

# Комptonовское рассеяние в прецизионных экспериментах на электрон-позитронных коллайдерах

Николай Мучной

Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера

9 июня 2011 г.

## Цели работы:

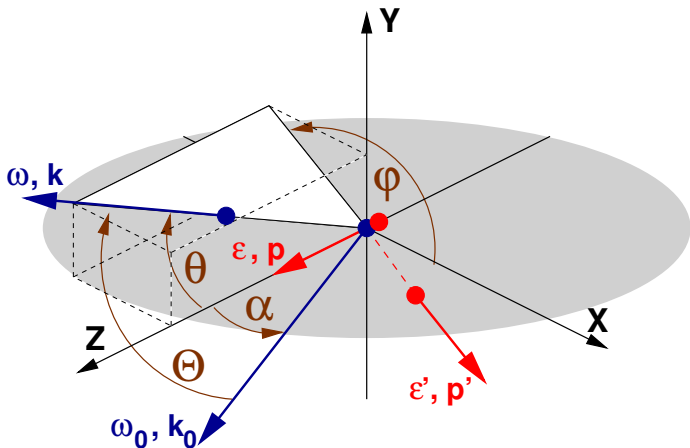
- Создание на базе установки РОКК-1М многофункционального источника гамма-квантов и электронов, получаемых методом комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронном пучке коллайдера ВЭПП-4М
- Проведение на установке РОКК-1М экспериментов с использованием рассеянных гамма-квантов и электронов
- Разработка и эксплуатация систем прецизионного измерения средней энергии пучка для установок ВЭПП-4М, ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- Поиск новых способов применения комптоновского рассеяния в физическом эксперименте

# Содержание

- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 Заключение

- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 Заключение

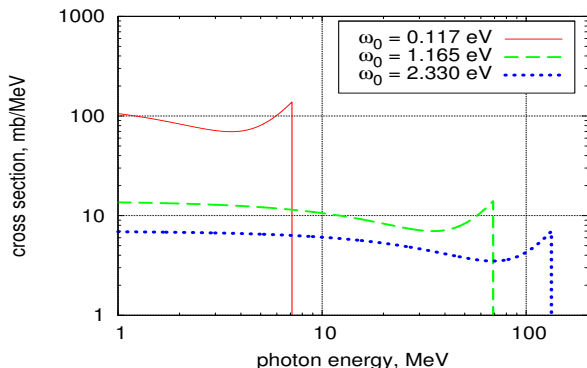
# Комптоновское рассеяние: кинематика



$$\omega = \omega_0 \frac{1 - \beta \cos \alpha}{1 - \beta \cos \theta + \frac{\omega_0}{\varepsilon} (1 - \cos \Theta)}$$

# Комптоновское рассеяние: $\omega_{max}$ и $\varepsilon$

$$\omega_{max} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon + \frac{m^2}{4\omega_0 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\omega_{max}}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_0 \omega_{max} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \right)$$



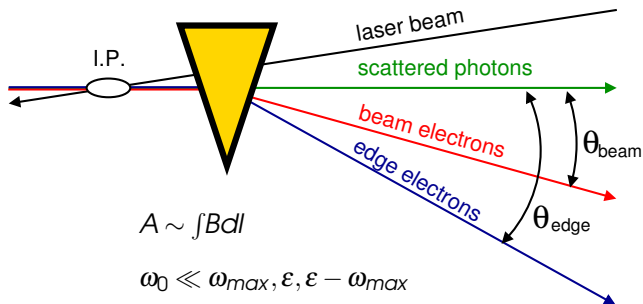
$$\alpha = \pi$$
$$\varepsilon = 2\text{GeV}$$

# Комптоновское рассеяние: схема

$$\omega_{max} = \varepsilon \frac{\lambda}{1 + \lambda}$$

$$\left( \lambda = \frac{4\omega_0 \varepsilon}{m^2} \right)$$

$$\varepsilon - \omega_{max} = \varepsilon \frac{1}{1 + \lambda}$$



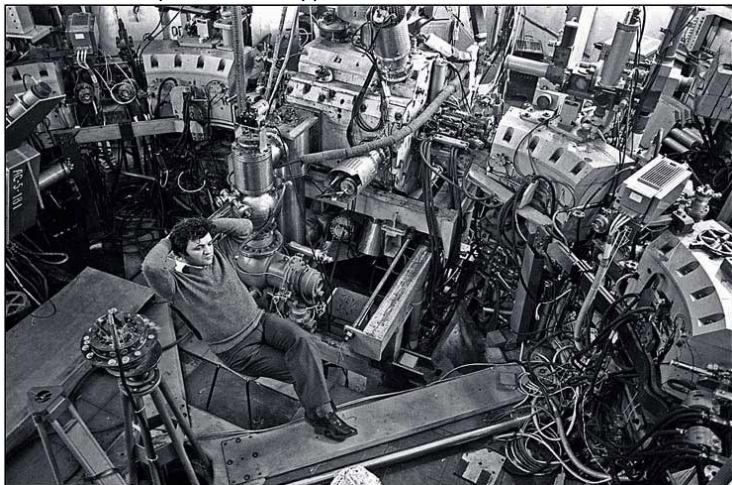
## УГЛЫ ПОВОРОТА:

$$\theta_{beam} = \frac{A}{\varepsilon} \Rightarrow \theta_{edge} = \frac{A}{\varepsilon - \omega_{max}} = A \frac{1 + \lambda}{\varepsilon} = \theta_{beam} + \frac{4A\omega_0}{m^2}$$

## МЕТОД МЕЧЕНИЯ РАССЕЯННЫХ ФОТОНОВ:

$$\omega(\theta_{se}) = \left( 1 - \frac{\theta_{beam}}{\theta_{se}} \right) \varepsilon$$

Кезерашвили Гурам Яковлевич 1952-1999



Установки РОКК-1 (1982), РОКК-2 (1987), РОКК-1М (1992)

- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 Заключение

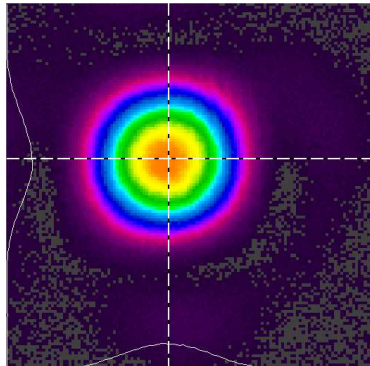
- Кинематика комптоновского рассеяния определяет однозначную связь между величинами  $\omega_0$ ,  $\varepsilon$  и  $\omega_{max}$ .

- Кинематика комптоновского рассеяния определяет однозначную связь между величинами  $\omega_0$ ,  $\varepsilon$  и  $\omega_{max}$ .
- Если  $\omega_0$  – известная константа, можно использовать  $\varepsilon$  для определения  $\omega_{max}$  и наоборот.

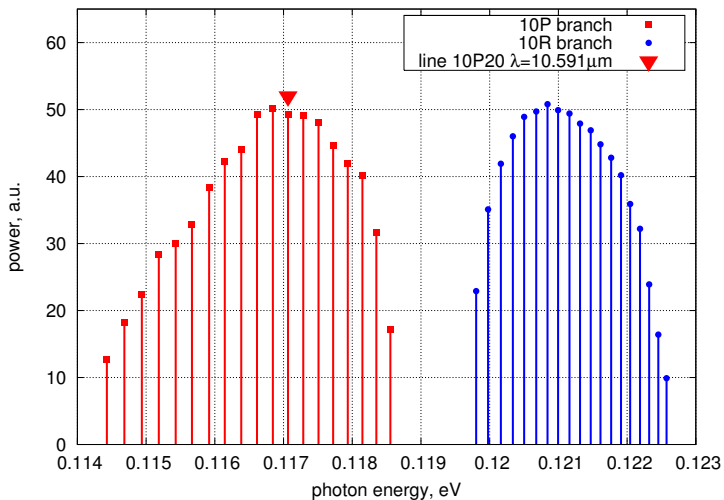
- Кинематика комптоновского рассеяния определяет однозначную связь между величинами  $\omega_0$ ,  $\varepsilon$  и  $\omega_{max}$ .
- Если  $\omega_0$  – известная константа, можно использовать  $\varepsilon$  для определения  $\omega_{max}$  и наоборот.
- С какой точностью можно считать известной константой среднюю энергию фотона в лазерном пучке?

