

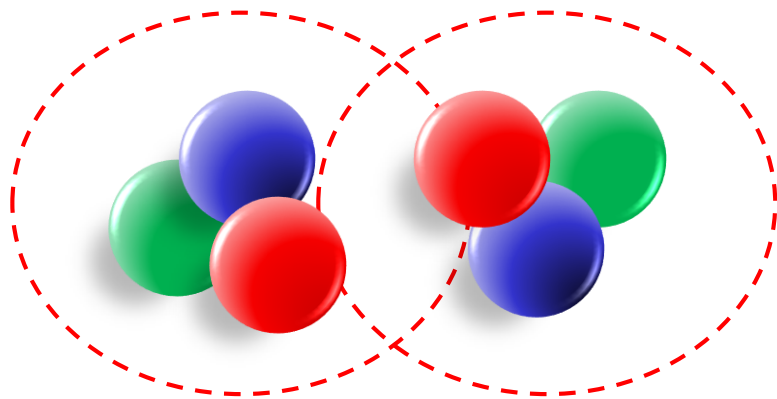
Когерентное фоторождение $\pi^0\pi^0$ на
дейтроне в области энергий возбуждения
дибариона $d^*(2380)$

Фикс А.И.

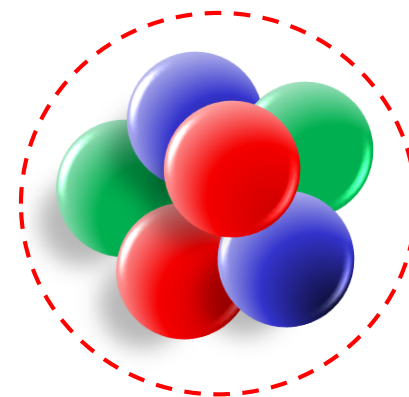
Институт ядерной физики
им. Г.И.Будкера СО РАН г. Новосибирск

$$B = 2$$

Дейтрон



$6q$

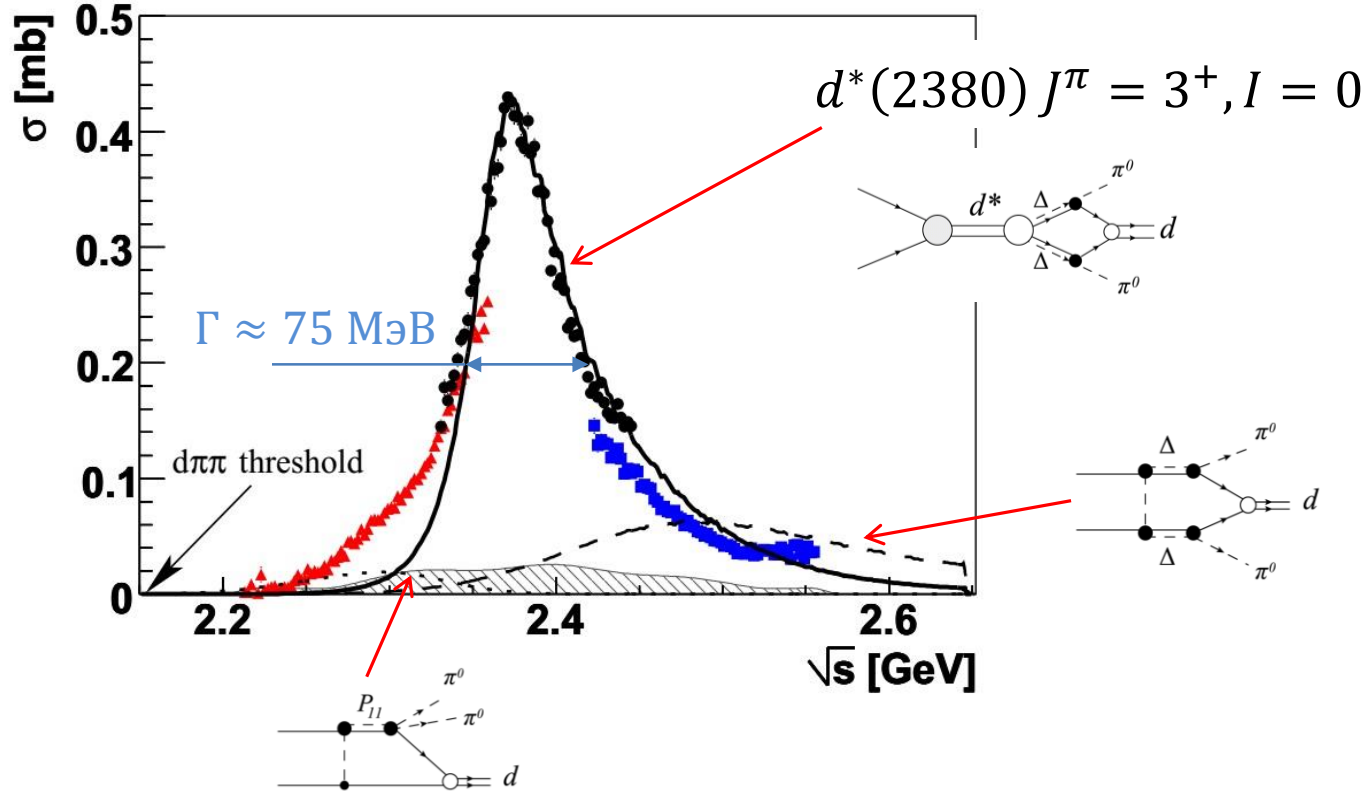


$pn \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$, Wasa-at-Cosy (Julich) 2011

$$p + d \rightarrow \pi^0 \pi^0 + d + p_{\text{спект}}$$

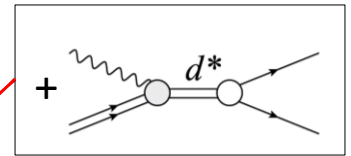
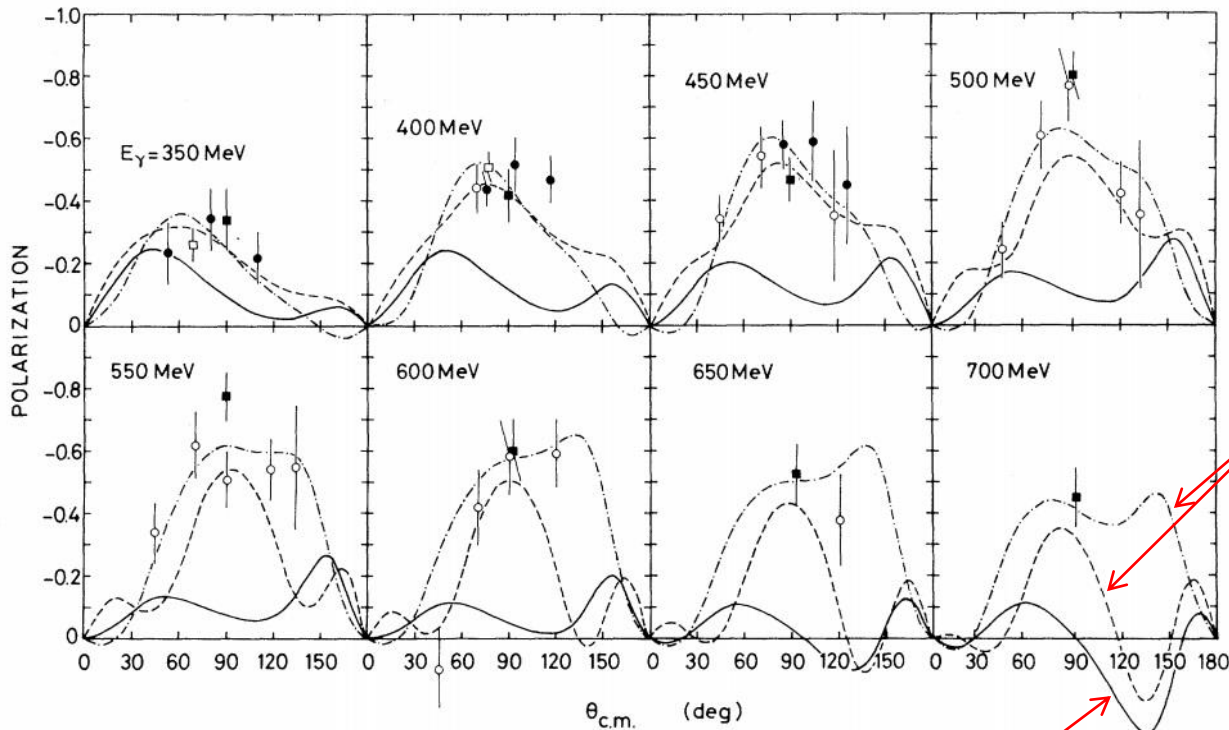
регистрировались все 4 частицы в 4π

