

Изучение двухфотонных процессов в эксперименте с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М

Жилич В.Н.

16 апреля 2021 г.

Семинар ФЭЧ ИЯФ

Цели семинара:

- Обсуждение физической программы КЕДР по двухфотонной физике
- Обзор результатов по двухфотонной физике, доступных для изучения на КЕДР в нашей области энергий.
- Роль Системы Регистрации Рассеянных Электронов КЕДР (СРРЭ, она же TS) в эксперименте

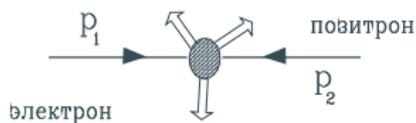
План семинара:

- 1 Что такое двухфотонные события?
- 2 Эксклюзивные/двухчастичные процессы
- 3 Изучение С-четных резонансов, эксклюзивная и инклюзивная моды
- 4 Инклюзивные процессы. Полное сечение рождения адронов
- 5 Измерение сечение $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$
- 6 Изучение топологии многоадронных событий в двухфотонных процессах
- 7 Моделирование $\gamma\gamma$ процессов
- 8 Система регистрации рассеянных электронов КЕДР (СРРЭ, TS)
- 9 Выделение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$
- 10 Достоинства СРРЭ
- 11 Заключение

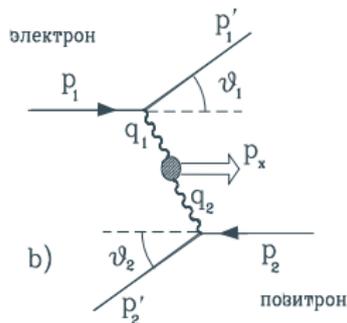
Что такое двухфотонные события?

Это не $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, а $\gamma\gamma \rightarrow X$
или, если мы говорим о встречных пучках,

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



a)



Двухфотонное взаимодействие e^+e^- .

Энергию виртуального фотона и другие
параметры рожденных частиц можно

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

$$q_1^2 = -|p_1||p'_1|\vartheta_1^2 - O(m_2^2),$$

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

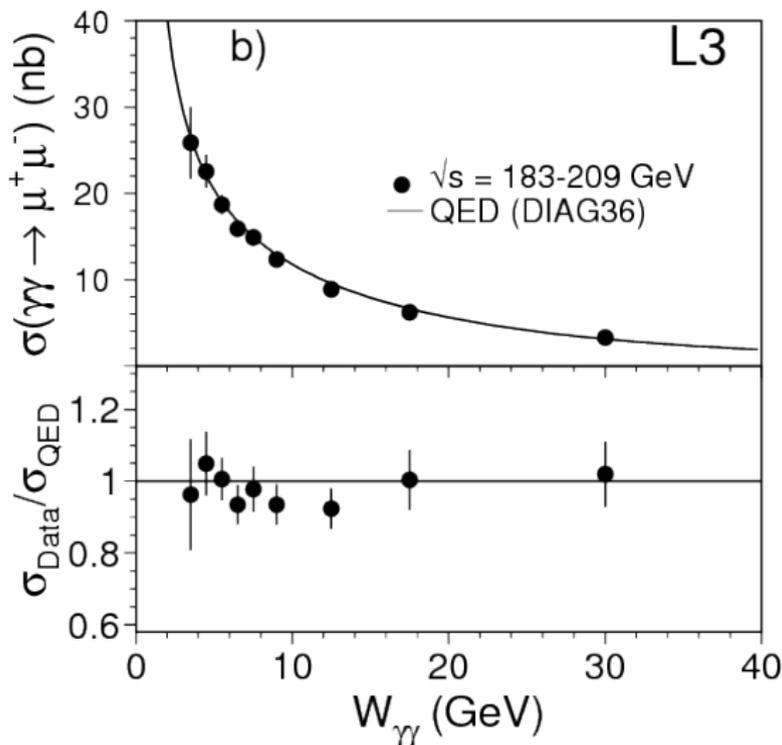
Однофотонная аннигиляция e^+e^-

Что такое двухфотонные события?

- В качестве системы X могут рождаться пары *лептонов/мезонов/барионов*, *C-четные адронные резонансы* и другие *многоадронные* ($N_{hadr} \geq 3$) системы
- Сечение рождения пар лептонов можно рассчитать в рамках QED.
- Чтобы выйти на уровень точности 1% требуется корректный учет рад.поправок, что уже не просто. В частности, у нас есть проблемы с их учетом для процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + e^+e^-$
- Для адронных систем требуется применение QCD в области низких энергий, где не существует надежных методов вычислений
- В рамках метода эквивалентных фотонов можно рассчитать функцию светимости $\mathcal{L}(W)$ такую, что $\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^- X) = \int_0^{2E_b} \mathcal{L}(W) \sigma(\gamma\gamma \rightarrow X) dW$. Пересчитывая обратно, мы можем говорить об измерении двухфотонного сечения
- Я расскажу о доступных для изучения на КЕДР процессах в ранне перечисленном порядке

- Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \mu^+\mu^-$ при $E_b = 4.7$ ГэВ составляет около 60 нб, а $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + e^+e^-$ в 100 раз больше. Правда, 99% рожденных e^+e^- улетает вдоль пучка и не регистрируются детектором
- Изучение этих процессов важно/неизбежно для анализа двухфотонных событий
- Данные процессы служат для контроля интегральной $\gamma\gamma$ -светимости, эффективности детектора и СРРЭ. Поиск по публикациям показал, что никто не получал точность лучше 3-5%
- В работе¹ наших коллег из Института Математики утверждается, что возможно наблюдение зарядовой асимметрии в этом процессе за счет интерференции с тормозной диаграммой. Более интересно наблюдение асимметрии при рождении пары пионов, но для этого необходим интеграл ≥ 100 1/пб
- Кажется интересным измерить процессы с реальными рад.поправками типа $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ (процесс α^5), который никто еще не измерял

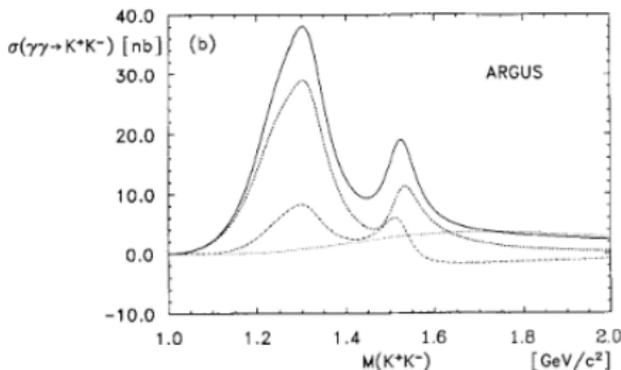
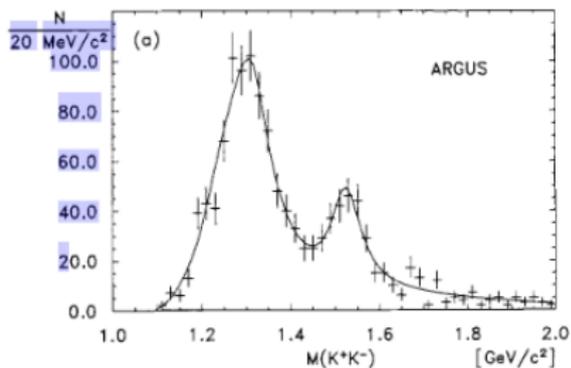
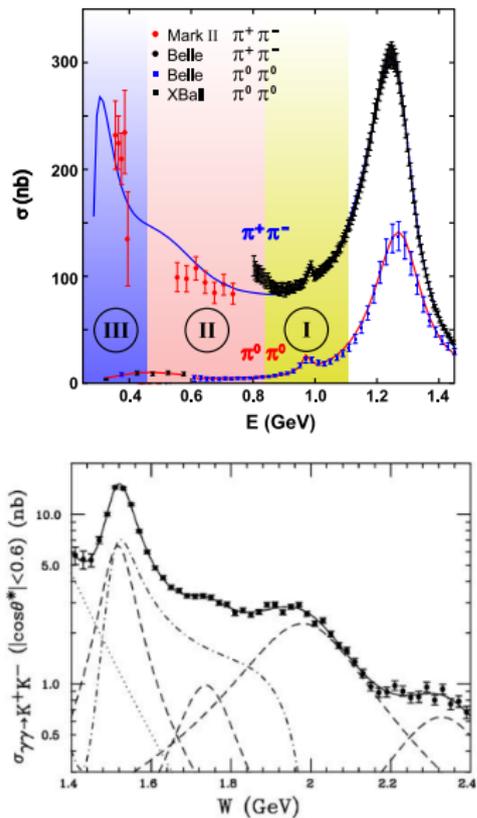
¹I.F. Ginsburg et al, Eur. Phys.J. C (2001)



Измеренное сечение процесса $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ (коллораация L3, LEP) и результаты расчета. Ошибки в точках 5-20%.

- Сечение этих процессов примерно в 10 и 100 раз меньше, чем $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \mu^+\mu^-$
- Так как инклюзивное изучение двухфотонных процессов планируется проводить для множественности $N_{ch} + N_n \geq 3$, то эти процессы являются необходимым дополнением к полному сечению $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$
- Здесь придется конкурировать с результатами Belle (90 1/фб) и ARGUS(280 1/пб)
- Однако, у КЕДР есть некоторое преимущество:
 - КЕДР может регистрировать процессы с меньшей инвариантной массой, чем ARGUS и Belle, по пионам ≥ 0.4 ГэВ. Поэтому такие измерения будут полезными, невзирая на меньший интеграл
 - Если получится настроить триггер на условие 1пучковая*РЭ2, тогда мы сможем заметно поднять эффективность регистрации (пока неясен вопрос о возможности подавлении фона при реконструкции события.)

