

Новые методы изучения взаимодействия нестабильных  
короткоживущих мезонов с ядерной средой.

A.Lapik, A.Mushkarenkov, V.Nedorezov\*, I.Pshenichnov, A.Turinge  
INR RAS, Moscow.

GRAAL and BGO-OD collaboration (Bonn)  
*Institute for Nuclear Research, RAS, Moscow*

# Постановка задачи :

## Фотомезонная + фотоядерная

Обычно взаимодействие мезонов, рождающихся в ядре, с ядерной средой рассматривается в рамках различных, главным образом феноменологических моделей, учитывающих остаточное взаимодействие мезона с этим ядром. Полученный результат интерпретируется как влияние ядерной среды, определяющей различие в свойствах образующихся мезонов на ядре и на свободном нуклоне .

Правомерен вопрос: можно ли получить информацию о реакциях взаимодействия мезона с ядерной средой по аналогии с той, что получают на пучках налетающих частиц? Очевидно, что создать пучки  $\pi^0$ ,  $\eta$  и других нестабильных короткоживущих мезонов не представляется возможным, даже если они рождаются сильно релятивистскими. Длина их пробега в лучшем случае получается сравнимой с размером тяжелого ядра.

Последние данные фотоядерного эксперимента на установке GRAAL \* показали, что в резонансной области энергий на ядре  $^{12}\text{C}$  можно проследить развитие внутриядерного каскада в отдельных парциальных реакциях с рождением различных нестабильных мезонов. При этом измерена множественность образующихся нуклонов, - от нуля до полного распада ядра на отдельные нуклоны.

\* V.Nedorezov, A.D Angelo, O.Bartalini e.a. (GRAAL Collaboration), Disintegration of  $^{12}\text{C}$  nuclei by 700 – 1500 MeV photons. Nucl.Phys. A (2015), in print.

# МЕТОД

Чтобы изучать взаимодействие короткоживущего мезона с ядром требуется комбинированный метод:

Во-первых – выделить парциальный канал фоторождения мезона как начальную стадию процесса, на основе традиционного кинематического анализа.

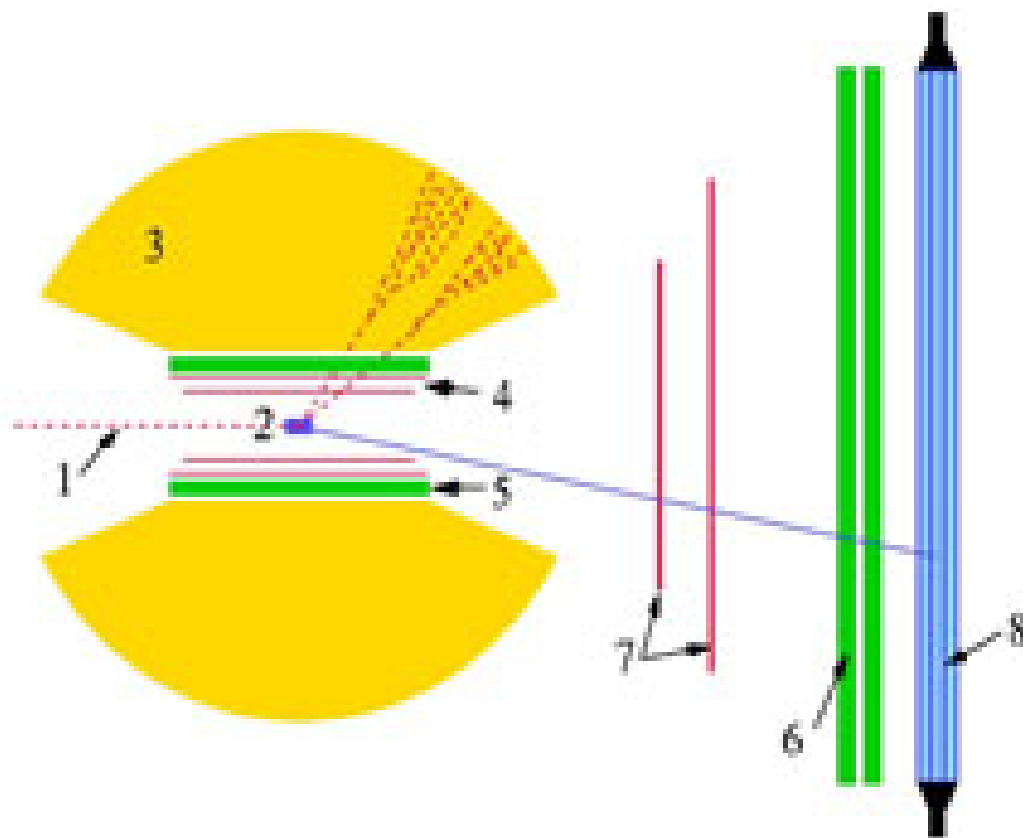
Например, нейтральный мезон по его инвариантной массе, заряженный мезон – лучше всего магнитным спектрометром.

Во вторых, - на совпадении с зарегистрированным мезоном произвести прямую регистрацию и идентификацию всех продуктов реакции, в том числе всех вторичных нуклонов отдачи, как протонов, так и нейтронов, а также возможных фрагментов типа дейтронов, тритонов и  $\alpha$  – частиц.

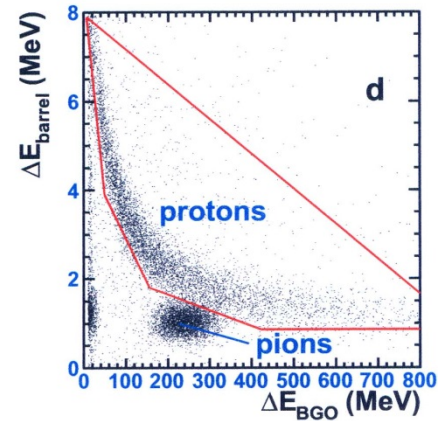
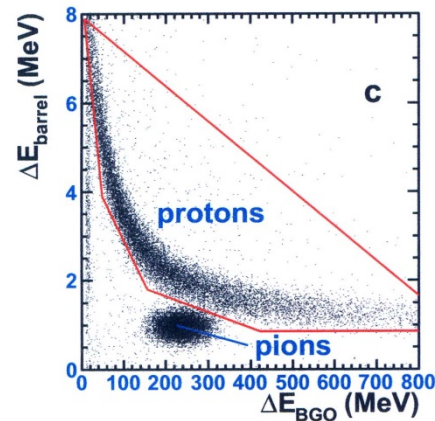
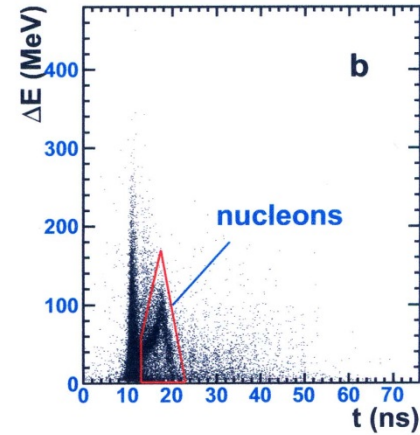
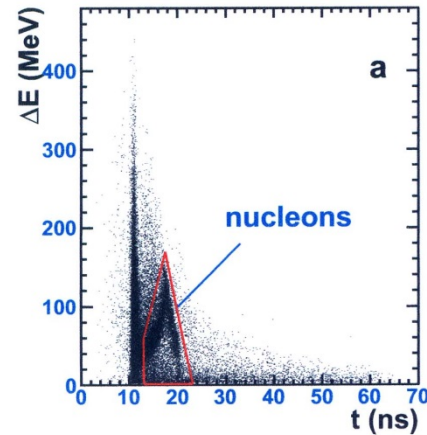
Эксперимент выполнен на детекторе LAGRAN<sub>γ</sub>E установки GRAAL :

