

Барионная спектроскопия на пучках «меченых» фотонов ускорителя ELSA в Бонне

С 1998 года сотрудники Лаборатории мезонной физики в составе коллаборации Crystal Barrel участвуют в экспериментах по изучению фоторождения нейтральных мезонов, проводимых на пучках «меченых» фотонов ускорителя ELSA. Ведущей организацией в этой коллаборации является Институт физики излучений и ядерной физики им. Гельмгольца (HISKP) Боннского университета. Кроме учёных из HISKP и ПИЯФ, в состав коллаборации входят физики из ещё четырёх университетов Германии, а также из университетов и научных центров Швейцарии, Нидерландов и США.

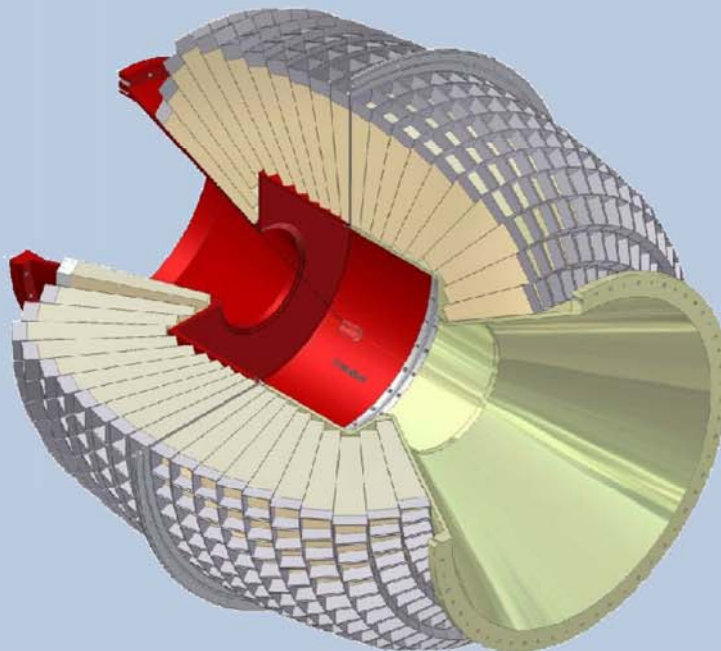
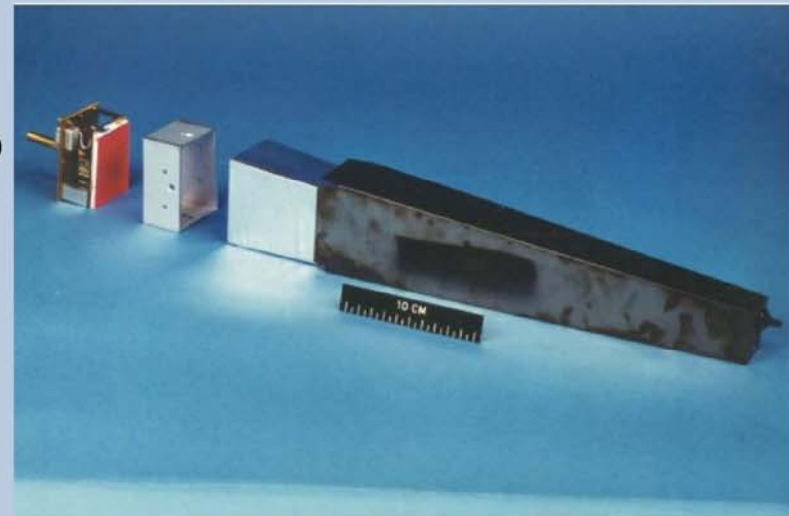
Основная цель выполняемой экспериментальной программы – внести существенный вклад в решение проблемы так называемых «недостающих» (missing) резонансов.

Суть проблемы в том, что до сих пор экспериментально не найдено большое число возбуждённых состояний нуклона, предсказываемых современными теоретическими моделями. Причина этого несоответствия может быть двоякой. Одна возможность состоит в том, что эти не наблюдаемые в эксперименте состояния **действительно не существуют** как следствие новых, «скрытых» симметрий. Интересной скрытой симметрией могла бы быть кварк-дикварковая структура барионов. Такая структура «заморозила» бы одну внутреннюю степень свободы и, следовательно, привела бы к меньшему количеству ожидаемых резонансов. Иная возможность с менее драматическими последствиями заключается в том, что **эти состояния просто не обнаружены в экспериментах** до сих пор. До недавнего времени практически вся приводимая в таблицах Particle Data Group (PDG) информация о характеристиках нестранных барионов получалась из экспериментов по упругому пион-нуклонному рассеянию. Если какие-то резонансы имеют очень слабую связь с каналом πN , то они не могут быть обнаружены в таких экспериментах. Но есть надежда получить информацию о