P. Adlarson *et al.* [PRL 106 (2011) 242302]



$\gamma d \rightarrow np$, поляризация протонов отдачи P_y

H. Ikeda *et al.*, [PRL 42, 1321 (1979)]

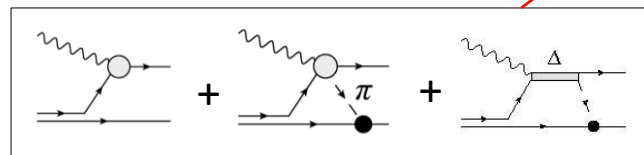


A
B

A: $1(3^-) + 0(1^+)$

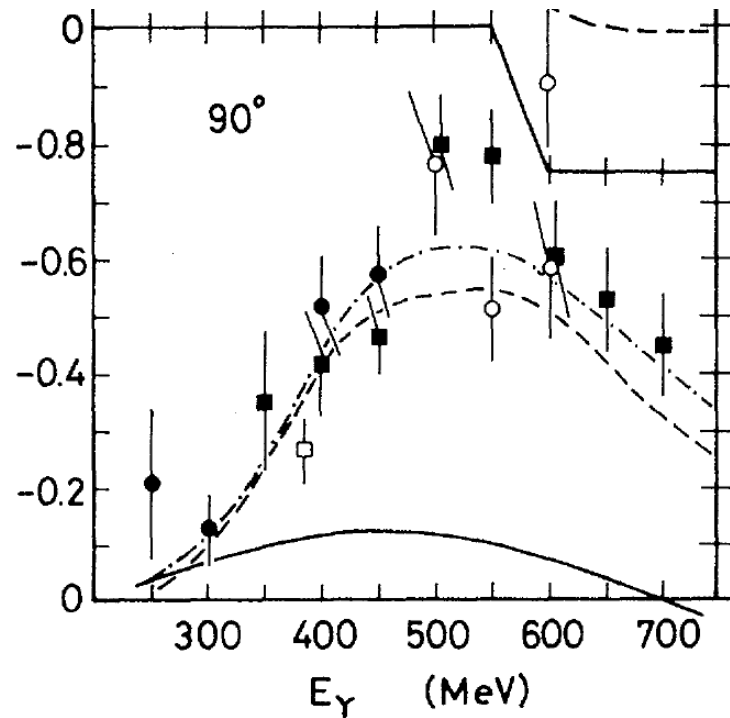
B: $1(3^-) + 0(3^+)$

$\Gamma_{d^*} > 230 \text{ МэВ}$



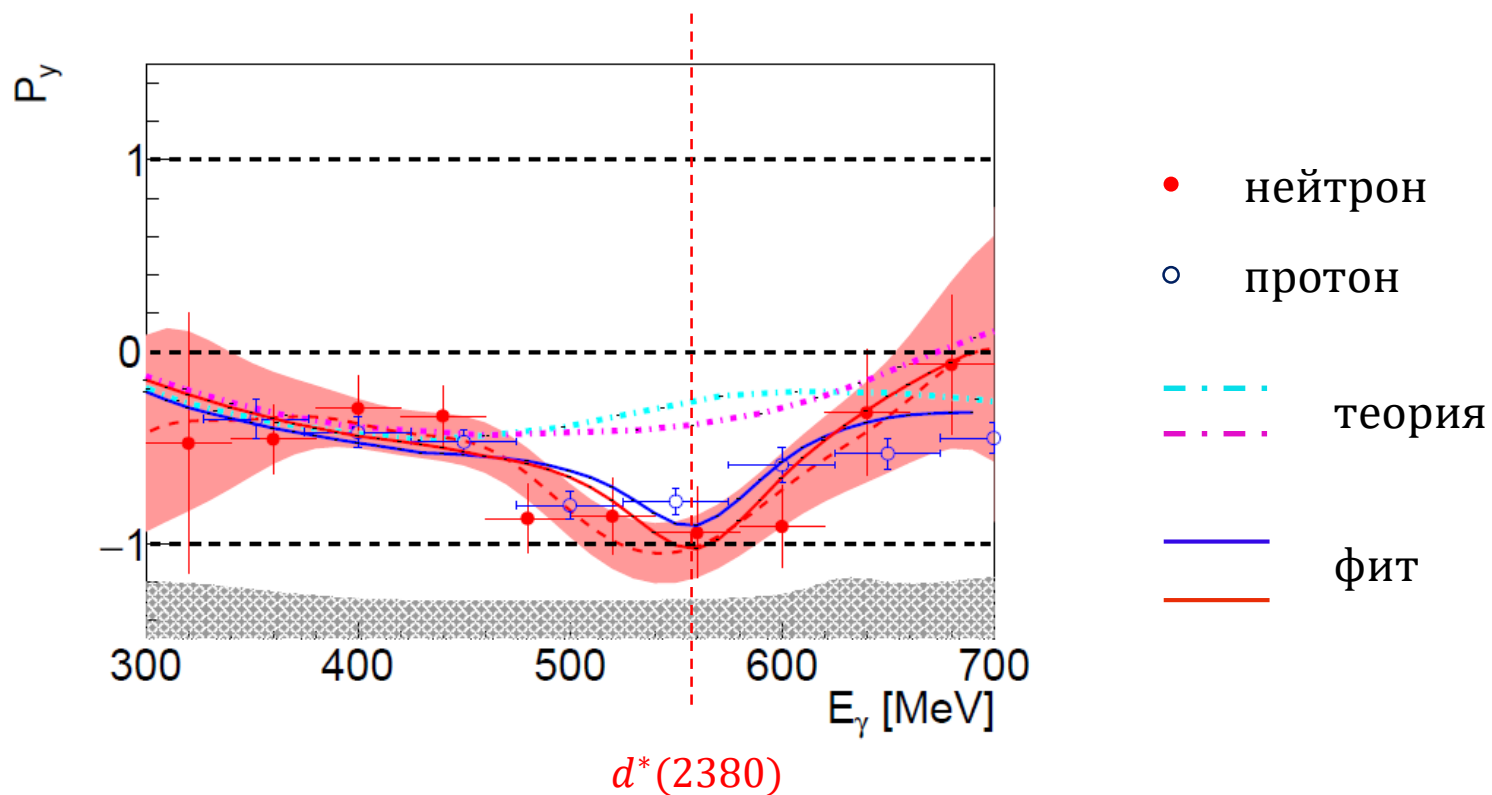
$\gamma d \rightarrow np$, поляризация протонов отдачи P_y

H. Ikeda *et al.*, [PRL 42, 1321 (1979)]



$\gamma d \rightarrow np$, поляризация нуклонов отдачи P_y

M. Bashkanov *et al.*, [PRL 124, 132001 (2020)]

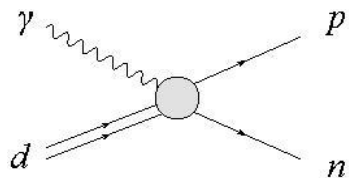


Фоторождение $d^*(2380)$ в реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$

Преимущества:

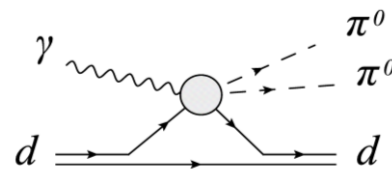
1. Отсутствие изовекторного фона

Фоторасщепление



Большая доля **изовекторных** переходов (>90 %) \Rightarrow Большой изовекторный фон

Фоторождение $\pi^0 \pi^0$

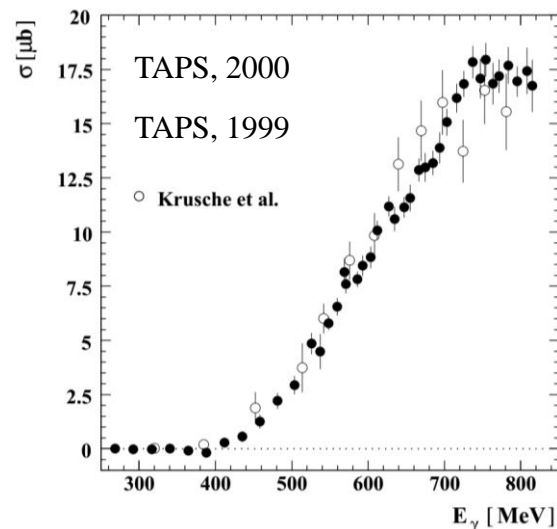
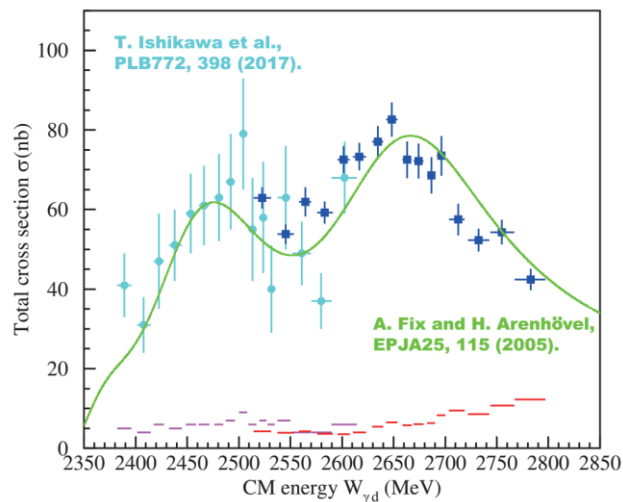
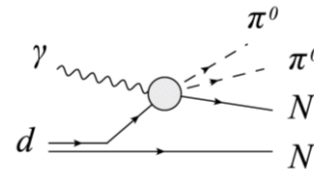
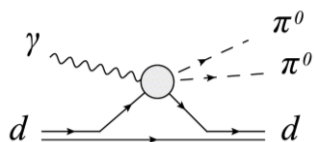


Только **изоскалярные** переходы

Фоторождение $d^*(2380)$ в реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$

Преимущества:

2. Слабость $\gamma N \rightarrow N^*(T = 0) \Rightarrow$ малое сечение конкурирующего процесса

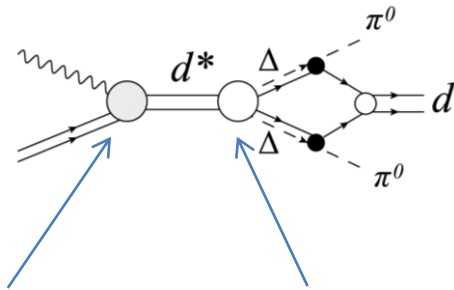


$$\sigma(\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d) \approx \frac{1}{300} \sigma(\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 n p)$$

Результаты. Полное сечение

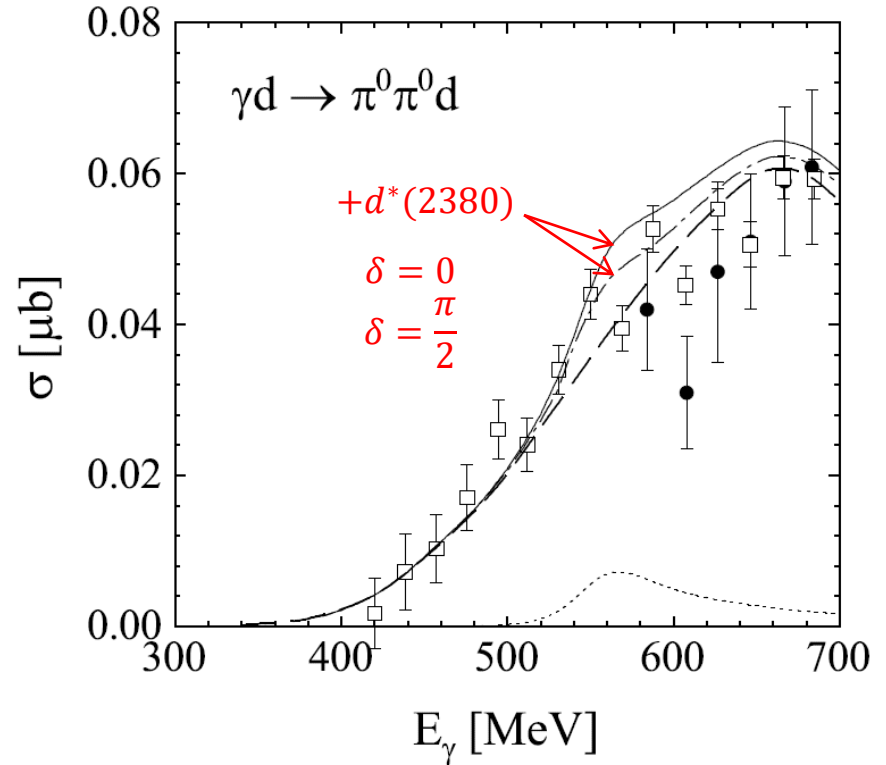
$$T = t^{\text{очн}} + e^{i\delta} t^{d^*}$$

$$t^{d^*} = F_{\gamma d \rightarrow d^*} \frac{1}{W - M_{d^*} + \frac{i}{2} \Gamma_{d^*}} F_{d^* \rightarrow \pi\pi d}^+$$



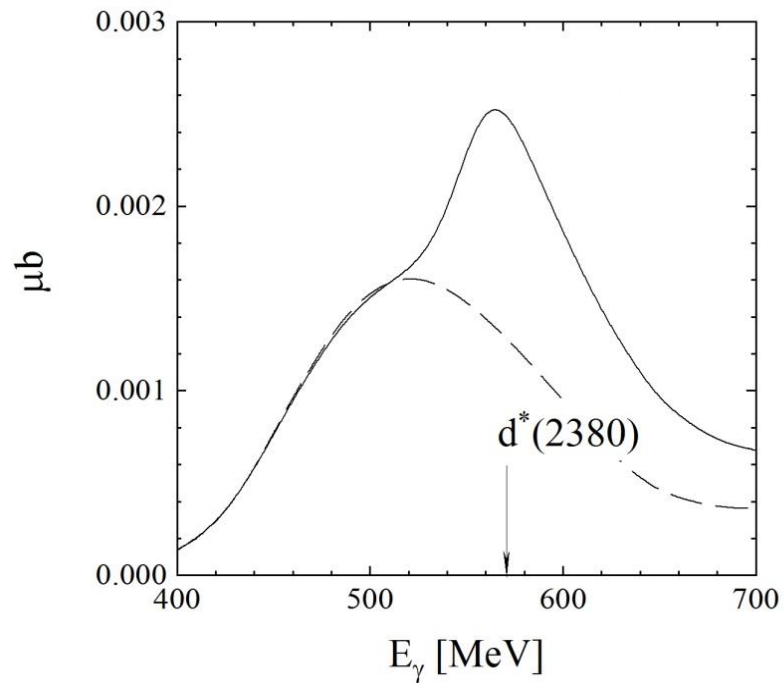
ПОДГОНЯЛАСЬ
ПОД ЭКСП-Т

ИЗВЕСТНА ИЗ
 $d^* \rightarrow np$
 $d^* \rightarrow \pi\pi NN$
 $d^* \rightarrow \pi\pi d$

