



光子ビームで探る

6クォーク粒子「ダイバリオン」

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

大阪大学核物理研究センター
石川貴嗣

高エネルギーQCD・核子構造勉強会
2025年7月4日





発表内容

- ダイバリオンの分光
- $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応
- $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 d$ 反応
- 今後の展望
- まとめ
- $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応





大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

ダイバリオンの分光

ダイバリオン の分光



T. Ishikawa

4 Jul 2025



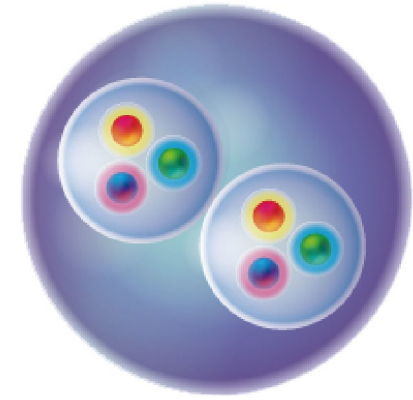
ダイバリオンの分光

ダイバリオンとは？

バリオン数が $B = 2$ のハドロン

重陽子 が最初に確立されたダイバリオン

陽子と中性子が弱く束縛した
スピン $J = 1$ 、アイソスピン $I = 0$ の系



ダイバリオンの内部構造（クォークがどのように運動しているか）はQCDの非摂動領域の振る舞いの理解に重要

ハドロンがどのようにクォークから形成されるか

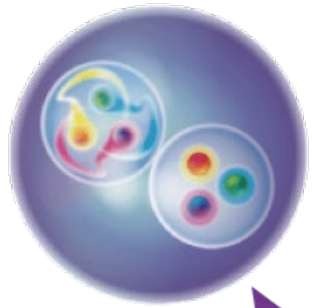




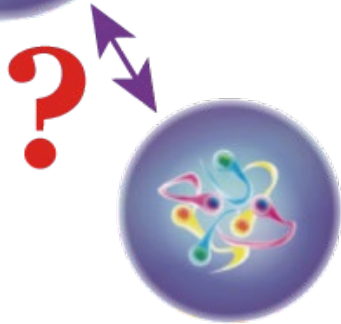
ダイバリオンの分光

ダイバリオンの内部構造

クォーク内部運動の変化有効自由度は何か？



二つのバリオンの分子のような状態
陽子と中性子からなる重陽子



空間的にコンパクトな6クォーク状態

「強い力から物質が形成され、進化していくメカニズムのおおもと」を調べる





ダイバリオンの分光

$d^*(2380)$ ダイバリオン

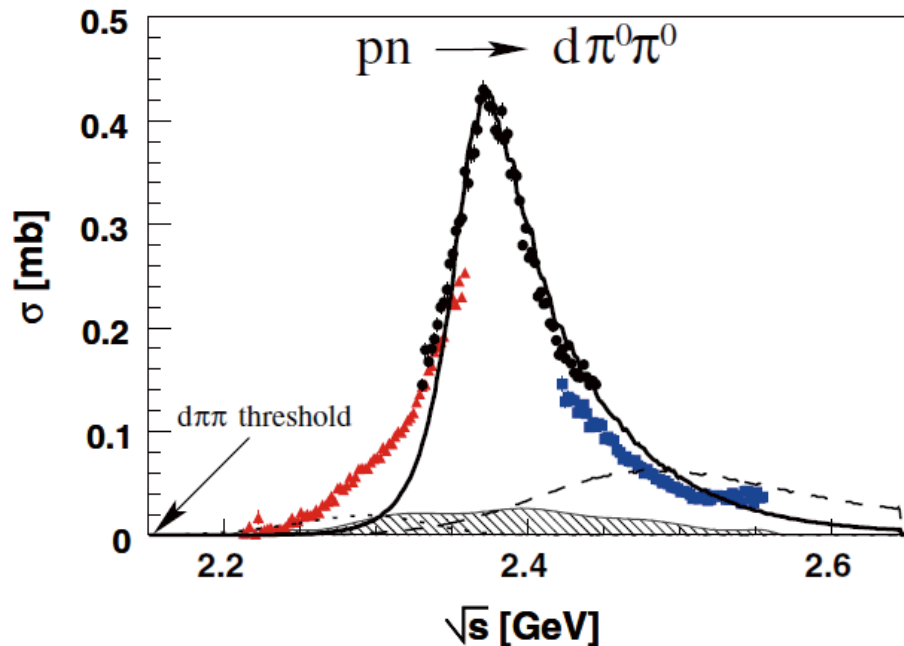
$pn \rightarrow d^*(2380) \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ で観測

