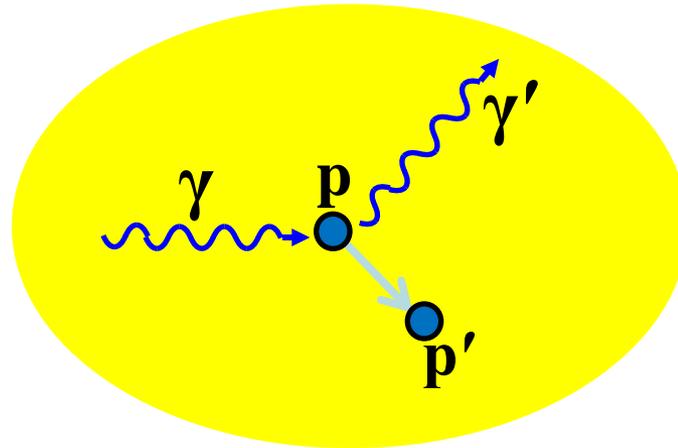


ИЗМЕРЕНИЕ СПИНОВЫХ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЕЙ ПРОТОНА

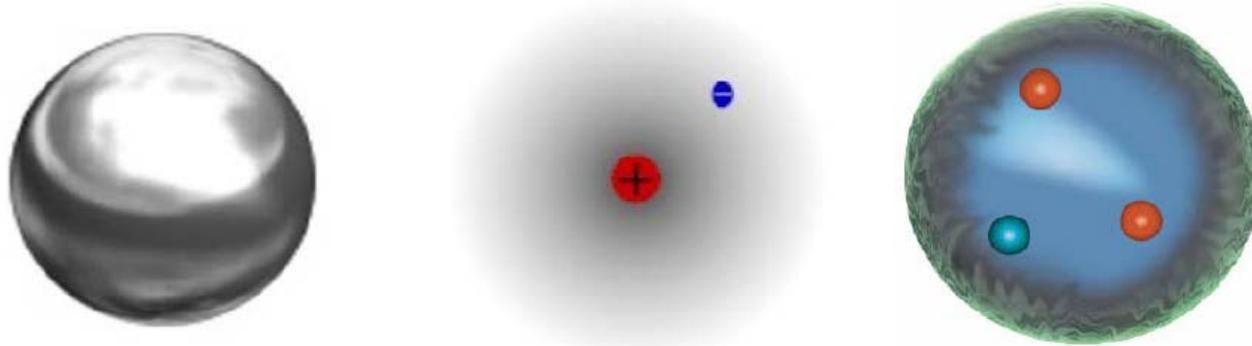


Г.М.Гуревич
ИЯИ РАН



Восьмые Черенковские чтения (ФИАН, 14.04.2015)

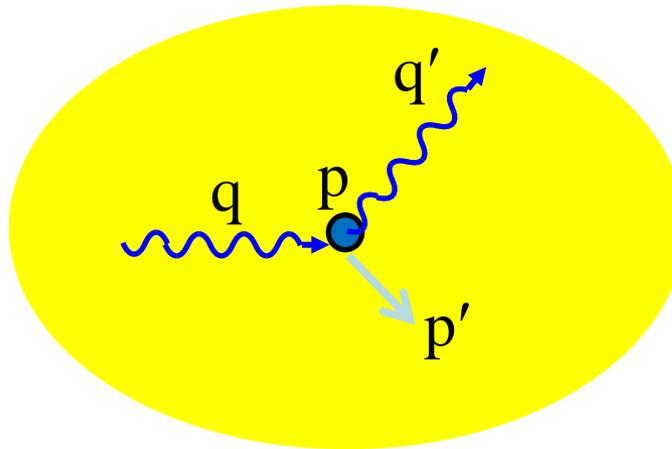
Электромагнитные поляризуемости – фундаментальные характеристики составных систем, таких, как молекулы, атомы, ядра и адроны. Они описывают отклик системы на воздействие внешнего электрического или магнитного поля. Если магнитные моменты дают информацию о свойствах основного состояния системы, то поляризуемости содержат информацию о возбужденных состояниях системы.



- Поляризуемость идеально проводящей сферы $\sim 1/4$ объема.
- Поляризуемость атома водорода $\sim 1/10$ объема.
- Для адронов поляризуемости гораздо меньше, чем объем, и имеют величину порядка 10^{-4} fm^3 , что связано с гораздо большей величиной квантовохромодинамических сил по сравнению с электромагнитными силами.
- Измерение поляризуемостей служит важнейшим тестом для теорий адронной структуры и КХД.

Комптоновское рассеяние & нуклонные поляризуемости

Электромагнитные поляризуемости получают из экспериментов по комптоновскому рассеянию, в которых поляризуемости вызывают отклонение сечения от величины, предсказываемой для рассеяния на бесструктурной частице Дирака.



$$\gamma(q) + p(p) \rightarrow \gamma(q') + p(p')$$

Гамильтониан комптоновского рассеяния (разложение по энергии налетающего фотона)

Zeroth Order - Mass and Electric Charge

$$H_{\text{eff}}^{(0)} = \frac{\vec{\pi}^2}{2m} + e\phi \quad (\text{where } \vec{\pi} = \vec{p} - e\vec{A})$$

First Order - Anomalous Magnetic Moment

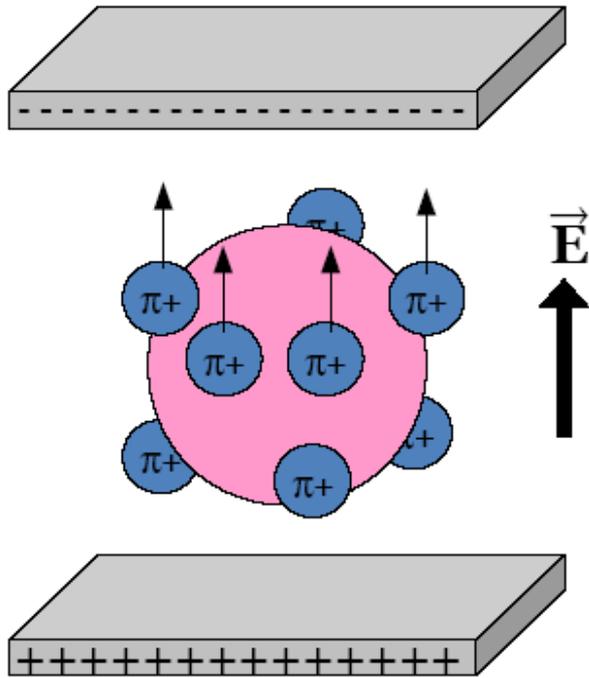
$$H_{\text{eff}}^{(1)} = -\frac{e(1+\kappa)}{2m} \vec{\sigma} \cdot \vec{H} - \frac{e(1+2\kappa)}{8m^2} \vec{\sigma} \cdot [\vec{E} \times \vec{\pi} - \vec{\pi} \times \vec{E}]$$

Second Order - Electric and Magnetic polarisabilities

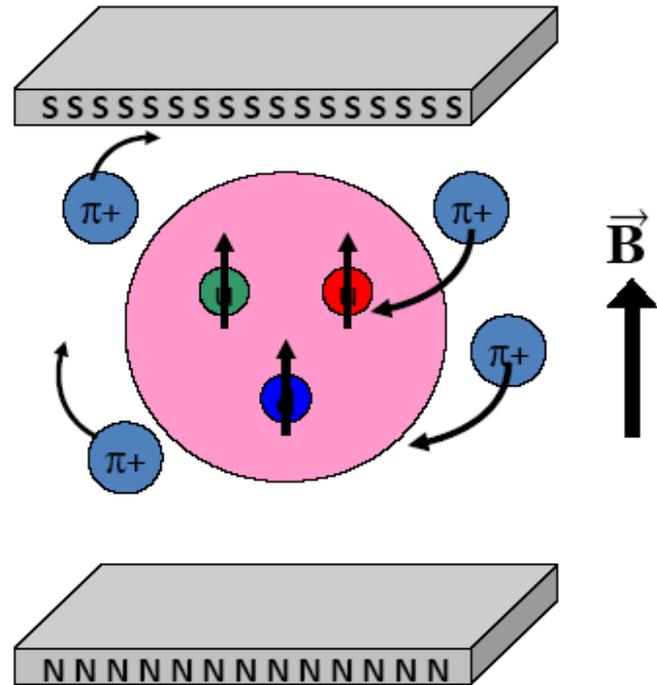
$$H_{\text{eff}}^{(2)} = -4\pi \left[\frac{1}{2} \alpha_{E1} \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \beta_{M1} \vec{H}^2 \right]$$

Скалярные поляризуемости

Proton Electric Polarizability



Proton Magnetic Polarizability



Proton between charged parallel plates:

$$d_{\text{ind}} = 4\pi\alpha E$$

$$\alpha = 12 \pm 0.6 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

Proton between poles of a magnet:

$$m_{\text{ind}} = 4\pi\beta B$$

$$\beta = 1.9 \pm 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$

Гамильтониан комптоновского рассеяния (разложение по энергии налетающего фотона)

Third Order - Spin Polarizabilities

$$H_{\text{eff}}^{(3)} = -4\pi \left[\frac{1}{2} \gamma_{E1E1} \vec{\sigma} \cdot (\vec{E} \times \dot{\vec{E}}) + \frac{1}{2} \gamma_{M1M1} \vec{\sigma} \cdot (\vec{H} \times \dot{\vec{H}}) \right. \\ \left. - \gamma_{M1E2} E_{ij} \sigma_i H_j + \gamma_{E1M2} H_{ij} \sigma_i E_j \right]$$

Индексы соответствуют комбинациям мультипольностей налетающего и рассеянного фотонов

- These parameters describe the response of the proton **spin** to an applied electric or magnetic field. Analogous to a classical Faraday effect.
- To date, these have not been individually determined. However, two linear combinations of them have been.