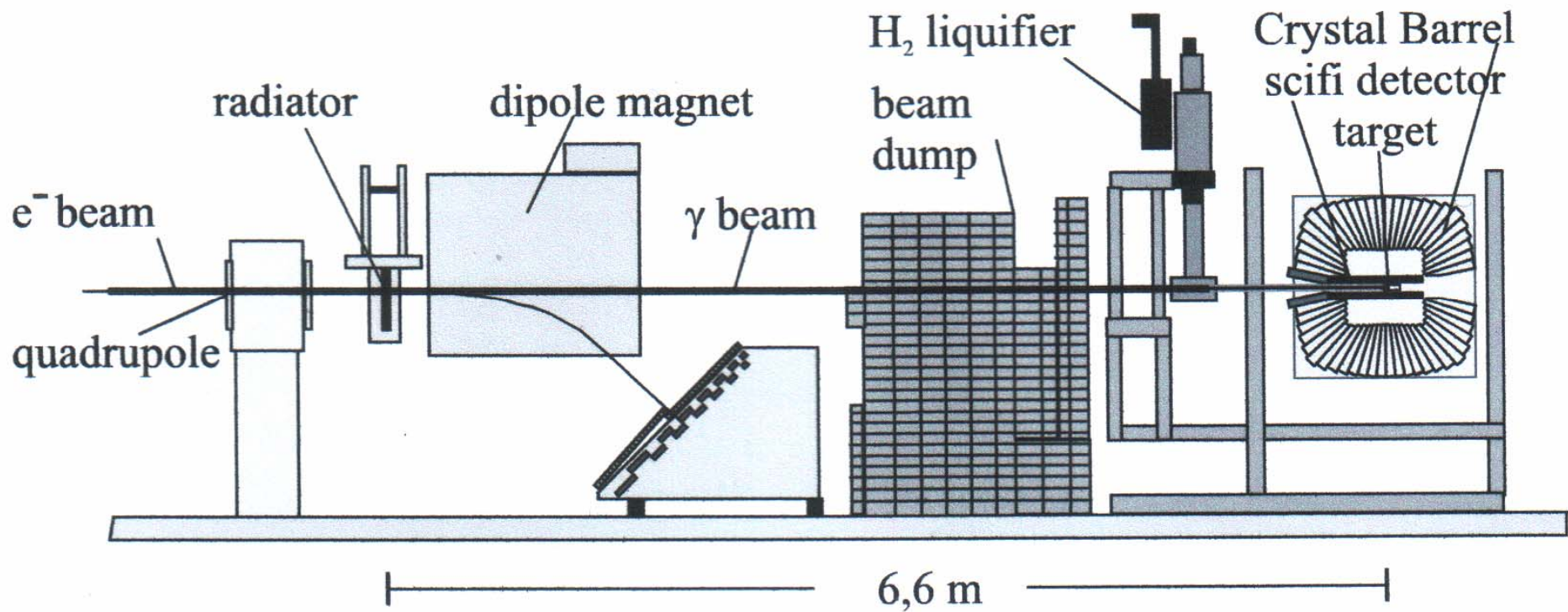
таких резонансах из экспериментов по фоторождению на основе изучения конечных состояний, отличных от πN . Именно поэтому подобные эксперименты интенсивно выполняются в течение последних лет на пучках меченых фотонов в ряде научных центров, и одной из наиболее эффективных групп, занимающихся изучением фоторождения нейтральных мезонов, является коллаборация Crystal Barrel. Главной частью экспериментальной установки – фотонный спектрометр Crystal Barrel, состоящий из 1290 кристаллов CsI(Tl)); этот прибор с его прекрасными возможностями детектировать много-фотонные события и с близким к 4π угловому захвату, представляет идеальный инструмент для изучения реакций, в которых рождаются один или несколько нейтральных мезонов, распадающихся, в свою очередь, на многие фотоны.

Crystal-Barrel

- 1230 CsI(Tl) crystals ($\theta: 156^\circ - 30^\circ$)
- $\Delta \theta : 6^\circ \quad \Delta \phi : 6^\circ \quad l = 30 \text{ cm} / 16 X_0$
- photodiode readout via WLS with integrated preamplifier
- 12-Bit dual range ADCs
1 MeV – 150 MeV / 1.2 GeV



- gated cellular logic cluster-finder for 2nd level trigger ($> 15 \text{ MeV}$; $\sim 5 \mu\text{s}$)
- reconstructed angular resolution $\sim 1^\circ$ (for photons)
- energy resolution $\sigma E / E = 2.5\% / E[\text{GeV}]^{1/4}$
5% (100 MeV) ; 2.5% (1 GeV)



Система мечения фотонов («таггер») состоит из радиатора, дипольного магнита и детектирующей части: 14 сцинтилляционных счётчиков и 2 проп. камер.

Диапазон энергий меченых фотонов – от 25% до 95% от энергии электронов.

Энергетическое разрешение составляет 0,1 (0,5) МэВ для высоких энергий фотонов и 10 (30) МэВ для низких энергий при $E_e = 1,4$ (3,2) ГэВ.

В результате цикла экспериментов, осуществлённых в период с 2000 по 2003 гг. выполнены прецизионные измерения дифференциальных сечений реакций $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$, $\gamma p \rightarrow \eta p$, $\gamma p \rightarrow \pi^0 \pi^0 p$, $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$. Измерения выполнены в широком диапазоне углов при энергиях электронов 1,4; 2,6 и 3,2 ГэВ, что позволило получить большой объем данных в диапазоне энергий фотонов от порога реакции до 3 ГэВ.

В настоящее время завершается интенсивная обработка и анализ полученных данных; конечной целью является уточнение характеристик существующих нуклонных резонансов и поиск новых (так наз. «missing») резонансов. Новые экспериментальные данные позволили определить – на основе парциально-волнового анализа – характеристики (массы, ширины, моды распада) около двадцати нуклонных резонансов. Большинство полученных характеристик в пределах приведённых ошибок согласуются с представленными в таблицах PDG. Вместе с тем получены свидетельства существования не известного ранее

резонанса $D_{13}(2070)$ и надёжно подтверждено существование резонанса $D_{33}(1940)$, имеющего весьма низкий рейтинг (одна звёздочка) в таблицах PDG; полученные в результате анализа характеристики резонанса $P_{11}(1710)$ явно отличаются от значений, приведённых в таблицах PDG. Кроме того, для нескольких нуклонных резонансов были более точно определены ширины некоторых парциальных распадов. Эти результаты неоднократно докладывались на Международных конференциях, значительная часть их уже опубликована в научной периодике – 21 статья в журналах Phys. Rev. C, Phys. Rev. Lett., Physics Lett., Eur. Phys. J. (шесть сотрудников Лаборатории мезонной физики ПИЯФ являются соавторами всех этих работ).

