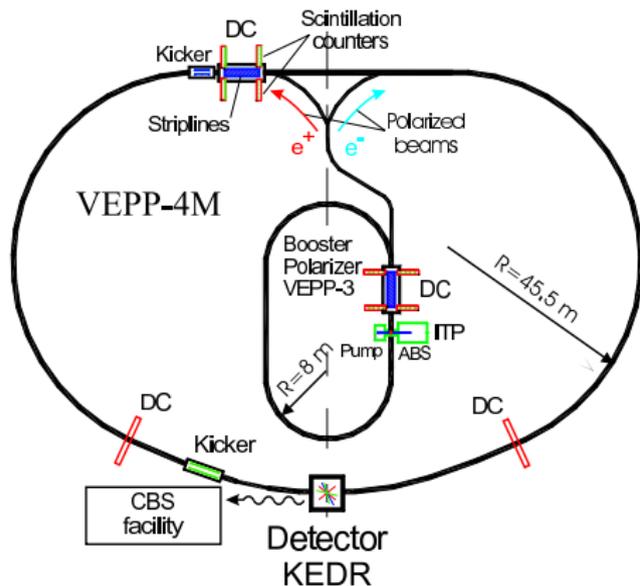


Калориметр высокого разрешения на основе
большого кристалла BGO для калибровки системы
мечения на детекторе КЕДР.

Жилич В.Н.

21 февраля 2025 г.

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН
посвящённая 70-летию В.А.Рубакова



Энергия пучка

$1 \div 5\text{ ГэВ}$

Количество банчей

2×2

Luminosity: $E_b = 1.9\text{ ГэВ}$

$2 \cdot 10^{30} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$

$E_b = 3.5\text{ ГэВ}$

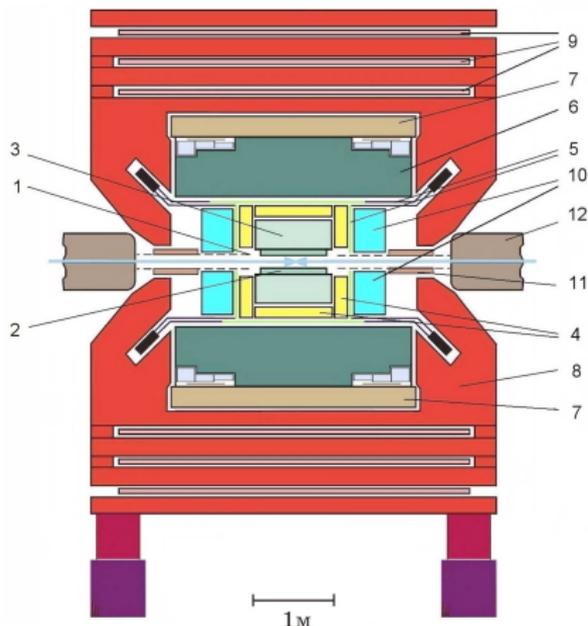
$1 \cdot 10^{31} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$

Период обращения

$1.2\ \mu\text{s}$

Энергия пучка может измеряться методом резонансной поляризации с точностью лучше 10 кэВ.

Последнее время работает в области J/ψ и $\Upsilon(1S)$.



- 1 Вакуумная камера
 - 2 Вершинный детектор
 - 3 Дрейфовая камера
 - 4 Аэрогелевые счетчики
 - 5 Сцинтилляционные счетчики
 - 6 Калориметр на жидком криптоне
 - 7 Сверхпроводящая катушка
 - 8 Ярмо магнита
 - 9 Мюонная система
 - 10 CsI калориметр
 - 11 Компенсационный соленоид
 - 12 Квадрупольный магнит ВЭПП-4М
- Мониторы светимости по процессу однократного тормозного излучения на e^+ и e^- сторонах
 - Система Регистрации Рассеянных Электронов (СРРЭ, система мечения) для изучения двухфотонных процессов

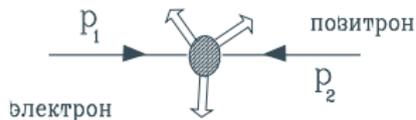
Что такое двухфотонные события?

