

Статус измерения R

Семен Эйдельман

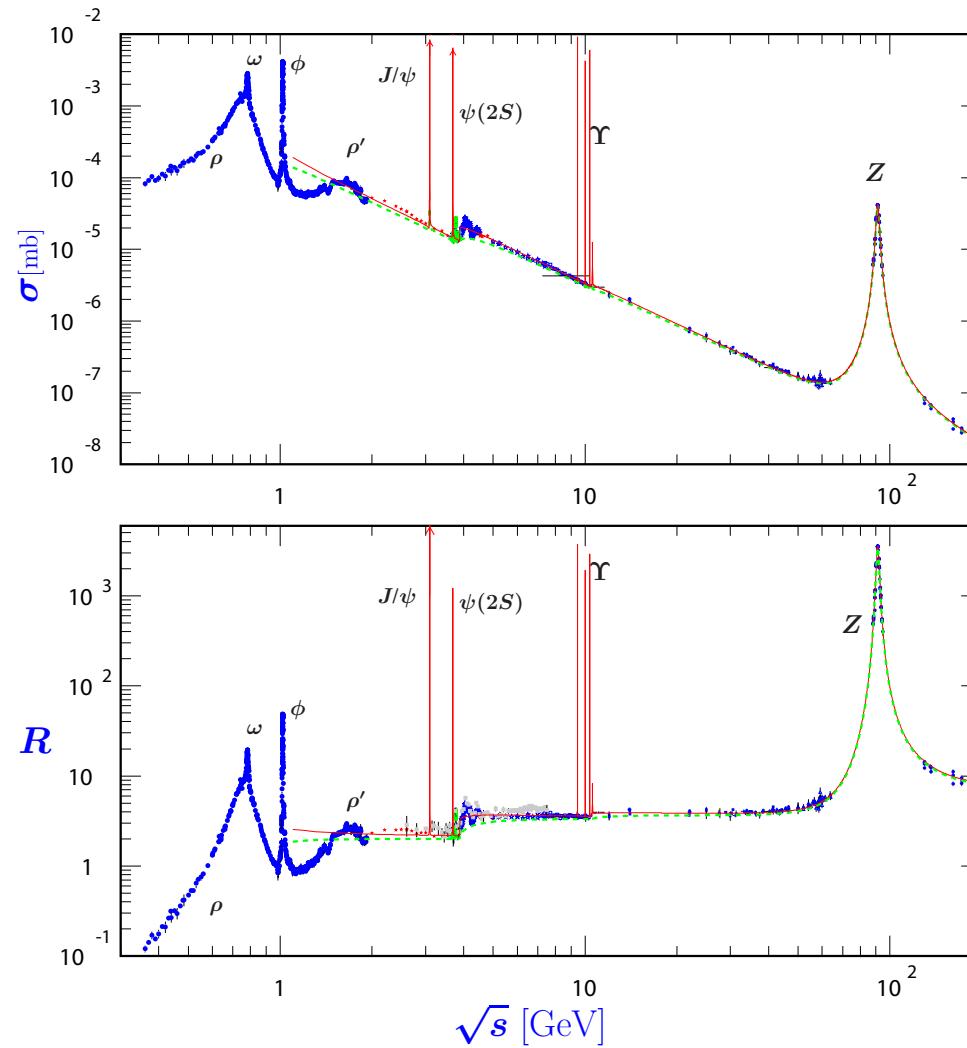
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
и НГУ, Новосибирск, РФ,
и ФИАН им.П.Н. Лебедева, Москва, РФ

ПЛАН

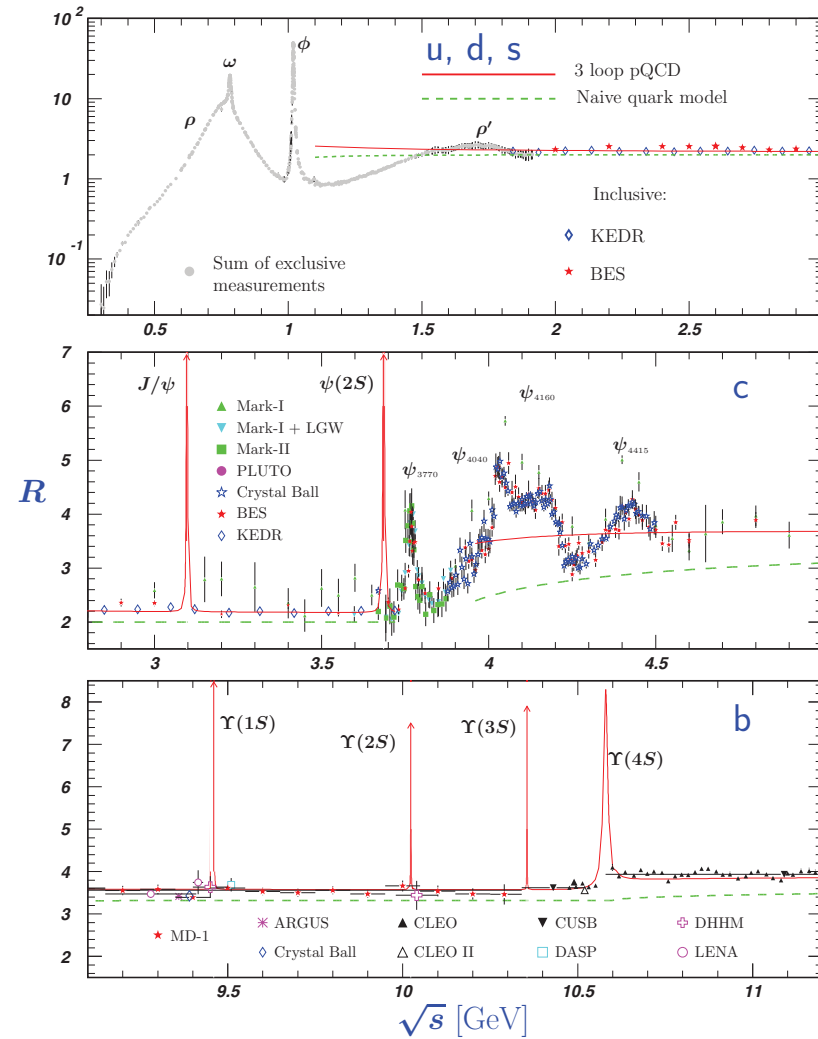
1. Теория
2. Статус измерений при $\sqrt{s} < 5$ ГэВ
3. Статус измерений при $\sqrt{s} > 5$ ГэВ
4. Что в будущем?