Спиновые поляризуемости «вперед» и «назад»

$$\gamma_0 = -\gamma_{E1E1} - \gamma_{E1M2} - \gamma_{M1E2} - \gamma_{M1M1}$$

$$\gamma_\pi = -\gamma_{E1E1} - \gamma_{E1M2} + \gamma_{M1E2} + \gamma_{M1M1}$$

Forward Spin Polarisability: γ_0

Determined from data taken for a measurement of the GDH sum rule

$$\gamma_0 = (-1.0 \pm 0.08) \times 10^{-4} \text{ fm}^4$$

J. Ahrens et al., *Phys. Rev. Lett.* 87, 022003 (2001)

H. Dutz et al., *Phys. Rev. Lett.* 91, 192001 (2003)

Backward Spin Polarisability: γ_π

Determined using a dispersive fitting to backward angle Compton scattering data such as that taken at MAMI.

$$\gamma_\pi = (8.0 \pm 1.8) \times 10^{-4} \text{ fm}^4$$

M. Camen, et al., *Phys. Rev. C* 65 032202 (2002)

Спиновые поляризуемости протона - Теория

Измерение спиновых поляризуемостей – важный тест теорий нуклонной структуры

γ	ChPT1	ChPT2	K-matrix	$L\chi$	χ_{EFT}	DR1	DR2	DR3
E1E1	-5.4	-1.3	-4.8	-3.7	-1.1	-3.4	-4.3	-3.8
M1M1	1.4	3.3	3.5	2.5	2.2	2.7	2.9	2.9
E1M2	1.0	0.2	1.8	1.2	-0.4	0.3	-0.02	0.5
M1E2	1.0	1.8	1.1	1.2	1.9	1.9	2.2	1.6
0	1.9	-3.9	2.0	-1.2	-2.6	-1.5	-0.8	-1.1
π	6.8	6.1	11.2	6.1	5.6	7.8	9.4	7.8

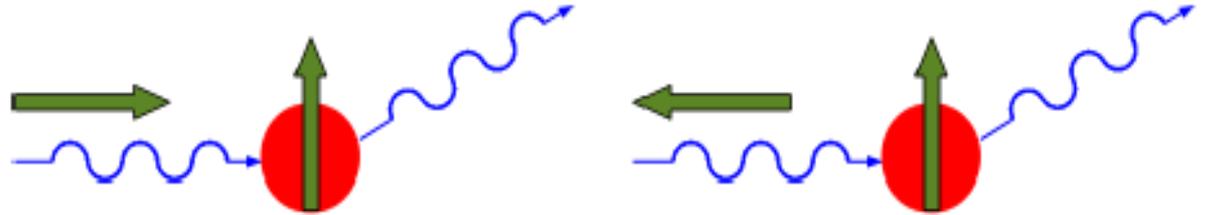
Расчетные значения спиновых поляризуемостей (в единицах 10^{-4} fm^4): ChPT – киральная теория возмущений, $L\chi$ – киральный лагранжиан, χ_{EFT} – киральная теория эффективного поля, DR – дисперсионные соотношения.

Спиновые поляризуемости протона - Измерение

Комптовское рассеяние с поляризационными степенями свободы (3 асимметрии):

- Circularly polarised photons, transversely polarised protons.

$$\Sigma_{2x} = \frac{N_{+x}^R - N_{+x}^L}{N_{+x}^R + N_{+x}^L}$$

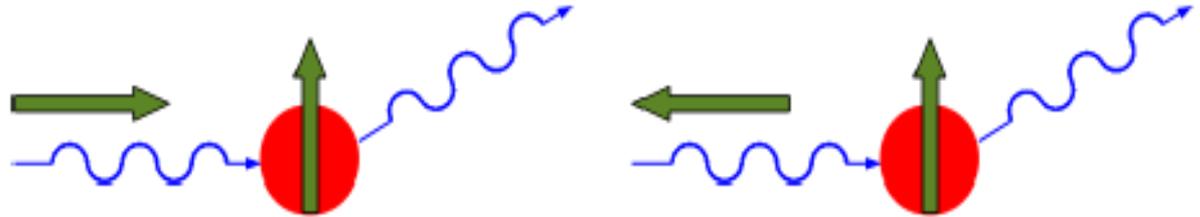


Спиновые поляризуемости протона - Измерение

Комптоновское рассеяние с поляризационными степенями свободы (3 асимметрии):

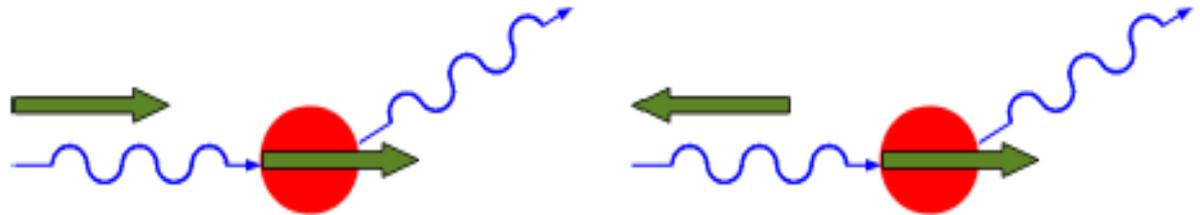
- Circularly polarised photons, transversely polarised protons.

$$\Sigma_{2x} = \frac{N_{+x}^R - N_{+x}^L}{N_{+x}^R + N_{+x}^L}$$



- Circularly polarised photons, longitudinally polarised protons.

$$\Sigma_{2z} = \frac{N_{+z}^R - N_{+z}^L}{N_{+z}^R + N_{+z}^L}$$

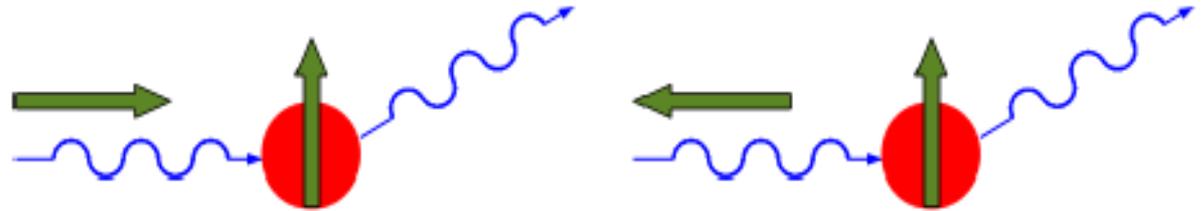


Спиновые поляризуемости протона - Измерение

Комптоновское рассеяние с поляризационными степенями свободы (3 асимметрии):

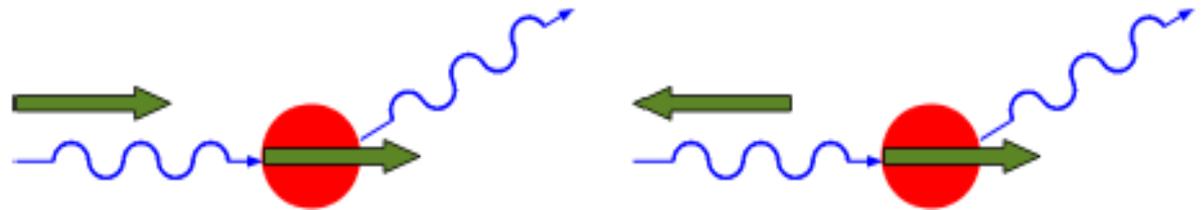
- Circularly polarised photons, transversely polarised protons.

$$\Sigma_{2x} = \frac{N_{+x}^R - N_{+x}^L}{N_{+x}^R + N_{+x}^L}$$



- Circularly polarised photons, longitudinally polarised protons.

$$\Sigma_{2z} = \frac{N_{+z}^R - N_{+z}^L}{N_{+z}^R + N_{+z}^L}$$



- Linearly polarised photons, unpolarised protons.

$$\Sigma_3 = \frac{N_{\parallel} - N_{\perp}}{N_{\parallel} + N_{\perp}}$$



Статус эксперимента

Коллаборацией A2 измерены асимметрии комптоновского рассеяния на протоне в области $\Delta(1232)$ -резонанса:

- Σ_{2x} (циркулярно пол. пучок, поперечно пол. мишень):
550 часов измерений (сентябрь 2010 & февраль 2011)
- Σ_{2z} (циркулярно пол. пучок, продольно пол. мишень):
600 часов измерений (апрель – май 2014)
- Σ_3 (линейно пол. пучок, жидководородная мишень):
500 часов измерений (декабрь 2012, май – июнь 2013)

Электронный ускоритель МAMI

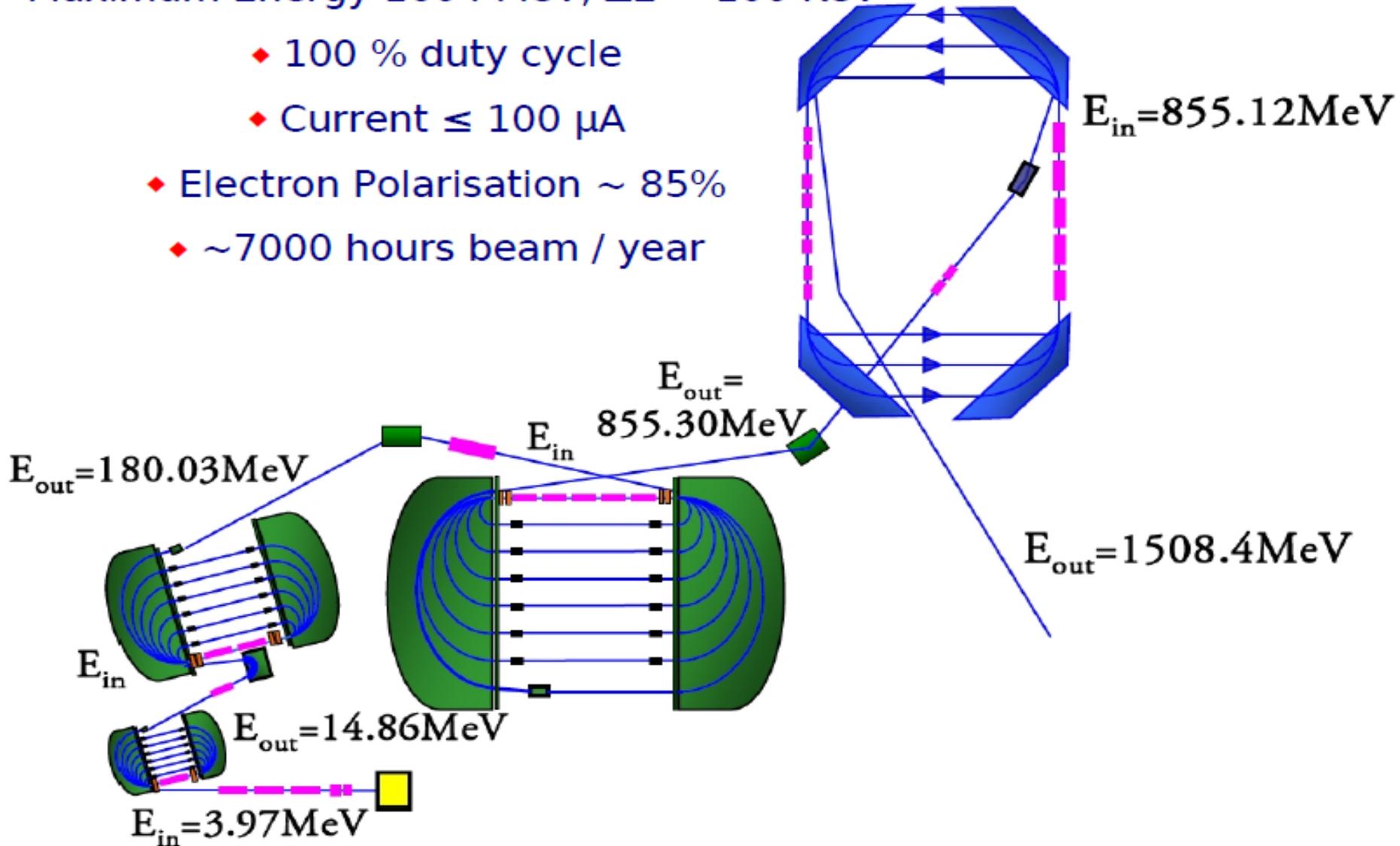
- ◆ Maximum Energy 1604 MeV, $\Delta E = 100$ KeV

