

Прецизионное Измерение Времени Жизни
 π^0 -мезона,
Основанное на Эффекте Примакова

И.Ф. Ларин

*Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики (Москва)*

Физическая мотивация измерения

- Ширина распада π^0 мезона на два γ -кванта является одним из наиболее точных фундаментальных предсказаний КХД, в расчёт закладывается полное количество цветовых состояний кварков. В пределе безмассовых кварков:

$$\lim_{\substack{m_u \rightarrow 0, \\ m_d \rightarrow 0}} \Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^2 N_c^2 m_{\pi^0}^3}{576 \pi^3 F_{\pi^0}^2} = (7.725 \pm 0.044) \text{ эВ}$$

- Распадная ширина и время жизни связаны простым соотношением:

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\hbar}{\tau} \cdot Br(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$$

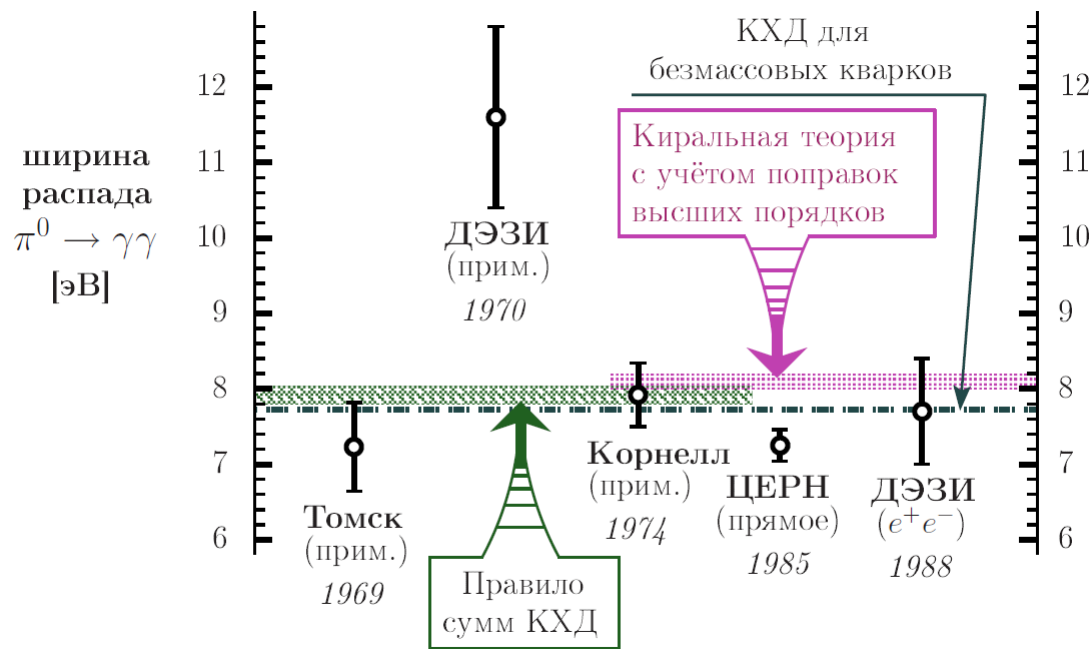
- Детальные расчёты дают величину ширины с точностью $\sim 1\%$:

7.93 эВ $\pm$ 1.5% (*правило сумм, Иоффе, Оганесян Phys. Lett. 2007, B647, p.389*)

8.10 эВ $\pm$ 1.0% (*киральная теория, J.L.Goity et al Phys.Rev.D66 076014(2002)*)

- Существовавшее экспериментально измеренное (среднемировое PDG) значение распадной ширины: **7.84 эВ $\pm$ 0.56 эВ** (или **8.4 $\pm$ 0.5 $\times 10^{-17}$ сек** для времени жизни) имело неопределённость $\sim 7\%$

Предшествующие измерения радиационной ширины π^0 -мезона

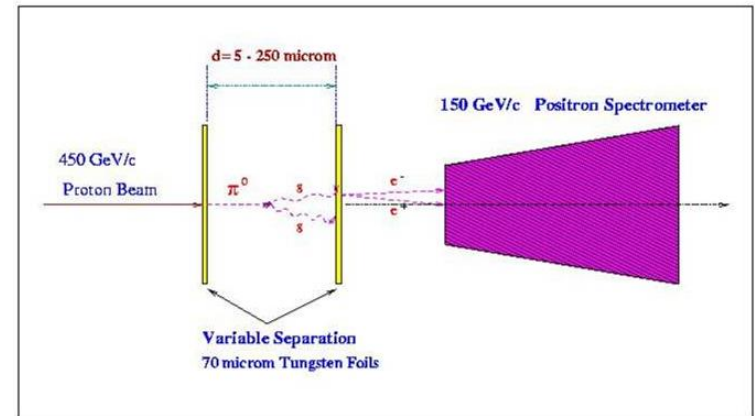


Использованные методики:

- по пробегу (прямое)
- сечение рождения в столкновении электрон-позитронных пучков
- сечение рождения в кулоновском поле ядра (примаковское)

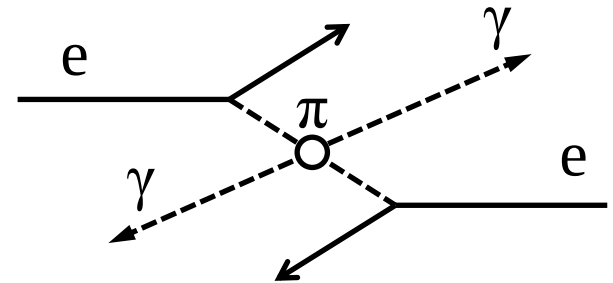
Прямой метод измерения времени жизни π^0 -мезона

- Осуществлѐн только однажды: ЦЕРН 1984г.
- Эксперимент в ЦЕРНе использовал протонный пучок с импульсом 450 ГэВ
- Время жизни $\sim 10^{-16}$ сек – пробеги ~ 10 мкм
- Измерялось количество конверсий в зависимости от расстояния между фольгами
- Результат: $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.34 \text{ эВ} \pm 3.1\%$
- Преимущества: не используется теория рождения π^0 -мезона; недостатки: недостаточно известный импульсный спектр π^0 -мезонов (точность по импульсу $\sim 1.5\%$)



Рождение π^0 в e^+e^- столкновениях

- ДЭЗИ 1988г. – измерение сечения рождения π^0
- Результат: $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.7 \text{ эВ} \pm 9\%$
- Преимущества: рождение только в электромагнитном взаимодействии – нет зависимости от параметров ядра, нет рождения в сильном взаимодействии; недостатки: плохо известная светимость эксперимента (интеграл перекрытия встречных пучков)

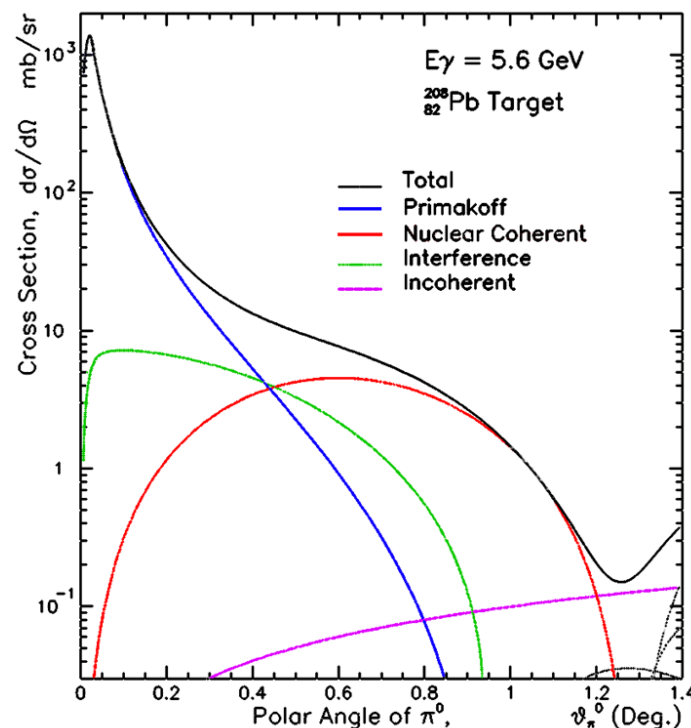
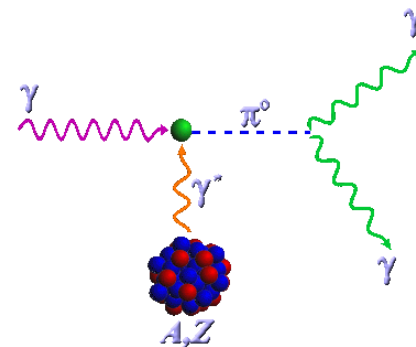


Эффект Примакова

- Фоторождение π^0 -мезона в кулоновском поле ядра
- Эквивалентность процессов фоторождения ($\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$) и радиационного распада ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) предполагает пропорциональность сечения примаковского рождения π^0 -мезона и его радиационной ширины:

$$\frac{d\sigma_P}{d\Omega} = \Gamma_{(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)} \frac{8\alpha_{em} Z^2}{m^3} \frac{\beta^3 E^4}{Q^4} |\tilde{F}_{em}(Q)|^2 \sin^2 \theta_\pi$$

- Рождение π^0 -мезона в данном механизме происходит под очень малыми углами (~ 0.3 мрад)
- Задача: точно измерить сечение и отделить примаковскую часть от ядерной



Предыдущие эксперименты, основанные на эффекте Примакова

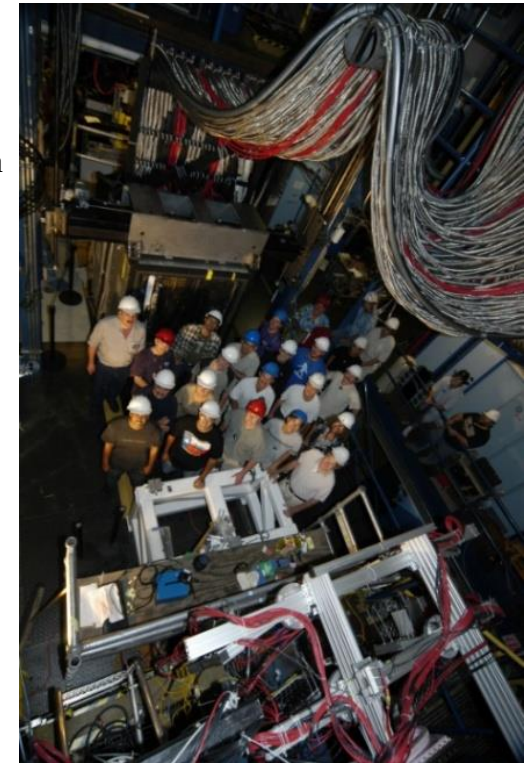
- Томск 1969г: энергия пучка ~ 1 ГэВ, мишень Pb, результат $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.2 \text{ эВ} \pm 8\%$
- ДЭЗИ 1970г: энергия пучка 1.5 - 2.5 ГэВ, мишень C, Zn, Al, Pb, результат $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 11.7 \text{ эВ} \pm 11\%$
- Корнелл 1974г: энергия пучка 4 - 6 ГэВ, мишень Be, Al, Cu, Ag, U, результат $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.92 \text{ эВ} \pm 5.3\%$
- Все предыдущие эксперименты использовали прямой (немеченый) тормозной пучок. γ -кванты от распадов π^0 -мезонов регистрировались калориметром на основе свинцового стекла (в лучшем случае). Как следствие, разрешение по углу вылета π^0 -мезонов было невысоким.