Введение

- $R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrons)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$
- В кварковой модели $R = \sum e_q^2$
- В КХД возникают поправки, меняющие R_0 на 10 – 20%
- Среди применений - $g - 2$, NVP, тонкая структура мюония
- Правила сумм КХД - непертурбативные эффекты,
из которых получают массы кварков, кварковые и глюонные конденсаты

Картина R 1

Картина R 2



Теория – I

Для $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ при $\sqrt{s} \gg 2m_f$, f – точечный фермион,

$$\sigma = \frac{4\pi\alpha^2 \sum e_q^2}{s} = \frac{4\pi\alpha^2 N_c \sum e_q^2}{3s}, \quad \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum e_q^2,$$

$$R_0(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3 \sum e_q^2.$$

При $\sqrt{s} > 1.02$ ГэВ (u, d, s), $R \simeq 3((2/3)^2 + (1/3)^2 + (1/3)^2) = 2$

При $\sqrt{s} > 3.77$ ГэВ (u, d, s, c), $R \simeq 10/3$

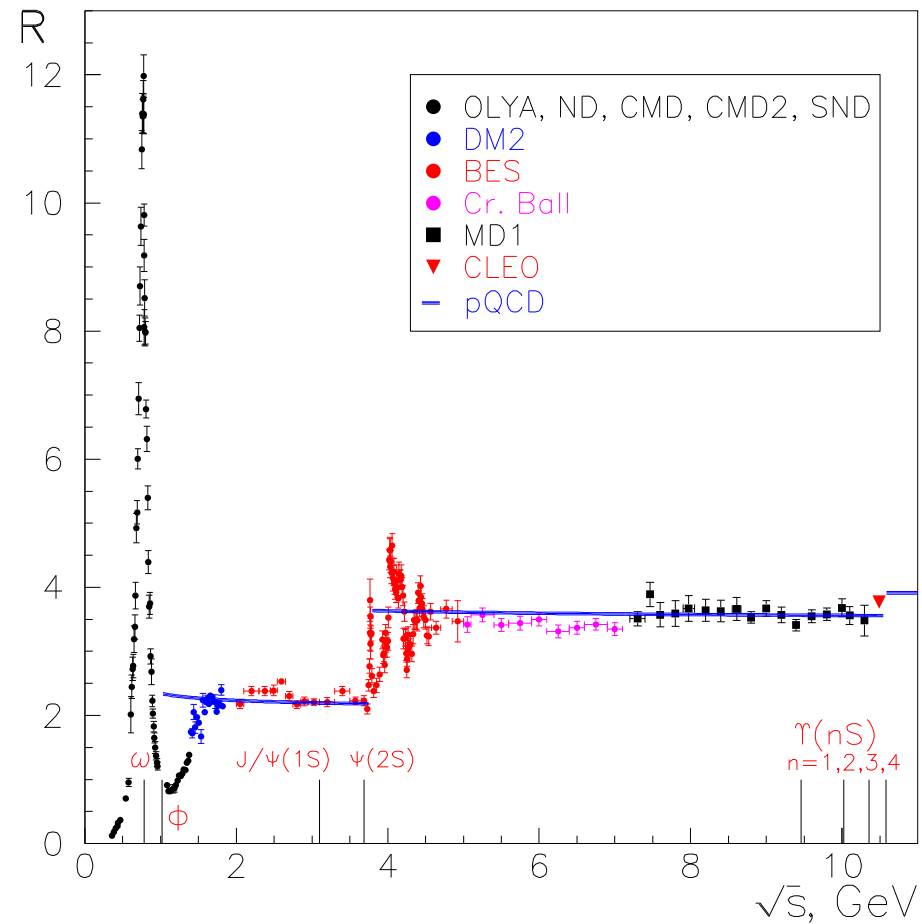
При $\sqrt{s} > 10.58$ ГэВ (u, d, s, c, b), $R \simeq 11/3$

$$R(s) = R_0(s) \left[1 + C_1 \frac{\alpha_s(s)}{\pi} + C_2 \left(\frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right)^3 + O(\alpha_s^4(s)) \right]. \quad (1)$$

При $n_f = 4$ $C_1 = 1$, $C_2 = 1.525$ и $C_3 = -11.686$.

L.R. Surguladze and M.A. Samuel, Phys. Rev. Lett. 66, 560 (1991);

S.G. Gorishny, A.L. Kataev, S.A. Larin, Phys. Lett. B 259, 144 (1991)

Картина R при $\sqrt{s} < 11$ ГэВ с птичьего полета

Теория – II

$$\alpha_s(s) = \frac{1}{b_0 t} \left(1 - \frac{b_1 l}{b_0^2 t} + \frac{b_1^2 (l^2 - l - 1) + b_0 b_2}{b_0^4 t^2} + \frac{b_1^3 (-2l^3 + 5l^2 + 4l - 1) - 6b_0 b_2 b_1 l + b_0^2 b_3}{2b_0^6 t^3} \right), \quad (2)$$

Здесь $t = \ln \frac{s}{\Lambda^2}$, $l = \ln t$,

Λ – шкала энергий КХД, а коэффициенты b_i определены как

$$b_0 = (33 - 2n_f)/(12\pi), \quad b_1 = (153 - 19n_f)/(24\pi^2),$$

$$b_2 = (2857 - 5033n_f/9 + 325n_f^2/27)/(128\pi^3).$$

K.G. Chetyrkin, B.A. Kniehl, M. Steinhauser, Nucl.Phys. B 510, 61 (1998)

Теория – III

$$R(Q) = R_{EW}(Q)(1 + \delta_{QCD}(Q)).$$

$$\text{При } Q \ll M_Z \quad R_{EW}(Q) = 3 \sum e_q^2.$$

$$\delta_{QCD}(Q) = \sum c_n \cdot \left(\frac{\alpha_s(Q^2)}{\pi} \right)^n + \mathcal{O}\left(\frac{\Lambda^4}{Q^4}\right).$$

$$c_1 = 1, \quad c_2 = 1.9857 - 0.1152n_f, \quad c_3 = -6.63694 - 1.20013n_f - 0.00518n_f^2 - 1.240\eta,$$

$$c_4 = -155.61 + 18.775n_f - 0.7974n_f^2 + 0.0215n_f^3 + (17.828 - 0.575n_f)\eta,$$

$$\eta = (\sum e_q)^2 / (3 \sum e_q^2).$$

n_f	η	c_2	c_3	c_4
3	0	1.6401	-10.2840	-105.8811
4	2/15	1.5249	-11.6857	-89.822

P.A. Baikov et al., Phys. Lett. B 714, 62 (2012)

