

Фоторождение мезонов на ядрах: НОВЫЕ МЕТОДЫ

*А.С.Игнатов, В.Г.Недорезов,
Институт ядерных исследований РАН*

Введение

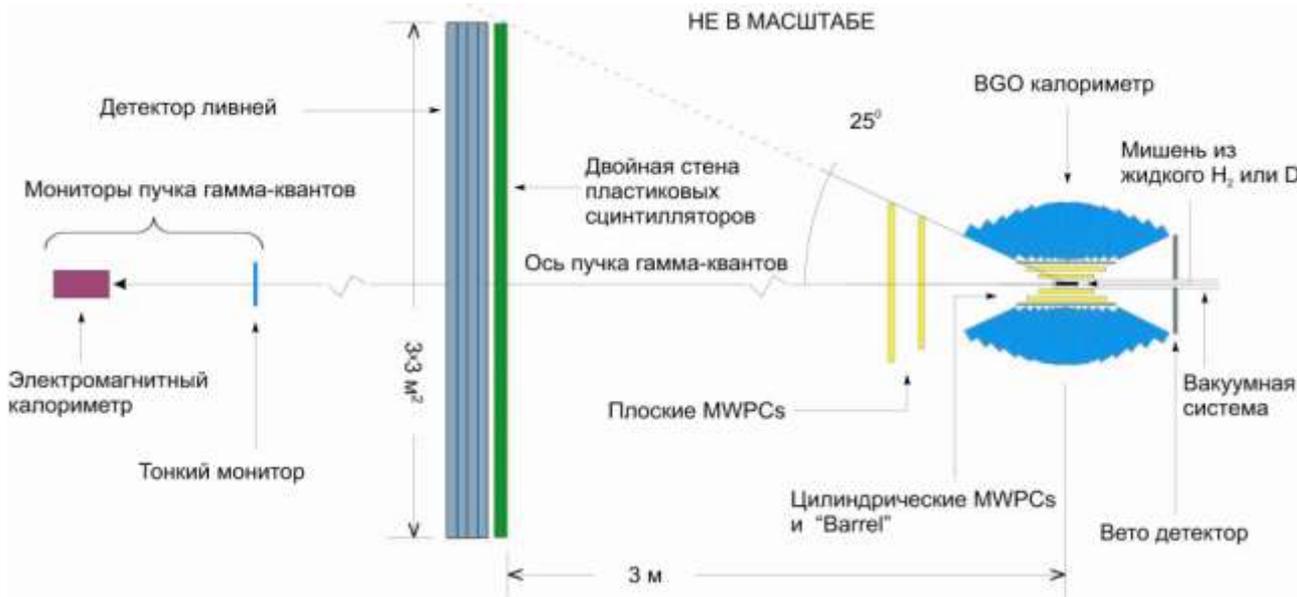
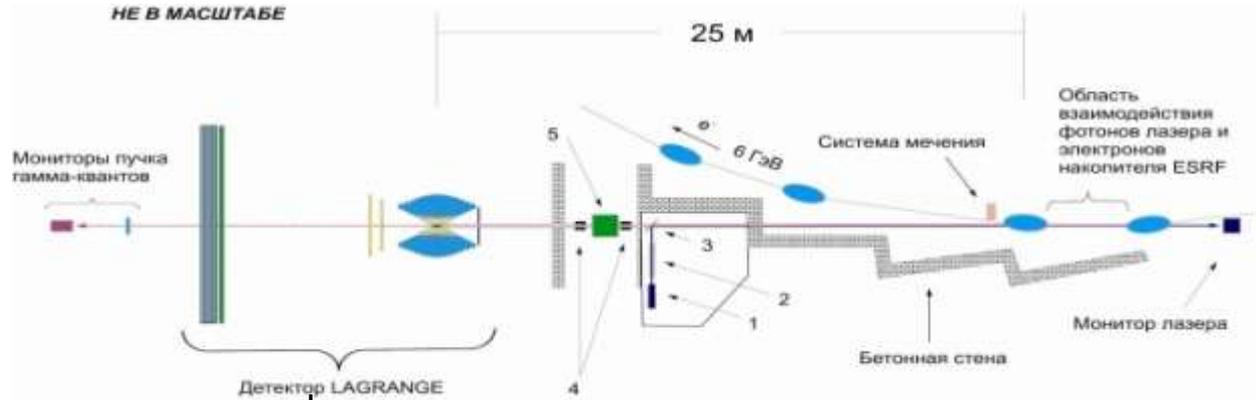
- Изучение взаимодействия нестабильных мезонов с ядрами («Меченые мезоны»)
- Безмодельный учет Ферми движения нуклонов в ядре при измерении сечений фоторождения мезонов
- Полное сечение фотопоглощения на нейтроне

Установка GRAAL

Пучок гамма-квантов:

- Обратное комптоновское рассеяние
- $E_\gamma = 0.5 - 1.5$ ГэВ

жесткий спектр, $\Delta E_\gamma = 16$ МэВ
 Низкий уровень фона
 Высокая степень поляризации

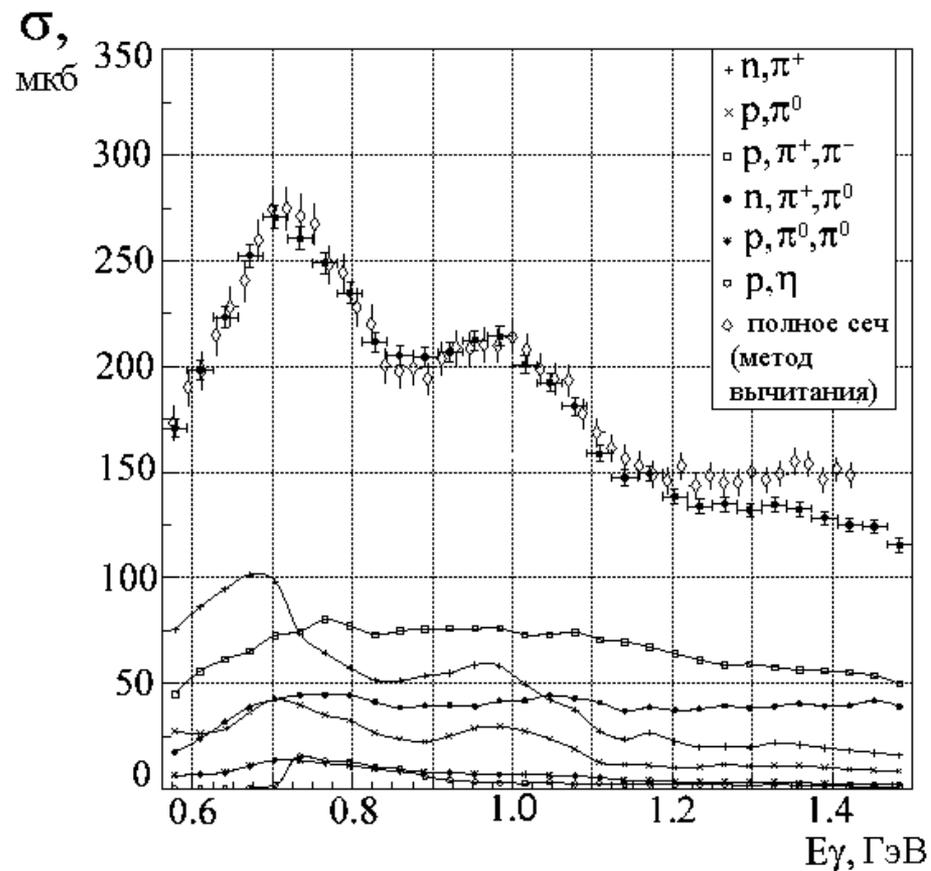


Детектор LAGRANuE:

- $\Delta\Omega \approx 3.8\pi$
- Регистрация заряженных частиц: эфф. ~100%, θ , ϕ , $\Delta E/E$ и TOF.
- Регистрация γ -квантов: эфф. ~100%, θ , ϕ и E .
- Регистрация нейтронов: θ , ϕ и TOF

Полное сечение фотопоглощения на протоне

О.Барталини и др.
GRAAL – collaboration
ЯФ (2008)



Эффективность регистрации нейтронов в ВГО-калориметре

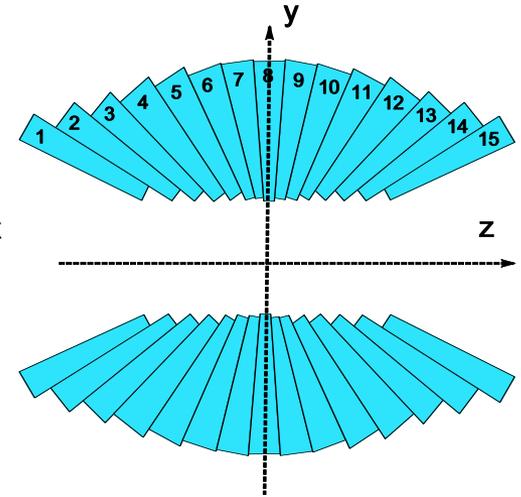
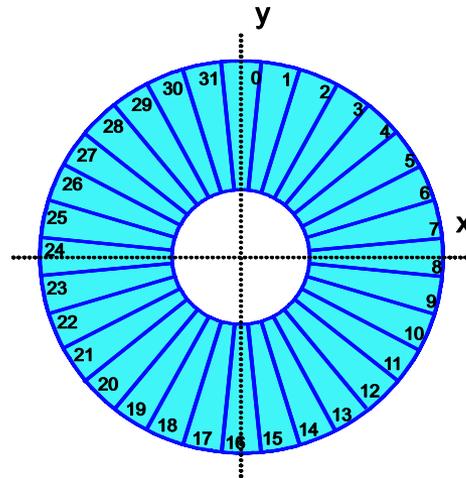
- ВГО-калориметр:

15 32=480 кристаллов ВГО,

$25^{\circ} < \theta < 155^{\circ}$, $0^{\circ} < \varphi < 180^{\circ}$,

$L_{\text{ВГО}} = 24 \text{ см}$ ($\sim 21 \text{ r.l.}$)

$E_{\gamma} < 2 \text{ ГэВ}$.



- Использовалась реакция: $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$,

- Эффективность регистрации

- где N_n – число событий с регистрацией нейтрона,
 N_{tot} – число «помеченных» нейтронов.

$$\varepsilon = \frac{N_n}{N_{\text{tot}}}$$

Эффективность регистрации нейтронов в BGO-калориметре

- Работы, выполненные ранее для сцинтилляторов BGO:
 - $E_n = 0.4 - 4.7$ МэВ, *H. Vincke et al., Nucl. Instr. and Meth. A 484, 102 (2002)*.
 - GEANT/FLUKA верно моделируют интегральную нейтронную эффективность.
 - $E_n = 15 - 45$ МэВ, *S. Kubota et al., Nucl. Instr. and Meth. A 285, 436 (1989)*.
 - При $E_n = 45$ МэВ и пороге ~ 10 МэВ эффективность $\approx 0.008 \text{ см}^{-1}$ (≈ 0.19 при $L = 24$ см).
 - В данной работе $E_n = 80 - 650$ МэВ.
- Проблемы регистрации нейтронов:
 - γ/e^- ($E > 5$ МэВ) \Rightarrow э.м. ливень \Rightarrow амплитуда на выходе ФЭУ однозначно связана с ΔE .
 - адроны \Rightarrow ионизация + ядерные взаимодействия \Rightarrow связь амплитуды импульса и ΔE через формулу Бете-Блоха.
 - **нейтрон** \Rightarrow ядерные взаимодействия \Rightarrow амплитуда импульса зависит от типов произошедших взаимодействий.
- Для корректного моделирования требуются нейтронные сечения и функция световыхода BGO.
- Необходима экспериментальная проверка эффективности регистрации нейтронов при различных энергетических порогах.