Лаборатория Т. Джефферсона

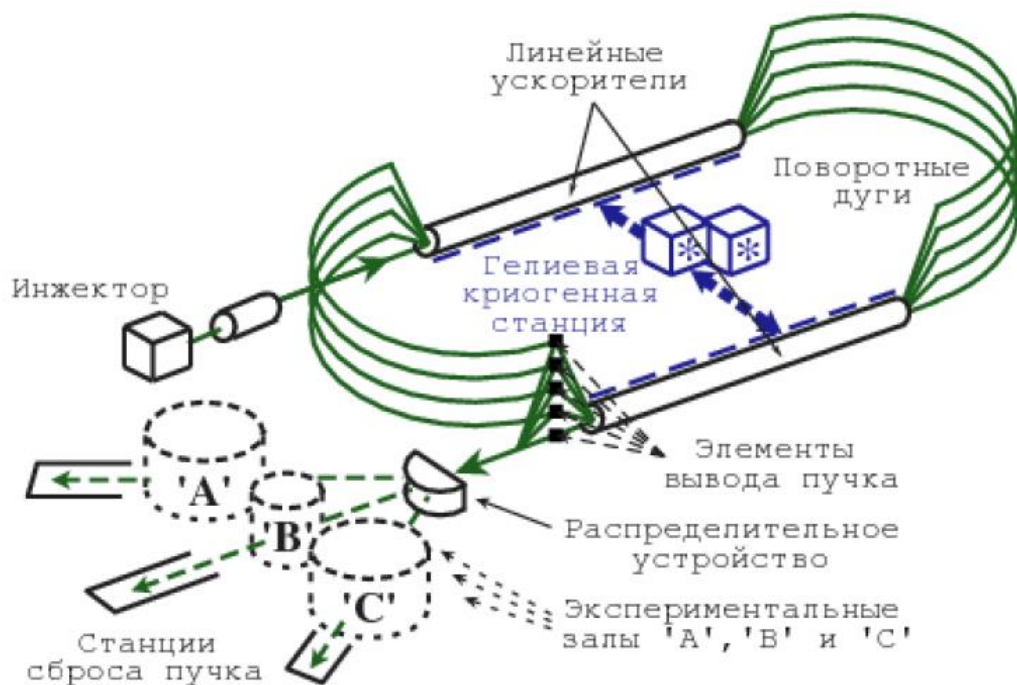


Университеты, институты и лаборатории входящие в состав сотрудничества PrimEx:

a	Arizona State University, Tempe, AZ
b	Catholic University of America, Washington, DC
c	Chinese Institute of Atomic Energy, Beijing, China
d	Eastern Kentucky University, Richmond, KY
e	George Washington University, Washington, DC
f	Hampton University, Hampton, VA
g	Institute for High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China
h	Institute for High Energy Physics, Protvino, Moscow region, Russia
i	Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia
j	Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine
k	Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA
l	Norfolk State University, Norfolk, VA
m	North Carolina A&T State University, Greensboro, NC
n	North Carolina Central University, Durham, NC
o	Southern University at New Orleans, New Orleans, LA
p	Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, VA
q	Tomsk Polytechnical University, Tomsk, Russia
r	University of Illinois, Urbana, IL
s	University of Kentucky, Lexington, KY
t	University of Massachusetts, Amherst, MA
u	University of North Carolina at Wilmington, Wilmington, NC
v	University of Texas at El Paso, El Paso, TX
w	University of Virginia, Charlottesville, VA
x	Yerevan Physics Institute, Yerevan, Armenia

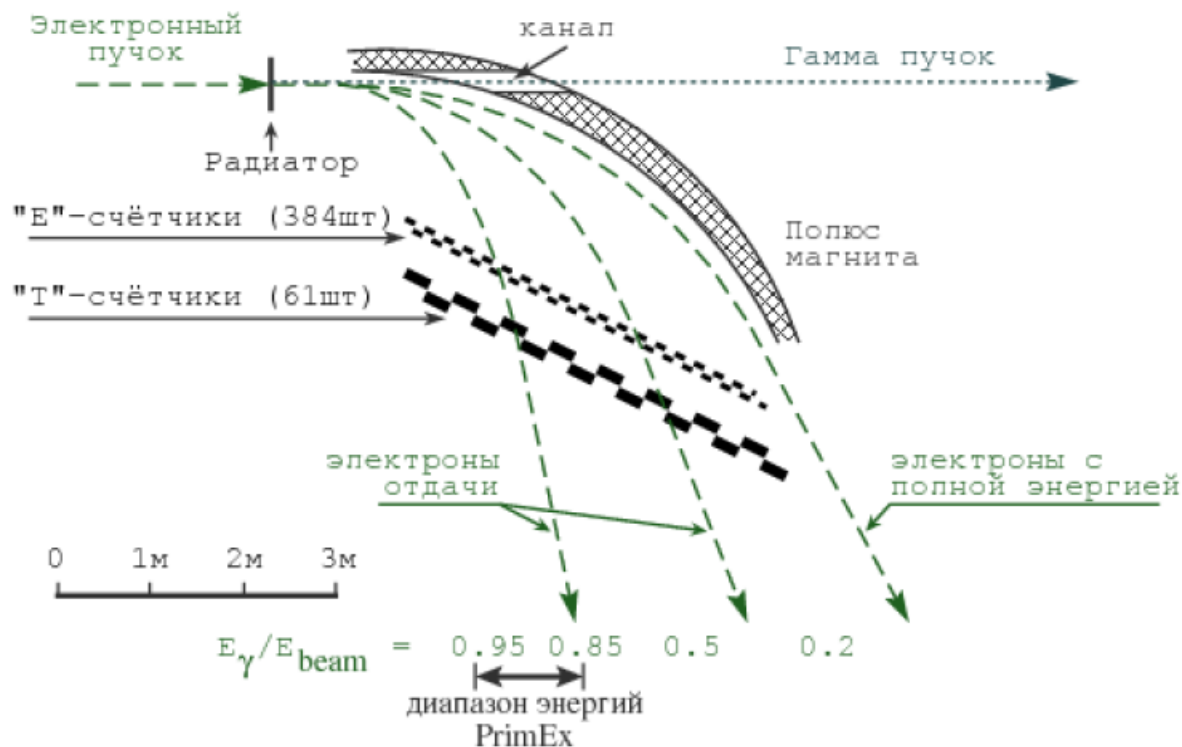


Линейный ускоритель лаборатории Томаса Джефферсона (США):



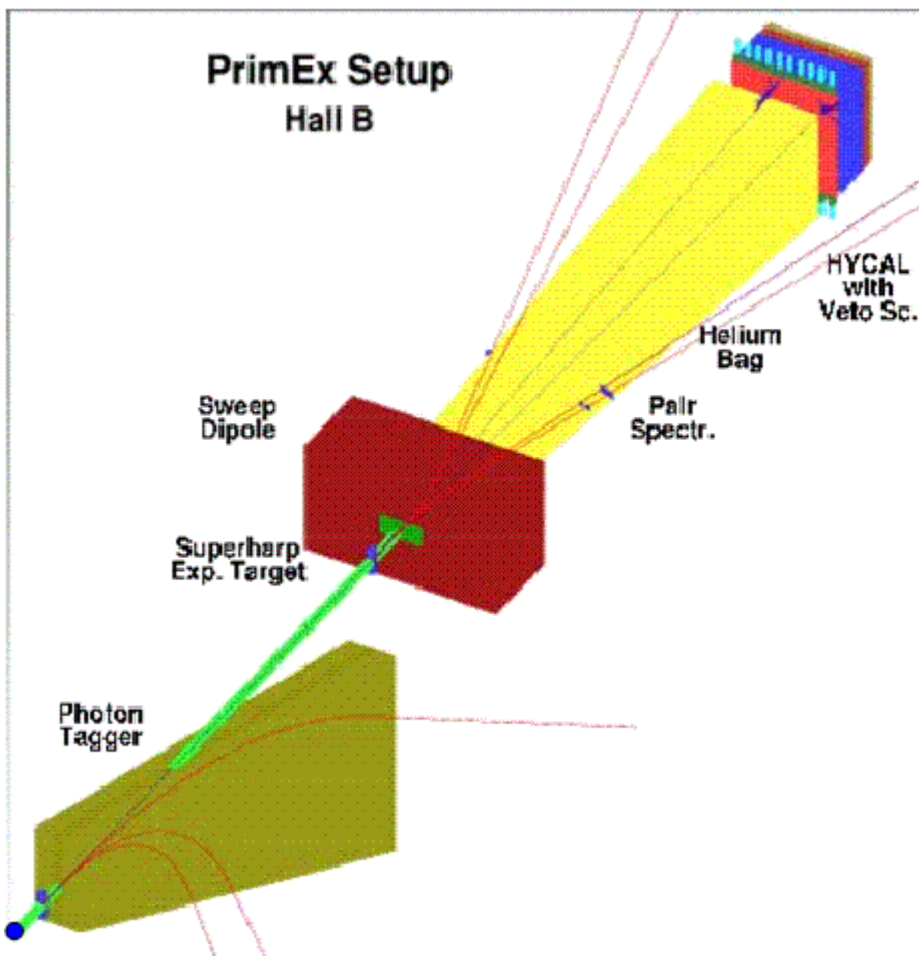
- Узкий монохроматический электронный пучок, инжектируемый электронным лазером
- Энергия электронного пучка на выходе ускорителя 5.75 ГэВ (в сеансах PrimEx)
- В эксперименте PrimEx используется пучок меченых γ -квантов с хорошо известной энергией в диапазоне 4.9...5.5 ГэВ