Измерение R на BESII – I

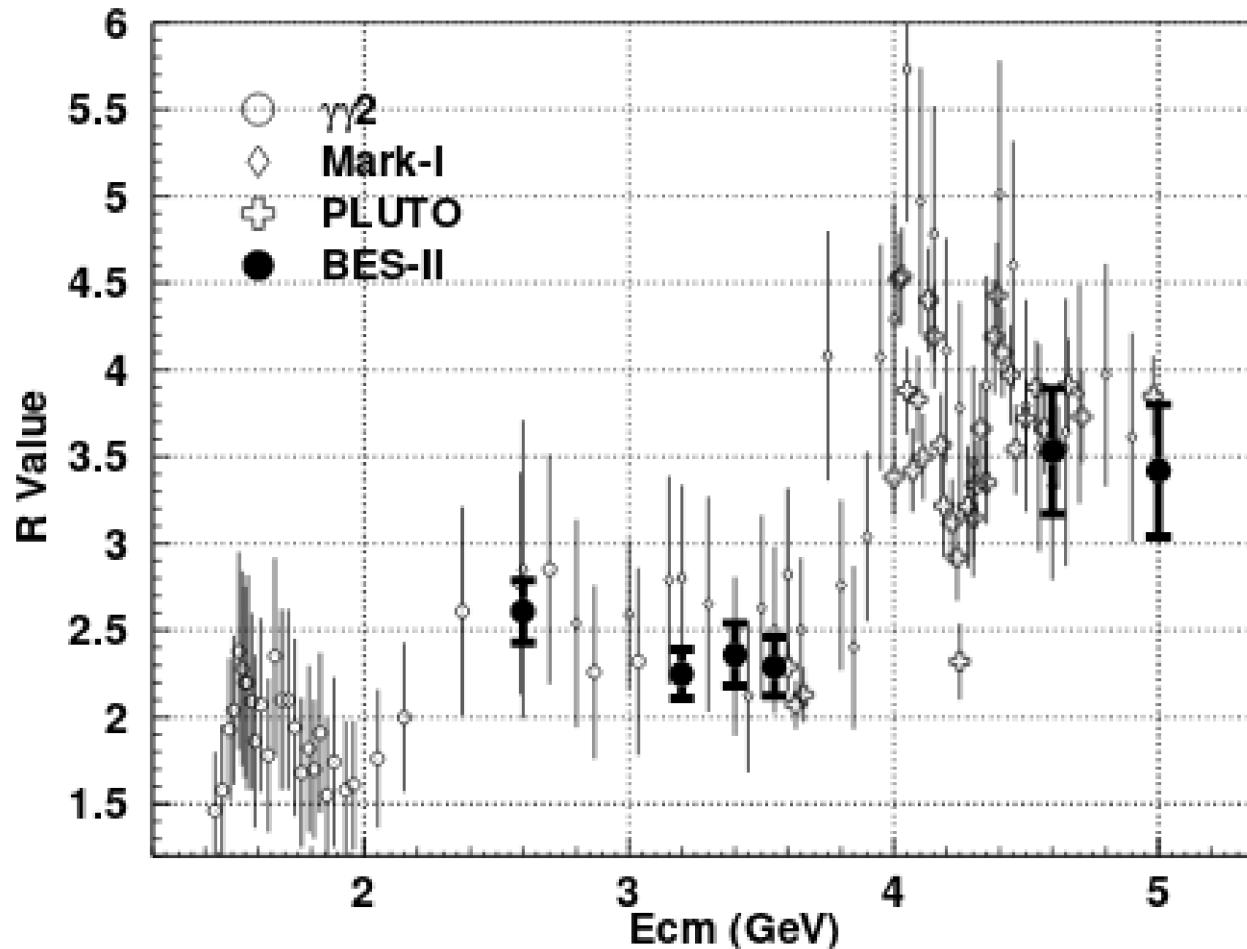
Заход	\sqrt{s} , ГэВ	N_{points}	$\int \mathcal{L} dt$, пб $^{-1}$	δ_{sys} , %
1	2.6-5.0	6	0.93	3.8-6.0
2	2.0-4.8	85	-	6.6 (3.3)

Наблюдается скачок R после порога рождения c -кварка

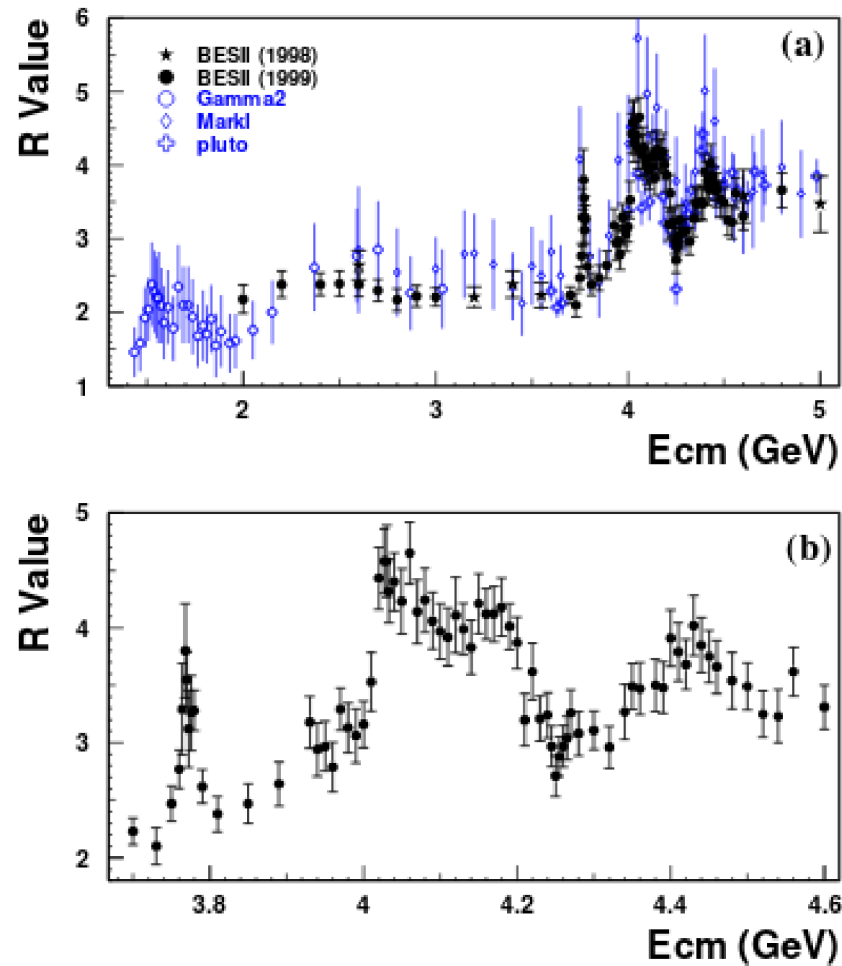
Переход к генератору LUARLW

J.Z. Bai et al., Phys.Rev.Lett. 84, 594 (2000)