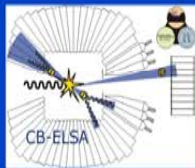
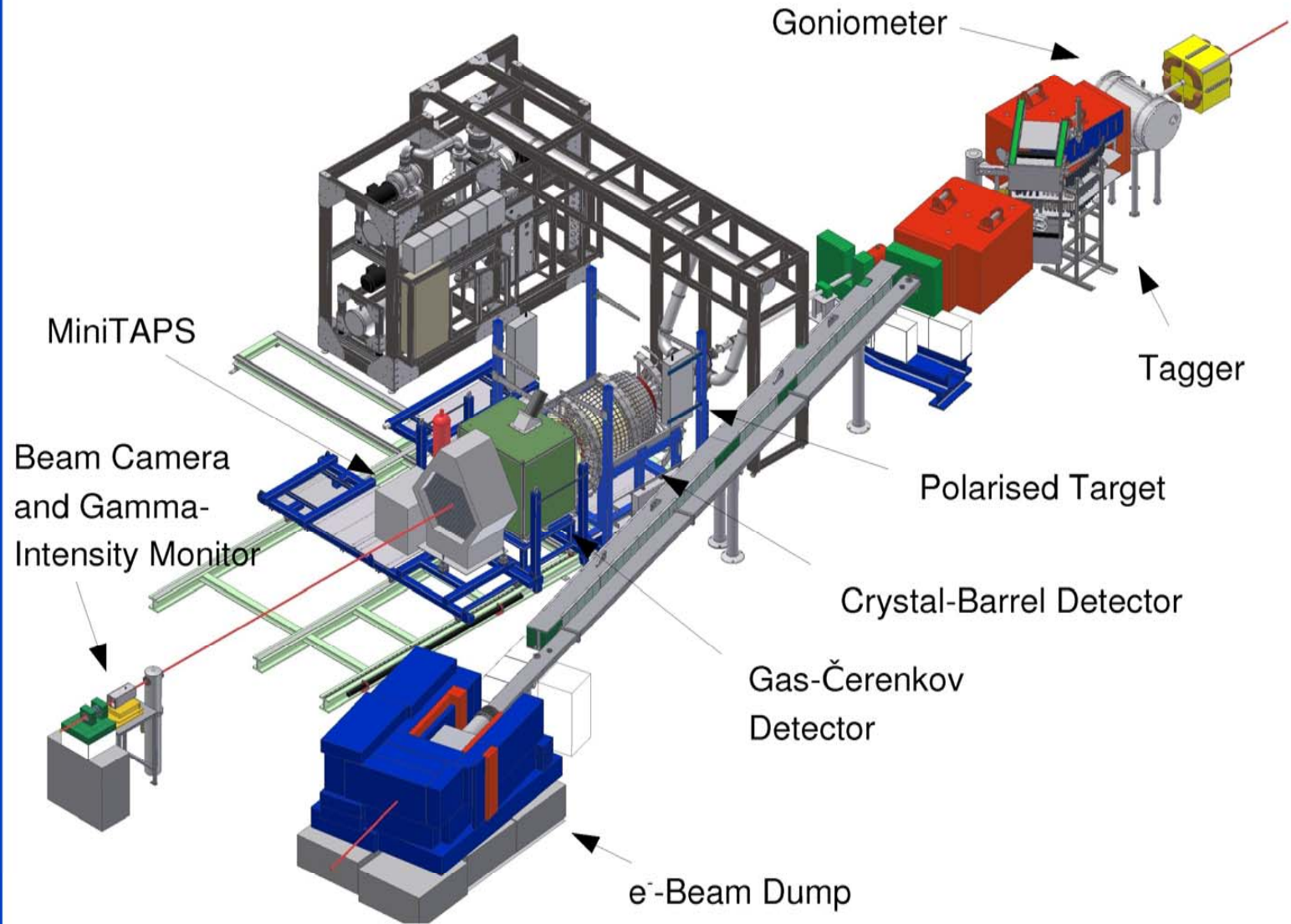
Начата новая серия экспериментов, в которых – при использовании поляризованной протонной мишени и пучков поляризованных фотонов – измеряются двойные поляризационные наблюдаемые. Эти наблюдаемые обеспечивают высокую чувствительность по отношению к резонансам, дающим малые вклады в сечение реакции, и дают возможность «распутать» перекрывающиеся резонансы при проведении парциально-волнового анализа. В такого рода экспериментах может быть измерено до 16 различных поляризационных наблюдаемых. Минимальный набор наблюдаемых, необходимых для проведения модельно-независимого ПВА – дифференциальные сечения, **три** одиночных поляризационных наблюдаемых и **четыре** двойных поляризационных наблюдаемых.

Observables in Meson Photoproduction

Photon polarization		Target polarization	Recoil nucleon polarization	Target and recoil polarizations
		X Y Z _(beam)	X' Y' Z'	X' X' Z' Z' X Z X Z
unpolarized	σ	- T -	- P -	T_x L_x T_z L_z
linear	Σ	H (-P) G	O_x (-T) O_z	(-L _z) (T _z) (L _x) (-T _x)
circular	-	F - E	C_x - C_z	- - - -

Для выполнения новой серии экспериментов, позволяющих измерять двойные поляризационные параметры, в 2006-2007 гг. проведена серьёзная модернизация установки со спектрометром Crystal Barrel (CB). Для этого CB был перемещён на другую пучковую линию ускорителя ELSA, что дало возможность поместить во внутреннюю полость CB поляризованную протонную мишень. Нужная величина поляризации протонов достигалась с помощью системы «накачки» поляризации, состоящей из рефрижератора, сверхпроводящего соленоида, создающего магнитное поле 5 Тл, и СВЧ-генератора для обеспечения динамической ядерной поляризации. После завершения этой процедуры система «накачки» сдвигалась с мишени, которая продолжала работать в режиме «замороженного спина» – при температуре около 50 мК и в «поддерживающем» магнитном поле 0,5 Тл, создаваемым тонким сверхпроводящим соленоидом, который был размещён внутри криостата мишени. Величина поляризации равна около 90%, и на этом уровне она могла держаться в течение 100–200 часов.