Система мечения тормозного пучка



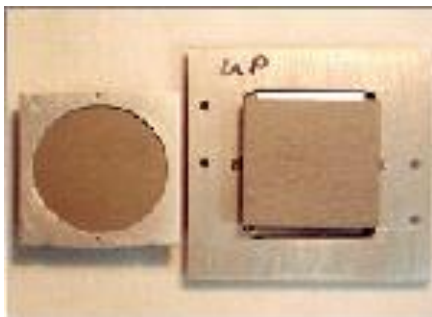
- Два ряда счётчиков: широкие – дают время сигнала отметки, узкие (уточнение траектории электрона отдачи) – дают энергию меченого пучка
- Энергетическое разрешение фотонного пучка $\sim 0.1\%$
- Временное разрешение ~ 0.1 нсек
- Точность измерения потока меченого пучка $\sim 1\%$

Установка PrimEx

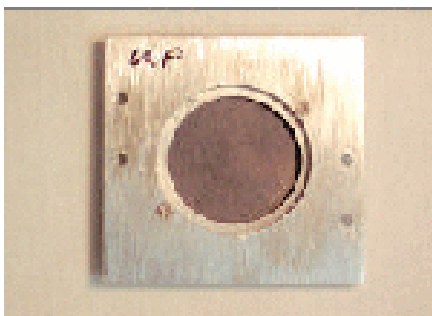


- Использование пучка меченых γ -квантов с хорошо известной энергией и потоком
- Энергия фотонов пучка 4.9 – 5.5 ГэВ
- Моноизотопные мишени C^{12} и Pb^{208}
- Гибридный электромагнитный калориметр на основе вольфрамата свинца (центр) – улучшенное разрешение по углу вылета π^0 -мезонов $\sim 0.035^\circ$
- Расстояние мишень-калориметр 7.3м
- Добавлен спектрометр электрон-позитронных пар для дополнительного контроля потока пучка при высоких интенсивностях
- Дополнительный контроль точности измерения сечений по Комптону и рождению пар

Основные мишени, использованные в эксперименте PrimEx

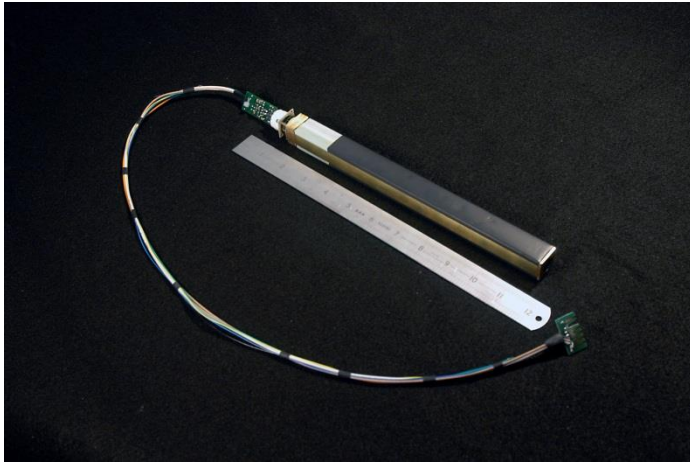


углеродная мишень (пиролитический графит толщиной 5% рад. длины ~ 10 мм, плотность 2.2 г/см^3).
Допустимое отклонение по толщине 0.1%.



свинцовая мишень (изотоп свинца 208 – бесспиновое ядро, фольга толщиной 5% рад. длины ~ 0.3 мм, плотность $\sim 11.4 \text{ г/см}^3$).
Допустимое отклонение по толщине 0.3%.

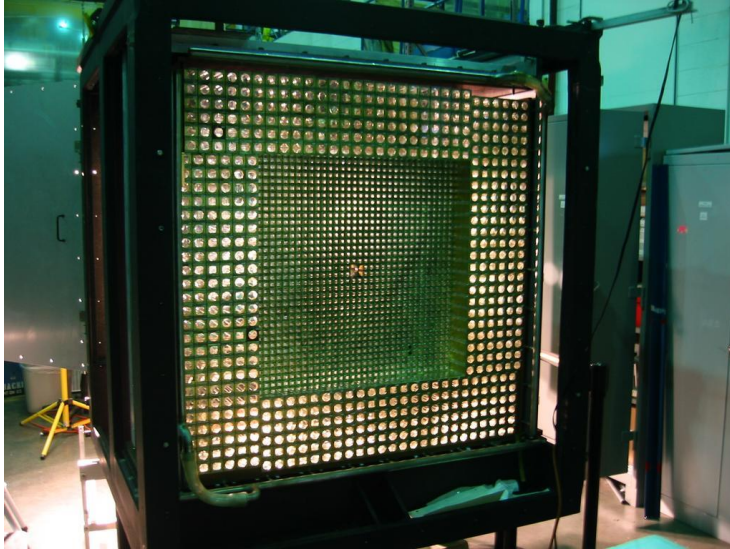
Гибридный калориметр NuCal:



- Поперечный размер 1.2м x 1.2м
- 1152 модулей PbWO_4 и 576 модулей из свинцового стекла
- Система вето (исключение заряженных частиц в калориметре)

Центральная часть, выполненная на кристаллах вольфрамата свинца (сцинтилляторы) термостатируется при 4°C и имеет:

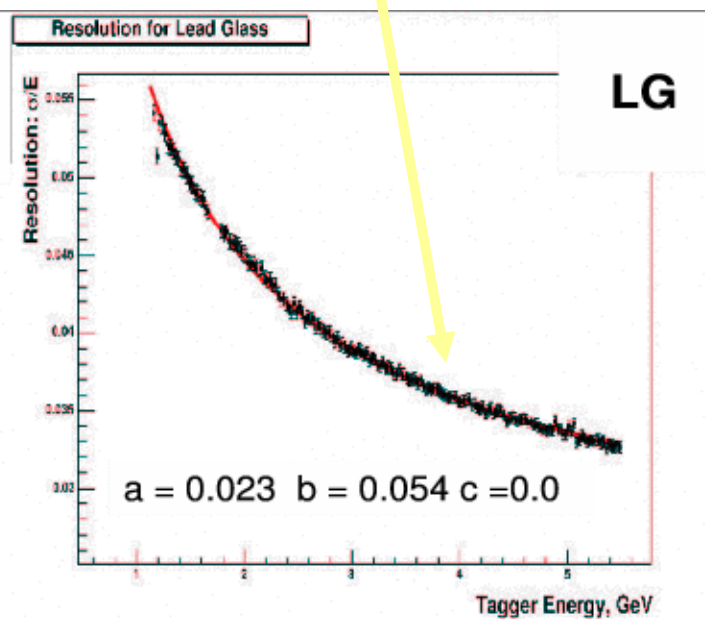
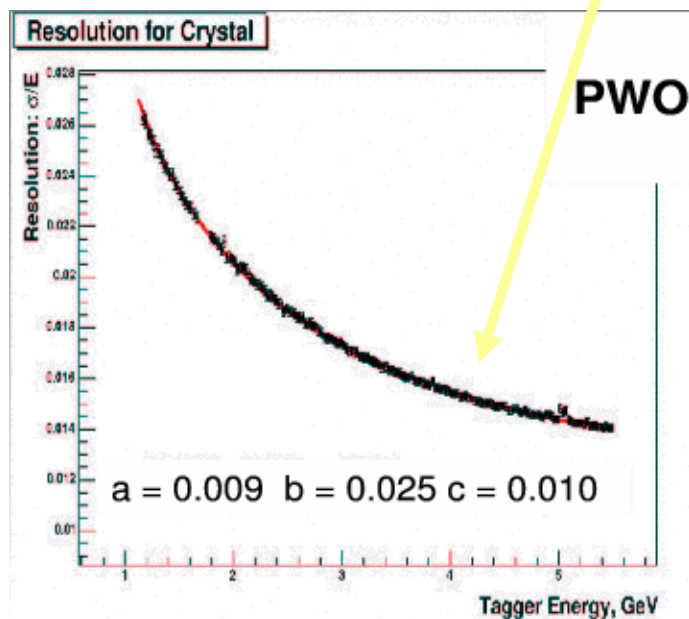
- Энергетическое разрешение 1.5%...2.0%
- координатное разрешение – 1.5мм...2.5мм



Периферическая часть выполнена из черенковских модулей, которые имеют примерно вдвое большие размеры и примерно вдвое худшие значения разрешений и выдвинуты относительно центральной части

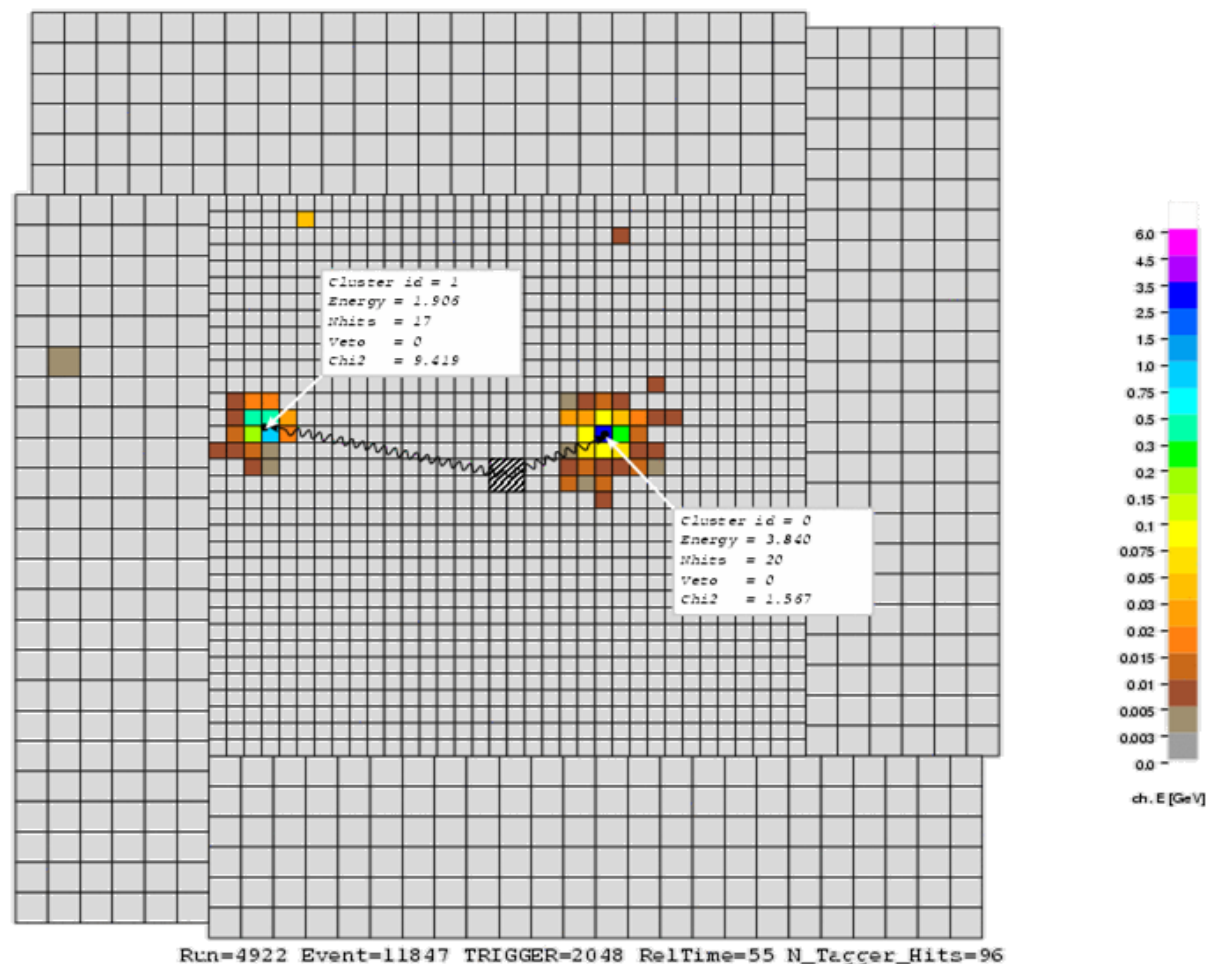
Кривые энергетического разрешения калориметра, полученные в ходе сканирования γ -пучком низкой интенсивности