1 – gamma beam, 2 – target, 3 – BGO ball, 4,7 – MWPCs,

5 – Barrel, 6 – plastic wall, 7 – EM calorimeter

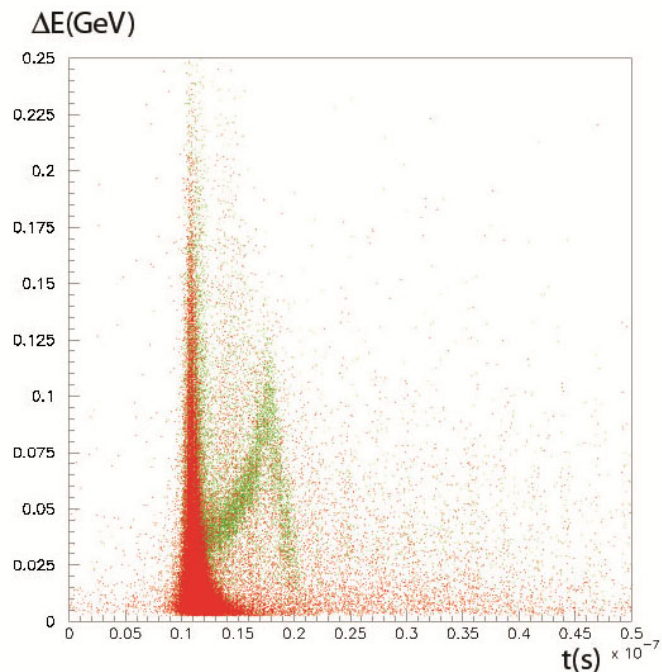


Прямая идентификация продуктов реакции во время пролетном детекторе (верхние рисунки) и BGO калориметре (нижние рисунки)  
a,c – моделирование, b,d – эксперимент GRAAL



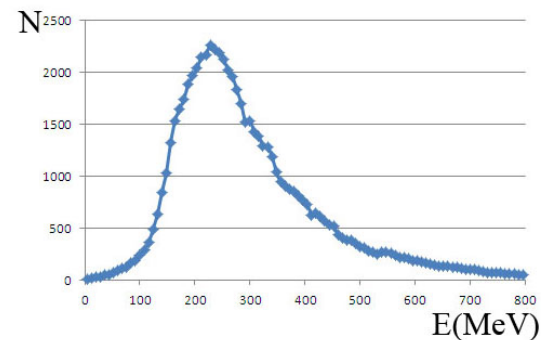
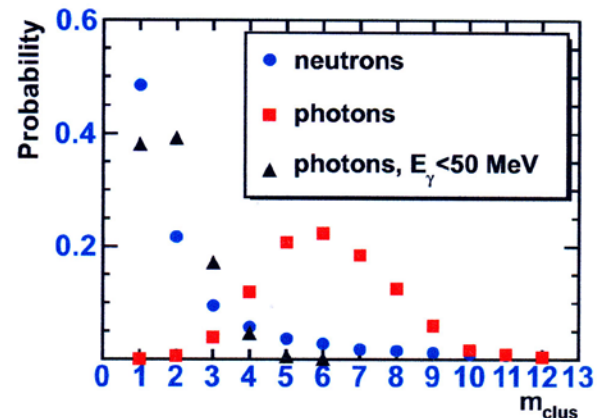
Для прямой идентификации нейтронов в BGO калориметре, возможно, потребуются дополнительные усилия :

измерение размеров нейтрального кластера,  
измерение времени пролета относительно медленных вторичных частиц,  
идентификация звезды (точки образования мезона в мишени)  
активная защита от внешнего фона.



Размер нейтрального кластера для нейтронов И фотонов

Гамма спектр для всех фотонов, образующихся при фоторождении мезонов на нуклоне

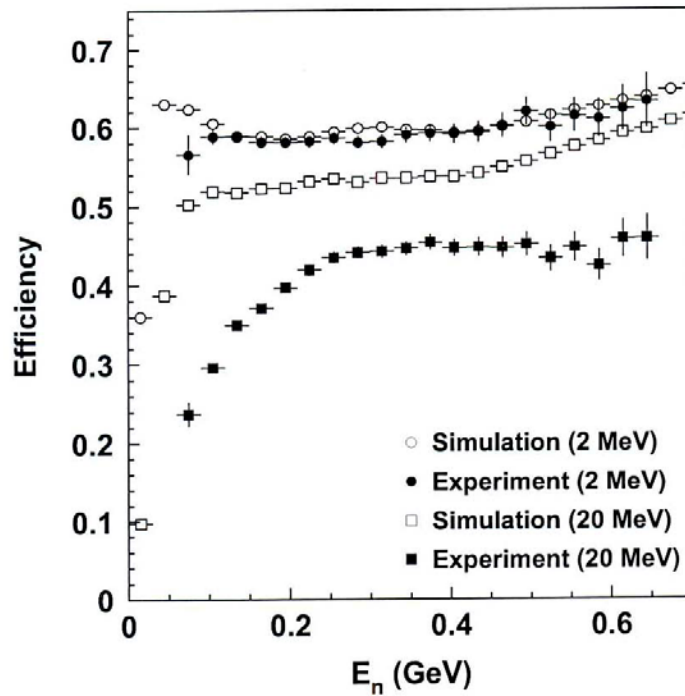


В переднем направлении (EM-калориметр) спектр TOF-DE аналогичен протонному, но эффективность регистрации в 5 раз ниже

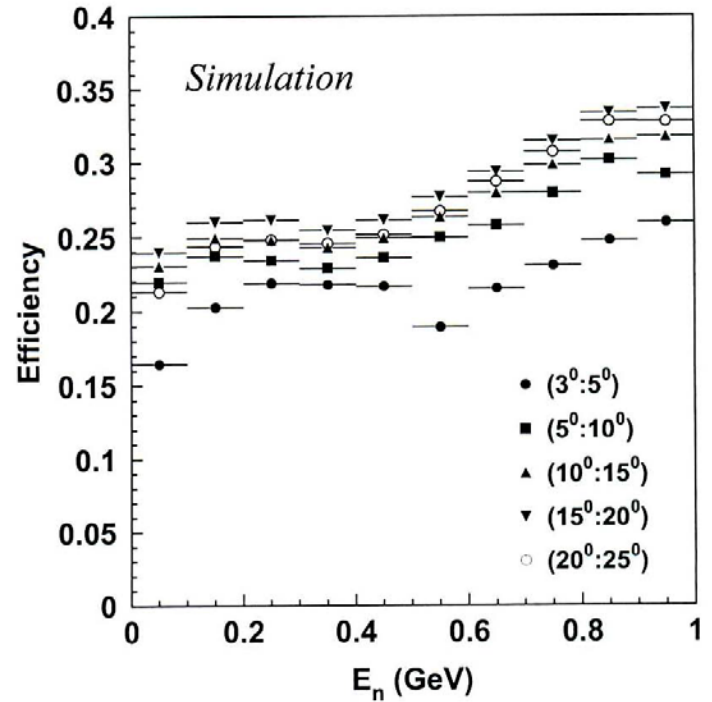
Вклад от фотонов с  $E_\gamma < 50$  МэВ не превышает 2%

# Neutron measurement efficiency for the BGO ball at different crystal thresholds and angles of emission

O. Bartalini , A.Mushkarenkov et.al., NIM A 448, 12 (2006).



(a)



(b)

# VERTEX : Yield of charged particles from the mylar windows with different multiplicity (n=2,3,4,5)

Target : 8 cm LD + 100  $\mu\text{m}$  mylar windows ( $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ )

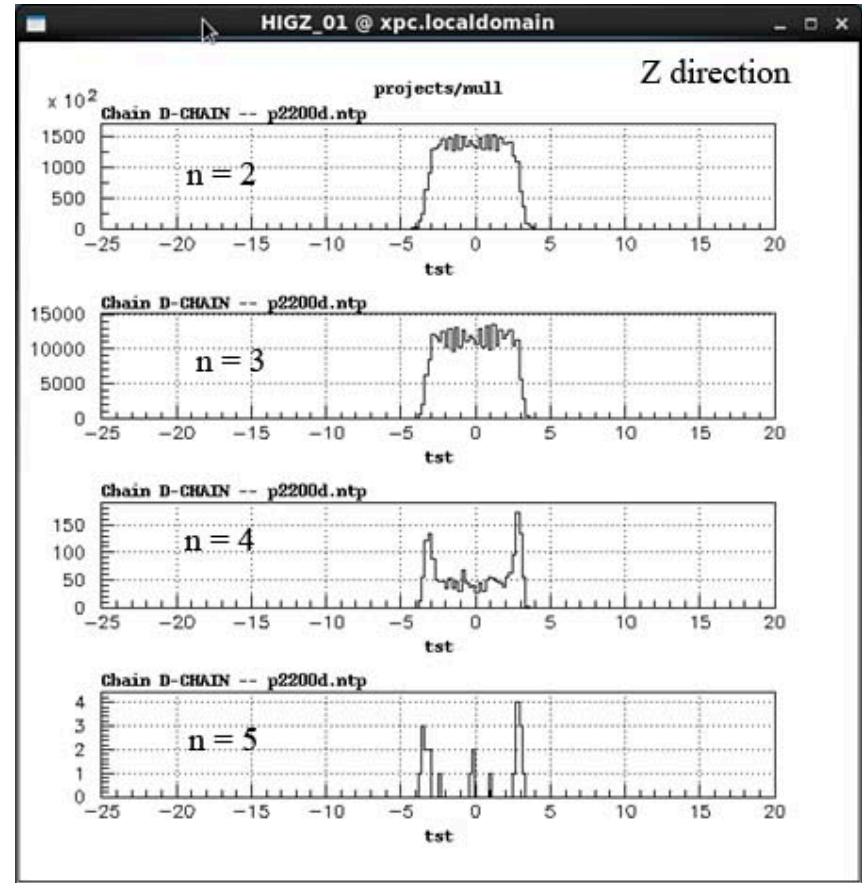
Beam  $E_\gamma = 0.6\text{-}1.5$  GeV



Cylindrical  $4\pi$  MWPCs  
of the detector  $\text{LA}_\gamma\text{RANGE}$ :

for  $n = 5$  measured particles  
are not mesons, not primary  
recoils,

Most probably they are cascade  
protons from intra-nuclear  
interaction





# Результаты измерений для событий с разной множественностью (без начальной идентификации мезона): Угловые распределения (левый рисунок) Вероятности вылета частиц разной множественности (правый рисунок) в сравнении с предсказаниями по модели RELDIS

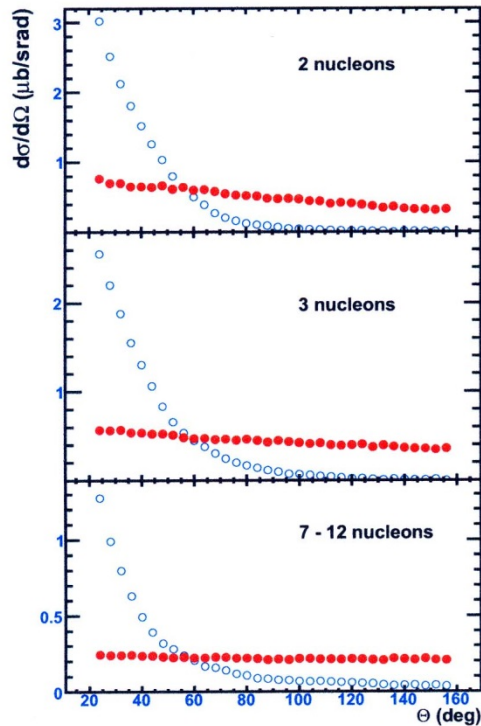


Figure 6: Measured angular distributions of nucleons produced in photodisintegration of  $^{12}\text{C}$  in the laboratory system in events with two (top panel), three (middle panel), seven and more fragments (bottom panel). In all cases the angular distribution for the leading most energetic proton in each event is presented by open circles, while the distributions for all other nucleons in the same event are presented by solid circles.

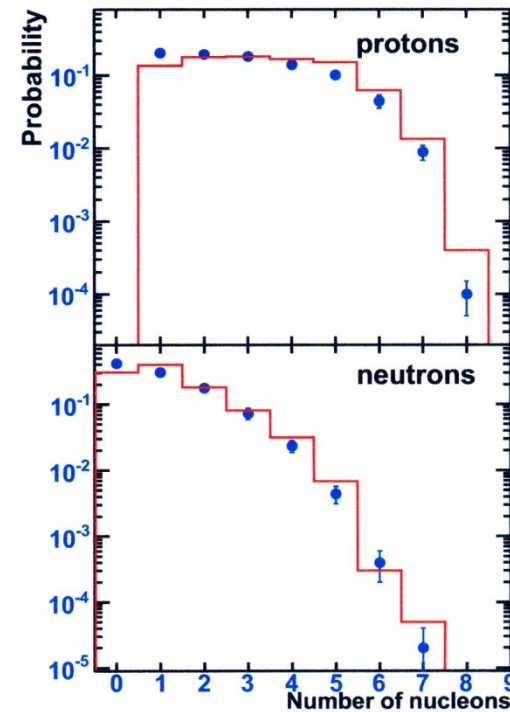


Figure 8: Measured (points) and calculated (histograms) probabilities of photodisintegration events of  $^{12}\text{C}$  at 0.7–1.5 GeV with a given number of protons (top) and neutrons (bottom). Only statistical uncertainties of measurements are shown.

## RELDIS model \*

is based on intranuclear cascade and Fermi break-up models

Условие распада ядра на нуклоны и фрагменты – энергия возбуждения выше энергии связи на нуклон, на самом деле – выше примерно 3 МэВ. Основные результаты получены на пучках протонов и релятивистских ядер, данных для фотонов практически не было.

Что нового могут дать фотоны ?

- Относительно невысокая множественность образующихся продуктов и полная характеристика процесса,
- Ядро прозрачно для фотонов,
- Хорошие фоновые условия (нет вторичного и множественного рассеяния)

\* I. Pshenichnov et.al., Phys. Rev. **C57**, 1920 (1998). , Physics of particles and nuclei, 42 (2011) 215, Eur. J. Phys. A 24 (2005) 69.

# Propagaion of mesons and nucleons in nuclear media:

## INC – Intra - Nuclear Cascade

[Moscow, EMIN-2001, p.170 ]

**Probability of secondary interactions between meson and intra-nuclear nucleon :**

$$w(k) = \frac{(\sigma\rho l)^k}{k!} \exp(-\sigma\rho l)$$

where  $\sigma$  – cross section,  $\rho$  – nuclear density ( $0.17 \text{ Fm}^{-3}$ ),  $l$  – free mean pass.

$$\sigma = \sigma_{\text{tot}}(\eta N) = \sigma_{\text{el}}(\eta N) + \sigma_{\text{in}}(\eta N).$$

$$\delta w(0) = \frac{dw(0)}{d\sigma} \delta\sigma = -\rho l \exp(-\rho\sigma l) \delta\sigma$$

**Probability for zero and one interaction step within INC :**

$$\delta w(1) = \frac{dw(1)}{d\sigma} \delta\sigma = -\rho l \exp(1 - \rho\sigma l) \delta\sigma$$

The ratio  $\frac{\delta w(1)}{\delta w(0)} = \rho\sigma l - 1 = 6.7$  for slow  $\eta$ -mesons ( $\sigma = 150 \text{ mb}$ )

**Life time of unstable mesons depends on its velocity; for slow  $\eta$ - mesons the free mean pass  $l = 3 \text{ Fm}$ .**

# INC prediction for different cascade steps

[Moscow, EMIN-2001, p.170 ]

Table 1: Particle emission probability from nucleus  $^{14}\text{N}$  on different steps of reaction initiated by photoproduction of  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons on intranuclear proton (%).

| particle | reaction step | $\gamma p(^{14}\text{N}) \rightarrow \pi^0 p$ | $\gamma p(^{14}\text{N}) \rightarrow \eta p$ |
|----------|---------------|---|--|
| p        | 1             | 95  | 95   |
| $\pi^0$  | 1             | 80  | 0  |
| $\eta$   | 1             | 0   | 70   |
| p        | 2             | 22.0  | 20.8   |
| n        | 2             | 23.7  | 22.1   |
| $\pi^0$  | 2             | 8.7   | 8.6  |
| $\pi^+$  | 2             | 8.67  | 9.1  |
| $\pi^-$  | 2             | 7.84  | 6.78   |
| p        | 3             | 8.85  | 7.15   |
| n        | 3             | 8.90  | 7.05   |
| p        | 4             | 2.61  | 2.17   |
| n        | 4             | 2.90  | 2.02   |