# Лазер: GEM Select 50 (CO<sub>2</sub>)

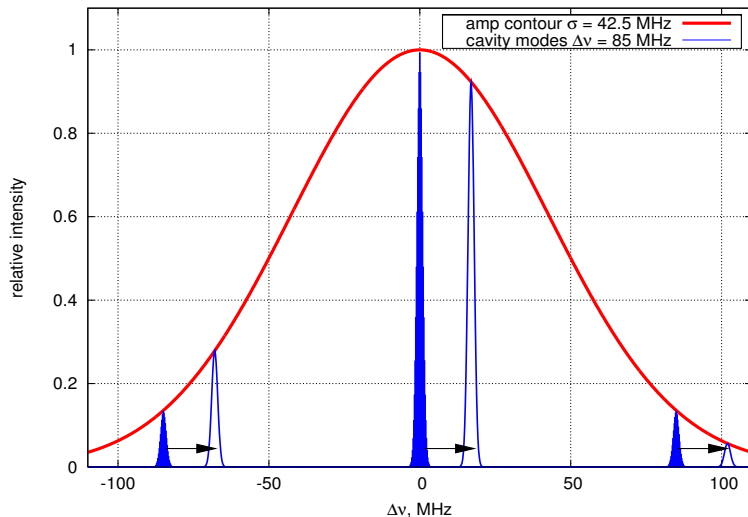
Рассмотрим основные принципы устройства лазеров на примере молекулярного газового лазера на диоксиде углерода.



# Линии генерации $\text{CO}_2$ лазера (10P и 10R ветви)



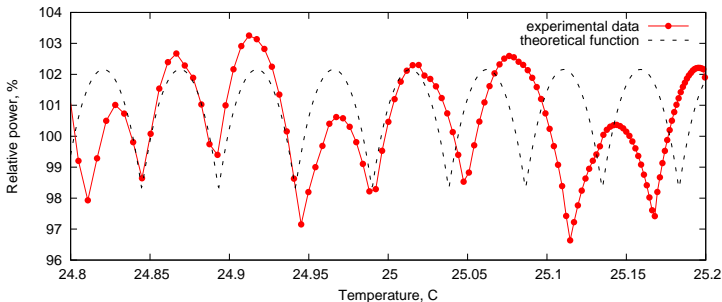
# Лазер: продольные моды резонатора



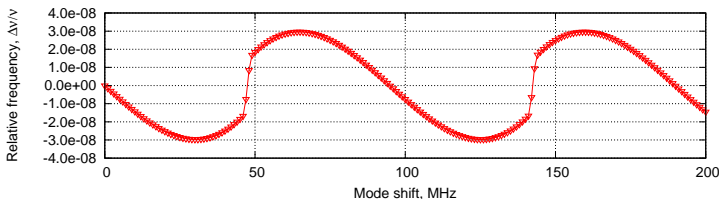
Линия 10P20  $\lambda = 10.5910352$  мкм

Расстояние между продольными модами  $\Delta\lambda/\lambda \sim 3 \cdot 10^{-6}$

# Лазер: колебания мощности и частоты



## Зависимость мощности излучения от температуры резонатора



## Колебания средней частоты генерации в спектре излучения

## WaveMaster Wavelength Meter



- точность  $\Delta\lambda = 0.005$  нм
- разрешение  $\Delta\lambda = 0.001$  нм
- встроенная абсолютная калибровка
- диапазон длин волн от 380 нм до 1095 нм

# Лазер: расчёт светимости

В общем случае:

$$L_{sc} = \int S dt dx dy dz ; \text{ где } S = \rho_e \rho_\gamma \sqrt{(\vec{v}_e - \vec{v}_\gamma)^2 - \frac{(\vec{v}_e \times \vec{v}_\gamma)^2}{c^2}}$$

Для ультрарелятивистского случая, корень даёт множитель к светимости  $(1 - \cos \alpha)$ , который называется Мёллеровским множителем.

Для непрерывного лазера

$$\frac{dL_{e\gamma}}{dsd\varepsilon} = \frac{2n_{ph}N_e}{(2\pi)^{3/2}\sigma_\varepsilon\sqrt{(\sigma^2 + \sigma_x^2)(\sigma^2 + \sigma_z^2)}} \times \\ \times \exp\left\{-\frac{z_0^2}{2(\sigma^2 + \sigma_z^2)} - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} - \frac{(x_0 + \psi\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0})^2}{2(\sigma^2 + \sigma_x^2)}\right\}$$

# Лазер: расчёт светимости

Средняя энергия  $\bar{\varepsilon}_L$  электронов, взаимодействующих с фотонами, отличается от средней энергии всего пучка электронов:

$$\Delta\varepsilon = (\bar{\varepsilon}_L - \varepsilon_0) = -\frac{\chi_0 \sigma_\psi \sigma_\varepsilon}{\sigma^2 + \sigma_x^2 + \sigma_\psi^2}$$

где  $\sigma_\psi = \psi \cdot (\sigma_\varepsilon / \varepsilon_0)$  – вклад синхротронных колебаний в поперечный горизонтальный размера пучка.

Энергетический разброс взаимодействующих электронов отличается от энергетического разброса пучка, когда  $\psi \neq 0$ :

$$\sigma'_\varepsilon = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\sigma_\psi^2}{\sigma^2 + \sigma_x^2}}}$$

- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор**
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 Заключение

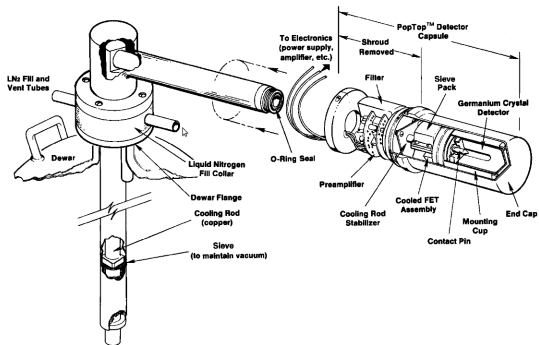
## Плюсы:

- энергетическое разрешение –  $\sigma_E/E < 1 \cdot 10^{-3}$
- возможность абсолютной калибровки шкалы с помощью гамма линий известных изотопов в диапазоне энергий до 10 МэВ
- современный технологический уровень производства детекторов и электроники обеспечивает высокую линейность и стабильность всего спектрометрического тракта

## Минусы:

- невысокая эффективность регистрации гамма квантов с энергиями в несколько МэВ
- относительно высокая стоимость

# HPGe: криостат и электроника

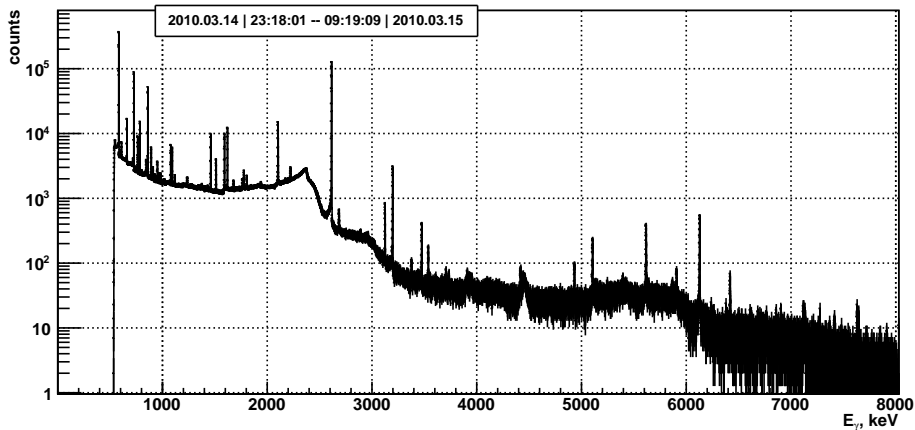


Сигнальный процессор

Криостат

Концентрация примесей (ловушек)  $\sim 10^{-12}$ .