Фит функцией $\Delta E/E = a \oplus b/\sqrt{E} \oplus c/E$ и его результаты:

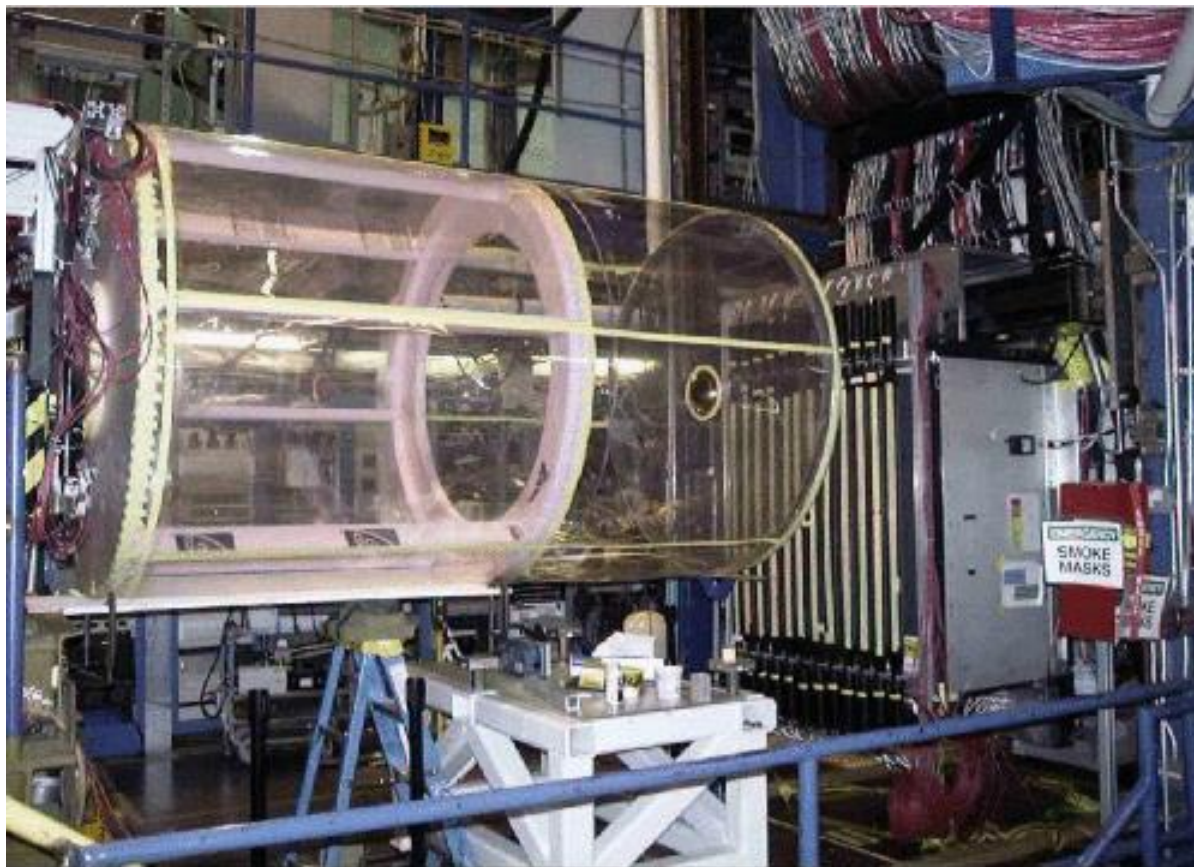


Типичное событие регистрации π^0 мезона в калориметре

- Триггер – совпадение по времени сигнала системы мечения и калориметра. Последний вырабатывался при превышении полного энерговыделения величины 2.5 ГэВ
- Частота триггера ~ 1 кГц
- Невысокая множественность кластеров в калориметре – «лишний кластер» наблюдался примерно в 10% событий



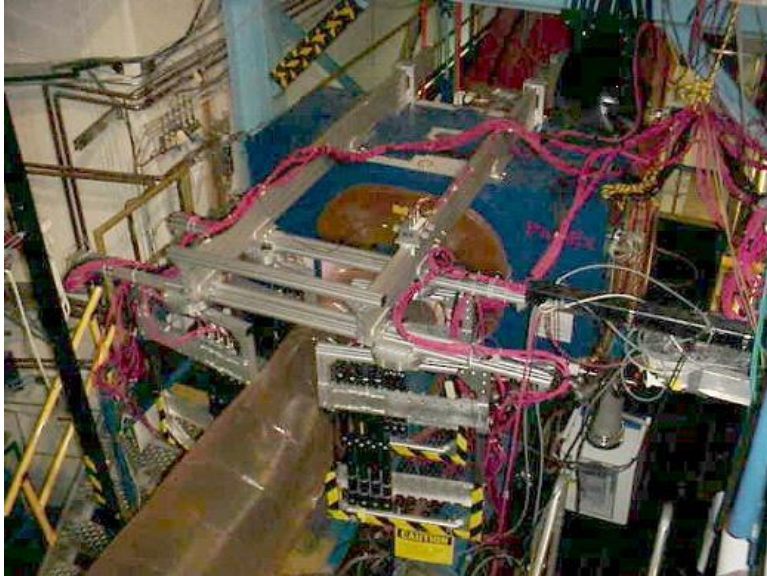
Гелиевый мешок:



Длина ~5м

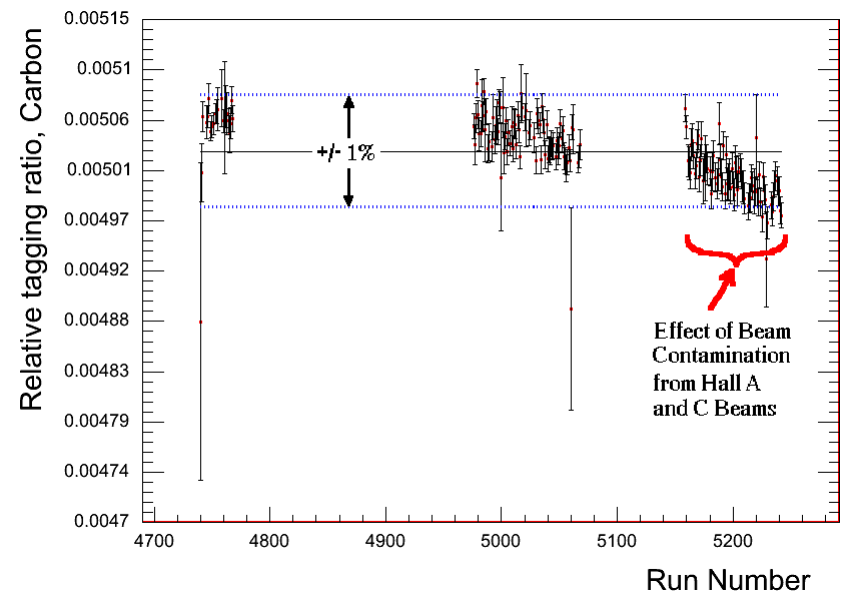
Толщина окон для прохождения пучка – порядка десятой мм

Спектрометр электрон-позитронных пар



- Интеграл поля спектрометра $16 \text{ кГс} \cdot \text{м}$
- 2 плеча, каждое из 2 рядов по 8 сцинтилляционных пластин

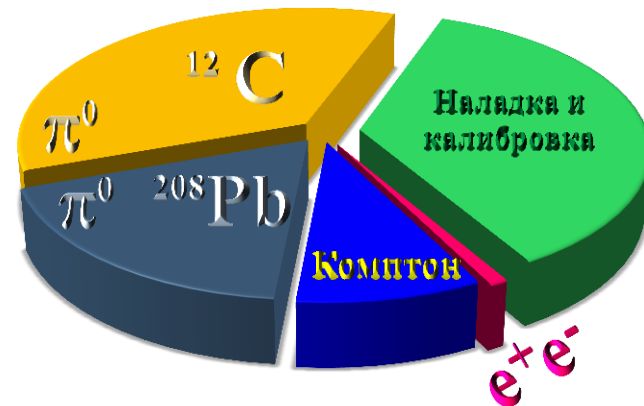
- Дополнительный контроль пучкового потока
- Анализ регистрируемого выхода пар от конверсий пучка в мишени, нормированного на поток



Основные этапы PrimEx

- 1999 – эксперимент утвержден
- 2000 – выделен грант NSF \$1млн на постройку калориметра
- 2004 – окончание сборки установки и проведение сеанса
- 2007 – получен предварительный результат
- 2009 – получен окончательный результат
- 2011 – результат опубликован (Phys. Rev. Lett.)
- 2012 – PDG использует результат для получения среднемирового времени жизни нейтрального пиона
- 2010 – проведение второго сеанса

Данные PrimEx (сеанс 2004г)



