

# Эксперименты с детектором КЕДР на ВЭПП-4М

*Ю.А.Тихонов*

ИЯФ СО РАН им. Г.И.Будкера

Комплекс ВЭПП-4М

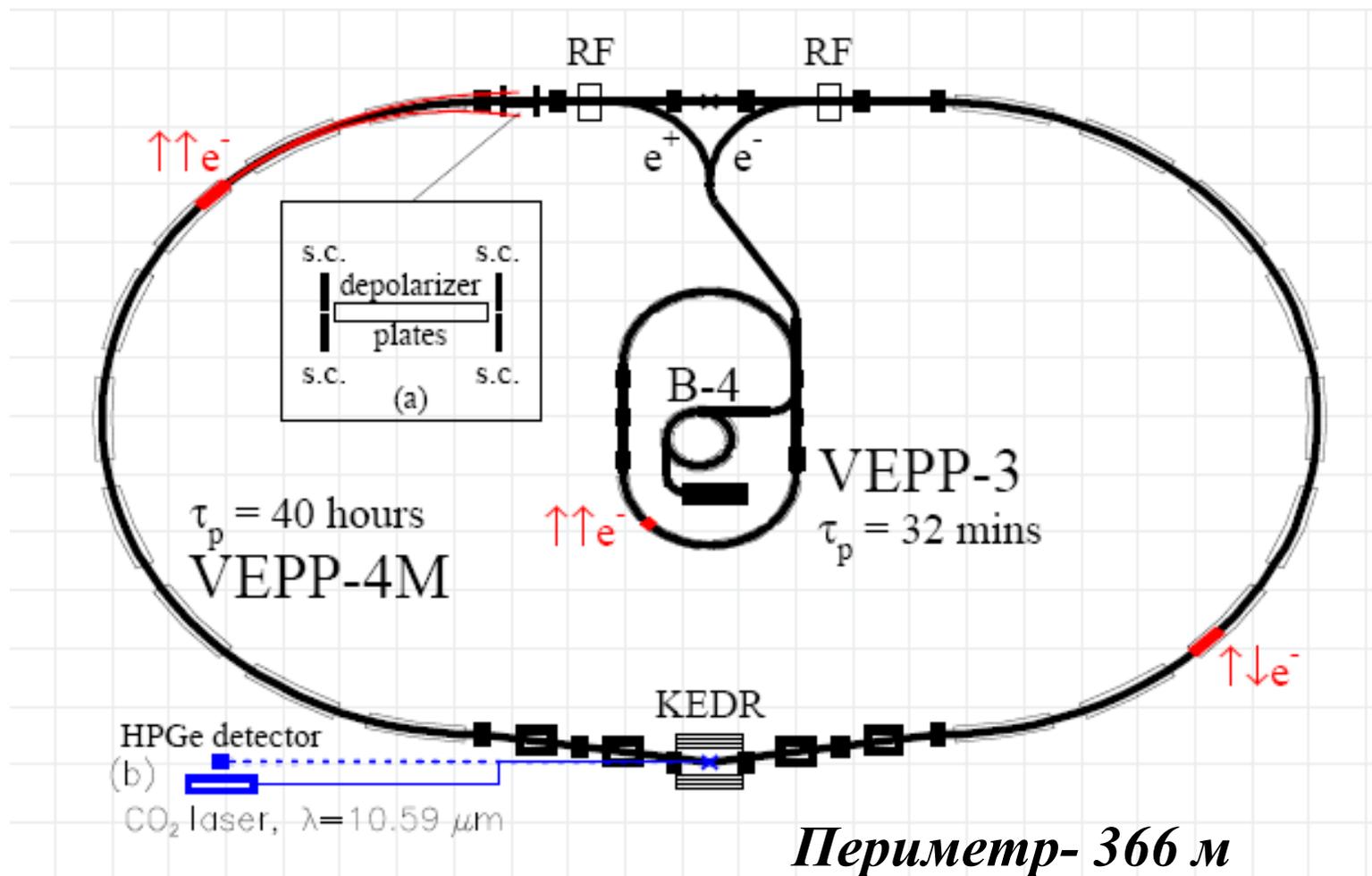
Детектор КЕДР

Физическая программа и результаты

Заключение

Протвино, 23.12.08

# Комплекс ВЭПП-4М



# Комплекс ВЭПП-4М

- Диапазон энергий:  $2E=2\div 11$  ГэВ

- Светимость:

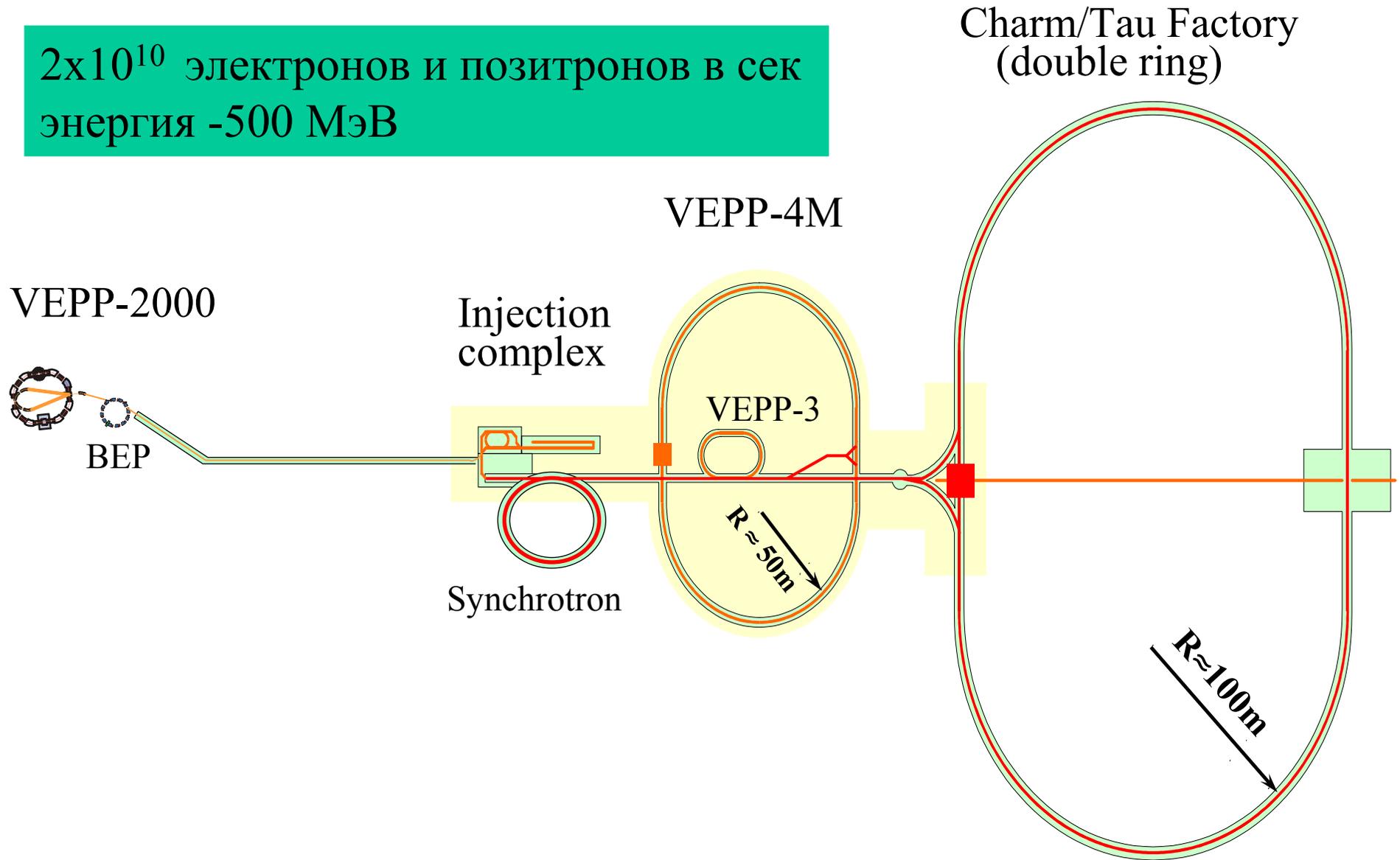
низкая энергия  $L=2\times 10^{30}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>

высокая энергия  $L=2\times 10^{31}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>

$L=8\times 10^{31}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> (с новым инжектором)

# СХЕМА КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

$2 \times 10^{10}$  электронов и позитронов в сек  
энергия -500 МэВ



# **ВЭПП-5 : 2x300 MeV линейный ускоритель и система производства позитронов**



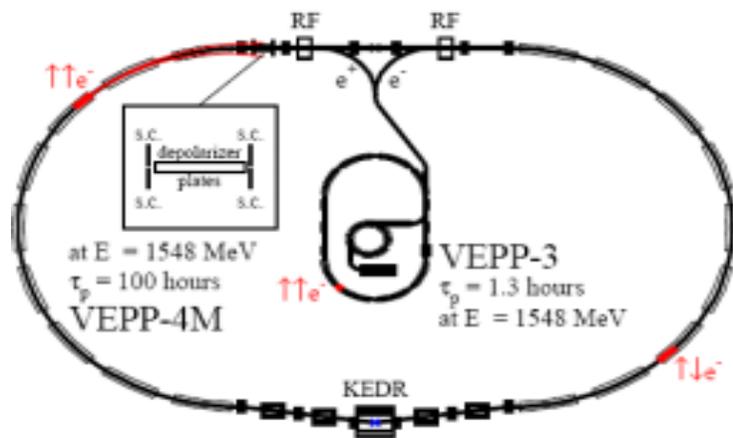
# Комплекс ВЭПП-4М и детектор КЕДР

□ ВЭПП-4М значительно уступает в светимости В-фабрикам

□ Наши преимущества:

- Большой диапазон энергий-  $2E=2\div 11$  ГэВ
- Уникальные технологии прецизионного измерения энергии пучков (радиационная деполяризация и обратное комптоновское рассеяние)
- Детектор КЕДР с калориметром на основе жидкого криптона с высоким энергетическим и пространственным разрешением
- Система измерения энергии рассеянных электронов и позитронов (для изучения двухфотонных процессов)

# Метод резонансной деполяризации на ВЭПП-4М



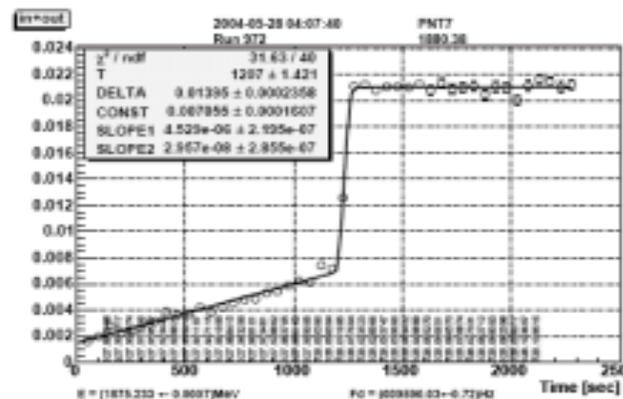
$$\Omega_{spin}/\omega_{rev} = 1 + \gamma \cdot \mu' / \mu_0$$

Touschek (intra-beam scattered) electron pairs are detected with 2×2 scintillation counters (s.c.)

$$\Omega_{spin} \pm \Omega_{dep} = n \cdot \omega_{rev}$$

Scattering rates from unpolarized ↓↓ and polarized ↑↑ beams are compared

$$\Delta = \frac{f_{pol} - f_{unpol}}{f_{pol}}$$

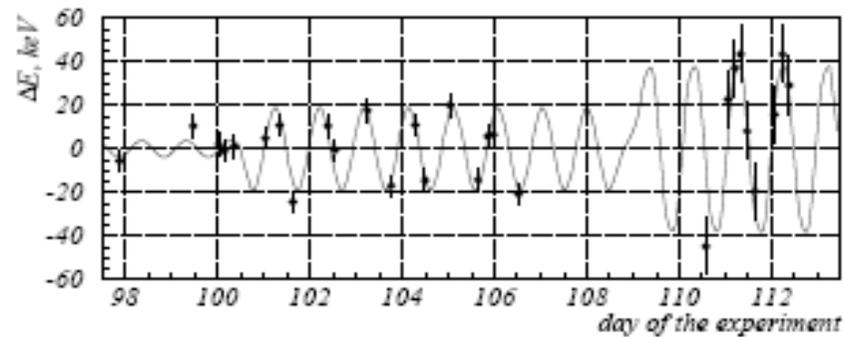


- Энергия частиц в ускорителе может быть определена по измеренному интегралу магнитного поля: точность  $\sim 10^{-3}$
- Метод резонансной деполяризации на ВЭПП-4М позволяет определить энергию с точностью  $5 \times 10^{-7}$  ! (в 20-50 раз лучше чем на ВЭПП-2М, ВЭПП-4 и др.)
- При сравнении частот прецессии электрона точность лучше  $10^{-8}$  (проверка СРТ)

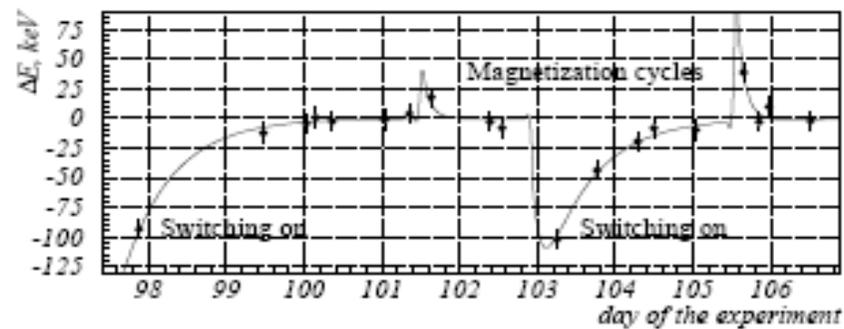
# Метод резонансной деполяризации на ВЭПП-4М

- Более 1500 измерений энергии пучка

## Периодические (апериодические учтены)

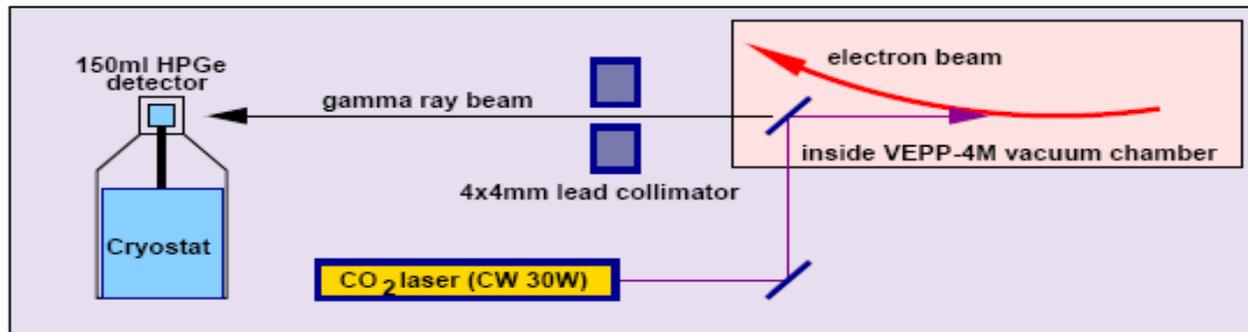


## Апериодические (периодические учтены)



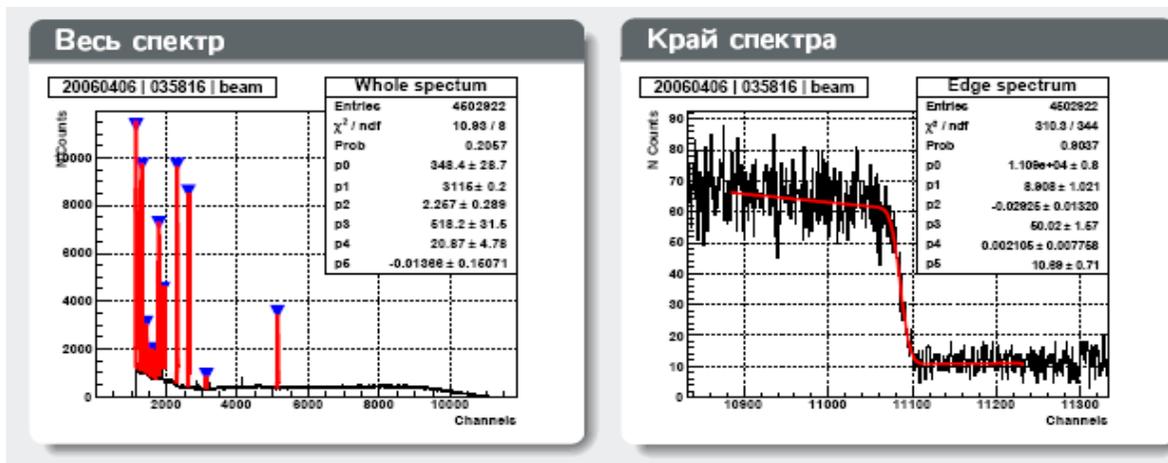
# Определение энергии по обратному комптоновскому рассеянию на ВЭПП-4М

- R. Klein et al., NIM A384 (1997) 293: BESSY-I, 800 MeV
- R. Klein et al., NIM A486 (2002) 545: BESSY-II, 1700 MeV



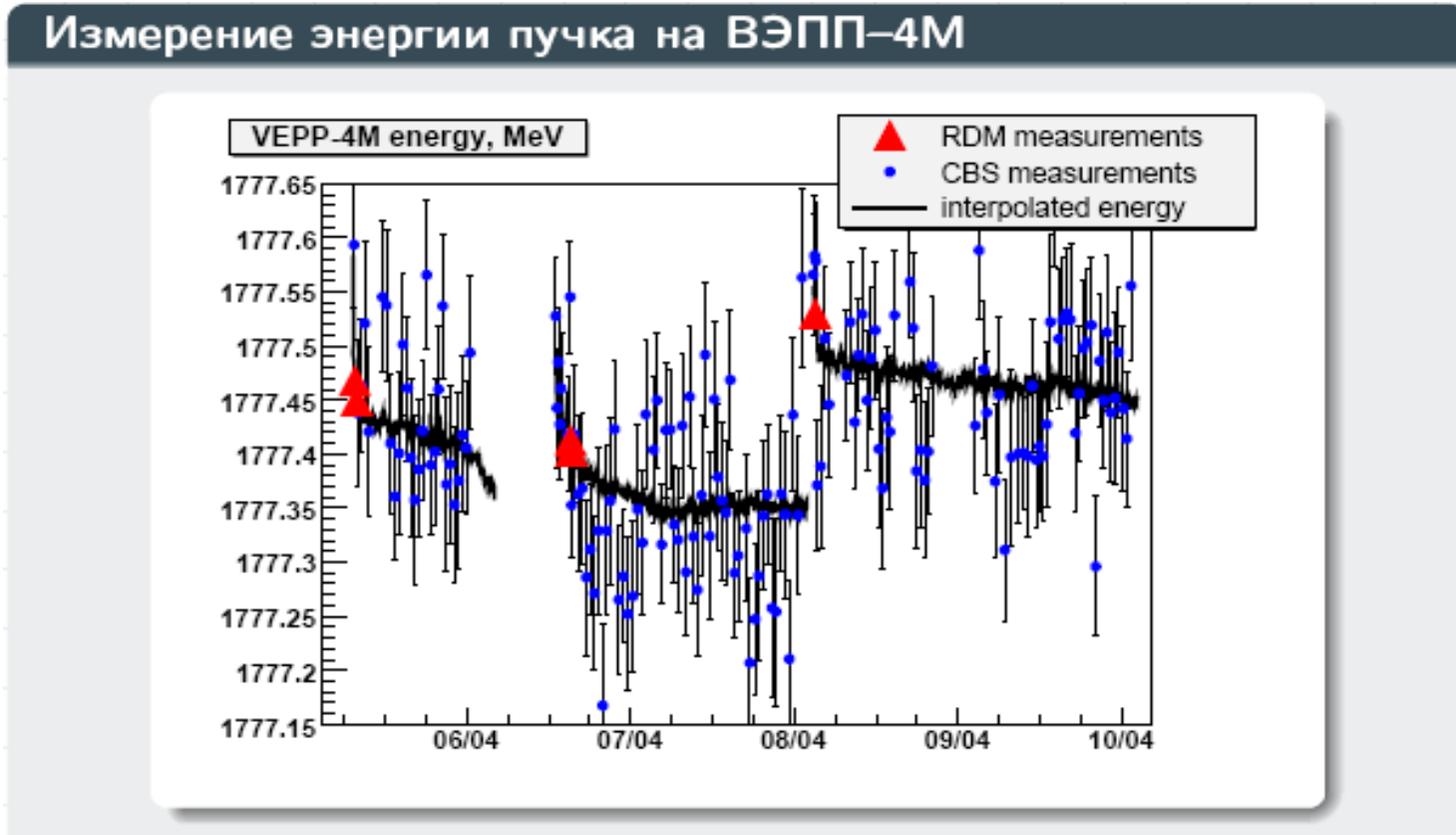
$$\omega'_{max} = \frac{E^2}{E + m^2/4\omega_{laser}}$$