J.Z. Bai et al., Phys.Rev.Lett. 88, 101802 (2002)

Измерение R на BESII – II

J.Z. Bai et al., Phys.Rev.Lett. 84, 594 (2000)

Измерение R на BESII – III

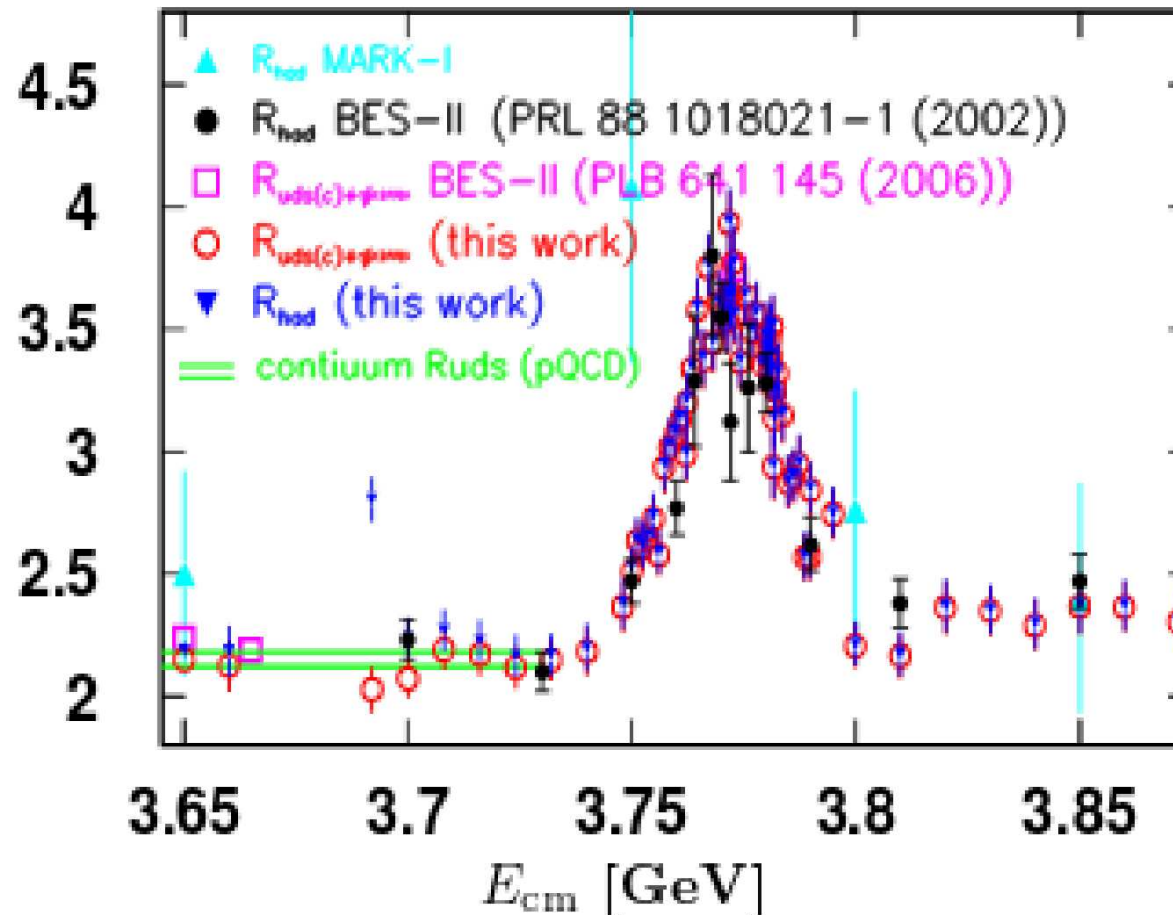
J.Z. Bai et al., Phys.Rev.Lett. 88, 101802 (2002)

Измерение R на BESIII – I

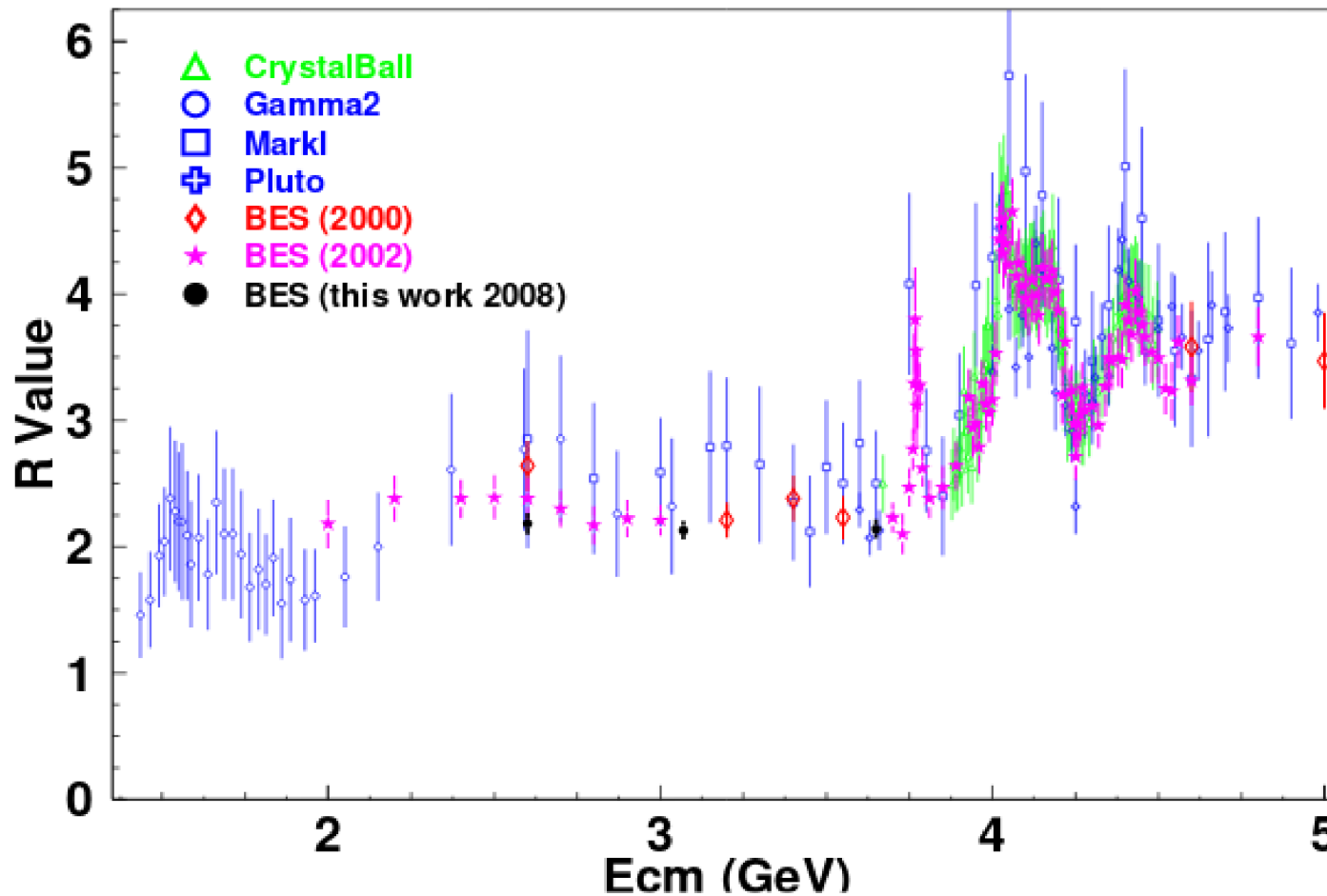
Заход	\sqrt{s} , ГэВ	N_{points}	$\int \mathcal{L} dt$, пб $^{-1}$	δ_{sys} , %
1	3.650-3.872	68	-	4.0 (4.9)
2	2.60-3.65	3	10.0	3.5