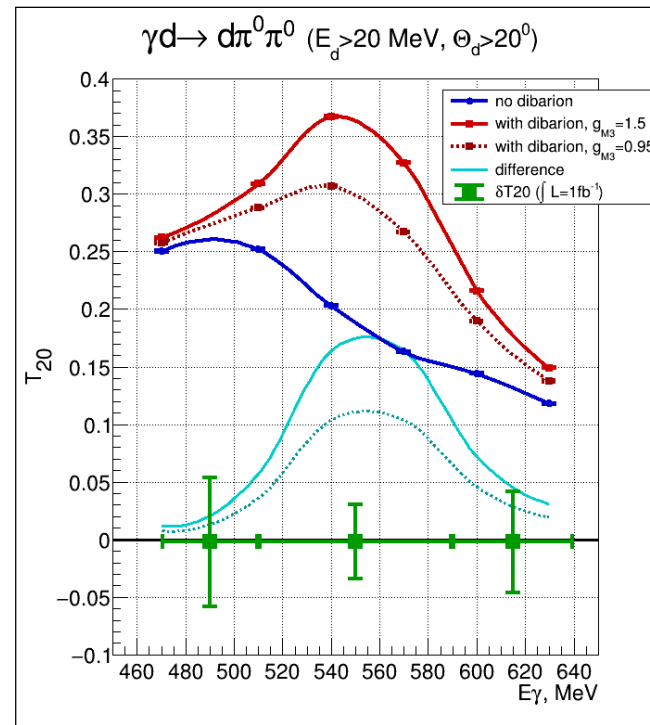
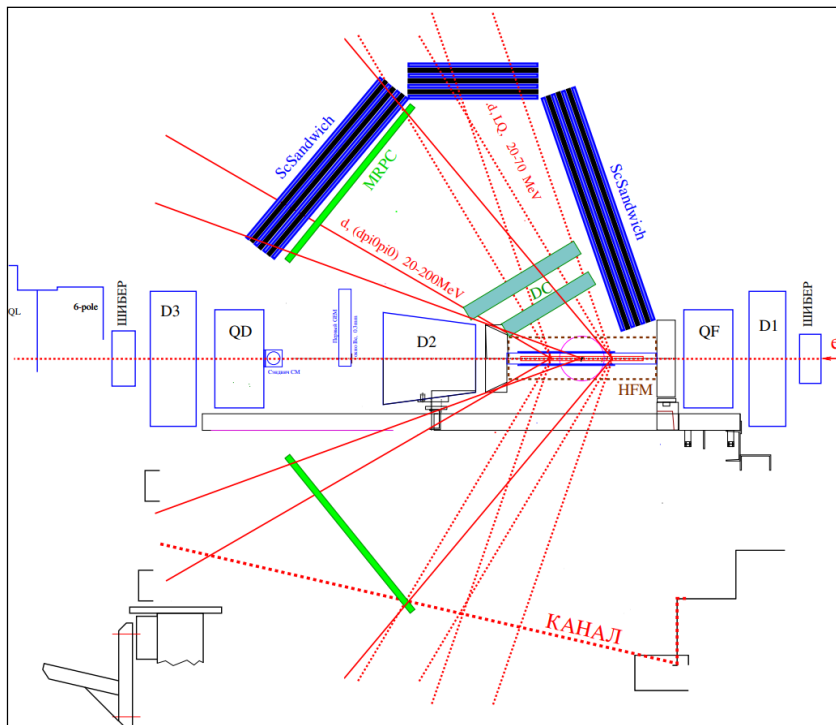


Эксперимент: ELPH (2017, 2018), МАМІ(2018)

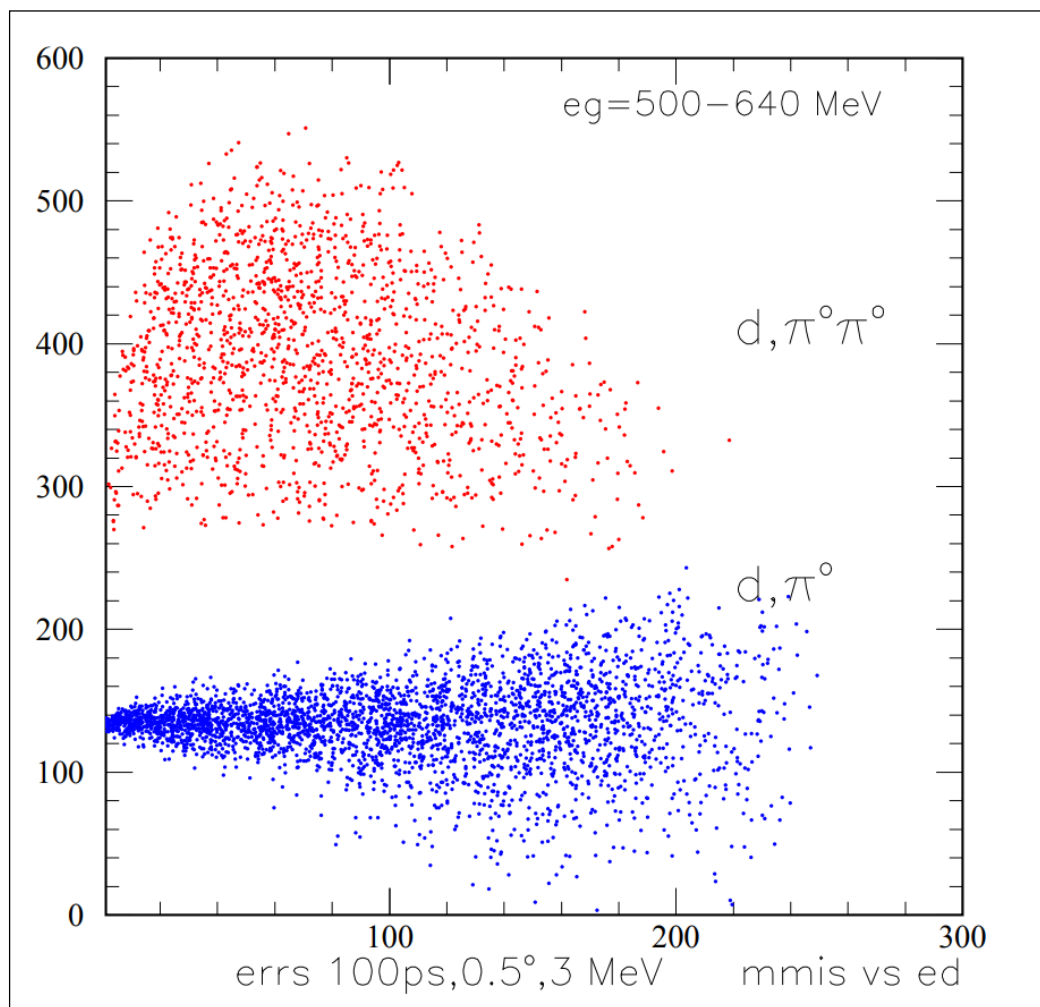
Результаты. $\sigma_0 T_{20} \left(\Theta_d < \frac{\pi}{2} \right)$



Фоторождение дибариона $d^*(2380)$:: Вариант схемы детектора и оценка стат. ошибки



Фоторождение дибариона $d^(2380)$:: Выделение событий $d\pi^0\pi^0$*



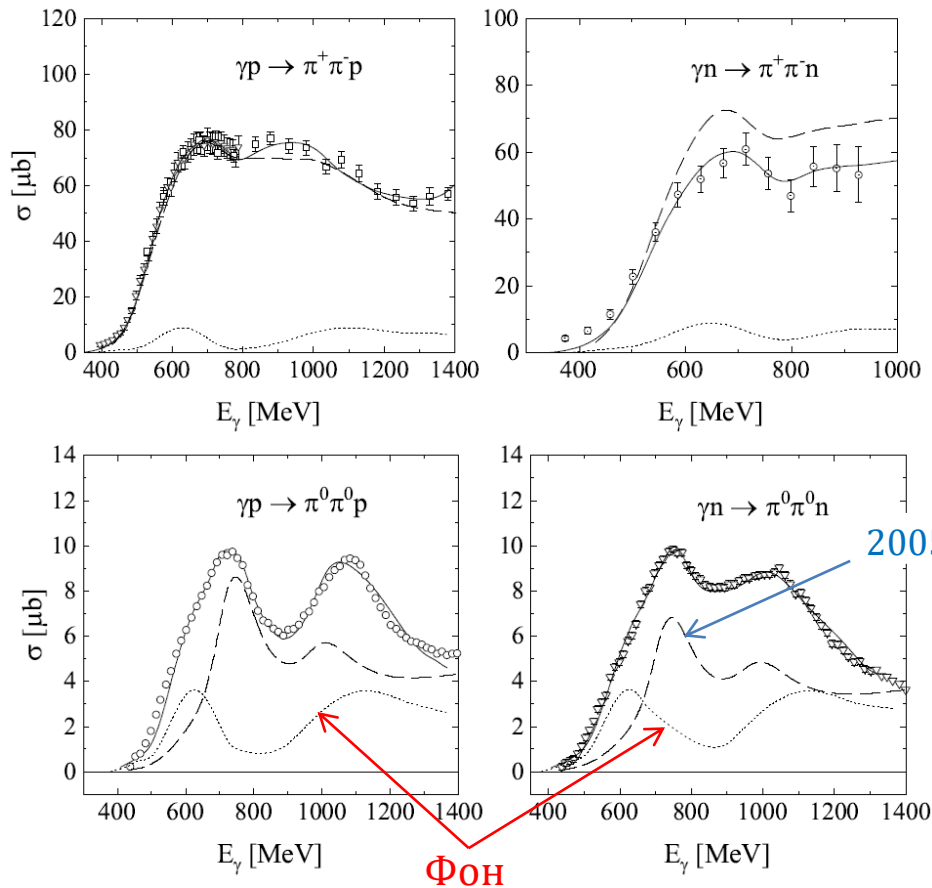
Фоторождение $d^*(2380)$ в реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$

Выводы:

- $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ – «золотой канал» для поиска $d^*(2380)$
- Сечение мало \Rightarrow необходима хорошая статистика и высокое разрешение по энергии

