



Прецизионные измерения характеристик лёгких мезонов с помощью механизма Примакова в JLab

В.А. Матвеев, В.В. Тарасов
НИЦ “Курчатовский институт”

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, 10-13 марта 2026, Новосибирск

План доклада

- Эксперименты в Jlab с использованием примаковского механизма
- Механизм Примакова
- Эксперимент PrimEx
 - - установка
 - - отбор событий
 - - результаты измерений
- Эксперимент PrimEx-eta
- Эксперименты CPP/NPP

Эксперименты на прецизионных фотонных пучках в Jefferson Lab основанные на механизме Примакова

Эксперименты:

В Hall B в лаборатории им. Т. Джефферсона

1) PrimEx — прецизионное измерение времени жизни(ширины распада) нейтрального пиона в реакции $\gamma\text{Pb}(\text{Si},\text{C}) \rightarrow \pi^0 \text{Pb}(\text{Si},\text{C}); \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.

В Hall D в лаборатории им. Т. Джефферсона

2) PrimEx-eta - прецизионное измерение ширины распада эта-мезона в реакции $\gamma \text{}^4\text{He} \rightarrow \eta \text{}^4\text{He}; \eta \rightarrow \gamma\gamma$.

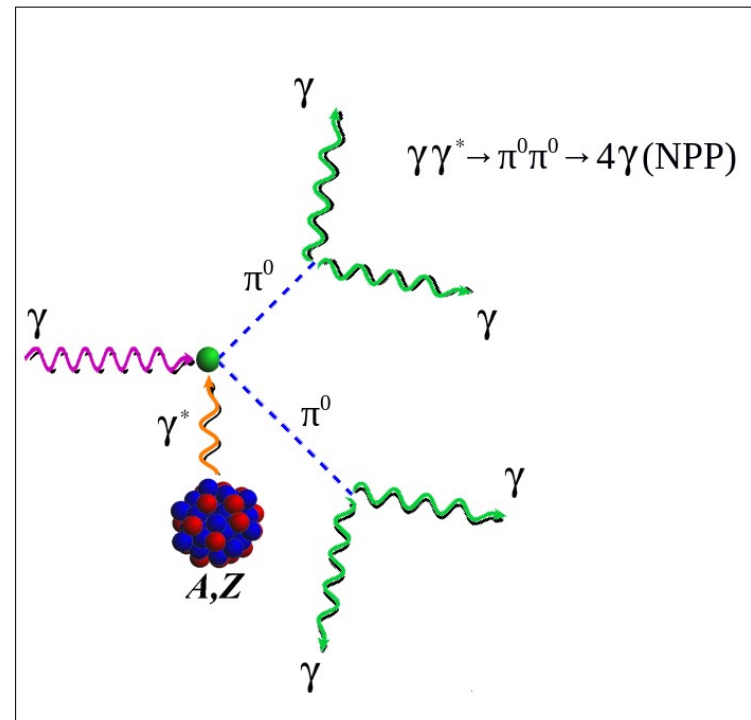
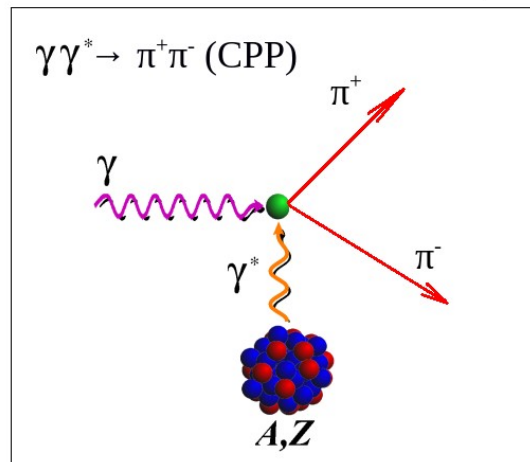
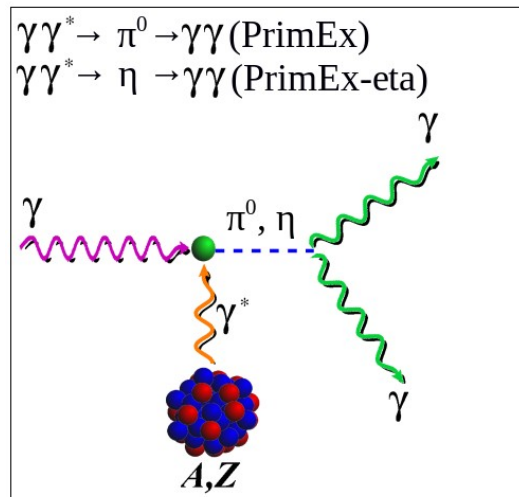
3) CPP — измерение поляризуемости заряженного пиона в реакции $\gamma\text{Pb} \rightarrow \pi^+\pi^-\text{Pb}$

4) NPP — измерение поляризуемости нейтрального пиона в реакции $\gamma\text{Pb} \rightarrow \pi^0\pi^0 \text{Pb}; \pi^0\pi^0 \rightarrow 4\gamma$.

Во всех экспериментах измеряется примаковское сечение фоторождения мезонов в реакциях ($\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$, $\gamma\gamma^* \rightarrow \eta$, $\gamma\gamma^* \rightarrow 2\pi^0$, $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^+\pi^-$) и с помощью этого определяются характеристики легких мезонов.

Эффект(механизм) Примакова

Эффект Примакова — фоторождение мезонов(π^0 , η , $\pi^+\pi^-$, $\pi^0\pi^0$) в кулоновском поле ядра.



PrimEx: ширина распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

1) Ширина распада π^0 -мезона на два гамма кванта является одной из наиболее точных предсказываемых величин в КХД при низких энергиях. В киральном пределе, предполагающем нулевые массы кварков, амплитуда этого распада предсказывается теорией с точностью около полпроцента и выражается через константу распада π^0 -мезона и число цветовых состояний кварков.

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^2 N_C^2 m_{\pi^0}^3}{576\pi^3 F_{\pi^0}^2} = 7.725 \pm 0.044 \text{ eV}$$

2) С учетом поправок на ненулевые массы кварков и диаграмм высших порядков, киральная теория возмущений предсказывает ширину распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ с точностью 1-1,5%. Измерение этой величины со сравнимой точностью позволило проверить одно из фундаментальных предсказаний КХД.

3) Среднее значение в PDG на 2010 год: $7.747\text{eV} \pm 7.1\%$

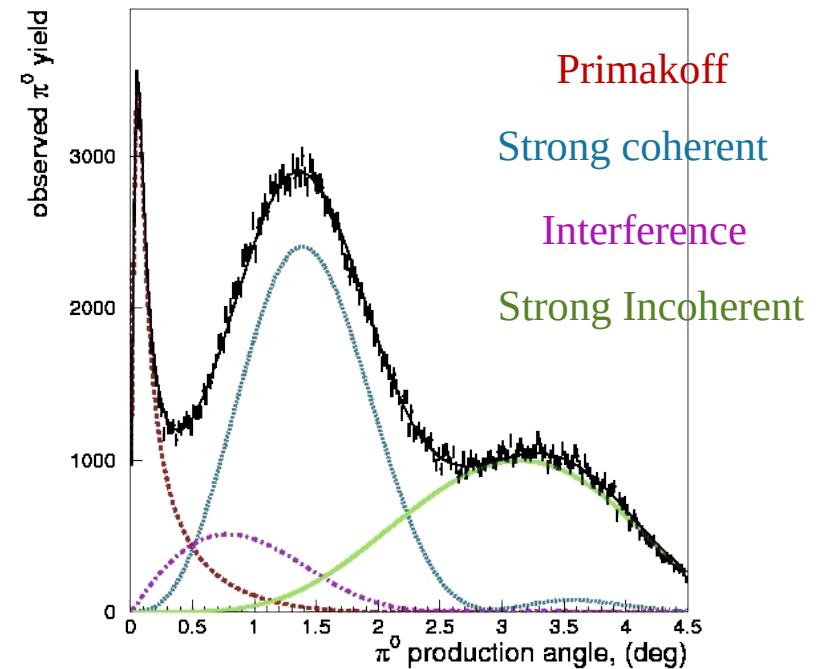
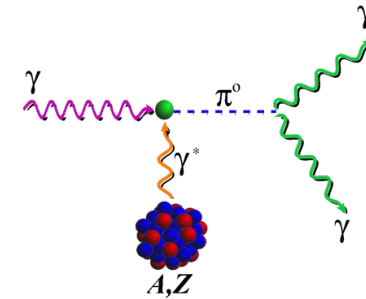
Механизм Примакова на примере эксперимента PrimEx

1) Эффект Примакова — фоторождение π^0 -мезона в кулоновском поле ядра;

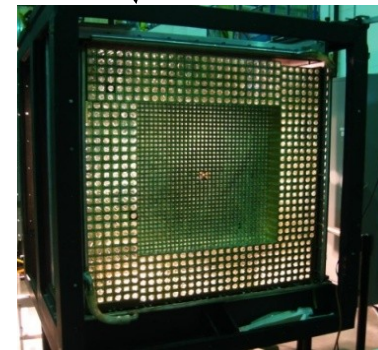
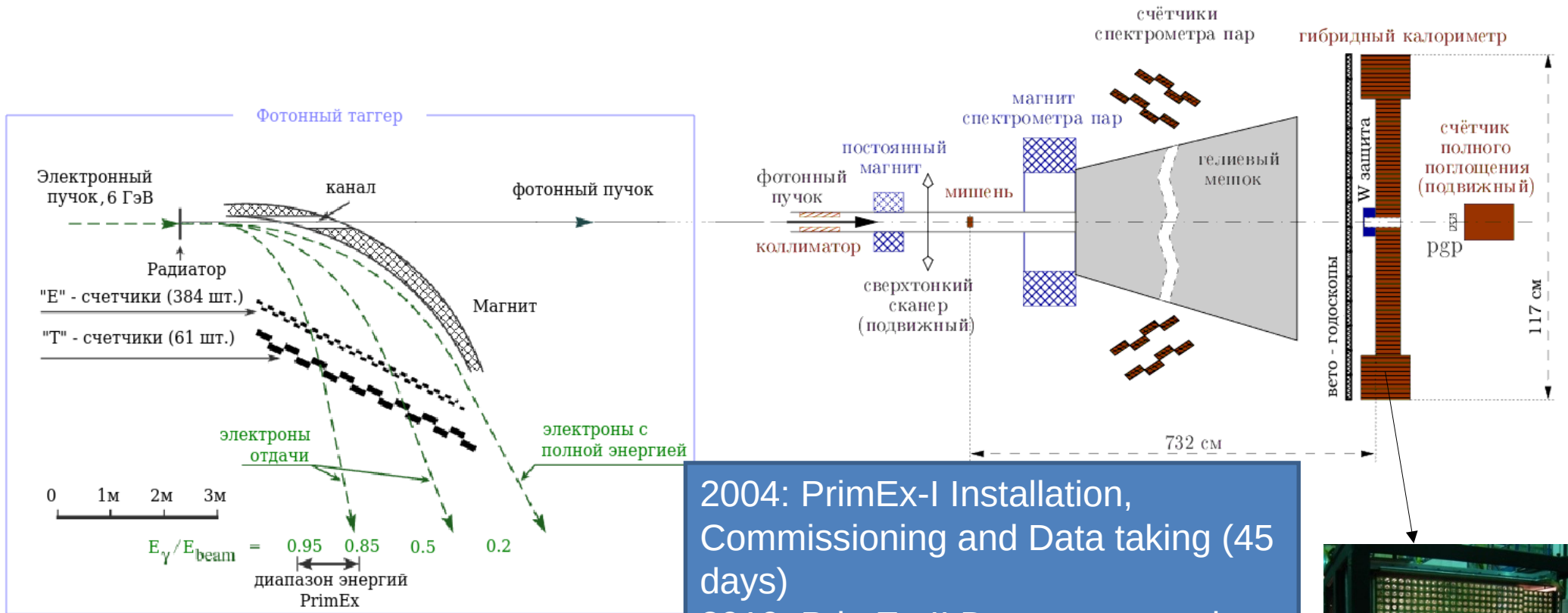
2) Зависимость между сечением примаковского фоторождения π^0 -мезона и шириной его распада на два гамма кванта имеет простой вид:

$$\frac{d\sigma_{Prim}}{d\Omega_\pi} = 8 \alpha Z^2 E_\gamma^4 \Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \left(\frac{\beta_\pi}{m_\pi}\right)^3 \left(\frac{|F_{em}(q^2)| \sin \theta_\pi}{q^2}\right)^2$$

3) Необходимо отделить Примаковский механизм от других процессов фоторождения;



Установка PrimEx



Фотонный таггер: Определение потока гамма пучка, высокое разрешение по энергии пучка (0,1%) и времени пучка (~100пс).

Гибридный ЭМ калориметр: высокое пространственное, временное и энергетическое разрешение, большой геометрический акцептанс.

Спектрометр электрон-позитронных пар: дополнительная проверка потока пучка.

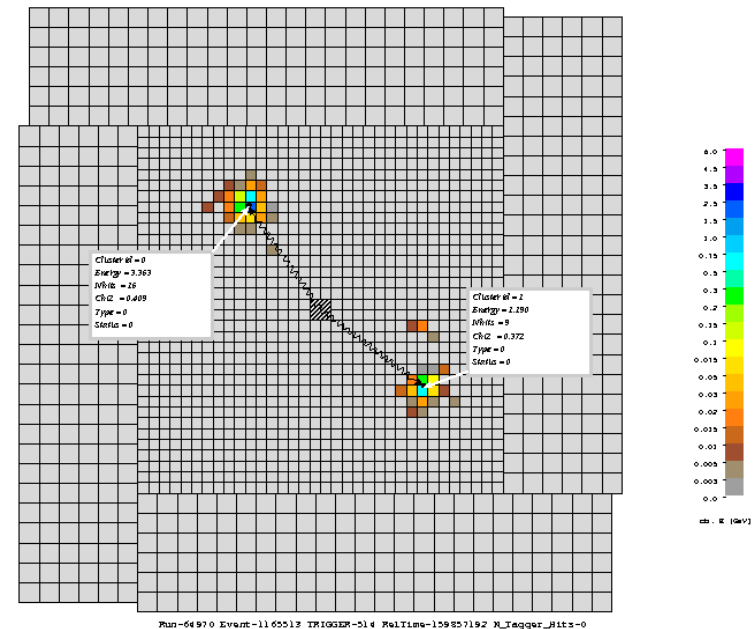
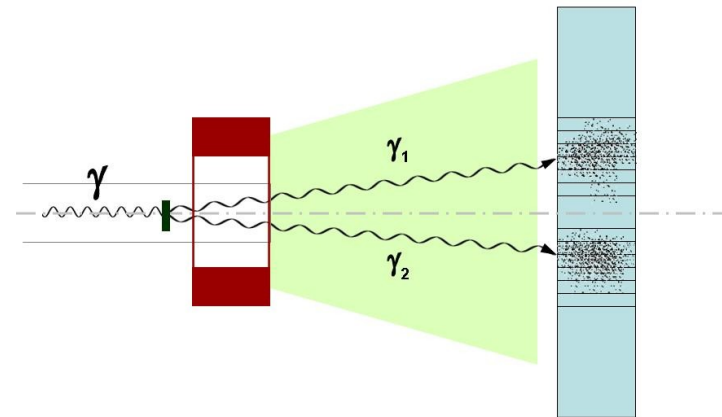
Отбор событий в реакции $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

- энергия одного γ не меньше 0,5 ГэВ

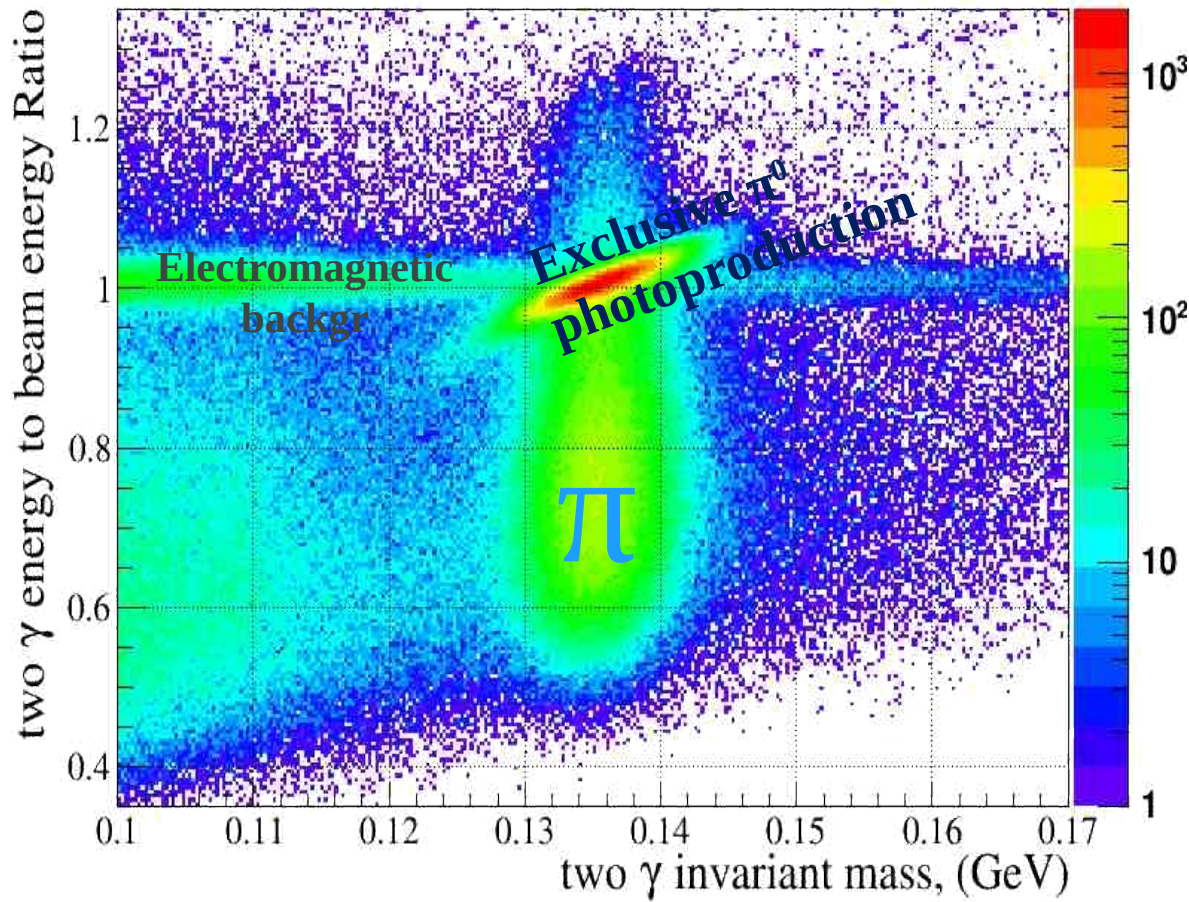
- суммарная энергия двух γ квантов не ниже 3,5 ГэВ