M. Ablikim et al., Phys.Rev.Lett. 97, 262001 (2006)

M. Ablikim et al., Phys.Lett. B 677, 239 (2009)

Измерение R на BESIII – II

M. Ablikim et al., Phys.Rev.Lett. 97, 262001 (2006)

Измерение R на BESIII – III

M. Ablikim et al., Phys.Lett. B 677, 239 (2009)

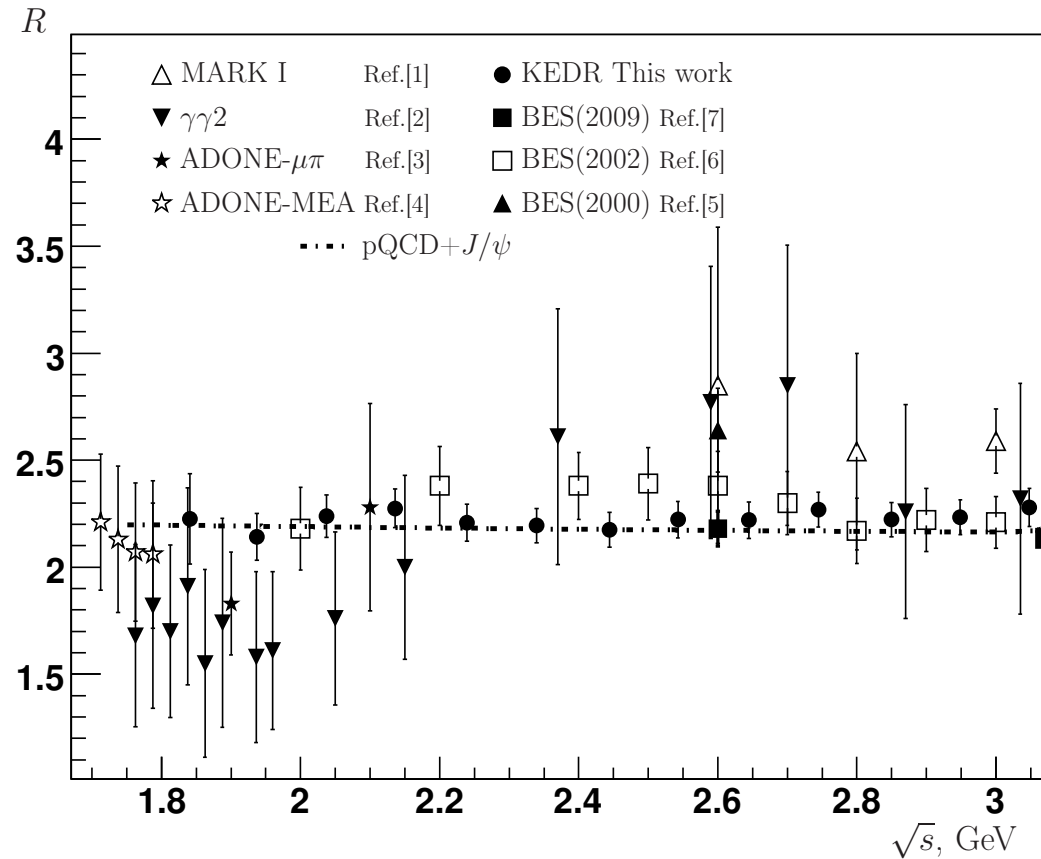
Измерение R на КЕДРe – I

\sqrt{s} , ГэВ	N_{points}	$\int \mathcal{L} dt$, пб $^{-1}$
1.84-3.05	13	0.66

Систематическая погрешность составляет (1.7-1.8)%

$$\bar{R}_{\text{exp}} = 2.225 \pm 0.020 \pm 0.047 \quad R_{\text{th}} = 2.18 \pm 0.02$$

V.V. Anashin, Phys.Lett. B 770, 174 (2017)

Измерение R на КЕДРe – II

V.V. Anashin, Phys.Lett. B 770, 174 (2017)