Эффективность регистрации нейтронов в BGO-калориметре

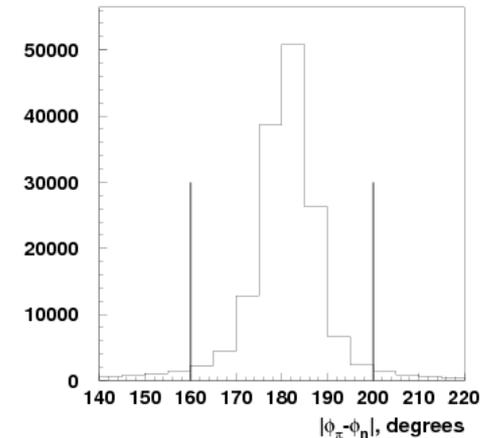
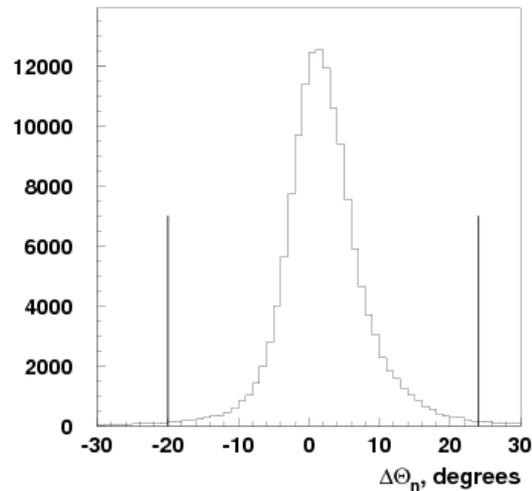
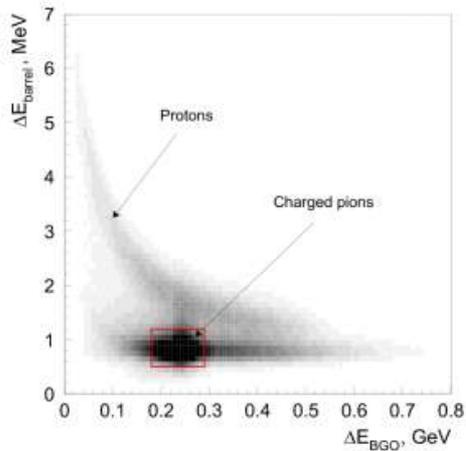
Отбор событий с регистрацией нейтрона:

- =1 «заряженных» кластеров, ≥ 1 «нейтральных» кластеров в BGO-калориметре,

- $\Delta E_{\text{barrel}} \text{ vs } \Delta E_{\text{BGO}} \Rightarrow$ отбираются π ,

- Кинематика $\gamma p \rightarrow \pi^+ n \Rightarrow$ отбираются нейтроны: $\Delta\theta_n = \theta_n(\text{exp}) - \theta_n(\text{calc})$ и $\Delta\phi = |\phi_\pi - \phi_n|$,

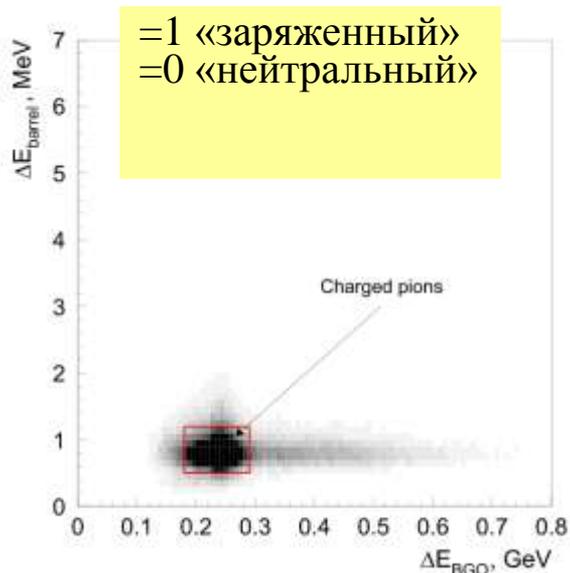
где $\theta_n(\text{exp})$ и $\theta_n(\text{calc})$ – измеренный в BGO-детекторе и рассчитанный из $\theta_\pi(\text{exp})$ полярный угол вылета нейтрона; ϕ_π и ϕ_n – измеренные азимутальные углы π^+ и нейтрона.



Эффективность регистрации нейтронов в BGO-калориметре

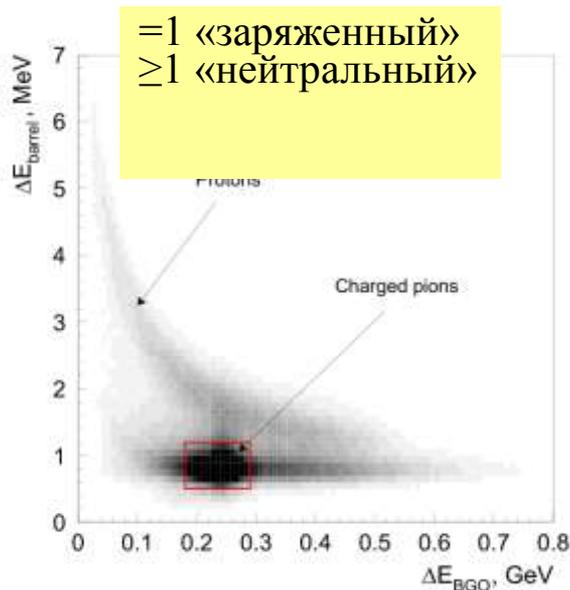
Отбор событий без регистрации нейтрона:

1)



- только π^+ из $\gamma+p \rightarrow \pi^+ + n$
- вклад других каналов < 0.5% (моделирование)

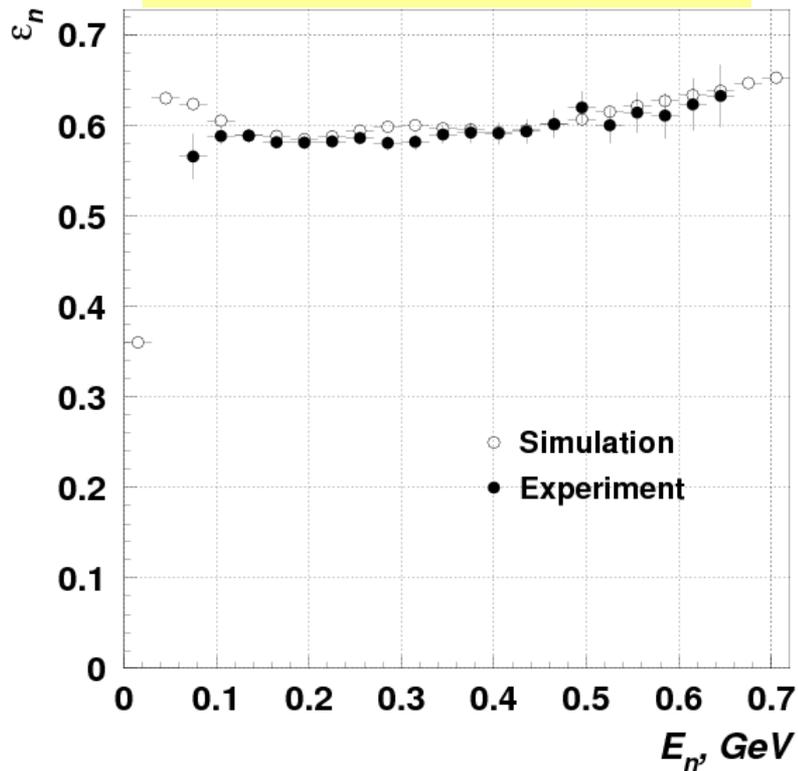
2)



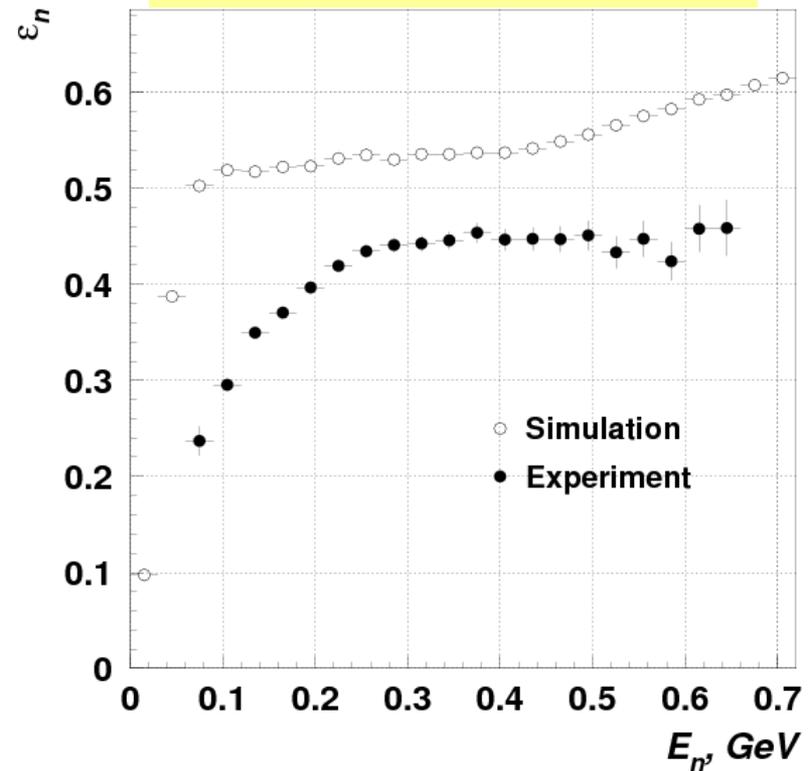
- вклад других каналов ~2% (моделирование)
- потеря полезных событий ~1% (моделирование)

Эффективность регистрации нейтронов в BGO-калориметре [O.Bartalini e.a. NIM (2003)]

Порог регистрации 2 МэВ



Порог регистрации 20 МэВ



Фоторождение η -мезонов на дейтроне

- Отбор событий:

$\forall \gamma+d \rightarrow \eta+p+n_{sp}$ и $\gamma+d \rightarrow \eta+n+p_{sp}$ (sp – spectator),

$\forall \eta \rightarrow \gamma\gamma$ в BGO-калориметре, p или n в центральном или переднем направлениях,

- Идентификация мезонов:

$$M_{\eta} = \sqrt{(E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2})^2 - (\vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2})^2} = \sqrt{2E_{\gamma_1} E_{\gamma_2} \sqrt{1 - \cos\theta_{\gamma_1} \cos\theta_{\gamma_2} - \sin\theta_{\gamma_1} \sin\theta_{\gamma_2} \cos(\varphi_{\gamma_1} - \varphi_{\gamma_2})}}$$

- Идентификация мезонов:

$$\Delta E_{\eta} = E_{\eta}^{цм}(E_{\gamma}, M_{\eta}, M_N) - E_{\eta}^{цм}(E_{\eta}^{лаб}, \vartheta_{\eta}, \varphi_{\eta}),$$

$$\Delta E_N = E_N^{цм}(E_{\gamma}, M_{\eta}, M_N) - E_N^{цм}(E_N^{лаб}, \vartheta_N, \varphi_N)$$