# Калибровочный спектр (Март 2010)



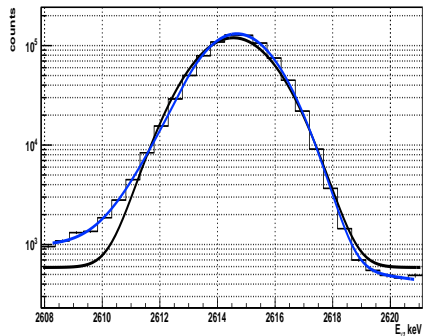
На форму пика оказывают влияние:

- статистика рождения электрон-дырочных пар,
- шумы предусилителя,
- комptonовская «ступенька» под пиком,
- настройка компенсации полюса нулём в сигнальном тракте,
- захват носителей заряда на примесных центрах полупроводника, приводящий к неполному сбору заряда,
- зависимость времени сбора заряда от места ионизации,
- наложение импульсов при высокой скорости счёта,
- особенности и настройки алгоритма измерения амплитуды импульса в цифровом сигнальном процессоре (коррекция баллистического дефицита, режектор наложений, восстановление базовой линии и т.д.)

# HPGe: пик полного поглощения $^{2614.530}$ кэВ

$\chi^2/NDF=50.8/20$

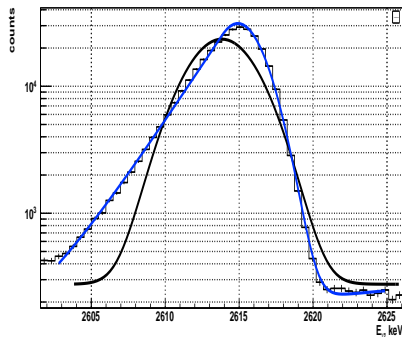
2010.03.14 | 23:18:01 – 09:19:09 | 2010.03.15



Март 2010

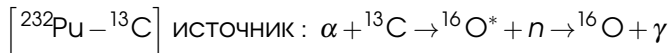
$\chi^2/NDF=153.1/40$

2010.06.09 | 23:30:12 – 05:04:43 | 2010.06.10



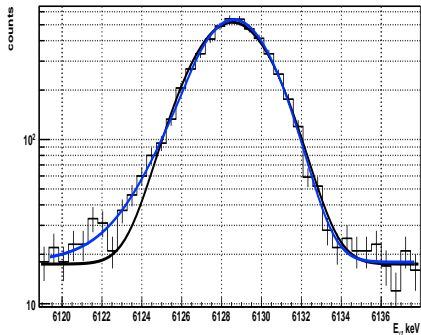
Июнь 2010

# HPGe: пик полного поглощения 6129.266 кэВ



$\chi^2/\text{NDF} = 24.5/34$

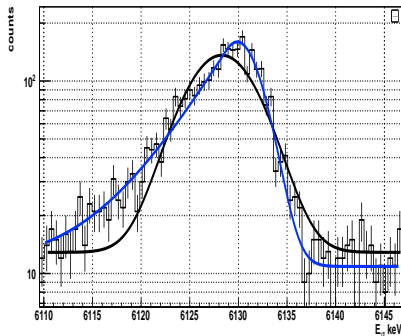
2010.03.14 | 23:18:01 -- 09:19:09 | 2010.03.15



Март 2010

$\chi^2/\text{NDF} = 92.2/74$

2010.06.09 | 23:30:12 -- 05:04:43 | 2010.06.10



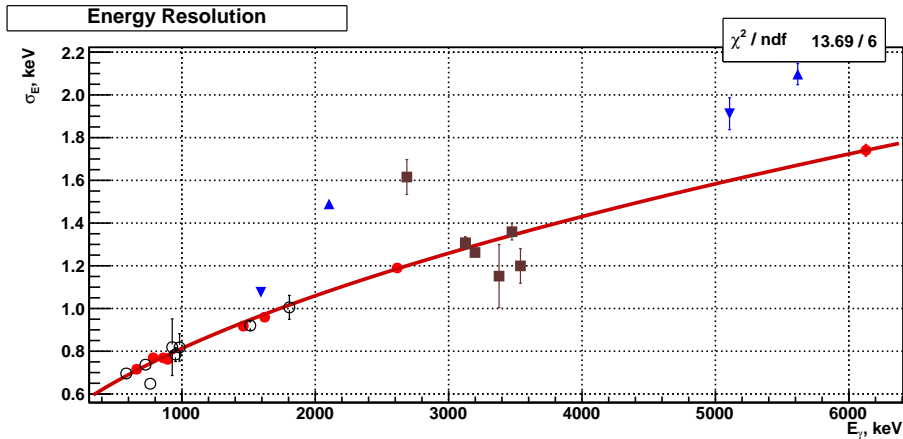
Июнь 2010

$$f(x, x_0, \sigma, \xi) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \begin{cases} x > (x_0 - \xi \cdot \sigma): & \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ x < (x_0 - \xi \cdot \sigma): & \exp\left\{\frac{\xi^2}{2} + \frac{\xi(x-x_0)}{\sigma}\right\} \end{cases}$$

Нормировка:

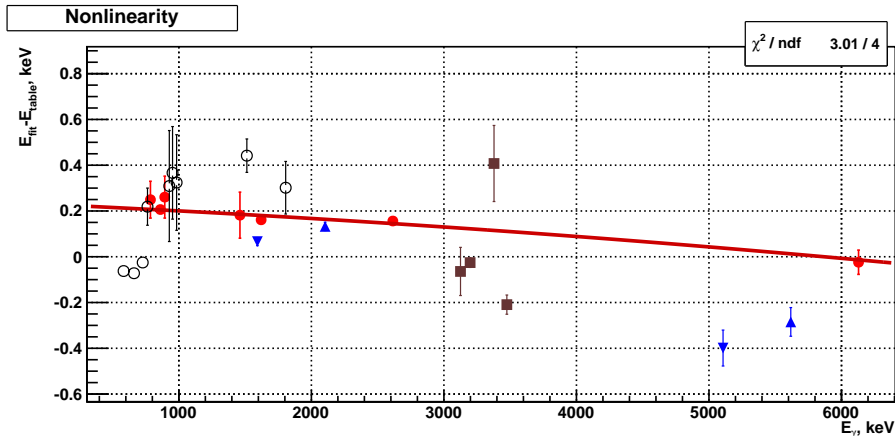
$$\frac{1}{N} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, x_0, \sigma, \xi) dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{\xi}{\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right)$$

# HPGe: энергетическое разрешение



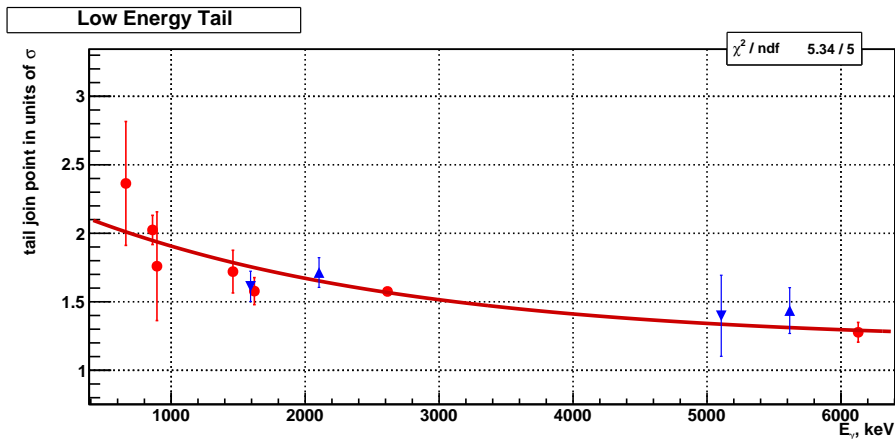
Параметры подгонки  $\sigma_E = \sqrt{K_0 + F\varepsilon E}$ :  
«Fano» =  $0.156 \pm 0.002$ ,  $K_0 = 0.199 \pm 0.009$  кэВ<sup>2</sup>.