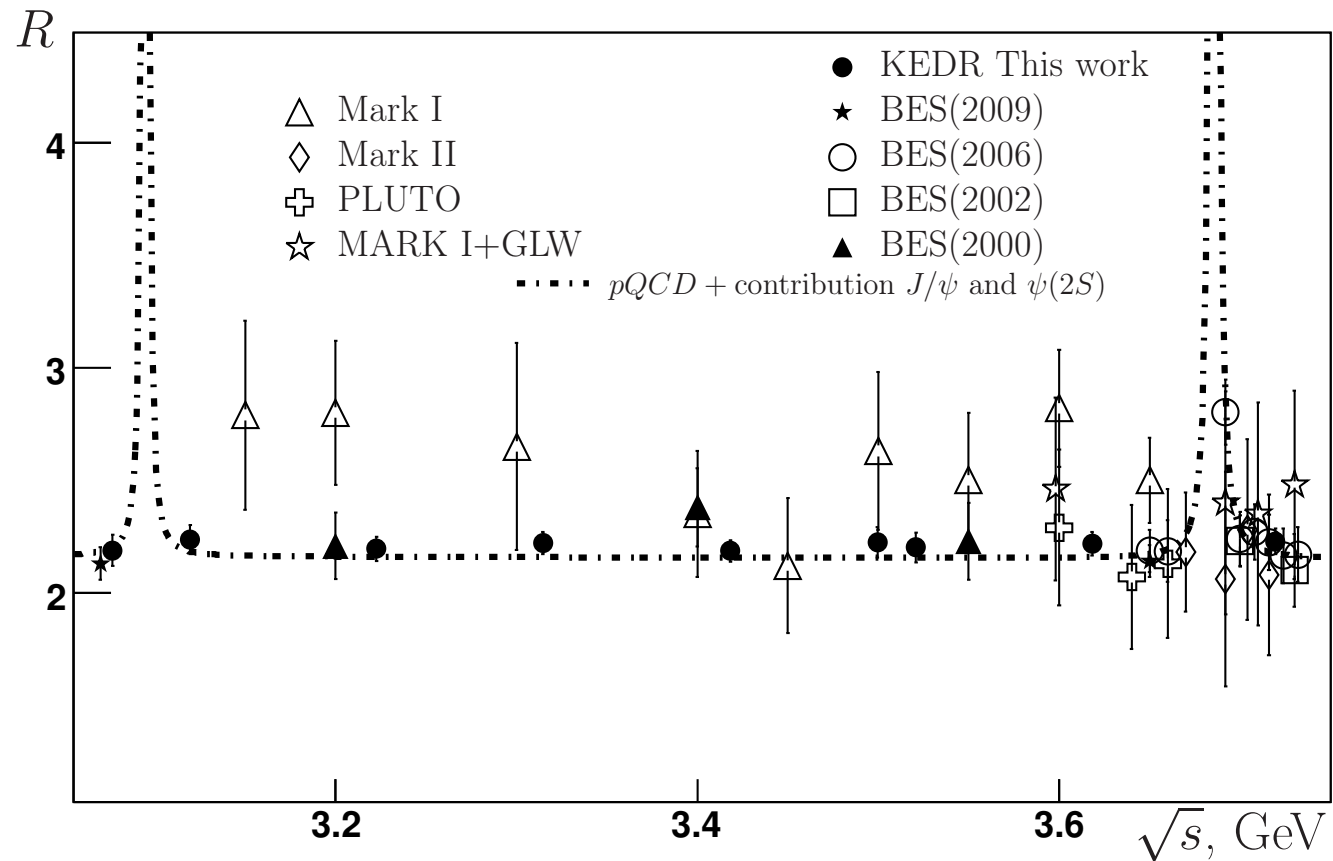
Измерение R на КЕДРе – III

\sqrt{s} , ГэВ	N_{points}	$\int \mathcal{L} dt$, пб $^{-1}$
3.08-3.72	9	1.3

$\bar{R} = 2.201 \pm 0.014 \pm 0.026$ на 1σ выше $R_{\text{th}} = 2.16 \pm 0.01$

$$\Lambda = 0.361_{-0.174}^{+0.155} \text{ ГэВ} \Rightarrow \alpha_s(m_\tau) = 0.332_{-0.092}^{+0.100}$$

V.V. Anashin, Phys.Lett. B 788, 42 (2019)

Измерение R на КЕДРe – IV

Новое измерение R на BESIII – I

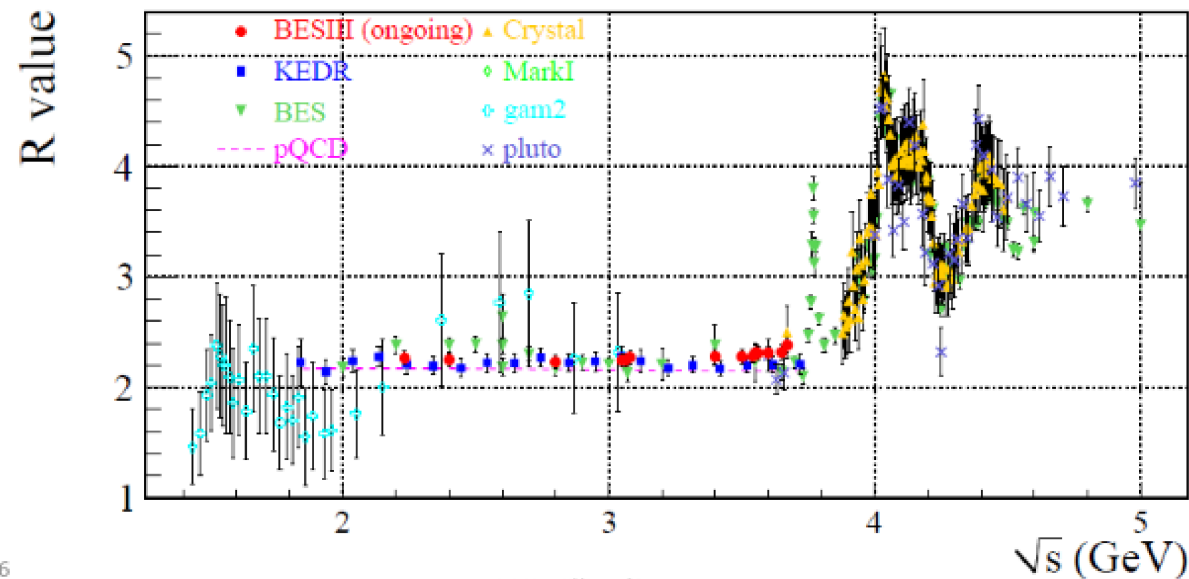
Заход	\sqrt{s} , ГэВ	N_{points}	$\int \mathcal{L} dt$, пб ⁻¹
1	2.23-3.4	4	12
2	2.0-3.08	22	650
3	3.8-4.6	104	800

G.S. Huang, Sept. 2019, IHEP

Новое измерение R на BESIII – II

R measurement at BESIII

- Analysis ongoing. Goal: 3% precision;
- Key issue: MC generator:
 - ✓ Inclusive (LUARLW)
 - ✓ known exclusives (ConExc) + inclusive (LUARLW)