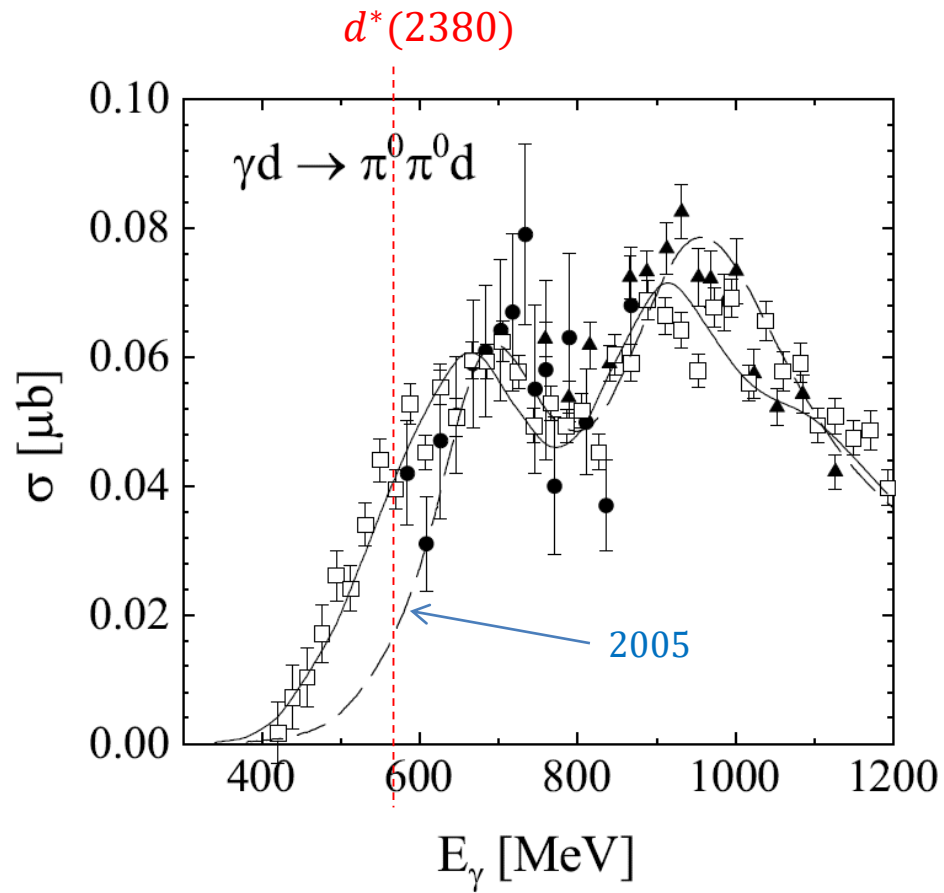
Модель $\gamma N \rightarrow \pi\pi N$

Полные сечения



Модель $\gamma N \rightarrow \pi\pi N$

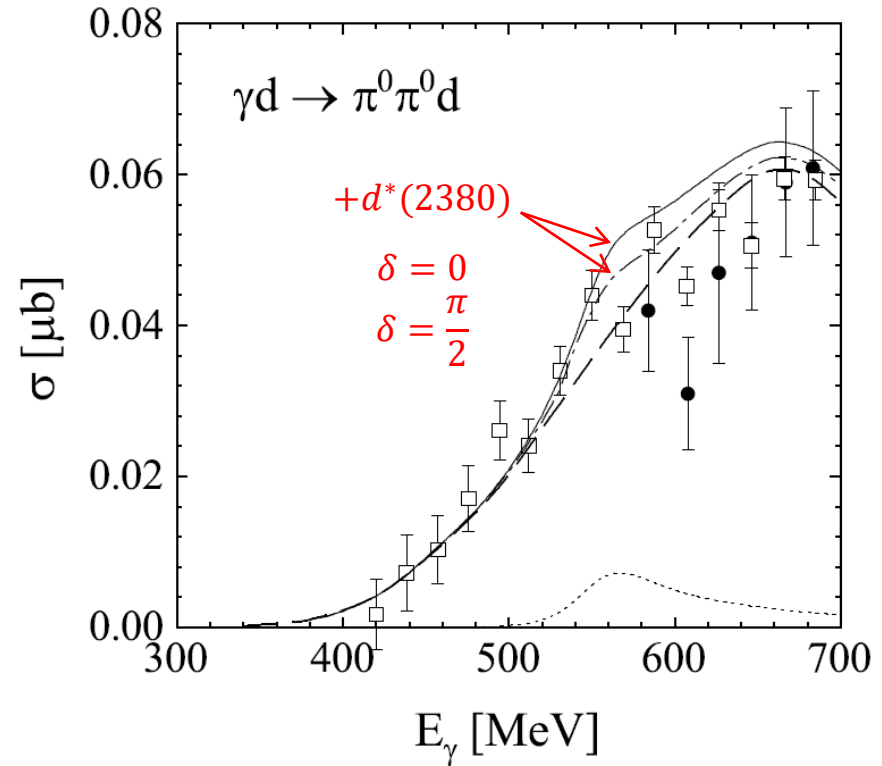
Сечение $\gamma d \rightarrow \pi^0\pi^0 d$



Результаты. Полное сечение

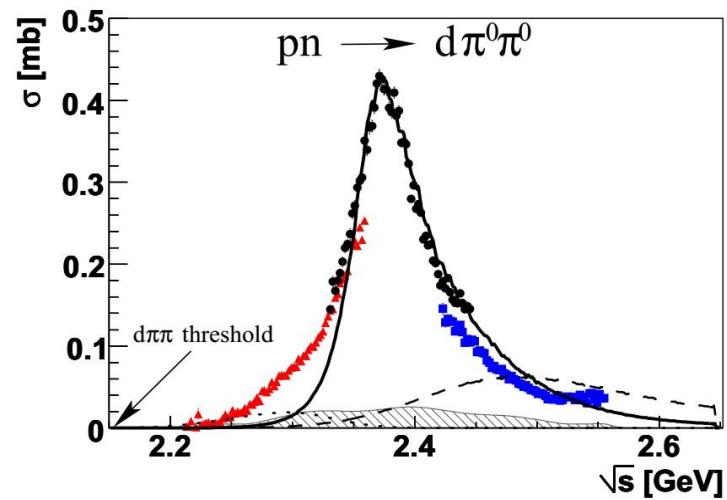
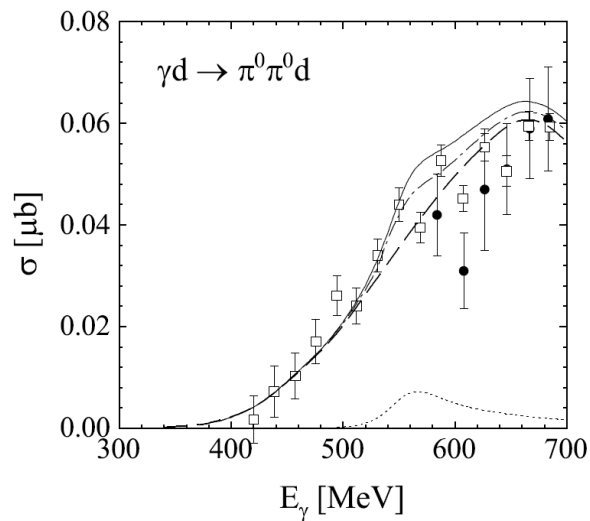
$$T = t^{\text{осн}} + e^{i\delta} t^{d^*}$$

- d^* проявляется в $\sigma(E_\gamma)$ в виде плеча
- Зависимость от δ
- Эффект от $d^*(2380)$ заметно меньше, чем в $np \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$

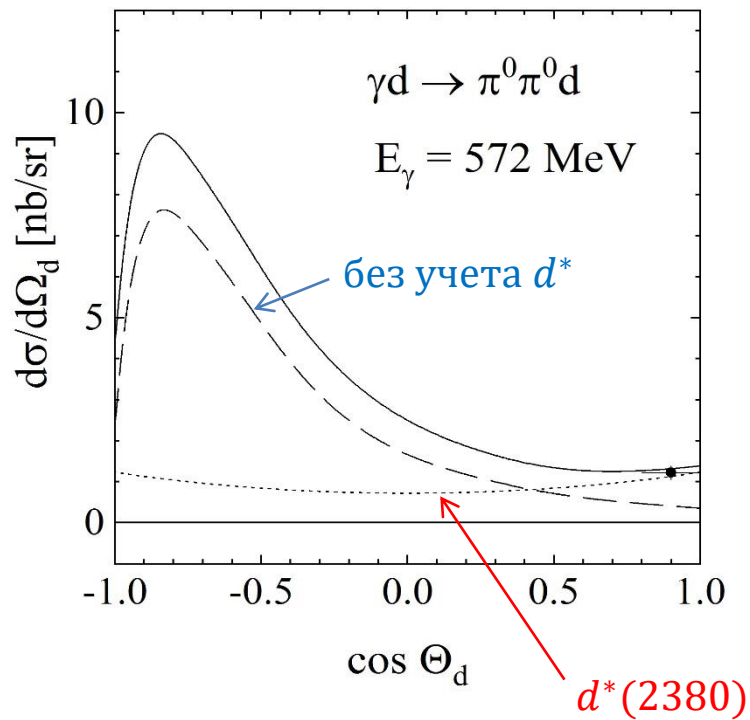


Эксперимент: ELPN (2017, 2018), MAMI(2018)

Результаты. Полное сечение



Результаты.



$d^*(2380)$ наиболее заметен в области больших переданных импульсов

$$\Theta_d < \frac{\pi}{2}$$

Результаты. Поляризационные наблюдаемые

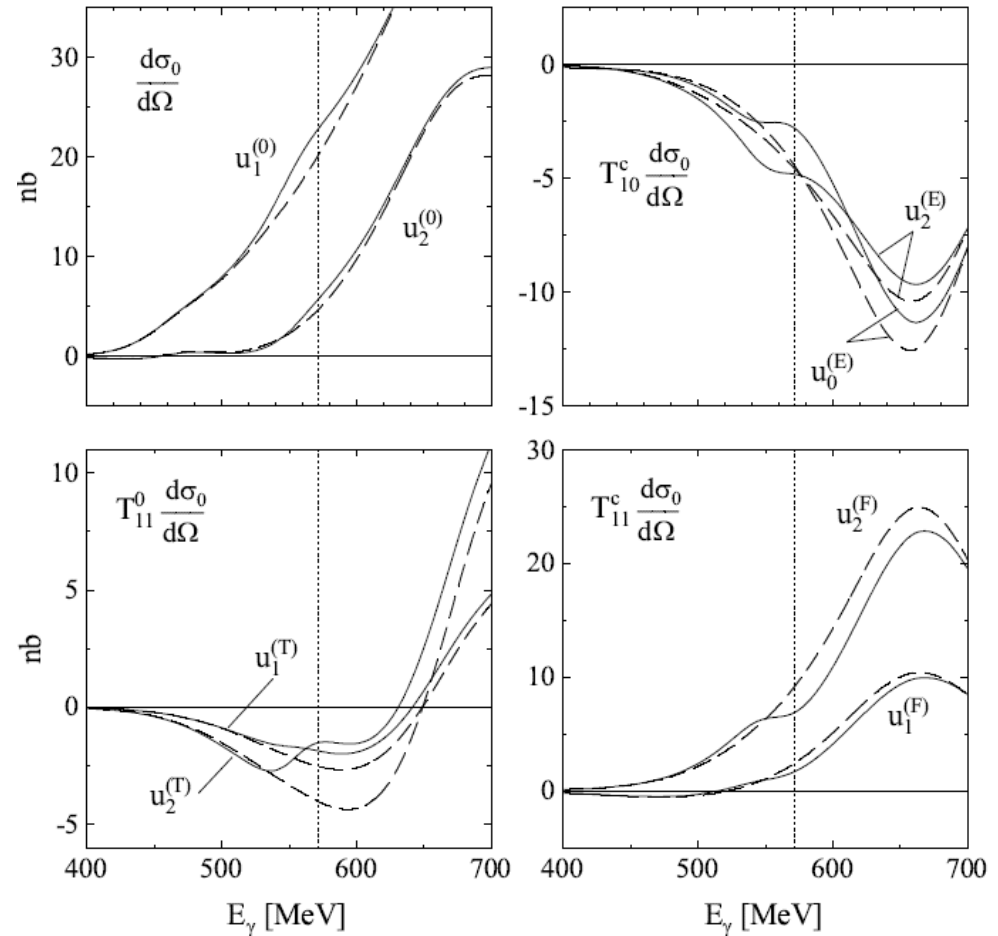
$$\frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=0}^{\infty} (2j+1) u_j^{(0)} P_j(\cos\theta),$$

$$T_{11}^0 \frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} u_j^{(T)} P_j^1(\cos\theta),$$

$$T_{10}^c \frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=0}^{\infty} (2j+1) u_j^{(E)} P_j(\cos\theta),$$