$$m = 2.37 \text{ GeV}, \Gamma = 0.07 \text{ GeV}, I = 0, J^\pi = 3^+$$

M. Bashkanov *et al.* (CELSIUS/WASA), PRL102, 052301 (2009).

P. Adlarson *et al.* (WASA-at-COSY), PRL106, 242302 (2011).

$pn \rightarrow pn$ の偏極分解能でヒントはあった **T. Kamae, PRL38, 468 (1977).**



6クォーク状態

$$R = \frac{\hbar c}{\sqrt{2\mu B}} \sim 0.6 \text{ fm}$$

μ : 換算質量

B : 束縛エネルギー

F. Piccini, School in Erice (2015).

and/or

$\Delta\Delta$ の準束縛状態

F.J. Dyson and N.-H. Xuong,

PRL13, 815 (1964). T. Ishikawa

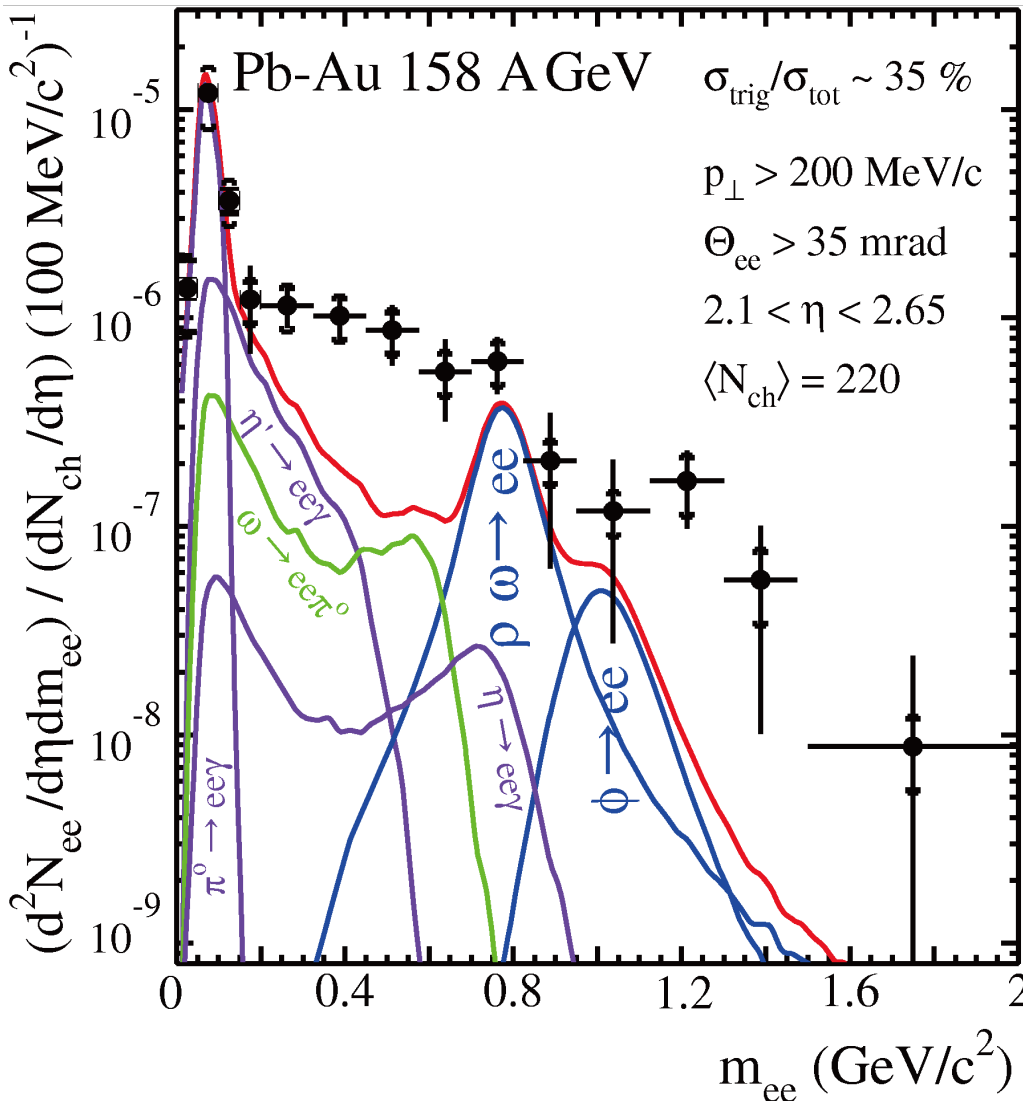




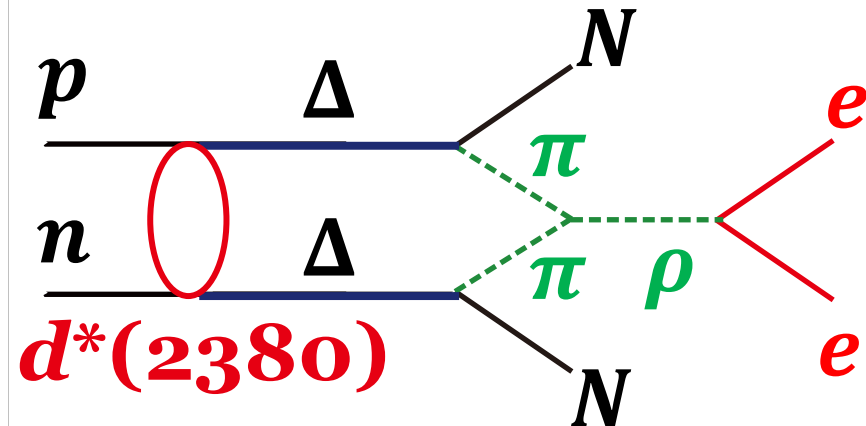
ダイバリオンの分光

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

$d^*(2380)$ ダイバリオン



G. Agakichiev et al.
(CERES collaboration),
Phys. Lett. B 422, 405 (1998).



M. Bashkanov and H. Clement,
Eur. Phys. J. A 50, 107 (2014).

T. Ishikawa

7
4 Jul 2025



ダイバリオンの分光

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

ダイバリオンの内部構造の理解には、励起スペクトルの確立が重要

ストレンジなしのダイバリオン六重項

F.J Dyson and N.-H. Xuong,
PR.L13, 815 (1964).

スピン・フレーバーSU(6)対称性

観測

J-PARC E79

$\mathcal{D}_{IJ}$	$\mathcal{D}_{01}$	$\mathcal{D}_{10}$	$\mathcal{D}_{12}$	$\mathcal{D}_{21}$	$\mathcal{D}_{03}$	$\mathcal{D}_{30}$