Двухфотонная физика на Belle и ARGUSe



Измерения сечение процессов $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $K^+ K^-$ на детекторах Belle и ARGUS

- Сечение рождения резонанса пропорционально $(2J + 1)\Gamma_{\gamma\gamma}/M_R^3$ где J–спин частицы, M_R –масса. Двухфотонная ширина $\Gamma_{\gamma\gamma} = \Gamma_{tot} \cdot Br_{\gamma\gamma}$ может быть рассчитана в рамках различных моделей, она зависит от кваркового состава и волновой функции. Это помогает разбираться с внутренним строением резонансов
- В этих процессах КЕДР не может претендовать на рекордную точность, в связи с малым интегралом. Особенно для тех резонансов, которые распадаются на пару π или K , например, $f_2(1270)$
- Однако, применяя метод одиночного или двойного тагирования, можно выделять резонансы с улетевшими частицами, что резко повышает эффективность и позволяет получить вполне конкурентоспособные результаты
- Результаты МД-1 по двухфотонной ширине η, η', a_2 до сих пор присутствуют в PDG (20 1/пб, 35(!) лет назад).
- При наборе интеграла светимости ≥ 100 1/пб измерения КЕДР будут одними из лучших по точности.

Двухфотонное рождение очарованных C-четных резонансов

- Мезоны $\eta_c, \eta_c(2S), \chi_0, \chi_2$ тяжелые, поэтому их сечение рождения подавляется фактором $1/M^3$ и эффективной $\mathcal{L}(\gamma\gamma)$ светимостью
- Сечение рождения η_c равно 7(10) пб при $E_b=3.7(4.5)$ ГэВ
- В отличие от других детекторов КЕДР может их изучать в инклюзивной моде, не требуя полной реконструкции, а массу определять по двум рассеянным электронам с разрешением около 15 МэВ. Что дает значительное увеличение эффективности регистрации
- Конкурентные результаты можно получить на интеграле ≥ 200 1/пб, когда число рожденных резонансов составит несколько сотен. При этом большое значение имеет энергия пучка, на которой набран интеграл светимости
- Для $\eta_c(2S)$ данные по $\Gamma_{\gamma\gamma}$ противоречивы, так что практически любое

$\eta_c(2S)$ PARTIAL WIDTHS

$\Gamma(\gamma\gamma)$					Γ_{16}
VALUE (keV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT	

• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •

0.44 ± 0.14	106	²⁰ XU	18	BELL $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta/\pi^+\pi^-$	
1.3 ± 0.6		²¹ ASNER	04	CLEO $\gamma\gamma \rightarrow \eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	

²⁰ Assuming that the branching fraction into $\eta/\pi^+\pi^-$ is the same as for $\eta_c(1S)$.

²¹ They measure $\Gamma(\eta_c(2S)\gamma\gamma) B(\eta_c(2S) \rightarrow K\bar{K}\pi) = (0.18 \pm 0.05 \pm 0.02) \Gamma(\eta_c(1S)\gamma\gamma) B(\eta_c(1S) \rightarrow K\bar{K}\pi)$. The value for $\Gamma(\eta_c(2S) \rightarrow \gamma\gamma)$ is derived assuming that the branching fractions for $\eta_c(2S)$ and $\eta_c(1S)$ decays to $K_S^0 K \pi$ are equal and using $\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow \gamma\gamma) = 7.4 \pm 0.4 \pm 2.3$ keV.

измерение будет важным

Полное сечение рождения адронов в двухфотонных процессах

- Особый интерес представляет полное сечение перехода $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ (здесь *hadrons* - любая адронная система)
 - In pre-QCD times, in order to describe the behaviour of scattering amplitudes at high energy, s , and small momentum-transfer squared, t , Regge theory was developed and successfully applied in a wide range of energies. The Regge approach is based on the singularities of amplitudes in the complex angular momentum, j , plane.
- Используя довольно общие предположения, можно связать сечение $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ с полным сечением процессов γN и NN , где N - любой нуклон (чаще всего протон), и получить зависимость² от инвариантной массы $W_{\gamma\gamma}$ в интервале 2÷8 ГэВ