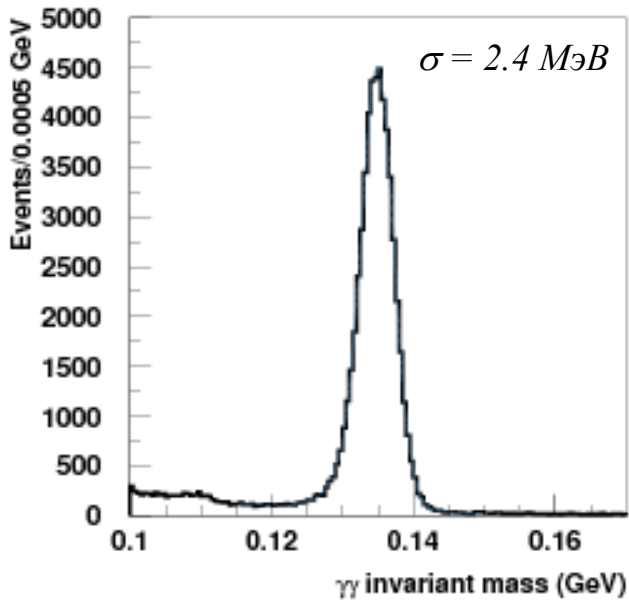
Анализ событий и доступная статистика

- Измеряемые величины:
 - энергия и время регистрации пучкового фотона
 - энергии, координаты в калориметре фотонов от распада π^0 -мезонов
 - временной сигнал от калориметра
- Кинематические переменные: отношение энергии пары γ -квантов к энергии пучка, их угол вылета и инвариантная масса
- Кинематические связи использованные в анализе:
 - Сохранение энергии (отдача мала)
 - Инвариантная масса
- Две группы анализировали данные независимо
- Используемая в данном анализе статистика (светимость) с наиболее стабильным пучком:
 - Углерод-12 148.6 нбарн⁻¹
 - Свинец-208 0.731 нбарн⁻¹

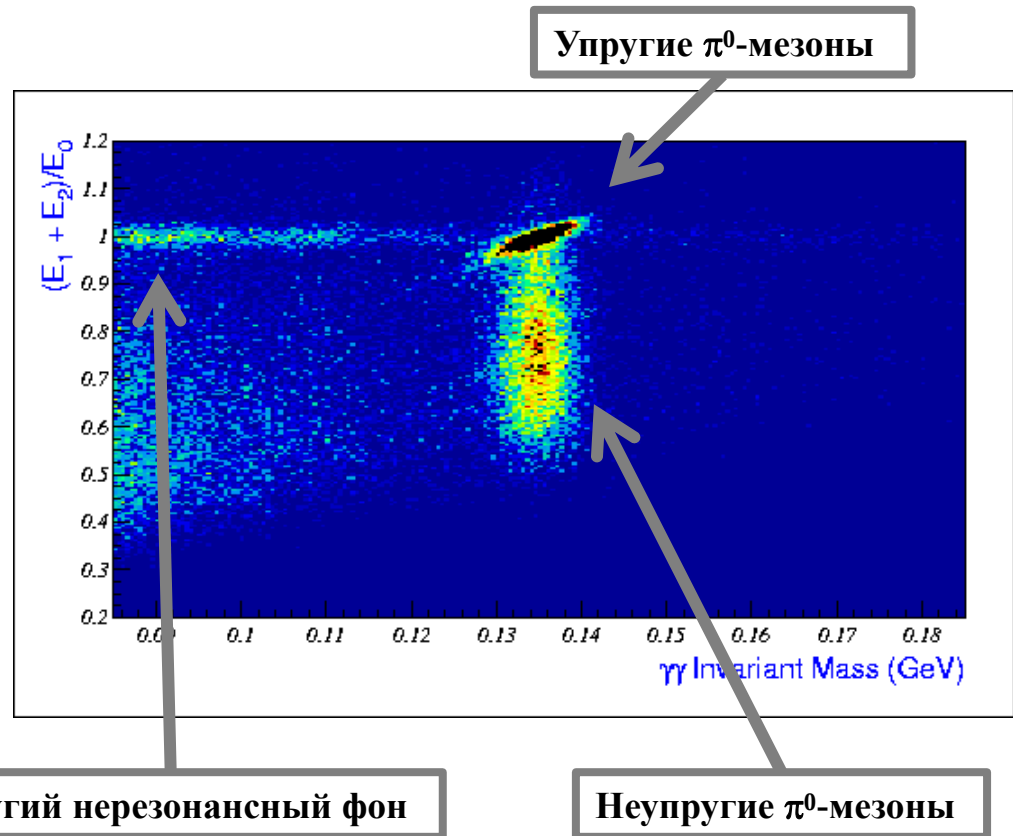
Отбор событий с π^0 -мезонами

- Минимальная энергия γ -кванта 0.5 ГэВ,
- использована центральная часть калориметра, собранная на кристаллах вольфрамата свинца
- сигнал от вето

Выделение π^0 -мезонов:
инвариантная масса двух γ -квантов



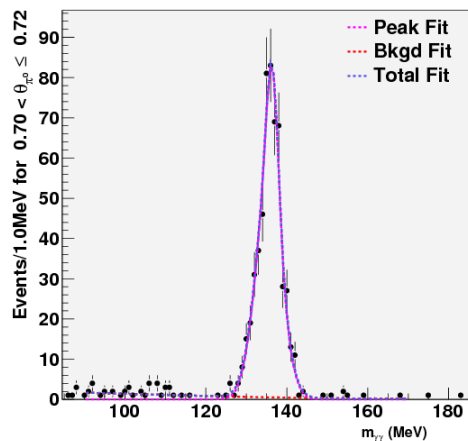
Двумерное распределение:
инвариантная масса двух частиц
против отношения энергии двух
частиц к энергии пучка



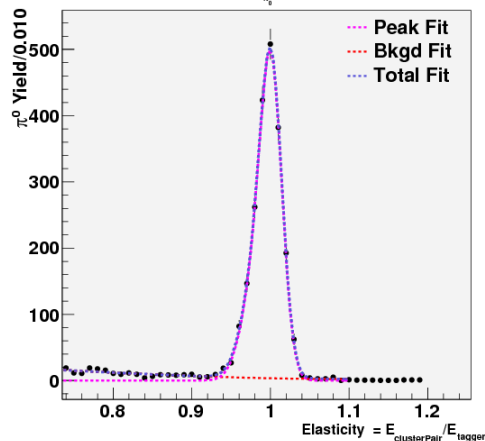
Выделение упругих π^0 -мезонов

- Задача: получить количество π^0 -мезонов как функцию угла вылета – события сгруппированы по углу вылета с интервалом 0.02°
- Использовано два различных подхода в двух независимых анализах:
 - События разбиты по энергии пары частиц, дополнительно к разбиению по углу вылета. Выход π^0 -мезонов для каждого значения энергии и угла получен из распределения по инвариантной массе
 - Использована кинематическая связь на сохранение энергии: энергии двух частиц поправлены с учётом этой связи. С использованием этой поправки, получено новое распределение по инвариантной массе двух частиц, использованное для получения выхода

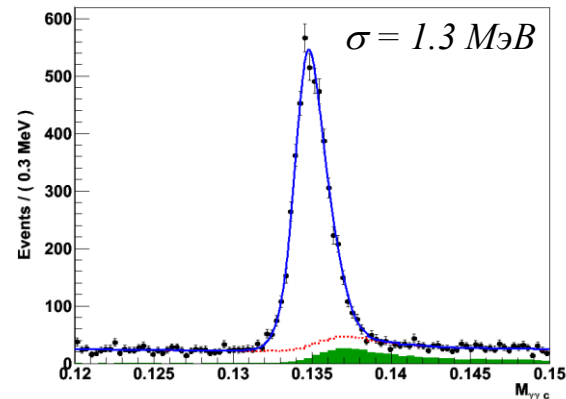
Инв. масса для некоторого значения угла и энергии



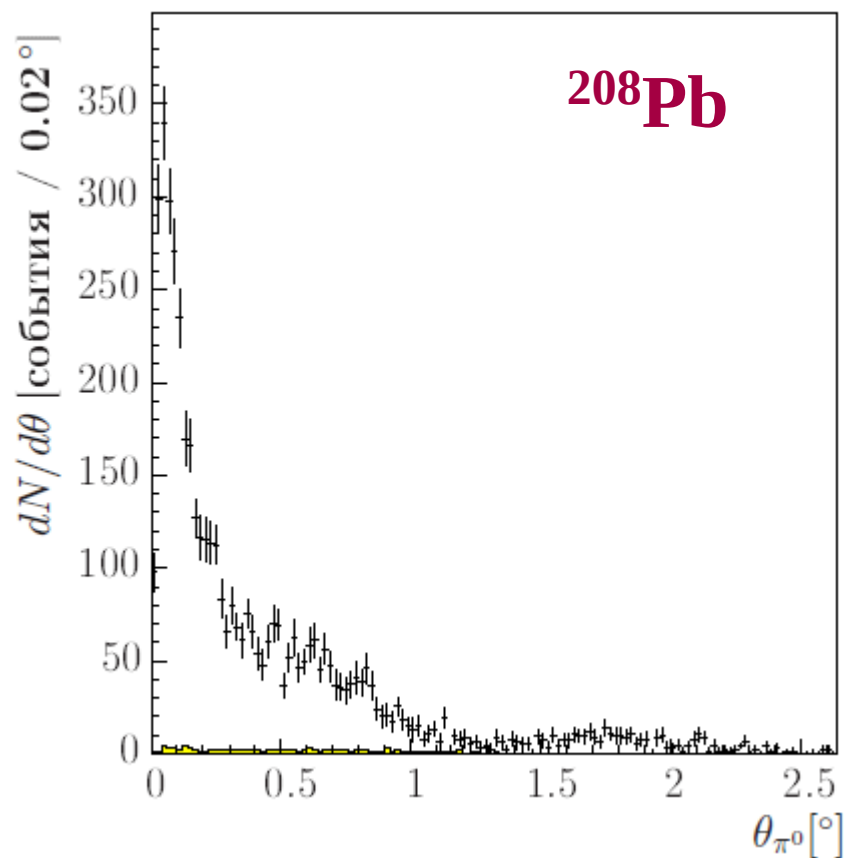
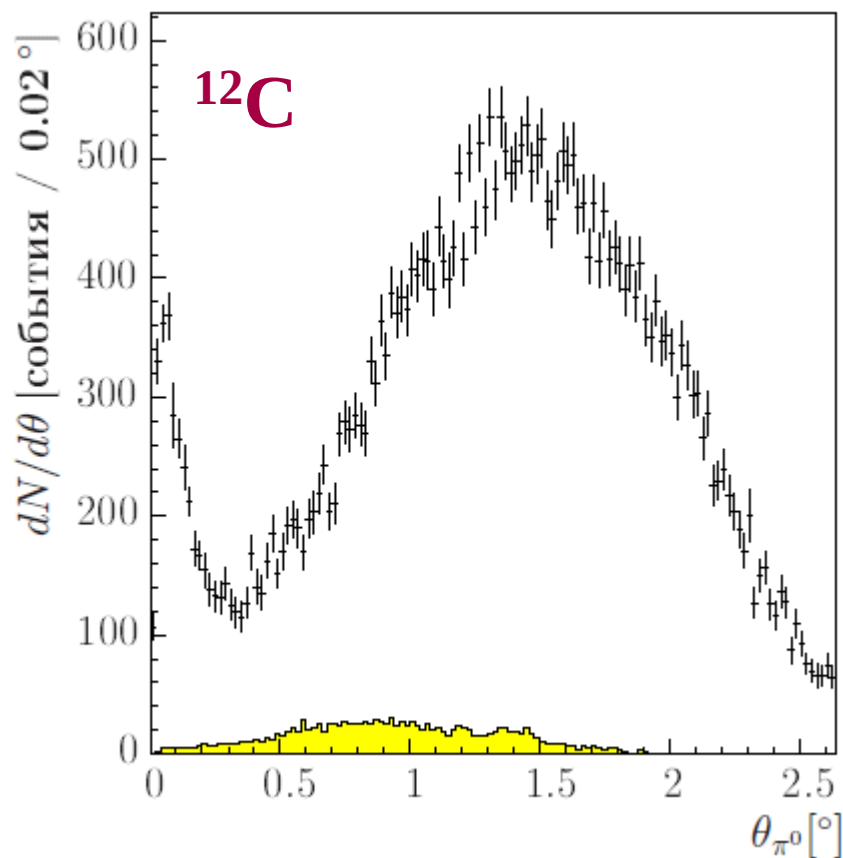
Отношение энергии π^0 -мезона к энергии пучка