BB	NN	NN	ΔN	ΔN	$\Delta\Delta$	$\Delta\Delta$
M [MeV]	1878	1878	2160	2160	2348	2348

3S_1 重陽子

1S_0 NN 仮想状態

$pp \rightarrow \pi^- \pi^+ pp$ で観測?

P. Adlarson et al., PRL121,
052001 (2018).

$\pi^+ d \rightarrow pp$ で観測(?)

B.S. Neganov and L.B. Parfenov,
JETP7, 528 (1958).



T. Ishikawa

4 Jul 2025



ダイバリオンの分光

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

D_{12} ダイバリオン

対応するピークはきれいに観測されている
部分波展開から 2^+ が得られている

$\pi^+ d \rightarrow pp$ R. Arndt et al.,
PRC48, 1926 (1993).

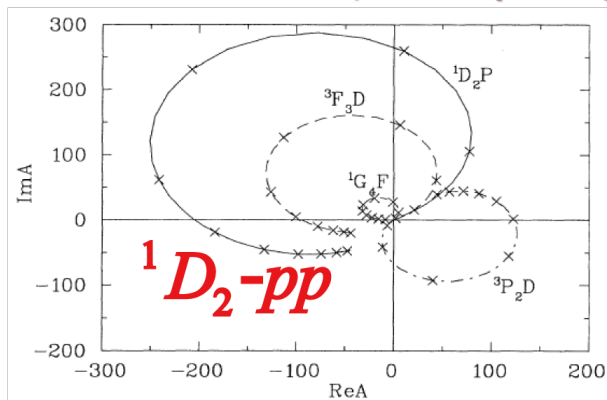


FIG. 7. Argand plot of dominant partial-wave amplitudes. The X points denote 50 MeV steps. All amplitudes have been multiplied by a factor of 10^3 .

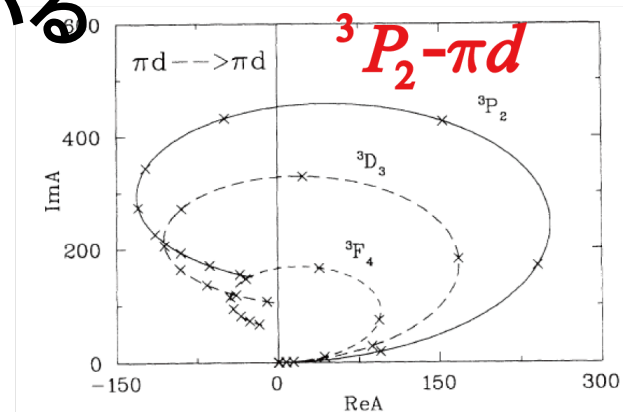


FIG. 7. Argand plot of the dominant πd partial-wave amplitudes 3P_2 , 3D_3 , and 3F_4 which correspond to the 1D_2 , 3F_3 , and 1G_4 pp states, respectively. (Compare Fig. 7 of Ref. [3]). The X points denote 50 MeV steps. All amplitudes have been multiplied by a factor of 10^3 .

$\pi^\pm d \rightarrow \pi^\pm d$ R. Arndt et al.,
PRC50, 1796 (1994).

SAIDグループにより D_{12} の共鳴パラメータが
 $pp \rightarrow pp$ を含めて決定される

C.H. Oh et al., PRC56, 635 (1997).