Это не

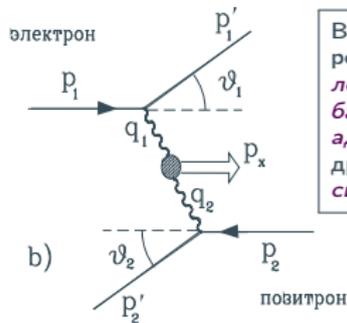
$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma, \text{ а } \gamma\gamma \rightarrow X$$

или, если мы говорим о встречных пучках, процессы, которые идут через виртуальные фотоны

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^- + X.$$



a)



В качестве X могут рождаться пары *лептонов/мезонов/-барионов*, C -четные адронные резонансы и другие *многоадронные системы* ($N_{hadr} \geq 3$)

Однофотонная аннигиляция e^+e^-

Двухфотонное взаимодействие e^+e^- .

Энергию виртуального фотона и другие параметры рожденных частиц можно

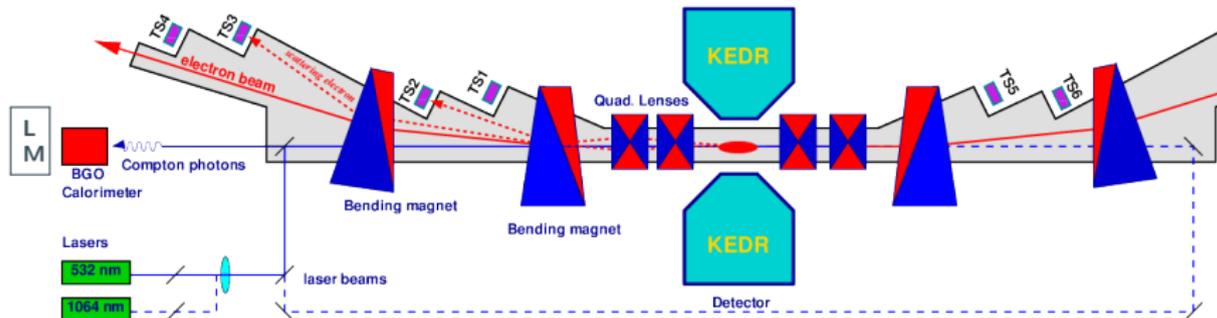
$$\text{найти как } \omega_1 = (|p_1| - |p'_1|),$$

$$q_1^2 = -|p_1||p'_1|\vartheta_1^2 - O(m_e^2),$$

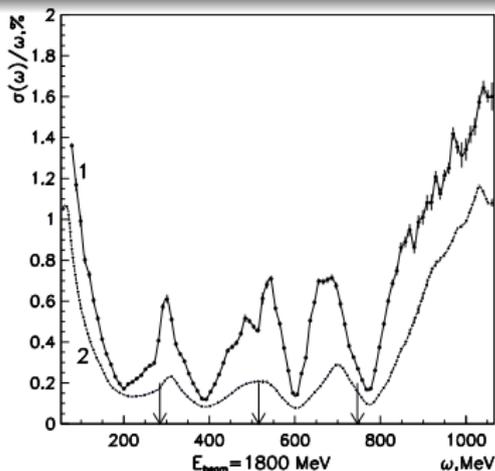
$$W(\gamma\gamma) \approx 2\sqrt{\omega_1\omega_2}$$

Сформировалось два подхода к изучению данных процессов: только по продуктам распада рожденной системы X и с использованием тагирования провзаимодействовавших частиц пучка (рассеянные электроны, РЭ).

- **No-tag** метод – параметры рожденной системы восстанавливаются только по продуктам распада в центральной части детектора. Применяется на большинстве детекторов. Хорошо работает при изучении малочастичных конечных состояний рожденной системы X .
- Если детектор может регистрировать обе рассеянные частицы пучка (РЭ – рассеянные электроны), так называемый **double-tag** метод, то, измеряя энергии РЭ, кинематические параметры рожденной системы X можно определить независимо от центральной части. При малых углах вылета РЭ $W^2 \approx 4\omega_1\omega_2 = 4(E_b - E_{e-})(E_b - E_{e+})$, где $\omega_{1,2}$ – энергии виртуальных фотонов, а $E_{e+,e-}$ – энергии РЭ.
- В промежуточном случае регистрация одного РЭ (**single-tag**) дает дополнительную информацию для кинематической реконструкции и помогает подавлению фона.