# Предыдущие эксперименты

**300 GeV p + W** ( 66 tracks) Akhorov O. e.a. **ОИЯИ**  
R1=9963 (1976)

**1 GeV p + Pb,Th,U** Gorshkov B.L.,e.a. Explosion  
reaction in  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{197}\text{Au}$  by 1 GeV protons.  
JETP Letters,37.60-63, (1983). **ПИЯФ**

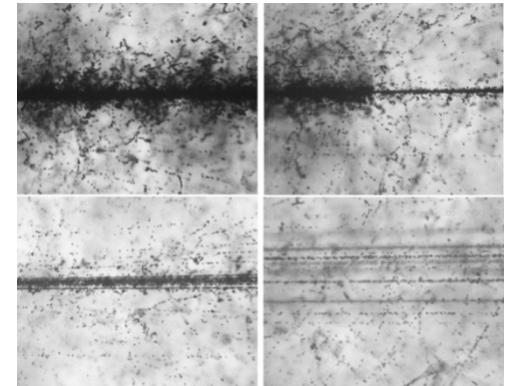
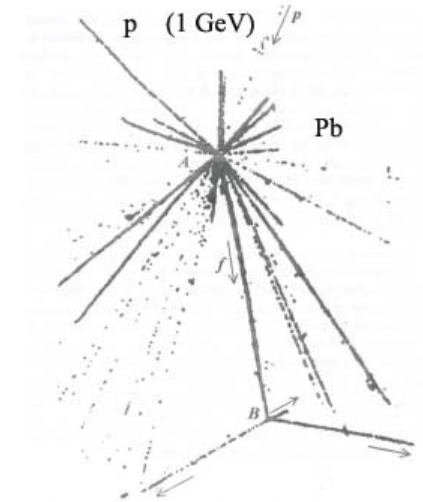
**p,  $\alpha$ - частицы** Lips V.,e.a. **FASA. ОИЯИ, ТУ**  
Darmstadt (1993), IKDA 3/7, p1-11 (1993).

**Релятивистские ионы + Au (фотоэмульсия)**

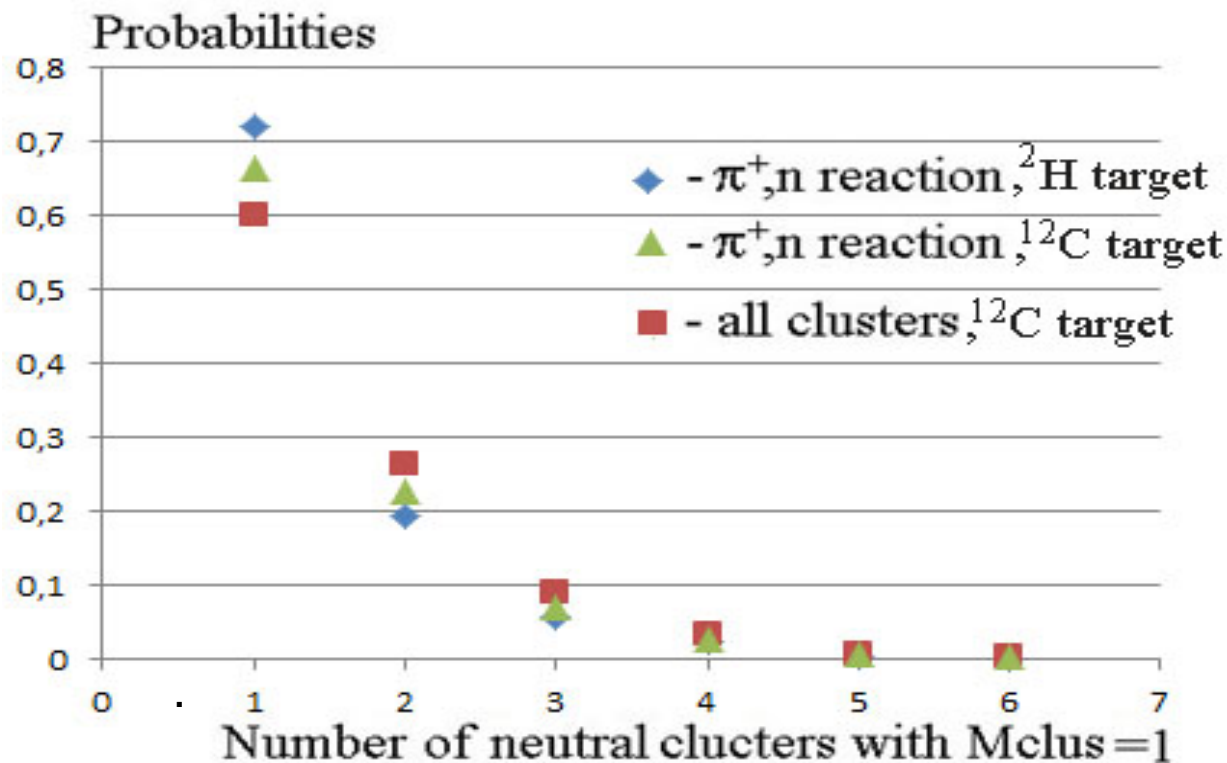
**Возбуждение ядер виртуальными фотонами**

**[becquerel.jinr.ru](http://becquerel.jinr.ru)**

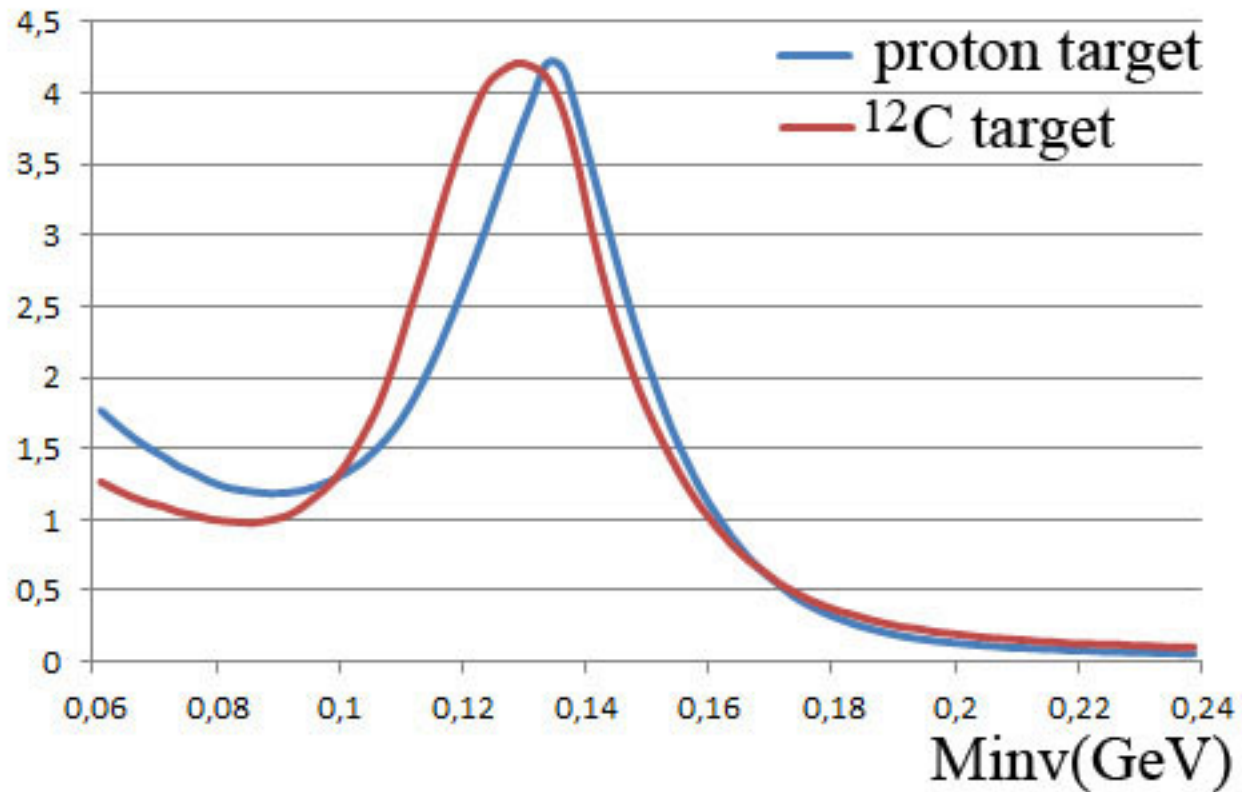
A.S.Botvina e.a. **ALADIN** collaboration @ SIS, Multifragmentation of  
spectators in relativistic heavy-ion reactions, NP A 584 , 4 (1995) 737.