$$\sigma(\gamma\gamma \rightarrow hadrons) = A + B/W.$$

Первый член определяется померонным обменом, второй обменом f_2, a_2

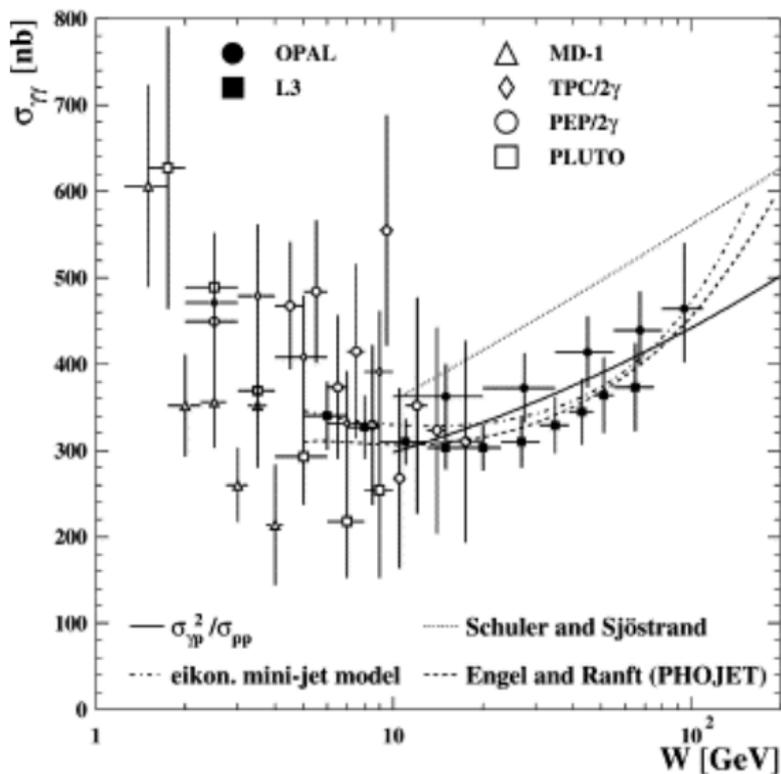
- В некотором приближении
$$A = \sigma_{asympt}^2(\gamma N) / \sigma_{asympt}(NN) \approx 240 \text{ нб} \quad (250 \div 300 - \text{ в зависимости от способа расчета}),$$
$$B \approx 270 \text{ нб} \cdot \text{ГэВ} \quad (260 \div 370)$$

²Первую ссылку дают на J.L.Rosner, Brookhaven rep. CRISP 71 26 (1971), но этой публикации я не нашел. Результаты другого расчета взяты из статьи I.F. Ginzburg, V.G. Serbo, Phys.Lett 109B (1982) 231

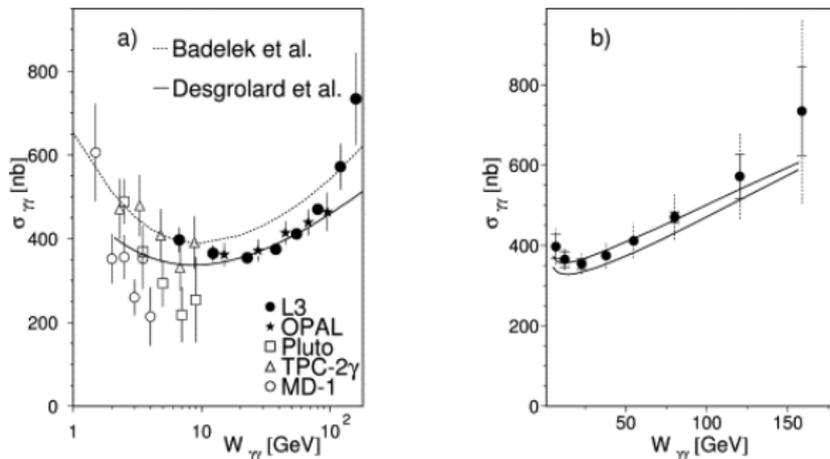
Полное сечение рождения адронов в двухфотонных процессах

- Значительное число работ по этой теме было выполнено в 80-х и начале 90-х годов. Последние 10-15 лет интерес к $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ лежит в области больших энергий (LEP+LHC). Там наблюдается степенной по s (причем с дробной степенью) рост сечения, который, при этом, объясняется теорией.
- А в области $W < 5$ ГэВ, как правило, исследуются фиксированные конечные состояния, в частности события с большой виртуальностью $\gamma\gamma^*$ (Belle, BABAR и др.)

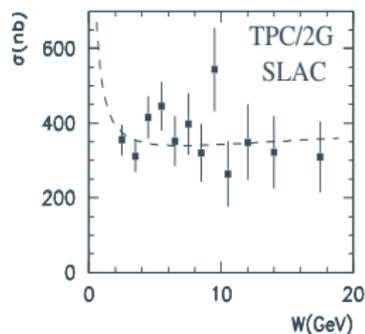
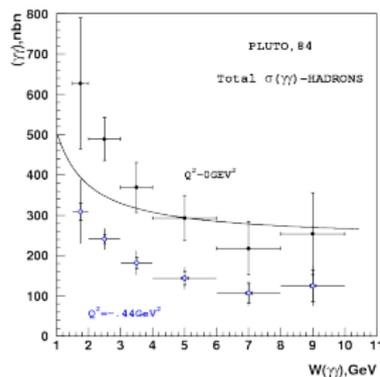
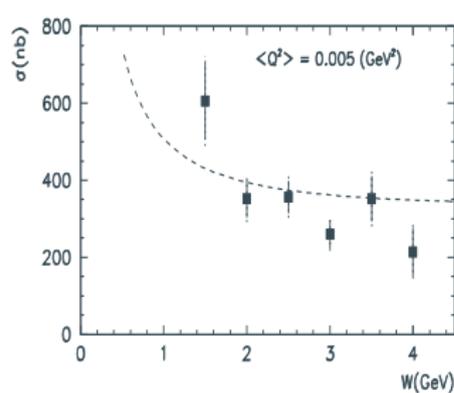
Экспериментальные данные по $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$