- Рассеянные Электроны с энергией $E_{e\pm} = E_b - \omega$, выводятся с равновесной орбиты поперечным полем поворотных магнитов коллайдера.
- Линзы вблизи места встречи создают фокусирующую систему — для каждой энергии $E_{e\pm}$ траектории РЭ собираются в фокус, расположенный между местом встречи и некоторой точкой за блоком TS4.
- Блоки системы регистрации TS (Tagging System = CPPЭ) расположены вдоль вакуумной камеры на удалении 9-17 м от места встречи — 2 набора по 4 модуля.
- Мониторы светимости LM (сэндвич Pb+Sc), кроме своей прямой задачи, позволяют подавить фоновые РЭ от процесса тормозного излучения $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$, ветируя события с реальными



Разрешение $\sigma(\omega)/\omega$ при $E_b = 1.8$ ГэВ для излученного γ -кванта. Линия 1 соответствует виртуальным фотонам в двухфотонных событиях, линия 2 — для реальных γ в событиях ОТИ, разрешение лучше благодаря меньшему угловому разбосу. Стрелками отмечены границы блоков СРРЭ. Для энергии 5 ГэВ разрешение ухудшается примерно в 1.5 раза за счет увеличения углового и энергетического разбросов.

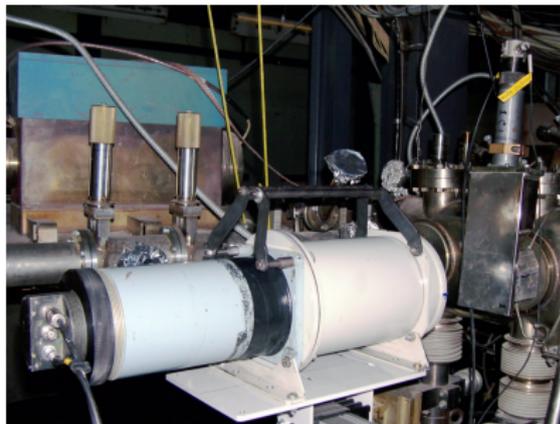
- В СРРЭ попадают РЭ с энергией $(0.4 \div 0.97) \cdot E_b$.
- Блоки расположены так, чтобы “ловить” фокус для некоторого интервала энергий.
- Для РЭ вблизи фокуса координата в плоскости орбиты слабо зависит от угла вылета и, в основном, определяется их энергией. Это позволяет сделать обратный пересчет и точно определить энергию РЭ по его координате в блоке.
- Реальное разрешение СРРЭ для блока TS4 было проверено (уже довольно давно) с помощью обратного Комптоновского рассеяния. Результаты близки к расчетным.
- При работе с реальными γ -квантами СРРЭ может быть использована для измерения разрешения прототипов калориметра. Это было сделано на этапе изготовления калориметра для детектора Belle.

- Поскольку $W \approx 2\sqrt{\omega_1\omega_2}$, то система $\gamma\gamma$ может рождаться при столкновении фотонов разных энергий. При этом "запутываются" все блоки, а разрешение по инвариантной массе $\frac{\Delta W}{W} \sim \frac{\Delta\omega}{\omega}$ будет определяться мягкими фотонами.
- Можно сделать вывод, для сохранения достоинств системы мечения, систематическая ошибка определения энергии γ -кванта не должна превышать 0.2% для TS4 и 0.5% для TS1.
- Таким образом, нужна была методика калибровки СРРЭ измерению энергии, которая сможет обеспечить нужную точность. Опора только на моделирование и расчеты, исходящие из параметров магнитной системы коллайдера и геометрического положения блоков, показалась не слишком надежной.
- Для этих целей была спроектирована и изготовлена комплексная калибровочная система, включающая лазер и BGO калориметр для каждой из сторон e^+e^- .
- BGO калориметр размещался на подвижной подставке и занимал место на линии вывода фотонов ОТИ только на время калибровки.
- Лазеры работали и во время основного эксперимента. Отслеживая положение края Комптоновских электронов в СРРЭ можно следить за стабильностью магнитной системы коллайдера.