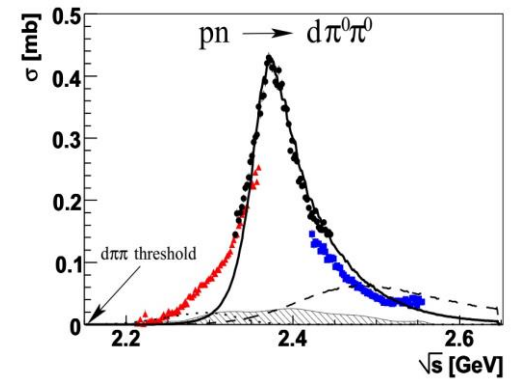
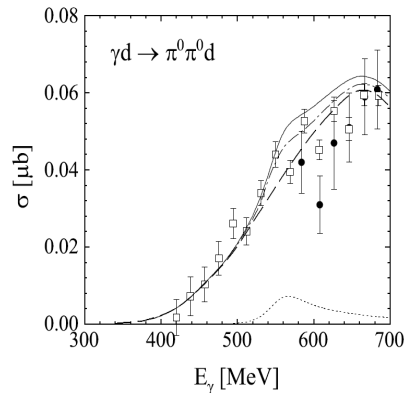
$$T_{11}^c \frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} u_j^{(F)} P_j^1(\cos\theta)$$

Эффект такой же, как в полном сечении

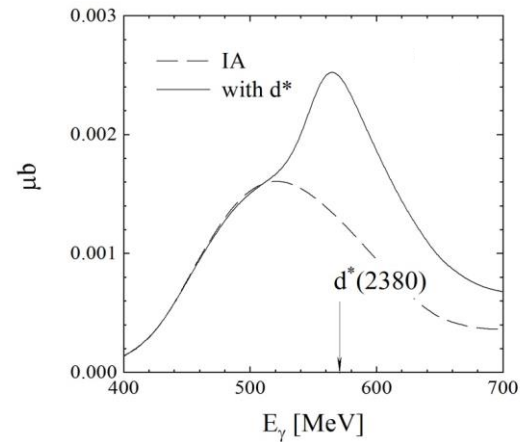


Выводы

- среди э.м. процессов $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ является наиболее эффективным, но
- проигрывает адронному каналу $pn \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$



- вклад $d^*(2380)$ наиболее заметен в области больших Q



Кварковая модель адронов

Могут существовать цветовые синглеты, отличные от $(q\bar{q})$ и (qqq)

- $(q\bar{q}q\bar{q})$, например $Z_c^+(u\bar{d}c\bar{c})$
- $(qqqq\bar{q})$, например $\Lambda_b^0(udsb\bar{b})$
- $(qqqqqq)$

Секстет нестранных дибарионов D_{IJ}

F. J. Dyson and N.-H. Xuong [Phys. Rev. Lett. 13, 815 (1964)]

$SU(6) \Rightarrow$ 6 нестранных дибарионов с $L = 0$

$$q = \begin{pmatrix} u \uparrow \\ d \uparrow \\ s \uparrow \\ u \downarrow \\ d \downarrow \\ s \downarrow \end{pmatrix}$$

$$6 \otimes 6 \otimes 6 = 56_S \oplus 70_M \oplus 70_M \oplus 20_A$$

Секстет нестранных дибарионов D_{IJ}

F. J. Dyson and N.-H. Xuong [Phys. Rev. Lett. 13, 815 (1964)]

$56 \otimes 56 \quad L = 0 \Rightarrow 6$ дибарионов

Массовая формула: $M = A + B[I(I + 1) + J(J + 1) - 2]$

$A = 1876$ МэВ, $B \approx 50$ МэВ

Notation	I	J	Asymptotic baryon-baryon configuration	Mass (formula)	Mass (value) (MeV)
D_{01}	0	1	Deuteron	A	1876
D_{10}	1	0	1S_0 NN virtual state	A	1876
D_{12}	1	2	ΔN	$A + 6B$	2160
D_{21}	2	1	ΔN	$A + 6B$	2160
D_{03}	0	3	$\Delta\Delta$	$A + 10B$	2350
D_{30}	3	0	$\Delta\Delta$	$A + 10B$	2350

$d^*(2380)$



(I=0, J=3): Связанное $\Delta\Delta$ состояние ($L = 0, S = 3$)

$$M(D_{03}) = 2350 \text{ МэВ (эксп.: 2380 МэВ)}$$

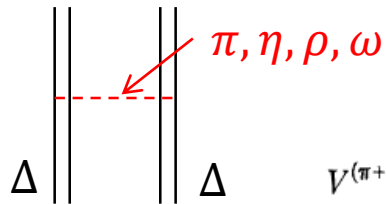
$$D_{03} \rightarrow \Delta\Delta \rightarrow \pi\pi NN \text{ (88 \%)}$$

$$D_{03} \rightarrow NN \text{ (12 \%)}$$

$$\Gamma_{\Delta}(W = M_{\Delta} - 50 \text{ МэВ}) \approx 80 \text{ МэВ} \Rightarrow \Gamma_{\Delta\Delta} \approx 160 \text{ МэВ (эксп.: 80 МэВ)}$$

$d^*(2380)$, теория

T. Kamae and T. Fujita, [PRL 38 (1977) 471]: $\Delta\Delta$ потенциал однобозонного обмена



$$V^{(\pi+\eta)}(r) = \frac{1}{3} \frac{f_{\Delta\Delta\pi}^2}{4\pi} [\vec{\tau}(1) \cdot \vec{\tau}(2)] [\vec{\sigma}(1) \cdot \vec{\sigma}(2)] \frac{\exp(-m_\pi r)}{r} + \frac{1}{3} \frac{f_{\Delta\Delta\eta}^2}{4\pi} [\vec{\sigma}(1) \cdot \vec{\sigma}(2)] \frac{\exp(-m_\eta r)}{r}.$$

$$V^{(\rho+\omega)}(r) = [\vec{\tau}(1) \cdot \vec{\tau}(2)] \left\{ \frac{g_{\Delta\Delta\rho}^2}{4\pi} + \frac{f_{\Delta\Delta\rho}^2}{4\pi} \frac{2}{3} [\vec{\sigma}(1) \cdot \vec{\sigma}(2)] \right\} \frac{\exp(-m_\rho r)}{r} \\ + \left\{ \frac{g_{\Delta\Delta\omega}^2}{4\pi} + \frac{f_{\Delta\Delta\omega}^2}{4\pi} \frac{2}{3} [\vec{\sigma}(1) \cdot \vec{\sigma}(2)] \right\} \frac{\exp(-m_\omega r)}{r}.$$

$$E_B = 100 \text{ МэВ.}$$

$d^*(2380)$, теория

T. Goldman *et al.*, [PRC 39 (1989) 1889]: 'inevitable dibaryon'

Certain basic features, common to all phenomenological models of hadron structure based on the picture of confinement at large distances and effective one-gluon exchange within the confinement region, necessarily lead to the prediction of the existence of a nonstrange dibaryon resonance with quantum numbers $IJ^P=03^+$, the d^* , independent of more detailed features of the dynamics of any of the models.

qq – потенциал:

$$V_{ij} = V_{ij}^{conf} + V_{ij}^G$$

$$V_{ij}^{conf} = -(\lambda_i^a \lambda_j^a) ar_{ij} \quad V_{ij}^G = -(\lambda_i^a \lambda_j^a) \frac{\alpha_s}{4} \left[\frac{1}{r_{ij}} - \frac{2\pi}{3} \frac{\vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j}{mq^2} \delta(r_{ij}) \right]$$

$$E_B = 350 \text{ МэВ} \gg E_B = 80 \text{ МэВ из } \sigma(pn \rightarrow \pi^0 \pi^0 d)$$

$d^*(2380)$, теория

Bag Model, P. Mulders *et al.*, [PRL 40 (1978) 1543]

Предсказывает $d^*(2380)$ + большое число других дибарионов

Lattice QCD, K. Sasaki *et al.*, [Talk at the MPMBI Workshop, Sendai, 2016]

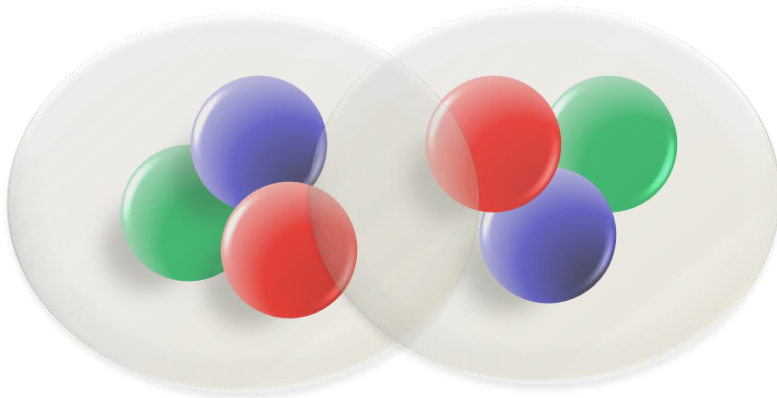
Связанное $\Delta\Delta$ состояние $J^\pi = 3^+$, но $m_\pi = 1015$ МэВ

Общая особенность – слишком большая ширина Γ_{d^*}

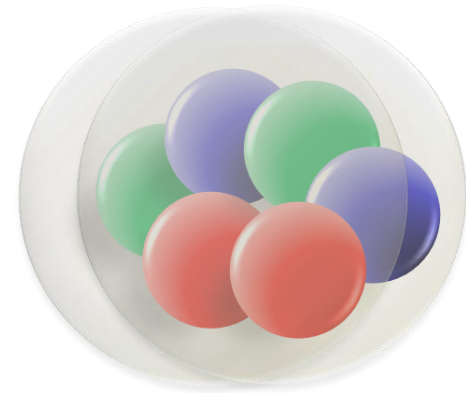
$d^*(2380)$, теория

Chiral SU(3) QM (RGM), Y. Dong *et al.*, [PRC 94 (2016) 014003]: $\Gamma_{d^*} = 70$ МэВ

$$\Psi_{d^*} = \Psi_{\Delta\Delta}(31\%) + \Psi_{C_8C_8}(69\%)$$



$|\Delta\Delta\rangle$



$|C_8C_8\rangle$

$d^*(2380)$, гексакварк или $(3q)-(3q)$ молекула?

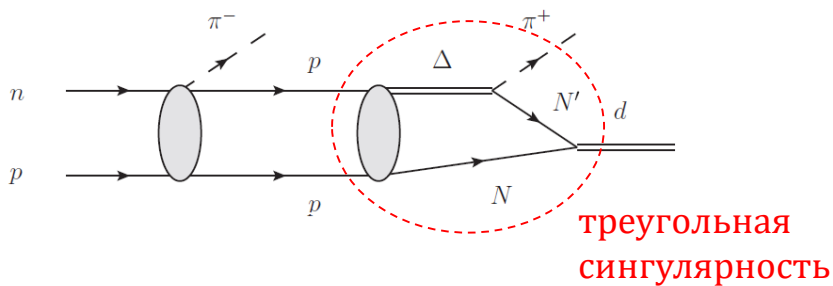
Chiral SU(3) QM (RGM), Y. Dong *et al.*, [PRC 94 (2016) 014003]:

r.m.s. radius $r_{d^*} = 0.8 \text{ fm} \ll r_d \approx 2.0 \text{ fm}$

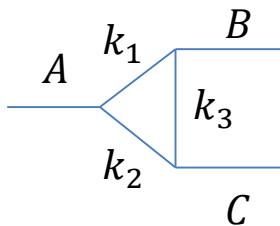
$\Rightarrow d^*(2380)$ – компактный 6-кварковый объект