T. Ishikawa

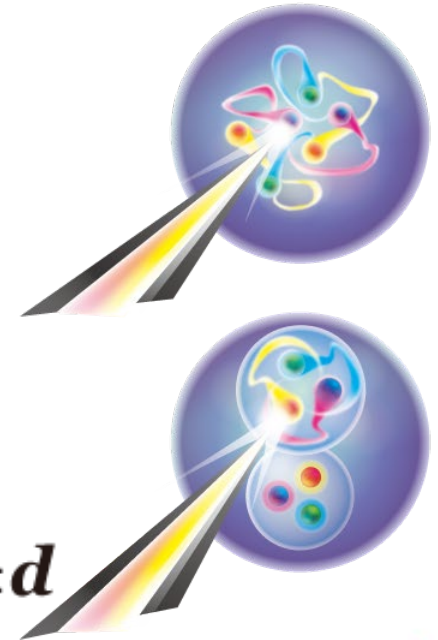
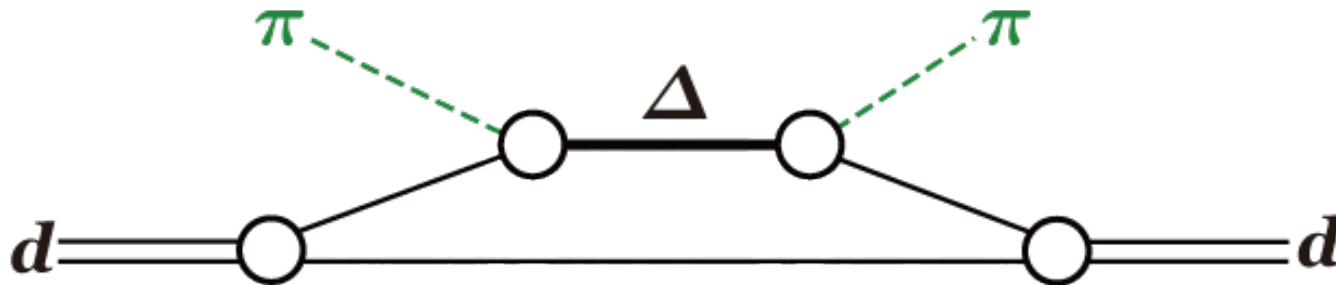
4 Jul 2025



ダイバリオンの分光

D_{12} ダイバリオン

ダイバリオンという解釈は確立されていない



重陽子中の核子を標的とした準自由過程での Δ バリ
オンの生成が運動学的に分離できない





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

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

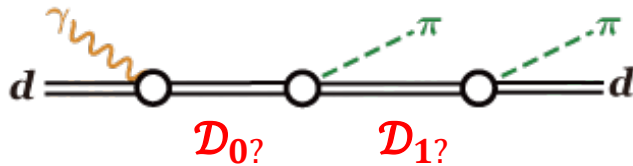




$$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$$

重陽子標的でのコヒーレントなダブルメソン光生成

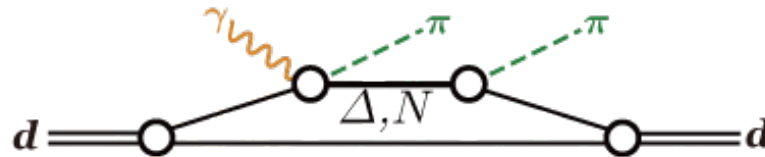
(1) dibaryon production



angular distribution of
deuteron emission

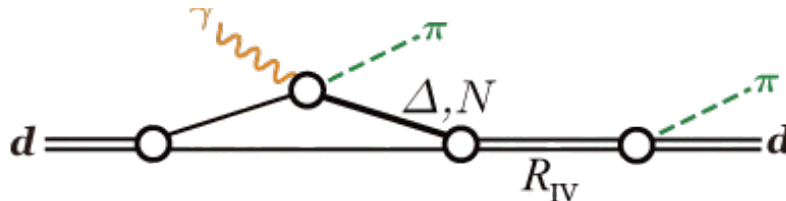
almost flat

(2) QF $\pi\pi$ production



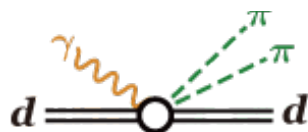
backward peaking

(3) QF π production



sideway peaking

(4) direct $\pi\pi$ production



almost flat

kinematically separable!



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

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

加速器

Electron Beam

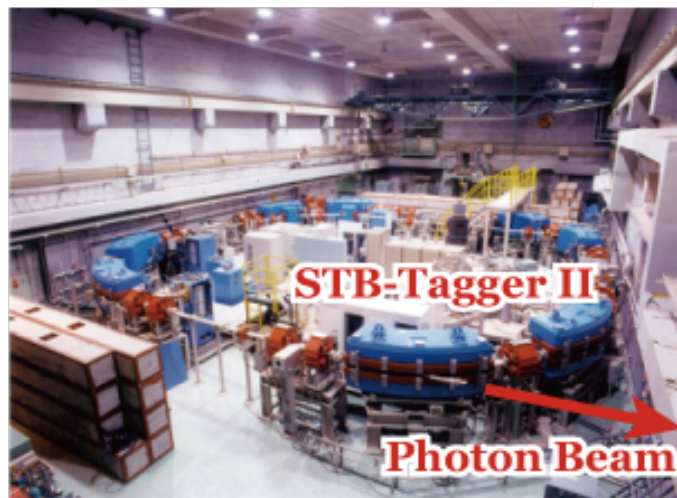
LINAC 150 MeV

Booster Ring 1200 MeV (max)