The Crystal-Barrel Experiment




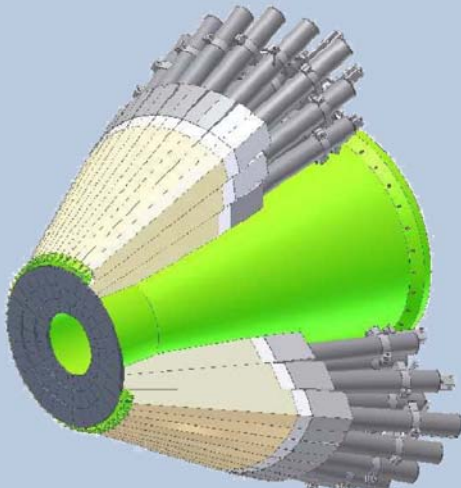
Annika Thiel

22.02.08

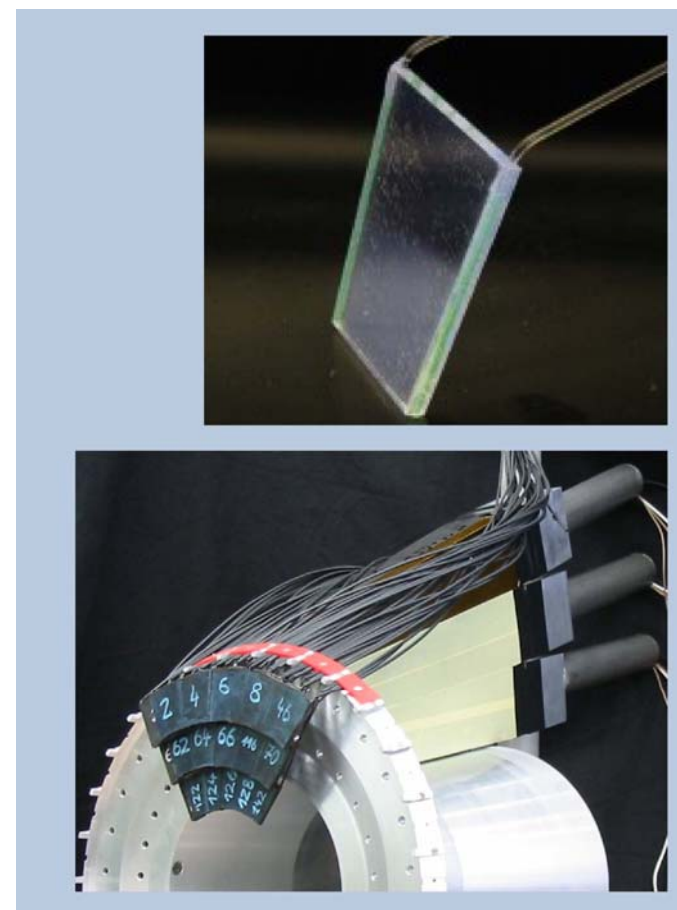
Существенный этап модернизации экспериментальной установки – разработка двух дополнительных форвардных детекторов, позволяющих регистрировать фотоны и заряженные частицы, вылетающие под малыми углами – вплоть до $\pm 1^\circ$. Один из них (именуемый Forward Plug) состоит из 90 кристаллов CsI(Tl).

The 30° Forward-Calorimeter

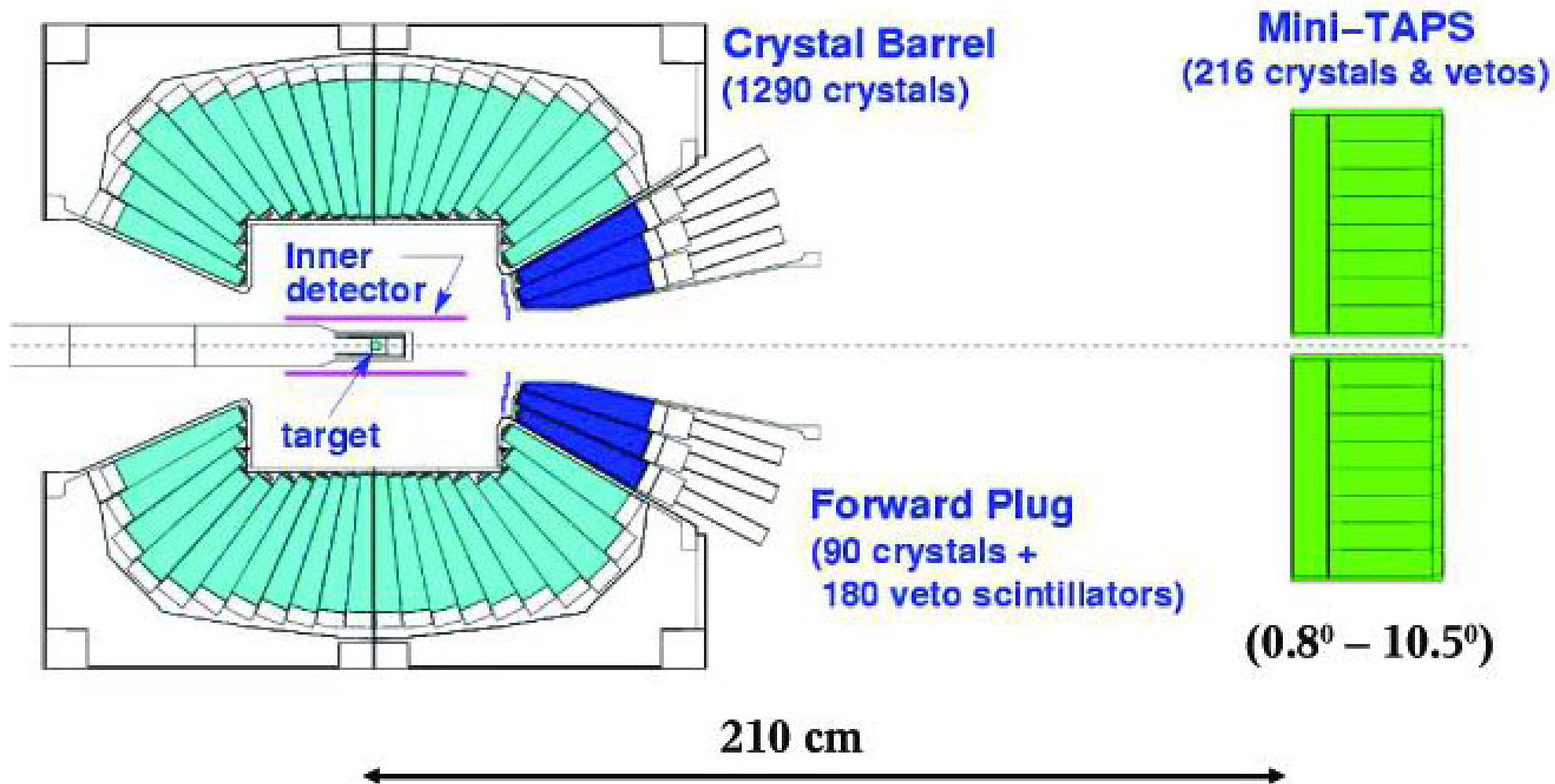
- 90 CsI(Tl) crystals ($\theta : 27.5^\circ\text{-}11.2^\circ$)
- $\Delta\theta : 6^\circ$ $\Delta\phi : 12^\circ$
- PMT readout
- 12-Bit dual range ADC
1 MeV – 250 MeV / 2 GeV