- CO<sub>2</sub> – laser ( $\lambda = 10.591 \mu\text{m}$ ,  $\omega_{laser} = 0.12 \text{ eV}$ ,  $\omega'_{max} \simeq 6 \text{ MeV}$ )



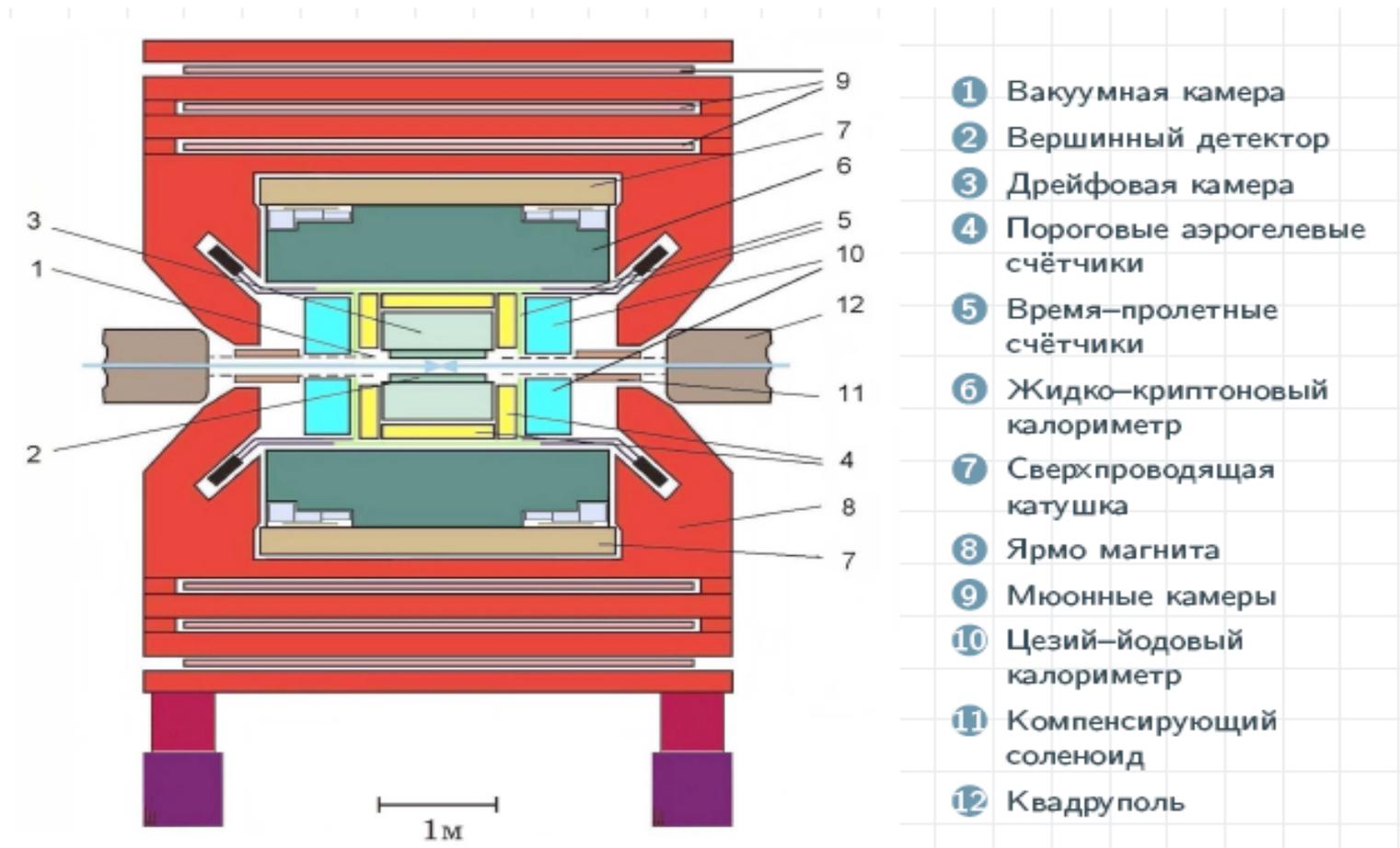
- Точность измерения энергии 50-70 кэВ во время эксперимента (оперативный метод)
- Определение энергетического разброса с точностью 5%.

# Определение энергии ВЭПП-4М



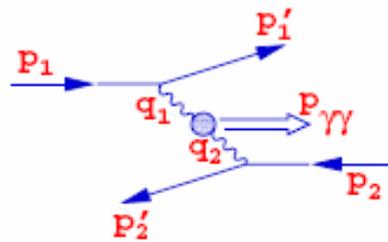
Точность определения энергии составляет 20-30 кэВ при периодическом использовании резонансной деполяризации

# Детектор КЕДР

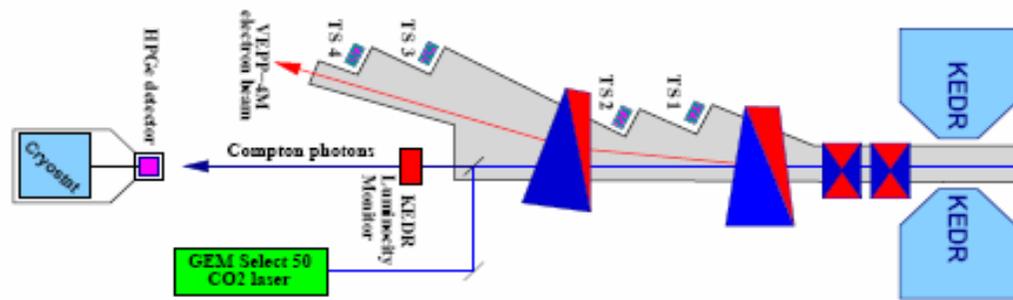


# Детектор КЕДР

## Двухфотонные процессы



## Система регистрации РЭ



- Разрешение по инвариантной массе  $2\gamma$ -состояния  $10^{-3}$

В настоящее время это единственный эксперимент в котором  
надежно будет измерено полное сечение  $\gamma\gamma \rightarrow$  адроны  
(доклад О.Белобородовой)

# Программа экспериментов с детектором КЕДР на ВЭПП-4М

## Физические задачи

- Измерение масс элементарных частиц  
Низкая энергия:  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi''$ ,  $D^0$ ,  $D^\pm$ -мезоны,  $\tau$ -лептон  
Высокая энергия:  $\Upsilon(1s)$ ,  $\Upsilon(2s)$ ,  $\Upsilon(3s)$ ,  $\Upsilon(4s)$  – мезоны
- Измерение  $R$  в области  $2E = 2 \div 11$  ГэВ
- Измерение сечения  $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ ,  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  и  $2\gamma$ -процессы
- Вероятности радиационных переходов в  $c\bar{c}$  и  $b\bar{b}$  – системах
- Измерение бранчингов распадов  $c\bar{c}$  и  $b\bar{b}$  – состояний с вероятностями  $10^{-4}$  и более (десятки распадов на статистике  $10^7$   $c\bar{c}$ )
- Независимое измерение в спорных ситуациях

# Эксперименты с детектором КЕДР

## Вероятность распада $\psi'' \rightarrow \text{non} - D\bar{D}$ (2006)

- BES-II

$$Br(\psi'' \rightarrow D\bar{D}) = (83.9 \pm 1.6 \pm 5.7) \%$$

$$Br(\psi'' \rightarrow \text{non} - D\bar{D}) = (16.1 \pm 1.6 \pm 5.7) \% (2.7\sigma)$$