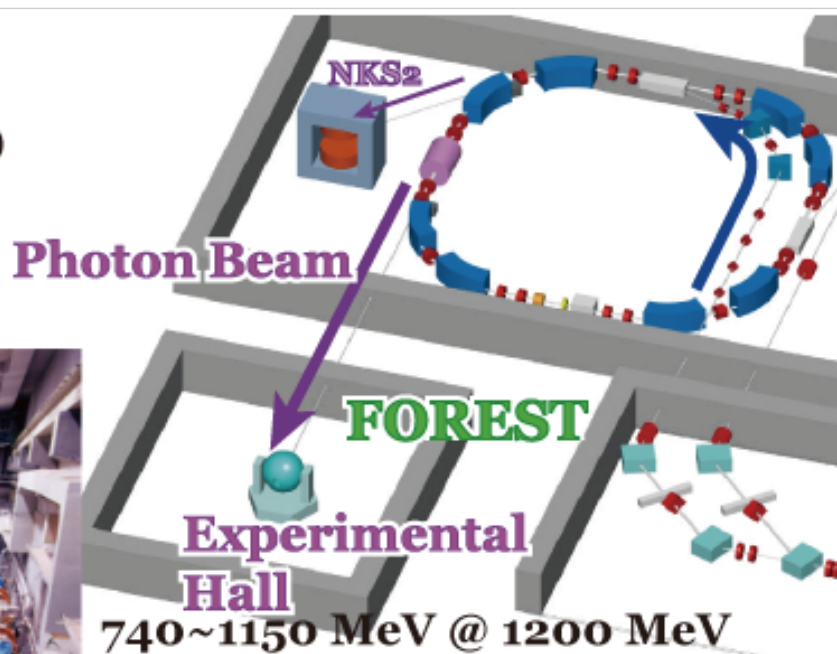
Photon Beam

Bremsstrahlung

Tagged



1.3 GeV Booster STorage Ring



740~1150 MeV @ 1200 MeV
~20 MHz (photon: 10 MHz)
 $W_{\gamma d} = 2.50 \sim 2.80$ GeV

570~890 MeV @ 930 MeV
~2.8 MHz (photon: 1.2 MHz)
 $W_{\gamma d} = 2.38 \sim 2.61$ GeV

T. Ishikawa et al., NIMA 622, 1 (2010); T. Ishikawa et al., NIMA 811, 124 (2016);
Y. Matsumura et al., NIMA 902, 103 (2018); Y. Obara et al., NIMA 922, 108 (2019).