G.S. Huang, Sept. 2019, IHEP

Измерение R на Crystal Ball – I

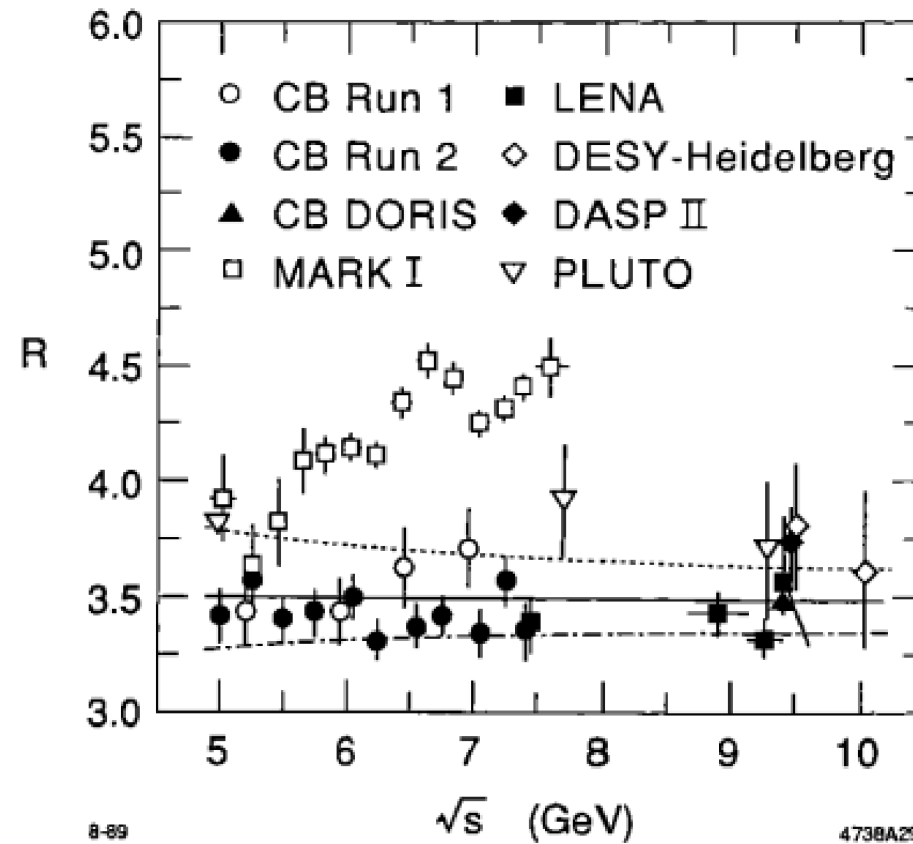
Заход	\sqrt{s} , ГэВ	N_{points}	$\int \mathcal{L} dt$, пб $^{-1}$
1	5.2-7.0	4	0.4
2	5.0-7.4	11	3.8

Общая систематическая неопределенность = 5.2%

$$\bar{R} = 3.44 \pm 0.03 \pm 0.18$$

$\alpha_s(6 \text{ GeV}) = 0.12 \pm 0.11$ во 2-ом порядке по α_s

C. Edwards et al., SLAC-PUB-5160 (1990)

Измерение R на Crystal Ball – II

C. Edwards et al., SLAC-PUB-5160 (1990)

Измерение R на MD-1 – I

\sqrt{s} , ГэВ	N_{points}	$\int \mathcal{L} dt$, пб $^{-1}$
7.25-10.34	31	16

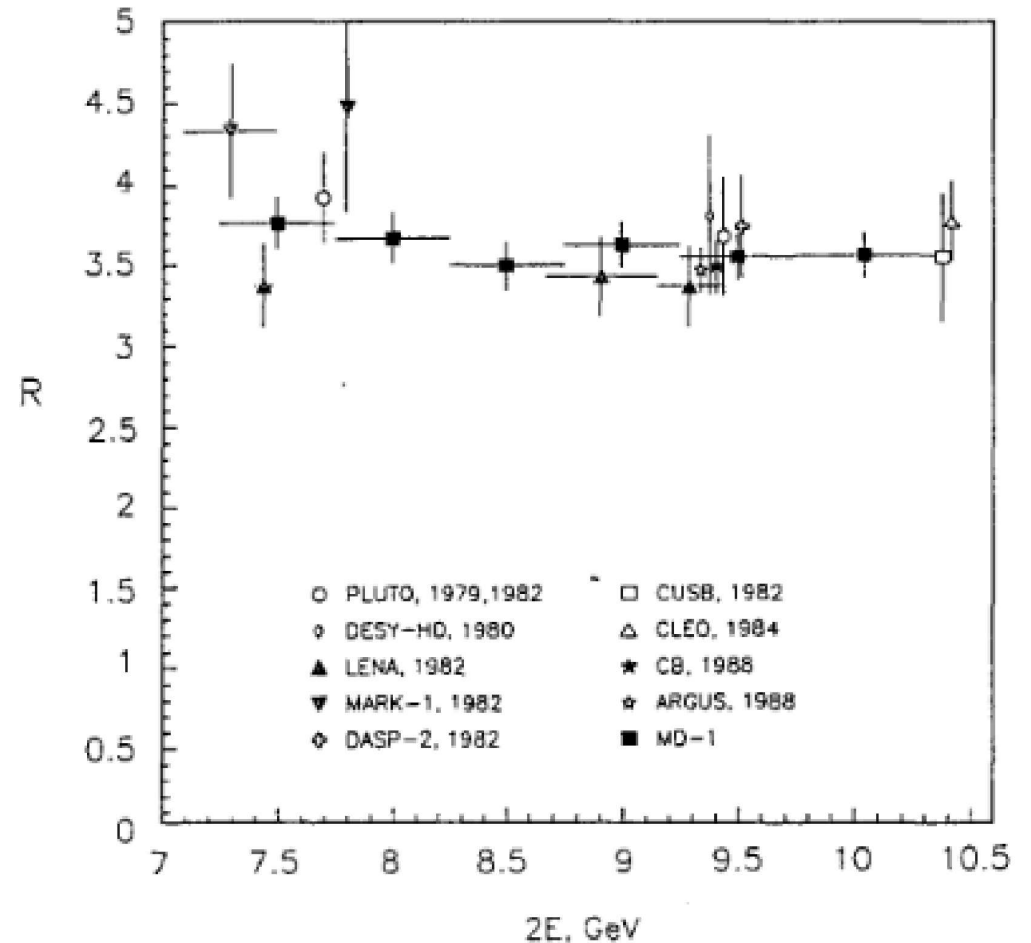
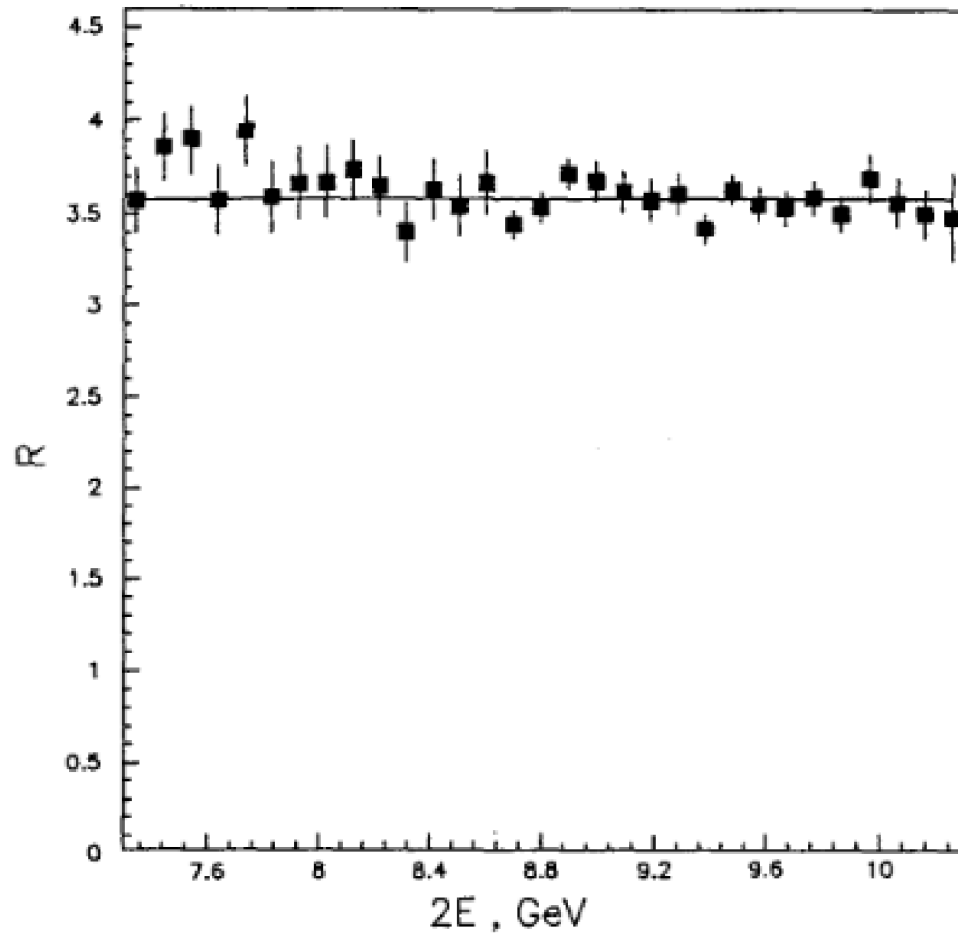
Систематическая погрешность составляет 3.9%