- совпадение по времени триггерных сигналов от фотонного таггера и калориметра в пределах ~ 5 нс;

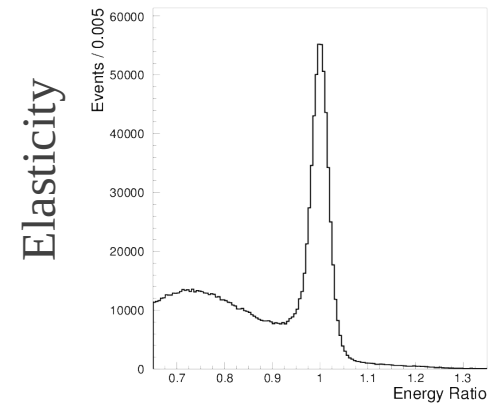
- совпадение по времени сигналов в калориметре от первого и второго γ - кванта из распада π^0 (PrimEx-II)



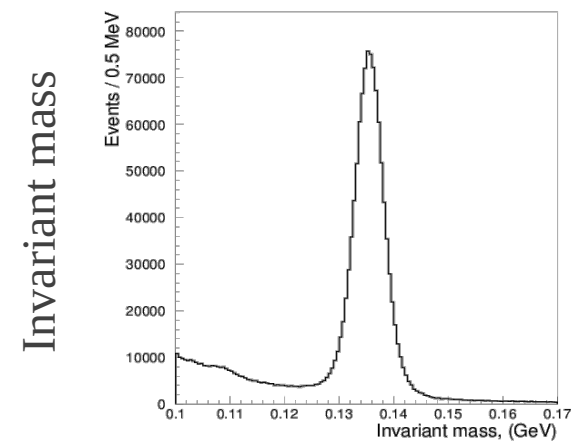
Инвариантная масса $\gamma\gamma$



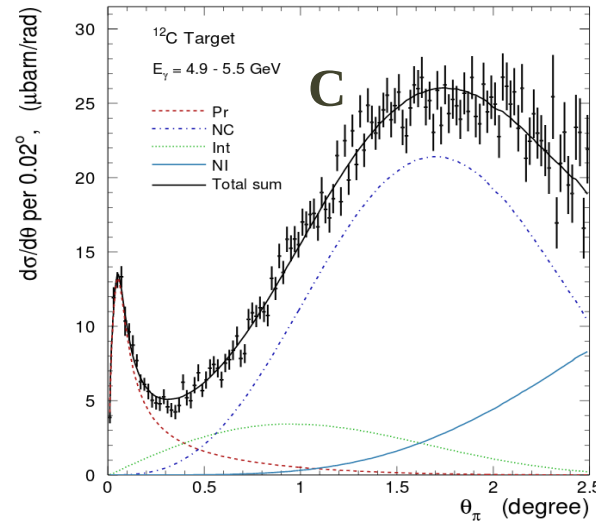
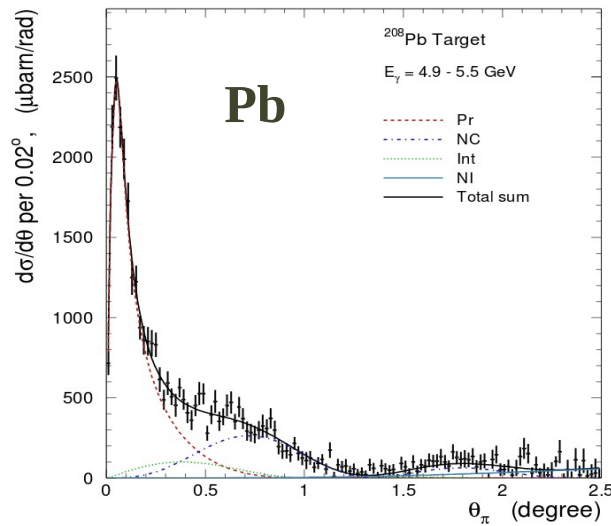
$\sigma = 1.8 \%$



$\sigma = 2.3 \text{ MeV}$



Дифференциальные сечения рождения π^0 мезона в экспериментах PrimEx-1 и PrimEx-2

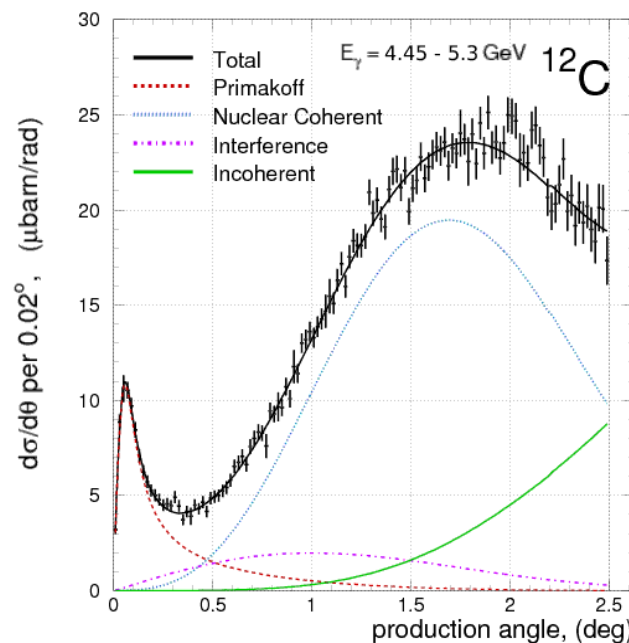
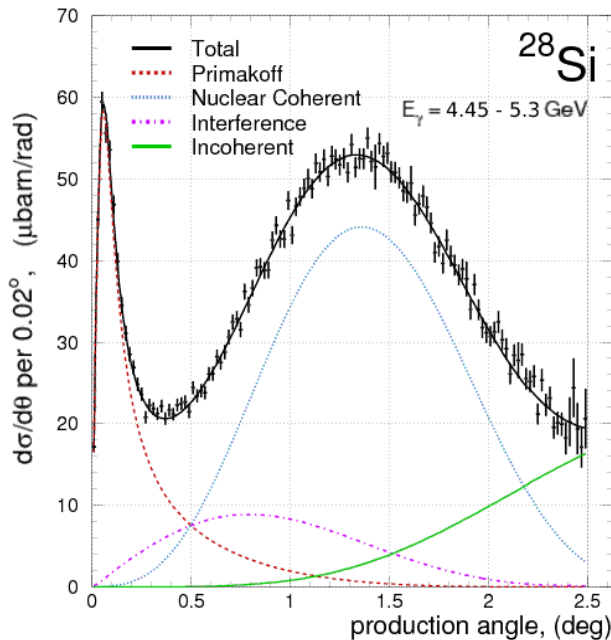


PrimEx-1

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.82 \pm 0.14(\text{stat.}) \pm 0.17\text{eV}(\text{syst.})$$

2.8 % total

Larin I. et al. (PrimEx Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 162303.



PrimEx-2

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.80 \pm 0.06(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.}) \text{ eV}$$

1.6% total

PrimEx-I+PrimEx-II

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.802 \pm 0.052(\text{стат.}) \pm 0.105(\text{сист.}) \text{ эВ}$$

1.5% total

Результат PrimEx

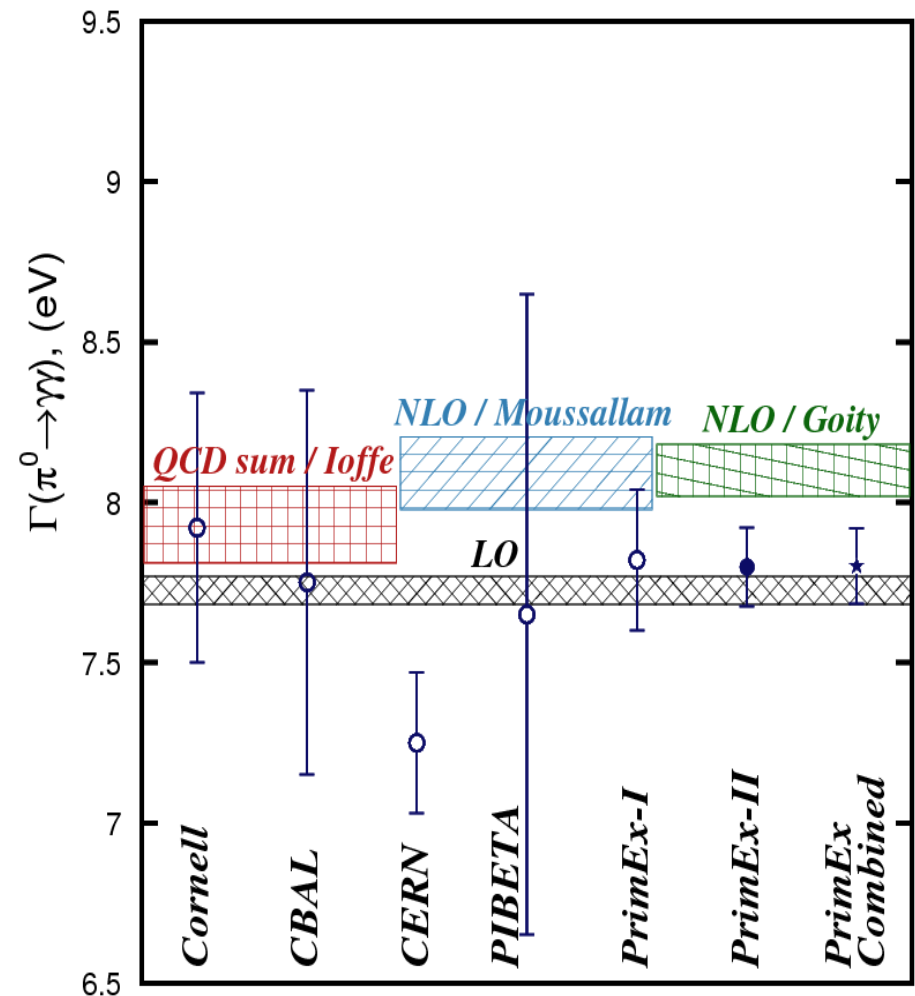
1. Осуществлён прецизионный эксперимент для проверки фундаментального предсказания КХД.
2. Прецизионность результатов обеспечивалась за счёт конструктивных особенностей установки – высокочувствительным фотонным таггером и гибридным калориметром.
3. Результатом эксперимента PrimEx стало уменьшение ошибки измерения ширины распада нейтрального пиона на два гамма-кванта до 1,5%, что сравнимо с теоретическими расчетами и является лучшим измерением в мире.
4. Результаты были опубликованы в журнале Science в 2020 году.
[Science, 2020, 368\(6490\), pp. 506509.](#)

Объединённый результат PrimEx:

$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.802 \pm 0.052$ (стат.) ± 0.105 (сист.) эВ
1.5% полная ошибка

Время жизни нейтрального пиона:

$\tau = 8.337 \pm 0.056$ (стат.) ± 0.112 (сист.) 10^{-17} с



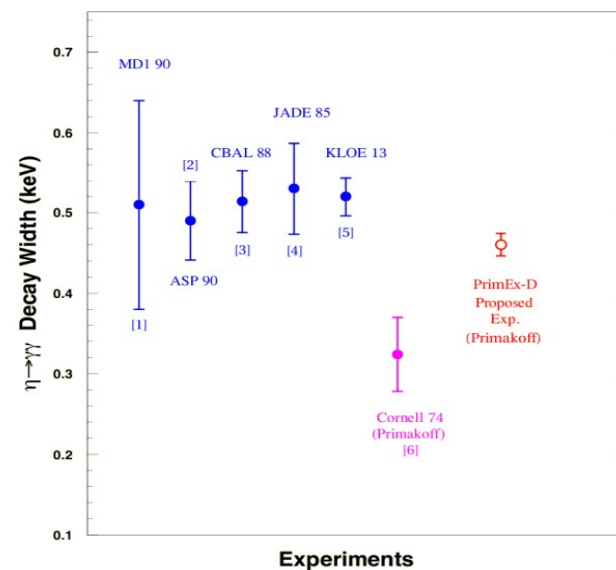
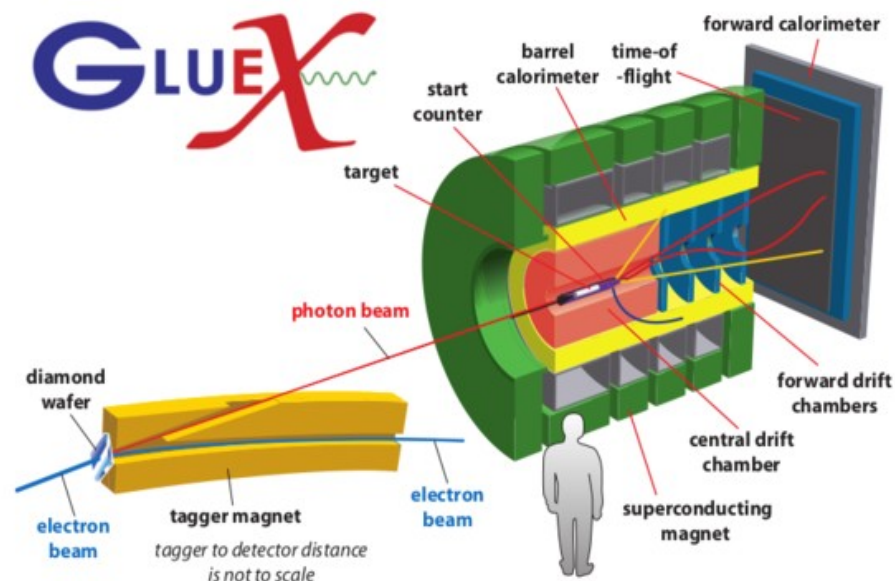
PrimEx-eta: $\eta \rightarrow \gamma\gamma$

С использованием эффекта Примакова предполагается измерить ширину распада $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ с точностью 3% на более энергичном пучке с энергией 8-11.2 ГэВ на установке GlueX