# HPGe: нелинейность шкалы



Точность абсолютного измерения энергии  $\gamma$ -линии  $\sim 30\text{--}40$  эВ

# HPGe: асимметрия формы пика

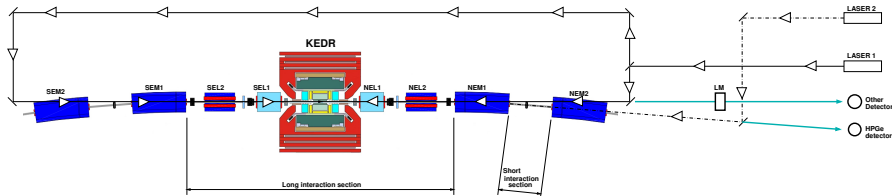


Параметры подгонки:  $\xi(E_\gamma) = p_0 + \exp(-p_1(E_\gamma - p_2))$ ,  
 $p_0 = 1.21 \pm 0.16$ ,  $p_1 = 0.0004 \pm 0.0002$ ,  $p_2 = 131 \pm 420$ .

- В результате применения вышеописанного алгоритма калибровки энергетической шкалы спектрометра, во всём рабочем диапазоне энергий гамма-квантов определены параметры функции отклика системы на монохроматическое возбуждение.
- Точность абсолютного измерения энергии гамма квантов – на уровне 50 эВ.

- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР**
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 Заключение

# Установка РОКК-1М на ВЭПП-4М



## Задачи, для решения которых создавалась установка РОКК-1М:

- эксперименты на пучке гамма квантов,
- калибровка СРРЭ детектора КЕДР,
- измерение степени поляризации электронного пучка,
- измерение энергии электронного пучка...

Установка РОКК-1М запущена в 1991 году.

**Метод резонансной деполяризации (РД)** позволяет измерять моментальное значение средней энергии электронов в пучке с непревзойдённой точностью  $\Delta E/E \simeq 10^{-6}$  (ВЭПП-4, ВЭПП-2М, LEP, HERA, ...).

Недостатки метода РД:

- машина должна обеспечивать возможность работы с поляризованным пучком,
- требуется интерполяция измерений при наборе статистики,
- в некоторых точках по энергии поляризация невозможна из за спиновых резонансов,
- потери пучкового времени на измерения энергии.

# Прецессия спина в магнитном поле

Метод прецизионного измерения энергии  $e^+ / e^-$  пучков в циклических ускорителях был предложен и развит в ИЯФ в 1970-х.

Эффект Соколова-Тернова – радиационная поляризация пучка:

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{5\sqrt{3}}{8} \alpha \frac{\lambda_e^2}{R} \gamma^5 v_0$$

$\tau_p$  - время поляризации,  $\alpha$  - постоянная тонкой структуры,  $\lambda_e$  - комптоновская длина волны электрона,  $R$  - радиус поворота,  $\gamma$  - Лоренц фактор,  $v_0$  - частота обращения.

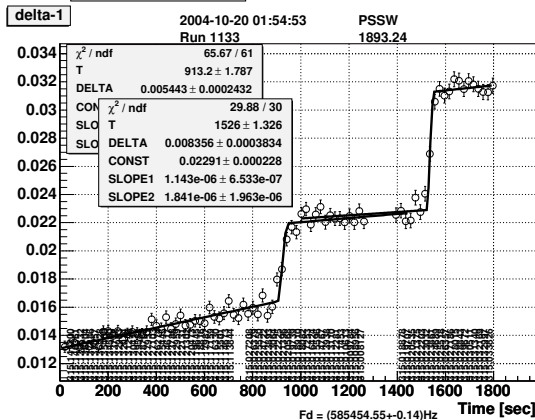
$\Omega$  – частота прецессии спина вокруг направления ведущего поля:

$$\frac{\Omega}{v_0} = 1 + \gamma \frac{\mu'}{\mu_0}; \quad \frac{\mu'}{\mu_0} = \frac{g-2}{2} = 0.0011596521811(7)$$

# Метод резонансной деполяризации - РД

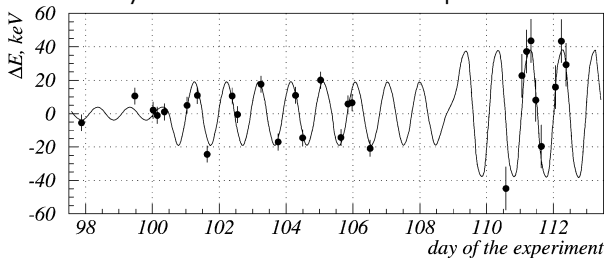
Поляризация пучка может быть разрушена внешним переменным полем такой частоты  $\Omega_D$ , что выполняется условие резонанса:

$$\Omega \pm \Omega_D = n\nu_0, \text{ где } n - \text{целое число.}$$

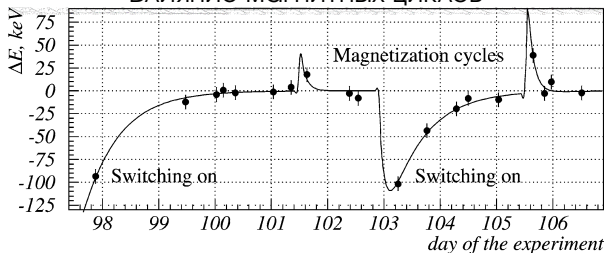


Вниз:  $E = 1888.2195 \pm 0.001$  МэВ; Вверх:  $E = 1888.2194 \pm 0.001$  МэВ

## Суточные колебания энергии



## Влияние магнитных циклов



**Метод обратного комптоновского рассеяния (ОКР)** позволяет измерять среднюю энергию электронов в пучке в течение некоторого времени измерения (от нескольких минут) с точностью  $\Delta E/E \lesssim 5 \cdot 10^{-5}$ .

$$\varepsilon = \frac{\omega_{max}}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_0 \omega_{max} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \right)$$

Точность метода:

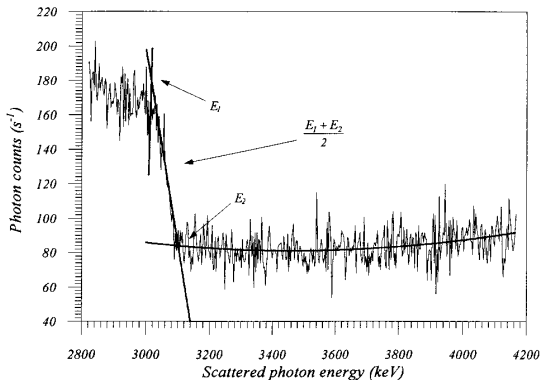
$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta \omega_{max}}{\omega_{max}} \oplus \frac{1}{2} \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0}$$

Край спектра:

$$\sigma_{\omega} \equiv \frac{\delta \omega_{max}}{\omega_{max}} \simeq 2 \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \oplus \frac{\delta \omega_0}{\omega_0} \oplus \frac{\delta r}{r}$$