- ◆ 100 % duty cycle

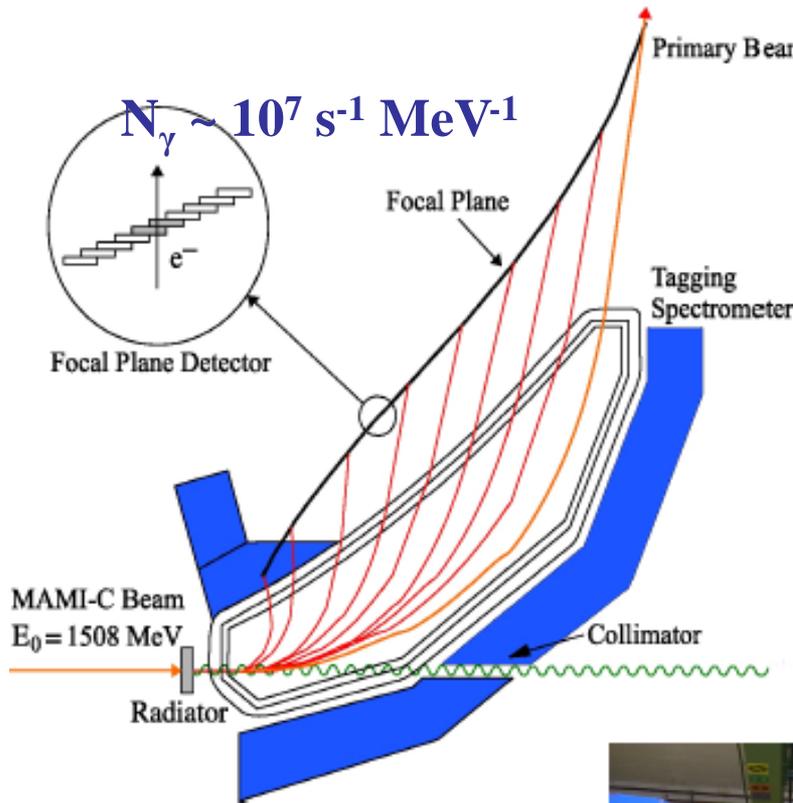
- ◆ Current $\leq 100 \mu\text{A}$

- ◆ Electron Polarisation $\sim 85\%$

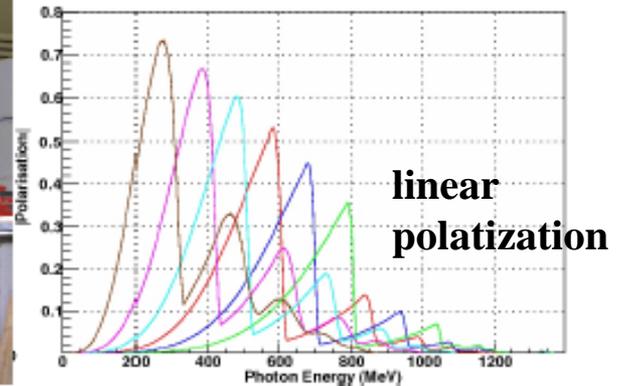
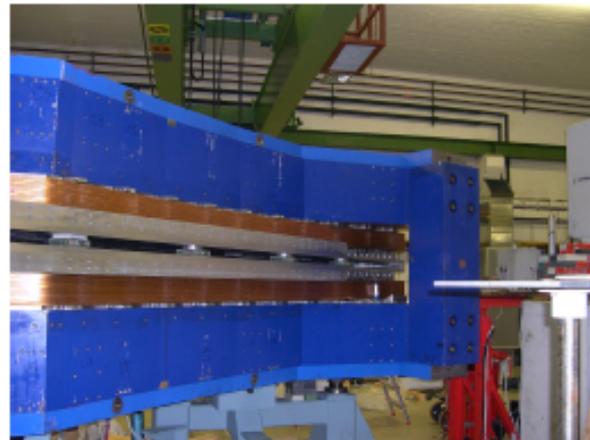
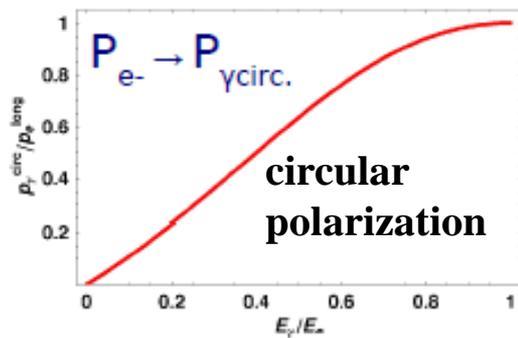
- ◆ ~ 7000 hours beam / year



Система мечения фотонов по энергии (Glasgow, Mainz)



- ◆ Detection of radiating electrons:
 $\rightarrow E_\gamma = E_0 - E_e'$
- ◆ Tagged range: 4.7 - 93% E_0
- ◆ Energy resolution $\sim 1 - 4$ MeV
- ◆ Circularly pol. γ from e^- pol, upto 85%
- ◆ Linearly pol. γ from crystal. rad., upto 70%
- ◆ 1 MHz / channel e- rate
- ◆ EPJ A 37, 129 (2008)

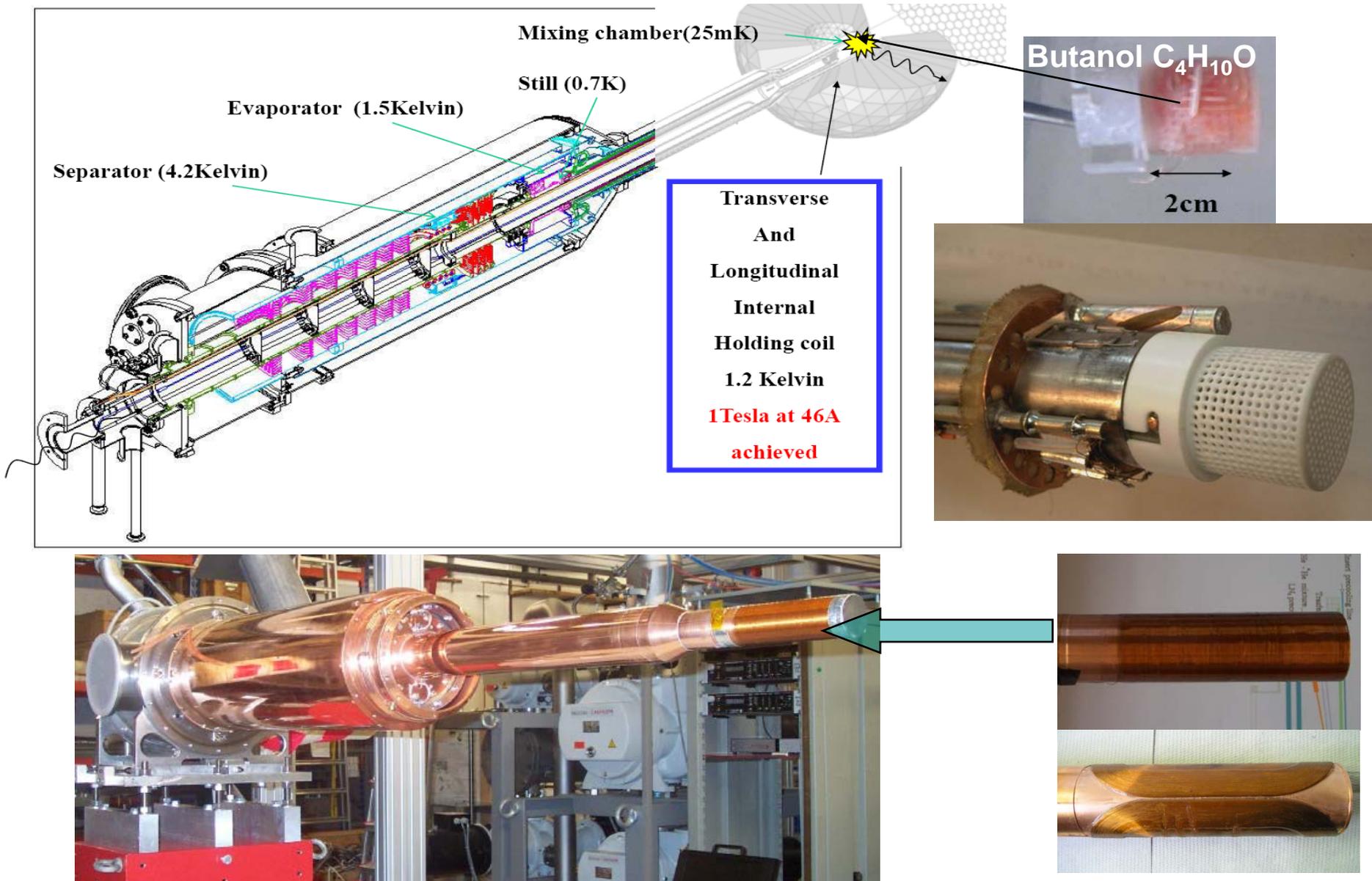


Неполяризованная протонная мишень



10 cm liquid hydrogen target

Поляризованная мишень (Дубна, Москва, Mainz)



Поляризованная мишень (Дубна, Москва, Mainz)

General view of the target in the experimental hall

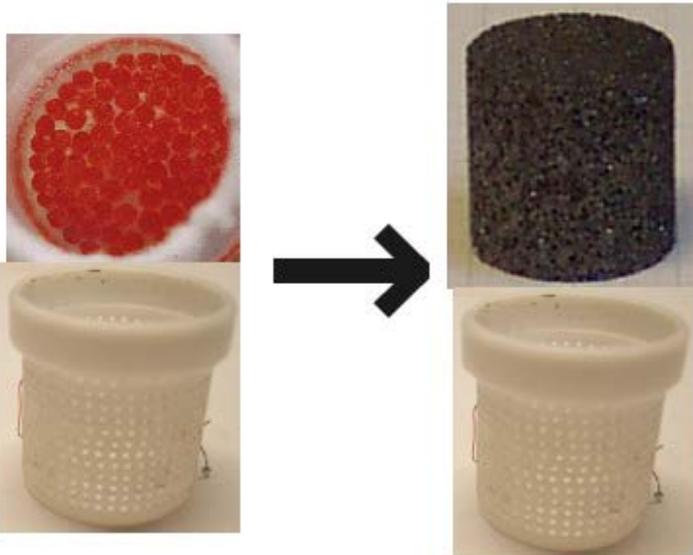


- ▶ DNP to achieve ~90% proton, ~80% deuteron polarization
- ▶ Relaxation time >2000 hours

Polarization reversed approximately once per week to remove systematic errors

Вычитание фона от криостата

Для вычитания фоновых событий от криостата и от неводородных нуклонов в бутаноловой мишени и гелиевой ванне был выполнен отдельный эксперимент с углеродной мишенью. Ее плотность была подобрана таким образом, чтобы число нуклонов в углеродной мишени равнялось числу неводородных нуклонов в мишени из бутанола.