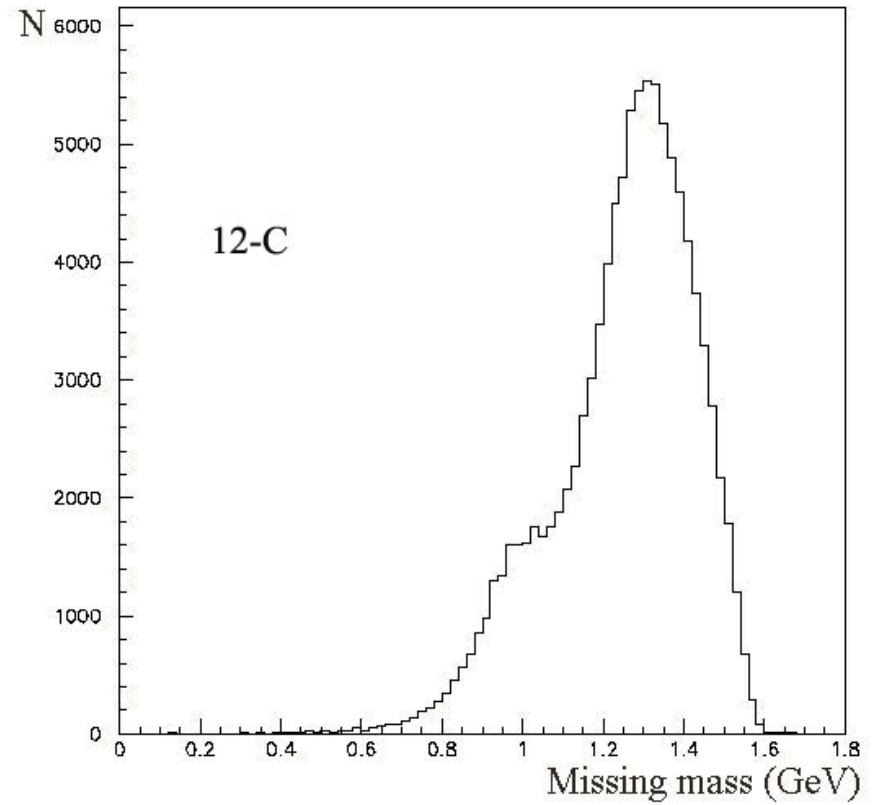
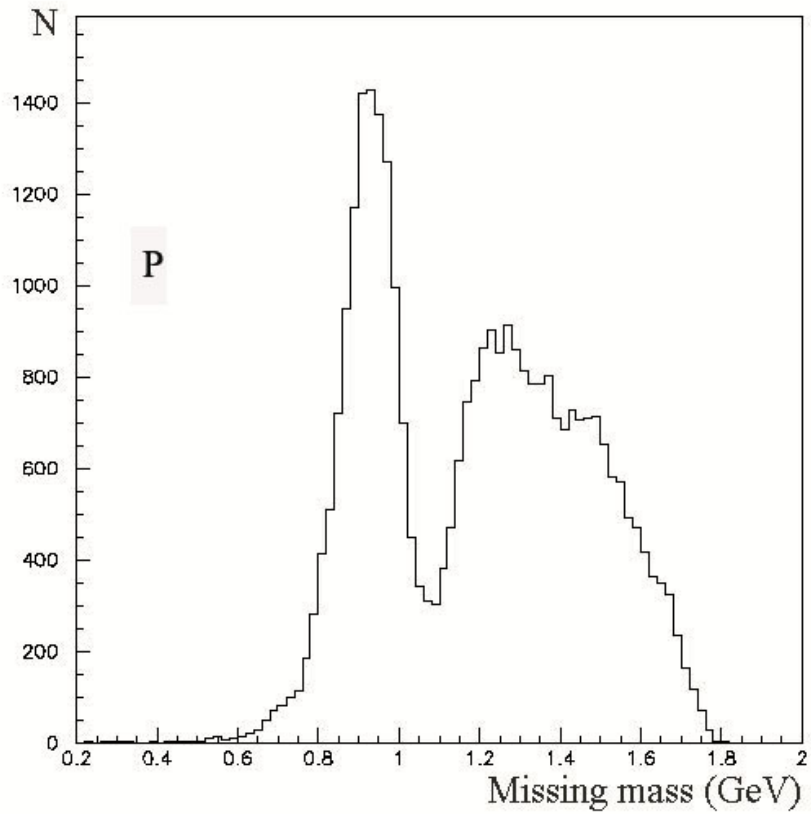
Вероятность вылета каскадных нейтронов, инициированных разными парциальными каналами на ядрах дейтерия и углерода



# Invariant mass of $\pi^0$ meson for proton and carbon target

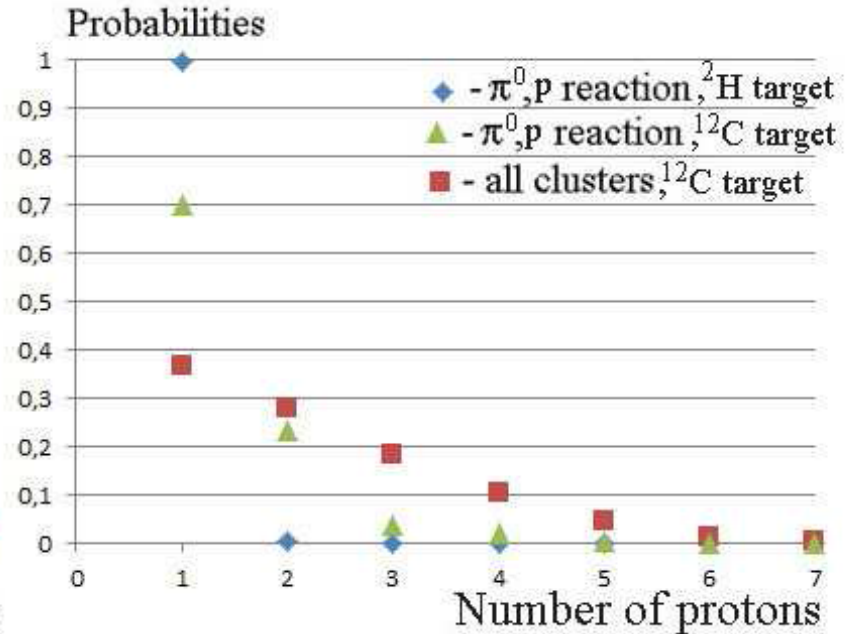
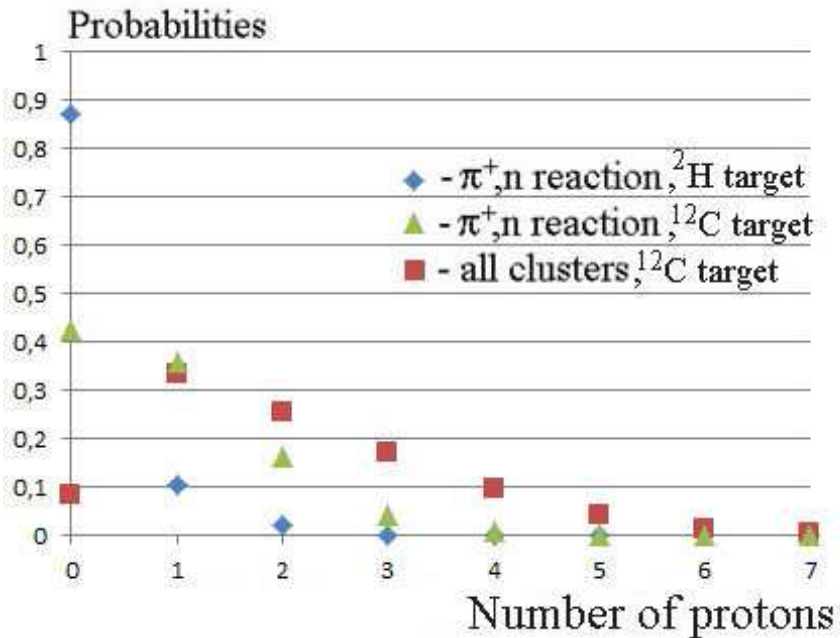