- BES-II

$$Br(\psi'' \rightarrow D\bar{D}) = (83.9 \pm 7.3 \pm 4.2) \%$$

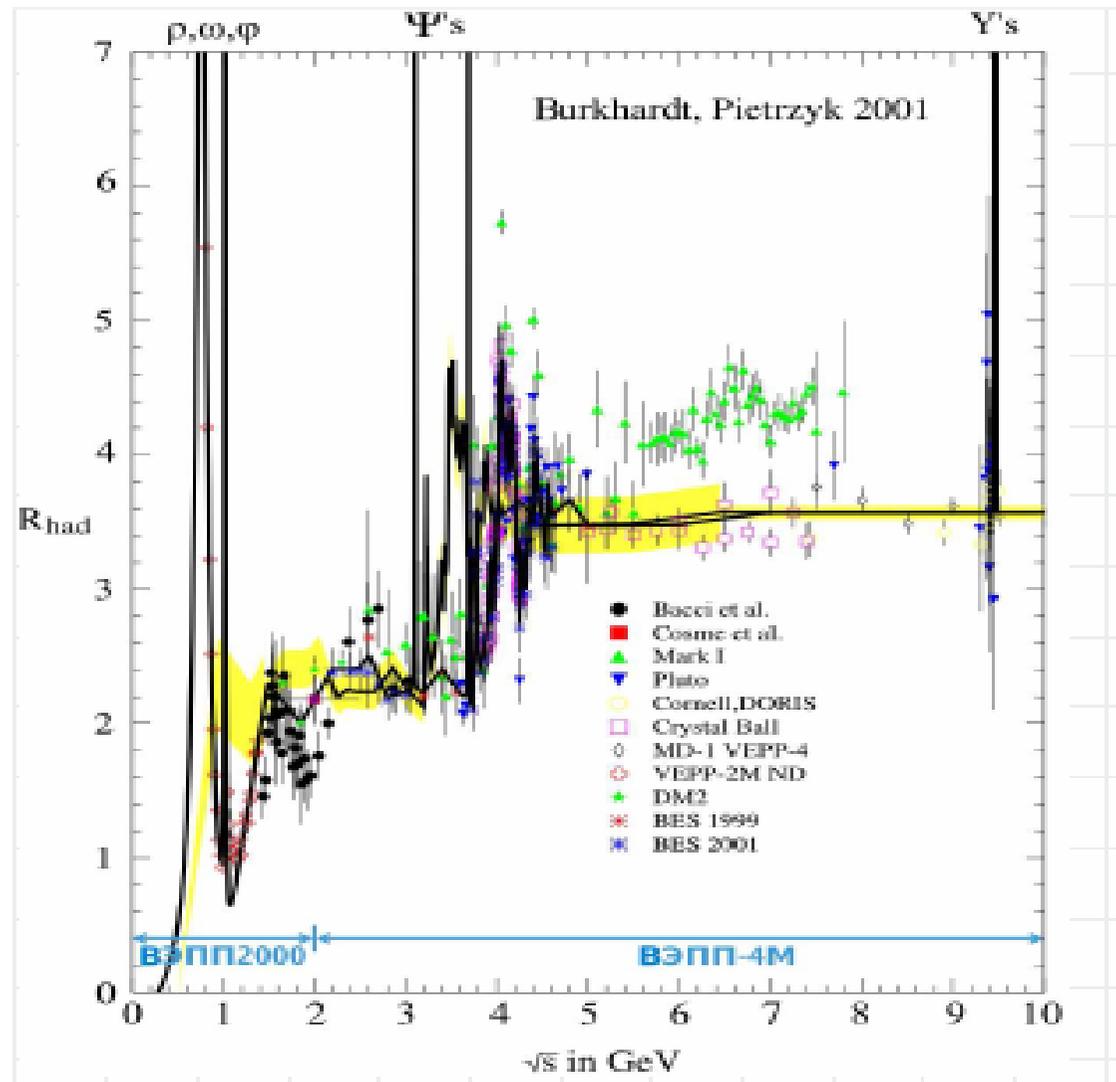
$$Br(\psi'' \rightarrow \text{non} - D\bar{D}) = (16.1 \pm 7.3 \pm 4.2) \% (1.9\sigma)$$

- CLEO-c

$$Br(\psi'' \rightarrow D\bar{D}) = (100_{-6.8}^{+0}) \%$$

⇒ Измерение КЕДР крайне важно и мы планируем его провести

# Эксперименты с детектором КЕДР на ВЭПП-4М



Область энергий  $2E=2-11$  ГэВ очень интересна!

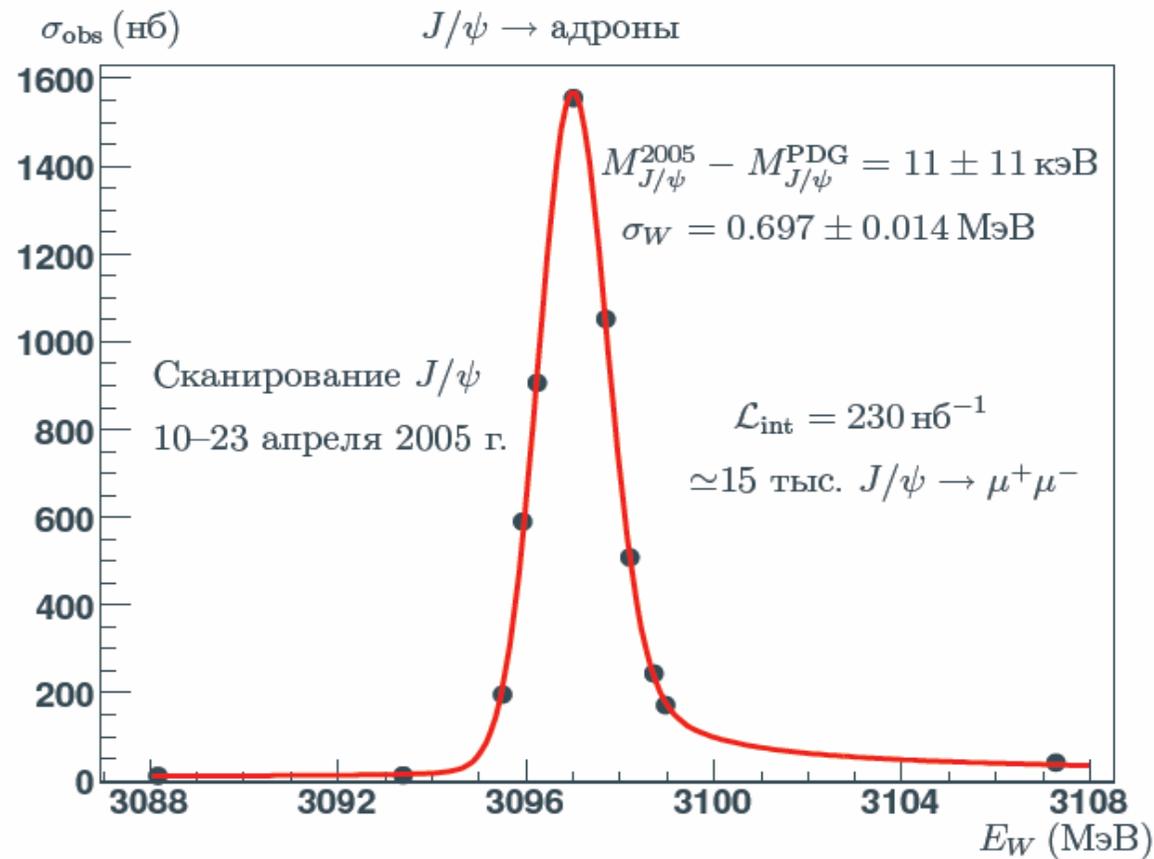
# Прецизионные измерения масс частиц

## Зачем измерять массы элементарных частиц ?

- Масса – один из основных параметров элементарной частицы
- Вопрос метрологии ( $J/\psi$ ,  $\psi'$ ). Результаты использованы для измерения масс:  $\chi_{c0,1,2}$ ,  $\eta_c$ ,  $\eta'_c$ ,  $\tau$ ,  $D^0$  (15 ссылок) (точность теоретических расчетов  $\simeq 3 \div 5\%$ )
- Природа  $X(3872)$  ( $D^0$ ,  $D^\pm$ )  
 $\Rightarrow$  необходимо повышение точности до 0.1 МэВ
- Проверка принципа лептонной универсальности Стандартной Модели. Формула Koide ( $\tau$ -лептон)

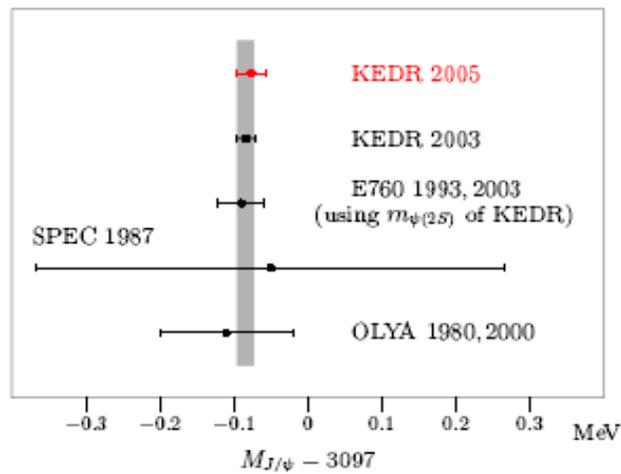
# Прецизионные измерения масс частиц на встречных пучках