«Бездибарионные» модели

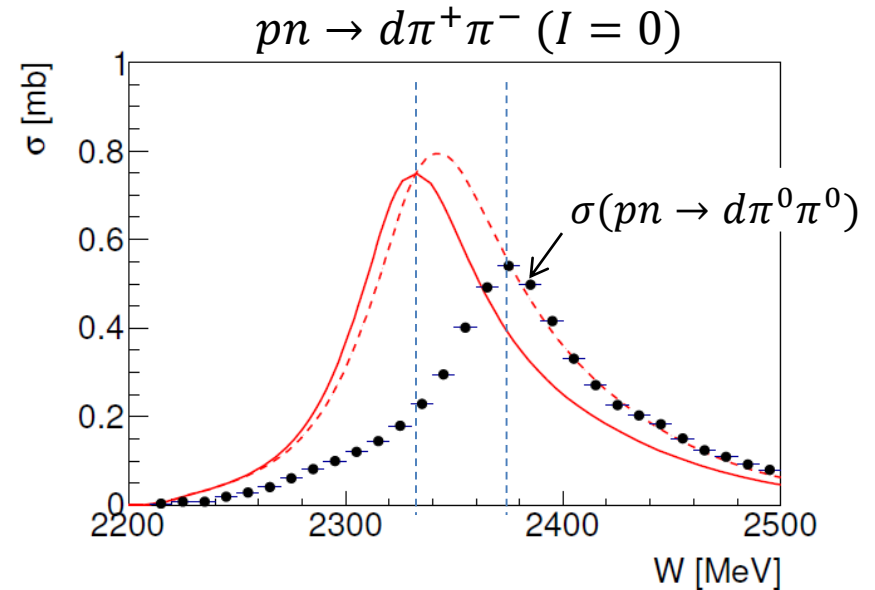
N. Ikeno, R. Molina, and E. Oset, [PRC 104, 1 (2021)]



L. D. Landau, Nucl. Phys. 13, 181 (1960).



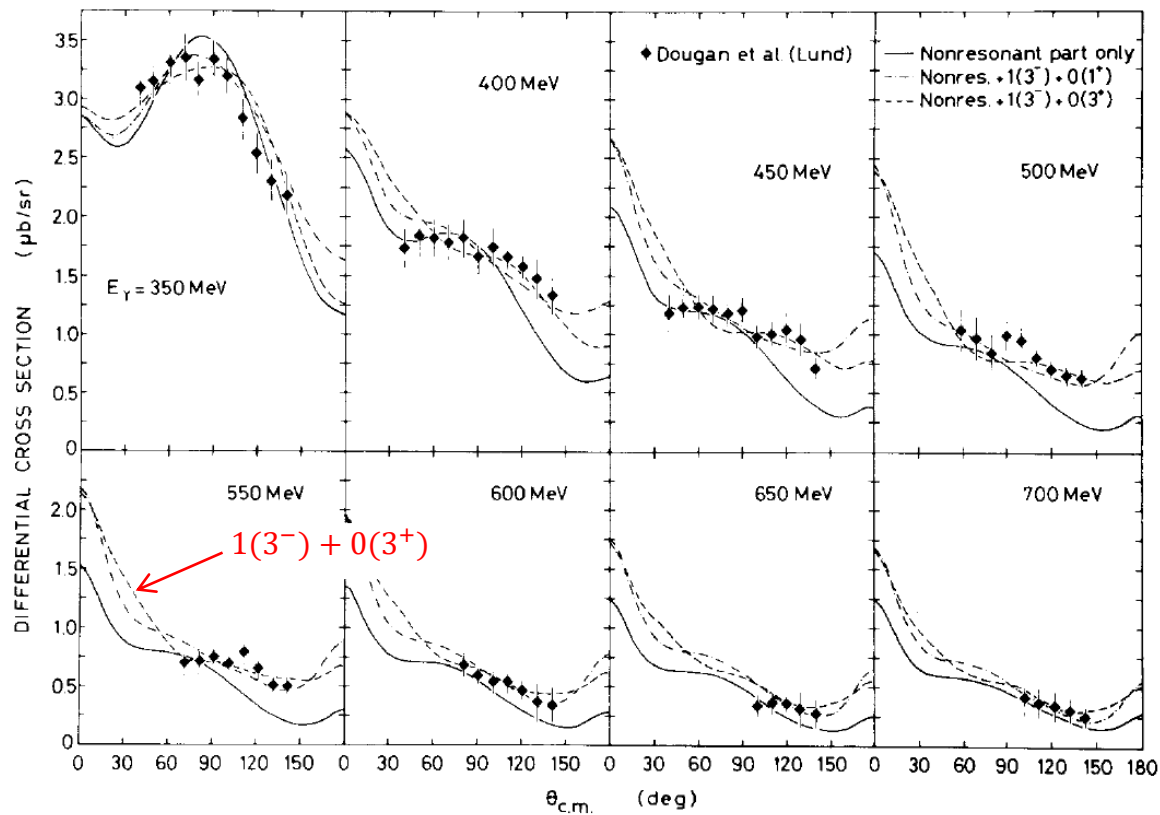
$$\begin{cases} xk_{1\mu} - yk_{2\mu} + zk_{3\mu} = 0, & x, y, z \in [0,1], \\ x + y + z = 1. \end{cases}$$



1. Максимум сдвинут на 50 МэВ влево.
2. Не объясняет максимум в $pn \rightarrow r\pi^+\pi^-$, $pn \rightarrow r\pi^0\pi^0$ и $pn \rightarrow rr\pi^0\pi^-$, где нет тр. сингулярности.

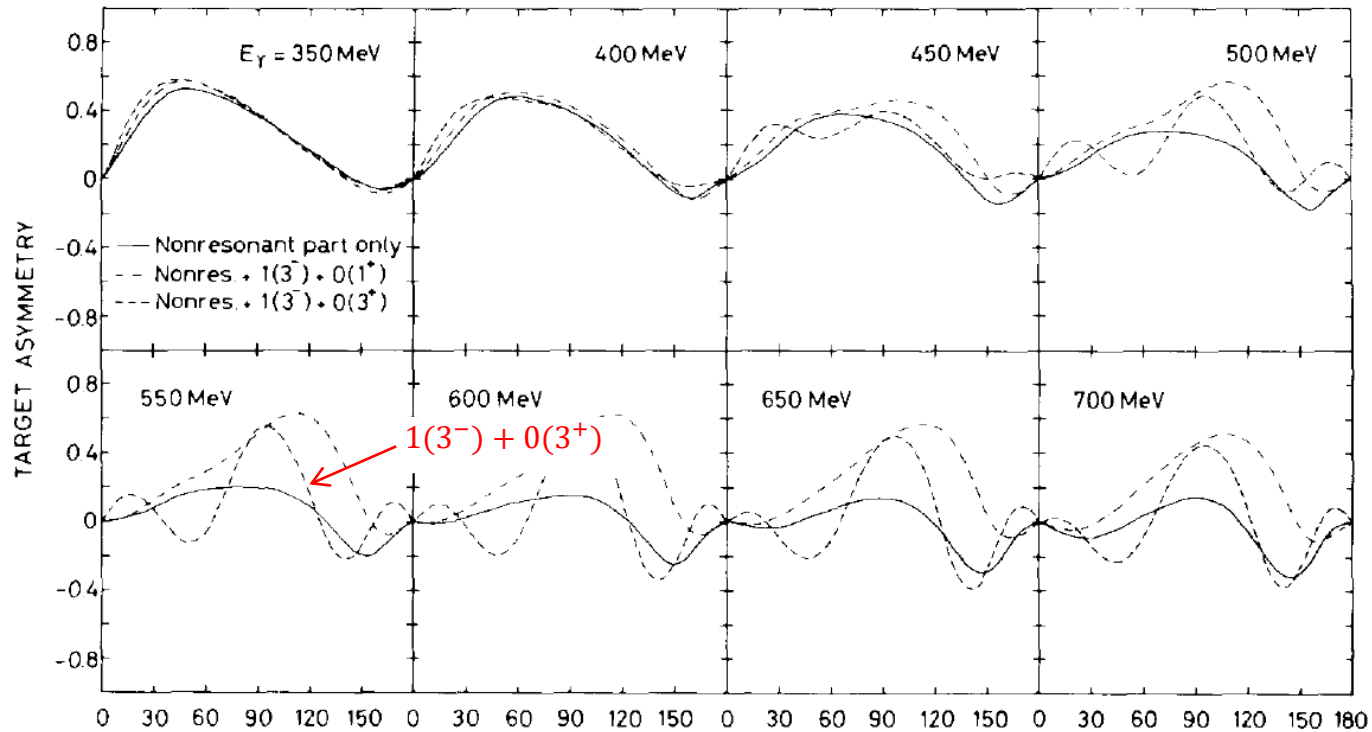
$\gamma d \rightarrow np$, дифференциальное сечение

H. Ikeda *et al.*, [NPB 172, 509 (1980)]



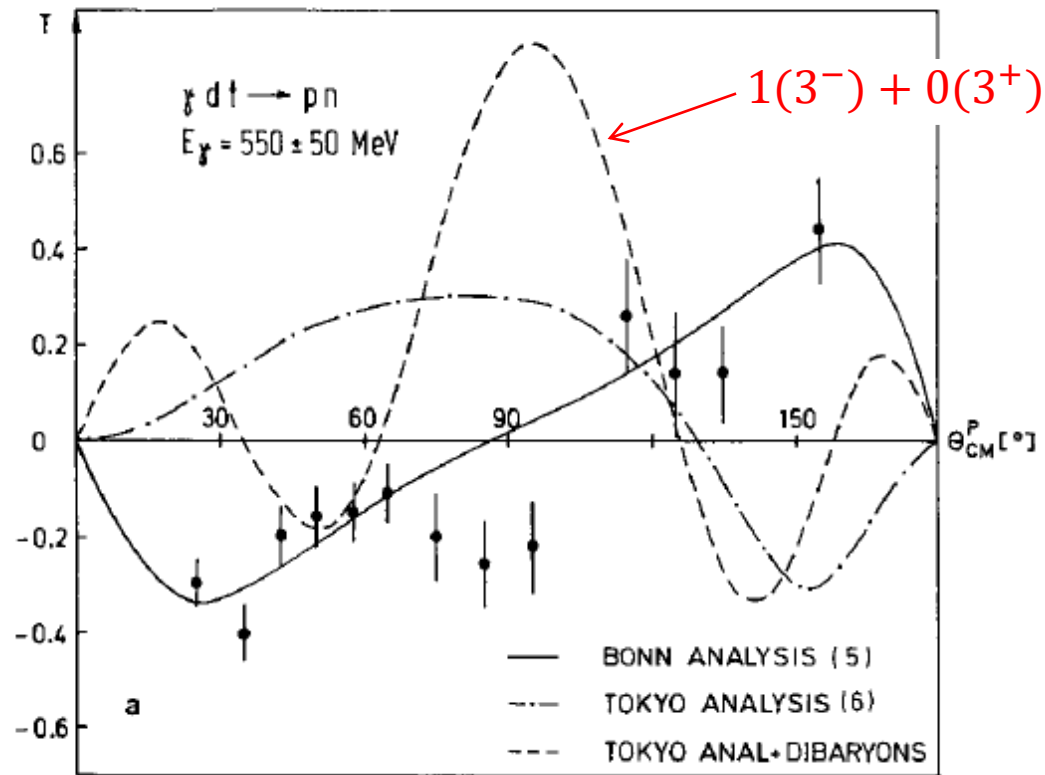
$\gamma d \rightarrow np, T$ – асимметрия