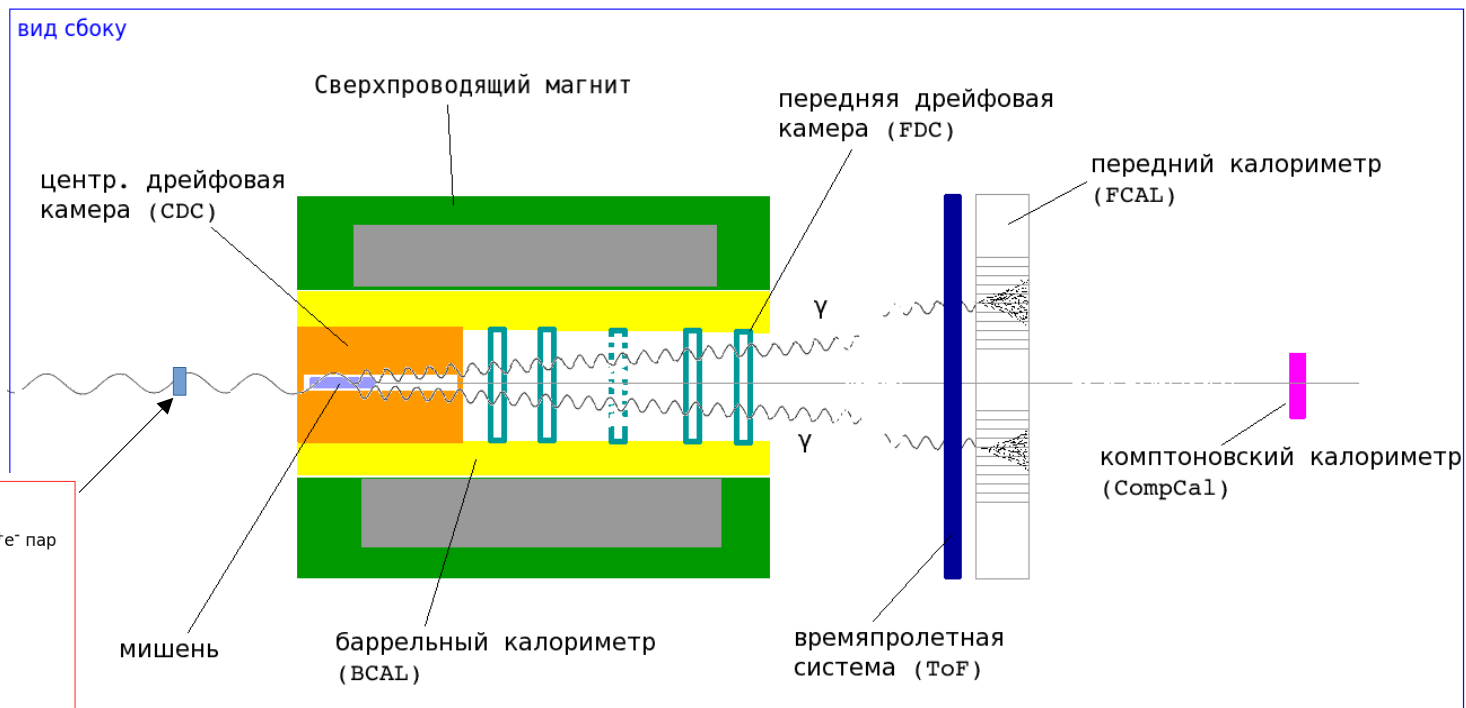
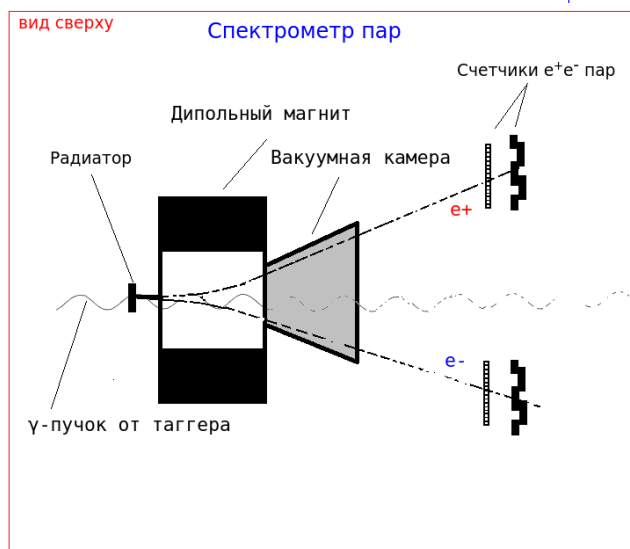
Предполагаемое измерение ширины распада эта-мезона позволит существенно улучшить точность таких фундаментальных параметров КХД, как отношение масс легких кварков и угол смешивания $\eta-\eta'$

В настоящее время существует сильное различие для ширин распада эта-мезона, полученных в коллайдерных и примаковских измерениях

- Primex-eta ($\eta \rightarrow \gamma\gamma$)
- фаза-1 \rightarrow 53 календарных дня $\rightarrow 6\text{pb}^{-1}\text{c}^{-1}$ (2019)
- фаза-2 \rightarrow 50 календарных дней $\rightarrow 2\text{pb}^{-1}\text{c}^{-1}$ (2021)
- фаза-3 \rightarrow 113 календарных дней $\rightarrow 20\text{pb}^{-1}\text{c}^{-1}$ (2022)

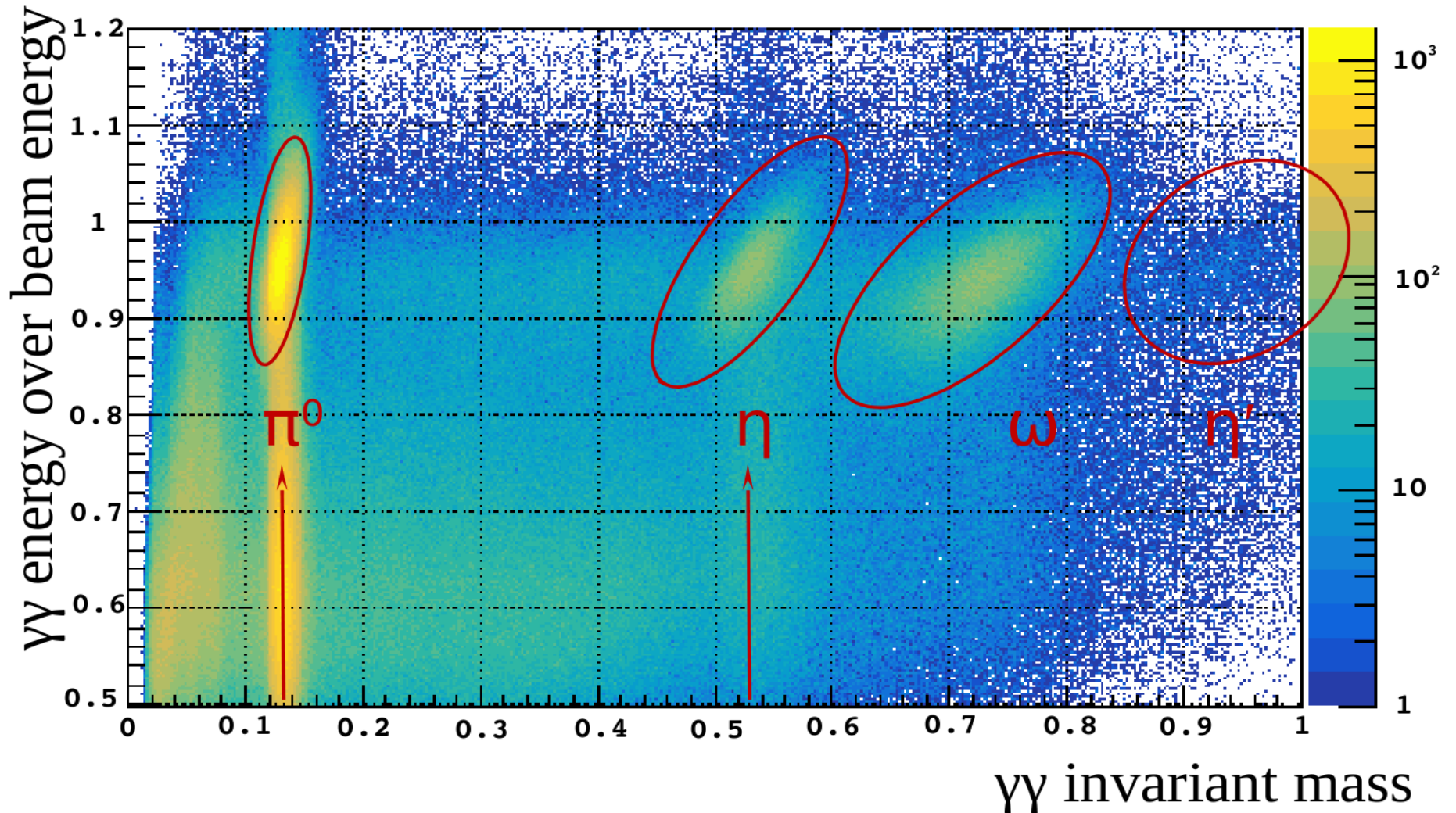


Отбор событий $\eta \rightarrow \gamma\gamma$



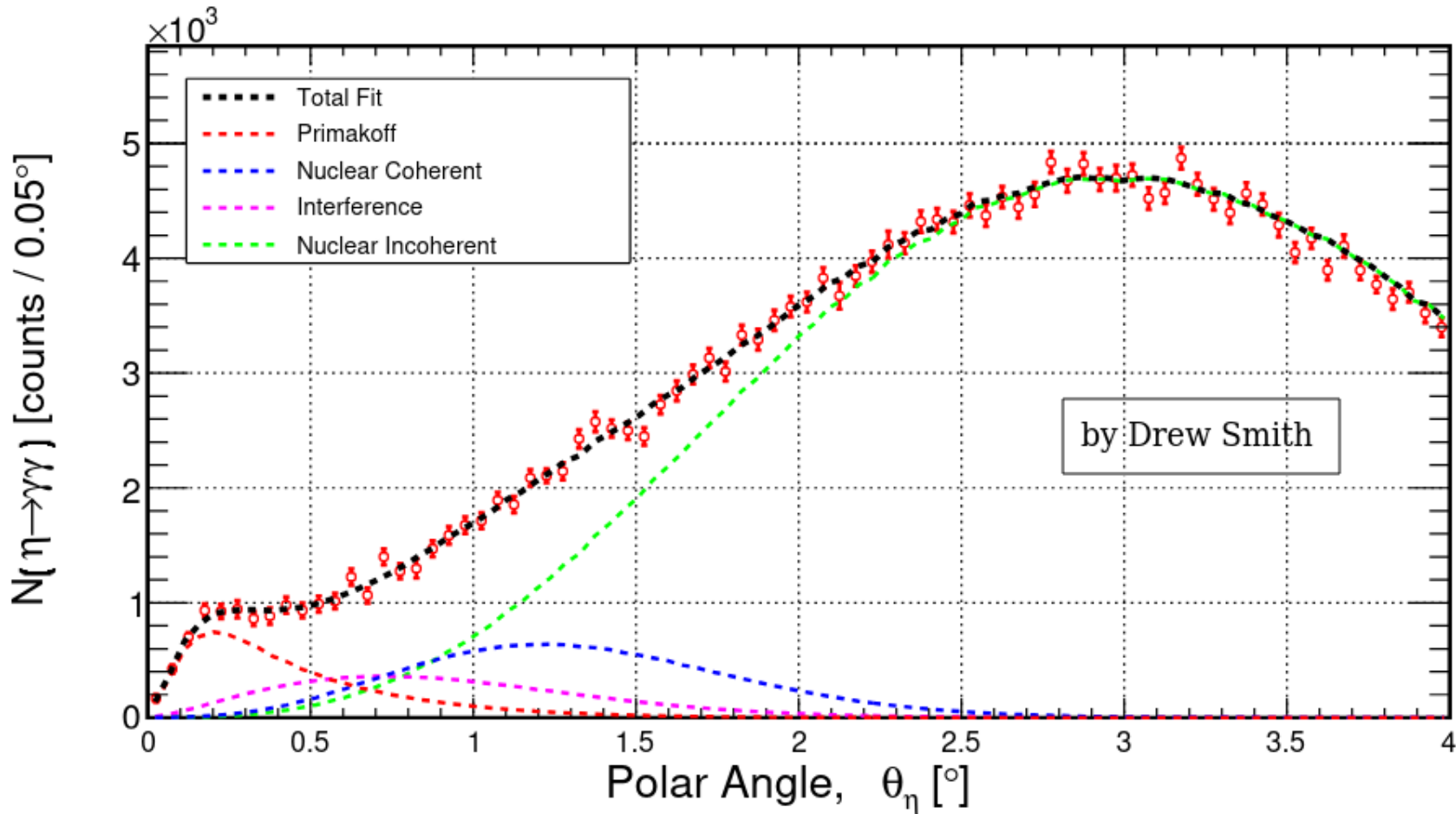
- Оба гамма кванта от распада эта-мезона дают сигнал в переднем калориметре (при этом нет сигналов от баррельного калориметра)
- Минимальная энергия одного гамма 0,5 ГэВ
- Минимальная энергия пучка 8 ГэВ
- Энергия суммы двух гамма квантов в калориметре и энергия пучка отличаются не более чем на 1,2 ГэВ
- Времяпролетная система использовалась как вето-годоскоп

Инвариантная масса двух гамма квантов



По оси X – инвариантная масса двух гамма квантов, по оси Y – отношение суммы энергий двух гамма квантов к энергии пучка

Предварительный выход η -мезона в зависимости от угла рождения на всей доступной статистике

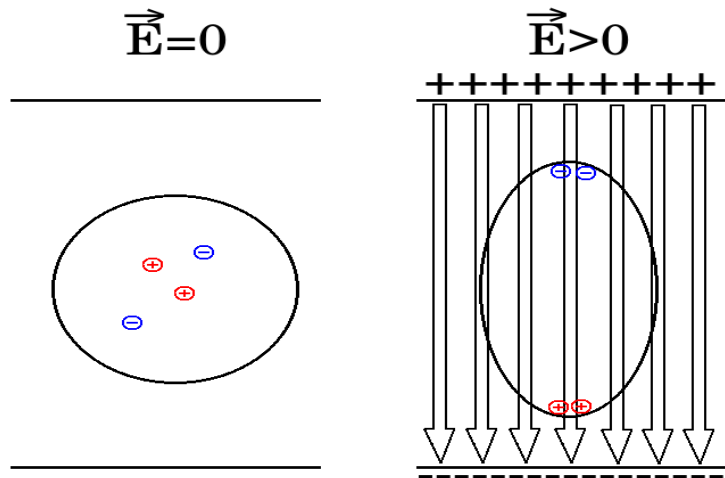


Данные, полученные при наборе в первом, во втором и в третьем сеансе полностью откалиброваны. Получен предварительный выход реакции $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ в зависимости от угла рождения. Анализ данных продолжается.

Эксперименты СРР/НРР: поляризуемость пионов

Поляризуемость это величина определяющая насколько сильно частица деформируется во внешнем электрическом поле.

Фактически поляризуемость это коэффициент пропорциональности, имеющий размерность объёма, между величиной напряжённости приложенного внешнего поля и величиной наведённого им дипольного момента.



$$E \approx 0.1 \text{ ГэВ}/1 \text{ фм} = 10^{23} \text{ В/м}$$

$$\vec{p} = -\alpha \vec{E}$$

$$\vec{\mu} = \beta \vec{H}$$

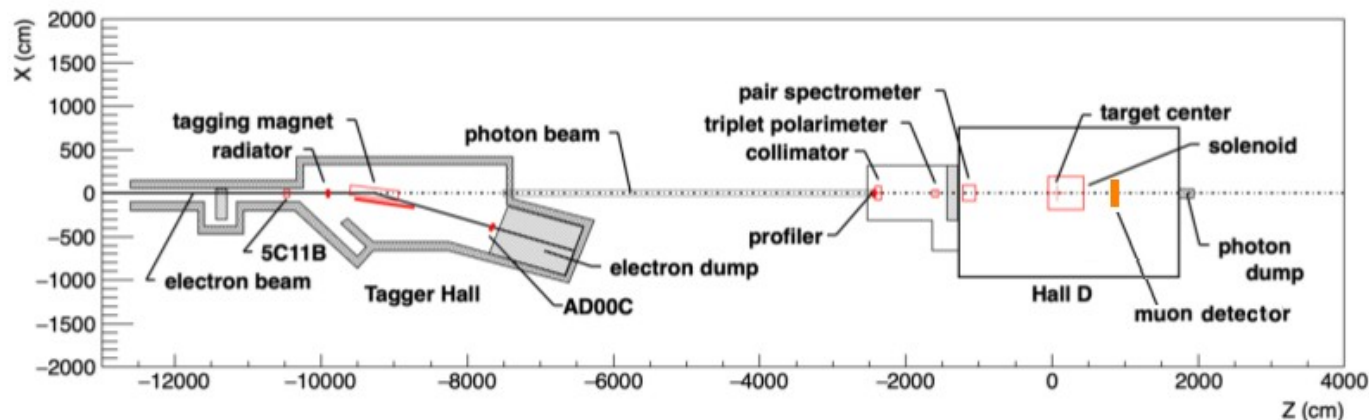
Электрическая поляризуемость $\alpha \approx 10^{-4} \cdot \text{Объем}$

Магнитная поляризуемость $\beta \approx 10^{-4} \cdot \text{Объем}$

Задача эксперимента оценить деформацию пионов во внешнем электромагнитном поле.

Эксперименты СРР/НРР на модернизированной установке GlueX

Целью экспериментов СРР и НРР является точное измерение поляризуемости пионов посредством исследования реакций $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0\pi^0$

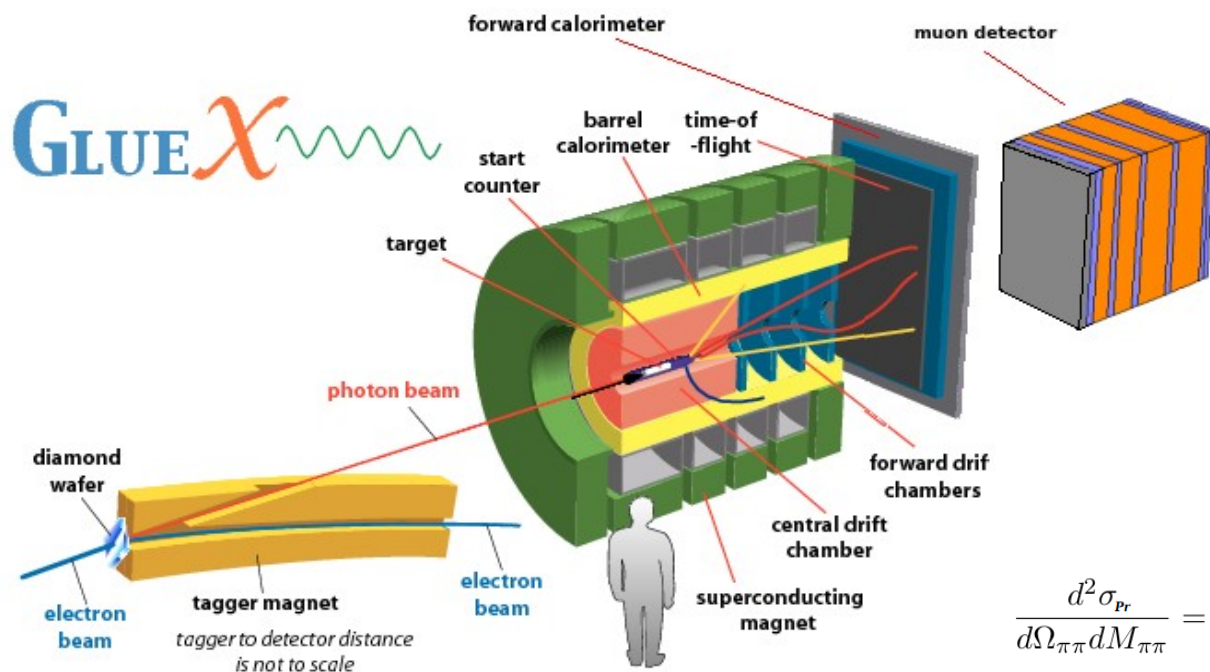


СРР: ожидаемая точность в 1.5 раза лучше нежели самое точное измерение на сегодняшний день.