- ♦ Butanol beads → carbon foam
- ♦ $N_{\text{nucleii}} = 12N_{\text{C}} + 16N_{\text{O}} + 4N_{\text{He4}} + 3N_{\text{He3}}$
- ♦ Simultaneously subtracts empty target

Детектирующая система

- Регистрация продуктов реакции осуществляется детектирующей системой на основе детекторов Crystal Ball (центральный детектор) и TAPS (передний детектор), которые совместно перекрывают телесный угол около 97% от 4π .
- Мишень располагается внутри апертуры детектора Crystal Ball .

4π спектрометр

TAPS:

366 BaF₂ detectors
72 PbWO₄ detectors
Max. kin. energy:
 π^{+-} : 180 MeV
 K^{+-} : 280 MeV
P : 360 MeV

Crystal Ball:

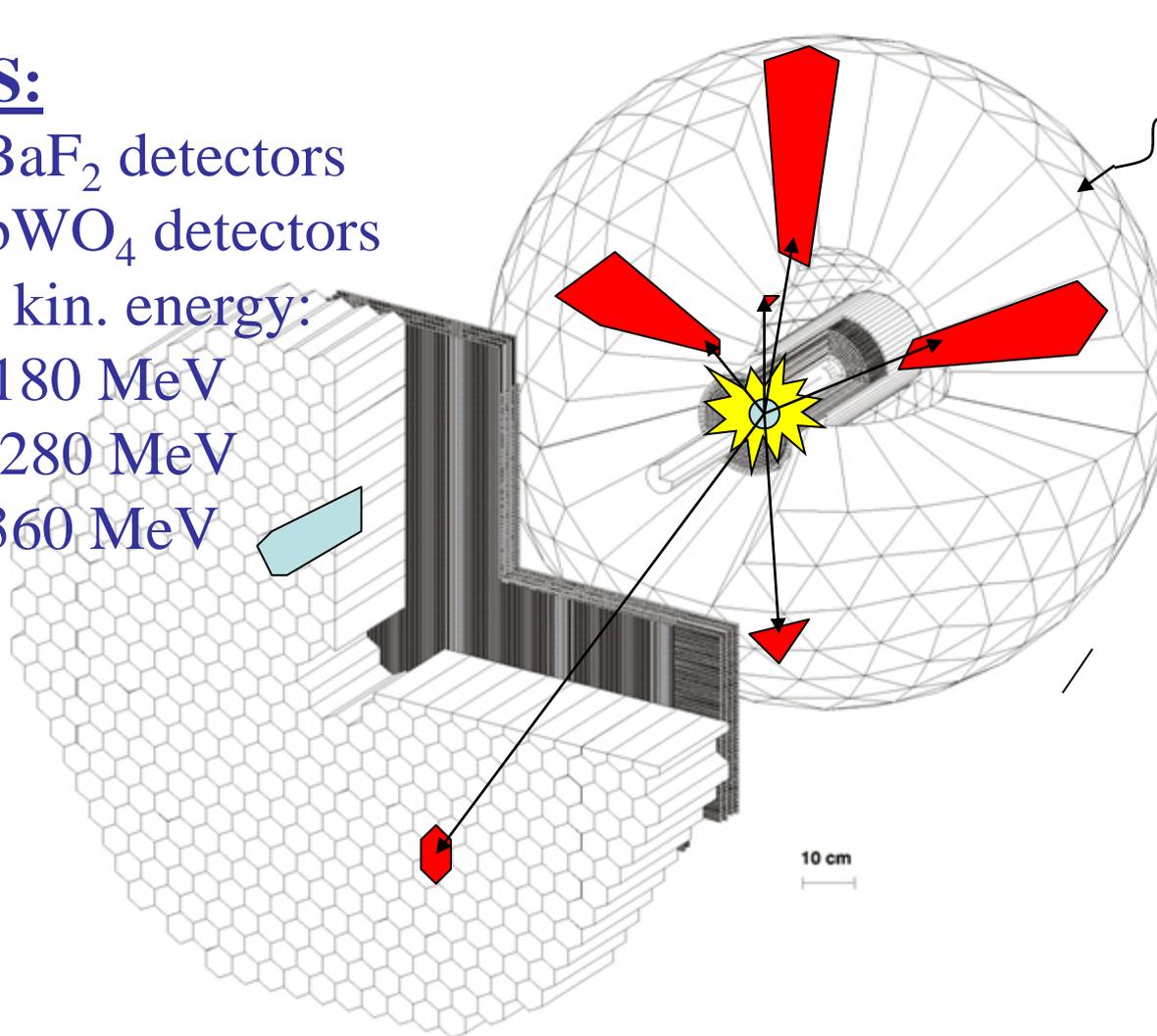
672 NaI detectors
Max. kin. energy:
 μ^{+-} : 233 MeV
 π^{+-} : 240 MeV
 K^{+-} : 341 MeV
P : 425 MeV

Vertex detector:

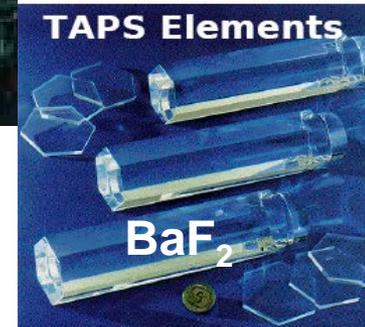
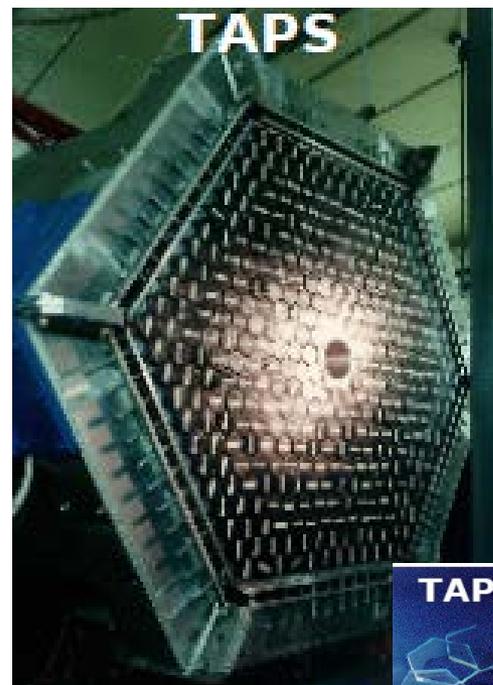
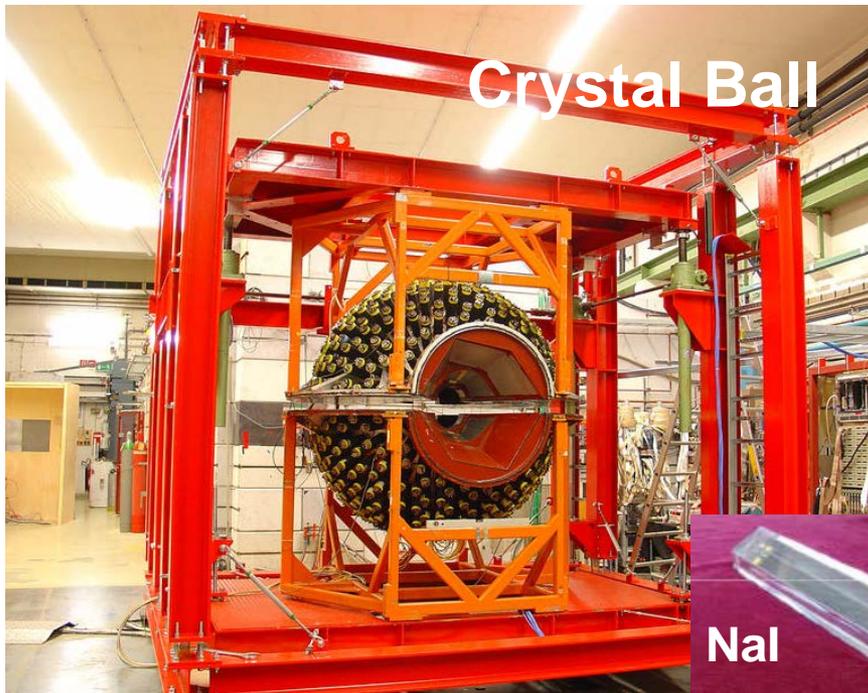
2 Cylindr. MWPCs
480 wires,
320 stripes

PID detector:

24 thin plastic
detectors

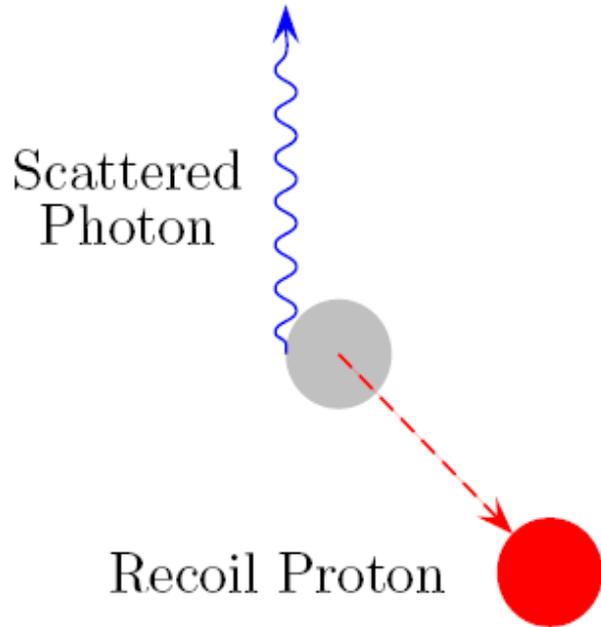


Элементы 4π спектрометра



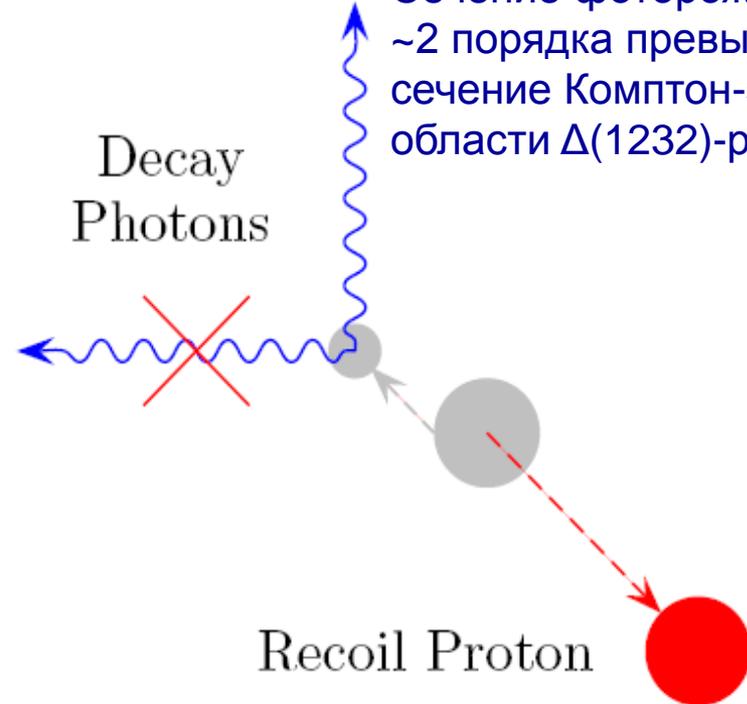
Фоны от фоторождения π^0 -мезонов

Комптовское событие – срабатывание одного заряженного и одного нейтрального кластера в детекторе