## Процедура определения массы

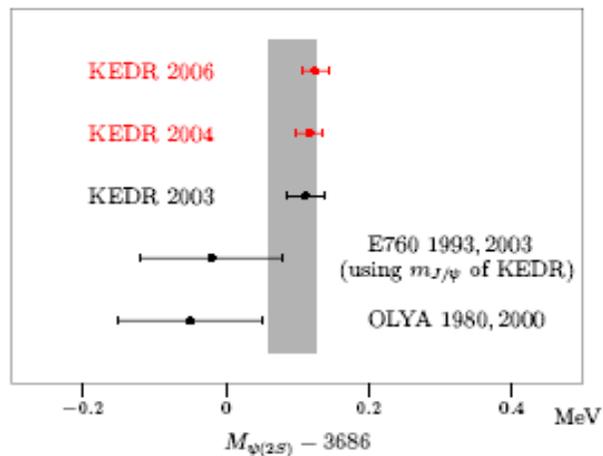


Параметры:  $M_{\text{рез}}$ ,  $\sigma_W$ -энергетический разброс пучков, фон

# Прецизионное измерение масс $J/\psi$ , $\psi'$



$$J/\psi: (3096.917 \pm 0.010 \pm 0.007) \text{ МэВ}, (4 \times 10^{-6})$$

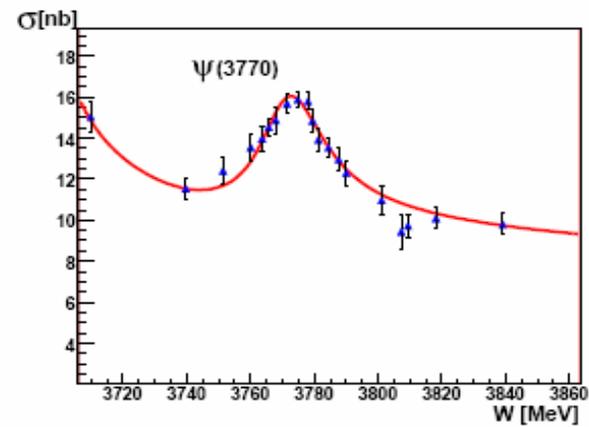
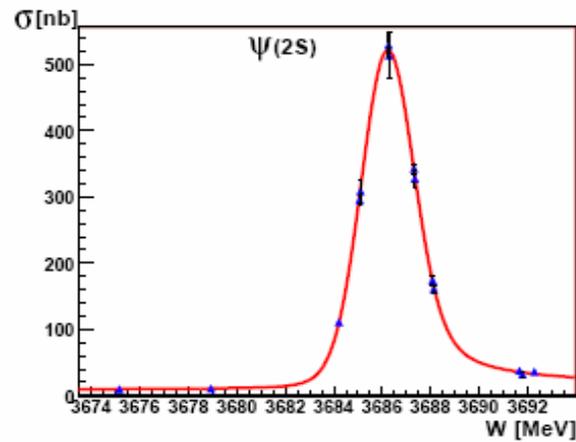


$$\psi': (3686.120 \pm 0.004 \pm 0.008) \text{ МэВ}, (2 \times 10^{-6})$$

Мезон с наиболее точно измеренной массой!

$$e, \mu, p, n: (\sim 10^{-7})$$

# Измерение массы $\psi''$



$$M_{\psi(3770)} = 3772.9 \pm 0.6 \pm 0.8 \text{ MeV}$$

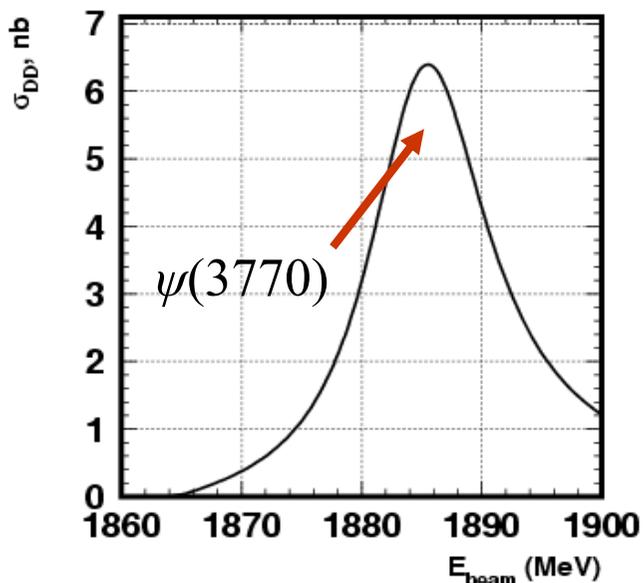
(preliminary)

$$\int \mathcal{L} dt \simeq 2.4 \text{ pb}^{-1} \text{ in two scans}$$

PDG:  $\pm 1.1 \text{ MeV}$

(Доклад К.Тодышева)

# Измерения масс D-мезонов



Сечение  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$

Рождение вблизи порога,  $p_D = 260 \text{ МэВ}/c \Rightarrow$

$$\sigma^2(M_D) = \sigma_W^2 / 4 + \left( \frac{p_D}{M_D} \right)^2 \sigma_{p_D}^2 = \sigma_W^2 / 4 + 0.02 \sigma_{p_D}^2 \approx 7 \text{ МэВ}/c^2$$

Вклад импульсного разрешения сильно уменьшается

Используется процесс  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$ ,  
максимум сечения при  $E \sim M(\psi(3770))$

Один из D-мезонов реконструируется:

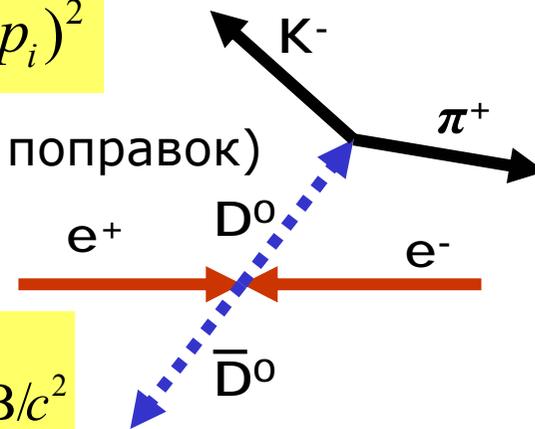
$$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \quad Br = 3.8 \pm 0.1\%$$

$$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \quad Br = 9.2 \pm 0.6\%$$

Масса D определяется как

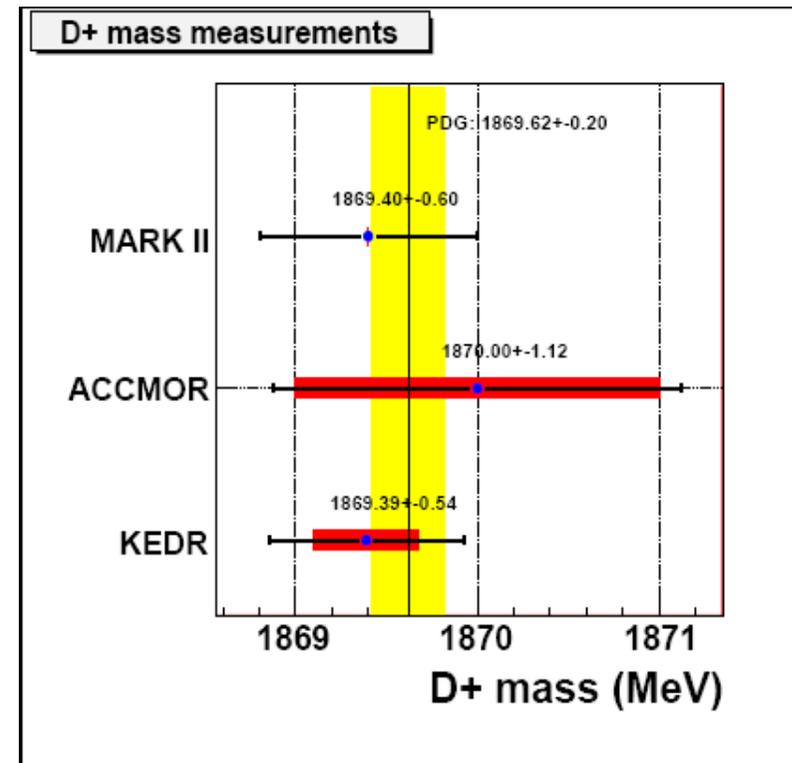
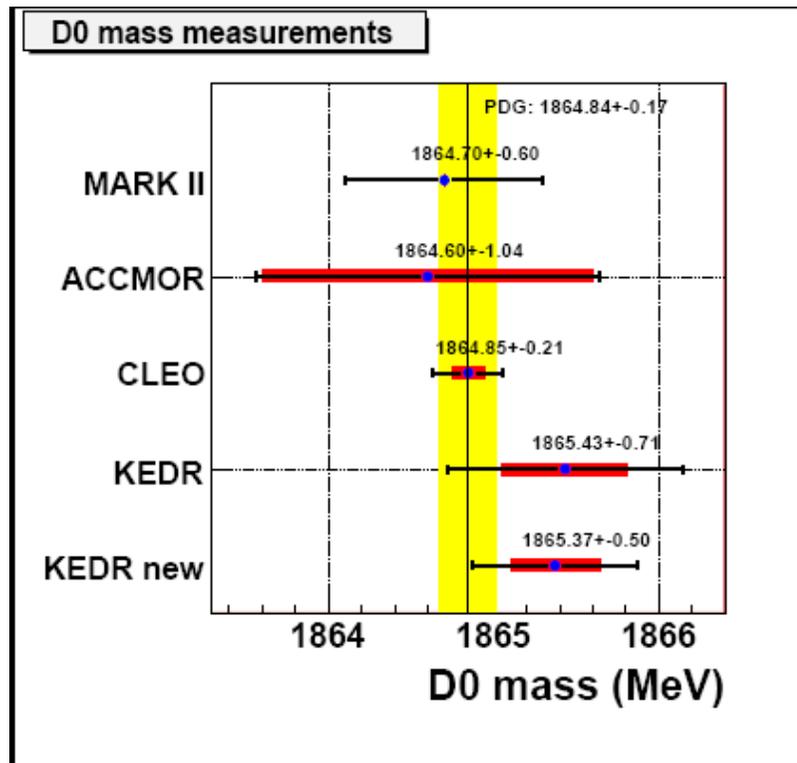
$$M_D = \sqrt{E_{beam}^2 - (\sum p_i)^2}$$

(с точностью до рад. поправок)