НРР: Прямое измерение поляризуемости нейтральных пионов — впервые.

Пионная поляризуемость играет важную роль в $(g-2)_\mu$ аномалии.

Летний сеанс 2022 г. длился с 8 июня по 17 августа.

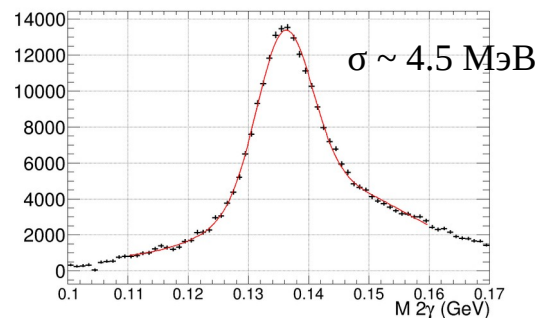
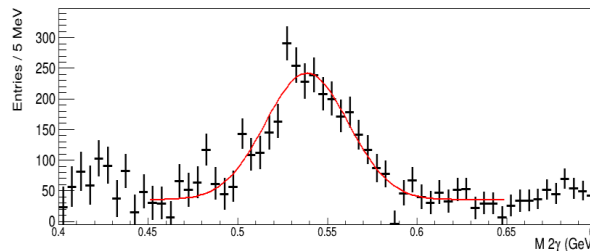
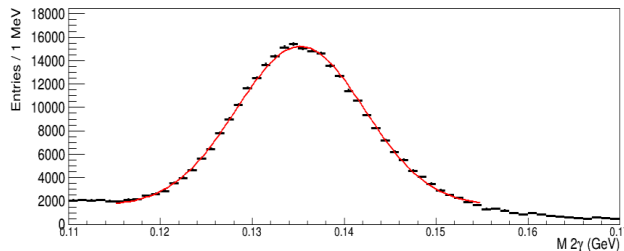
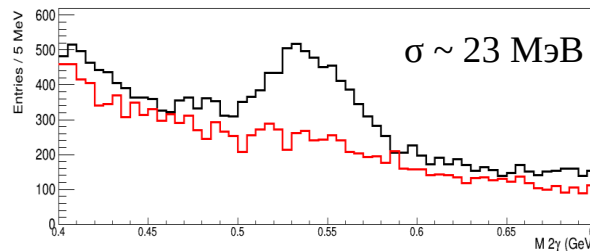
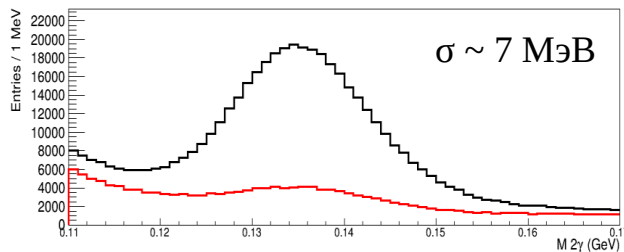


$$\frac{d^2\sigma_r}{d\Omega_{\pi\pi}dM_{\pi\pi}} = \frac{2\alpha Z^2 E_\gamma^4 \beta^2 \sin^2\theta}{\pi^2 M_{\pi\pi} Q^4} |F(Q^2)|^2 (1 + P_\gamma \cos 2\phi_{\pi\pi}) \sigma(\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi)$$

Одиночные выходы π^0 и η с использованием предварительной калибровки калориметра (2022)

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, энергия гамма пучка
4.5-6.0 GeV

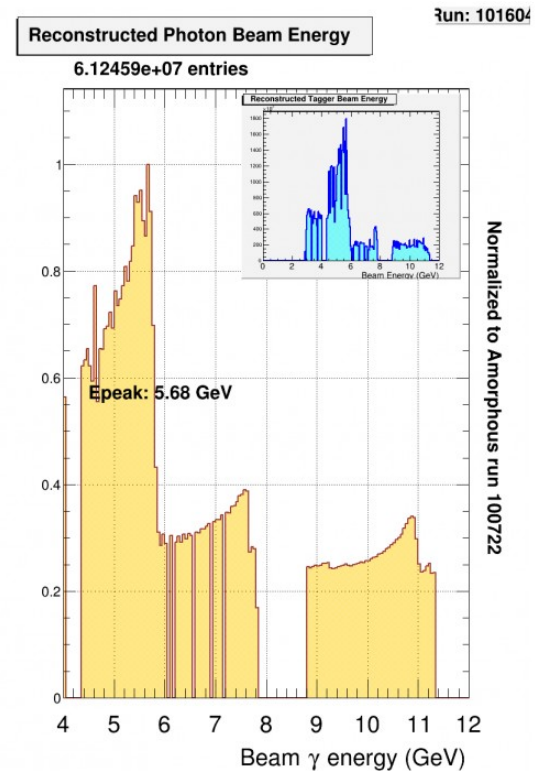
$\eta \rightarrow \gamma\gamma$, энергия гамма пучка
более 8 GeV



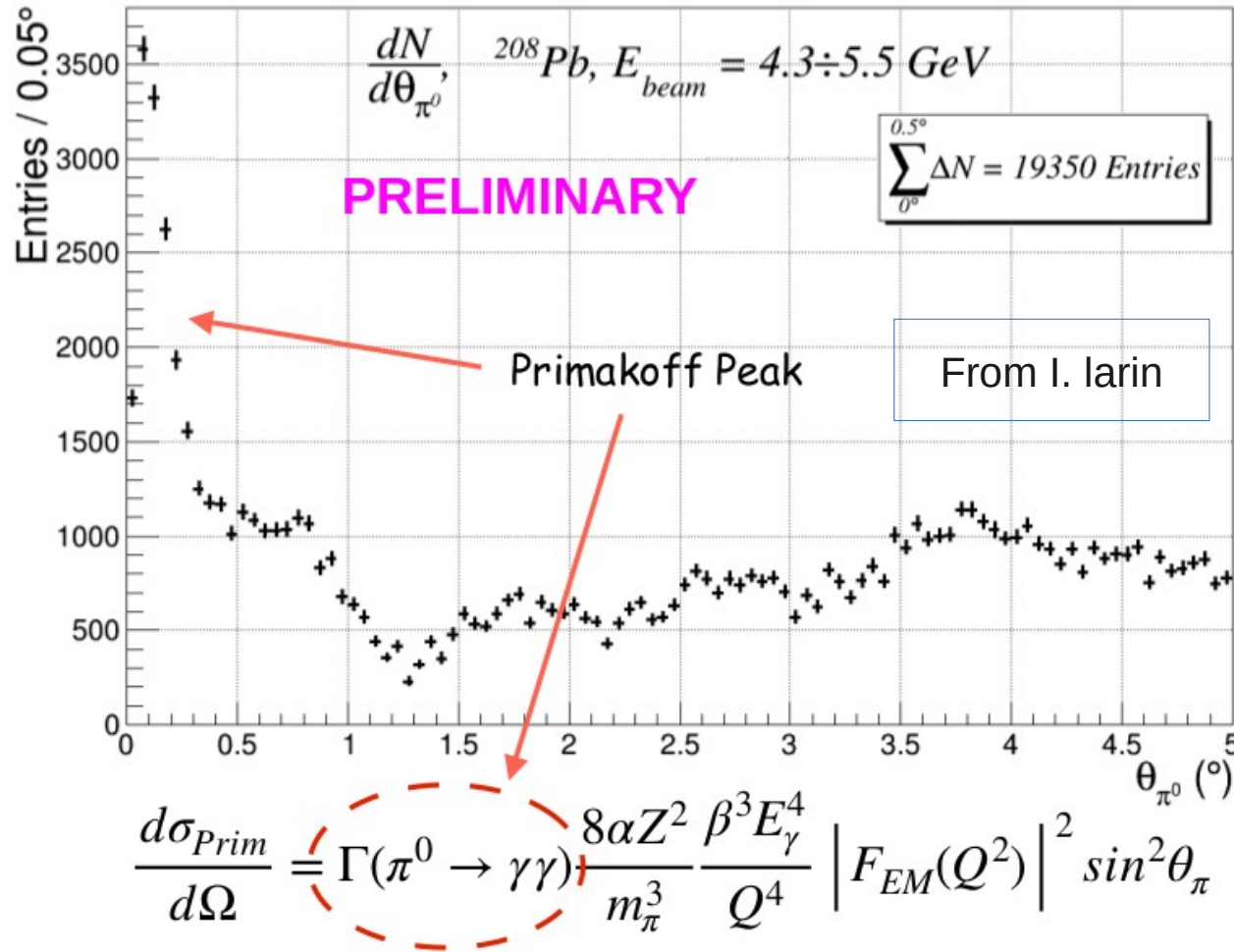
— Свинцовая мишень
— Без мишени

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ «эластичная часть», предварительные данные

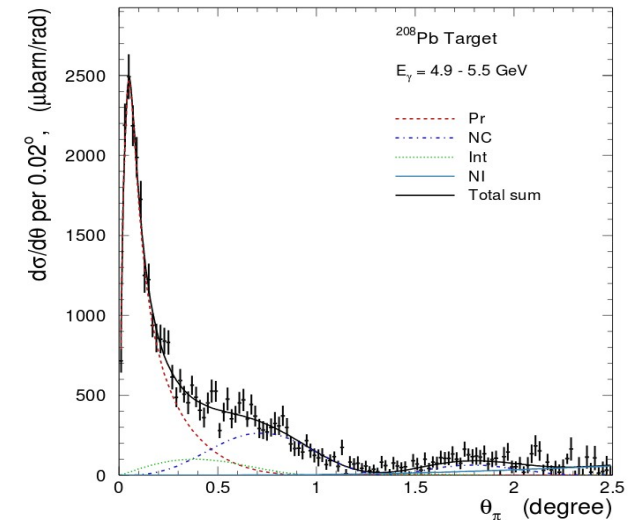
Энергия пучка (смены)



Выход π^0 на Pb мишени в реакции $\gamma\text{Pb} \rightarrow \pi^0\text{Pb}$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (предварительные данные на ограниченной статистике)

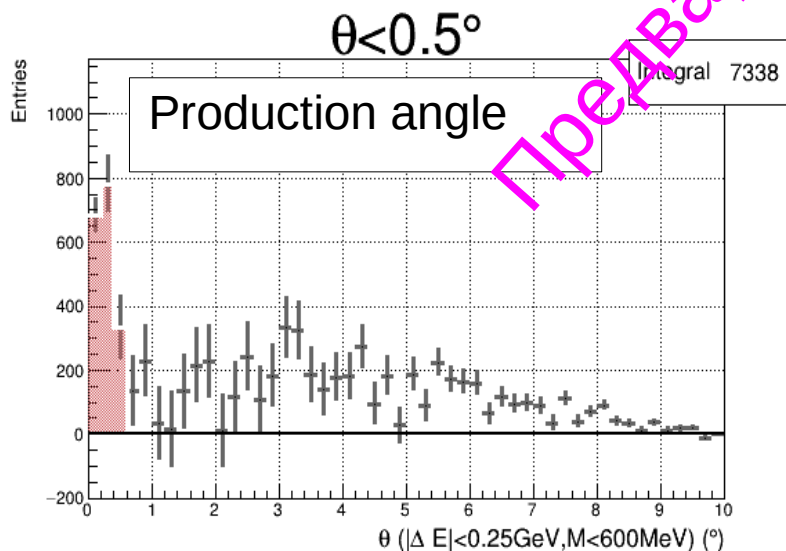
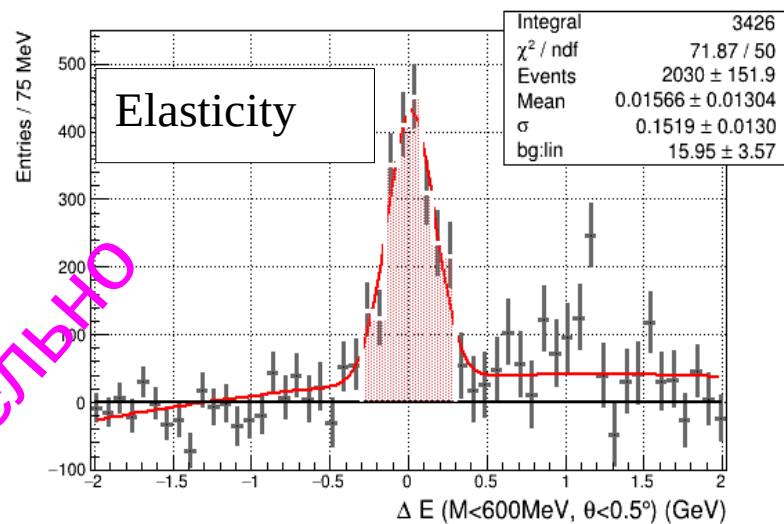
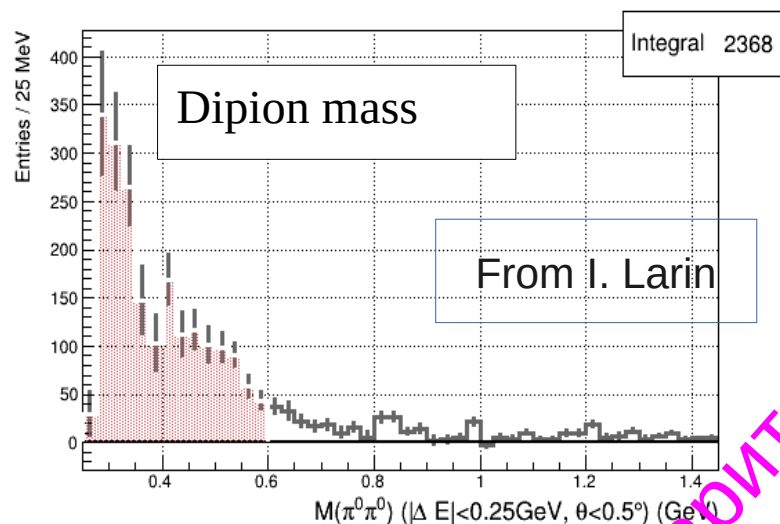


PrimEX-I $\gamma\text{Pb} \rightarrow \pi^0\text{Pb}$



Larin I. et al. (PrimEx Collaboration)
 Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 162303.

Предварительные данные по рождению двух нейтральных π^0



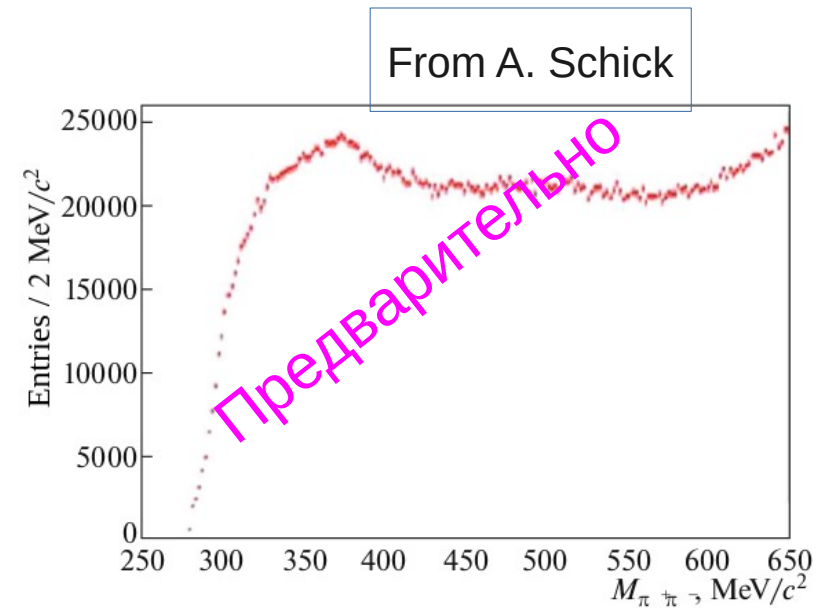
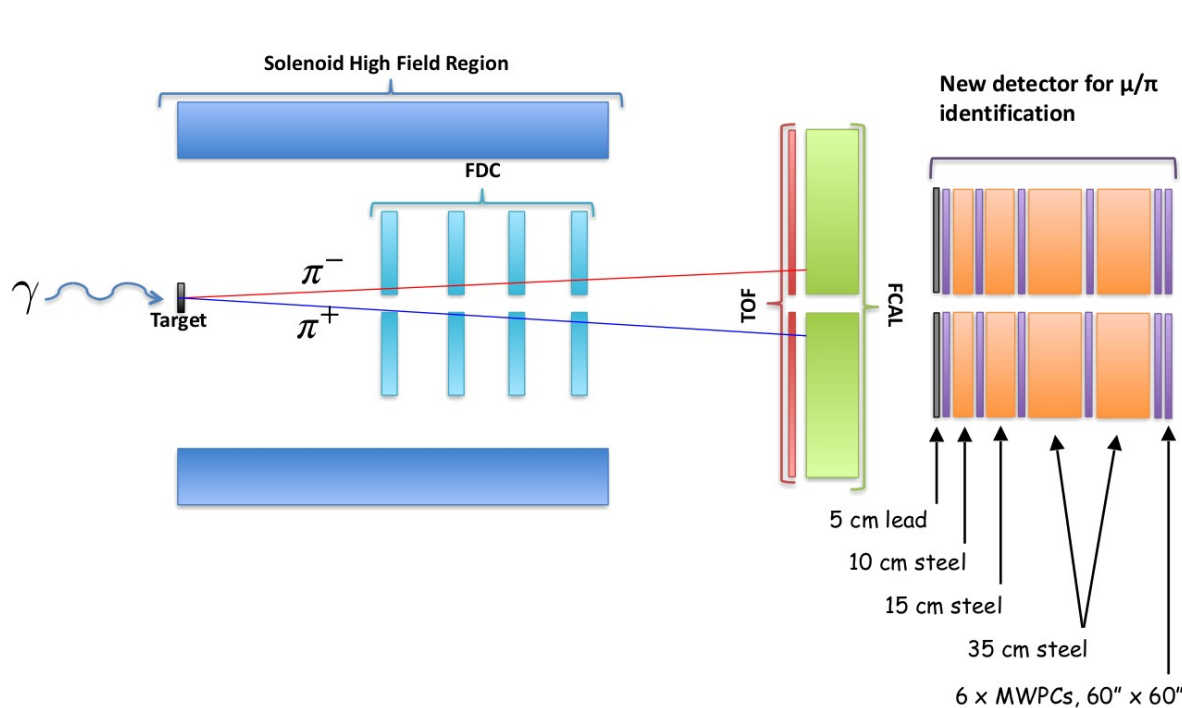
Виден сигнал (2030 ± 152 событий) для всего энерг. диапазона, с числом событий 1718 ± 139 для диапазона энергий 4.35-7.80 GeV (будет использов. в будущем анализе)