## Missing mass for p and C target

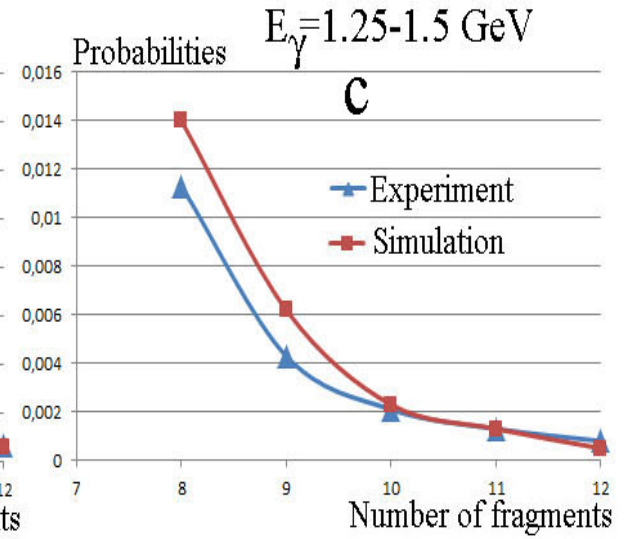
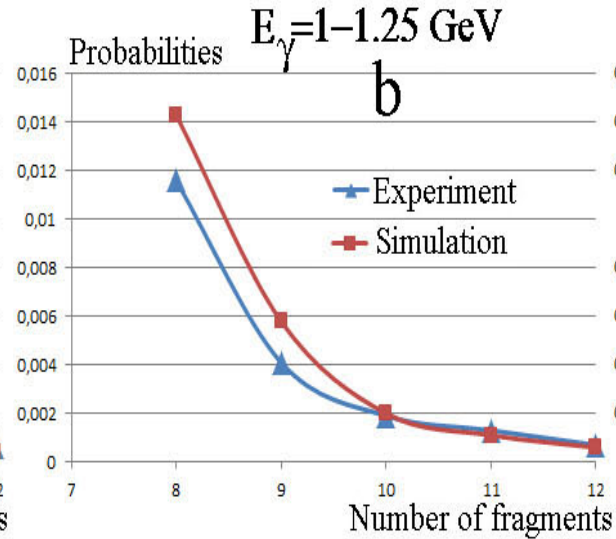
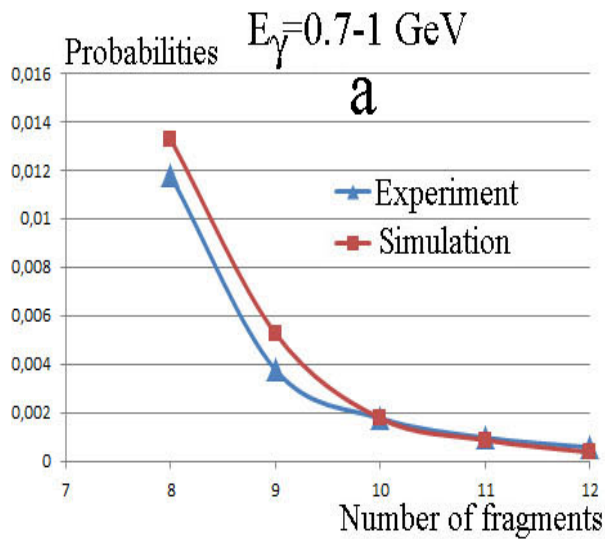




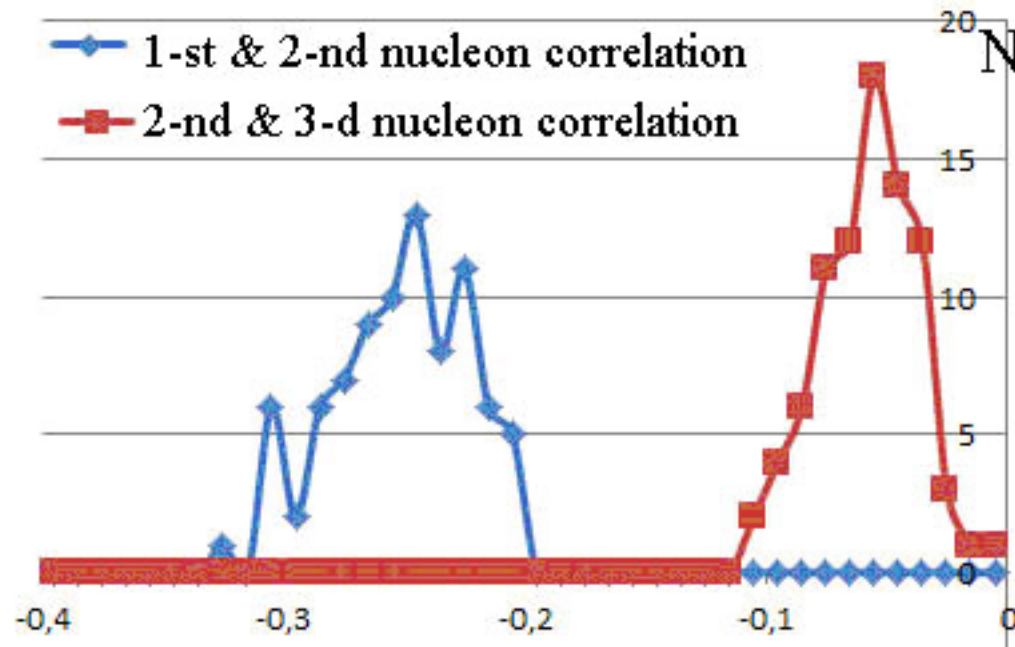
## Вероятность вылета каскадных протонов, инициированных разными парциальными каналами на ядрах дейтерия и углерода



$^{12}\text{C}$  multi-fragmentation probabilities ( $n = 8 - 12$ )  
at different  $E_\gamma$  energies  
in comparison with RELDIS predictions



Угловые корреляции между каскадными нуклонами  
«1-й нуклон» имеет максимальную энергию,  
2-ой нуклон –меньшую энергию и т.д.



# Предварительные выводы и направления будущих исследований :

Заметны различия в выходах каскадных нуклонов, инициированных разными парциальными каналами фоторождения мезонов. Это значит, что разные мезоны по-разному взаимодействуют с ядерной средой. Нужна информация о зависимости от энергии мезонов, от множественности самих мезонов и т.д.

Можно ли наблюдать события, когда множественность испускаемых нуклонов  $n = 0$  или когда мезон поглощается ядром?