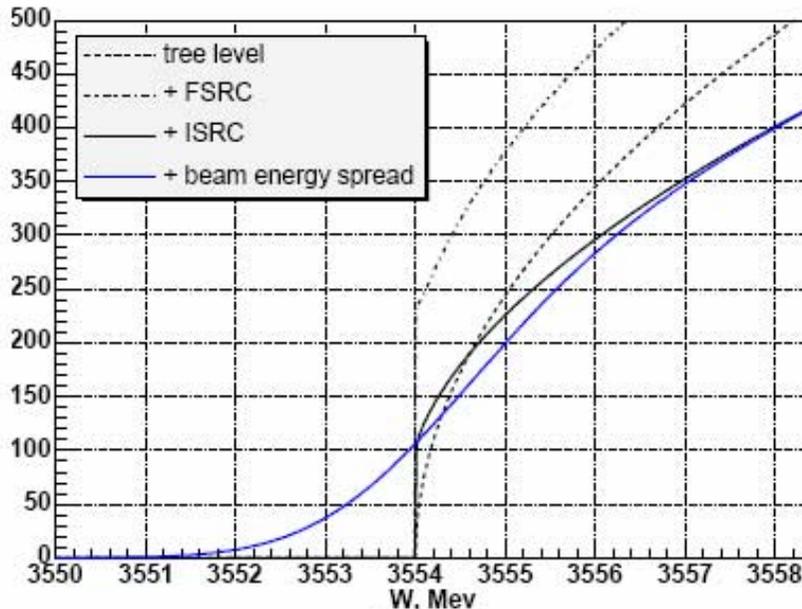
**(Доклад А.Полуэктова)**

# Результаты измерения масс D-мезонов



Для  $D^+$  мезона результат КЕДРа лучший по точности

# Измерение массы $\tau$ -лептона



Narrow region  $|E_{beam} - m_\tau| \sim \sigma_E$   
is most sensitive to the mass value

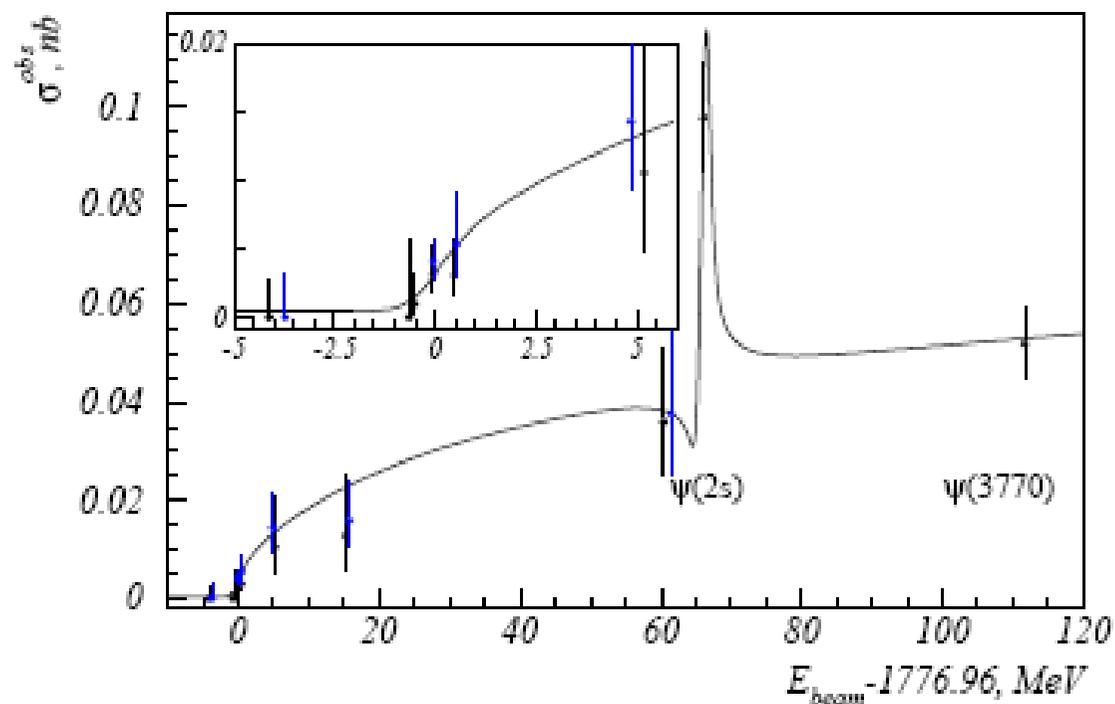


High requirements on  $E_{beam}, \sigma_E$   
accuracy and stability

- Luminosity distribution :
  - $\approx 10\%$  below the threshold (*background*)
  - $\approx 60\% \pm 0.5$  MeV around the threshold (*mass*)
  - $\approx 30\%$  well above the threshold (*detection efficiency*)
- Threshold search:  $E_{beam} = m_\tau - 0.5, m_\tau, m_\tau + 0.5, m_\tau + 1$  or  $m_\tau - 1$  MeV

# Результаты измерения массы $\tau$ -лептона

- $14.3 \text{ pb}^{-1}$ , 26 events at the threshold
- 5-parameter data fit: the detection efficiency for two scans,  $\epsilon = 2.07 \pm 0.25 \%$ ,  $\epsilon' = 1.49 \pm 0.25 \%$ ,  $\sigma_B = 0^{+0.32} \text{ pb}$



$$M_{\tau}^{\text{KEDR}} = 1776.69_{-0.19}^{+0.17} \pm 0.15 \text{ MeV (preliminary)}$$

*PDG2006*

$$M_{\tau} = 1776.99_{-0.26}^{+0.29} \text{ MeV}$$

# Результаты измерения массы $\tau$ -лептона

## *Систематические ошибки*

- **Conservative estimates**

---

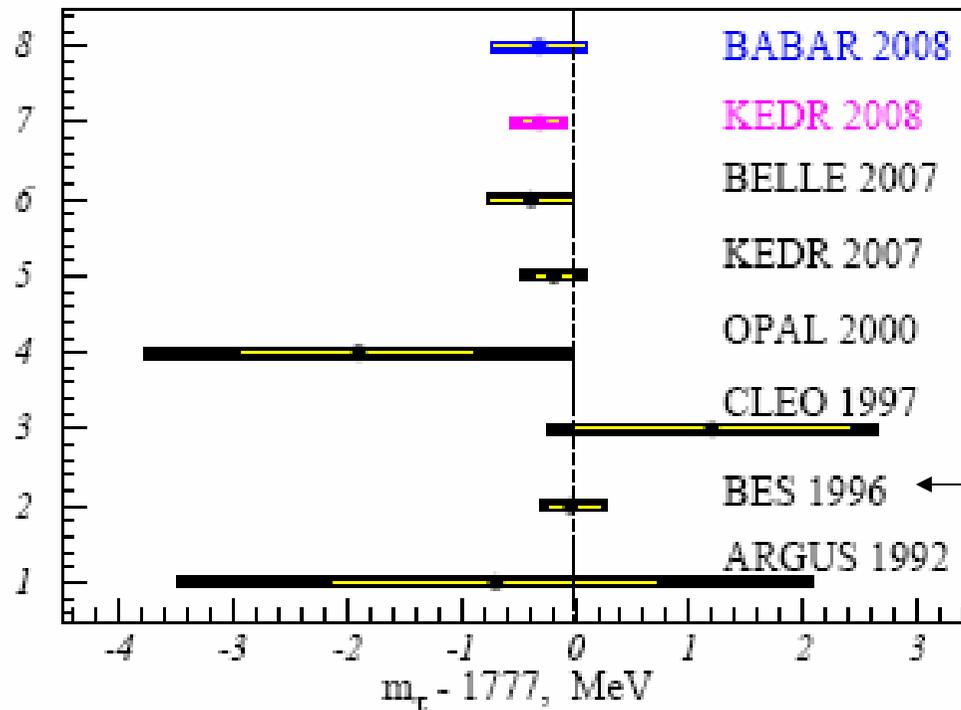
---

Beam energy determination	: 35 keV
Detection efficiency variations	: 120 keV
Energy spread determination accuracy	: 20 keV
Background dependence on the beam energy	: 20 keV
Luminosity measurement instability	: 80 keV
Beam energy spread variation	: 10 keV
Cross section calculation (r.c., $\psi(2S)$ interference)	: 30 keV
<i>Sum in quadrature</i>	<i>: 150 keV</i>

---

---

# Измерения массы $\tau$ -лептона



*Используется  
масса  $J/\psi$   
с ВЭПП-4*

Total (black) and systematic (yellow) errors are shown

**Результат КЕДРа лучший по точности**

# Прогресс в проверке лептонной универсальности

Точность проверки $\mu - \tau$ – универсальности				
$\frac{G_F^2(\tau)}{G_F^2(\mu)}$	$t_\tau$ , fs	$B_{\tau \rightarrow \nu_\tau e \bar{\nu}_e}$ , %	$m_\tau$ , МэВ	Примечание
0.9405	$305.6 \pm 6.0$ $\pm 0.0185$	$17.93 \pm 0.26$ $\pm 0.0136$	$1784.1^{+2.7}_{-3.6}$ $+0.0095$ $-0.0071$	PDG 1992 -2.4 $\sigma$
0.9609	$295.7 \pm 3.2$ $\pm 0.0104$	$17.76 \pm 0.15$ $\pm 0.0081$	$1784.1^{+2.7}_{-3.6}$ $+0.0097$ $-0.0073$	W.A., Октябрь 1992 -2.4 $\sigma$
0.9800	$\pm 0.0106$	$\pm 0.0083$	$1777.1 \pm 0.5$ $\pm 0.0012$	BES (предварительно) -1.5 $\sigma$
0.9999	$291.0 \pm 1.5$ $\pm 0.0052$	$17.83 \pm 0.08$ $\pm 0.0045$	$1777.0^{+0.30}_{-0.27}$ $\pm 0.0008$	PDG 1996 -0.01 $\sigma$
1.0020	$290.6 \pm 1.1$ $\pm 0.0038$	$17.84 \pm 0.06$ $\pm 0.0034$	$1776.99^{+0.29}_{-0.26}$ $\pm 0.0008$	PDG 2002, 2004 +0.4 $\sigma$