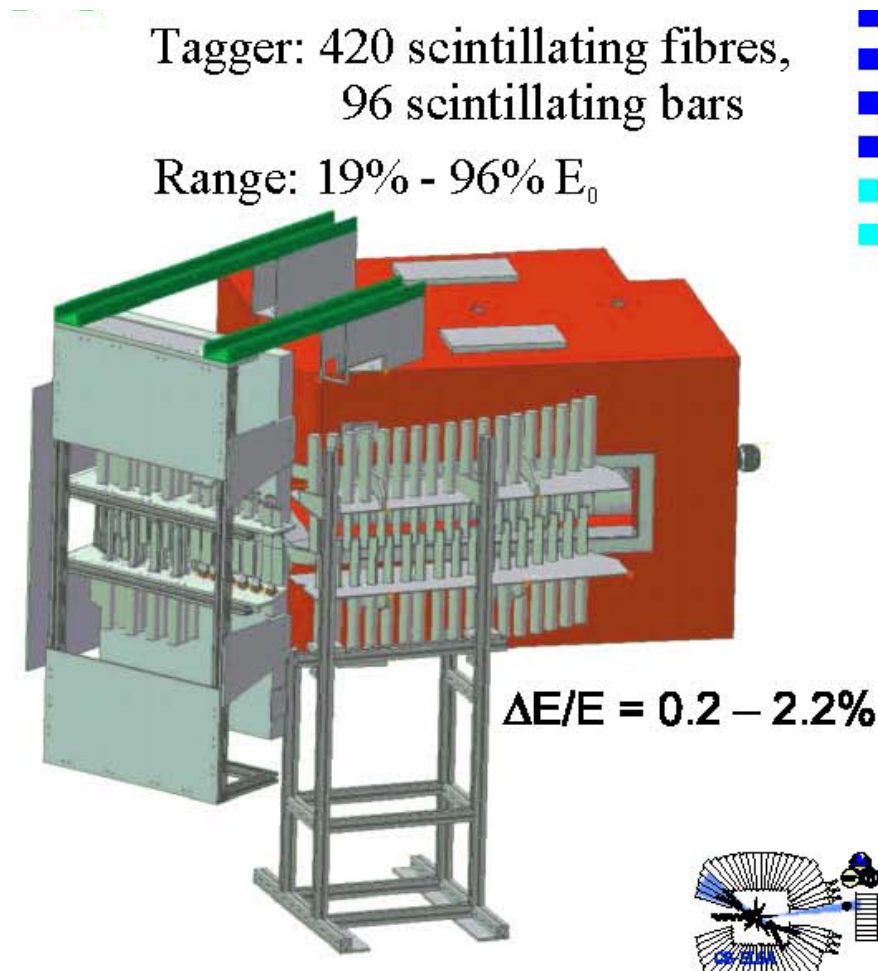
- free running clusterfinder (SRAM lookup-table)
1st level trigger (<70 ns)
- MultiHit TDC
- photon time resolution 1.7 ns (FWHM)



Схематическое изображение спектрометра Crystal Barrel и форвардного детекторов



И, наконец, была разработана и отлажена усовершенствованная система мечения фотонов, состоящая из 96 сцинтилляционных счётчиков варьируемой ширины и из 480 сцинтилляционных нитей.



После завершения описанной выше модернизации установки Crystal Barrel начат цикл качественно новых экспериментов, в которых измеряются двойные поляризационные наблюдаемые для реакций фоторождения мезонов и странных частиц – при использовании как поляризованной мишени, так и пучка поляризованных фотонов. Сотрудники Лаборатории мезонной физики ПИЯФ принимали деятельное участие в модернизации установки СВ; в частности, в изготовлении и настройке детектора Forward Plug. Сейчас физики Лаборатории активно включились в эксперименты, выполняемых на пучке «меченых» фотонов ускорителя ELSA с помощью модернизированной установки Crystal Barrel – ведь в настоящее время эта установка является единственной в мире, на которой проводятся измерения двойных поляризационных наблюдаемых для реакций фоторождения нейтральных мезонов. Именно эти измерения являются ключевыми в программе поиска «недостающих» резонансов на основе изучения процессов фоторождения мезонов и гиперонов на протонах.

На первом этапе измеряются двойные поляризационные наблюдаемые для реакций фоторождения нейтральных мезонов на **продольно поляризованной мишени**. В экспериментах с использованием **пучка циркулярно поляризованных фотонов** извлекается параметр E :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \varphi) = \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \cdot [1 - P_z \cdot P_\gamma^{circ} \cdot E(\theta)].$$

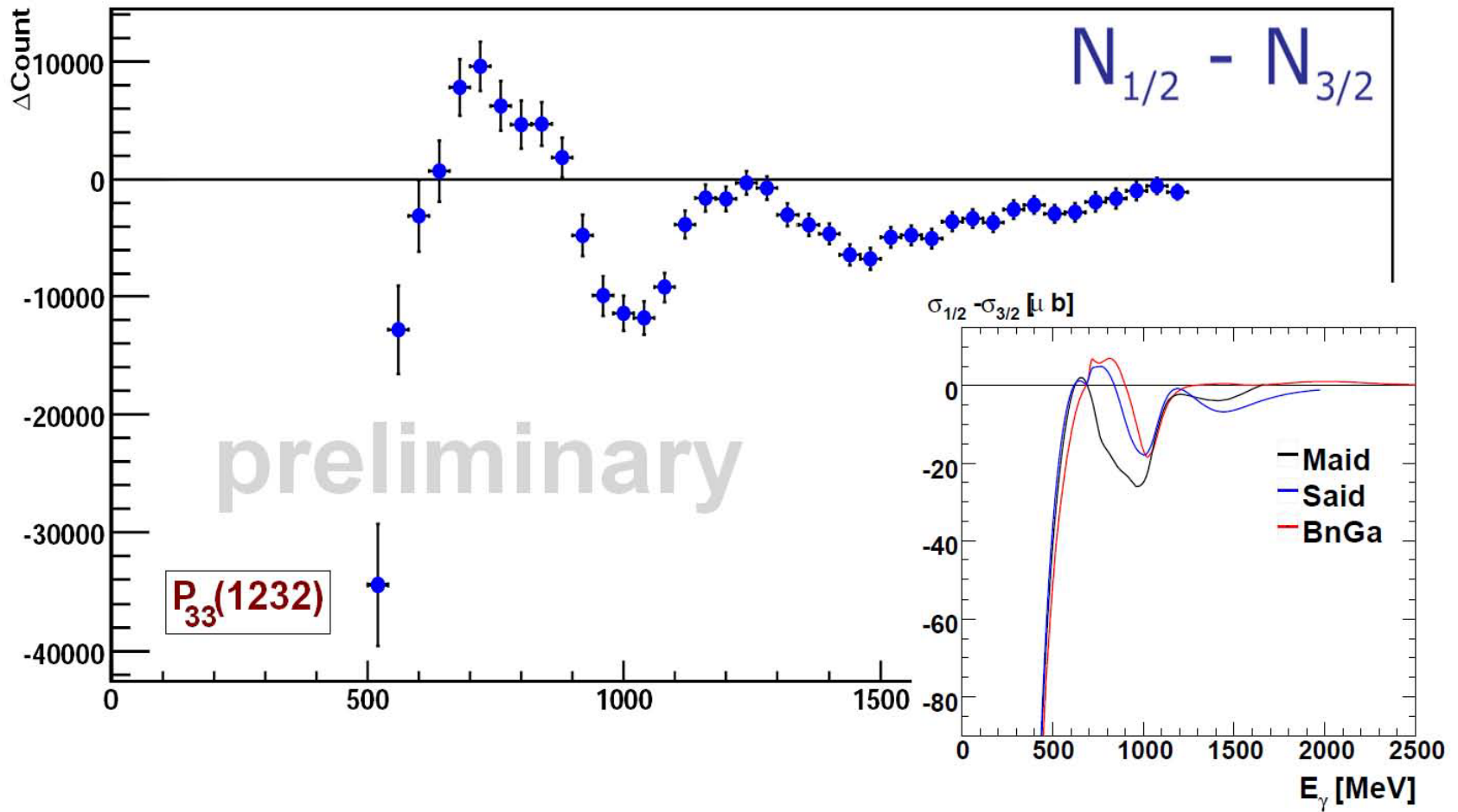
Для этого проводятся измерения сечений при двух направлениях поляризации мишени (т. е. при двух значениях спиральности 1/2 и 3/2) и находится отношение