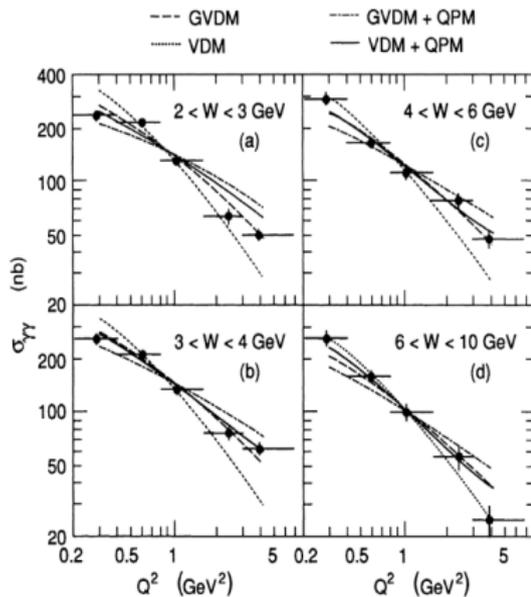
Измерение сечения $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$, компиляция данных за 40 лет



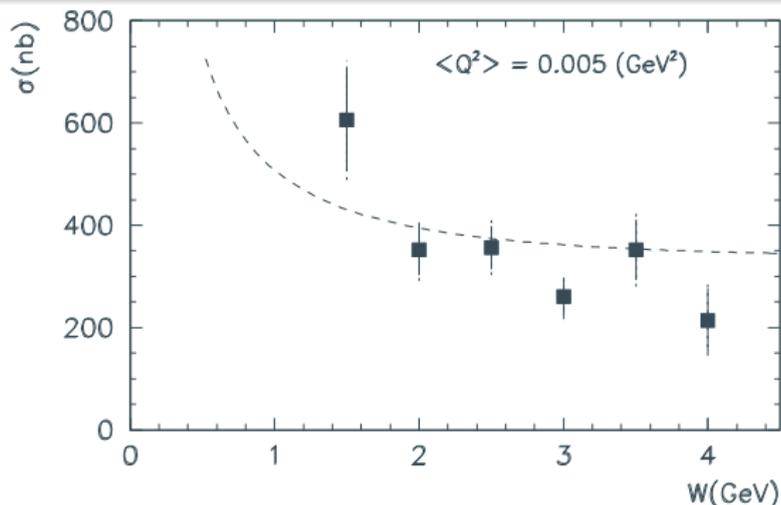
Сечение $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$, измеренное разными детекторами. Сравнение с двумя теоретическими моделями. Данные в области низких энергий могут влиять на выбор модели



Результаты измерения полного сечения $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$, полученные на детекторе МД-1 (Новосибирск, ИЯФ) в 1983-1985 гг., PLUTO (1984) и ТРС/2 γ (1990). Результаты на МД-1 получены при $Q^2 \approx 0.005 \text{ ГэВ}^2$, PLUTO – $Q^2 \geq 0.44 \text{ ГэВ}^2$, ТРС/2 γ – $Q^2 \geq 0.2 \text{ ГэВ}^2$ (знак у Q^2 опущен). На всех картинках показана теоретическая кривая $\sigma(W_{\gamma\gamma}) = 240 + 270/W$



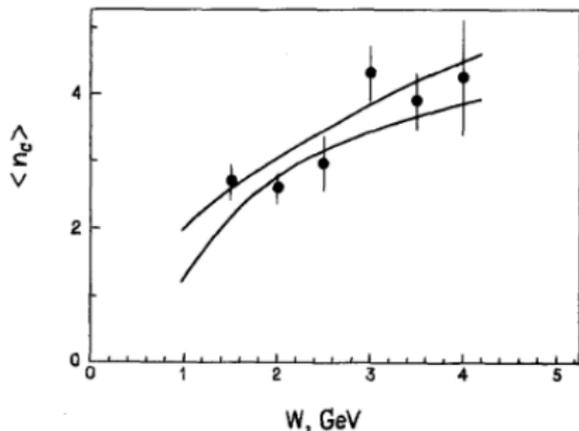
В ТРС/2 γ тагировали электроны при больших углах вылета. Поэтому $\langle Q^2 \rangle$ изменялся в пределах 0.2÷5 ГэВ². При этом сечение $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ падало почти в 10 раз при больших Q . Для интерполяции к $\langle Q^2 \rangle = 0$ приходилось использовать различные модели, что давало значительную систематическую ошибку. Аналогичная ситуация была и в эксперименте PLUTO.