# Что нового даст изучение процессов фоторождения мезонов без вылета каскадных нуклонов? –

Когерентные взаимодействия – ядро остается в основном состоянии, или энергия возбуждения очень мала

Нелинейные эффекты в фотоядерных процессах :

- отличия в полных сечениях фотопоглощения от «универсальной кривой»:

$$\sigma_{\text{tot}} = A \sigma_{\gamma N}$$

- Когерентное фоторождение мезонов \*
- Дельбрюкковское рассеяние (через виртуальное рождение  $e+e-$  пар) \*\*,
- Эффект Примакова (рождение псевдоскалярных мезонов в когерентном взаимодействии) \*\*\*,
- Процессы с малой передачей энергии и импульса при фотоделении ядер: эффект превышения сечений на 20% над универсальной кривой на ядрах –актинидах в области нуклонных резонансов\*\*\*\*

\* A2 collaboration (Mainz)

\*\* BINP (Novosibirsk)

\*\*\*CEBAF (JLAB), CAST (Livermore), SN1987A (DESI) , COMPASS (CERN)

\*\*\*\* BINP, Novosibirsk, CEBAF (JLAB)

Мезон поглощается в ядре,  
но факт его рождения можно наблюдать по нуклонам отдачи  
(Мечение мезонов)

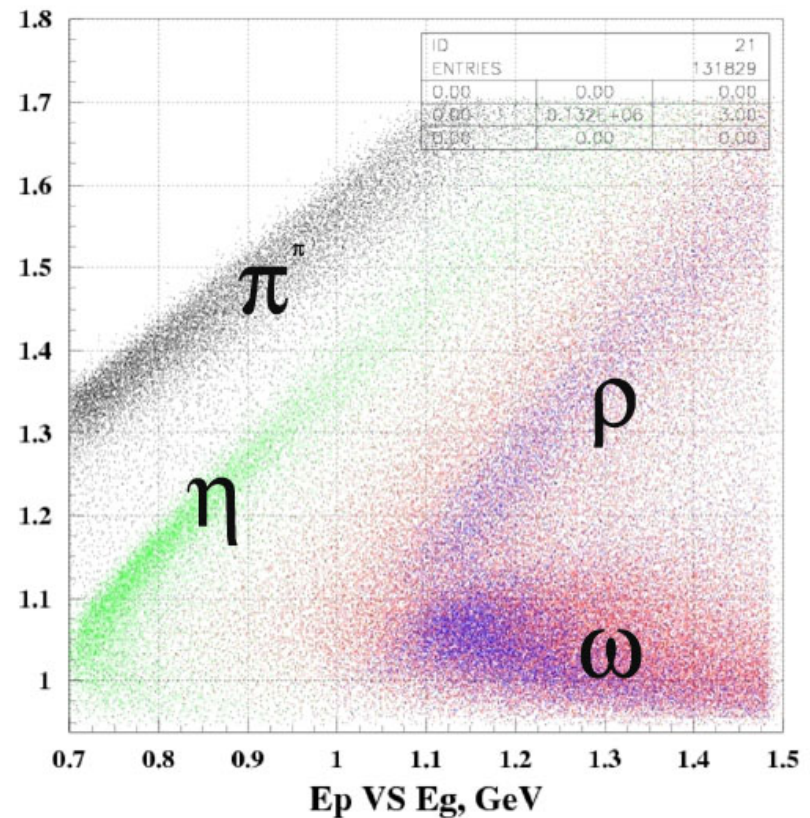
Моделирование показало, что в  
области кинематических  
переменных нуклонов отдачи  
существует четкая корреляция :

ядро N-14

$$\theta_p = 2^\circ - 10^\circ$$

Включено многократное  
( $n \leq 4$ ) рождение мезонов

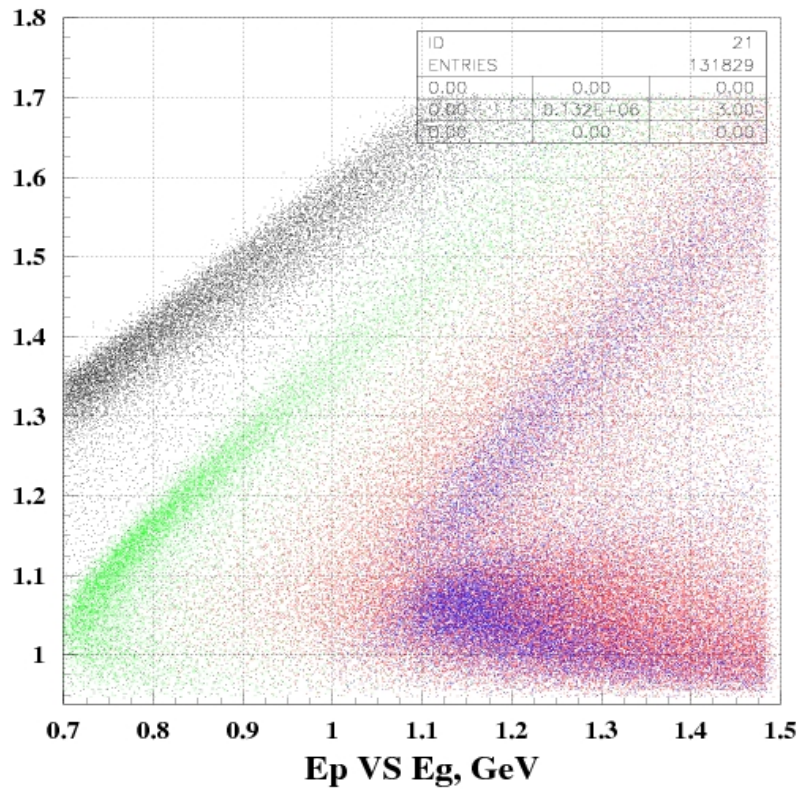
[I.Pshenichnov e.a. Moscow, EMIN-2001, p.170]



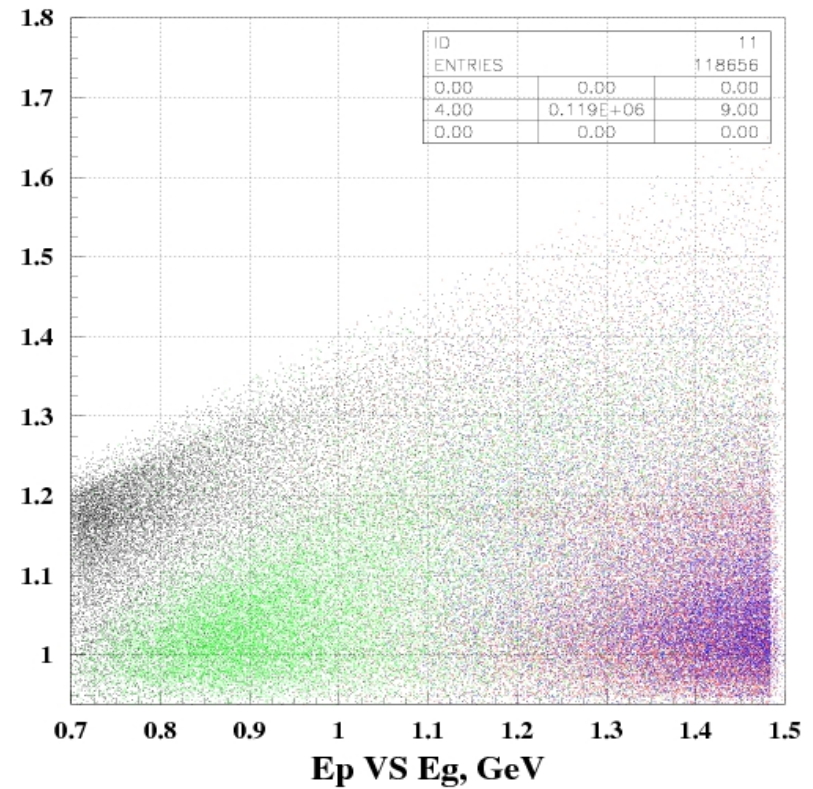
gamma+p --> pi0+p  
 gamma+n --> pi-+p  
 gamma+p --> rho0+p  
 gamma+n --> rho-+p  
 gamma+p --> eta+p  
 gamma+p --> omega+p