$$\bar{R}_{\text{MD-1}} = 3.578 \pm 0.021 \pm 0.140 \quad R_{\text{QCD}} = 3.602 \pm 0.014$$

Усреднение с использованием всех данных в этой области дает

$$\bar{R}_{\text{exp}} = 3.579 \pm 0.066 \quad \alpha_s(8.9\text{GeV}) = 0.174 \pm 0.039$$

А.Е. Blinov et al., Z. Phys. Rev. C 70, 31 (1996)

Измерение R на MD-1 – II

A.E. Blinov et al., Z. Phys. Rev. C 70, 31 (1996)

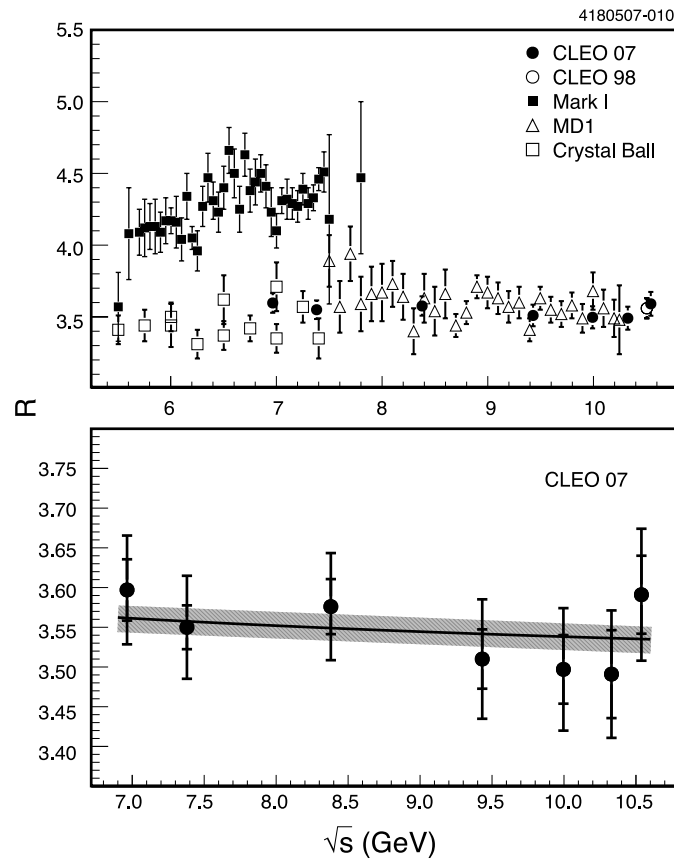
Измерение R на CLEO – I

\sqrt{s} , ГэВ	6.964	7.380	8.380
$\int \mathcal{L} dt$, пб ⁻¹	2.52	8.48	6.68
N_{ev} , 10 ³	14.5	42.2	26.7

Систематическая погрешность составляет (1.7-1.8)%

Систематическая погрешность составляет (1.7-1.8)%

D. Besson et al., Phys. Rev.D 76, 072008 (2007)

Измерение R на CLEO – II

D. Besson et al., Phys. Rev.D 76, 072008 (2007)

Что в будущем?

- Окончательные результаты BESIII от 2.0 до 4.9 ГэВ
- КЕДР провел новое сканирование в области $2E=4.69-6.98$ ГэВ в 17 точках с шагом 75 МэВ.
Интегральная светимость 13.7 пб^{-1} .
Начат анализ с целью достичь систематики $\sim 2\%$.
- BelleII - очень интересна $2E$ от 10.6 до 11.2-11.5 ГэВ, возможен набор данных при $2E < \Upsilon(4S)$ с большим интегралом