*В настоящее время уровень точности 0.3 МэВ в измерении массы  $\tau$ -лептона достаточен, однако улучшение точности измерения других величин потребует улучшения точности измерения массы  $\tau$ -лептона*

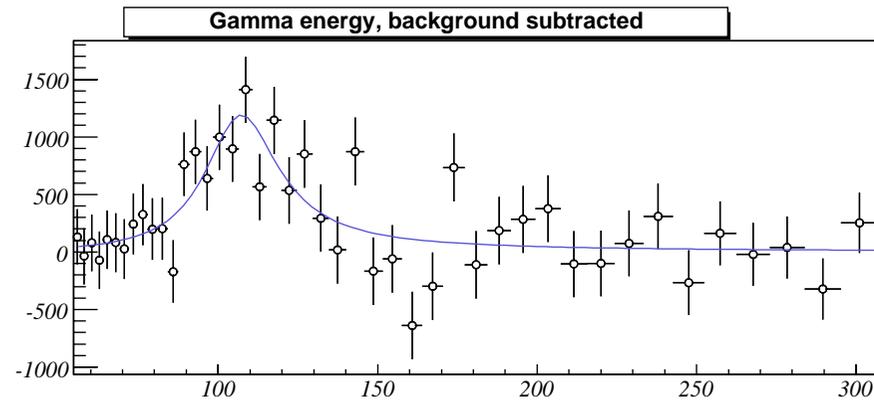
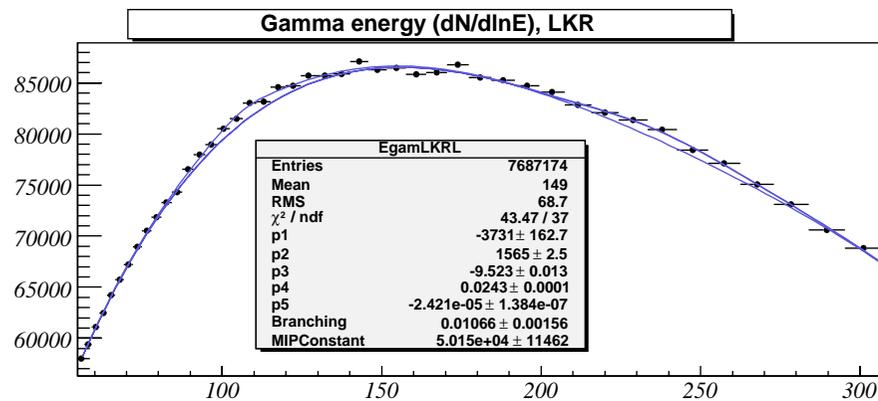
# Измерения вероятностей распадов

## $\psi$ -МЕЗОНОВ

- $Br(\psi' \rightarrow \tau\tau)$  – опубликован, ошибка ~среднемировой, будет улучшена в 1.5 раза)
- $Ge_e(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow ee, \mu\mu)$  – окончательный результат, лучшая в мире точность (**Доклад Е.М.Балдина**)
- $Br(\psi' \rightarrow \mu\mu)$  – предвар. результат, ошибка ~среднемировой, будет улучшена в 1.5 раза (**доклад А.Сухарева**)
- $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c)$  – предвар. результат, ошибка ~среднемировой, будет улучшена в 1.5 раза (**доклад В.Мальшева**)
- $Br(J/\psi \rightarrow pp)$  – идет анализ
- $Br(\psi' \rightarrow pp)$  – идет анализ
- $Br(\psi' \rightarrow \gamma\eta_{c1,2,2} \rightarrow \gamma J/\psi)$  – идет анализ
- +ряд других процессов)

# Измерение вероятности распада $J/\psi \rightarrow \gamma \eta c$

Измеряется инклюзивный спектр фотонов в пике  $J/\psi$

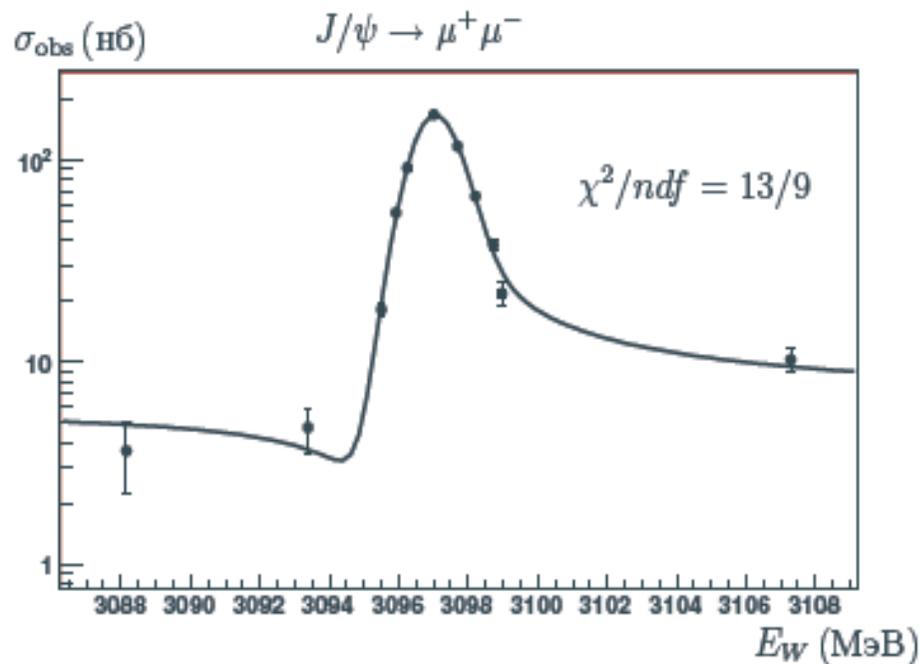
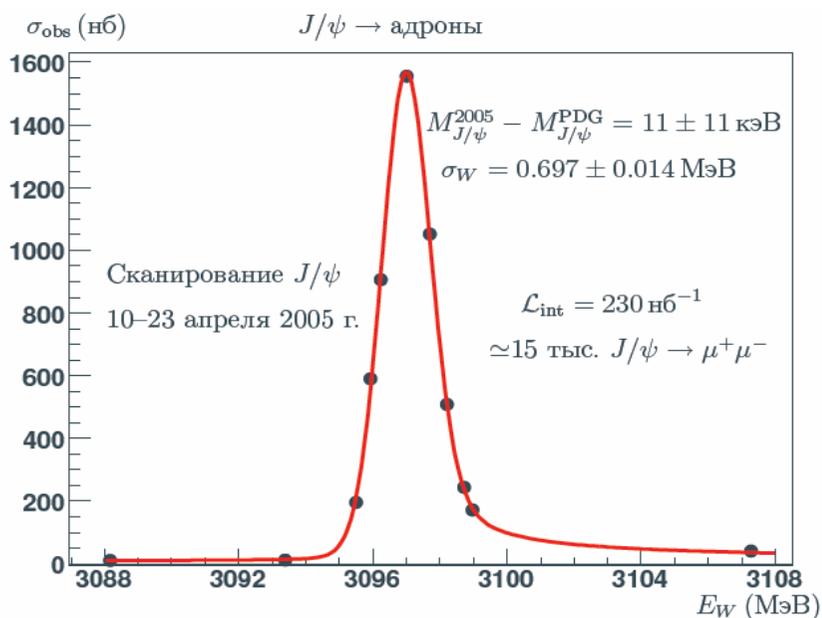


$E_\gamma$

# Измерение вероятности распада $J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c$

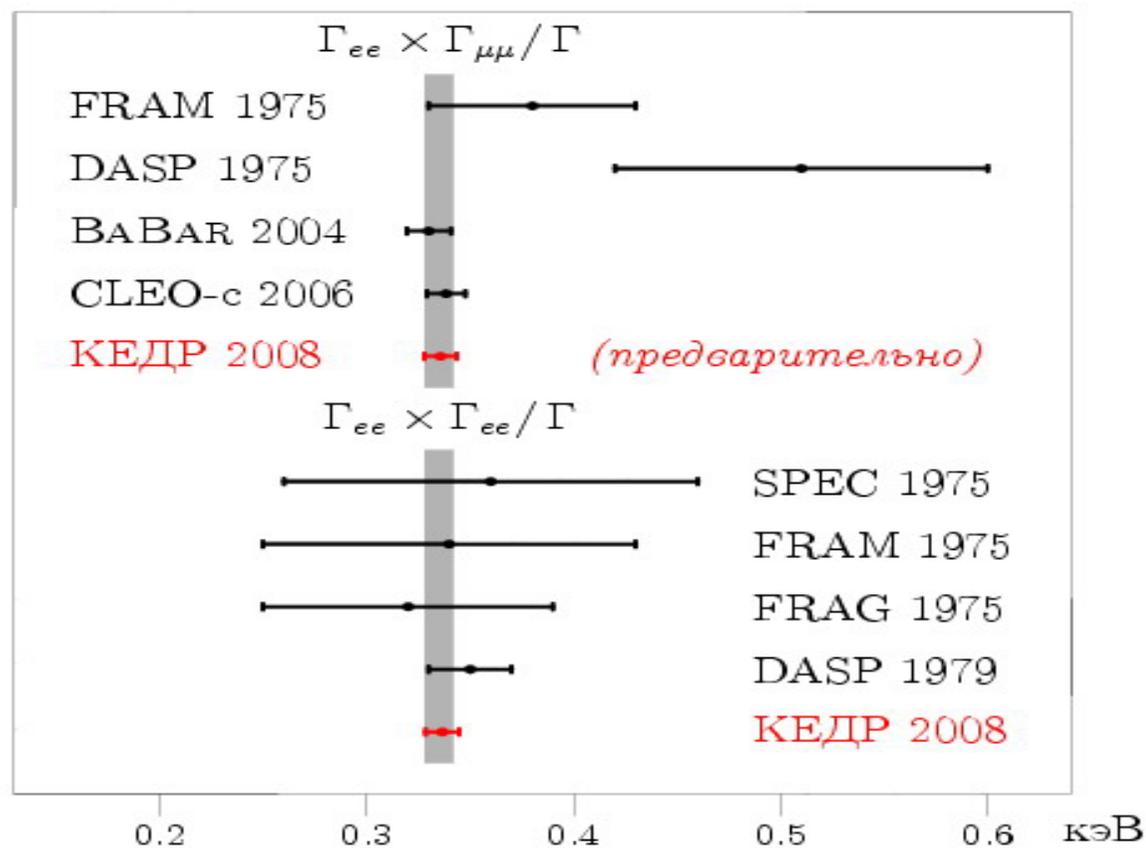
- ❑ Измеренная на КЕДР величина  $B(J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c) = (1.07 \pm 0.28)\%$   
*согласуется* с измерениями Crystall Ball  $(1.27 \pm 0.36)\%$ ,  
BaBar  $(0.79 \pm 0.20)\%$ ,  
*не согласуется* с измерениями CLEO  $(1.98 \pm 0.31)\%$ ,  
и теоретическими предсказаниями  $(2.4-3.1)\%$
- ❑ Необходима работа по определению теоретической формы линии спектра в этом распаде
- ❑ При увеличении статистики возможно измерение ширины, массы  $\eta_c$ . Набор статистики в пике  $J/\psi$  продолжается, планируется удвоить набранный интеграл светимости.