Compton Scattering

Сечение фоторождения π^0 на ~ 2 порядка превышает сечение Комpton-эффекта в области $\Delta(1232)$ -резонанса



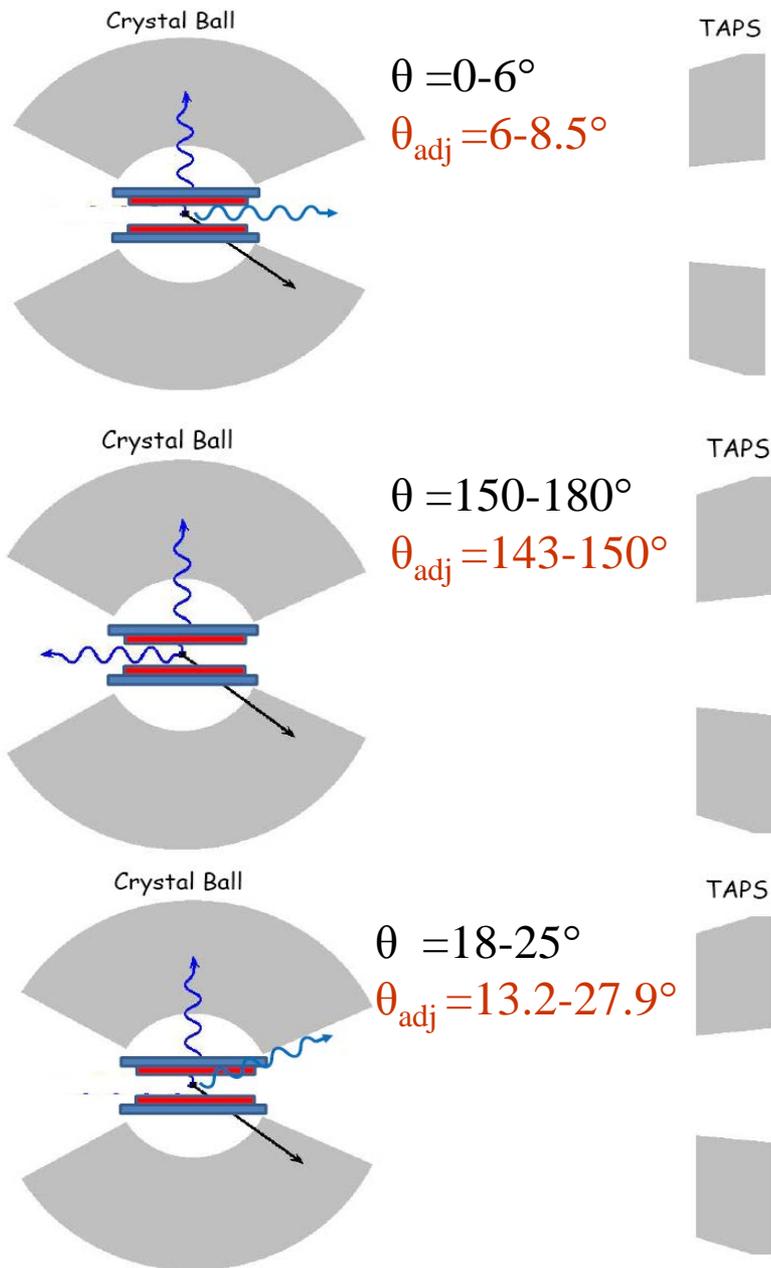
If one of the decay photons is lost, this can look like Compton

Фоны от рождения π^0

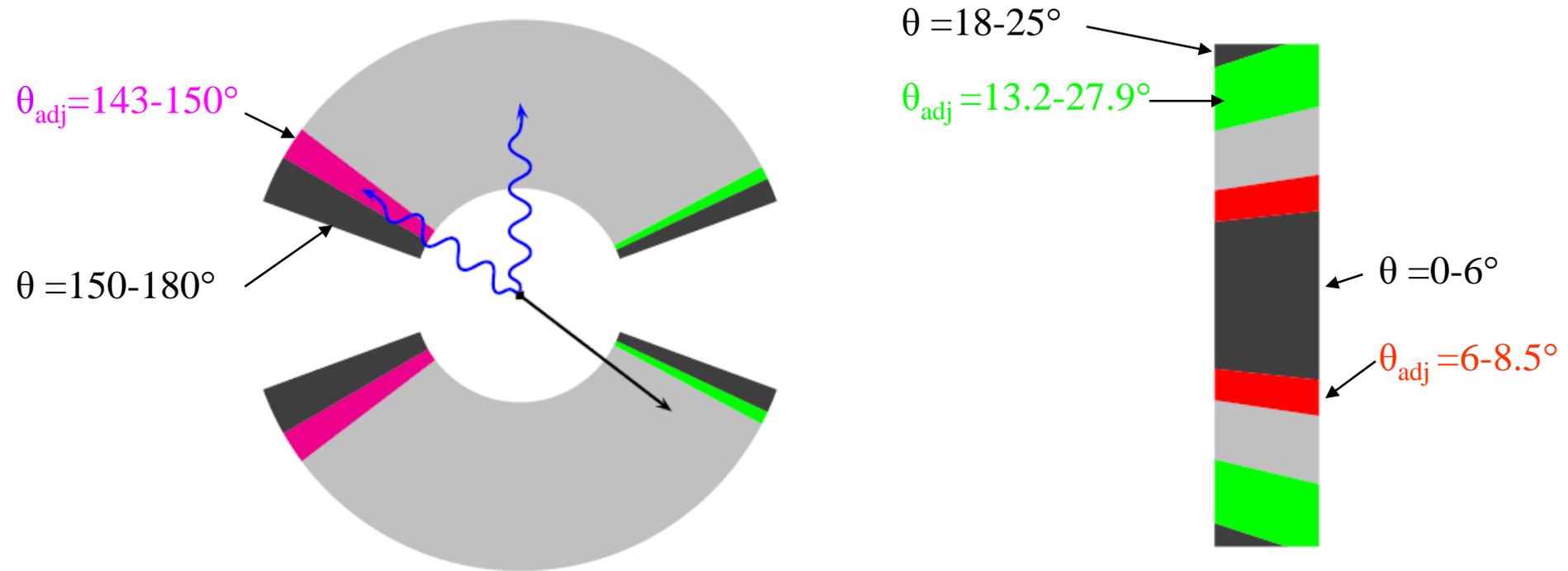
π^0 фотон вылетает через центральное отверстие TAPS

π^0 фотон вылетает через заднюю апертуру СВ

π^0 фотон вылетает через щель между СВ & TAPS



Фоны от рождения π^0

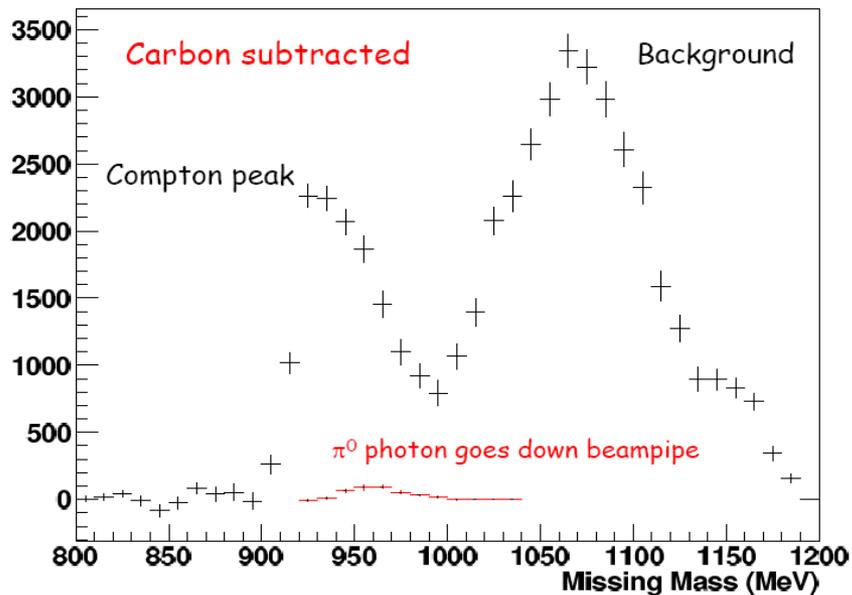


Рассчитаны спектры недостающей массы для фоновых событий от рождения π^0 -мезонов

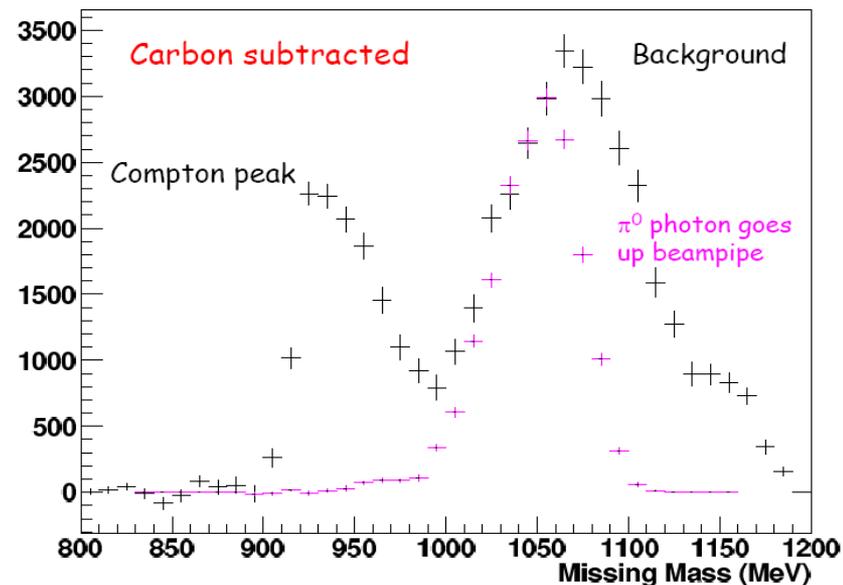
$$M_{\text{miss}} = [(E_{\gamma i} + m_p - E_{\gamma f})^2 - (\mathbf{p}_{\gamma i} - \mathbf{p}_{\gamma f})^2]^{1/2}$$

Фотон, регистрируемый под θ_{adj} , игнорировался, а второй фотон рассматривался как комптоновский фотон. В эти спектры вводилась поправка, учитывающая то обстоятельство, что $\theta_{\text{adj}} \neq \theta$.