## Phys. Rev. E, Vol. 54, No 5 (1996)

Energy measurement of relativistic electron beams by laser Compton scattering  
*Ian C. Hsu, Cha-Ching Chu, and Chuan-Ing Yu*



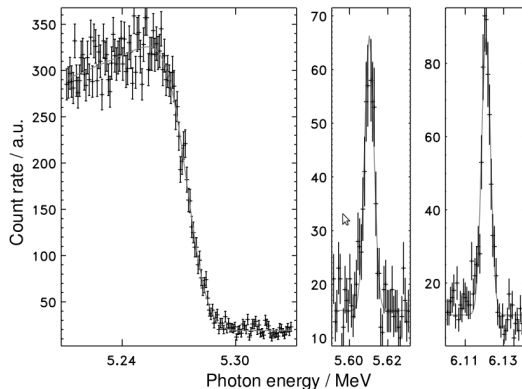
Результат:

$$E_{beam} = 1305.8 \pm 1.7 \text{ МэВ}$$

## Nucl. Instr. and Meth. A 486 (2002)

Measurement of the BESSY II electron beam energy by Compton-backscattering of laser photons

*R. Klein, P. Kuske, R. Thornagel, G. Brandt, R. Gorgen, G. Ulm*



## Результаты:

$$E_{CBS} = 1718.76 \pm 0.05 \text{ МэВ}$$

$$E_{RD} = 1718.74 \pm 0.02 \text{ МэВ}$$

$$E_{\gamma}(^{16}\text{O}^*) = 6128.63 \pm 0.04 \text{ МэВ}$$

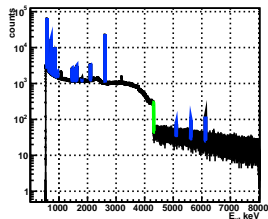
линия  $\beta$ -распада  $^{16}\text{N}$

$$E_{\gamma}(^{16}\text{O}^*) = 6129.27 \pm 0.05 \text{ МэВ}$$

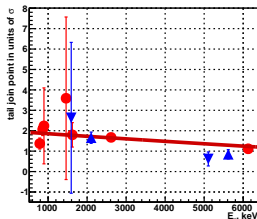
$$dE_{beam}/E_{beam} \simeq 0.08 \text{ МэВ}$$

# РОКК-1М: измерение энергии (Март 2010)

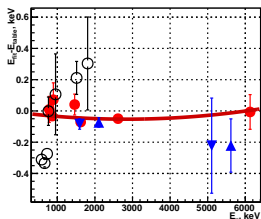
2010.03.09 | 16:58:25 -- 19:14:29 | 2010.03.09



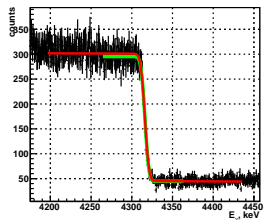
Low Energy Tail



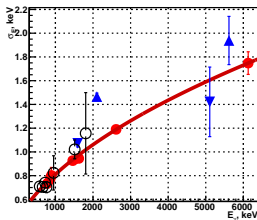
Nonlinearity



2010.03.09 | 16:58:25 -- 19:14:29 | 2010.03.09

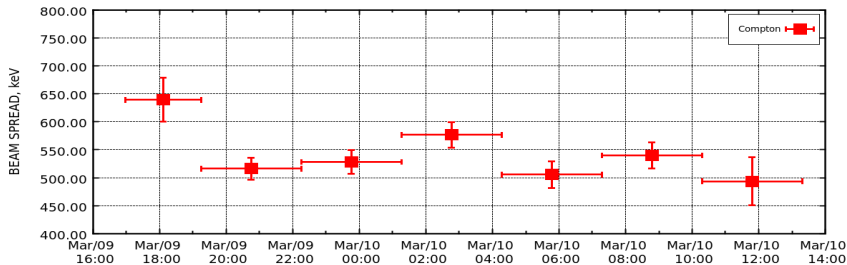
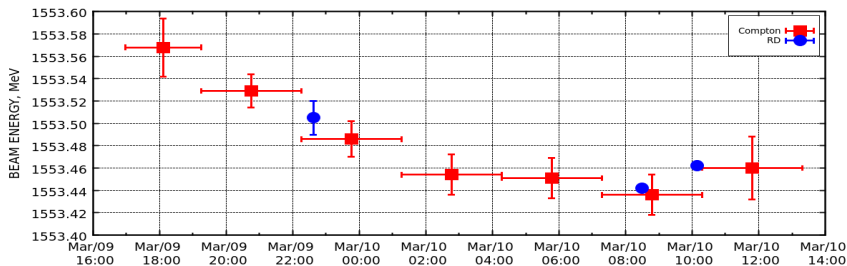


Energy Resolution

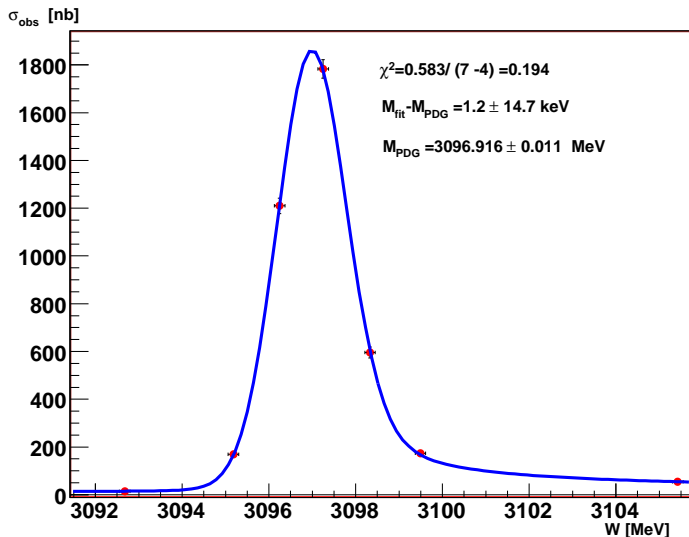


Zero = 0.31520 keV  
Gain = 0.48986 keV/Ch  
"Fano" =  $0.158 \pm 0.004$   
"Noise" =  $0.191 \pm 0.021$  keV  
 $E_{\text{edge}} = 4316.186 \pm 0.143$  keV  
 $\sigma_{E_{\text{edge}}} = 3.55 \pm 0.22$  keV  
 $E_{\text{beam}} = 1553.568 \pm 0.026$  MeV  
 $\sigma_{E_{\text{beam}}} = 639.5 \pm 39.5$  keV  
time from: 16:58:25 / 2010.03.09  
time upto: 19:14:29 / 2010.03.09

# РОКК-1М: Комптон + РД (Март 2010)



# Скан $J/\psi$ с детектором КЕДР (Март 2010)

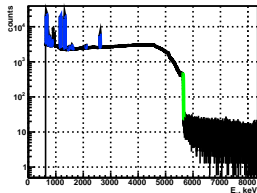


# РОКК-1М: эксперименты с детектором КЕДР

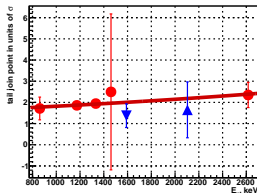
- В эксперименте КЕДР 2002 года по прецизионному измерению масс  $J/\psi$  и  $\psi'$  мезонов  $\sim 90\%$  времени было потрачено на измерения энергии методом РД и изучение поведения энергии пучка во времени.
- Наблюдаемые сечения рождения высоки, поэтому в эксперименте не требовался большой интеграл светимости – было набрано  $40\text{нб}^{-1}$  в трёх сканированиях  $J/\psi$  и  $76\text{нб}^{-1}$  в трёх сканированиях  $\psi'$ .
- В результате кропотливой работы по стабилизации систем питания и управления ВЭПП-4М и тщательного анализа данных удалось добиться точности интерполяции энергии пучка в сканированиях на уровне  $\Delta E/E \lesssim 3 \cdot 10^{-6}$ .
- С 2005 по 2008 гг. на ВЭПП-4М и КЕДР проводился эксперимент по измерению массы  $\tau$ -лептона. Для определения массы измеряется зависимость сечения реакции  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  от энергии встречных пучков вблизи порога реакции. Ввиду малости сечения, эксперимент требует набора большого интеграла светимости (набрано  $15.2\text{пб}^{-1}$  за  $\sim 7$  месяцев).