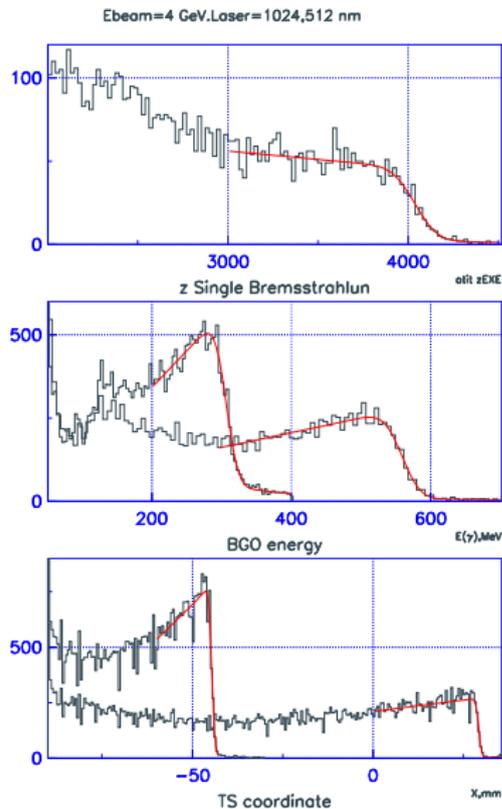
Лазер, мощность несколько Вт, работает в импульсном режиме с привязкой к фазе пучка. Может работать на двух гармониках с энергией фотонов 1.17 и 2.34 эВ. Свет направляется навстречу пучку и формирует поток отраженных γ -квантов — Обратное Комptonовское Рассеяние (ОКР).

- При рассеянии на релятивистском пучке форма спектра отраженных фотонов имеет резкий край на кинематическом пределе $\omega_{max} \simeq 4(E_b/m_e)^2 \omega_{laser}$. Размытие края определяется энергетическим и угловым разбросом пучка, как и для РЭ.
- Длина волны лазера известна с точностью $\sim 10^{-6}$, энергия пучка точность 1 МэВ (без точной калибровки коллайдера). Тогда точность по ω_{max} будет лучше 10^{-3} .
- Таким образом, при применении лазера мы получаем РЭ в системе мечения и γ -кванты в мониторе светимости LM, позволяющие откалибровать обе системы с точностью лучше 0.1%. Измерение фактической ширины края позволяет непосредственно увидеть разрешение СРРЭ.
- Как недостаток, лазерная калибровка, при фиксированной E_b возможно только в 2х точках по энергии и только в блоке TS4.



Калориметр на основе большого кристалла ВГО, время высвечивания $0.3\mu\text{s}$, световой выход около 8000 фотонов (450 фотоэлектронов) на 1 МэВ. Детектор установлен на дистанционно управляемой передвижной площадке. Перед детектором стоит сцинтилляционный счетчик для вентирования конвертированных γ .

- Кристаллы ВГО максимального доступного размера (вес ~ 10 кг) были приобретены у производителя (инст. Неорганической химии, СО РАН, г.Новосибирск).
- Рядом с детектором расположен предусилитель $\times 12$. После него сигнал передается по коаксиальному кабелю на 25 м к усилителю-формирователю ($\tau = 2\mu\text{s}$) и далее передается в DAQ КЕДРА на оцифровку. Кроме того, здесь же готовится быстрый сигнал ($\tau = 0.2\mu\text{s}$) для триггера.
- Имеется встроенный тестовый светодиод. Предполагалось использовать его для мониторингования стабильности калориметра и цифровых плат.



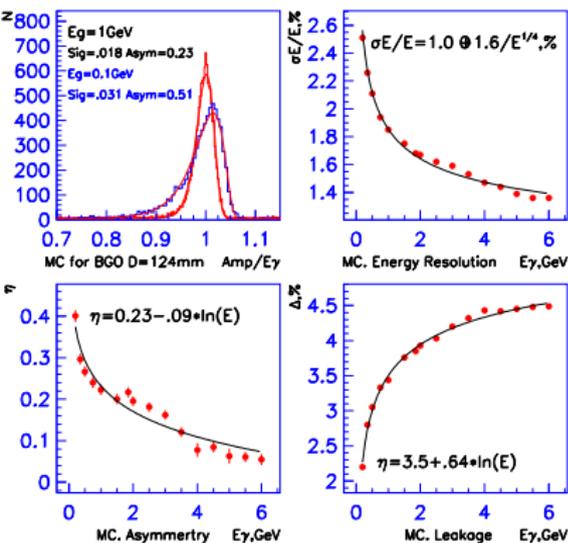
- Процесс однократного тормозного излучения (ОТИ) $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ хорошо известен с теоретической и с практической стороны. В этом процессе встречная частица практически не меняет своего движения, другая частица излучает фотон, при этом $E_e = E_b - E_\gamma$.
- Спектр γ -квантов имеет довольно резкий край на максимальной энергии, равной энергии пучка E_b .