Соотв. ожидаемому сигналу ~ 1700 событий (моделир. основанное на данных с эксп. Crystal Ball)

ΔE — разница между энергией гамма пучка и энергией $2\pi^0$ системы

M — масса $2\pi^0$ системы

Извлечение сигнала $\pi^+\pi^-$

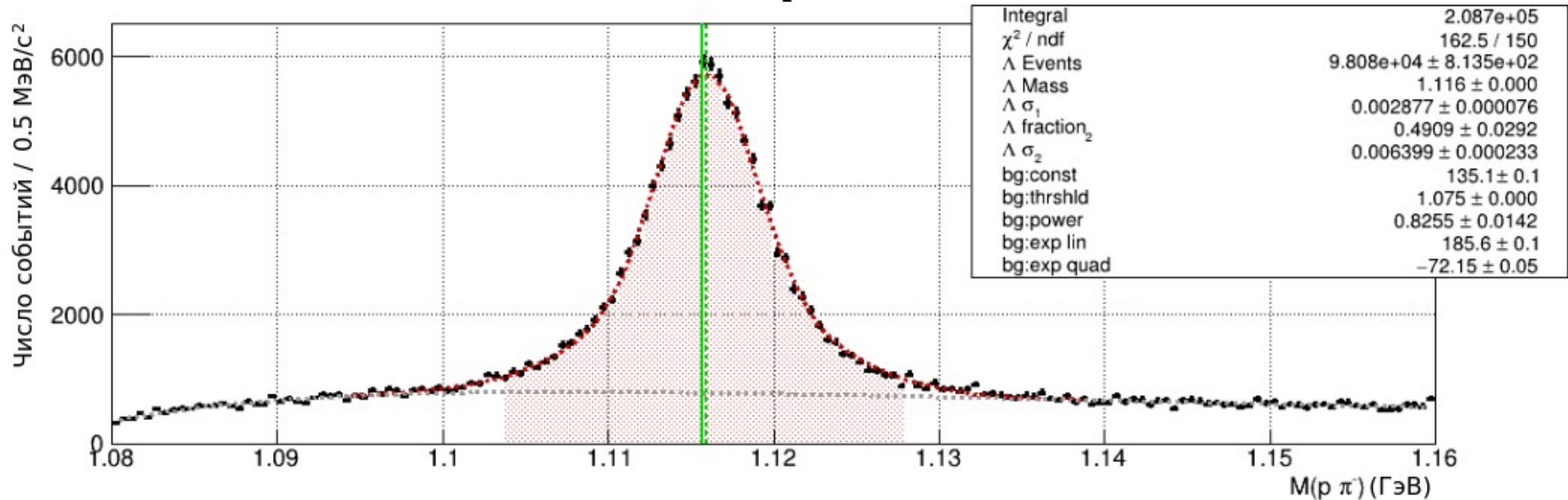
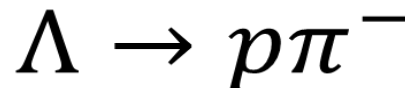
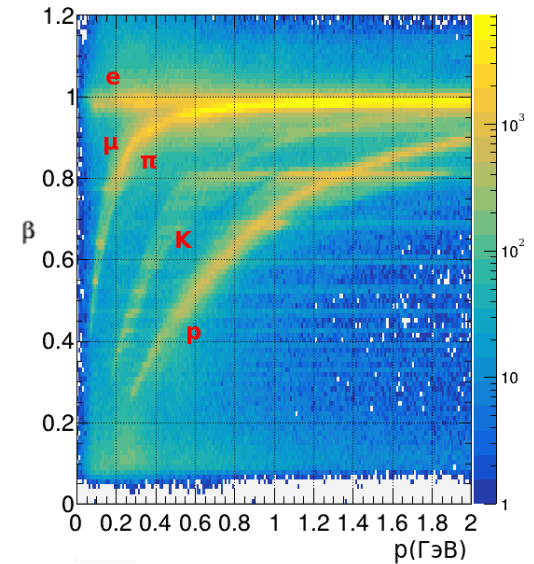


Мюонный детектор был установлен прямо после переднего калориметра (FCAL) для эксперимента CPP

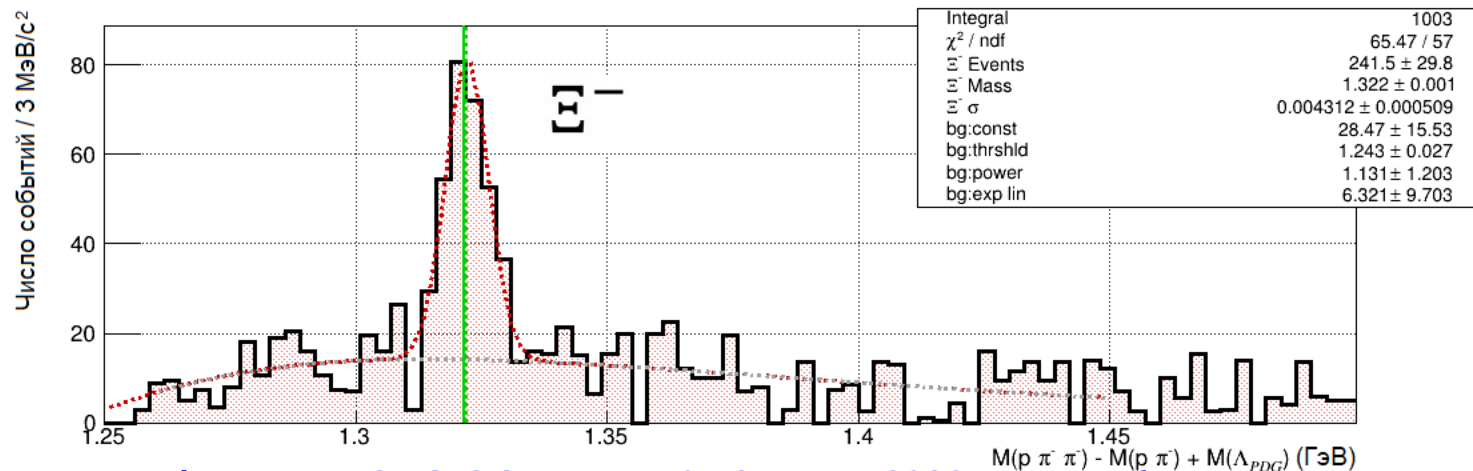
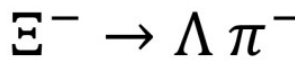
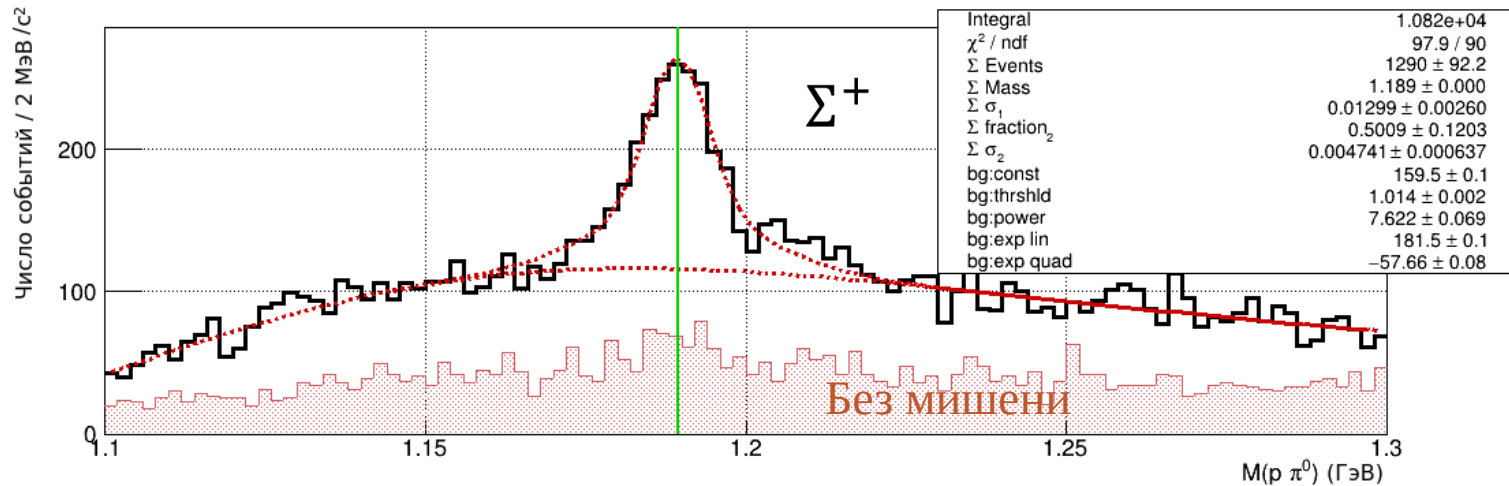
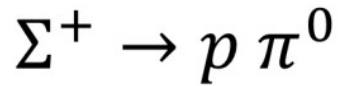
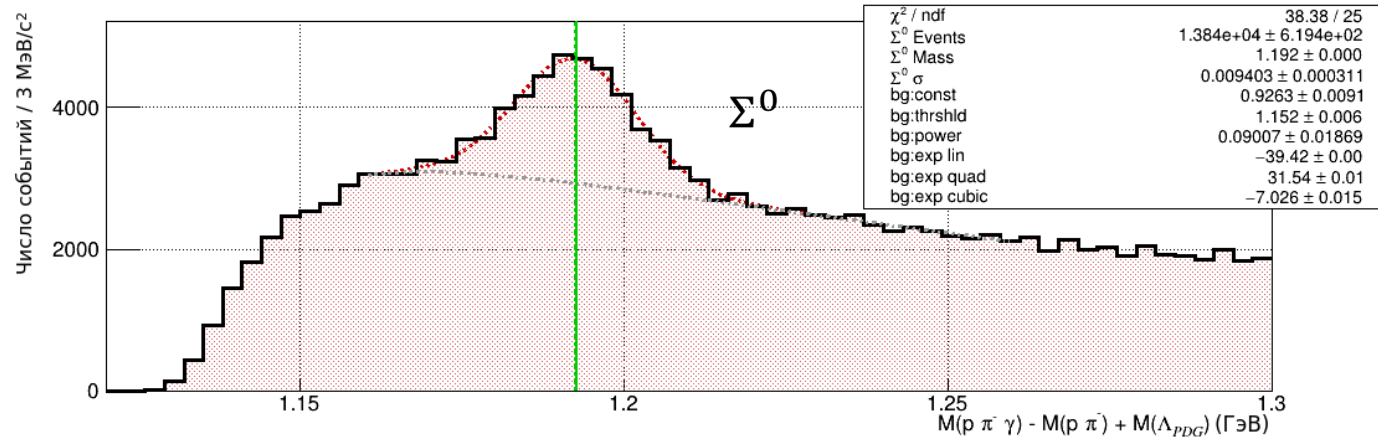
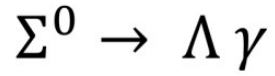
Уточнение для эксперимента NPP: не требовалось дополнительное оборудование к установке GlueX — гамма-кванты из распадов π^0 идентифицировались с помощью калориметров FCAL и BCAL

Что ещё интересного, в научном плане, видно в данных, набранных на свинцовой мишени?

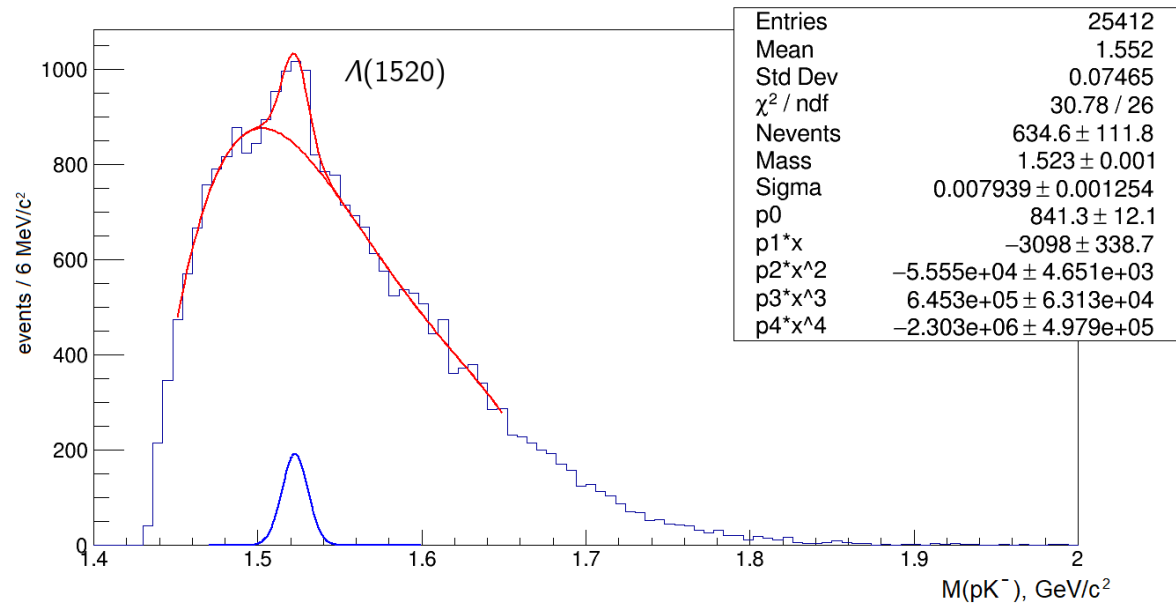
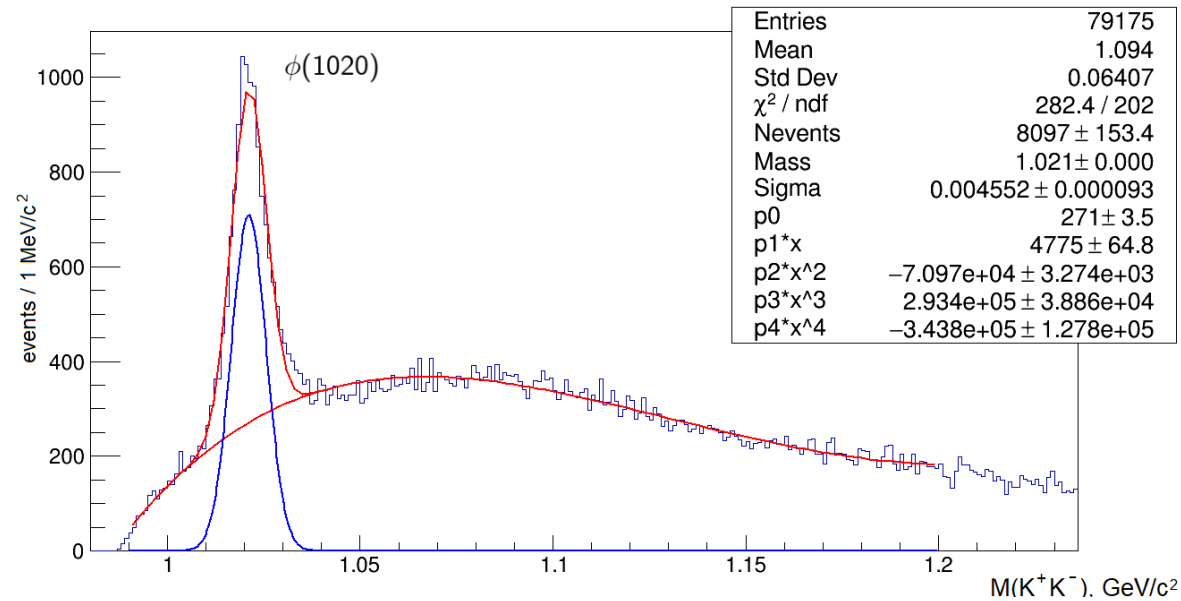
- Мишень типа фольги удобна для определения первичного положения вершины, что благоприятно для нахождения отдельных вершин: упрощенная K_S и гиперонная реконструкция.
- Пример реконструкции реакции $\gamma\text{Pb} \rightarrow p\pi^- X$