H. Ikeda *et al.*, [NPB 172, 509 (1980)]



$\gamma d \rightarrow np, T$ – асимметрия

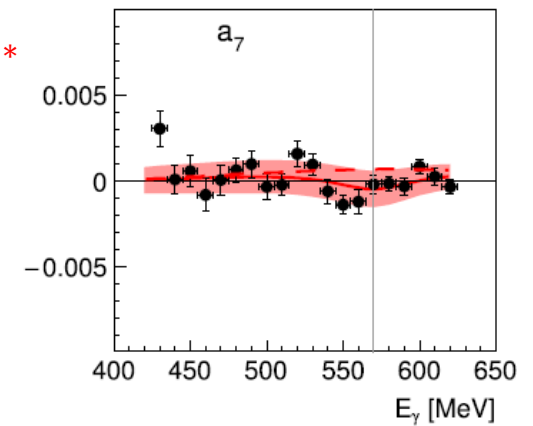
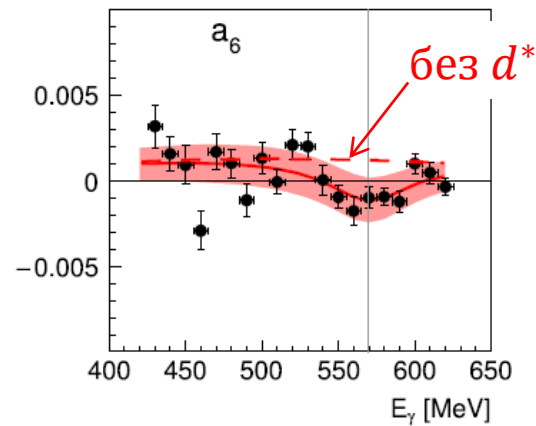
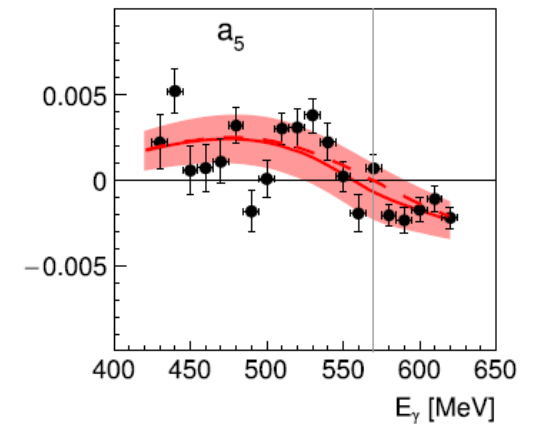
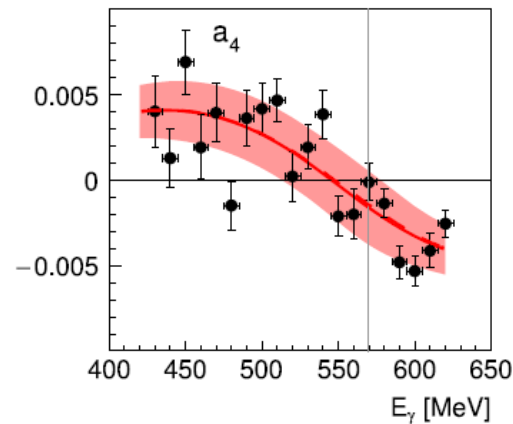
K. Althoff *et al.*, [Z.Phys. 26, 175 (1984)]



$\gamma d \rightarrow np, \Sigma$ – асимметрия

M. Bashkanov *et al.*, [PLB 789, 7 (2019)]

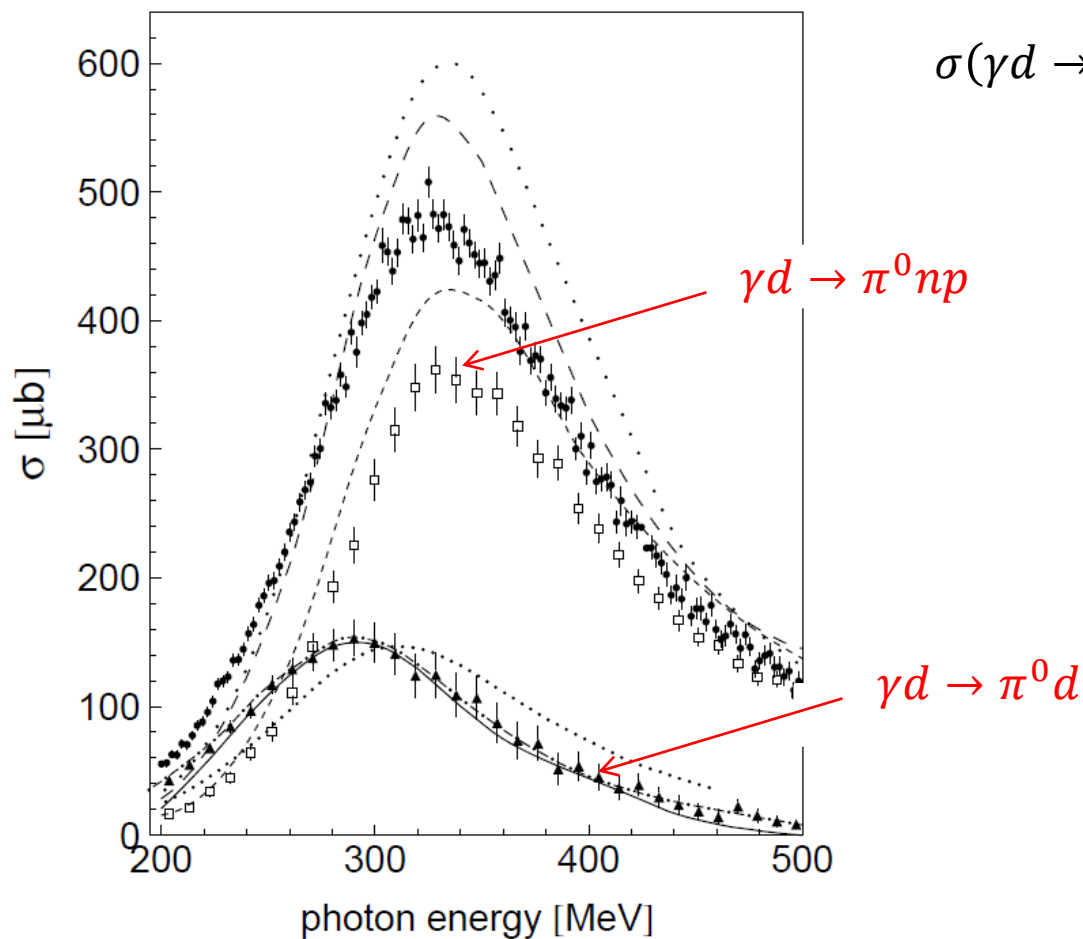
$$\Sigma(\Theta) = \sum_{l=2}^7 a_l P_l^2(\cos \Theta)$$



$\gamma d \rightarrow nr$, ВЫВОДЫ

- Чётких указаний на присутствие $d^*(2380)$ в $\gamma d \rightarrow nr$ нет
- Попытка объяснить имеющиеся разногласия с помощью $d^*(2380)$ приводит к новым разногласиям

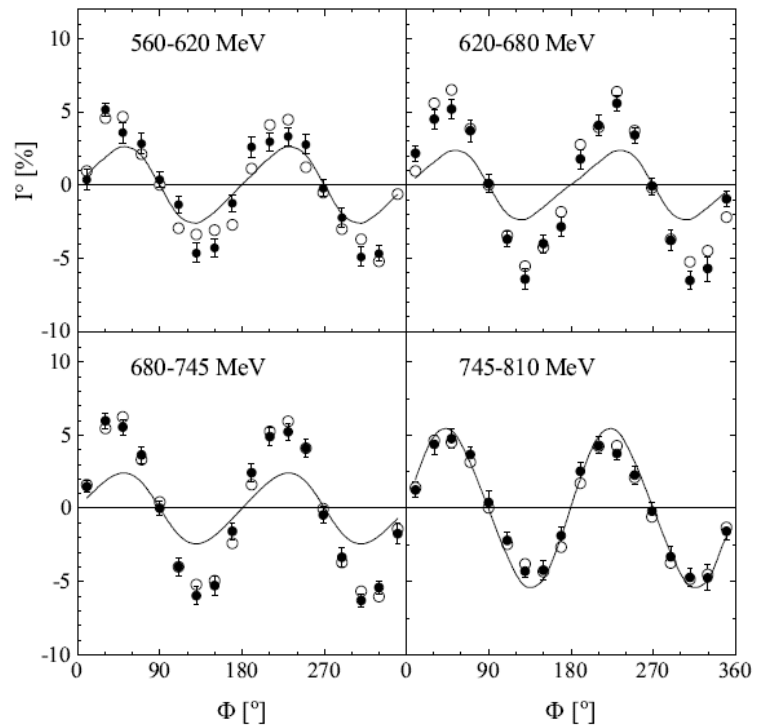
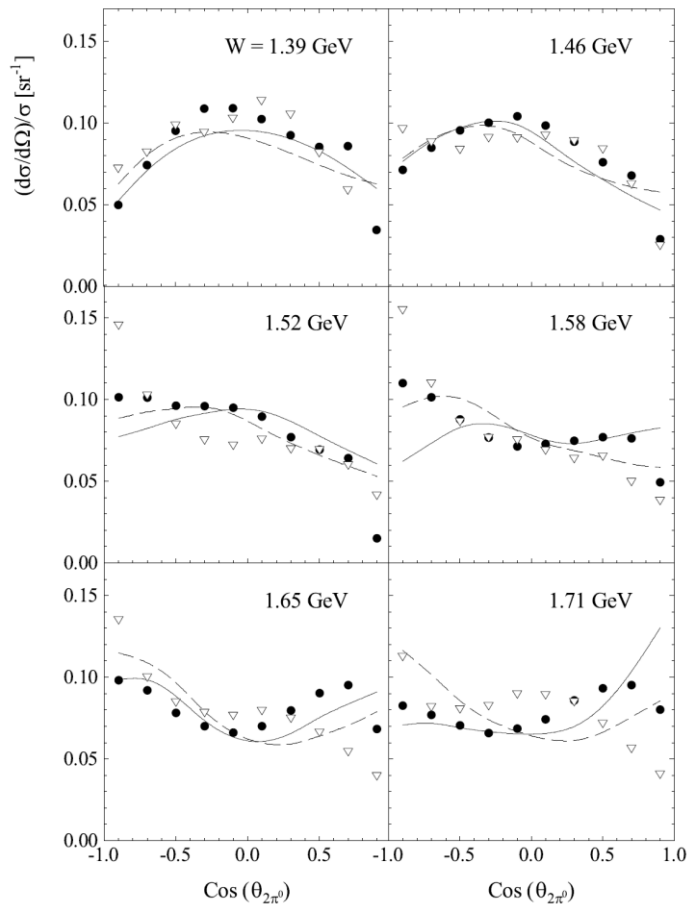
Для сравнения $\gamma d \rightarrow \pi^0 d$, $\gamma d \rightarrow \pi^0 np$