Данные были набраны при $E_b = 4000$ МэВ. На рисунке показаны типичные:

- Спектр ОТИ в BGO, уже после нескольких итераций калибровки. По горизонтали — энергия в МэВх.
- Спектры обратного Комптона в BGO, соответствующие двум линиям лазера.
- Два спектра обратного Комптона в блоке TS4. По горизонтали — координата в мм.

Моделирование BGO калориметра.

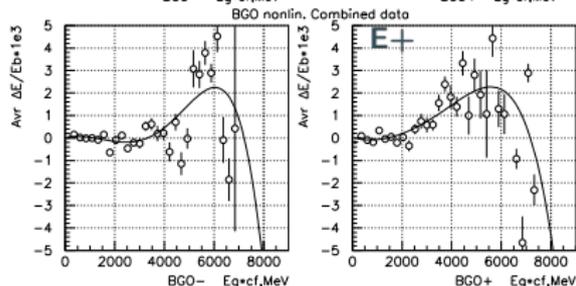
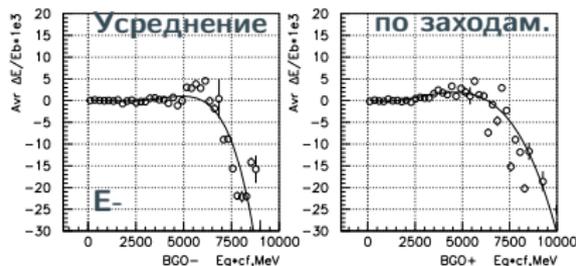
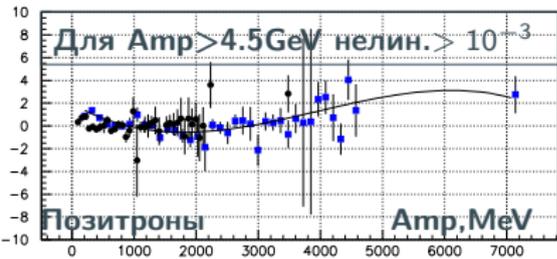
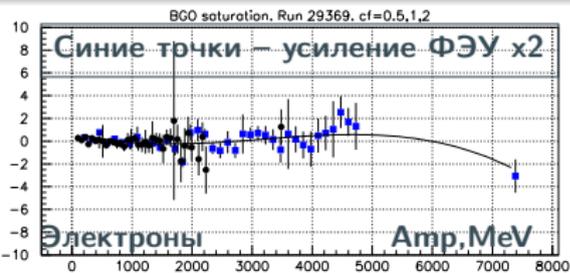
Simulation of the BGO



Расчетные параметры калориметра, полученные при моделировании программой GEANT-3.

- Для проверки деталей процедуры калибровки по краям спектров (ОТИ и Комптон), гамма-кванты генерились как в виде набора дискретных линий, так и в виде континуума.
- Как видно из графика, из-за утечек ливня, калориметр будет иметь нелинейность на уровне нескольких процентов.
- Дополнительную нелинейность вносит внутренняя неоднородность кристалла. С помощью коллимированного источника Cs^{137} была промерена продольная неоднородность обоих калориметров. В меньшем кристалле неоднородность составила 1%, а для большого наблюдалось падение амплитуды на 4% при приближении к ФЭУ. Влияние на вклад в общую нелинейность калориметра $< 0.1\%$.

Аппаратурные нелинейности.



Наличие СРЭ позволило нам увидеть появление нелинейности в калориметрах.

Идея состоит в том, что мы набираем последовательно два-три захода, увеличивая коэффициент усиления ФЭУ в 2-3 раза. Затем мы выравниваем амплитуды в разных заходах, опираясь на энергию мягких γ -квантов, измеренную по трекам TS3, TS4. Нелинейность будет видна в жесткой части спектра, что и показывают рисунки.