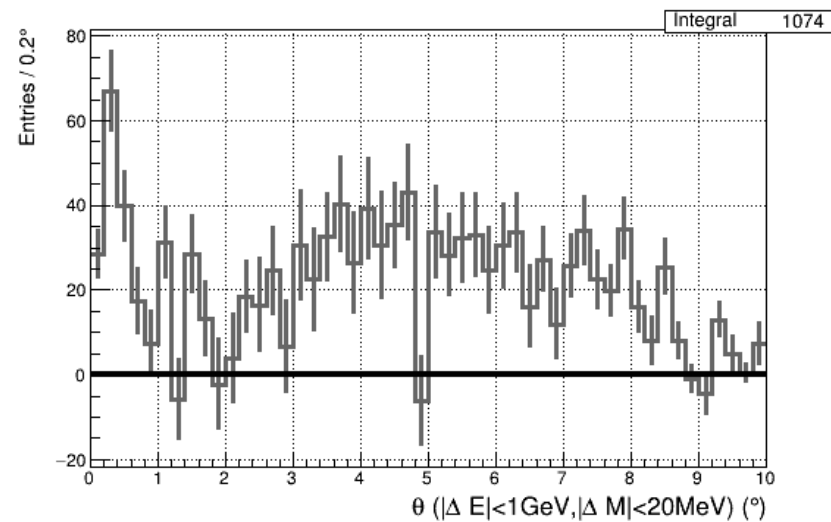
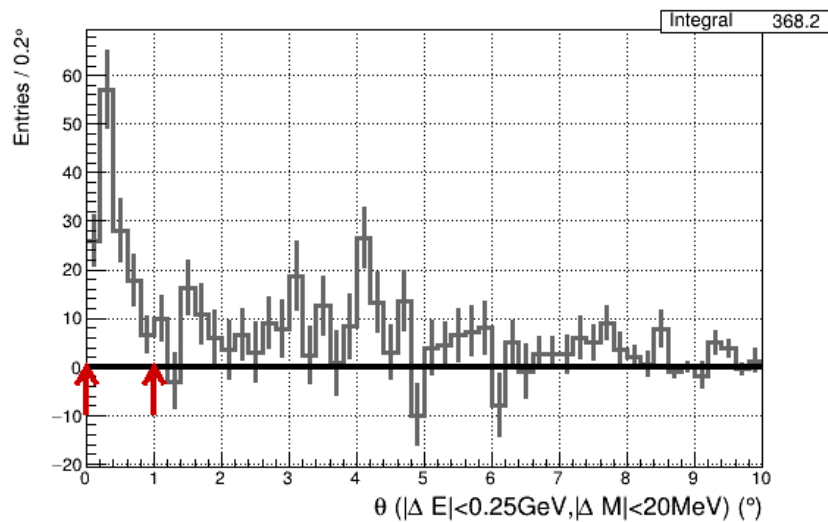
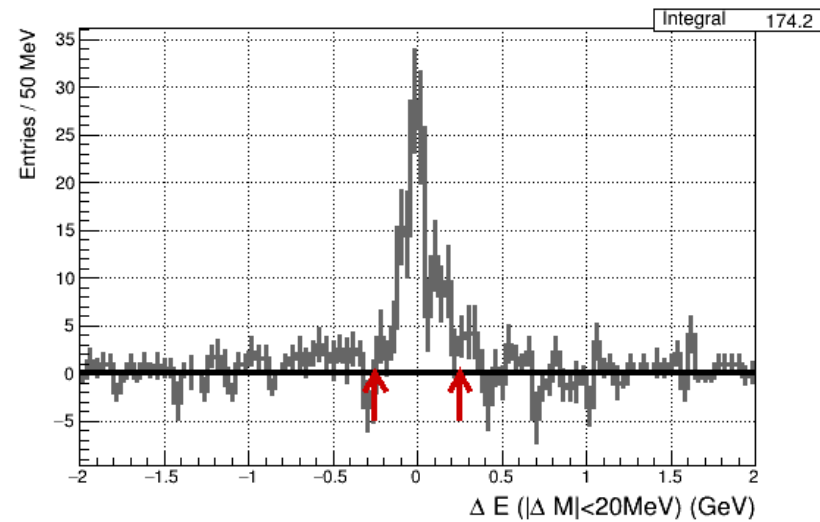
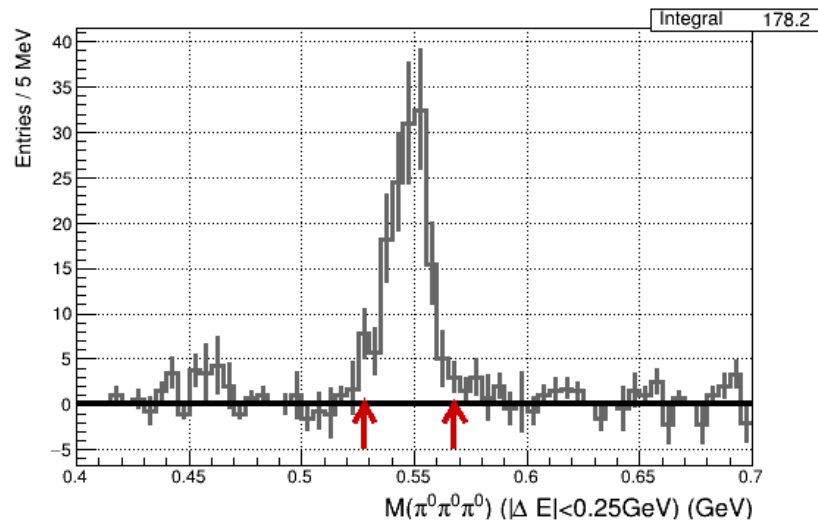
Наблюдаемые сигналы



Наблюдаемые резонансы $\phi(1020)$ и $\Lambda(1520)$ образованные в реакции $\gamma\text{Pb} \rightarrow \text{K}^+ \text{K}^- \text{X}$ и $\gamma\text{Pb} \rightarrow \text{pK}^- \text{X}$, соответственно



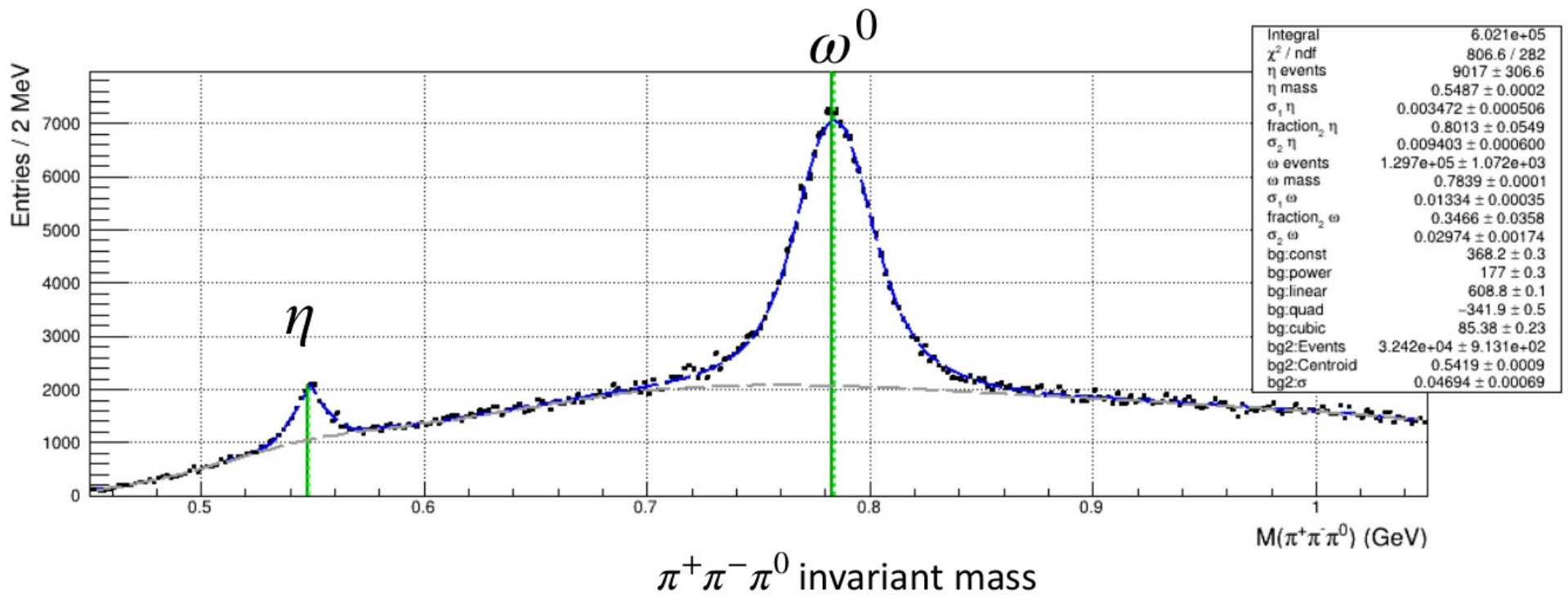
Предварительные данные по рождению $3\pi^0$



ΔE — разница между энергией гамма пучка и энергией системы $3\pi^0$

ΔM — разница между массой системы $3\pi^0$ и массой η -мезона

Инвариантная масса системы $\pi^+ \pi^- \pi^0$ в реакции $\gamma \text{Pb} \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 X$



Заключение

Летом 2022 года были собраны данные для измерения поляризуемости заряженного пиона в лаборатории Томаса Джефферсона в зале D.

Параллельно была набрана статистика для измерения поляризуемости нейтрального пиона. Всего было набрано 106 миллиардов событий на мишени из свинца-208. 23 миллиарда событий были набраны без мишени для анализа фона.

Выполнены все калибровки для нейтральных и заряженных частиц.

Наблюдалось рождение одиночного π^0 - (и η -мезона) с помощью механизма Примакова, который можно использовать в качестве опорного сигнала, а также для изучения его рождения.

Впервые обнаружен четкий примаковский сигнал $2\pi^0$ (~2К событий) на мишени из свинца-208. Наблюдаемый сигнал согласуется с ожиданиями

Набранные данные имеют высокое качество, что подтверждается наблюдением ω - и η -мезонов в спектре $\pi^+\pi^-\pi^0$, $\Lambda(1520)$ гиперона и $\phi(1020)$ —мезона в pK^- и K^+K^- инвариантном спектре масс, Λ , $\Sigma^{0/+}$ и Ξ^- гиперонов в $p\pi^-$, $\Lambda\pi$, $p\pi^0$ и $\Lambda\pi^-$ инвариантных спектрах масс соответственно.

В настоящее время продолжается дальнейший анализ данных.

Спасибо за
внимание!

Дополнительные слайды

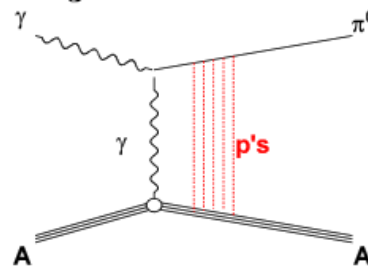
Диаграммы других механизмов образования π^0

π^0 Forward Photoproduction off Complex Nuclei (theoretical models)

□ Coherent Production $\gamma + A \rightarrow \pi^0 + A$

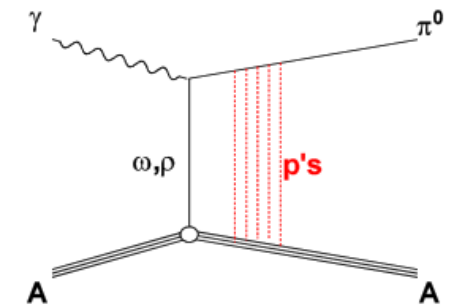
Leading order processes:

(with absorption)



Primakoff

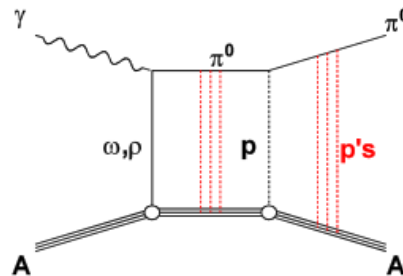
+



Nuclear coherent

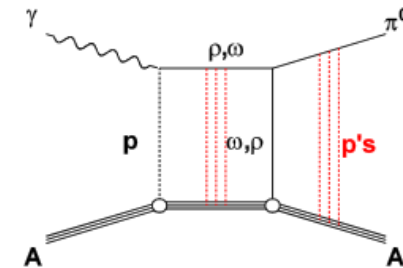
Next-to-leading order:

(with absorption)



π^0 rescattering

+



Photon shadowing

Предыдущие измерения

Прямые: CERN (1984)

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.34 \text{eV} \pm 3.1\%$$

В $e+e-$ соударениях: CBAL (1988)

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.75 \text{eV} \pm 6.4\%$$

Примаковский метод: Томск (1969)

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.21 \text{eV} \pm 7.2\%$$

Примаковский метод: DESY (1970)

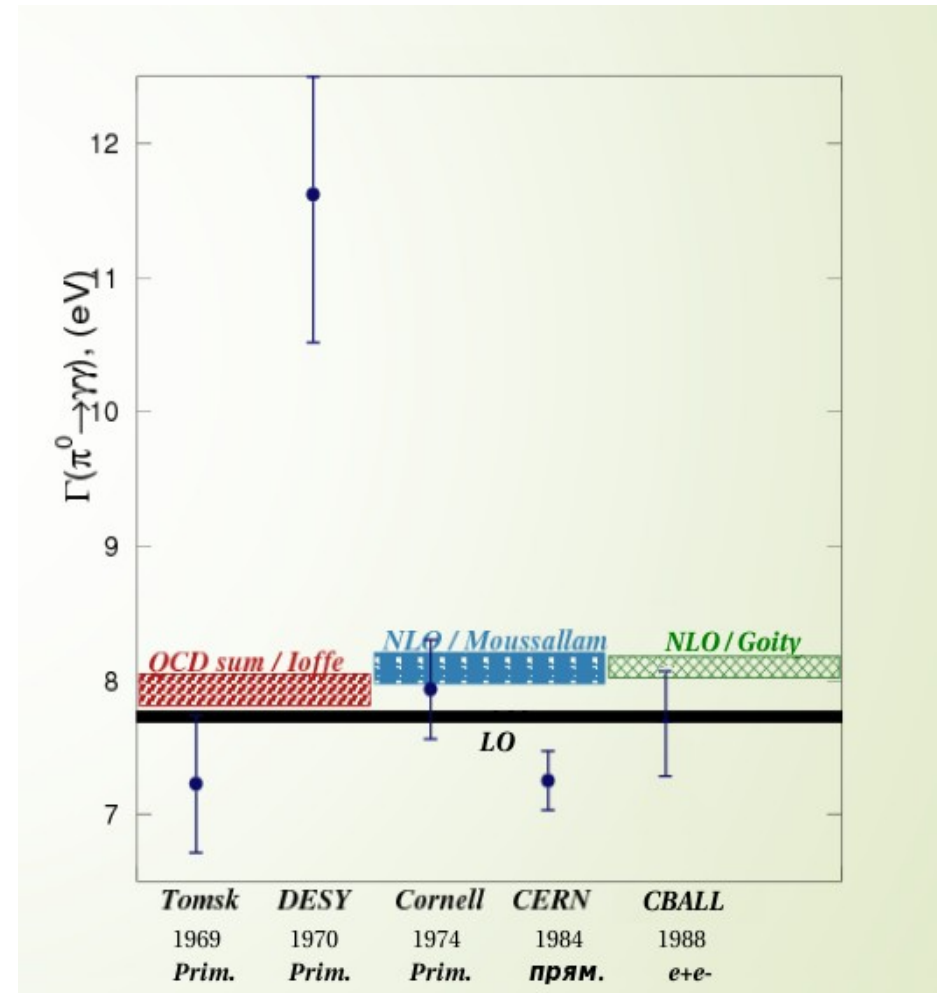
$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 11.7 \text{eV} \pm 10.0\%$$

Примаковский метод: Cornell (1974)

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.92 \text{eV} \pm 5.3\%$$

Во всех предыдущих экспериментах использовался нетаггированный фотонный пучок и традиционная калориметрия из свинцового стекла

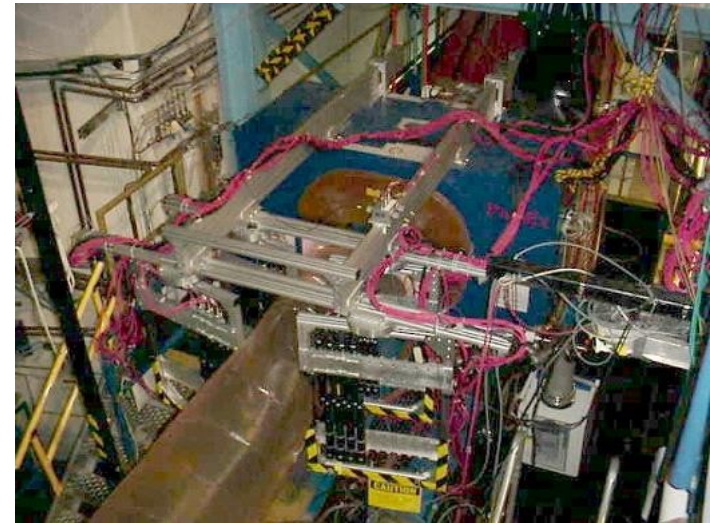
Среднее значение: $7.747 \text{eV} \pm 7.1\%$
(PDG 2010, before PrimEx1,2)



J.Goity, A.Bernstein, J.Donoghue, B.Holstein Phys Rev D66 (2002): 8.1eV
K.Kampf, B.Moussallam Phys. Rev. D 79 (2009): 8.09eV
B.Ioffe, A.Oganesian Phys Lett B647 (2007): 7.93eV

Спектрометр e^+e^- пар

- Спектрометр состоит из двух плечей, состоящих из сцинтилляционных пластин, расположенных слева и справа от линии пучка за магнитом парного спектрометра.
- Имеет акцептанс $\sim 1\%$ для пар, образованных в мишени
- Измерение выхода e^+e^- пар позволяет проверять стабильность потока γ -пучка во время работы и контролировать систематику в широком диапазоне интенсивности пучка.