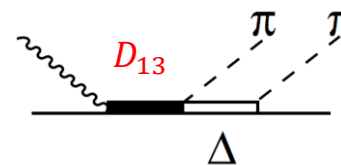
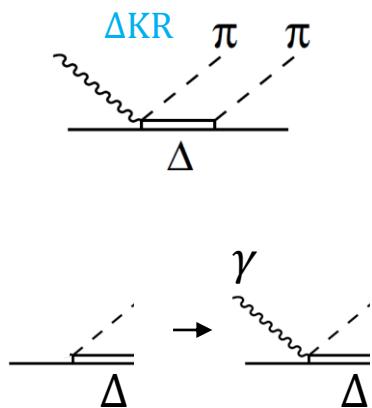
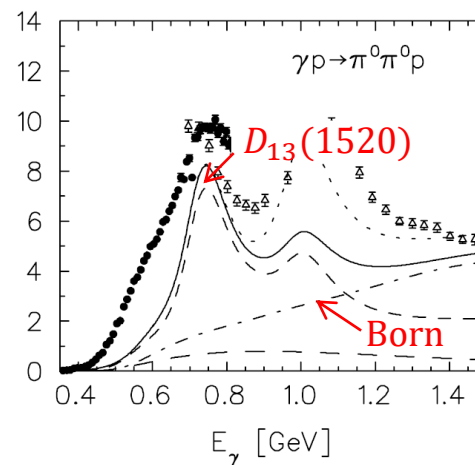
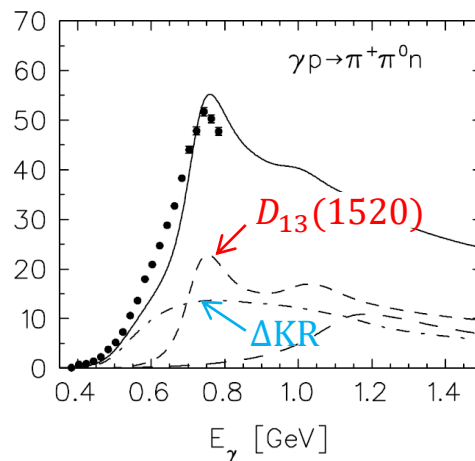
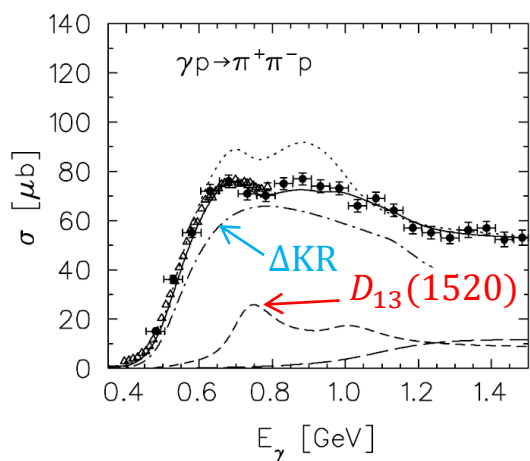
$$\sigma(\gamma d \rightarrow \pi^0 d) \approx \frac{1}{2.5} \sigma(\gamma d \rightarrow \pi^0 np)$$

Модель $\gamma N \rightarrow \pi\pi N$

Угловые распределения

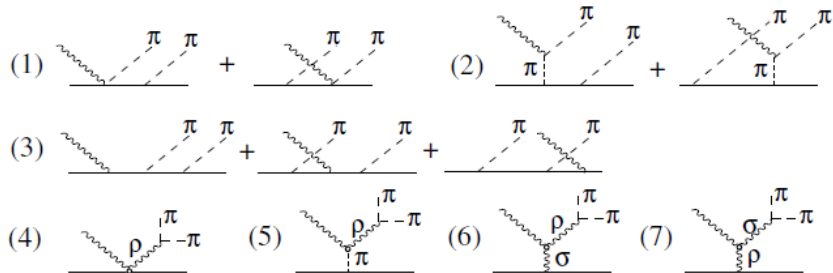


Фоторождение $d^*(2380)$ в реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$



Модель $\gamma N \rightarrow \pi\pi N$

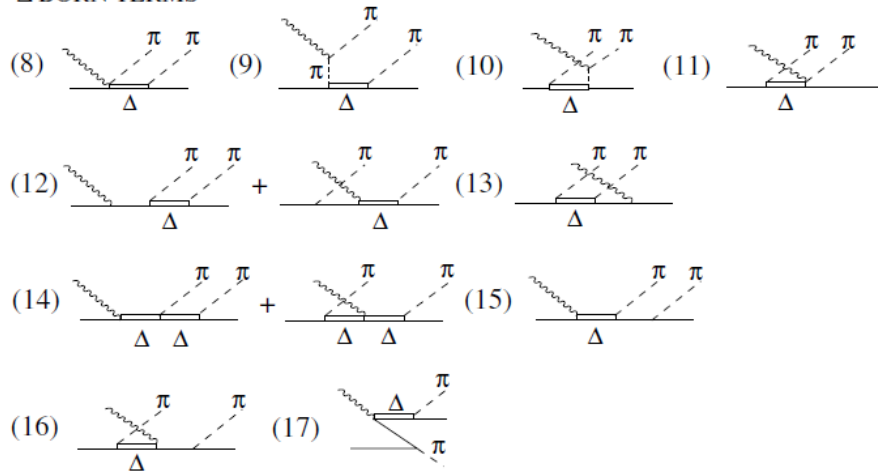
N-BORN TERMS



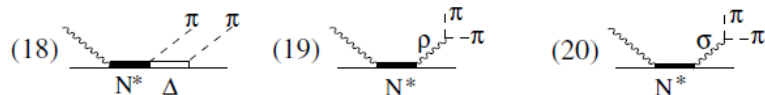
$$t = t_{\text{Борн}} + t_{\text{Рез}}$$

Все резонансные параметры – из PDG 2000

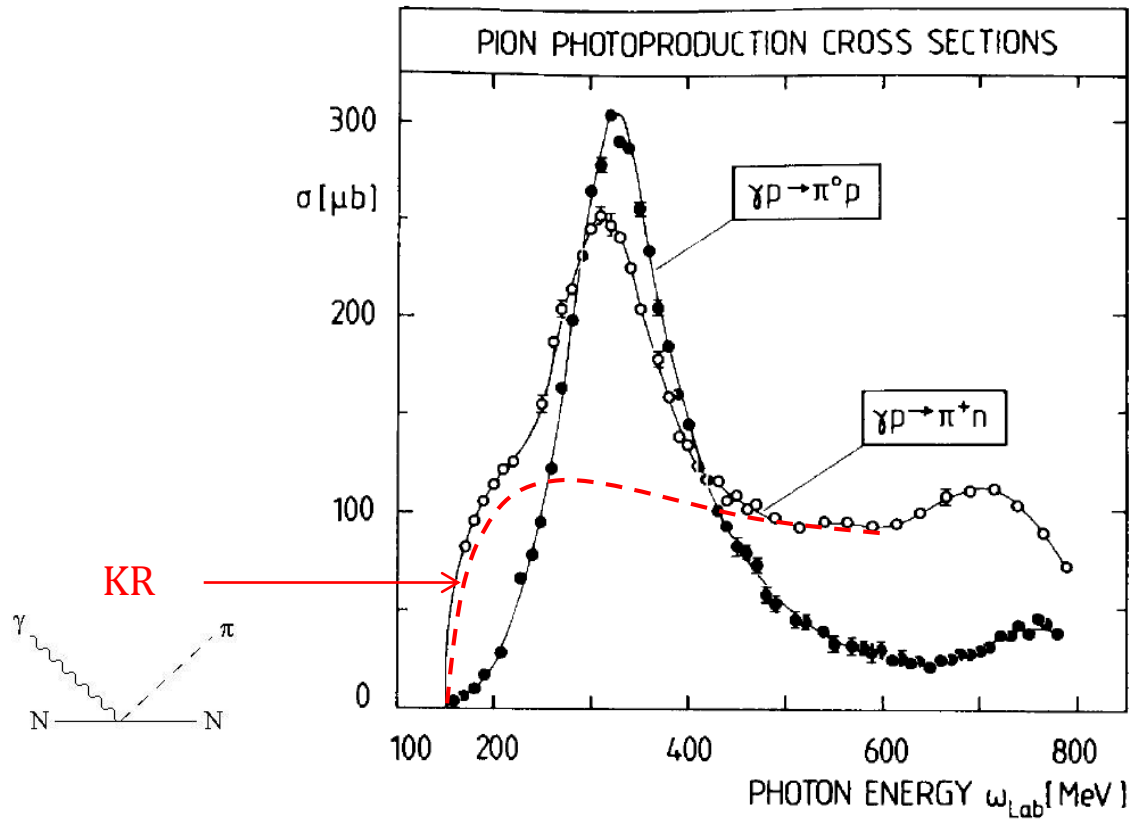
Δ -BORN TERMS



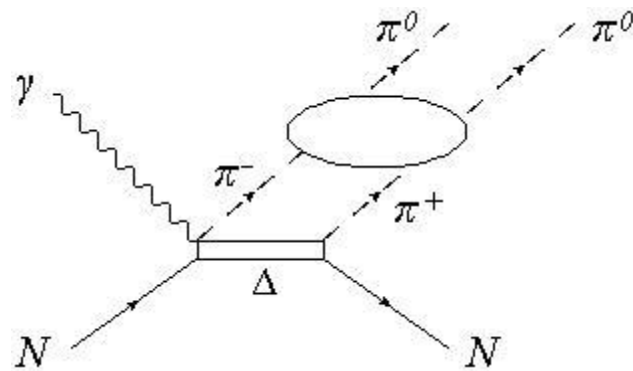
RESONANCE TERMS



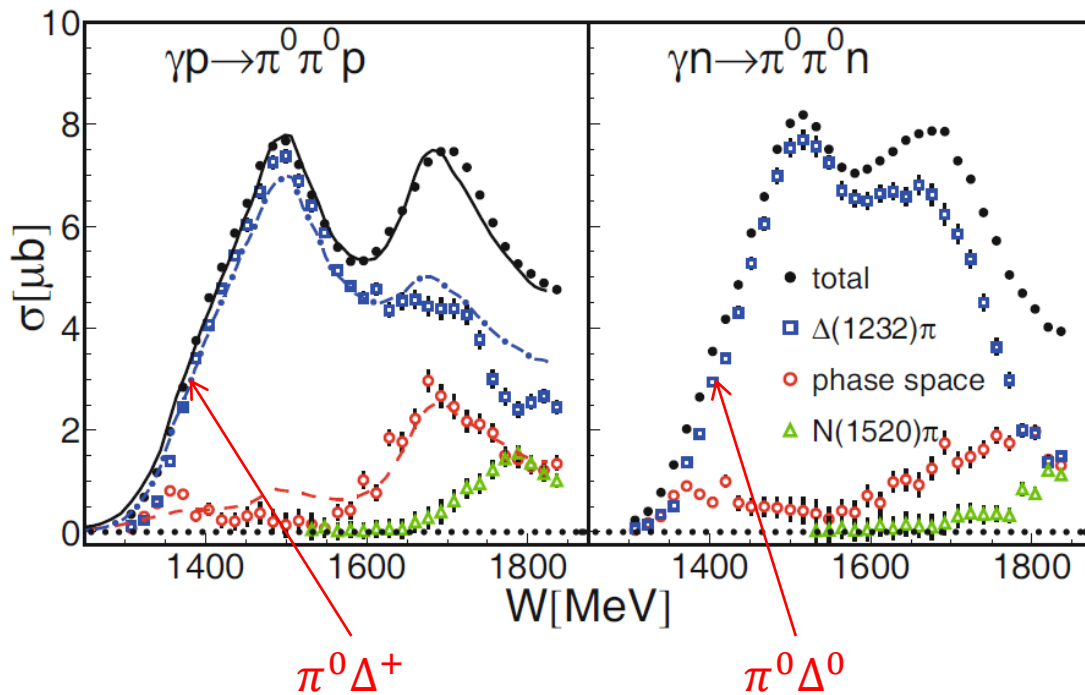
Для сравнения $\gamma N \rightarrow \pi N$



Модель $\gamma N \rightarrow \pi\pi N$

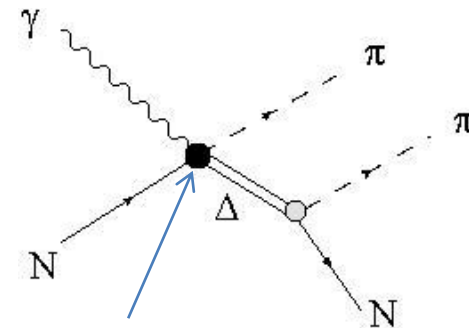


Модель $\gamma N \rightarrow \pi\pi N$



$$t = t^{\text{Борн}} + t^{\text{Рез}} + t^{\Phi\text{ОН}}$$

$$J^\pi = 3/2^\pm$$



$$\sum_{n=0}^3 C_n \left(\frac{W - M_N - 2m_\pi}{M_N + 2m_\pi} \right)^n$$

Эксп. данные – MAMI (2015)