# РОКК-1М: одно измерение вблизи порога $\tau$

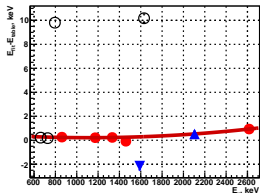
2007.01.02 | 23:55:29 -- 00:45:05 | 2007.01.03



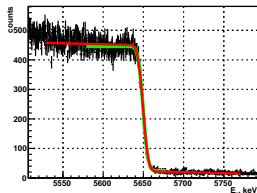
Low Energy Tail



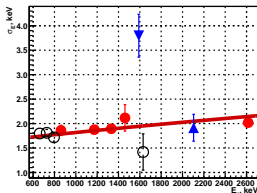
Nonlinearity



2007.01.02 | 23:55:29 -- 00:45:05 | 2007.01.03



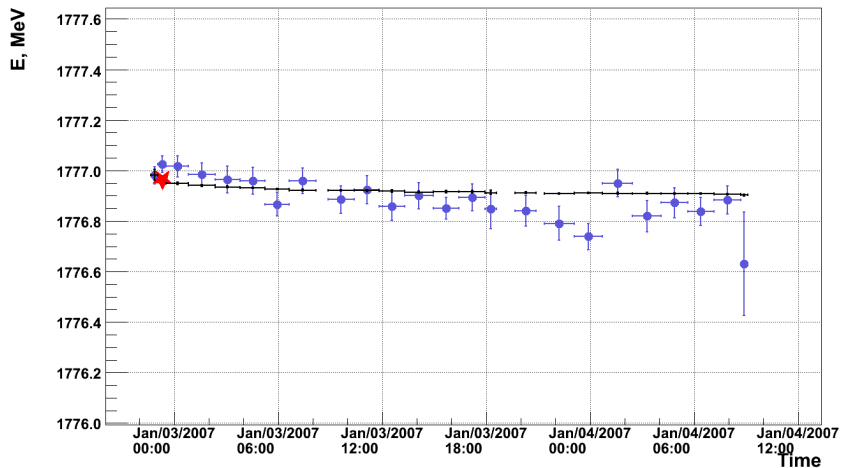
Energy Resolution



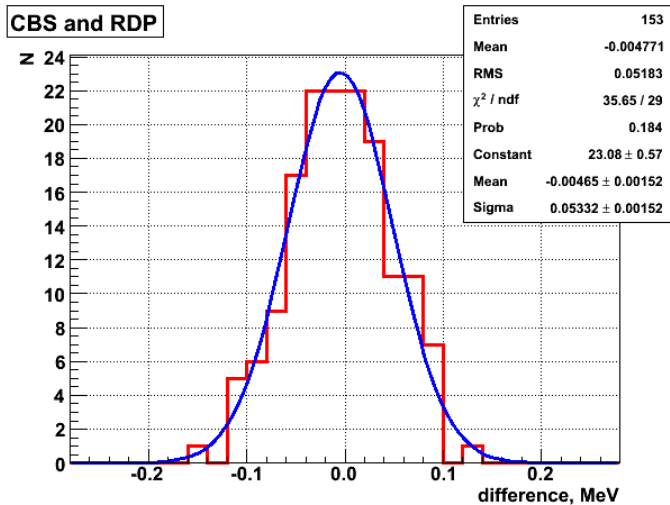
**Zero = -0.02060 keV**  
**Gain = 0.51005 keV/Ch**  
**"Fano" = 0.271 ± 0.009**  
**"Noise" = 2.500 ± 0.023 keV**  
**E<sub>edge</sub> = 5642.816 ± 0.184 keV**  
**σ<sub>E<sub>edge</sub></sub> = 4.26 ± 0.17 keV**  
**E<sub>beam</sub> = 1776.703 ± 0.029 MeV**  
**σ<sub>E<sub>beam</sub></sub> = 670.0 ± 26.8 keV**  
**time from: 23:55:29 / 2007.01.02**  
**time upto: 00:45:05 / 2007.01.03**

# РОКК-1М: поведение энергии

$E_{RDP}$ ,  $E_{NMR}$ ,  $E_{CBS}$

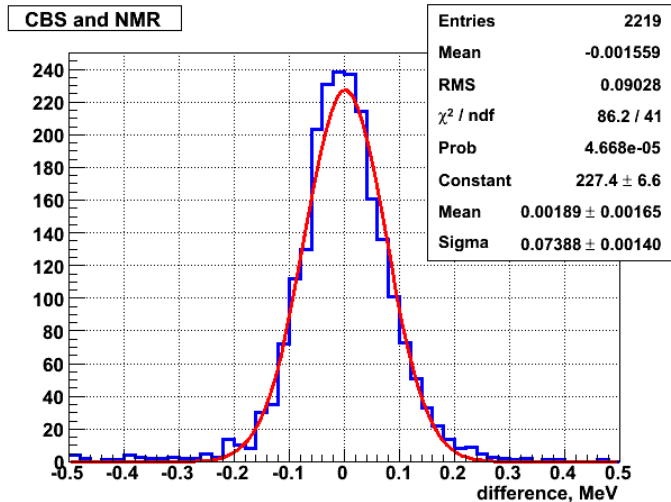


# РОКК-1М: сравнение ОКР и РД



Разброс  $\sigma_E \approx 50$  кэВ совпадает со стат. ошибкой измерений ОКР

# РОКК-1М: сравнение ОКР и интерполяции РД



$\sigma_E \approx 60$  кэВ – оценка суммарной систематической погрешности

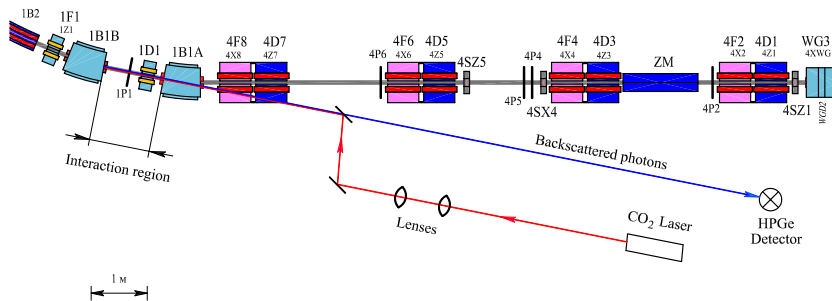
К настоящему времени на детекторе КЕДР, с использованием комбинированной техники измерения пучка (РД + ОКР), получены следующие результаты:

- Предварительный результат 2009:  $m_{\tau} = 1776.81^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15$  МэВ.
- Измерено произведение электронной ширины  $J/\psi$ -мезона и вероятности его распада на  $e^+e^-$  пару.
- Измерены массы  $D^0$  и  $D^+$  мезонов.
- Измерена масса, полная и лептонная ширина  $\psi(3770)$ .
- Произведён поиск узких резонансов в области энергий от 1.85 ГэВ до 3.1 ГэВ в с.ц.м. и поставлен верхний предел на их лептонную ширину.