расчёт

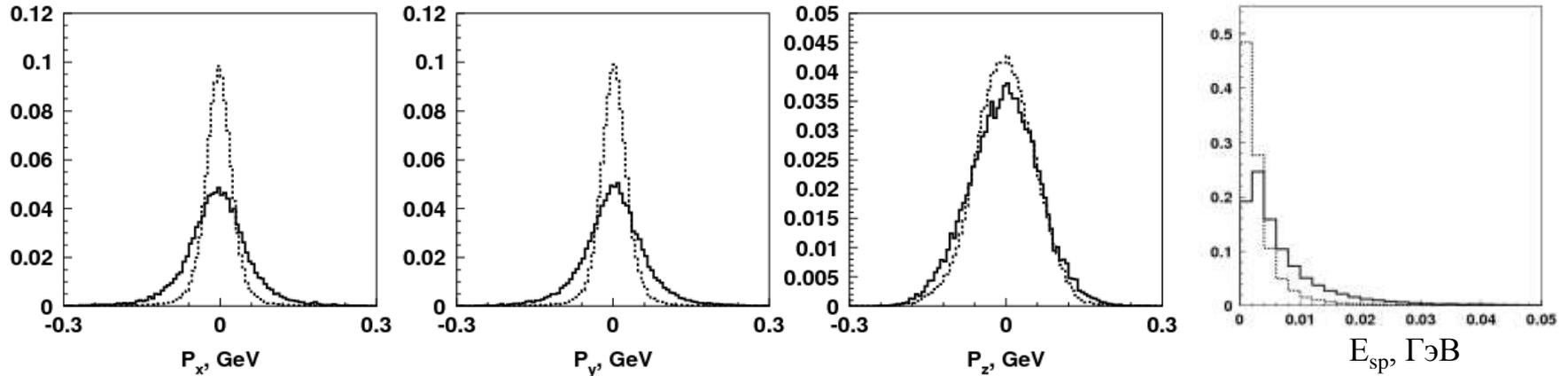
измерения

$$\Delta\theta_N = \theta_N(E_{\gamma}, \vec{p}_{\eta}) - \theta_N^{изм}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_N^{изм} - \varphi_{\eta}^{изм}$$

Фоторождение η -мезонов на дейтроне

Коррекция E_γ и θ^{cm} с учётом ферми-импульса нуклона мишени:



— квази-свободный протон

----- свободный протон

Коррекция θ^{cm}

$$\cos \theta_\eta^{cm} = \frac{(\vec{p}_\eta^{cm})_z^{corr}}{|(\vec{p}_\eta^{cm})^{corr}|},$$

$$(\vec{p}_\eta^{cm})^{corr} = \gamma_{cm}(\vec{p}_N - \vec{\beta}_{cm} E_N),$$

$$\vec{\beta}_{cm} = \frac{\vec{p}_\gamma + \vec{p}_F}{E_\gamma + E_{sp}},$$

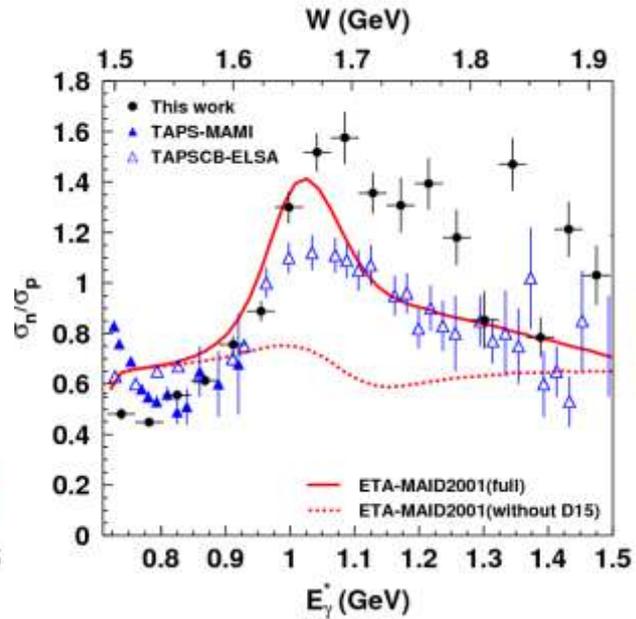
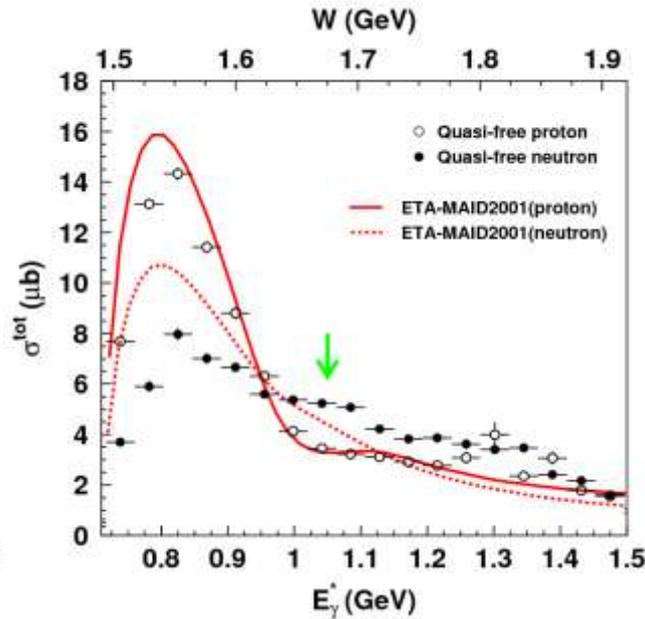
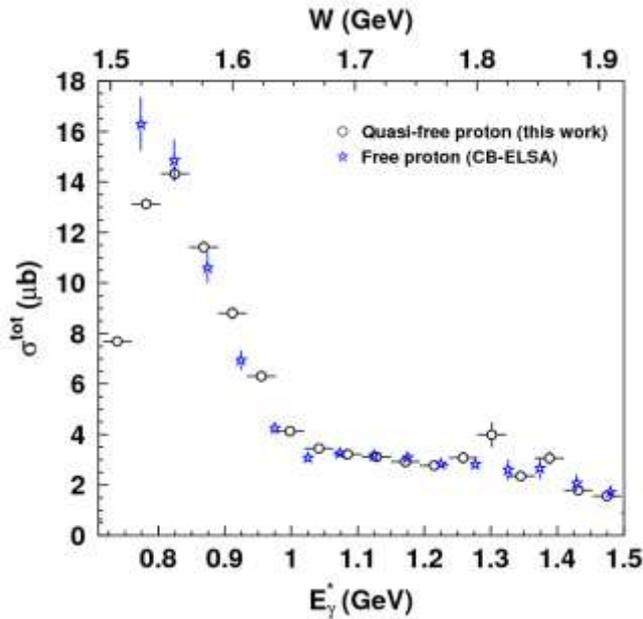
$$\gamma_{cm} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_{cm}^2}}.$$

Вычисление эффективной E_γ

$$W^2 = (E_\eta + E_N)^2 - (\vec{p}_\eta + \vec{p}_N)^2,$$

$$E_\gamma^* = \frac{W^2 - m_N^2}{2m_N}.$$

Фоторождение η -мезонов на дейтроне



— ETA-MAID2001, $\gamma+p \rightarrow \eta+p$

- - - ETA-MAID2001, $\gamma+n \rightarrow \eta+n$

\star $\gamma+p \rightarrow \eta+p$, *CB@ELSA, V. Credé et al. Phys. Rev. Lett. 94, 012004 (2005)*

$\gamma+d \rightarrow \eta+p+n_{\text{sp}}$, *GRAAL EMIN-2006*

\bullet $\gamma+d \rightarrow \eta+n+p_{\text{sp}}$, *GRAAL EMIN-2006*

— ETA-MAID2001, полная модель, включающая $D_{15}(1675)$ с $\Gamma_{\eta N}/\Gamma_{\text{tot}}=17\%$

- - - ETA-MAID2001, без $D_{15}(1675)$

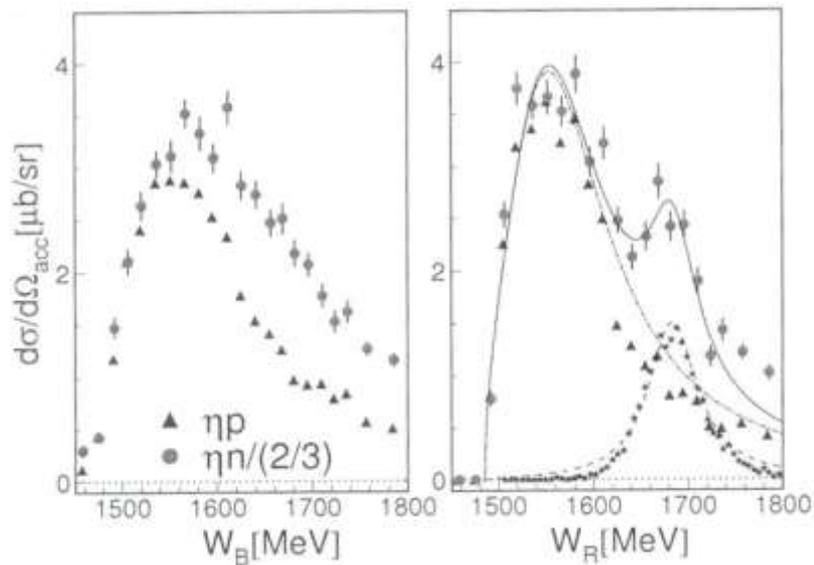
\bullet *GRAAL EMIN-2006*

Δ *TAPSCB@ELSA, I. Jeaglé, NSTAR2005*

TAPS@MAMI, J. Weiß et al., EPJ A16 275, 2003

➤ Модель ETA-MAID2001 качественно описывает зависимость σ_n/σ_p от E_{γ}

Quasi-free photoproduction of η -mesons off the neutron
 I.Jaegle e.a CBELSA/TAPS arHiv:0804.4841v1 [nucl-ex] 30 Apr 2008
 дейтронная мишень



Инвариантная масса:

W_B - по начальной энергии фотонов

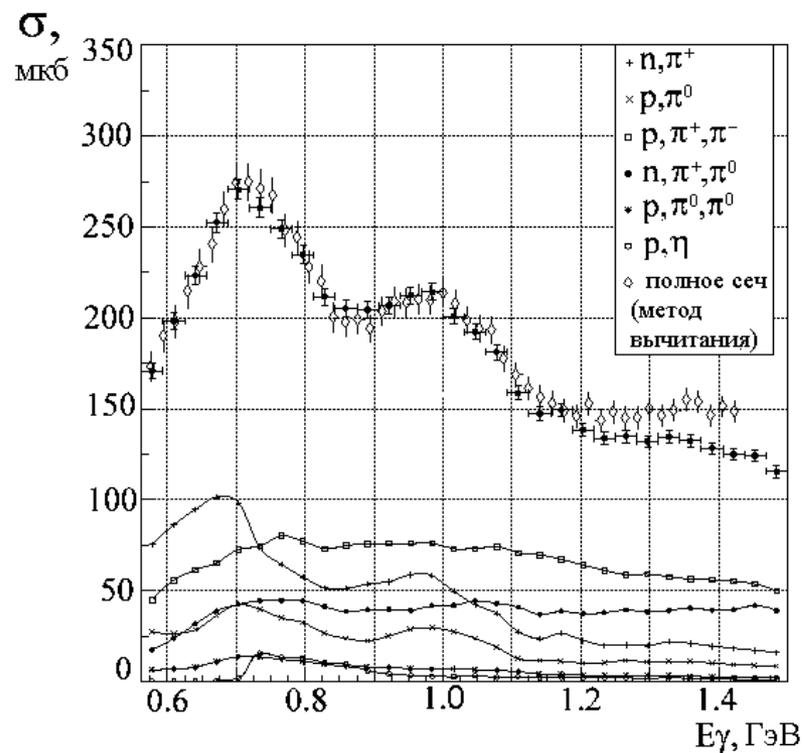
W_R – по энергии конечных частиц с поправкой на Ферми движение в каждом событии ($n + \eta (3\pi^0)$)

$S_{11}(1566)$; $\Gamma = 162$ МэВ

???? ; $\Gamma = 60$ МэВ (верхний предел)