T. Ishikawa



4 Jul 2025

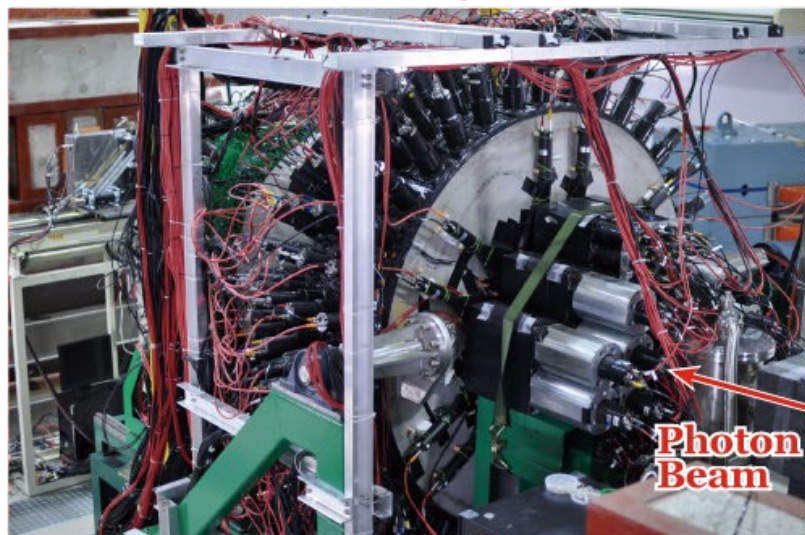


大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

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

電磁カロリメータ

終状態粒子の検出



Target: 45 mm thick LH2 & LD2

T. Ishikawa et al., NIMA 832, 108 (2016).

FOREST electro-magnetic
calorimeter

T. Ishikawa



14
4 Jul 2025



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

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

主なメンバー



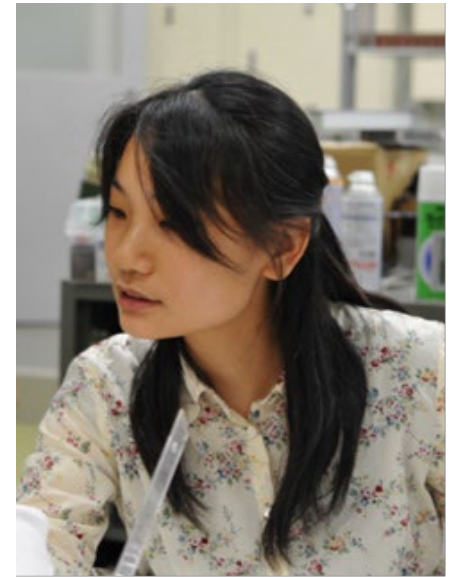
笠木



清水



山崎



藤村



T. Ishikawa

4 Jul 2025



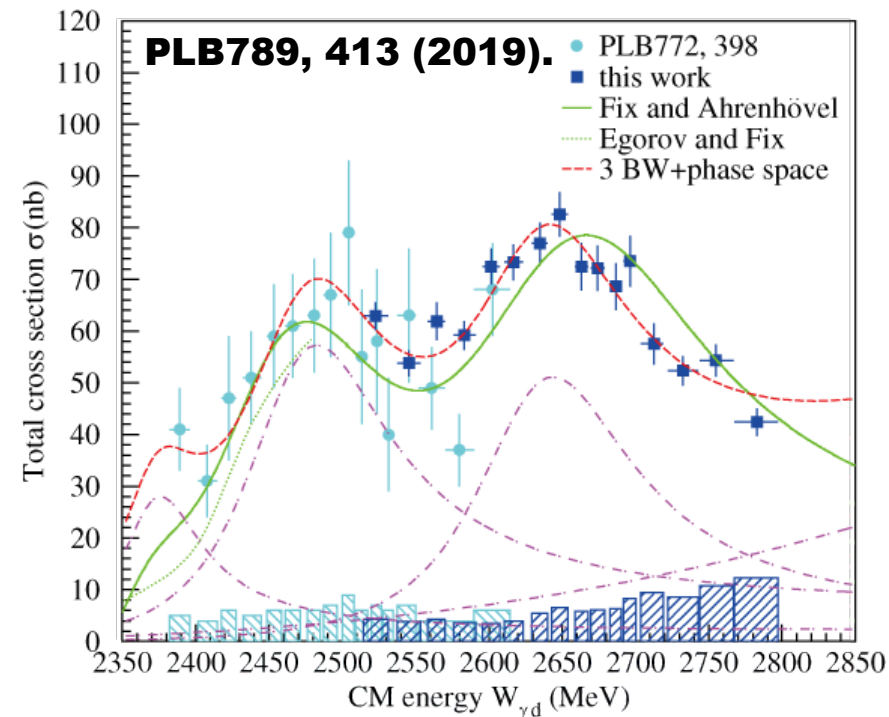
$$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$$