- Набрано около 20 1/пб, при энергии $2E = 7.7 - 9.7$ ГэВ
- Инвариантная масса рожденной системы определялась по энергиям рассеянных e^+e^- в double-tag режиме (РЭ2)
- Эффективность по РЭ2 режиму с отбором "вне горизонта" ($\theta_z > 0.5$ мрад): около $\sim 8\%$ в середине диапазона с падением на краях до 2% (если не исключать горизонт — $\sim 20\%$ в максимуме)
- Отбор по центральной части: множественность — $N_{ch} \geq 1$, $N_{ch} + N_{nt} \geq 3$. Плюс критерии для подавления фона Бабы, космики, двухчастных $\gamma\gamma$ процессов и пучкового фона
- 448 событий в интервале $W = 1.25 - 4.25$ ГэВ, из них фон около 12%

- Представляется интересным измерение инклюзивных сечений вида $\gamma\gamma \rightarrow \pi + X, K + X, K_s + X$ в зависимости от $W(\gamma\gamma)$
- Кроме измерения сечения процесса $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ представляется важным изучение других характеристик, таких как энергетические спектры, угловые распределения и т.п.
- Одной из таких характеристик является зависимость средней множественности от инвариантной массы
- Поскольку двухфотонные события являются неизбежным фоном для всех работающих коллайдеров, важно уметь правильно моделировать этот фон. Средняя множественность является удобным параметром для настройки и проверки Монте-Карло генераторов, используемых как для изучения двухфотонных событий, так и для борьбы с ними

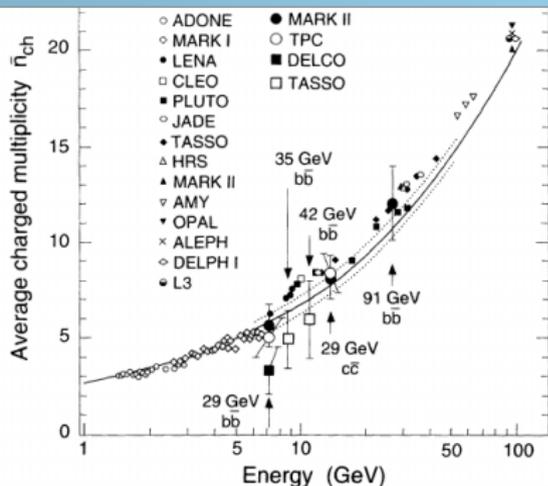
Множественность частиц в процессе $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$



Заряженная множественность в

$\gamma\gamma$ -событиях, измеренная на МД-1.

$$n_{ch} = 1.62^{\pm .37} + 1.83^{\pm .45} \cdot \ln(W(\text{GeV}))$$



Заряженная множественность в процессе

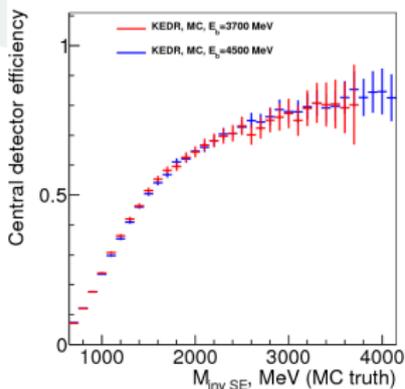
e^+e^- -аннигиляции, компиляция данных

$$\bar{n}_{had}^{corr} = 3.48 + 0.0511 \exp[2.737\sqrt{\ln E_{c.m.}}] - 141 E_{c.m.}^{-1.80}$$

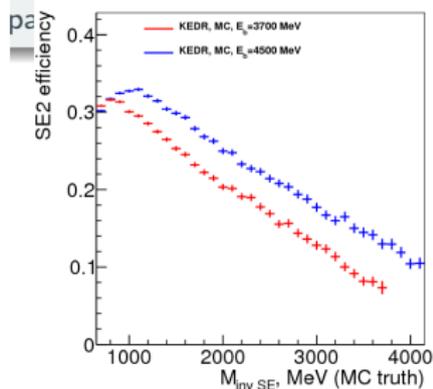
- Точность измерения этой зависимости для двухфотонных процессов во много раз хуже, чем для событий e^+e^- -аннигиляции
- Измерение средней множественности в процессе $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ и формы распределения для N_{ch} (оно необязательно Пуассоновское) было бы полезным для многих исследований

Условия отбора $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$:

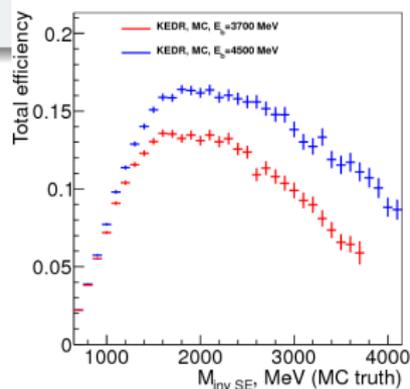
- Зарегистрировано 4 или больше частиц, среди которых, как минимум, две заряженных из места встречи $P_t > 80$ МэВ с некоторыми ограничениями на энерговыделение в калориметре



Эффективность по центральной части



Эффективность РЭЭ



Полная эффективность

Использовано моделирование $\approx 200 \text{ пб}^{-1}$, $E_b = 3.7$ и 4.5 ГэВ.
 Добавлялся фон ОТИ из моделирования, использовалось вето от LM.