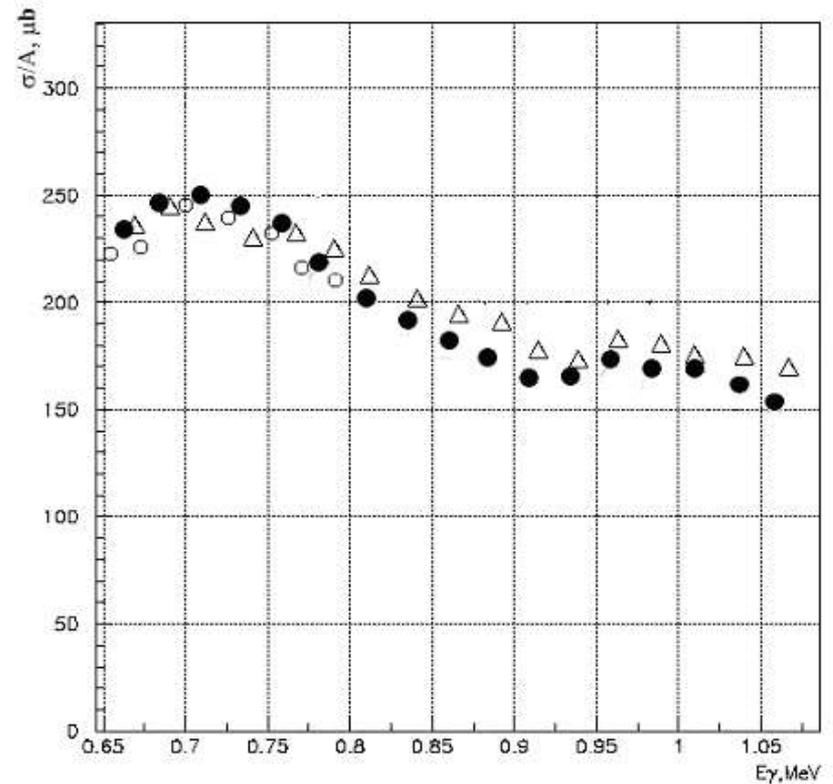
Актуальная задача: измерение полного сечения фотопоглощения на нейтроне с учетом Ферми модельно независимым способом

- p, π^-
- n, π^0
- $p, \pi^- \pi^0$
- $n, \pi^0 \pi^0$
- n, η

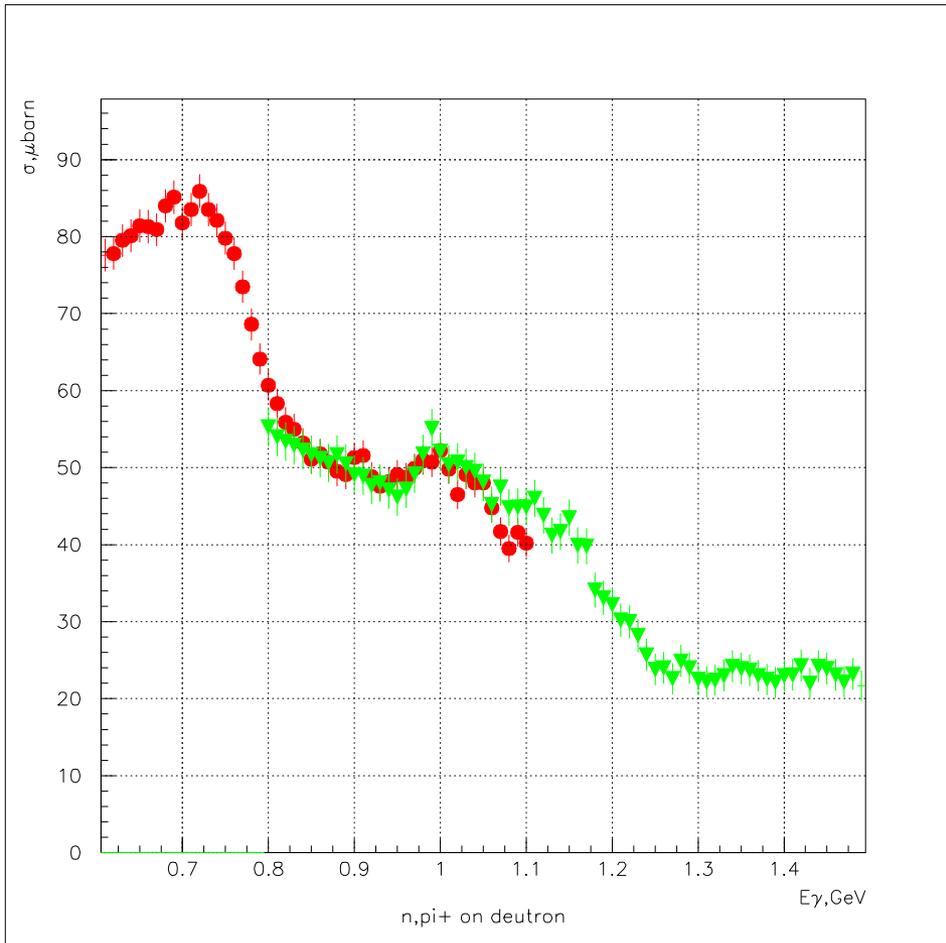


Полное сечение фотопоглощения на нейтроне

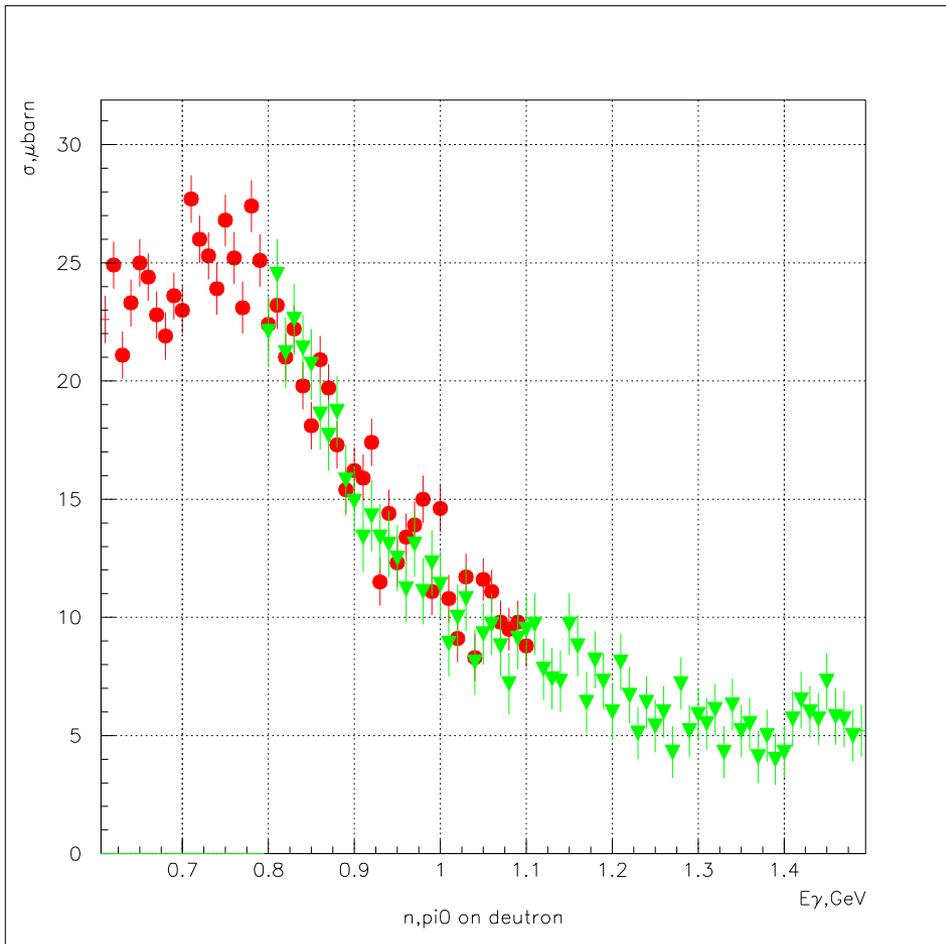
- Mainz - кружки
- Armstrong - треугольники
- GRAAL – сплошные кружки (EMIN-2003)
- Точность не более 10%
- D_{13} резонанс практически не виден