$$E = \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{1/2} - \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{3/2}}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{1/2} + \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{3/2}} = \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{1/2} - \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{3/2}}{2\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{unpol}}$$



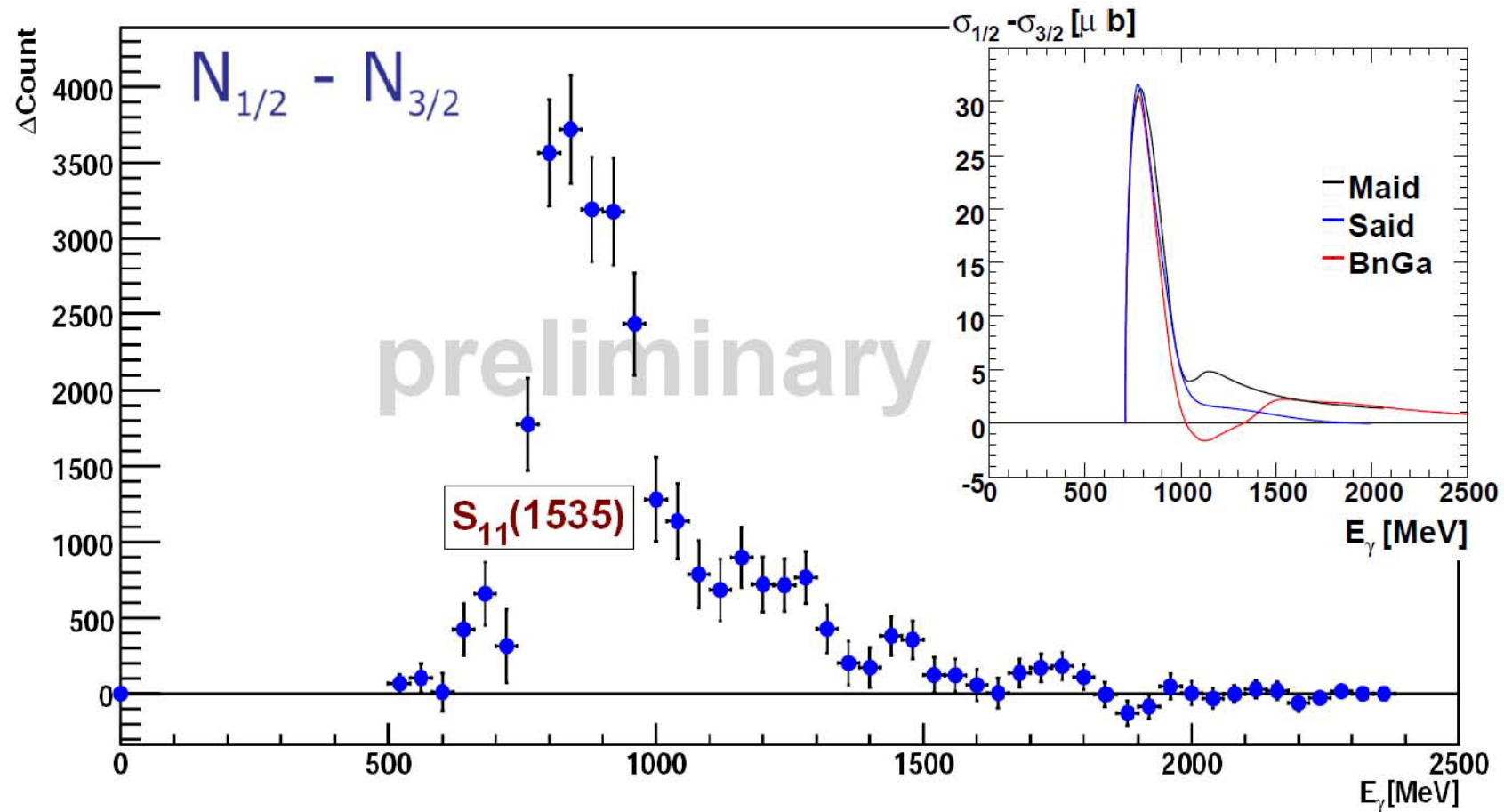
Count Rate Difference $\gamma p \rightarrow p \pi^0$