Инв. масса с поправкой на энергию пучка для некоторого значения угла (зелёная гистограмма снизу – фон ω -мезонов)



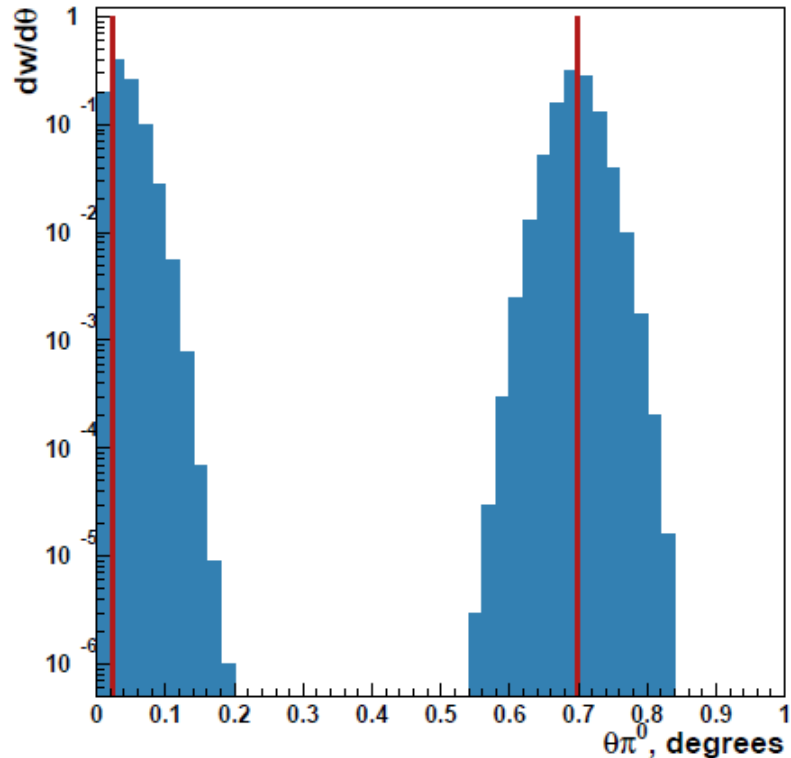
Выход упругих π^0 -мезонов по углу вылета



Жёлтая гистограмма снизу – вычтенный вклад от распадов ω -мезонов

Разрешение по углу вылета: переход от истинного значения к наблюдаемому

- Для описания наблюдаемого углового выхода π^0 -мезонов использованы теоретические модели, оперирующие с истинным значением угла вылета
- При помощи моделирования методом Монте-Карло получена матрица перехода от истинного значения угла к наблюдаемому
- Теоретически ожидаемые выходы для различных вкладов были предварительно свёрнуты с матрицей углового разрешения
- Точность моделирования проверена отдельно на данных по Комптону (приведено ниже)

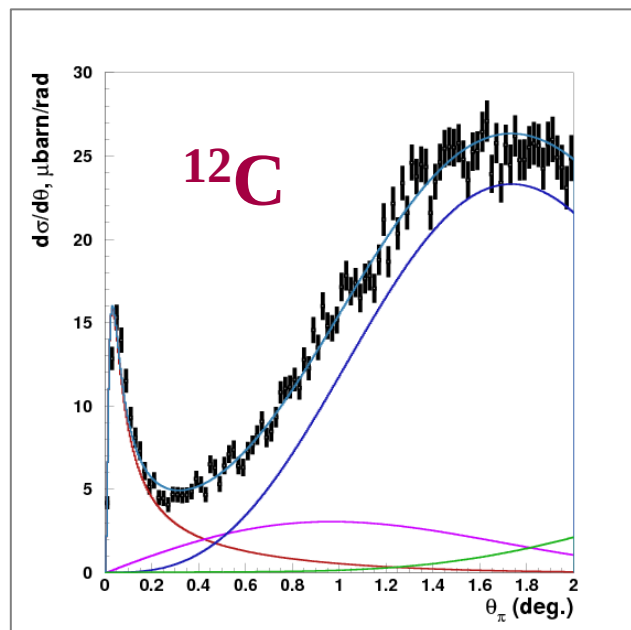


Красные полосы – истинное значение угла вылета в модельном событии, синие гистограммы – соотв. Распределение по наблюдаемому углу с учетом эффективности

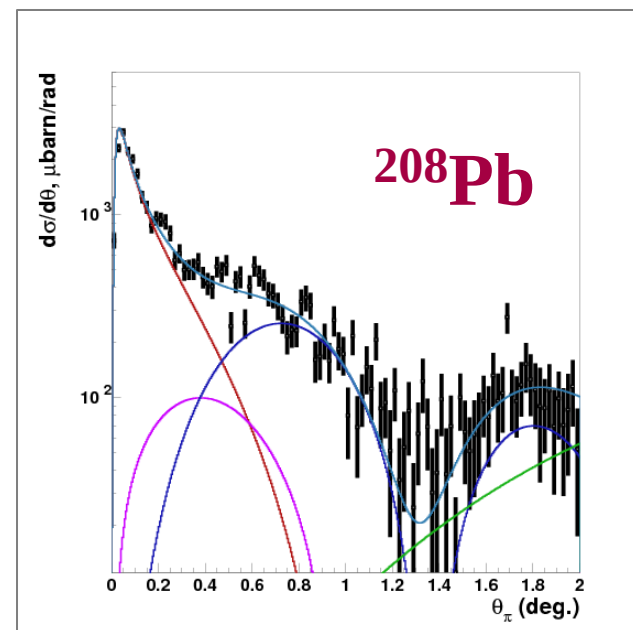
Дифференциальное сечение фоторождения π^0 -мезона по углу вылета

Сечения фоторождения π^0 -мезона, усреднённые по энергии, получены из выхода упругих π^0 -мезонов с использованием эффективности регистрации

$$E_\gamma = 4.9 - 5.5 \text{ ГэВ}$$



Примаковское —
Ядерное когерентное —
Интерференция —
Ядерное некогерентное —
Сумма всех —

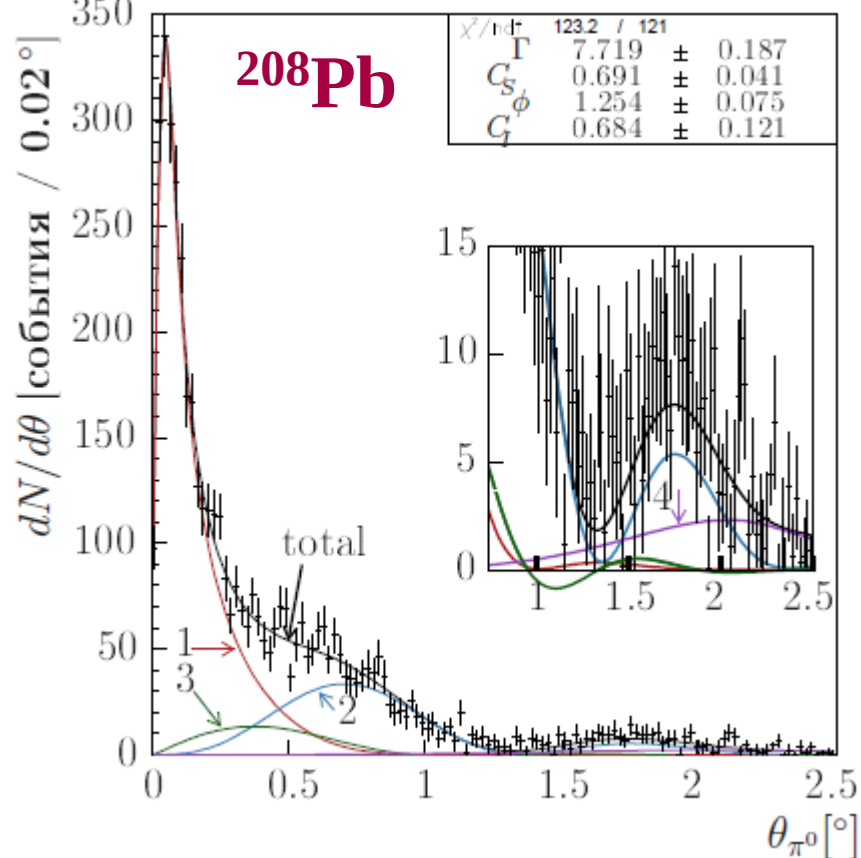
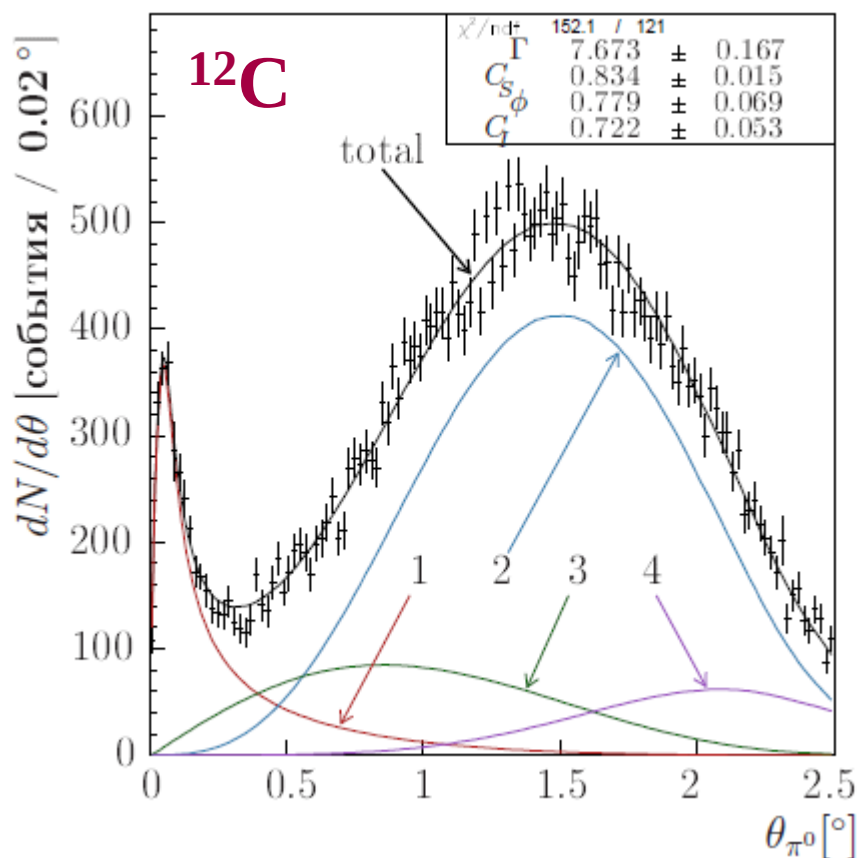