Ожидаемое число событий $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$

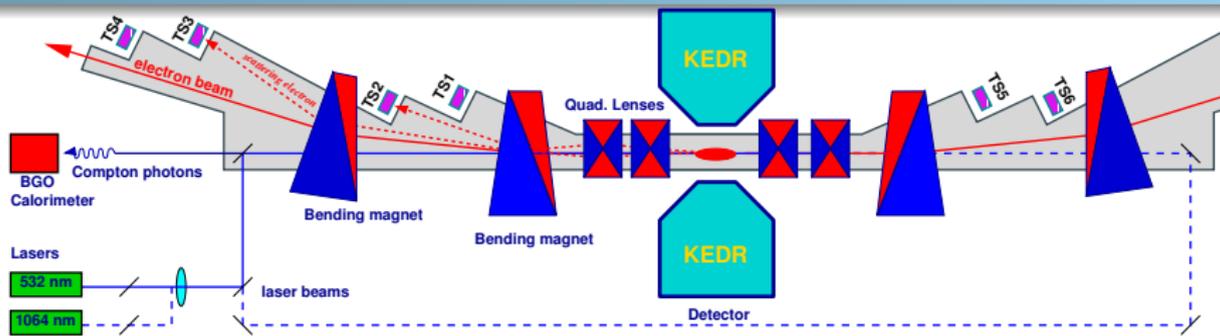
Проведена оценка однофотонного фона, а также оценка пучкового фона и фона на остаточном газе по фоновым заходам с наложением ОТИ из моделирования при средней светимости $5 \cdot 10^{30}$.

Ожидаемое число событий для 200 пб^{-1} :

$W_{\gamma\gamma}, \text{ MeV}$	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
$E_b = 3700 \text{ MeV}, \text{ MC}$	28396	19469	9306	4463	2046	803	<30
Однофотонный фон	579	123	41	22	< 5		
Пучковый фон	~ 320	~ 160	< 136				
$E_b = 4500 \text{ MeV}, \text{ MC}$	36267	27803	14785	7844	4096	2225	1112
Однофотонный фон	594	145	63	25	16	< 5	
Пучковый фон	< 136						
MD, experiment, 20 пб^{-1}		67	82	108	68	56	17

Ожидаемое число двухфотонных событий достаточно велико, чтобы выполнить поставленные задачи.

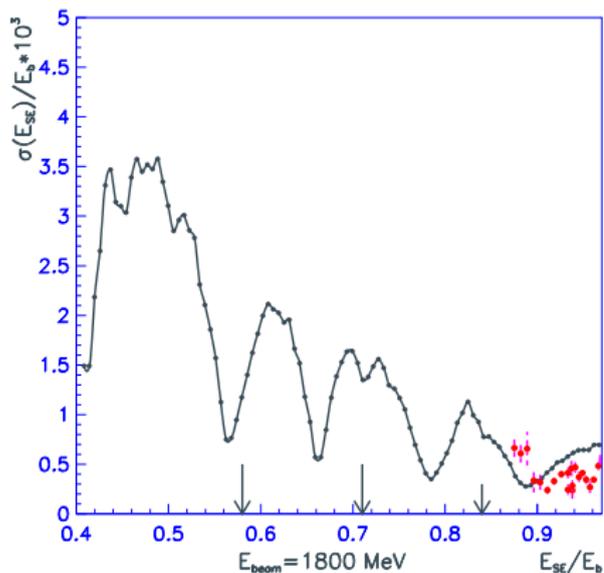
Система регистрации рассеянных электронов КЕДР



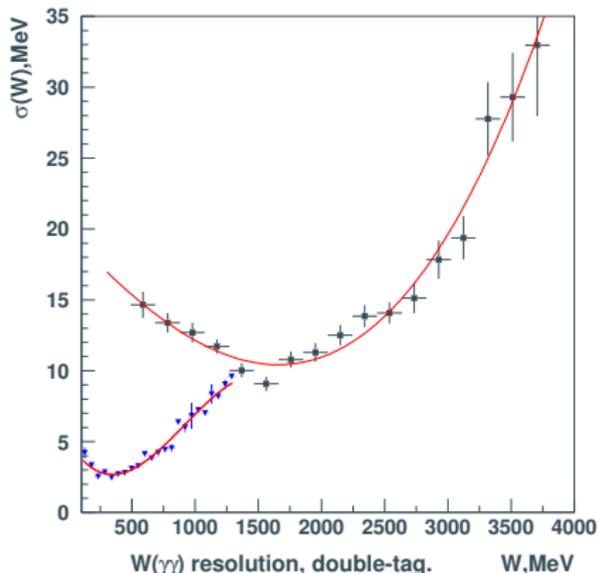
Экспериментальный промежуток ВЭПП-4М.