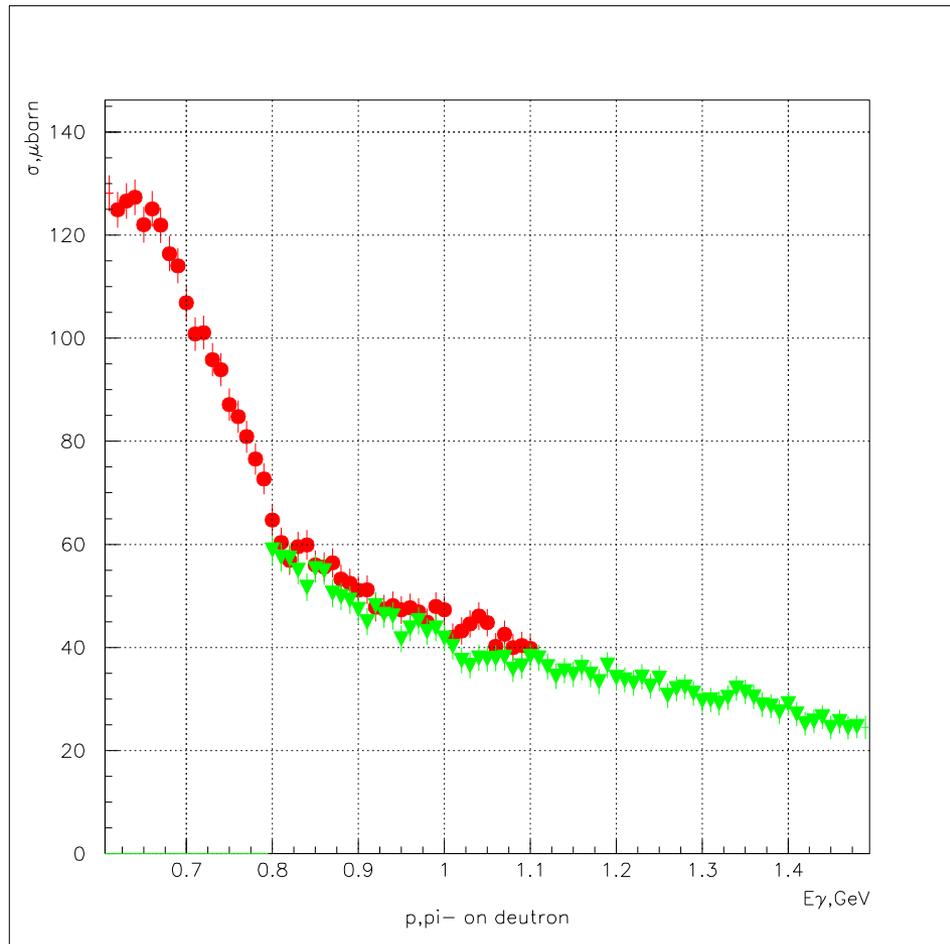
n, π^0



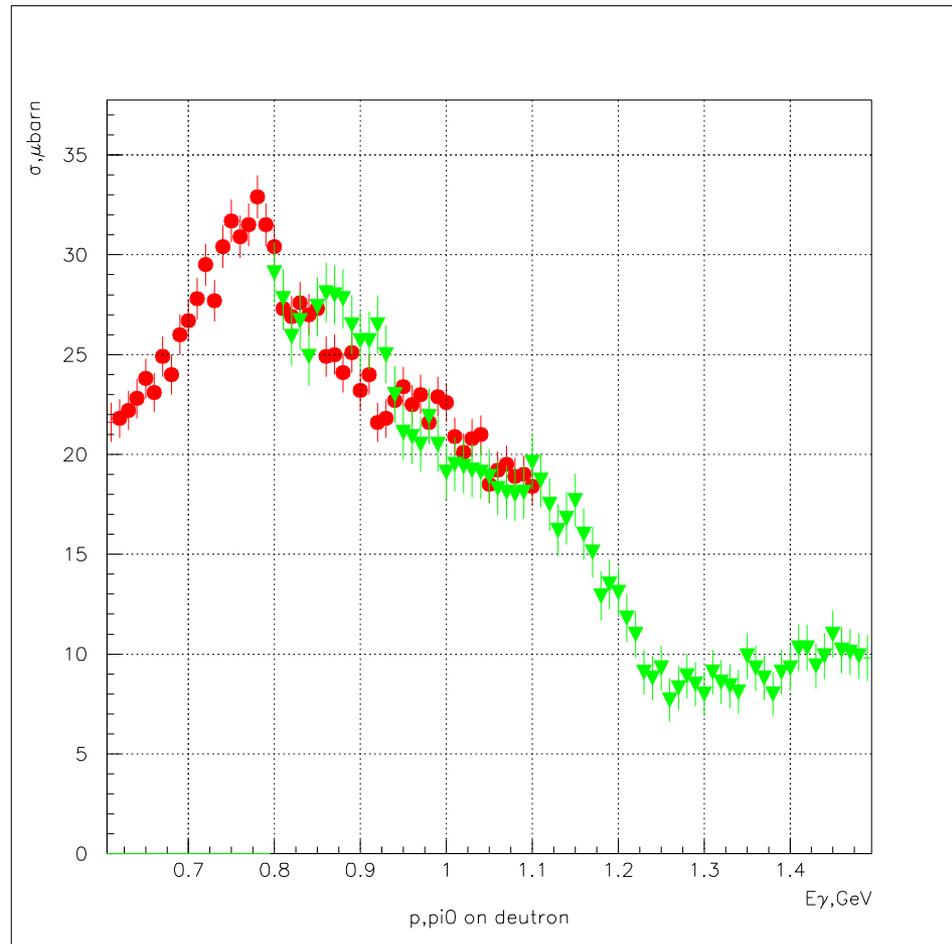
n, π^0



ρ, π^-



ρ, π^0

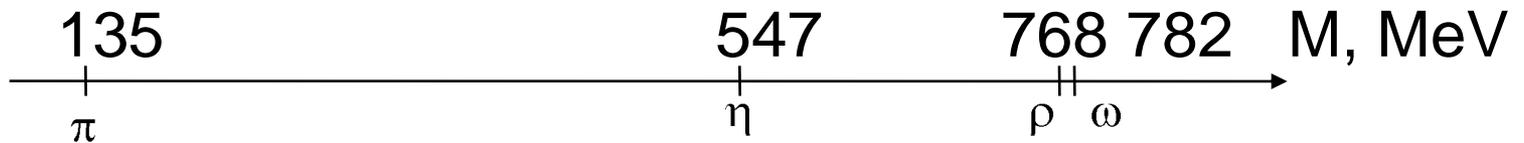
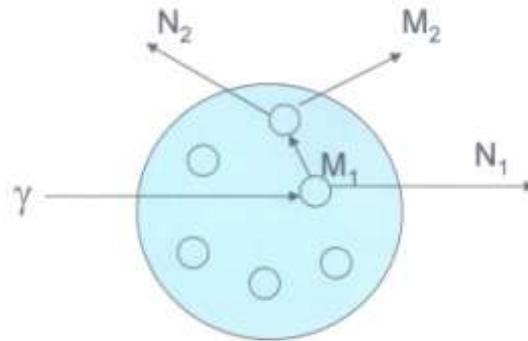


Фоторождение мезонов на легких ядрах

Мечение мезонов

Корреляционный анализ нуклонов отдачи

[Москва, EMIN-2001, p.170]



- Ядро – сумма квазисвободных нуклонов
- 4 π детектор + полная кинематика
- Низкий уровень фона

Прохождение мезонов и нуклонов в ядерной среде:

INC – Intra - Nuclear Cascade

[Moscow, EMIN-2001, p.170]

Вероятность вторичных взаимодействий мезонов с внутриядерными нуклонами :

$$w(k) = (\sigma\rho l)^k/k! \exp(-\sigma\rho l),$$

где σ – сечение, ρ – ядерная плотность (0.17 Fm^{-3}), l – длина свободного пробега.

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

Для медленных η –мезонов $\sigma = 150 \text{ mb}$.

Время жизни нестабильных мезонов зависит от скорости; для медленных η – мезонов средняя длина пробега $l = 3 \text{ Fm}$.

Вероятности каскадных взаимодействий в рамках модели INC

[Москва, EMIN-2001, p.170]

Table 1: Particle emission probability from nucleus ^{14}N on different steps of reaction initiated by photoproduction of π^0 and η 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
π^0	1	80	0
η	1	0	70
p	2	22.0	20.8
n	2	23.7	22.1
π^0	2	8.7	8.6
π^+	2	8.67	9.1
π^-	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

Моделирование фоторождения мезонов на ядре 14-N

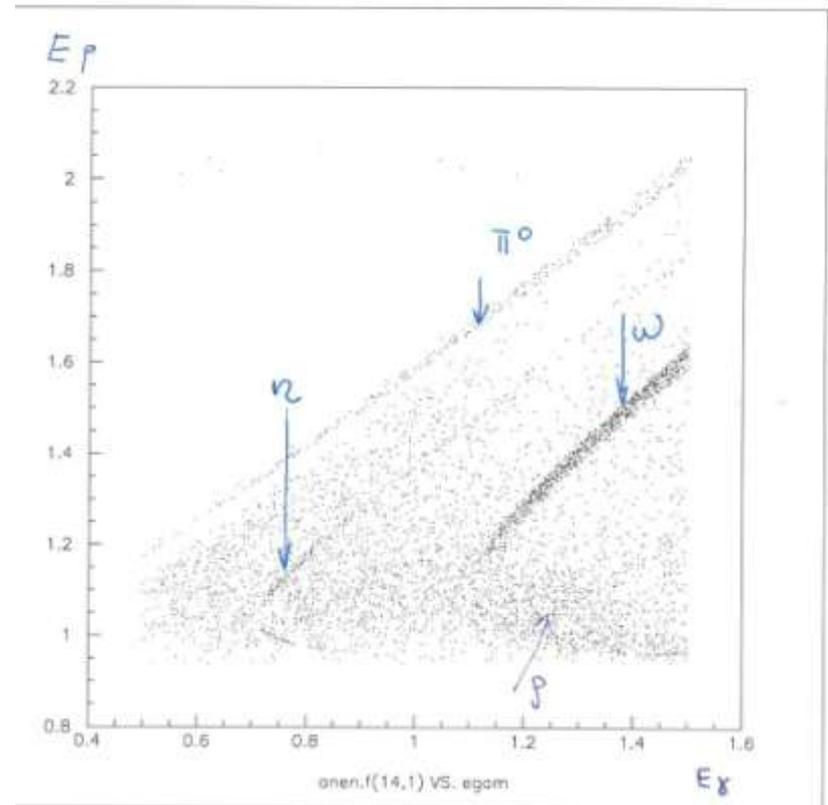
$(\theta_p = 2^\circ - 10^\circ);$

в рамках LAGGEN+INC

реакции множественного рождения мезонов (1-4) включены

Корреляции между энергией падающего фотона и энергией первичного каскадного протона

[Moscow, EMIN-2001, p.170]

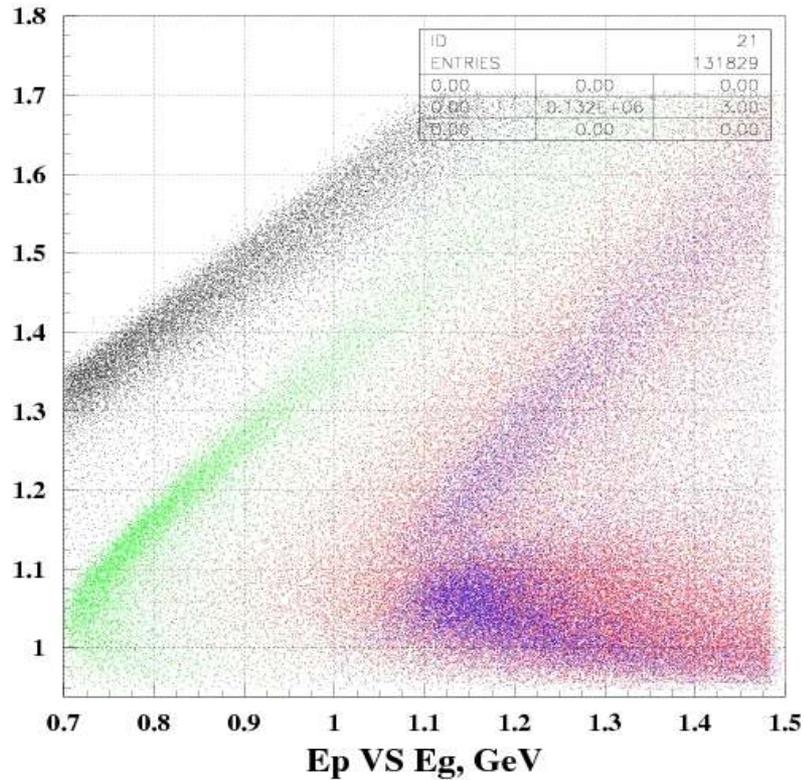


Simulation: ^2D target

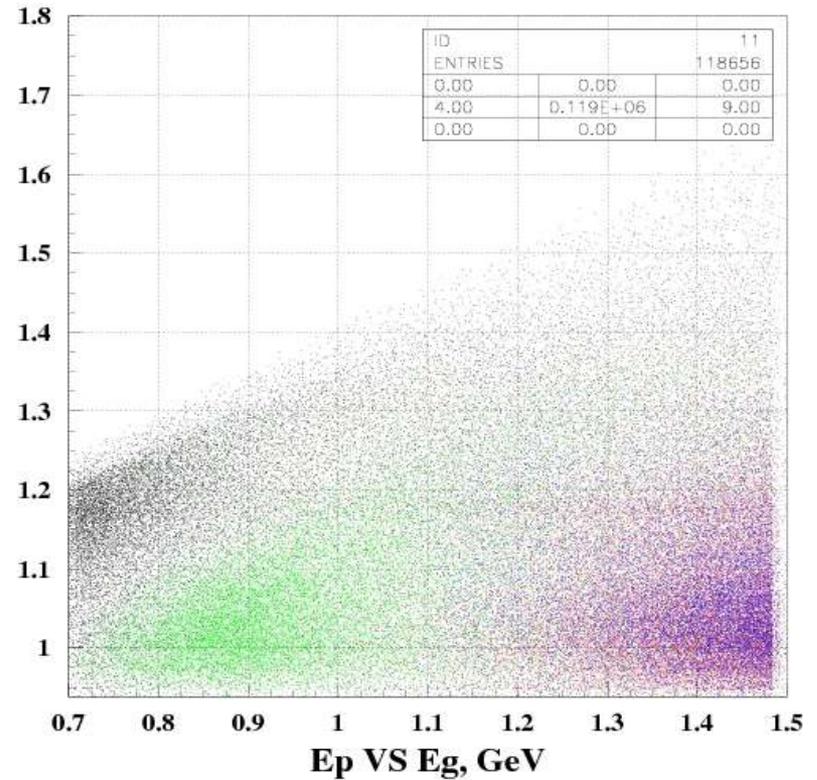
gamma+p --> pi0+p
gamma+n --> pi-+p
gamma+p --> rho0+p
gamma+n --> rho-+p
gamma+p --> eta+p
gamma+p --> omega+p