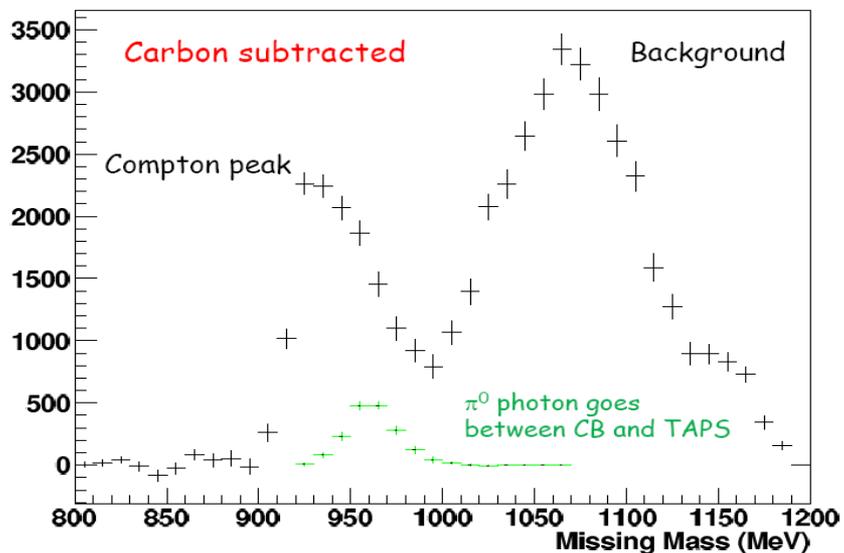
Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



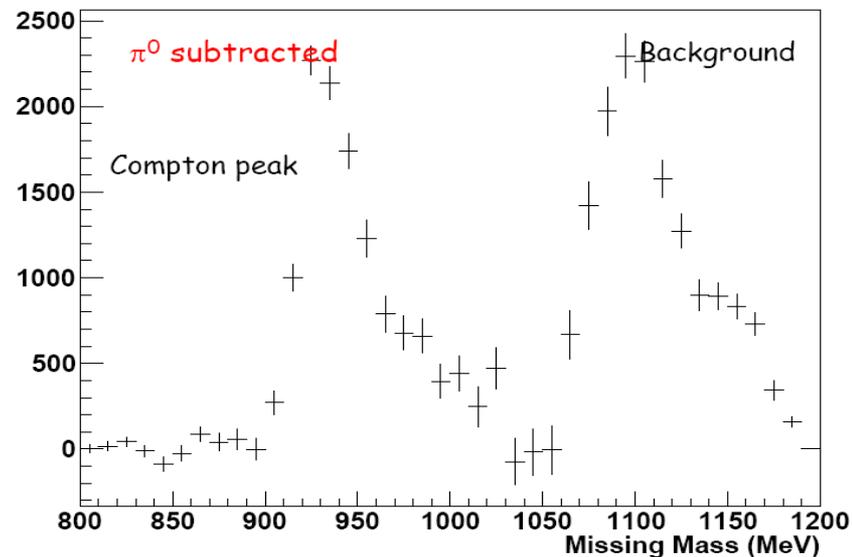
Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



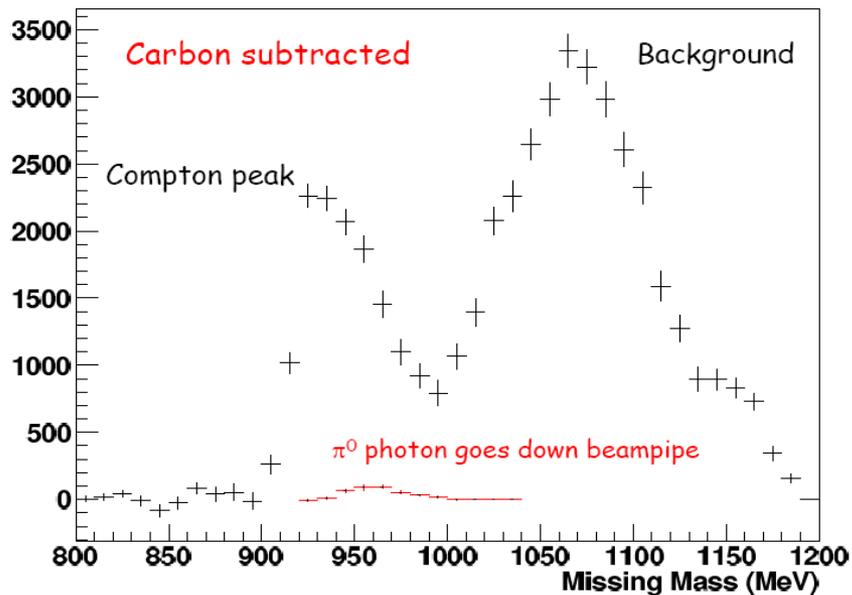
Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



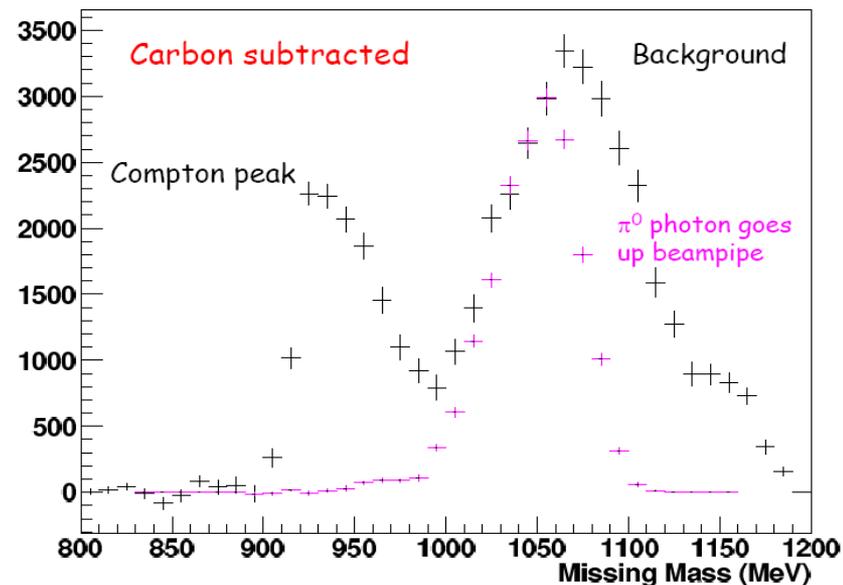
Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



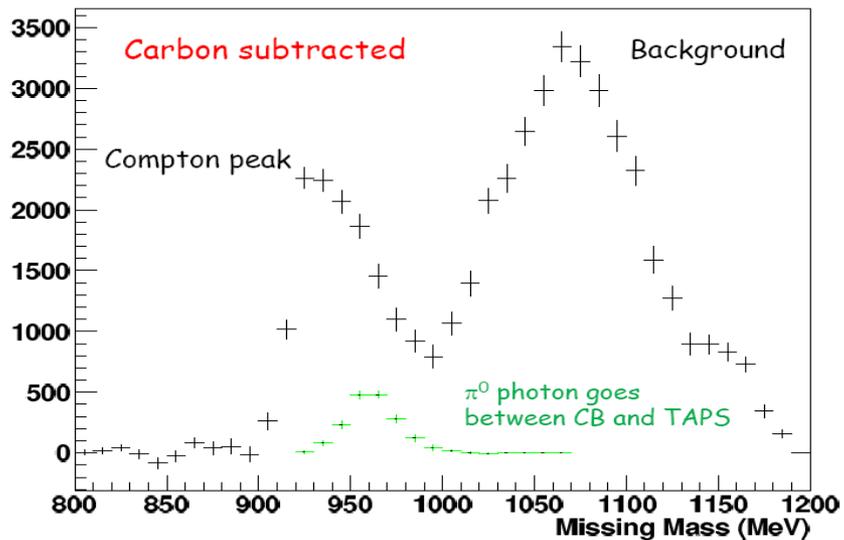
Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



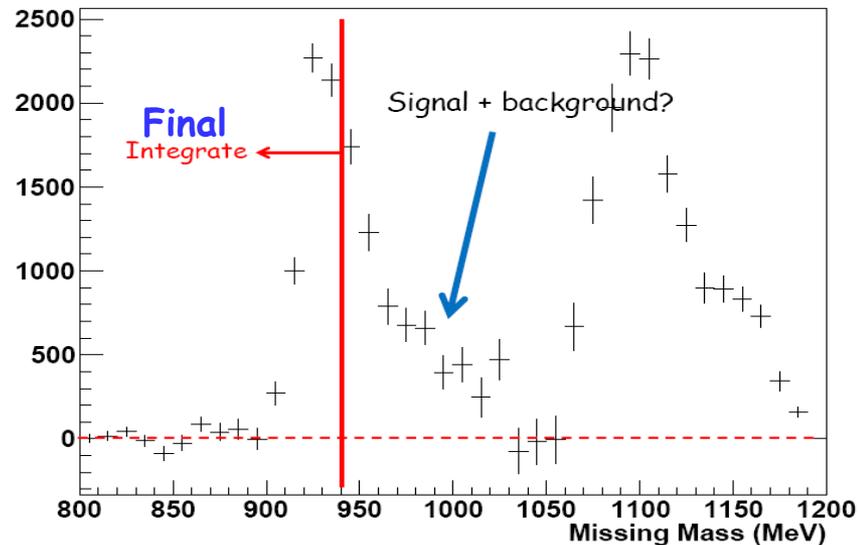
Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



Missing Mass - 270-310 MeV, 100-120 deg



Асимметрия Σ_{2x}

(циркулярно поляризованные фотоны, поперечно поляризованная мишень)

Для данной энергии налетающего фотона E , полярного угла комптоновского рассеяния θ , и азимутального угла Φ относительно направления поляризации мишени асимметрия Σ_{2x} :

$$\Sigma_{2x}(E, \theta) \cos(\phi) = \frac{1}{P_T P_\gamma(E)} \left[\frac{N^R(E, \theta, \phi) - N^L(E, \theta, \phi)}{N^R(E, \theta, \phi) + N^L(E, \theta, \phi)} \right],$$

P_T – поляризация мишени, P_γ – поляризация пучка, N^R (N^L) – число событий, соответствующих правой (левой) циркулярной поляризации пучка.