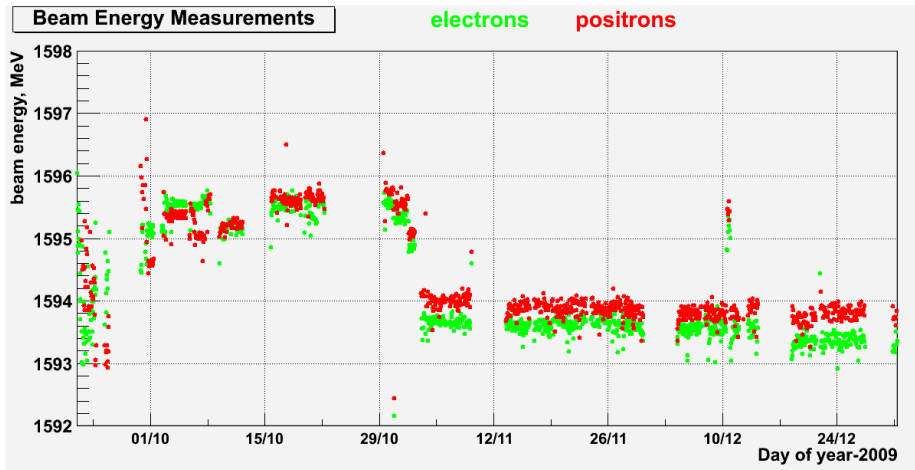
- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000**
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 Заключение

# ВЭПП-3: схема

На накопителе ВЭПП-3 в 2009 году проводился эксперимент по измерению зарядовой асимметрии в упругом рассеянии электронов и позитронов на газовой водородной мишени. Основным источником систематической погрешности измерения отношения сечений рассеяния является неидентичность режимов магнитной системы накопителя при работе с частицами разного знака заряда.



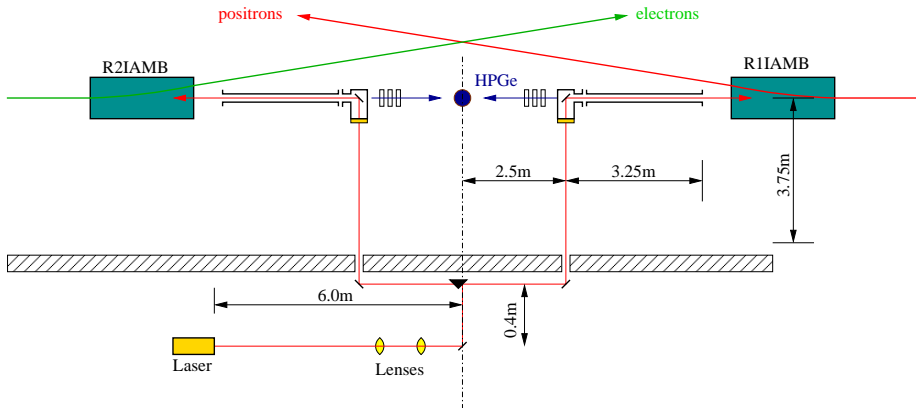
# ВЭПП-3: результаты



- В 2009 году начался набор статистики детектором BESIII. Максимальная полученная светимость –  $0.7 \cdot 10^{33} \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  на энергии  $2 \times 1.89$  ГэВ.
- В 2008 году ИЯФ официально вступил в международную коллаборацию BESIII.
- В рамках коллаборации было принято решение о создании прецизионной системы измерения энергии пучков на коллайдере BEPCII. Одной из важнейших задач, которую предполагается выполнить с использованием этой системы – новое точное измерение массы  $\tau$ -лептона ( $\Delta m_\tau \sim 50$  кэВ).

Energy determination at BEPC-II. / *N.Yu.Muchnoi, M.N.Achasov, V.E.Blinov et al.*  
// Proceedings of the Tenth International Workshop on Tau Lepton Physics (2009)

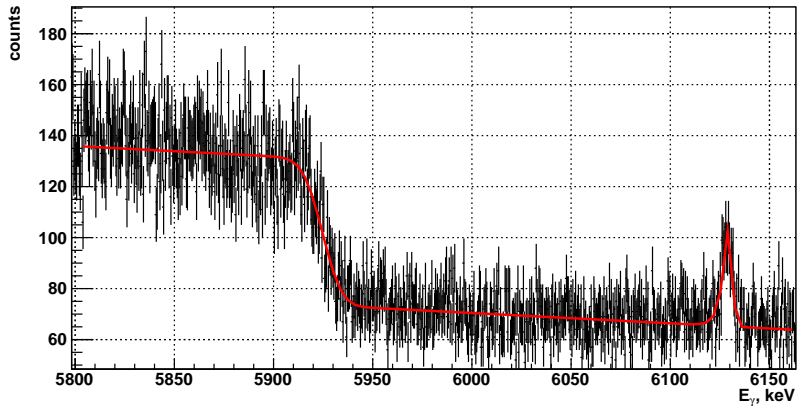
## Система измерения энергии пучков методом ОКР

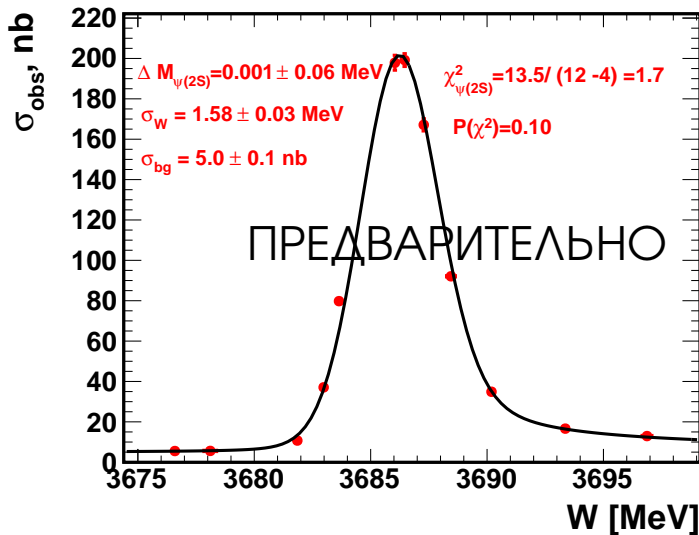


Физический запуск системы состоялся в конце 2010 года

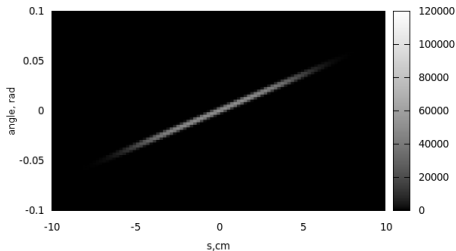
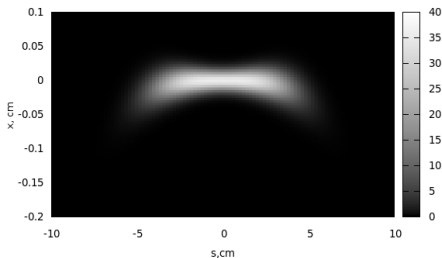
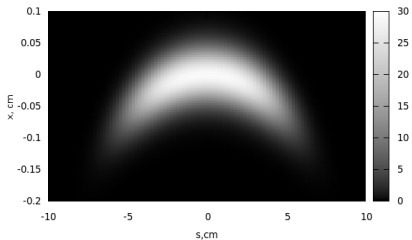
# Край комптоновского спектра