Получение величины $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$

Расчётные кривые ожидаемых выходов, свёрнутые с экспериментальным разрешением и эффективностью регистрации, использованы для описания вкладов составляющих механизмов: 1 – примаковский, 2 – ядерный когерентный, 3 – их интерференция, 4 – ядерный некогерентный

Результат данного анализа для обеих мишеней

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.70 \text{ эВ} \pm 0.14 \text{ эВ (стат.)} \pm 0.17 \text{ эВ (сист.)}$$

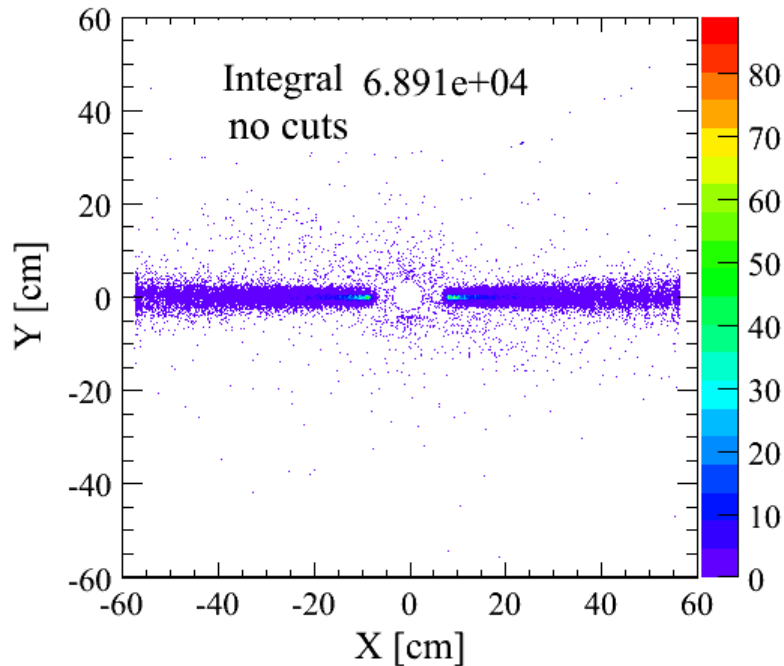


Систематическая погрешность

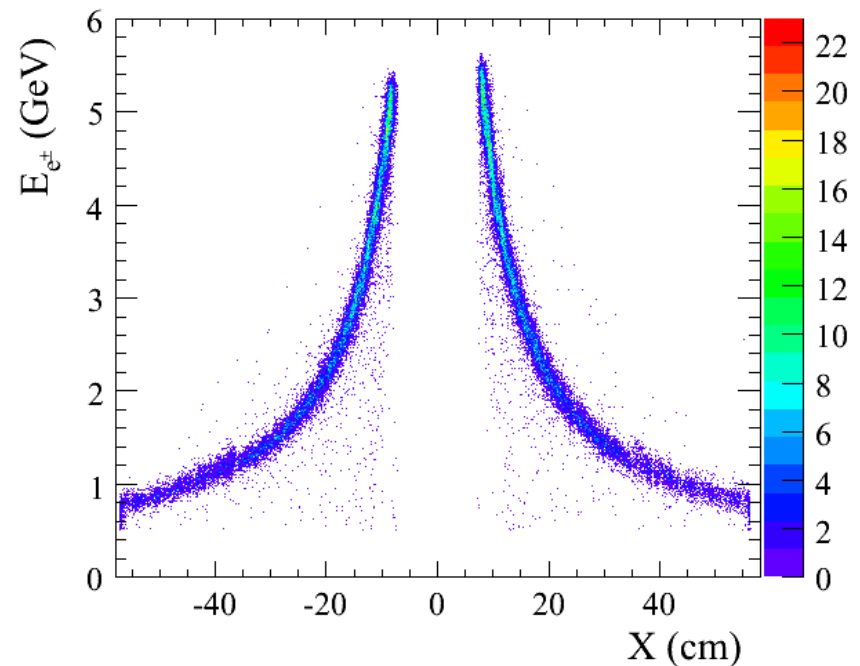
- Составляющие погрешности:
 - инструментальная часть (экспериментальная установка)
 - модельная часть (точность теоретического описания)
- Необходима независимая проверка точности вычисления сечений
- Хорошо известные КЭД процессы (рождение пар и комптоновское рассеяние) периодически измерялись в ходе сеанса

Дополнительная проверка: сечение рождения электрон-позитронных пар

Поле пар-спектрометра
снижено в 10 раз:
засветка калориметра



Характерная зависимость
энергии частицы от наблюдаемой
координаты в калориметре



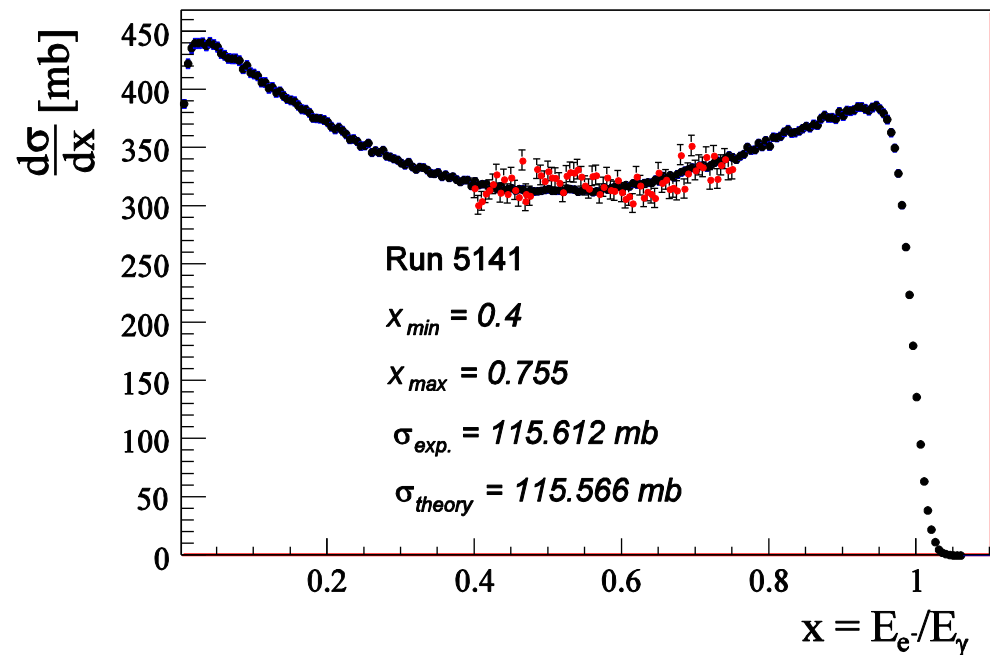
Дополнительная проверка: сечение рождения электрон-позитронных пар

Процессы включённые в расчёт:

- Бёте-Гайтлер с экранировкой атомными электронами
- Рождение пар на атомных электронах, включая возбуждение всех атомных уровней и корреляционными эффектами
- Рад. поправки (порядка α/π): виртуальные фотонные петли и процессы типа $\gamma A \rightarrow e^+ e^- A \gamma$
- Вклад некогерентного рождения: $\gamma p \rightarrow e^+ e^- p$
- Вклад виртуального комптоновского рассеяния

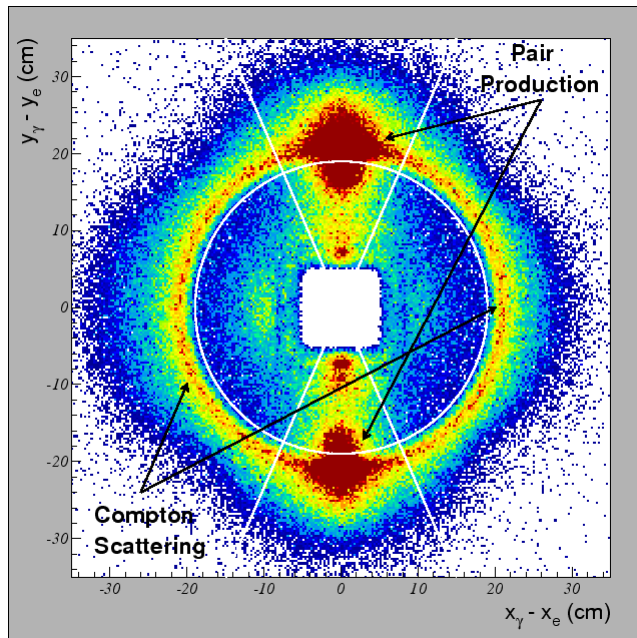
Полученные сечения совпадают с теоретическими вычислениями в пределах 1.7%