Simulation for  $^2\text{D}$  target при разных фиксированных углах вылета

$2 < \theta < 10$



$30 < \theta < 40$

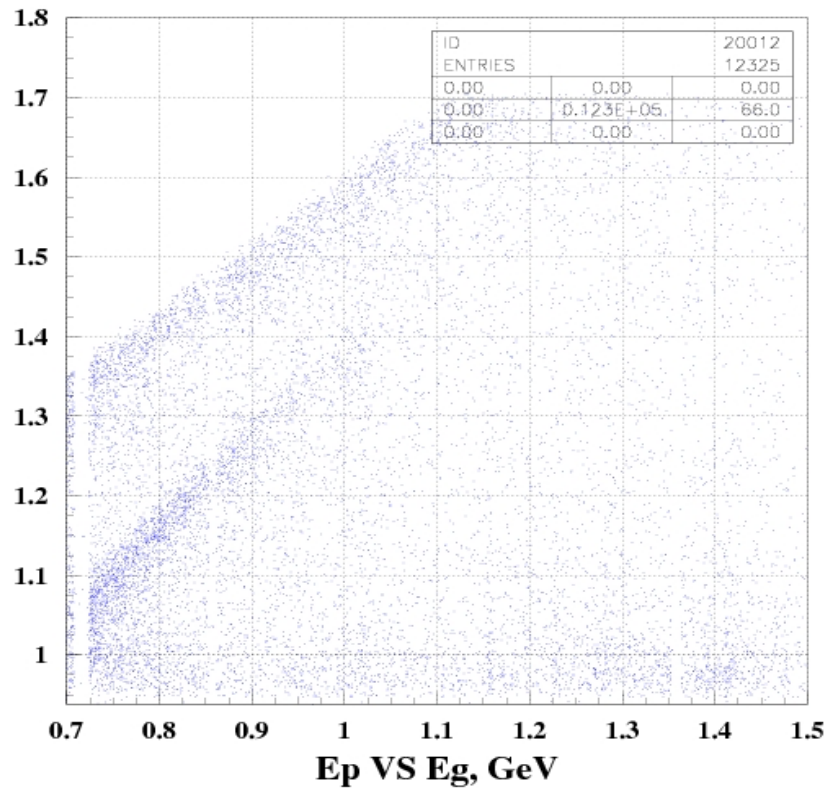
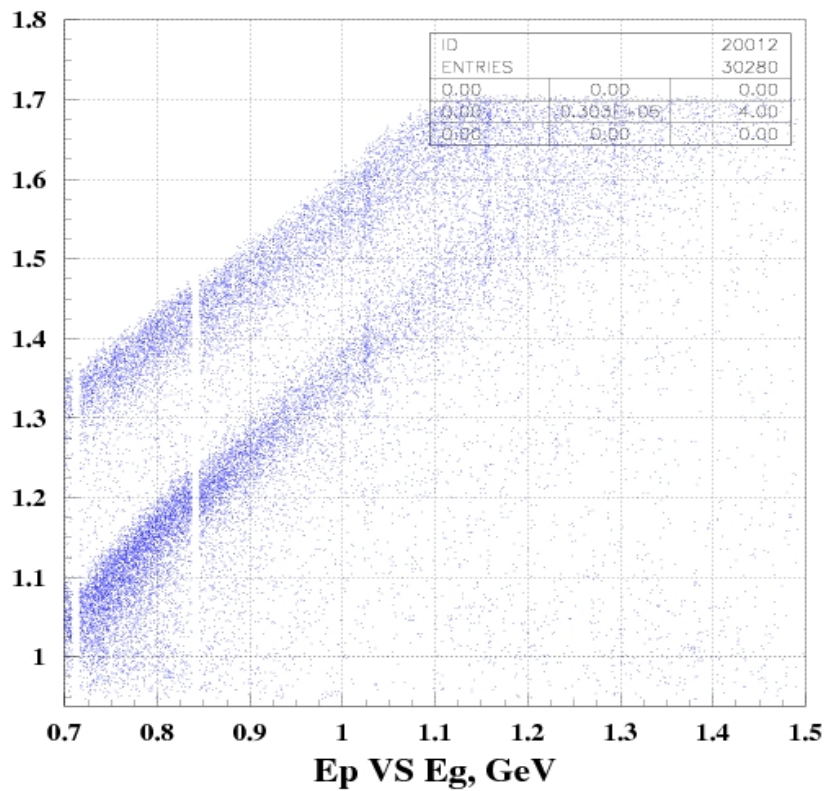


Первые экспериментальные данные :  
Разделение пионов и эта - мезонов по нуклонам отдачи из дейтронной мишени

simulation

$$\Theta < 10^0$$

GRAAL experiment  
**Kinematics is not included**





# BGO-OD at ELSA

Principal improvement as compared with GRAAL can be done due to the magnetic spectrometer placed downstream of the target to distinguish protons, deuterons and other charge fragments.

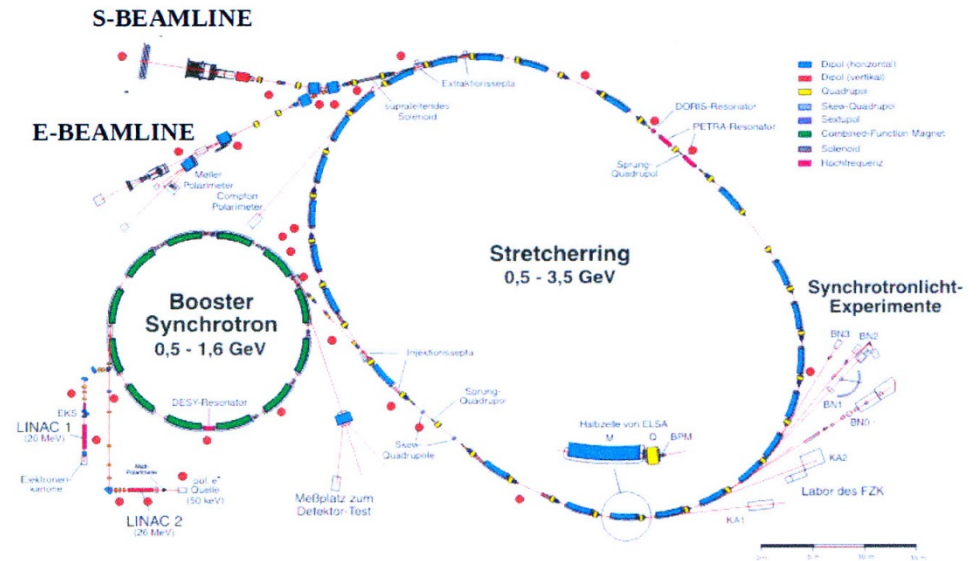
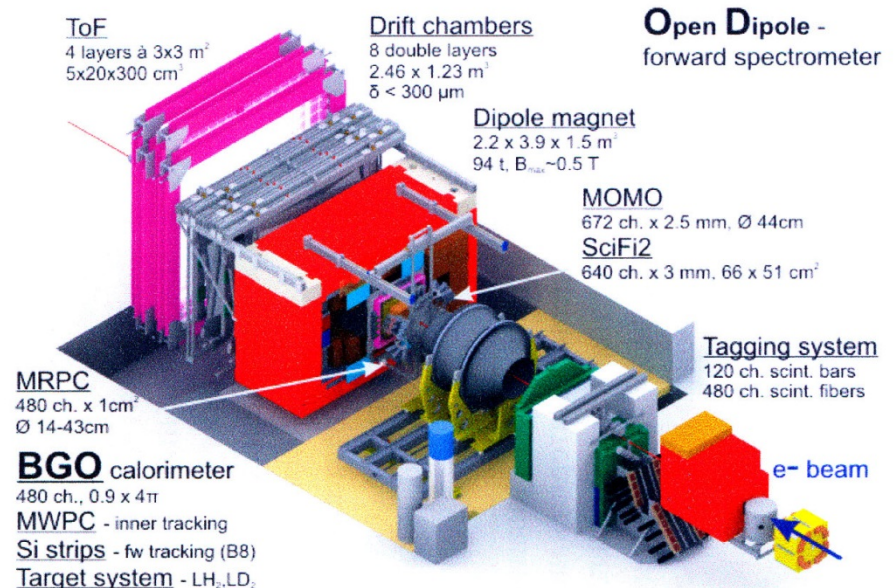


Figure 1. Elsa Facility.



# Заключение

Новые экспериментальные методы позволяют решать новые задачи:

Идентификация мезонов, нуклонов и ядерных фрагментов в большом телесном угле дает информацию о природе взаимодействий этих частиц с ядерной средой. Фотонные пучки предпочтительны для решения этой задачи.

Можно экспериментально изучать события, когда мезон поглощается или рассеивается ядром и смотреть продукты его взаимодействия с ядерной средой методом мечения мезонов.

Активная мишень – новые методические подходы