Electrons: 2010.12.01 | 21:35:23 -- 22:35:25 | 2010.12.01

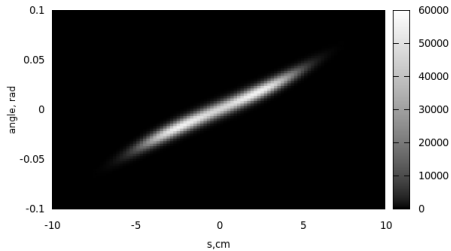




# ВЭПП-2000: область взаимодействия в магните

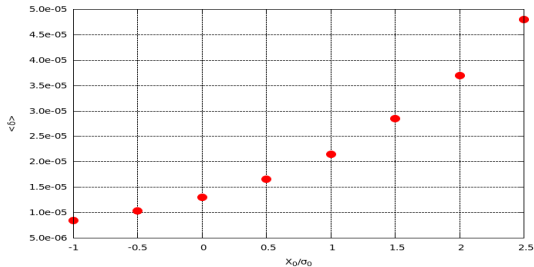
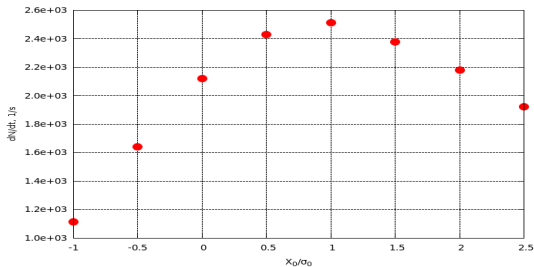


$$\sigma_0 = 0.5 \text{ mm}$$



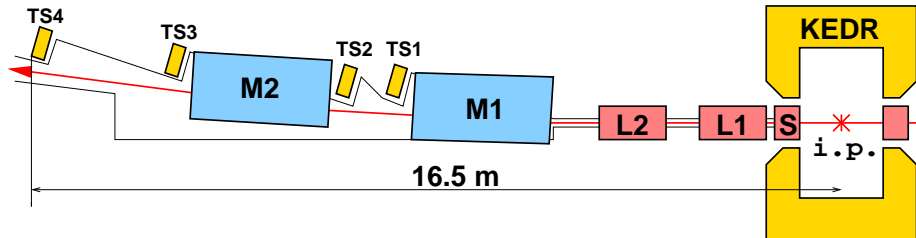
$$\sigma_0 = 0.05 \text{ mm}$$

# ВЭПП-2000: область взаимодействия в магните



- 1 Комптоновское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем**
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 Заключение

## Система Регистрации Рассеянных Электронов детектора КЕДР

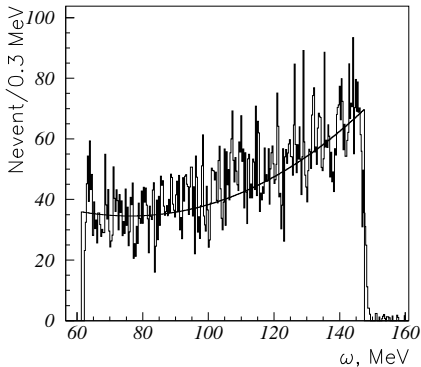


Исследование переходов  $\gamma\gamma \rightarrow$  адроны является важной частью экспериментальной программы детектора КЕДР.

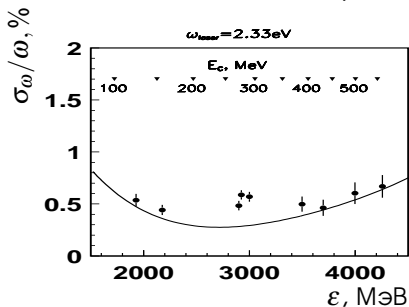
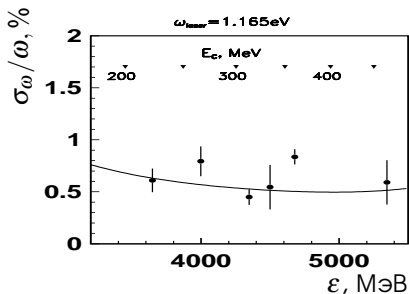
Для восстановления кинематических переменных  $\gamma\gamma$ -системы в состав детектора КЕДР входит Система Регистрации Рассеянных Электронов (СРРЭ).

# Калибровка детекторных систем: СРРЭ

Край спектра



Справа – энергетическое разрешение



- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой**
- 8 Заключение

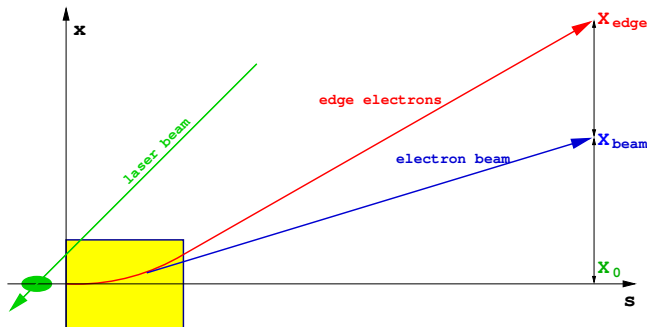
Рассмотренный выше метод измерения энергии электронного пучка прекрасно зарекомендовал себя как рабочий инструмент при проведении экспериментов на циклических ускорителях с энергией пучка до 2 ГэВ.

Но:

- Продвижение вверх по диапазону измеряемой энергии пучка весьма проблематично.
- Метод работает только для определения средней энергии пучка за довольно продолжительное время, в течение которого происходит набор энергетического спектра рассеянных фотонов.

# Магнитный спектрометр с ОКР-калибровкой

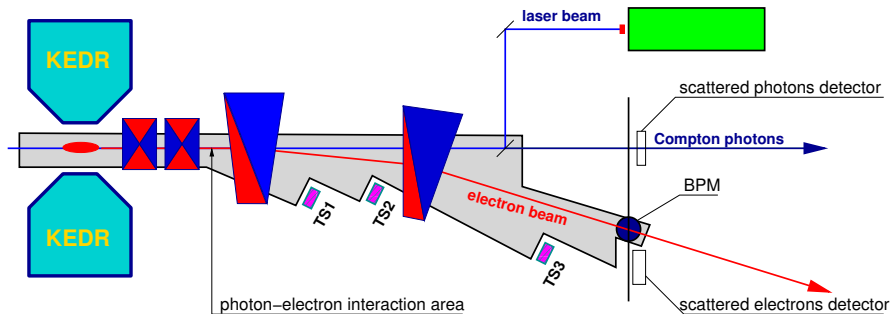
- ILC beam energy measurement by means of laser Compton backscattering / N.Muchnoi, H.J.Schreiber and M.Viti // NIM A 2009 Vol.607 no.2 pp.340-366



$$\begin{cases} X_{beam} - X_0 = B \cdot (1/E_{beam}) \\ X_{egde} - X_{beam} = B \cdot (4\omega_0/m^2) \end{cases} \Rightarrow E_{beam} = \frac{m^2}{4\omega_0} \cdot \frac{X_{egde} - X_{beam}}{X_{beam} - X_0}$$

# Магнитный спектрометр с ОКР-калибровкой

Идея провести тестовый эксперимент, способный продемонстрировать работоспособность метода в целом, на коллайдере ВЭПП-4М, появилась из-за того, что на установке РОКК-1М уже присутствуют почти все формально необходимые компоненты такой системы.



- 1 Комptonовское рассеяние
- 2 Лазер
- 3 HPGe - детектор
- 4 Установка РОКК-1М, эксперименты ВЭПП-4М – КЕДР
- 5 ВЭПП-3, ВЕРС-II, ВЭПП-2000
- 6 Калибровка детекторных систем
- 7 Магнитный спектрометр с лазерной калибровкой
- 8 **Заключение**

# Положения, выносимые на защиту:

- На коллайдере ВЭПП-4М создана установка РОКК-1М для проведения различных экспериментов с использованием обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронном пучке.
- Исследовано влияние различных факторов, определяющих форму края спектра ОКР в условиях реального эксперимента.
- Разработана методика измерений абсолютных энергий гамма квантов с помощью HPGe детектора в диапазоне энергий 1–10 МэВ.
- Создана система прецизионной калибровки энергии электронного пучка ВЭПП-4М.
- Аналогичные системы запущены на накопителе ВЭПП-3 и коллайдере BEPC-II.
- Проведена калибровка энергетической шкалы СРРЭ детектора КЕДР, прототипов калориметров КЕДР и BELLE.
- Предложен новый метод измерения абсолютной энергии пучка для проекта ILC.

# Нелинейность АЦП?