Circularly polarized photons and longitudinally polarized target



Count Rate Difference $\gamma p \rightarrow p\eta$

Circularly polarized photons and longitudinally polarized target



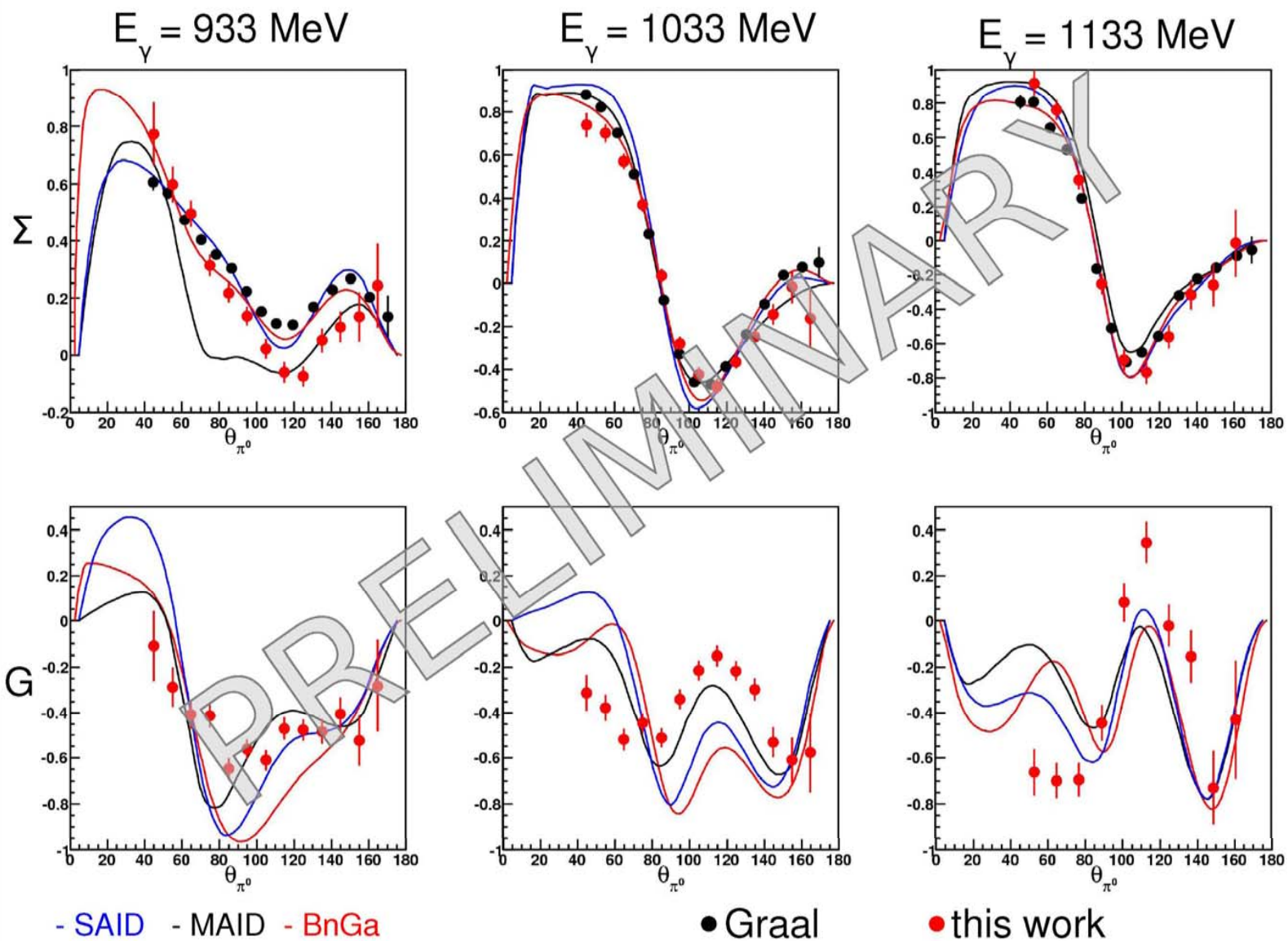
В экспериментах, выполняемых на **продольно поляризованной мишени** при использовании **пучка линейно поляризованных фотонов**, измеряется двойная поляризационная асимметрия **G** . В этом же эксперименте одновременно измеряется пучковая асимметрия **Σ** .

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \phi) = \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \cdot \left[1 - P_{\gamma}^{lin} \cdot \Sigma(\theta) \cdot \cos(2\phi) - P_z \cdot P_{\gamma}^{lin} \cdot G(\theta) \cdot \sin(2\phi) \right],$$

где P_z – величина поляризации мишени, P_{γ}^{lin} – величина линейной поляризации фотонов, ϕ – азимутальная ориентация плоскости реакции относительно плоскости, в которой лежит вектор поляризации фотонов.