Number of the charged tracks in forward ≥ 1

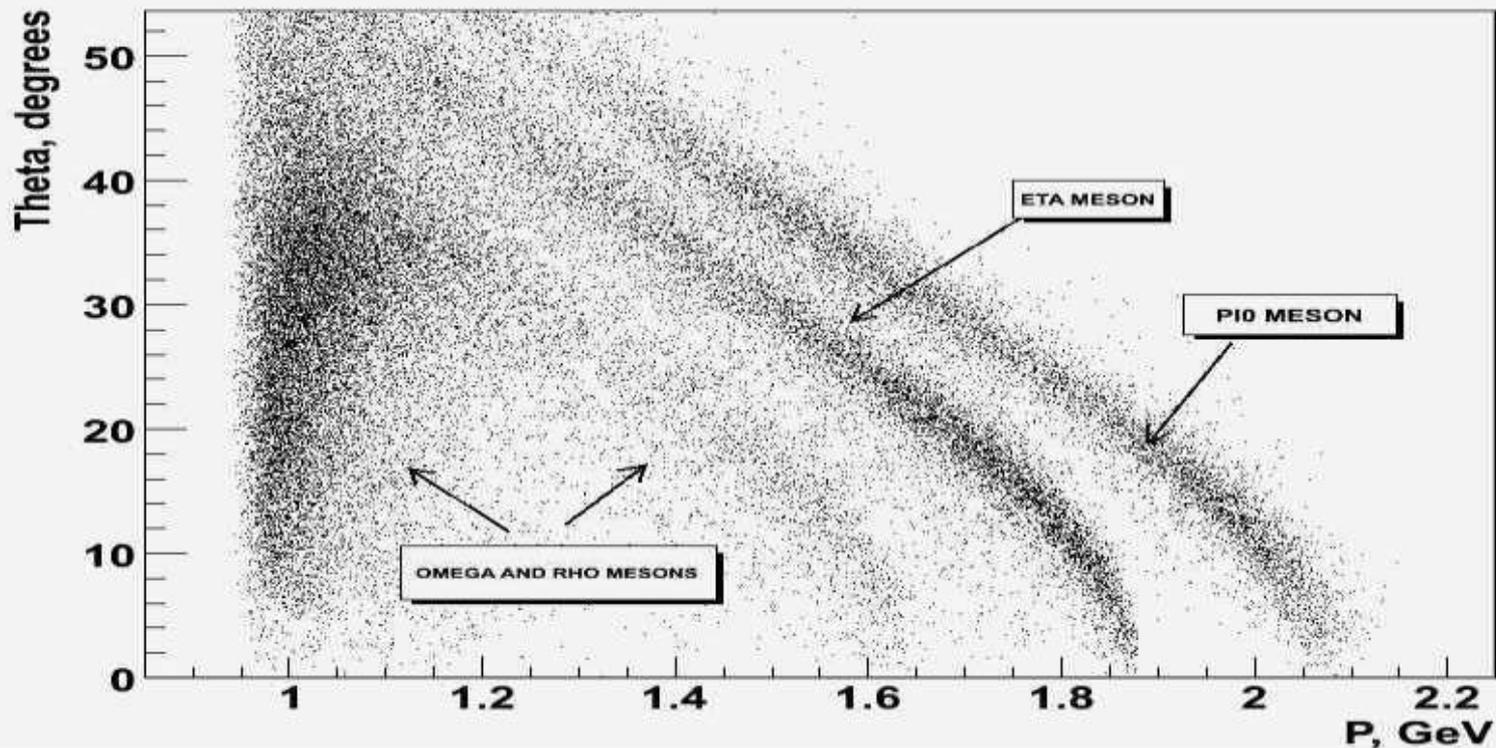
$2 < \theta < 10$



$30 < \theta < 40$



Моделирование фоторождения мезонов на ядре 14-N
в рамках LAGGEN+INC
реакции множественного рождения мезонов (1-4) включены
($E_\gamma = 1.4 - 1.5$ GeV);

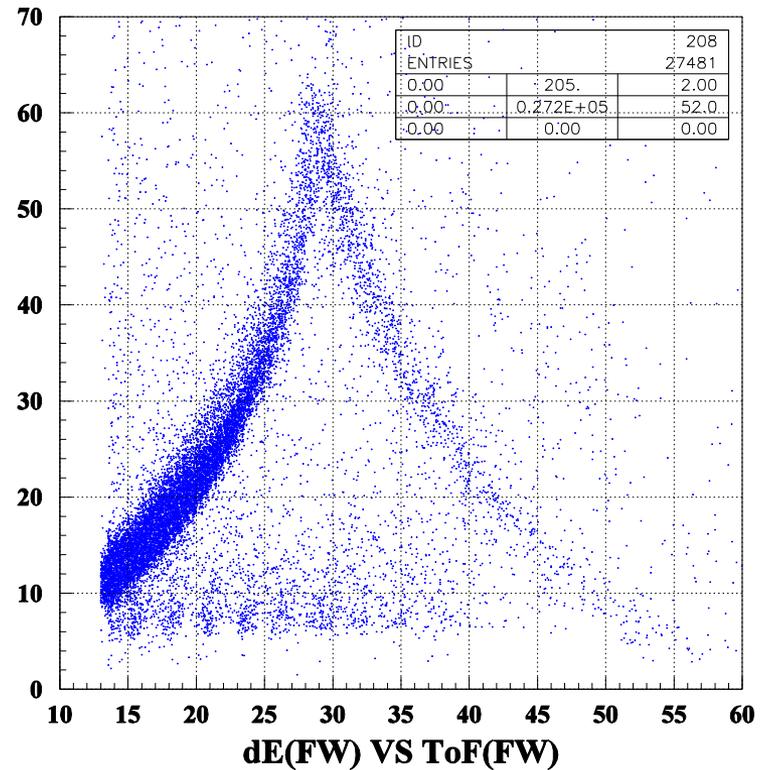
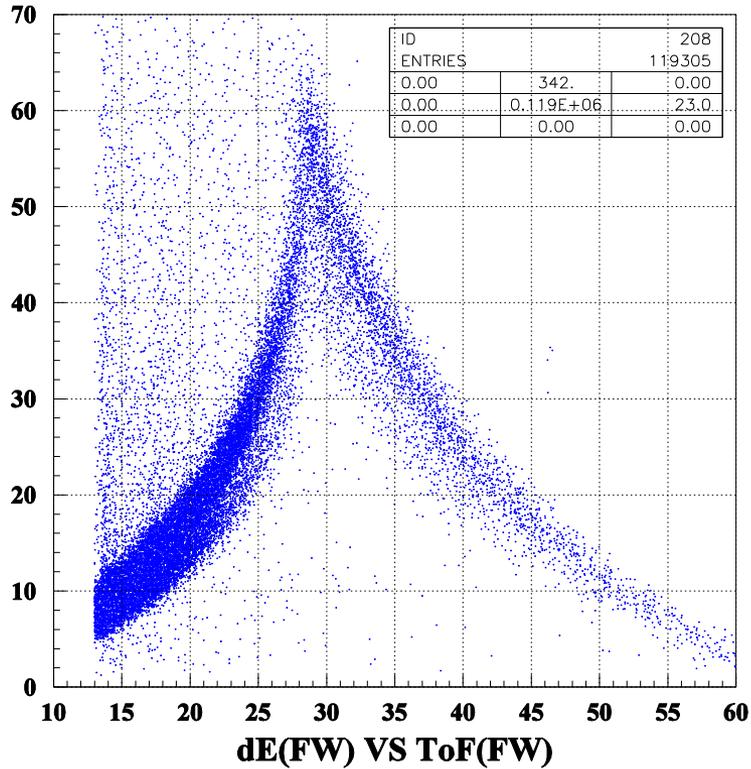


Корреляции между импульсом и углом вылета для первичного протона отдачи

Дейтронная мишень, $E_\gamma = 900-920$ MeV, $\theta \leq 25^\circ$, $N_{\text{charge tracks}} \geq 1$,

моделирование

эксперимент
(GRAAL)

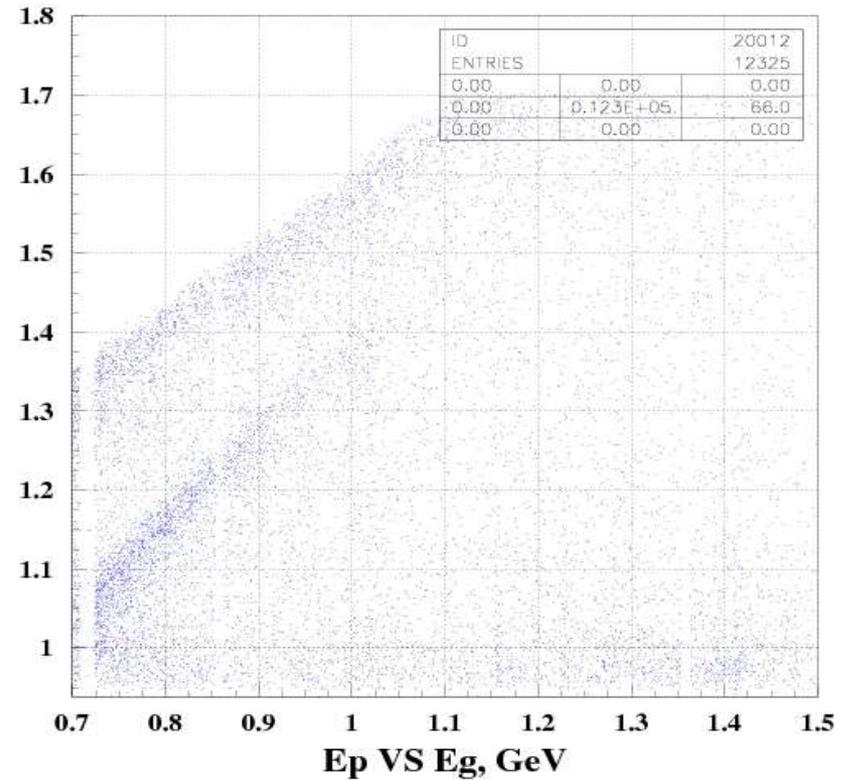
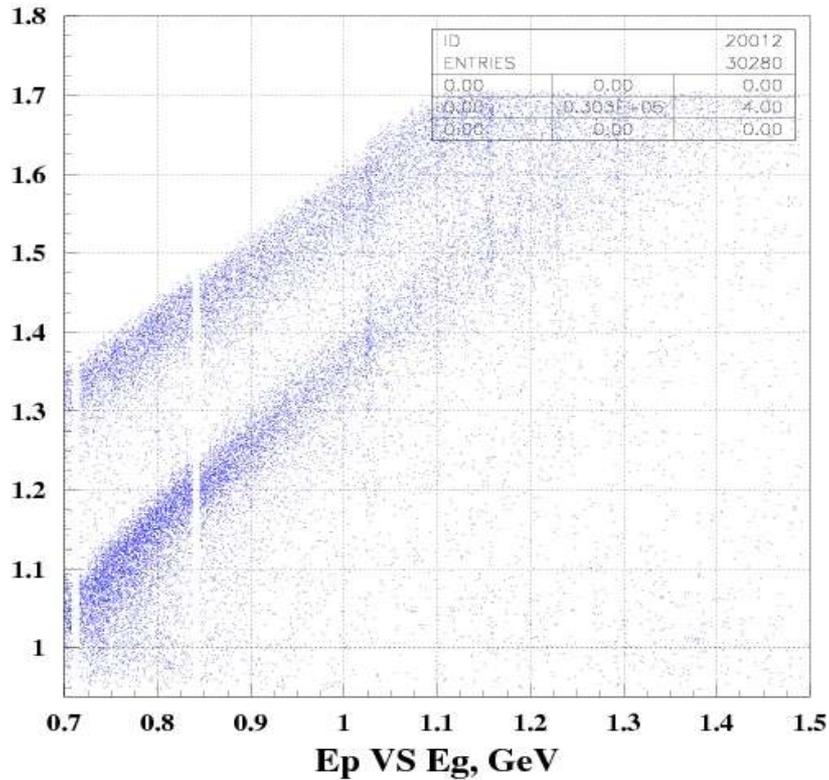