СРРЭ состоит из:

- Фокусирующие линзы и поворотные магниты – образуют спектрометр с фокусировкой в горизонтальной плоскости
- Координатные блоки регистрации РЕ (8 блоков, TS1–TS4, TS5–TS8), 6 двойных слоев дрейфовых трубочек+1 слой GEM. Координатное разрешение 0.30 мм (0.1 мм с применением GEMов)
- Детекторы однократного тормозного излучения (ОТИ). Во время калибровок – это 2 BGO калориметра высокого разрешения. Во время набора – это мониторы светимости (сэндвич Pb+Sc). Вето от монитора светимости позволяет подавить случайные совпадения ОТИ с событиями $\gamma\gamma$ в центральной части КЕДРа
- Система лазерной калибровки СРРЭ, позволяет уменьшить ошибку определения энергии виртуального фотона до уровня $\frac{\Delta\omega}{\omega} < 1\%$



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



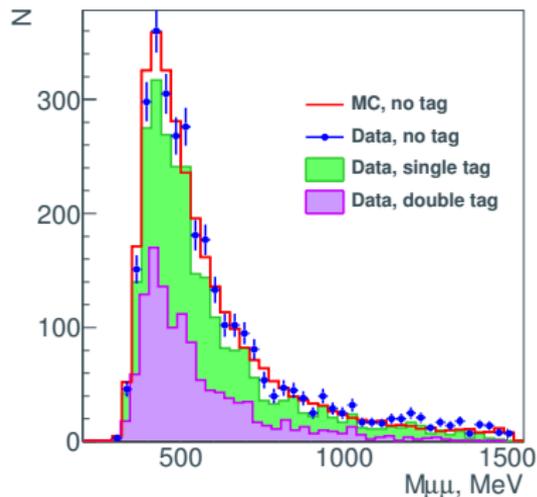
Расчетное разрешение по $W(\gamma\gamma)$ для двойного тагирования (РЭ2). Верхняя линия соответствует энергии пучка 5 ГэВ, нижняя 1.8 ГэВ

События $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$

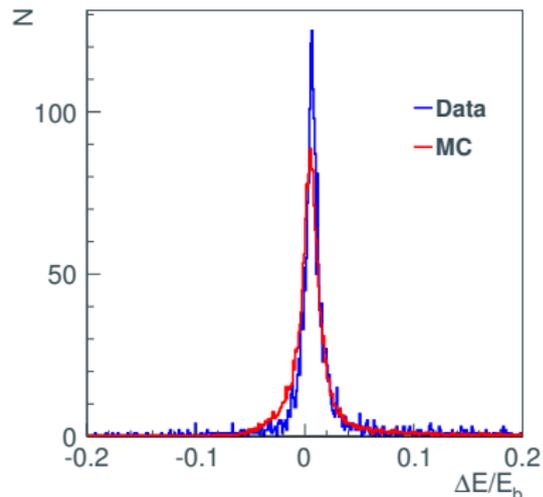
Data: $3014 \pm 56 \pm 83$,

MC: 3185,

Data/MC = 0.946 ± 0.033



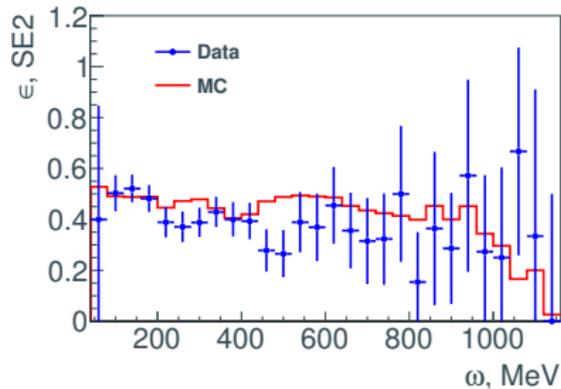
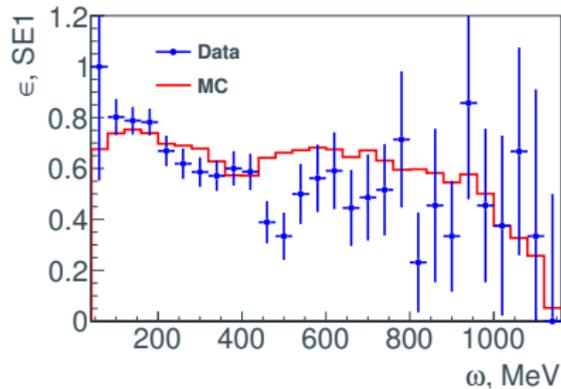
Наблюдаемые спектры для $0,1,2\text{-tag}$ событий



$\Delta E/E_b$, Разность энергии РЭ, кинематически рассчитанной по центральной части, и определенной по CPPЭ

Наблюдается удовлетворительное согласие эксперимента и моделирования по числу событий и по разрешению

Эффективность СРЭ в single-tag и double-tag модах



Наблюдается удовлетворительное согласие эксперимента и моделирования

- 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

На первом этапе эксперимента предполагается:

- Измерение полного сечений процесса $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ в интервале $W(\gamma\gamma)$ от 1 до 4 ГэВ и изучение характеристик событий (распределение по импульсам, углам, множественности и т.п.)
- Изучение эксклюзивных процессов при инвариантных массах $\lesssim 1$ ГэВ, недоступных по триггеру для В-фабрик

Для первого этапа необходимо набрать интеграл светимости 50-100 1/пб.

По результатам первого этапа исследований можно будет оценить возможность и требуемый интеграл светимости для

- Изучения очарованных резонансов $\eta_c, \chi_{0,2}, \eta_c(2S)$

Мы надеемся, что получение новых результатов по процессу $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ стимулирует теоретические работы в этой области.