# Измерение $\Gamma_{e^+e^-} \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$



$$\Gamma_{e^+e^-} \times \Gamma_{\mu^+\mu^-} / \Gamma_{\text{total}} = 0.3357 \pm 0.0050 \text{ кэВ}$$

# Измерения $\Gamma_{ee}(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow ee)$



**Результат КЕДРа –лучший по точности**

# Полное сечение $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$

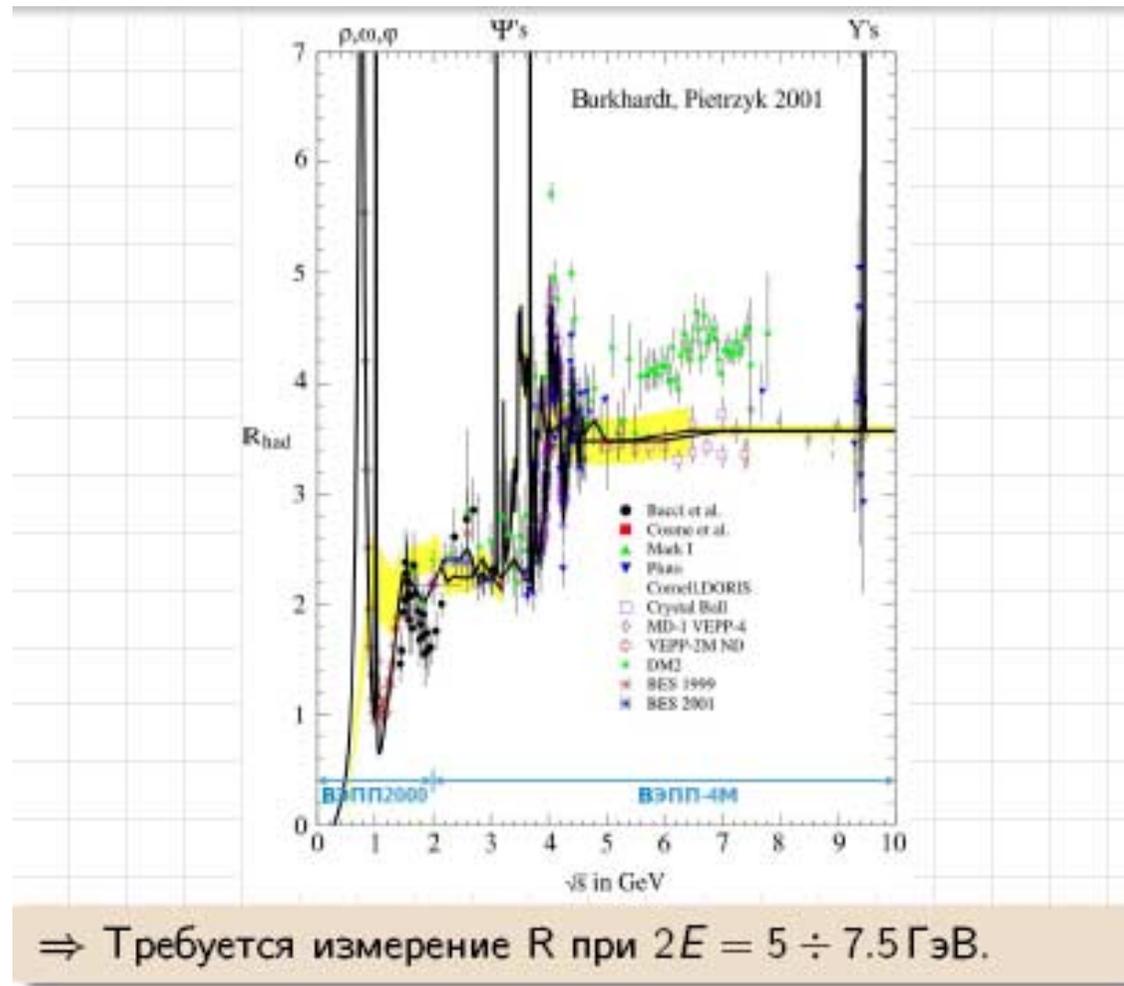
## Измерение $R$ при $2E = 2 \div 11$ ГэВ

- Измерение  $R$  – классическая задача ФЭЧ, не требующая высокой светимости

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

- Измеренное значение  $R$  используется в расчетах для вычисления вклада адронной поляризации вакуума (аномальный магнитный момент мюона,  $\alpha_{em}$  и др)

# Полное сечение $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$



# Полное сечение $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$

## Адронный вклад в аномальный магнитный момент мюона

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

где:  $\hat{K}(s)$  меняется от 0.63 до 1 при изменении  $s$  от  $4m_{\pi}^2$  до  $\infty$ , при  $s \rightarrow \infty$

$\sqrt{s}$ , ГэВ	$\Delta a_{\mu}^{\text{had}}, 10^{-10}$	$\Delta a_{\mu}^{\text{had}}, \%$
$2m_{\pi}$ -2.0	$640.7 \pm 4.4$	92.6
2.0-5.0	$41.4 \pm 1.7$	6.0
5.0- $\infty$	$9.9 \pm 0.2$	1.4
Всего	$692.0 \pm 4.7$	100.0

# Полное сечение $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$

## Адронный вклад в $\alpha(M_Z^2)$

$$\alpha(s) = \frac{\alpha(0)}{1 - \Delta\alpha_{\text{lep}}(s) - \Delta\alpha_{\text{had}}(s)},$$

где:  $\Delta\alpha_{\text{lep}}(M_Z^2) = 315.0 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{had}}(M_Z^2) = -\frac{\alpha(0)M_Z^2}{3\pi} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{R(s)ds}{s(s-M_Z^2)}$

$\sqrt{s}$ , ГэВ	$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2), 10^{-4}$	$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2), \%$
$2m_\pi$ -2.0	$58.8 \pm 1.6$	21.3
2.0-5.0	$48.3 \pm 2.3$	17.5
5.0-7.0	$18.3 \pm 1.1$	6.6
7.0-12.0	$30.4 \pm 0.9$	11.0
12.0- $\infty$	$120.3 \pm 0.2$	43.6
Всего	$276.1 \pm 3.1$	100.0

$\sim 80\%$  ошибки из области  $2 < \sqrt{s} < 7$  ГэВ.

# Эксперименты на ВЭПП-4М при высокой энергии

## Программа измерений на высокой энергии

- 1 Измерение масс  $\Upsilon(1s)$ ,  $\Upsilon(2s)$ ,  $\Upsilon(3s)$ ,  $\Upsilon(4s)$  – мезонов  
 $\int Ldt = 8, 3, 3 \text{ и } 20 \text{ пбн}^{-1}$ ,  $\sum = 35 \text{ пбн}^{-1}$
- 2 Измерение  $R$ ,  $2E = 8 \div 11 \div ? \text{ ГэВ}$   
 $\int Ldt \simeq 10 \text{ пбн}^{-1}$
- 3 Измерение полного сечения  $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ ,  $2\gamma$ -процессы  
 $\int Ldt \simeq 100 \div 300 \text{ пбн}^{-1}$

**Потребуется существенные вложения в коллайдер и ремонт детектора ( 9-10 месяцев)+ НОВЫЙ ИНЖЕКТОР !**

# Заключение

- На комплексе ВЭПП-4М с детектором КЕДР в 2005-08 реализована программа экспериментов по исследованию  $J/\psi, \Psi', \Psi''$ -мезонов и  $\tau$ -лептона и получен целый ряд результатов лучших в мире по точности
- В настоящее время завершается набор статистики в области  $J/\psi$ -мезона с целью улучшения точности измерения ряда вероятностей распадов
- В 2009 предполагается провести измерение полного сечения  $e^+e^- \rightarrow$  адроны и поиск узких резонансов в области  $2E=2 \div 5$  ГЭВ (существенное дополнение к экспериментам на ВЭПП-2М и ВЭПП-2000)
- 2010-12 – работа на высокой энергии: изучение  $Y$ -мезонов, измерение полного сечения  $\gamma\gamma$ -адроны