Гибридный электромагнитный калориметр - NuCal

Калориметр удалён на $\sim 7\text{м}$ (7.3 — PrimEx-1, 7.0 - PrimEx-2) от мишени, поперечный размер $117 \times 117 \text{ см}^2$

Центральная часть: 1152 модуля PWO4 ($2.05 \times 2.05 \times 18 \text{ см}^3$)

Энергетическое разрешение (для γ) :

$\sim 2.8\%$ при 1 ГэВ

$\sim 1.5\%$ при 4-5 ГэВ

Координатное разрешение (для γ):

0,28см при 1 ГэВ

Угловое разрешение (для π^0):

0.35 мрад (0.02°)

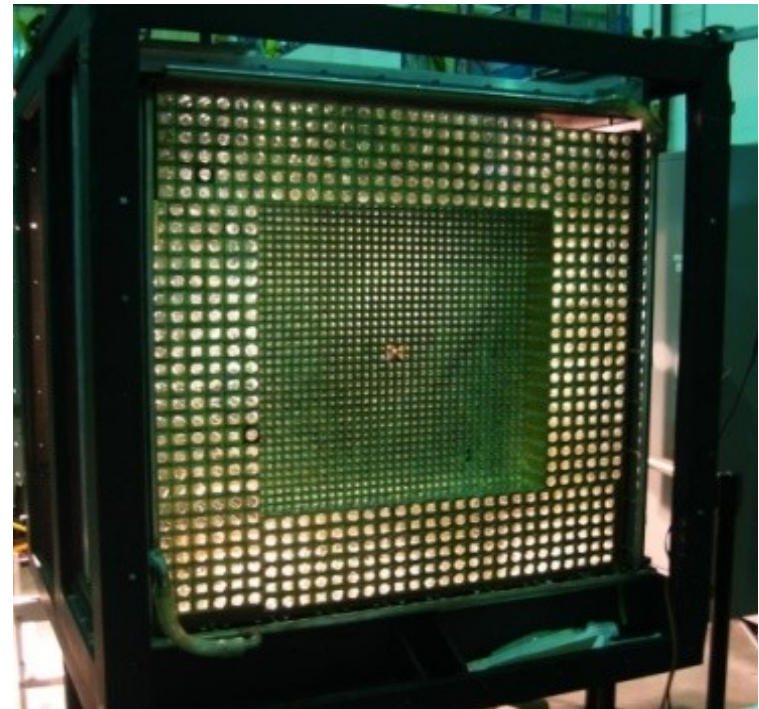
Временное разрешение:

$\sim 400\text{псек}$

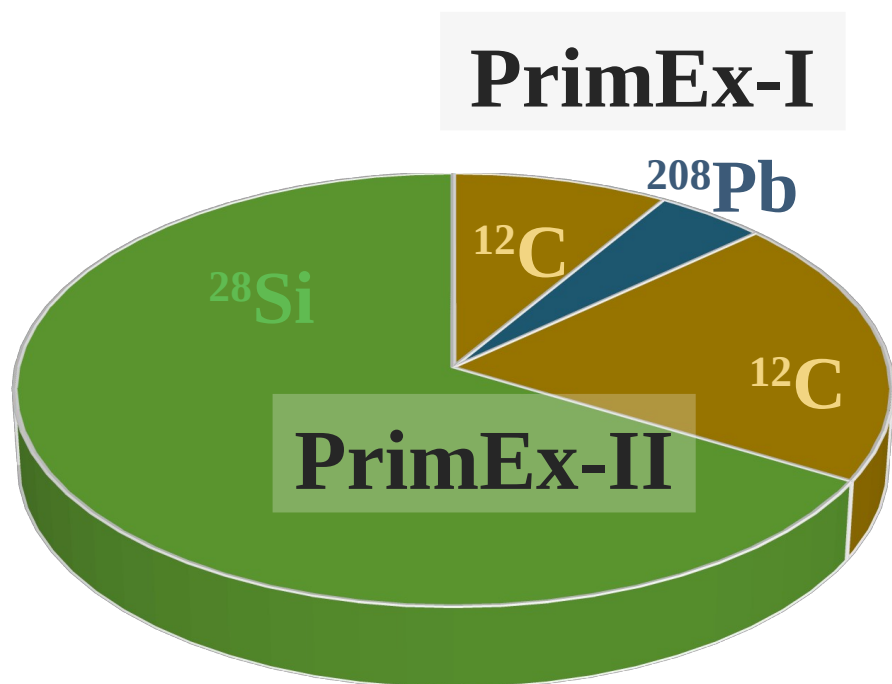
576 модулей свинцового стекла

(периферия)

($3.82 \times 3.82 \times 45\text{см}^3$)



Данные PrimEx-I & PrimEx-II

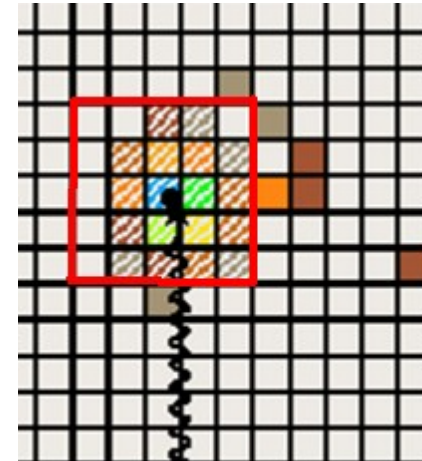


PrimEx сеанс	Мишень	Толщина [% р.д.]	Поток [$\times 10^{12}$]	Энергия пучка [ГэВ]
I	^{12}C	5	1.4	4.9...5.5
I	^{208}Pb	5	0.72	4.9...5.5
II	^{12}C	8	2.0	4.4...5.3
II	^{28}Si	10	5.3	4.4...5.3

Алгоритмы реконструкции гамма-квантов в калориметре при анализе первой и второй фазы набора данных в эксперименте PrimEx

Primex-I: алгоритм 5x5

- 1) Нахождение модуля с максимальным энерговыделением;
- 2) объявление всей области 5x5 вокруг модуля с максимальным энерговыделением как одно попадание



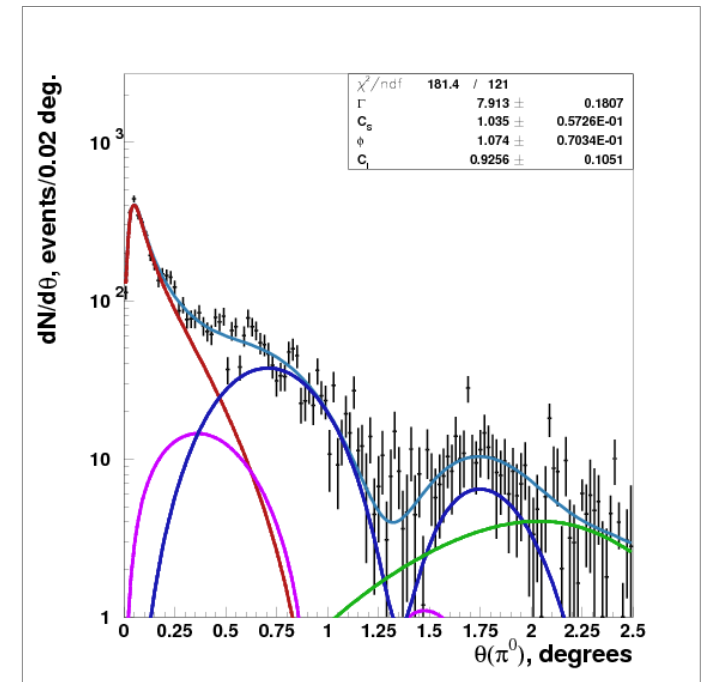
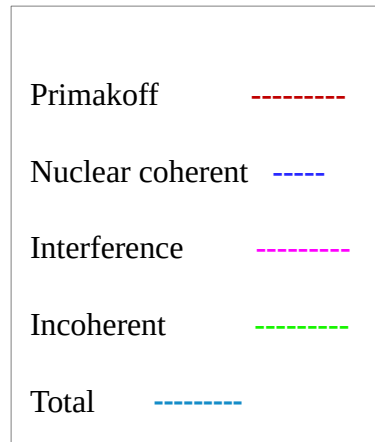
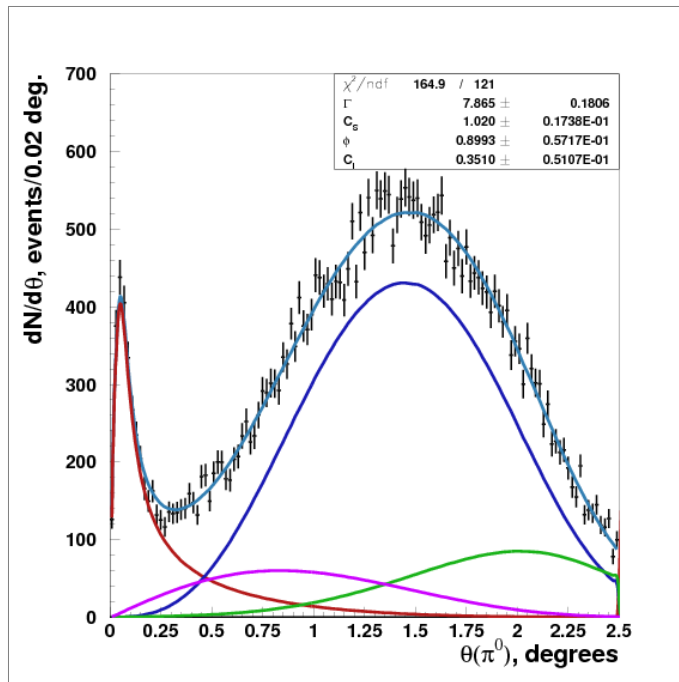
PrimEx-II: островной алгоритм

- 1) Нахождение модуля с максимальным энерговыделением;
- 2) объявление всей односвязной области вокруг модуля с максимальным энерговыделением как исходный «сырой» кластер;
- 3) попробовать разбить этот «сырой» кластер на множество попаданий

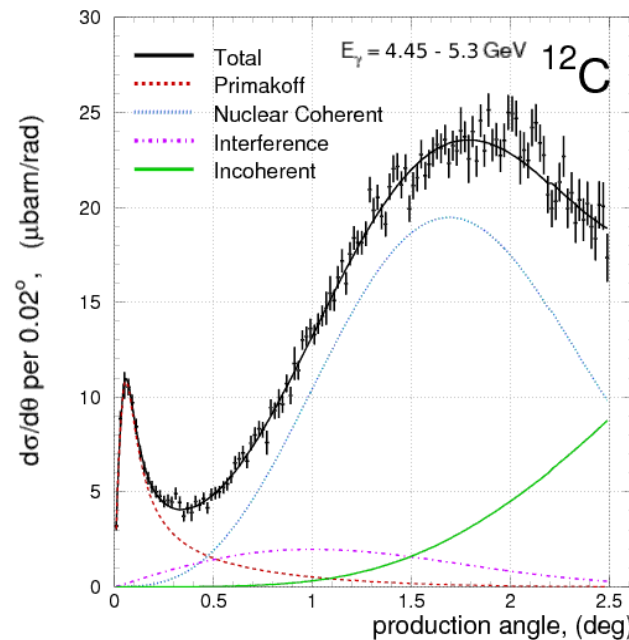
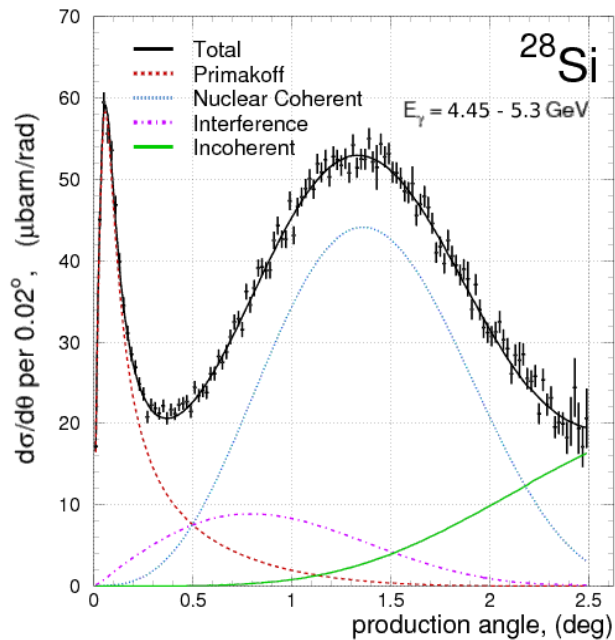
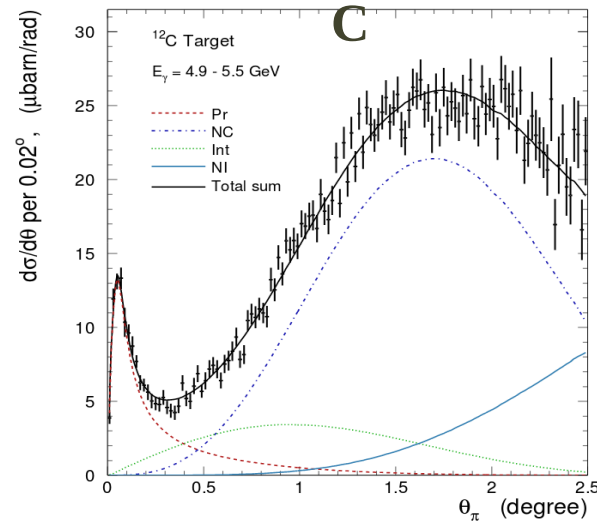
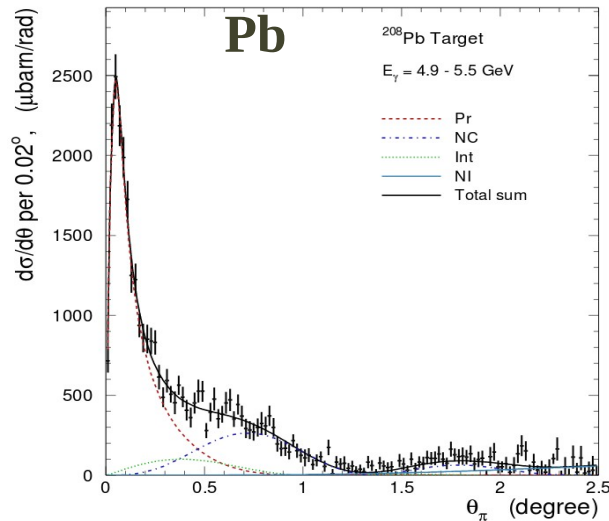


Выход π^0 в эксперименте PrimEx-I на углеродной и свинцовой мишенях

- Выход π^0 в эксперименте PrimEx-I для ^{12}C (слева) и ^{209}Pb (справа) мишеней
- Для фитирования данных была использована свертка теоретических распределений с разрешением установки



Дифференциальные сечения рождения π^0 мезона в экспериментах PrimEx-1 и PrimEx-2



Сечение фоторождения π^0 было получено из упругого выхода используя акцептанс установки и разрешение: $\sigma = N(\pi^0) / F(\text{поток}) \cdot L(\text{свет.}) \cdot \varepsilon$ (эфф.)

Погрешности в экспериментах PrimEx I и II

$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$

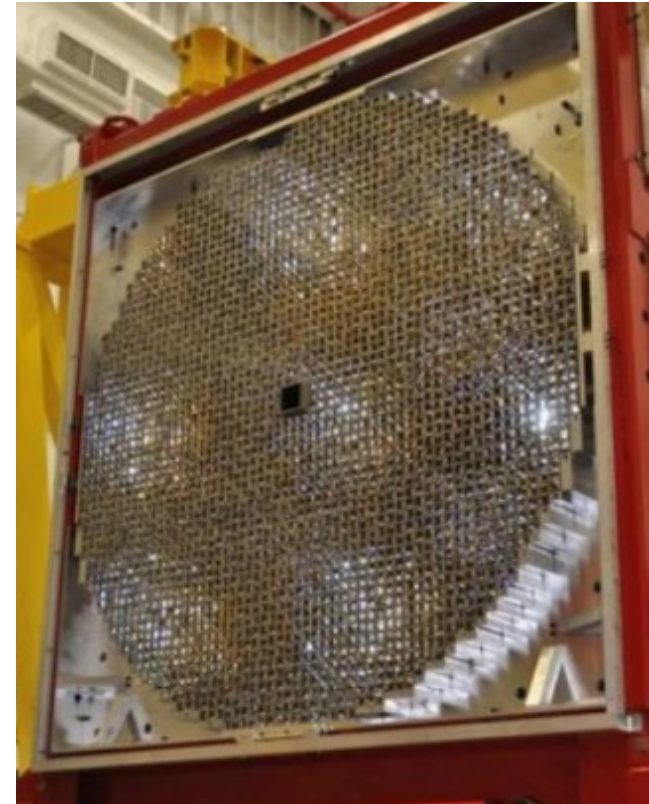
Источник погрешностей	PrimEx-I	PrimEx-II
Параметры пучка	0.4%	0.3%
Определение потока	1.0%	0.8%
Параметры мишени	0.1%	0.3%
Эффективность триггера	0.1%	0.1%
Отбор событий	0.5%	0.2%
МК погрешность	0.6%	0.6%
Извлечение выхода π^0	1.6%	0.8%
Фон от ω и ρ -мезонов	0.3%	0.4%
Систематические погрешности	2.1%	1.4%
Статистические погрешности	1.8%	0.7%
Общая	2.8%	1.6%

← Лучшее качество пучка

← Из-за увеличенной статистики

Передний калориметр (FCAL)

- Передний калориметр состоит из 2800 модулей из свинцового стекла размером $4 \times 4 \times 45$ см³, предназначенных для идентификации гамма-квантов из распадов π^0 -мезонов.
- Расположен на расстоянии 5.6 м от мишени.
- Центральное отверстие 3×3 модуля.
- Энергетическое разрешение для гамма-квантов: $6\%/\sqrt{E} \pm 1.6\%$.