Асимметрия Σ_{2x} (теория и эксперимент)

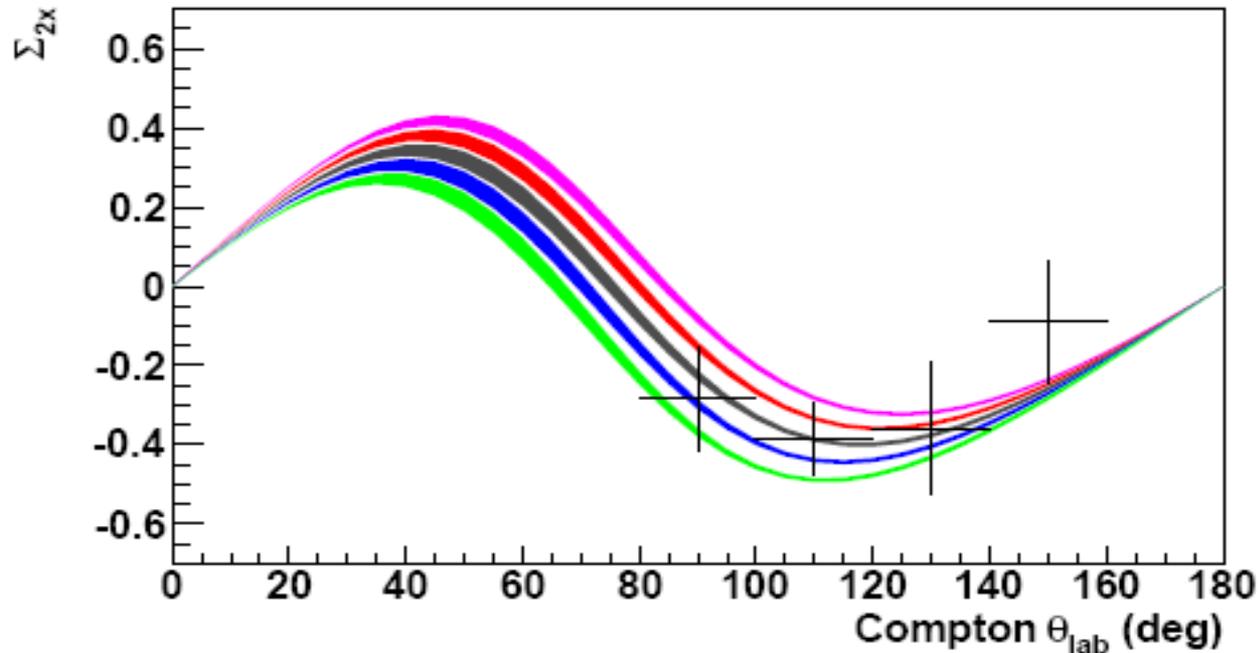
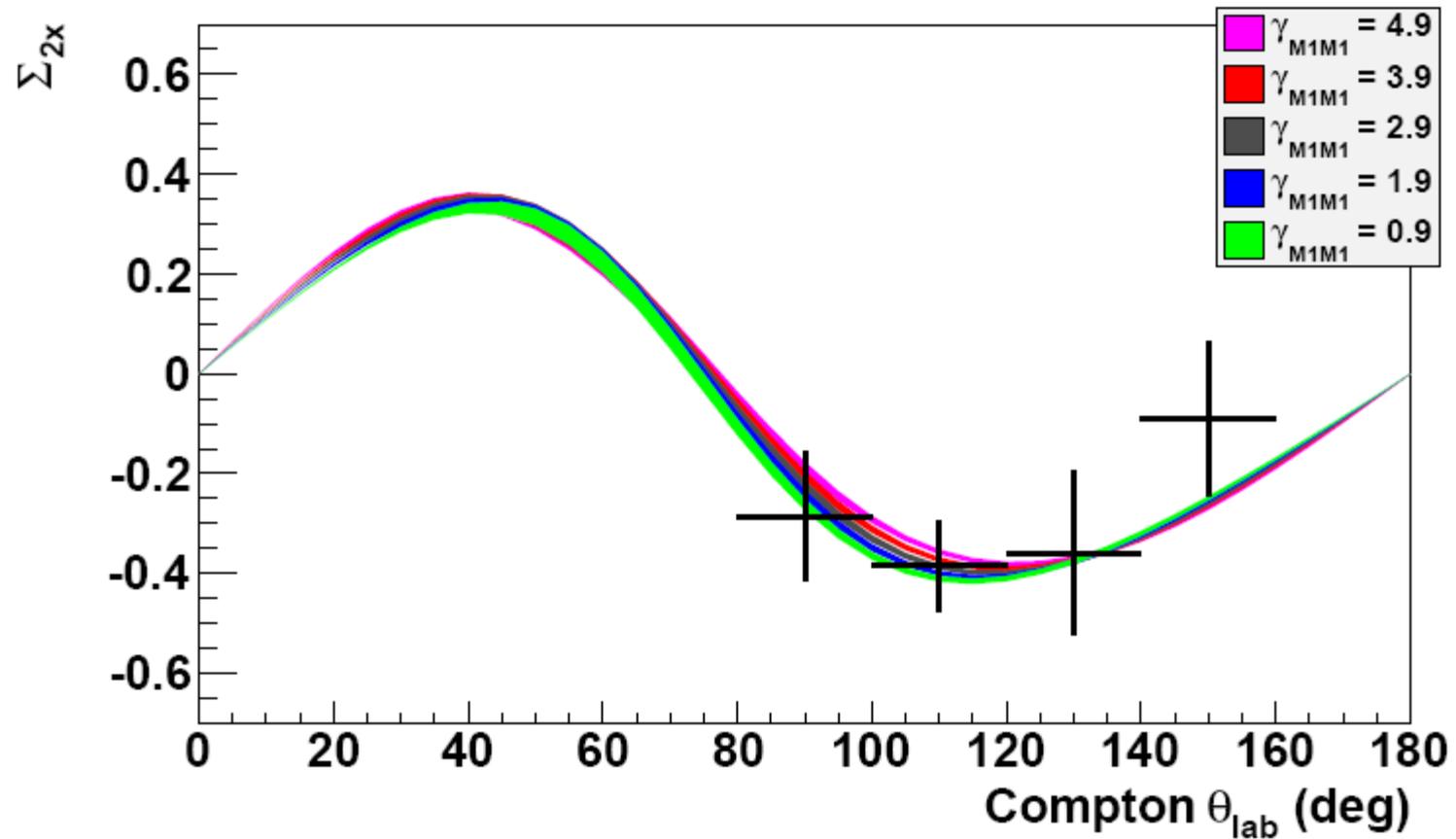


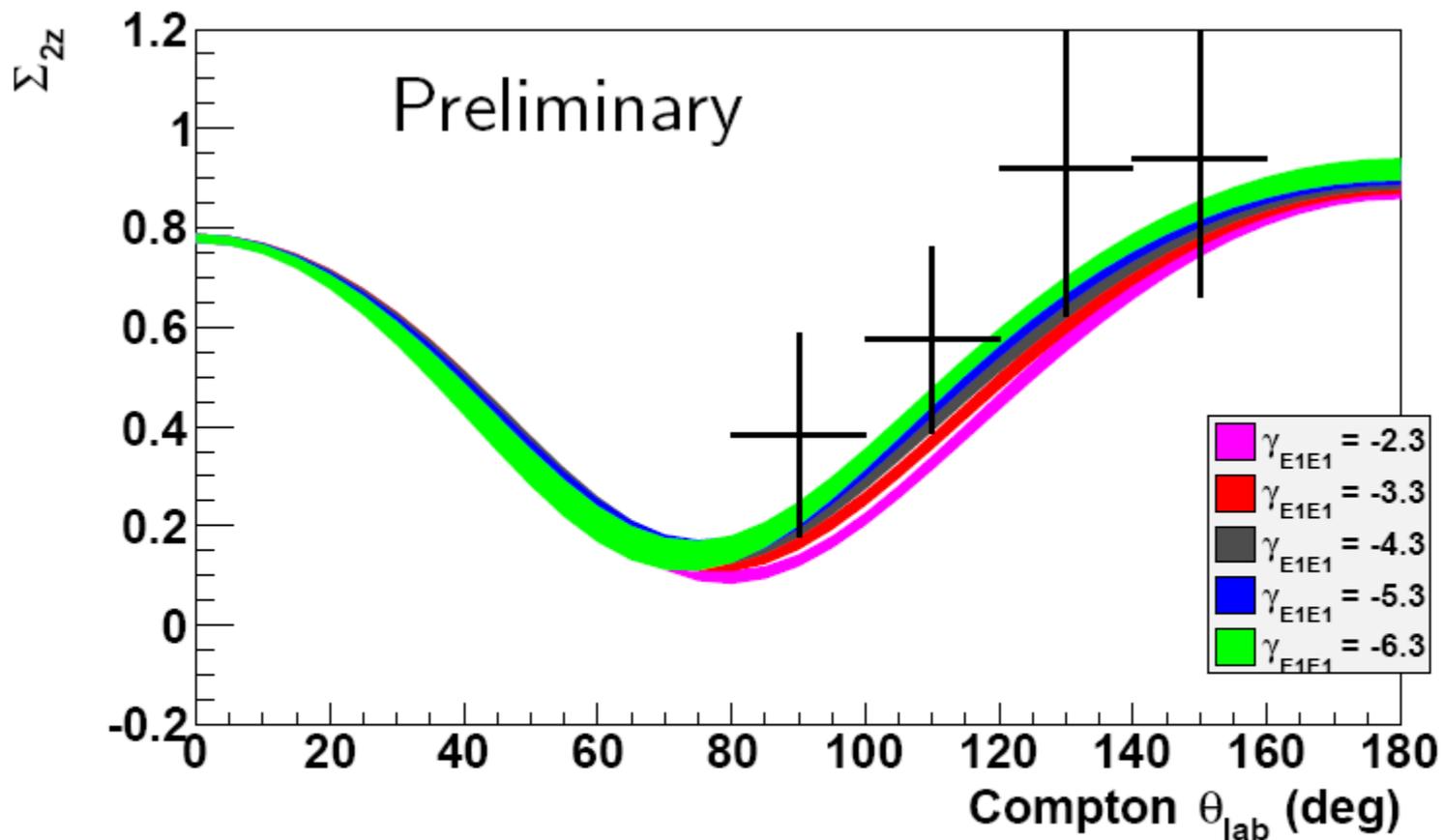
FIG. 3. Σ_{2x} for $E_\gamma = 273 - 303$ MeV (color online). The curves are from a dispersion theory calculation [11] with α , β , γ_0 , and γ_π held fixed at their experimental values, and γ_{M1M1} fixed at 2.9. The green, blue, brown, red and magenta bands are for γ_{E1E1} equal to -6.3 , -5.3 , -4.3 , -3.3 , and -2.3 , respectively. The width of each band represents the propagated errors from α , β , γ_0 , and γ_π combined in quadrature.