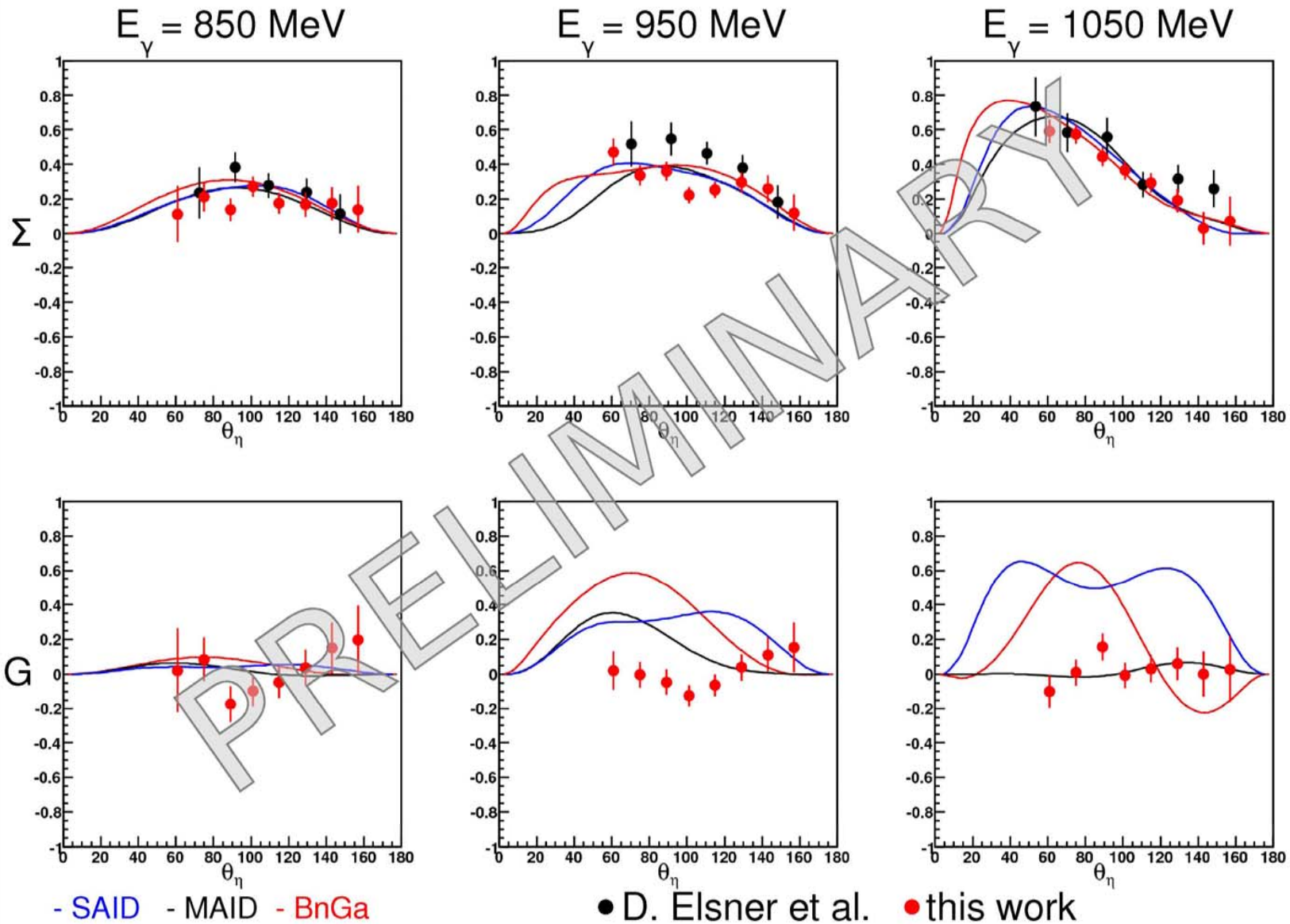


$\vec{\gamma} \vec{p} \rightarrow p \pi^0$: Observables Σ and G



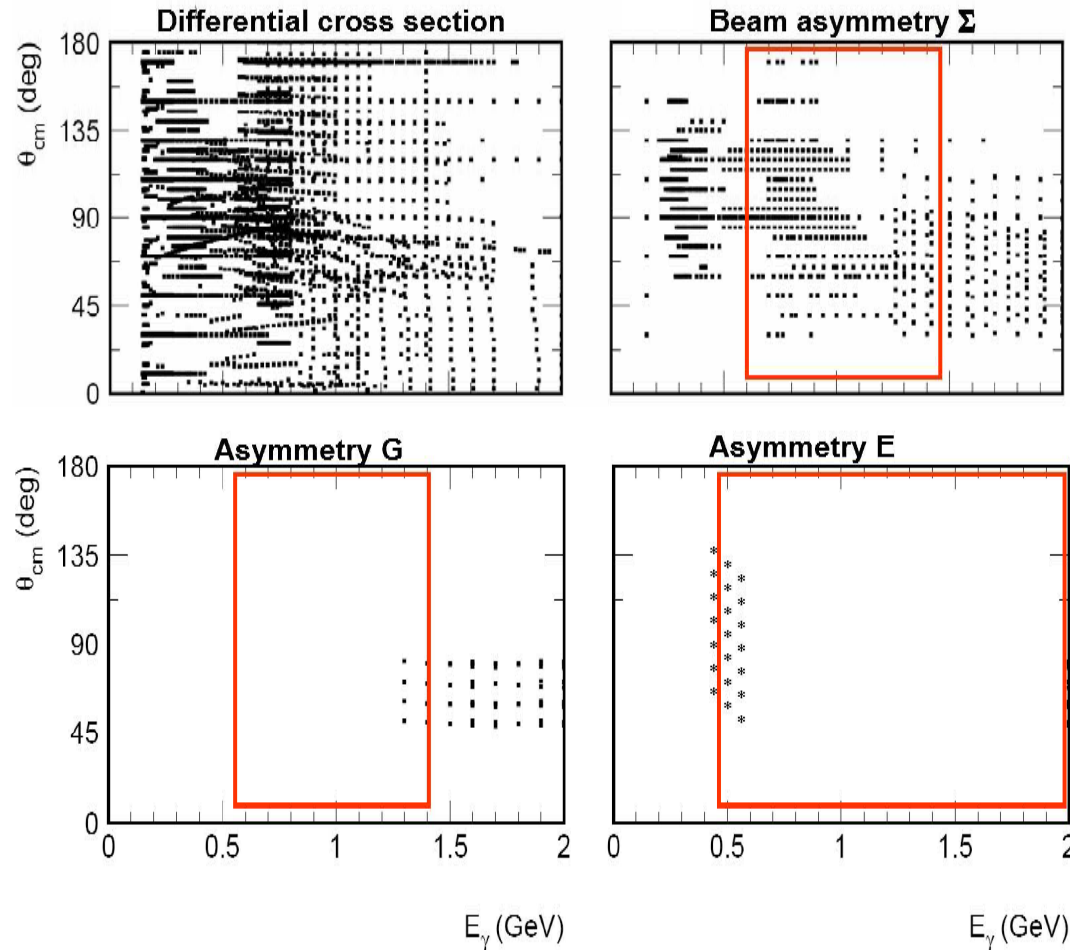


$\vec{\gamma} \vec{p} \rightarrow p \eta$: Observables Σ and G



World Data Base

reaction: $\vec{\gamma} + \vec{p} \rightarrow p + \pi^0$



First round of double polarization experiments with CB at ELSA:

Energy range for G: 600- 1300 MeV

Energy range for E: 500- 2100 MeV

Future plans for CB at ELSA:

Extend energy range to 3 GeV

Transversally polarized target in preparation

Future plans for Crystal Ball at MAMI C:

G: 150- 800 MeV

E: 150- 1500 MeV

Для выполнения следующего этапов эксперимента спин поляризованной мишени будет переориентирован таким образом, чтобы можно было проводить измерения с **поперечно поляризованной мишенью**. Эта модернизация мишени (планируется, что эта модернизация будет завершена в середине 2010 года) позволит измерить ещё 3 поляризационных параметра: T , P и H .

Photon polarization		Target polarization	Recoil nucleon polarization	Target and recoil polarizations
		X Y Z _(beam)	X' Y' Z'	X' X' Z' Z' X Z X Z
unpolarized	σ	- T -	- P -	T_x L_x T_z L_z
linear	Σ	H (-P) G	O_x (-T) O_z	(-L _z) (T _z) (L _x) (-T _x)
circular	-	F - E	C_x - C_z	- - - -

Заключение

- модернизированная установка Crystal Barrel на ускорителе ELSA позволяет измерять двойные поляризационные наблюдаемые
- поляризационные наблюдаемые необходимы для определения парциальных амплитуд на основе однозначного и модельно-независимого ПВА.
- первые результаты, полученные по двойным поляризационным наблюдаемым E и G , указывают на важные отличия от предсказаний существующих ПВА.
- выполненные измерения наблюдаемых E и G представляют собой первый важный шаг в выполнении «полного эксперимента».
- измерения двойных поляризационных наблюдаемых будут продолжены при другой ориентации спина поляризованной мишени.