Number of the charged tracks in forward = 1
Number of the neutral clusters in BGO = 2

$$2^0 < \theta < 10^0$$

simulation

Experiment
Kinematics is not
included

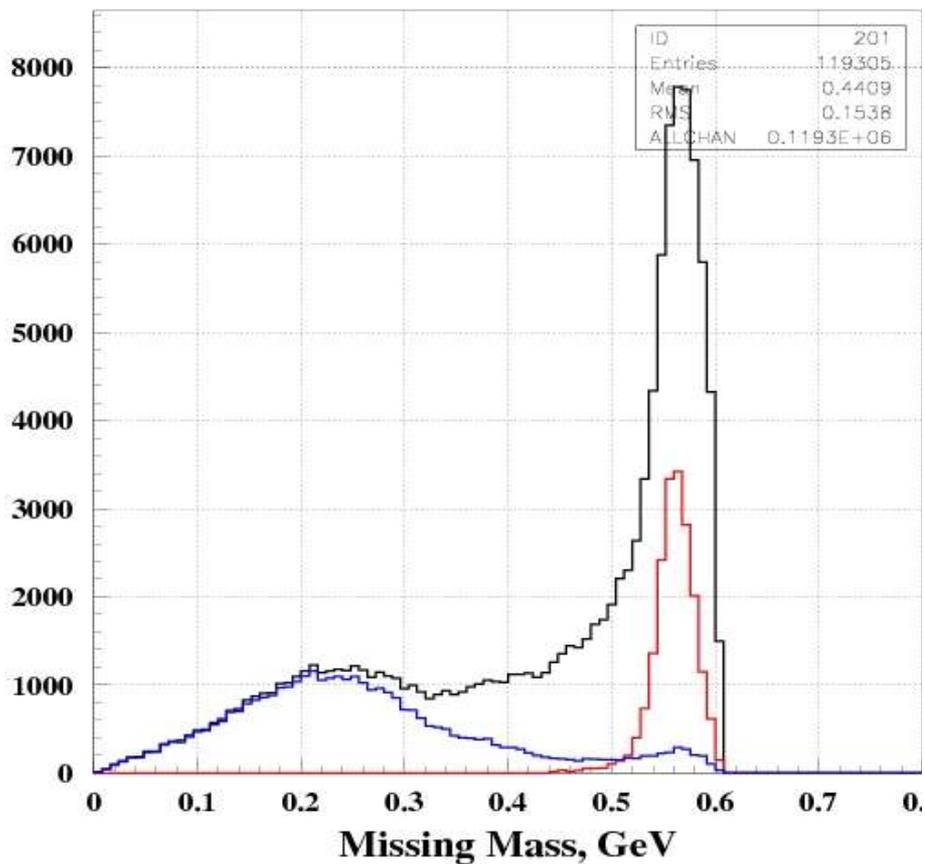


gamma+d --> all channels
gamma+p --> pi0+p
gamma+n --> pi-+p
gamma+p --> eta+p

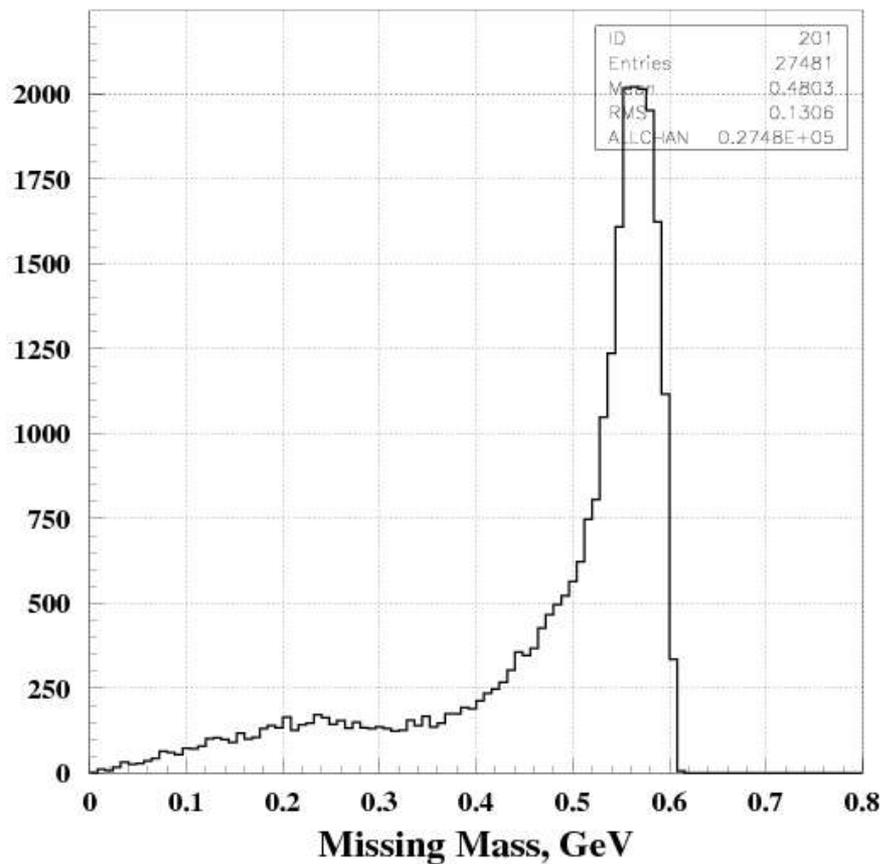
Number of the charged tracks in forward ≥ 1