Асимметрия Σ_{2x} (теория и эксперимент)



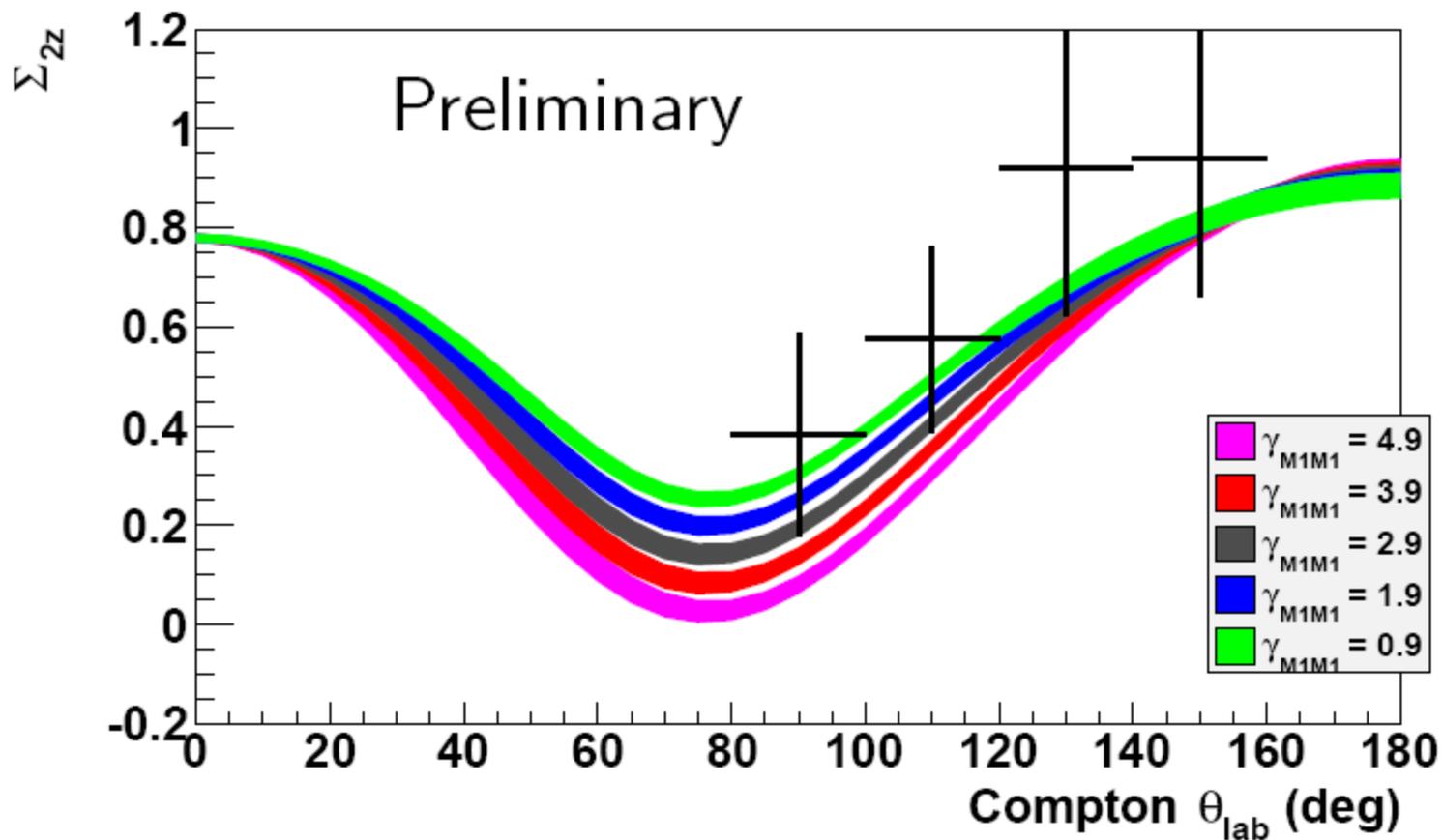
Vary γ_{M1M1} , holding γ_{E1E1} fixed.

Асимметрия Σ_{2z} (теория и эксперимент)



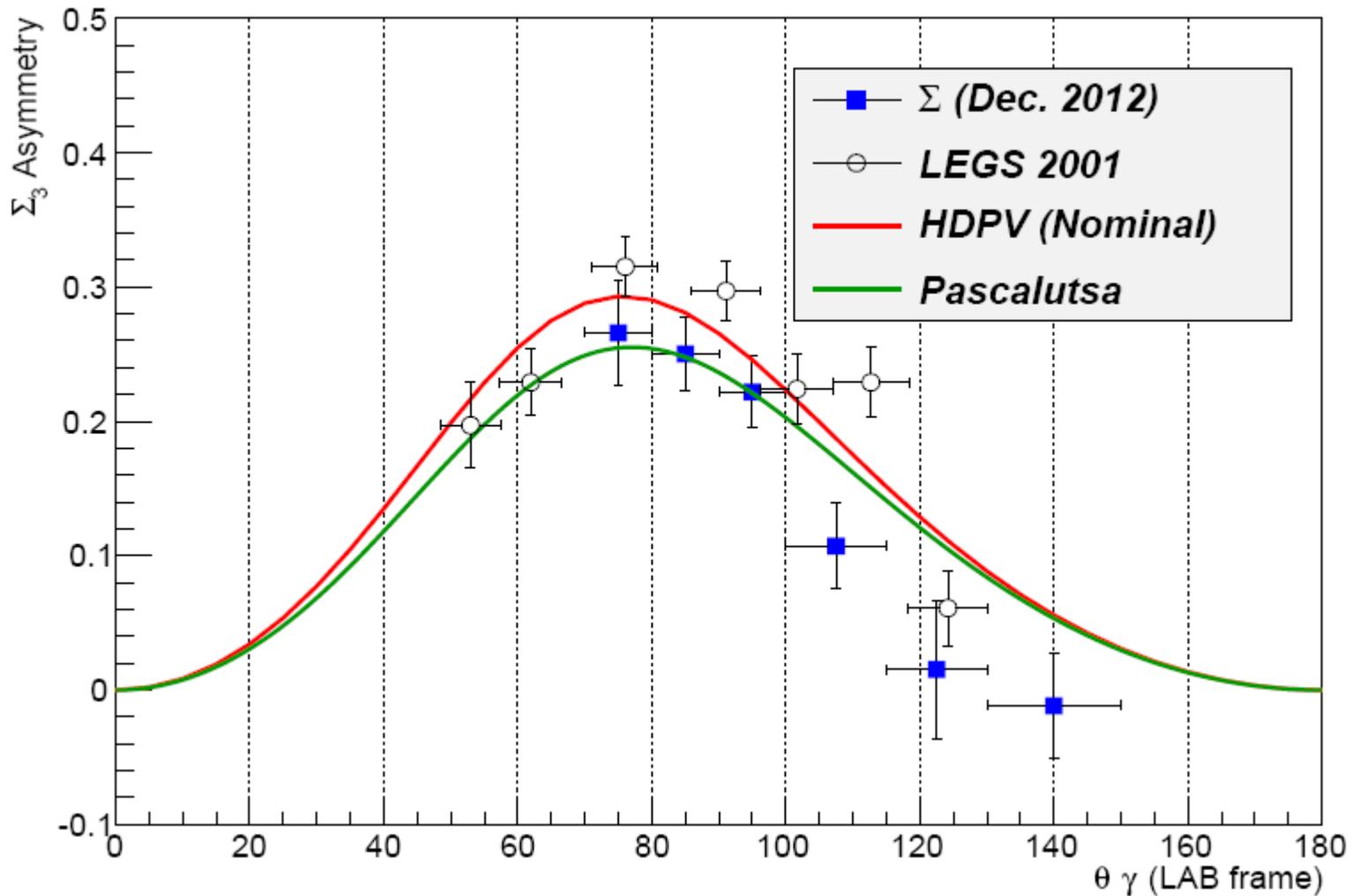
Vary γ_{E1E1} , holding γ_{M1M1} fixed.

Асимметрия Σ_{2z} (теория и эксперимент)



Vary γ_{M1M1} , holding γ_{E1E1} fixed.

Асимметрия Σ_3 (теория и эксперимент)



Извлечение спиновых поляризуемостей

- В принципе, относительно простой анализ двух измеренных экспериментальных асимметрий комптоновского рассеяния, например, Σ_{2x} и Σ_3 (с использованием известных значений γ_0 , γ_π и скалярных поляризуемостей α и β) позволяет извлечь четыре спиновые поляризуемости, правда в этом случае результаты будут содержать модельно-зависящие ошибки.
- Если же измерить все три асимметрии при разных энергиях и углах рассеяния, станет возможным выполнить глобальный анализ и извлечь все четыре спиновые поляризуемости независимо с малыми статистическими, систематическими и модельными ошибками.

Спиновые поляризуемости (Теория и Эксперимент)

γ	ChPT1	ChPT2	K-matrix	$L\chi$	χ_{EFT}	DR1	DR2	DR3	Experiment
E1E1	-5.4	-1.3	-4.8	-3.7	-1.1	-3.4	-4.3	-3.8	-3.5 ± 1.2
M1M1	1.4	3.3	3.5	2.5	2.2	2.7	2.9	2.9	3.16 ± 0.85
E1M2	1.0	0.2	1.8	1.2	-0.4	0.3	-0.02	0.5	-0.7 ± 1.2
M1E2	1.0	1.8	1.1	1.2	1.9	1.9	2.2	1.6	1.99 ± 0.29
0	1.9	-3.9	2.0	-1.2	-2.6	-1.5	-0.8	-1.1	-1.0 ± 0.08
π	6.8	6.1	11.2	6.1	5.6	7.8	9.4	7.8	8.0 ± 1.8

Экспериментальные величины спиновых поляризуемостей получены в результате комбинированного анализа асимметрий Σ_{2x} и Σ_3 с использованием расчета по дисперсионной модели, опубликовано Phys. Rev. Let. 114, 112501 (2015)

Заключение

- Измерены три асимметрии комптоновского рассеяния на протоне Σ_{2x} , Σ_{2z} , Σ_3 в области $\Delta(1232)$ резонанса
- Из анализа данных для двух асимметрий Σ_{2x} и Σ_3 получены значения всех четырех спиновых поляризуемостей протона, опубликовано
- Σ_{2z} - данные в процессе калибровки и анализа

Ближайшие планы:

- Выполнить комбинированный анализ данных для 3 измеренных асимметрий
- Это позволит осуществить тестирование теоретических моделей

Перспективы:

- Измерения ниже порога рождения π^0 - мезона – получение спиновых поляризуемостей наиболее модельно-независимым образом
- Требуется детектировать протоны отдачи с низким порогом регистрации
- Решение: Активная (сцинтилляционная) поляризованная мишень
- R&D in progress

Спасибо за внимание!

Backup

Активная поляризованная мишень