Поляризуемость пионов

Поляризуемость это фундаментальное свойство частиц.

Пион — легчайшая из сильно взаимодействующих частиц, наблюдаемая в природе. Измерение поляризуемости пиона это один из важнейших тестов проверки фундаментальной симметрии в КХД при низких энергиях.

Предсказание электрической и магнитной поляризуемости для **заряженного** пиона[1-3] представлено следующей формулой:

$$\alpha_{\pi^+} = -\beta_{\pi^+} = \frac{4\alpha}{m_{\pi} F_{\pi}^2} (L_9^r - L_{10}^r)$$

$$\alpha_{\pi^+} - \beta_{\pi^+} = (5.7 \pm 1.0) \times 10^{-4} fm^3$$

Для **нейтрального**[4-5]:

$$\alpha_{\pi^0} = -\beta_{\pi^0} = -\frac{\alpha}{96\pi^2 m_{\pi} F_{\pi}^2}$$

$$\alpha_{\pi^0} - \beta_{\pi^0} = (-1.9 \pm 0.2) \times 10^{-4} fm^3$$

где m_{π} (M_{π}) – масса пиона, F_{π} – константа распада пиона, α — постоянная тонкой структуры, L_9^r и L_{10}^r константы Лагранжиана.

Прецизионное измерение поляризуемостей заряженного и нейтрального пионов позволит получить параметры α_{π} и β_{π} с точностью 10%, что превосходит по точности все существующие на сегодняшний день измерения.

Пионная поляризуемость также играет важную роль в $(g-2)_{\mu}$ аномалии[6], интерес к измерению которой возрос многократно после того, как недавно было обнаружено, что этот параметр отклоняется на 4.2 стандарта от предсказанного Стандартной Моделью значения [7].

[1] Burgi U. // Nucl. Phys. B. 479. 392. (1996).

[2] Gasser J., Ivanov M.A., Sainio M.E. // Nucl. Phys. B. 745. 84. (2006).

[3] Pasquini B., Drechsel D., Scherer S. // Phys. Rev. C. 77. 065211. (2008).

[4] Babusci D., Belucci S., Giordano G. et al. // Phys. Lett. B. 277. 158. (1992).

[5] Bellucci S., Gasser J., Sainio M.E. // Nucl. Phys. B. 423. 80. (1994).

[6] Engel K., Patel H., Ramsey-Musolf M. // Phys. Rev. D. 86. 037502. (2012).

[7] Abi B., Albahri T., Al-Kilani S. et al. // Phys. Rev. Lett. 126. 141801. (2021).

Когерентный тормозной гамма пучок

Когерентное тормозное излучение экспериментально наблюдается, когда электроны проходят через кристаллические мишени.

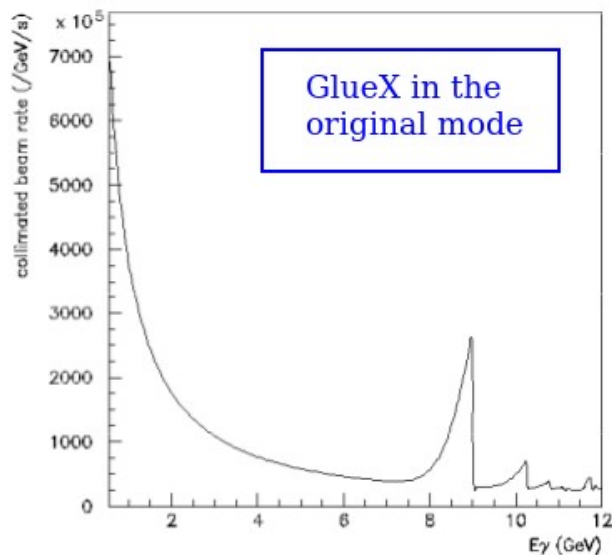


Figure 5: Collimated beam rate at 9 GeV. The ratio of events in the peak (8–9 GeV) to events outside the peak is 0.068.

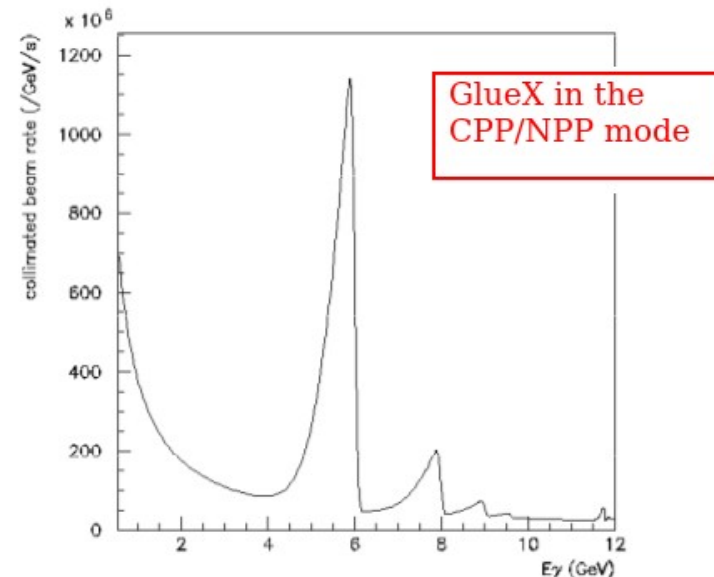


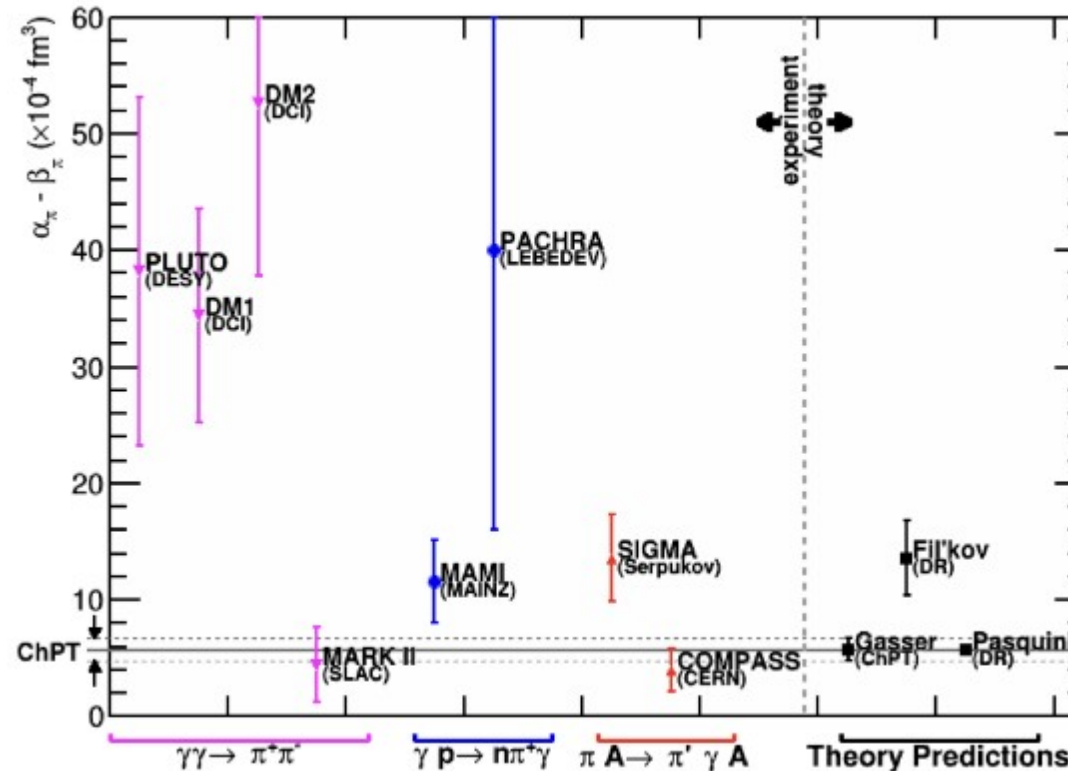
Figure 6: Collimated beam rate at 6 GeV. The ratio of events in the peak (5–6 GeV) to events outside the peak is 0.32.

AlekSejevs A., Barkanova S., Dugger M. et. al. A proposal to the 40 th Jefferson Lab Program Advisory Committee.

https://www.jlab.org/exp_prog/proposals/13/PR12-13-003.pdf

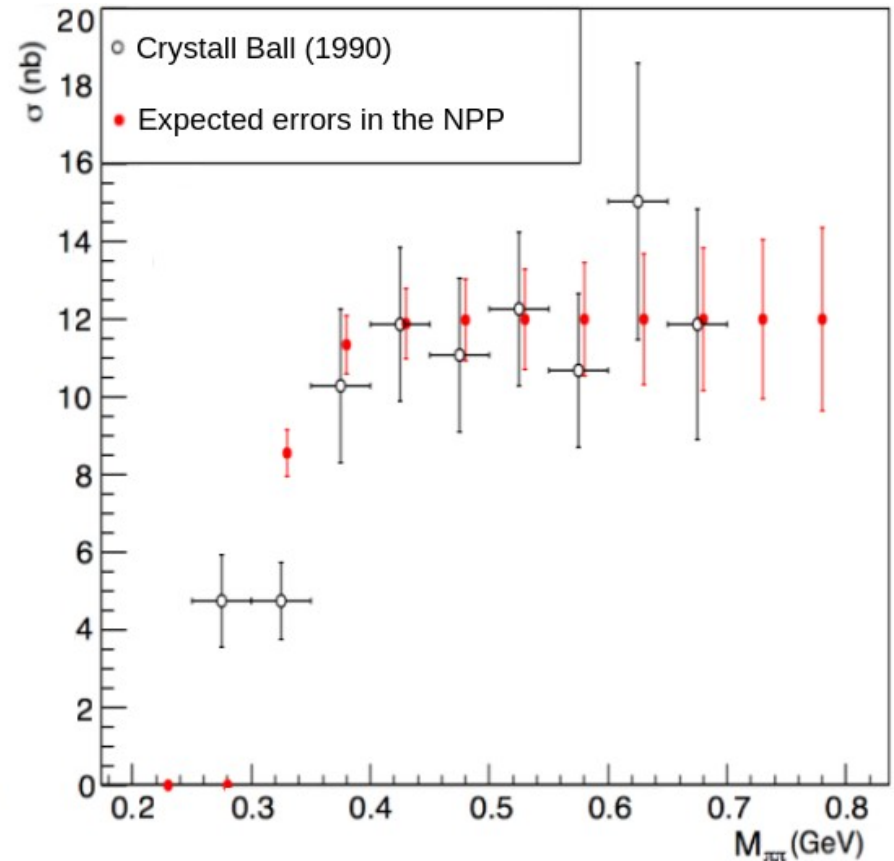
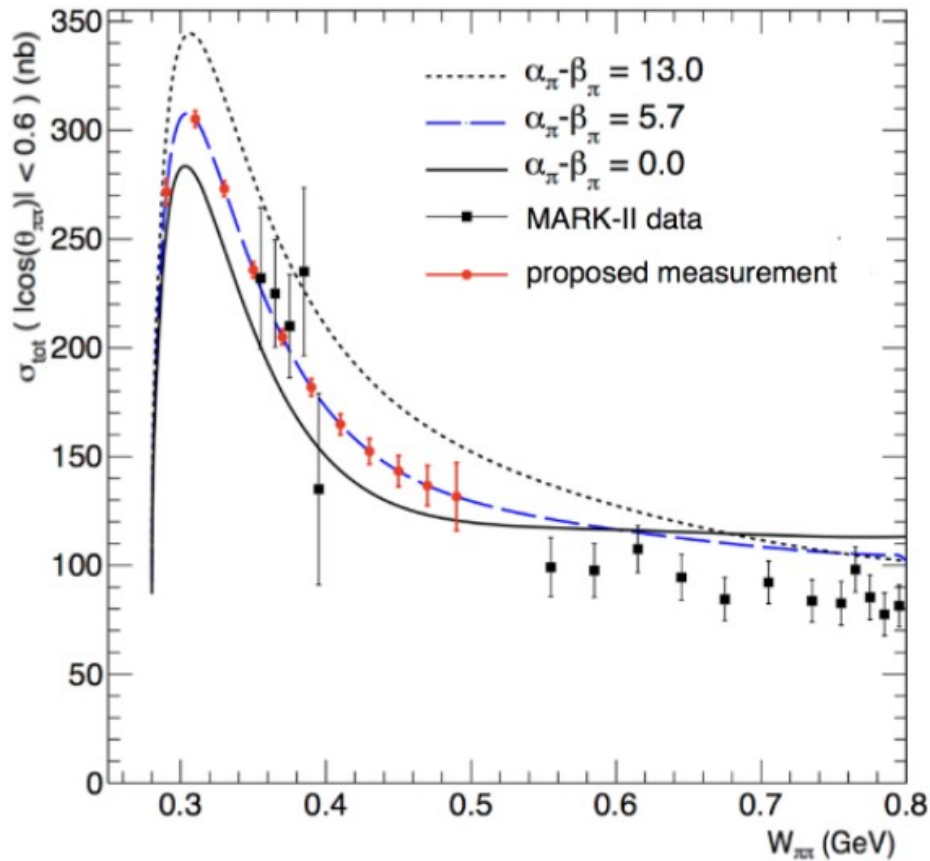
Предыдущие измерения

Предыдущие измерения поляризуемости заряженного пиона
(CPP)



Существует три различных способа, где была измерена поляризуемость заряженного пиона. Наиболее современные эксперименты для каждого способа: MARK-II, MAMI, COMPASS. Ожидается, что измерение CPP будет в 1,5 раз лучше чем наиболее точное на сегодняшний день.

Предыдущие измерения и ожидаемые данные для **заряженных**(слева) и **нейтральных**(справа) пионов



Слева: Сечение $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$. Сплошные, штриховые, пунктирные кривые это расчеты дисперсионной модели с $\alpha_\pi - \beta_\pi$ - равными 0,0, 5,7(ChPT) и 13,0 соответственно. Черные точки данных взяты из Mark II, красные точки — ожидаемый результат Jlab.

Справа: Оценочное полное сечение реакции $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$, полученное в эксперименте NPP (JLab) и на основе данных предыдущего единственного измерения с помощью «Crystall Ball» (недостатком здесь является очень низкая статистическая ценность — собрано около 300 событий для реакции $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$).

5.5 Lepton Pair Backgrounds

To compare relative rates for $\gamma A \rightarrow e^+e^-A$, $\gamma A \rightarrow \mu^+\mu^-A$ and $\gamma A \rightarrow \pi^+\pi^-A$, it is convenient to calculate cross sections for $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$. The angular distributions are shown in Fig. 16, where the lepton pair cross sections are derived from expressions in Bjorken and Drell. The $\pi^+\pi^-$ pair cross sections are from the MARK II data [Bo92]. The red, green and blue curves are for $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$ and e^+e^- , respectively, and the solid, dashed, and dash-dot curves are for CM energies of 300, 400, and 500 MeV. Over the angular range from 40 to 140 degrees, where GlueX has relatively good angular acceptance, the e^+e^- rate is negligible, and the muon:pion ratio can range from approximately 10:1 to 1:1. Because of the high muon rate relative to the pion rate, it will be necessary to instrument GlueX with a forward angle muon veto counter placed behind FCAL. Details of the detector system are given in Appendix A.

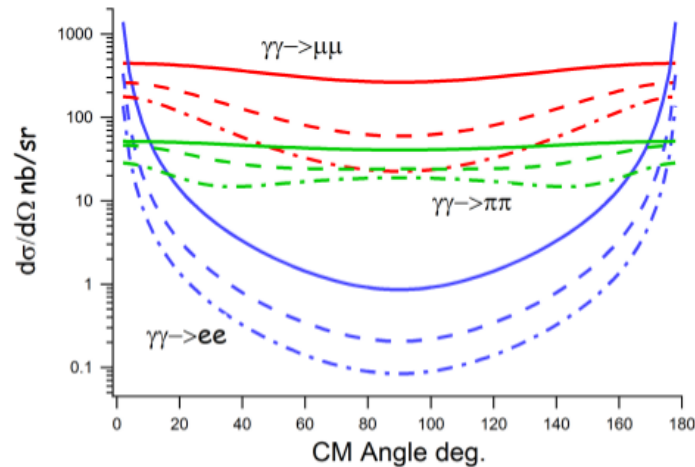


Figure 16: Angular distributions for e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ and $\pi^+\pi^-$ pairs are shown as red, green and blue curves, respectively. The solid, dashed, and dash-dot curves are for 300, 400 and 500 MeV CM energies.