$E_{\text{gamma}} = 790\text{-}810 \text{ MeV}$

моделирование

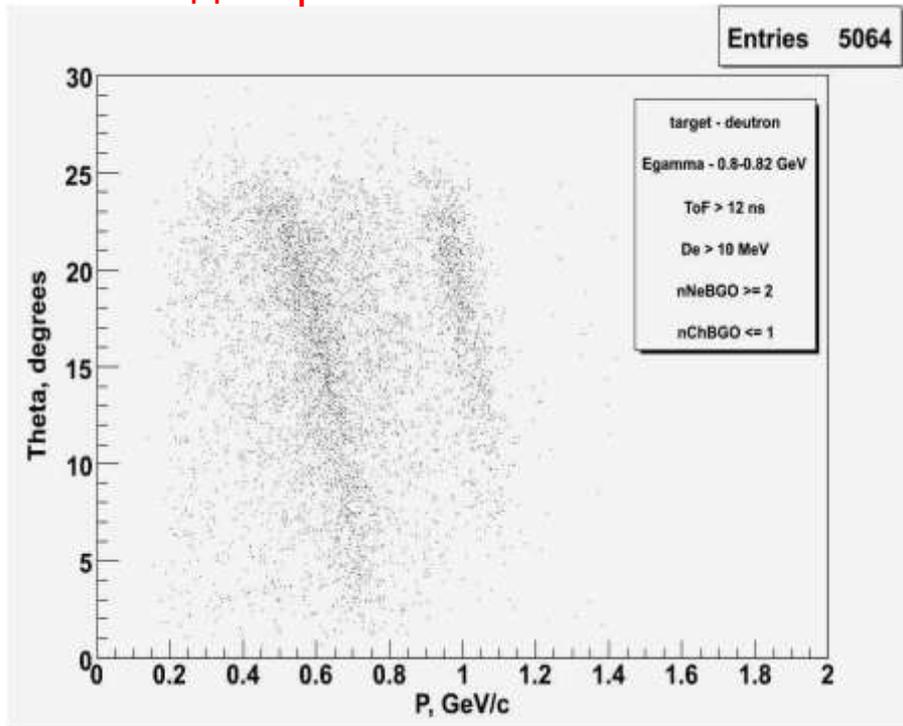


эксперимент

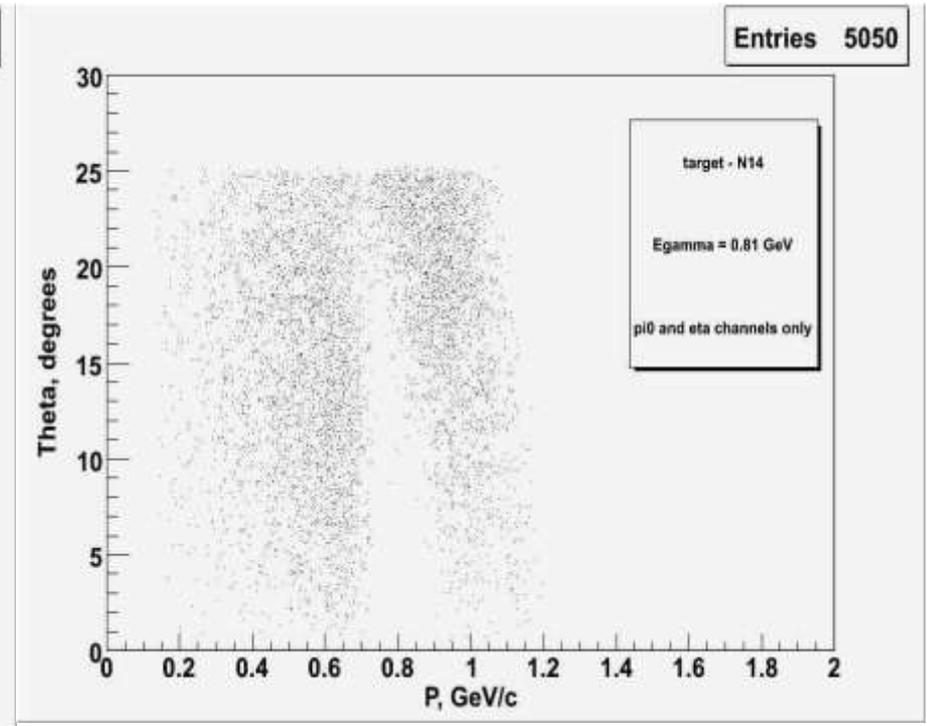


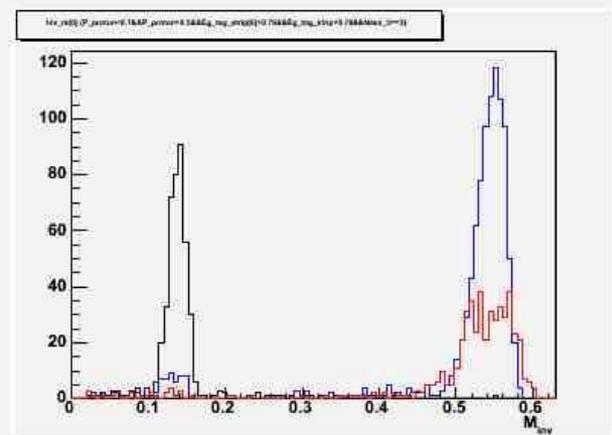
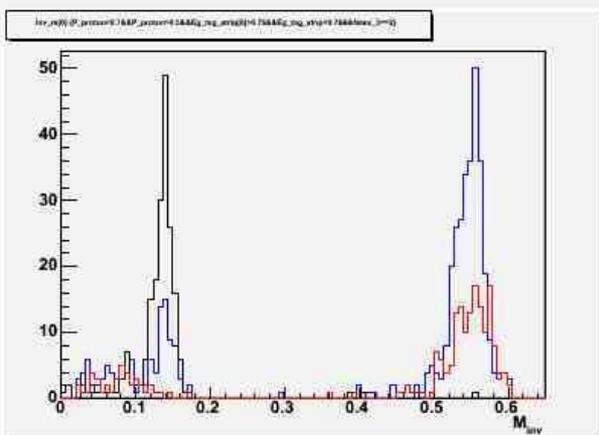
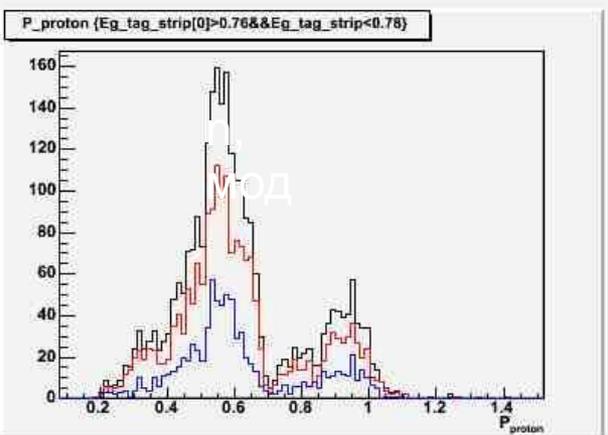
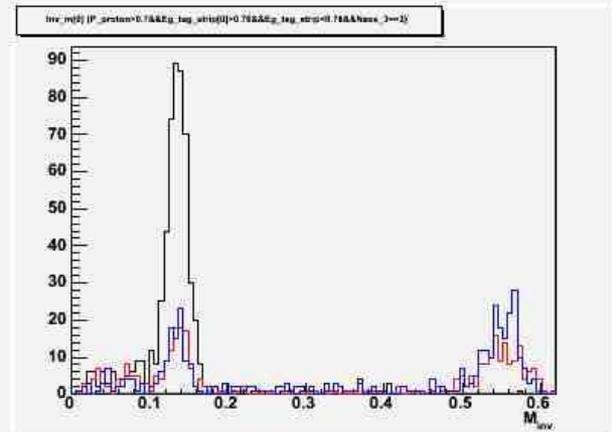
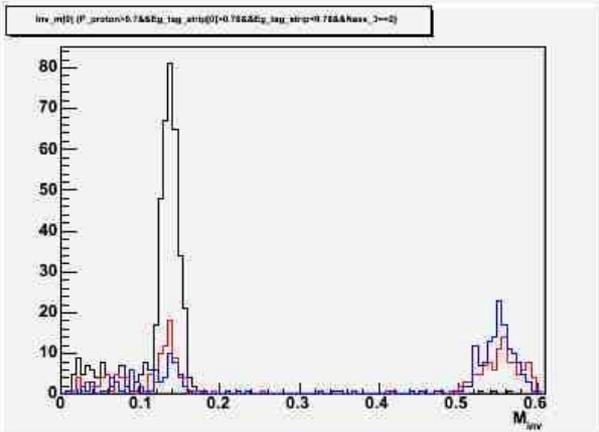
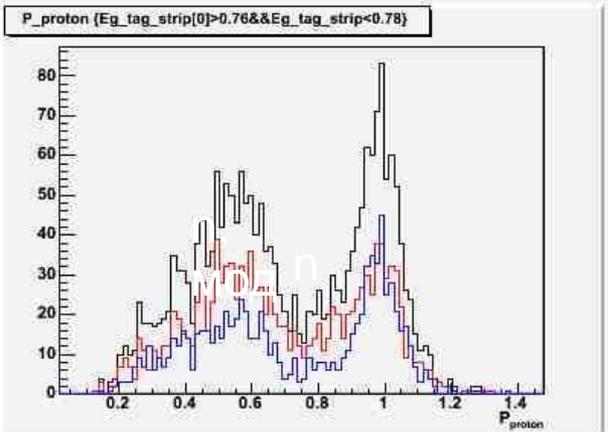
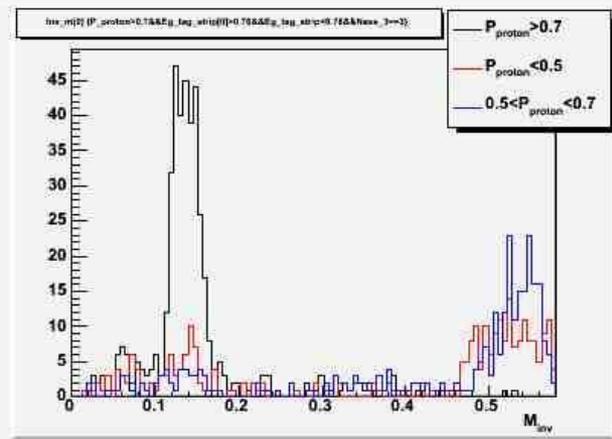
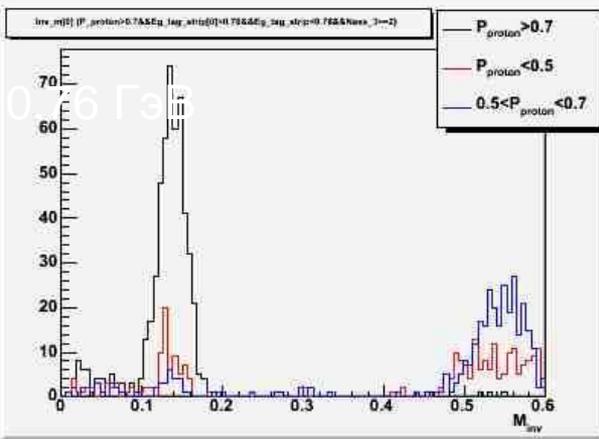
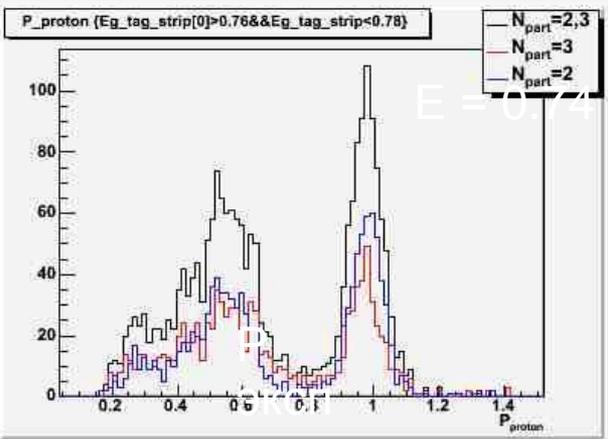
Корреляция между углом вылета и импульсом первичного протона отдачи

Эксперимент на
дейтроне



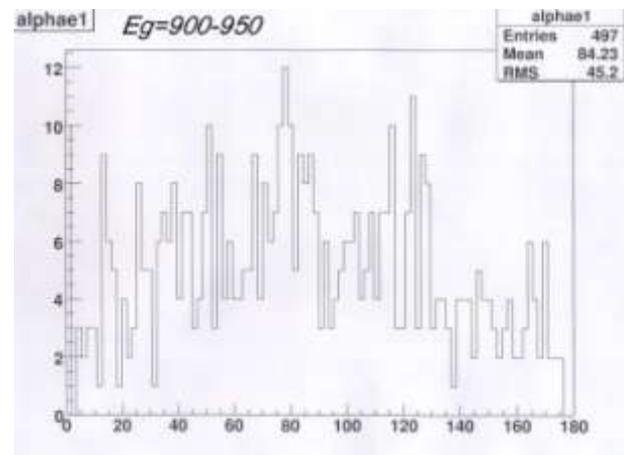
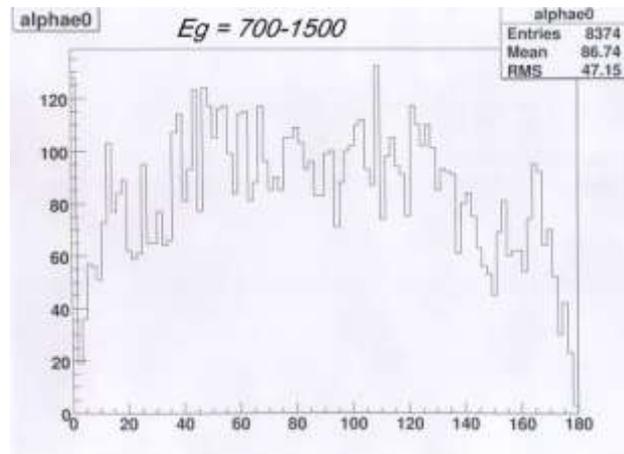
Моделирование



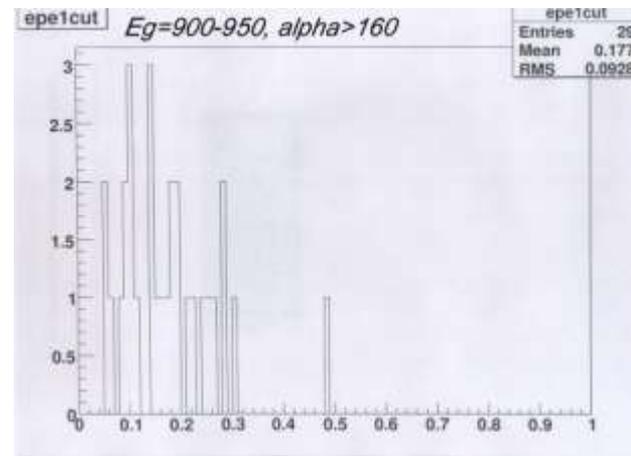
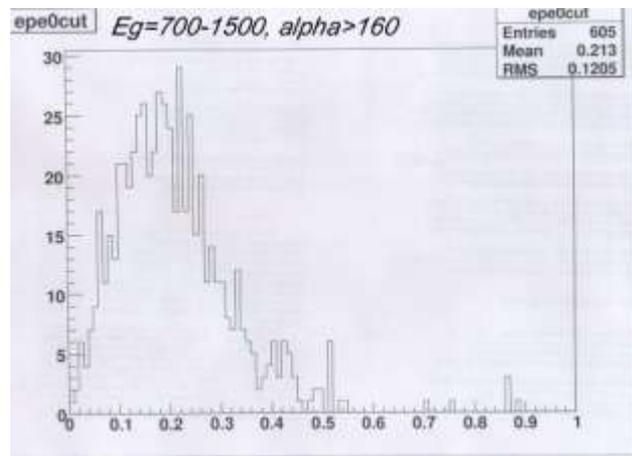
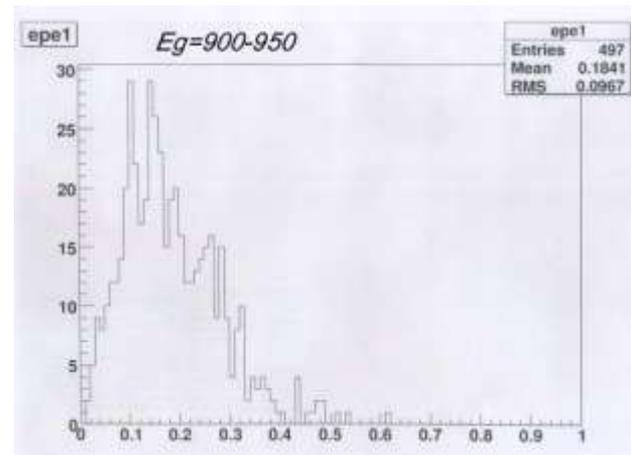
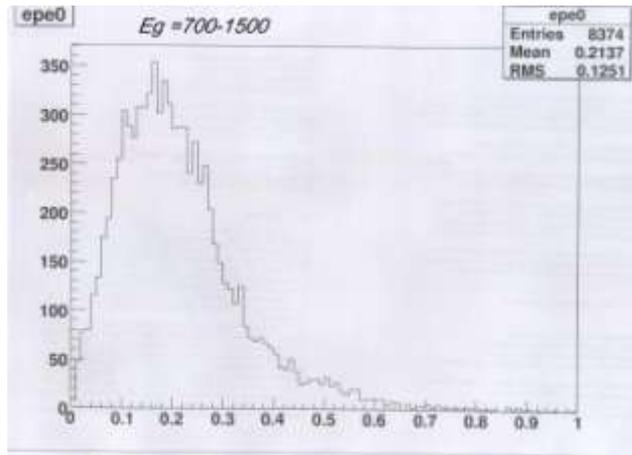


Вылет коррелированных пар $n + p$ из майларовой мишени

Alpha – угол между протоном и нейтроном в л.с.



Вылет коррелированных пар $n + p$ из майларовой мишени Энергия протона в л.с.



«Исследование ядерной материи и астрофизических процессов на пучках фотонов, электронов и тяжелых ионов».

Изучение взаимодействия нестабильных мезонов с ядрами («Меченые мезоны»)

Безмодельный учет Ферми движения нуклонов в ядре при измерении сечений фоторождения мезонов

Полное сечение фотопоглощения на нейтроне

Новые явления релятивистской физики и квантовой электродинамики. Фундаментальные проблемы взаимодействия высокоинтенсивных электромагнитных полей с веществом. — Эффекты высокого порядка по α

Нужны новые экспериментальные установки с высоким разрешением и эффективностью. Модернизация экспериментальной базы в России.