- **Нелинейность калориметра BGO на краю спектра, $Amp = E_b$.**

Таким образом мы обнаружили, что, начиная с некоторой амплитуды сигнала с калориметра, нелинейность канала превышает нашу целевую величину 10^{-3} . Пока нам не удалось выяснить, какой элемент из цепочки *ФЭУ–Предусилитель–Усилитель–формирователь* имеет это ограничение. Мы несколько понизили рабочее напряжение на ФЭУ, увеличив шумовой вклад в разрешение BGO.

- **Измерение пьедестала, $Amp = 0$.**

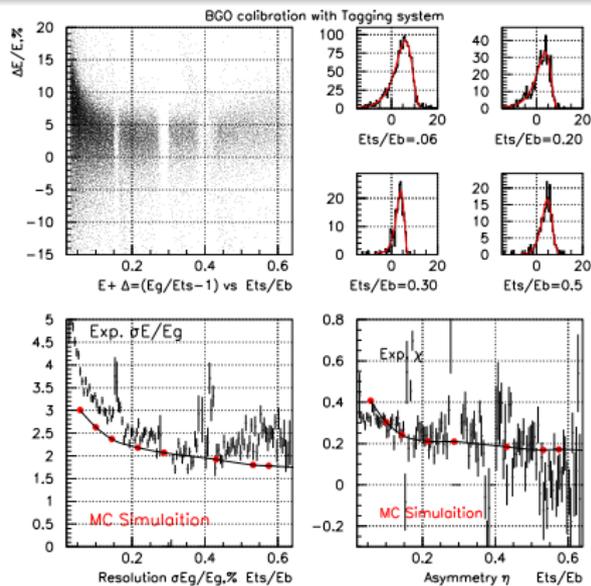
Обычно, для измерения пьедестала достаточно набрать события со случайным запуском. Но, к сожалению, многие АЦП имеют нелинейность в начале шкалы (хотя бы потому, что они всегда выбирают положительные всплески на фоне шумовых флуктуаций около нуля). Для нашей электроники оценка и косвенные измерения показали, что это отклонение составляет около 10 каналов или единицы МэВ. Мы могли бы эффективно уменьшить МэВы, поднимая коэффициент усиления ФЭУ. Но, как сказано выше, в этом мы ограничены.

Сейчас мы применяем некую процедура интерполяции к началу шкалы, но вопрос об финальной точности пока не вполне ясен. Калибровки по Комптоновскому спектру ($Amp \leq 0.1E_b$) прояснить этот вопрос.

Ниже мы покажем это на примере реальных спектров.

- Таким образом, точную калибровку BGO предполагается делать по 4ем точкам: пьедестал ($A = 0$), край спектра ОТИ(E_b) и два края Комптона($\leq 0.1E_b$).
- Внутренняя нелинейность кристалла поправляется по моделированию. Опыт работы показывает, что эта часть моделируется достаточно хорошо.
- Измеренная температурная стабильность BGO составляет 2% на 1 градус. Поскольку мы не можем обеспечить стабильность уровне 0.1 градуса, дрейф коэффициентов будет заметным.
- Калибровка должна делаться для каждого захода по внутренним данным. Поэтому калибровочный заход долже содержать в себе все типы событий в досточном количестве.
- Чтобы правильно найти положение края мы должны сделать свертку спектров с функцией разрешения детектора. В нашей параметриизации (логарифмический Гаусс) эти три параметра – Пик, Ширина и Асимметрия("хвост"в сторону меньших энергий).
- Если исходный спектр известен точно, то, формально, все три параметра можно заложить в подгонку. В реальности, спектр может быть искажен процедурой отбора, например, если эффективность зависит от энергии. Если мы это не учитываем, то подгонка даст смещенный результат.