Дифференциальное сечение рождения пар:
чёрные точки – расчёт; красные - измерение

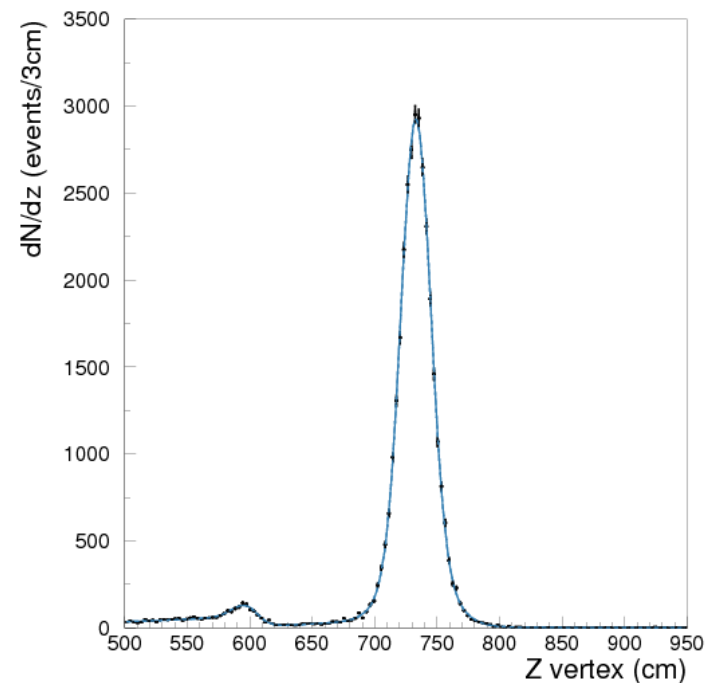


Дополнительная проверка: сечение КОМПТОНОВСКОГО рассеяния

Поле пар-спектрометра
выключено:
разность координат для
пары кластеров

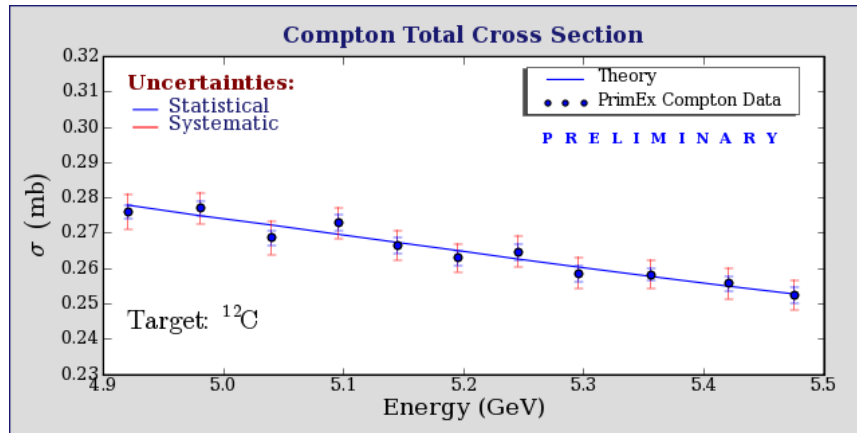


Используя формулу Клейн-Нишины
восстановлено предполагаемое
удаление точки КОМПТОНОВСКОГО
рассеяния от калориметра



Дополнительная проверка: сечение КОМПТОНОВСКОГО рассеяния

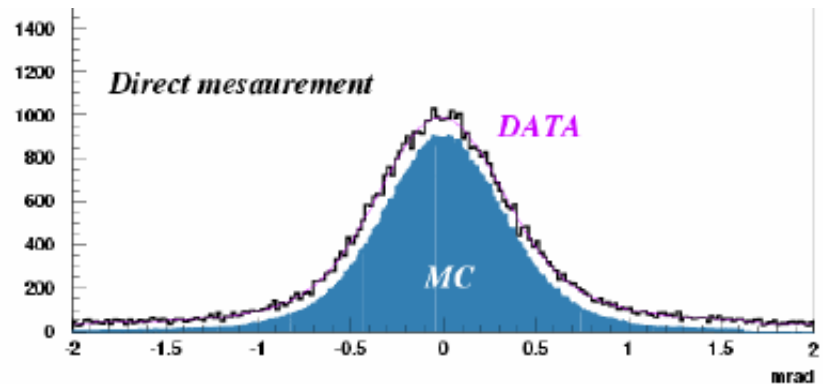
Сечение Комптона на углероде как функция энергии налетающего фотона: кривая – расчёт, точки с ошибками – результат измерения



- В расчёт сечения включены рад. поправки

Полученные сечения совпадают с теоретическими вычислениями в пределах 1.5%

Проверка соответствия углового разрешения в моделировании и данных: угол вылета (проекция) комптоновской пары в тонкой (0.5% рад. дл.) бериллиевой мишени



$$\sigma(\theta_x) \approx 0.35 \text{ мрад}$$

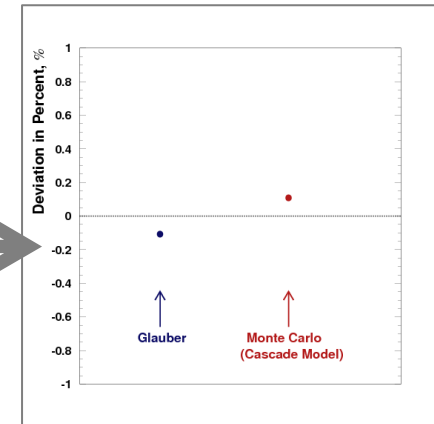
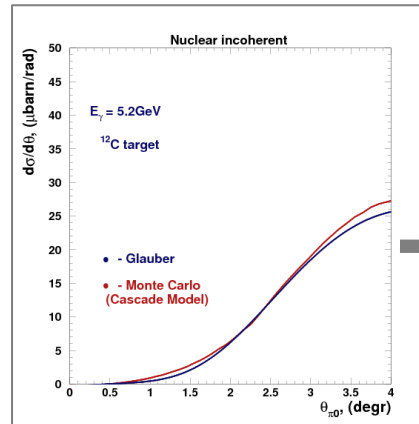
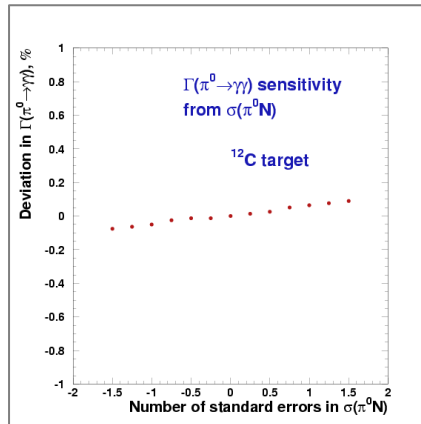
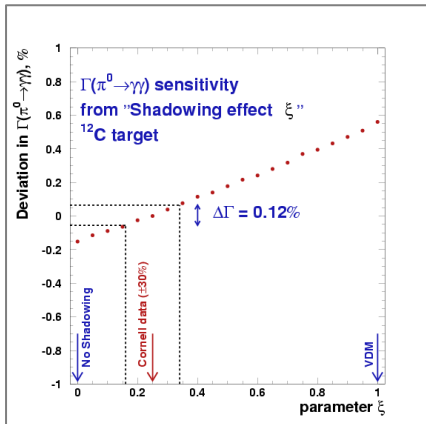
Угловое разрешение в моделировании совпадает с наблюдаемым в пределах 3%

Оценка систематической погрешности: пример для параметров использованной теории

Чувствительность $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$ к некоторым параметрам модели фоторождения

Использование различных моделей ядерного некогерентного рождения: $\gamma A \rightarrow \pi^0 A'$

- теория Глаубера
- каскадная модель



Составляющие сист. погрешности времени жизни нейтрального пиона

Составляющая	Вклад, [%]
Поток пучка	0.97
Мишень	0.3
Извлечение выхода π^0 -мезонов	1.5
Энергетический отклик калориметра	0.45
Параметры пучка	0.43
Эффективность триггера	0.1
Отбор событий	0.45
Акцептанс установки	0.3
Фон распадов ω -мезонов	0.3
Параметры теории	0.6
Угловое разрешение установки	0.2
Брэнчинг распада $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$	0.06
Всего	2.1

Результат PrimEx

Результат независимо получен двумя группами анализировавшими данные.

Результат данного анализа:

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.70 \text{eV} \pm 1.8\% \text{стат.} \pm 2.1\% \text{сист.}$$

Результат второй группы:

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.95 \text{eV} \pm 1.4\% \text{стат.} \pm 2.1\% \text{сист.}$$

Обобщённый результат PrimEx:

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.82 \text{eV} \pm 1.8\% \text{стат.} \pm 2.1\% \text{сист.} \quad (\pm 2.8\% \text{ полн.})$$

$$\tau(\pi^0) = 8.32 \cdot 10^{-17} \text{сек} \pm 1.8\% \text{стат.} \pm 2.1\% \text{сист.}$$

Заключение

- Проведено измерение времени жизни нейтрального пиона на установке с пучком меченых γ -квантов и гибридным электромагнитным калориметром, имеющим рекордные параметры разрешения
- Измерены дифференциальные сечения фоторождения π^0 -мезонов на ядрах C^{12} и Pb^{208} и их сист. погрешность
- Определена ширина $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 7.82 \text{ эВ} \pm 0.14 \text{ эВ(стат.)} \pm 0.17 \text{ эВ(сист.)}$ с точностью в 2.5 раза превышающую среднемировое значение
- С такой же точностью получен результат для времени жизни нейтрального пиона:
 $\tau = (8.32 \pm 0.15(\text{стат.}) \pm 0.18(\text{сист.})) \cdot 10^{-17} \text{ сек}$
- Полученный результат опубликован (*I.Larin et al, Phys. Rev. Lett. 2011, V106, p162303*) и использован для вычисления среднемирового времени жизни нейтрального пиона в таблицах частиц 2012 г.

Дополнительные слайды

Кристаллы PbWO_4 :



- Размеры 20.5 x 20.5 x 180.0 mm³
- Специфицированные допуски: 20.5^{+0.0 -0.1} mm; 180.0^{+0.3 -0.0} mm
- Плотность ~8.3 г/см³
- Рад. длина ~0.9 см
- Время высвечивания 10...20 нсек
- Показатель преломления ~2.2
- Световыход ~80 фотонов/МэВ



Инвариантная масса π^0 мезона, полученная в PbWO_4 части гибридного калориметра