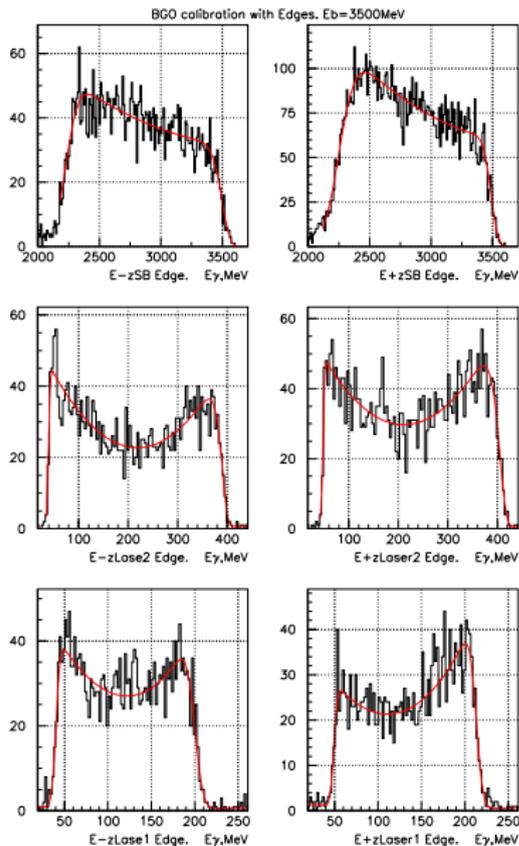
Точная калибровка ВГО calorimetра-1.



Измерение функции отклика ВГО calorimetра на событиях ОТИ при энергии $E_b=3500$ МэВ. Для ширины и асимметрии показано сравнение с моделированием

- По набранным событиям ОТИ можно проверять корреляцию между информацией о γ -квантах в calorimetре и треками в СРРЭ, проводя итерации и улучшая качество обработки в обеих системах. Даже не имея точной энергетической калибровки СРРЭ, мы можем получить много пользы для изучения параметров ВГО calorimetра.
- Принимая во внимание, что энергетическое разрешение по РЭ гораздо лучше, чем разрешение calorimetра, мы можем подгонять распределения $(E_\gamma - E_{TS})$ и непосредственно измерить функцию отклика calorimetра.
- Результаты анализа показаны на рисунке. Подстройка моделирования в данном случае не делалась (надо наложить правильные шумы). Поэтому согласие эксперимента и моделирования

Точная калибровка BGO калориметра-2.



Пример спектров для калибровки BGO калориметра, набранных во время одного захода (примерно 30 минут набора).

Для примера, статистическая точность калибровки для ОТИ – примерно 3500 ± 6 МэВ, для Комптона 405 ± 1.4 МэВ и 214.3 ± 0.8 МэВ.

Результаты калибровки калориметров

По данным одного захода полученные следующие результаты (для иллюстрации ограничений со стороны статистики).

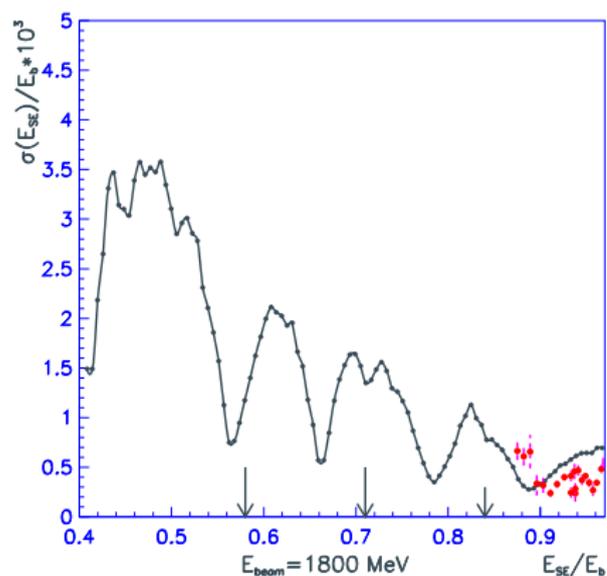
Сторона, Источник	Ожидаемое значение	Фит края Спектра	Точность из подгонки	Систематика от Асимметрии	Систематика за счет
Е- Лазер1	203.32	199.70	1.12	?	?
Е- Лазер2	387.43	389.24	1.06	1.2	1.2
Е- ОТИ	3478.20	3479.33	7.67	6.1	2.1
Е+ Лазер1	205.32	214.22	0.52	1.1	0.6
Е+ Лазер2	387.76	404.83	0.96	0.6	0.3
Е+ ОТИ	3478.20	3470.13	6.06	4.4	3.0

Какие выводы мы можем сделать:

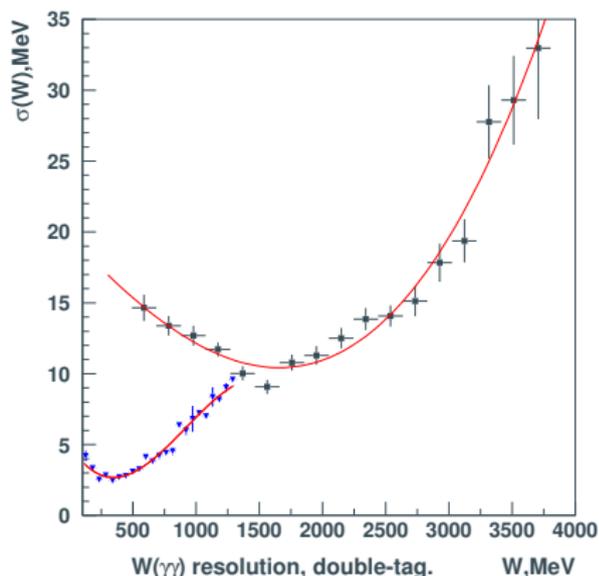
- Статистическая точность калибровки за один заход составляет $2 \cdot 10^{-3}$.
- Ошибка определения нуля (по пьедесталам АЦП) составила 2 ± 1.5 для электронной стороны и 10 ± 2 для позитронной стороны. Надо посмотреть больше заходов.
- Ошибки калибровки из-за неточного знания функции отклика детектора (асимметрия) и формы спектра (например, влияние эффективности) находится на уровне $(1 \div 2) \cdot 10^{-3}$.
- Полная точность калибровки шкалы калоримера на уровне $2 \cdot 10^{-3}$ кажется достижимой.

- Специализированная Система Регистрации Рассеянных Электронов (СРРЭ) на коллайдере ВЭПП-4М предназначена для изучения двухфотонной физики на детекторе КЕДР так называемым *double-tag* методом.
- Чтобы полностью использовать возможности СРРЭ, систематическая ошибка определения энергии рассеянных электронов не должна превышать нескольких промилле от энергии пучка.
- Для решения этой задачи была спроектирована и изготовлена комплексная калибровочная система, включающая в себя:
 - Два лазера для получения высокоэнергетических γ -квантов методом Обратного Комптоновского Рассеяния (ОКР).
 - Два калориметра высокого разрешения на основе больших кристаллов ВГО.

- Система была запущена в работу и уже прошла через различные настройки и оптимизации.
- В эксперименте лазерная система работает в автоматическом режиме, осуществляя подстройку интенсивности Комптона, и регулярно переключая длину волны лазеров.
- Система калибровки уже отработала несколько лет, набрав значительное количество калибровочных заходов.
- Надеемся в умеренно скором будущем закончить работы по калибровке системы калибровки и применить эти результаты для двухфотонной физики!



Расчетное энергетическое разрешение по энергии РЭ. Красные точки показывают измеренное в эксперименте разрешение по краю комптоновского спектра. Стрелками отмечены границы блоков СРЭ



Расчетное разрешение по $W(\gamma\gamma)$ для двойного тагирования (РЭ2). Верхняя линия соответствует энергии пучка 5 ГэВ, нижняя 1.8 ГэВ

- СРРЭ регистрирует РЭ с нулевым углом вылета
- Использование СРРЭ в режиме двойного тагирования позволяет измерять инвариантную массу рожденной $\gamma\gamma$ с разрешением 10-20 МэВ без требования полной реконструкции события в центральной части детектора
- Это дает значительные преимущества для изучения $\gamma\gamma$ процессов по сравнению с предыдущими экспериментами
- СРРЭ запущена в полном составе, работает штатно, параметры системы близки к расчетным

Основными задачами детектора КЕДР по двухфотонной физике являются:

- Измерение полного сечения процесса $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ с интервале $W(\gamma\gamma)$ от 1 до 4 ГэВ. СРРЭ дает существенные преимущества по сравнению с предыдущими экспериментами
- Исследование эксклюзивных процессов при малых инвариантных массах, недоступных по триггеру для В-фабрик

Для этих задач необходим интеграл светимости около 100 пб^{-1}

- В случае существенно большего интеграла светимости возможно изучение узких очарованных резонансов η_c , $\eta_c(2S)$ и т.д.