全断面積 σ

入射エネルギー 0.55~1.15 GeV

重心エネルギー 2.47 GeVと2.63 GeVにバンプ

この2ピーク構造は素過程 $\gamma N \rightarrow \pi^0 \pi^0 N$ と同じ



単純に考えると
重陽子中の核子を標的とし
た準自由過程



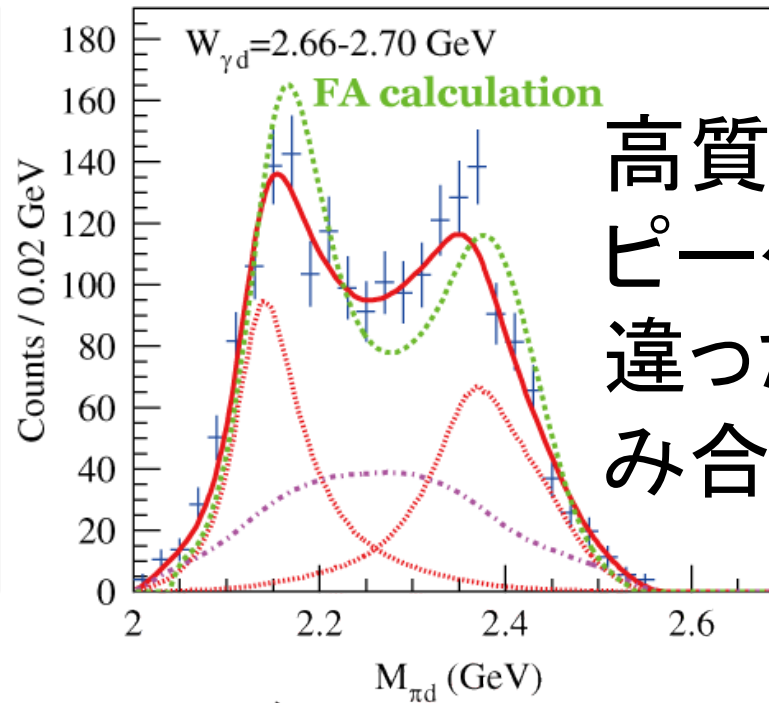
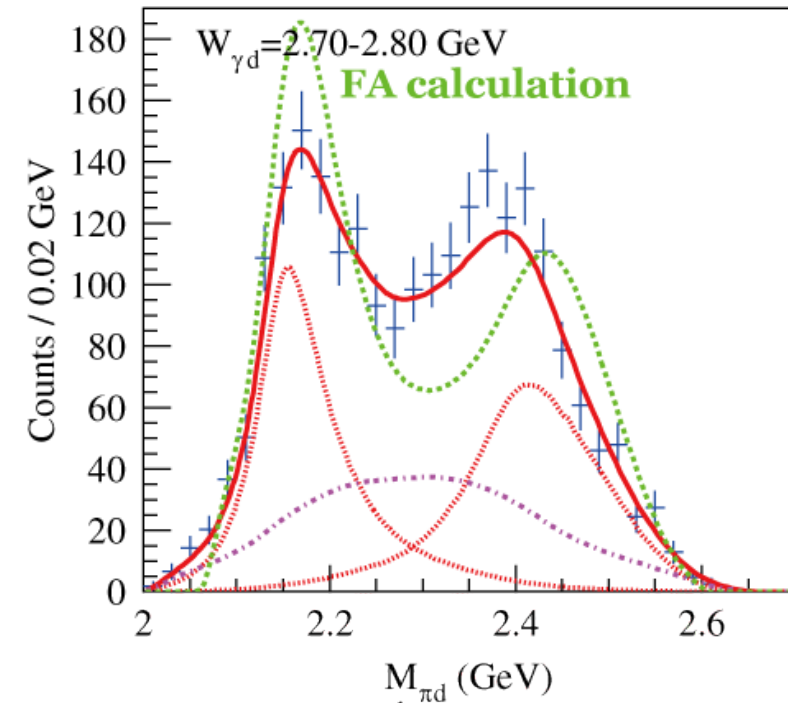


$$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$$

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

πd 不変質量分布

PLB789, 413 (2019).



高質量側の
ピークは間
違った πd の組
み合わせ

$$N(m_1) = \int_{m_2} \left(\alpha \left| L_{M,\Gamma}(m_1) + L_{M,\Gamma}(m_2) \right|^2 + \textcolor{violet}{C} \right) V_{\text{PS}}(m_1, m_2) dm_2$$

convoluted with 11-MeV- σ Gaussian

Breit-Wigner amplitude:

$$L_{M,\Gamma}(m) = \left(m^2 - M^2 + iM\Gamma \right)^{-1}$$

mass 2140 ± 11 MeV & width 91 ± 11 MeV

$\mathcal{D}_{12}$ or $\Delta + N$

T. Ishikawa



4 Jul 2025

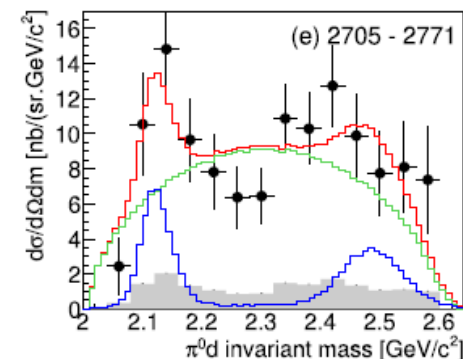
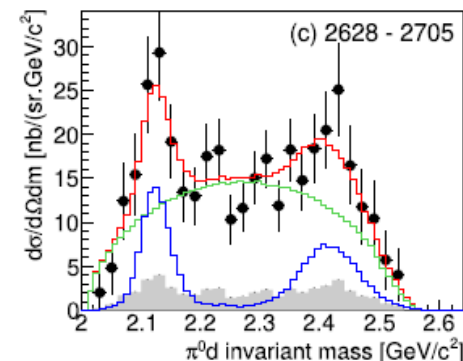
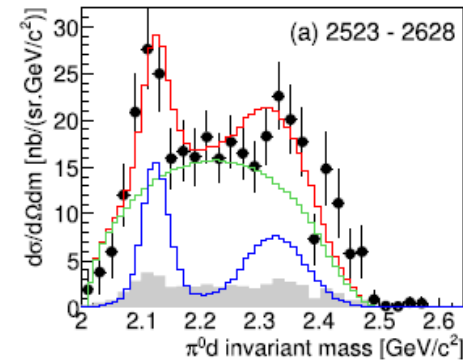
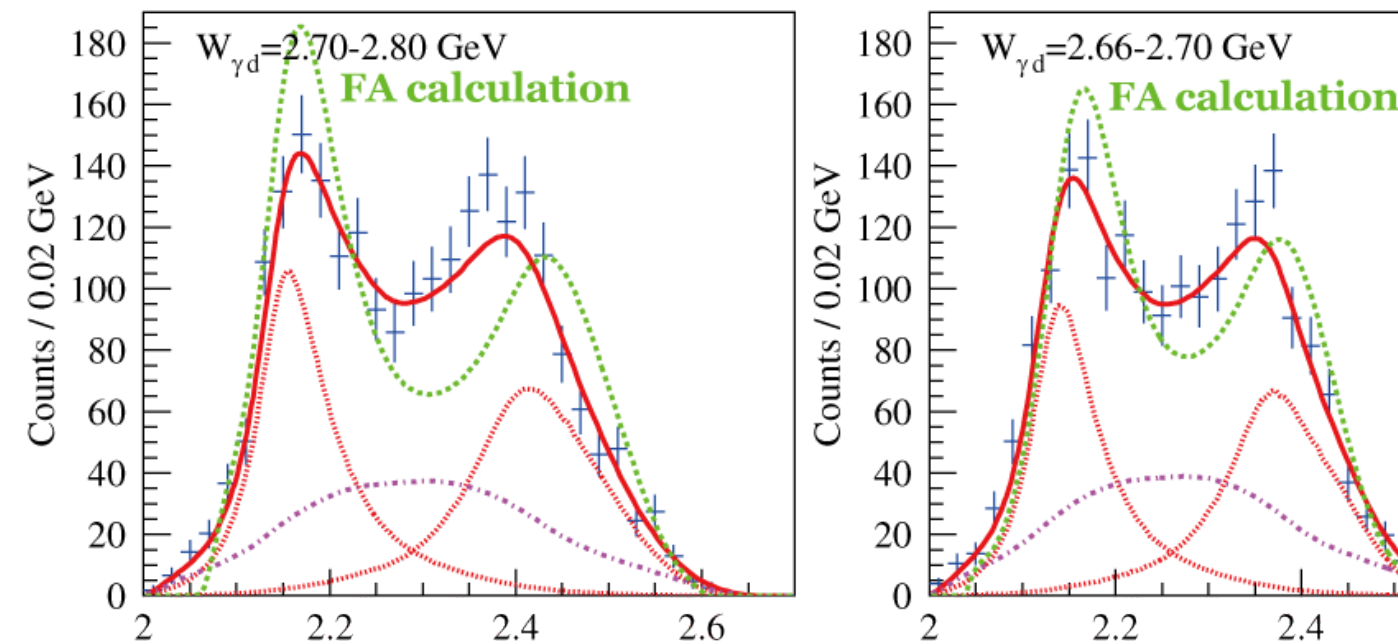


大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

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

πd invariant mass distribution

T.C. Jude et al.,
PLB832, 137277 (2022).



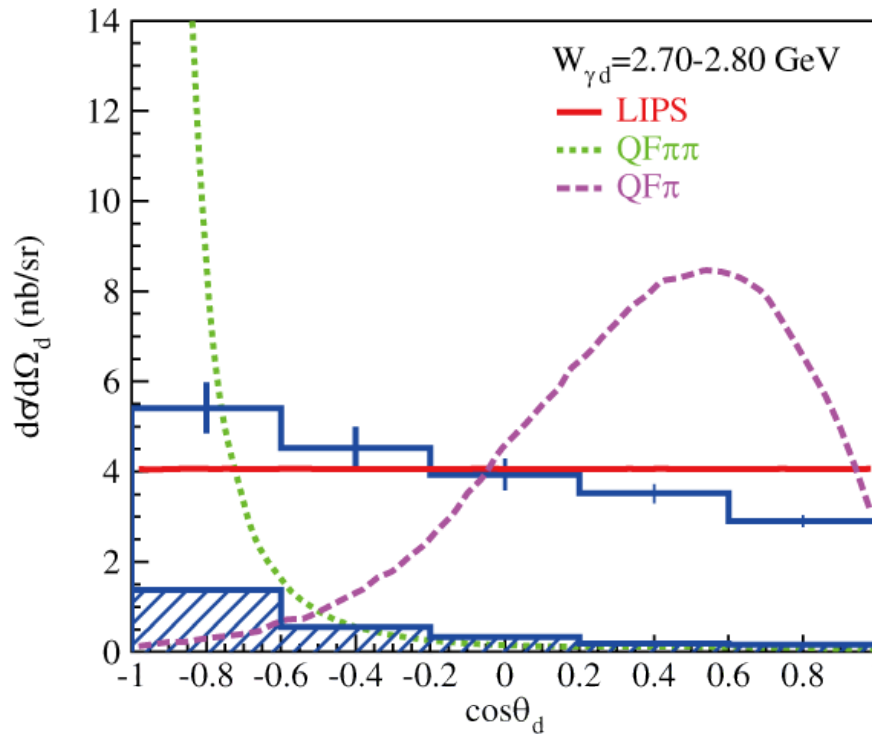
BonnのBGOOD実験では91
MeVよりもっと細い幅 20 MeVの
ピークを観測

mass 2140 ± 11 MeV & width 91 ± 11 MeV



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

重陽子の放出角分布 (重心系)



QF $\pi\pi$ production
(FA calculation)

QF π production

pure phase space
(direct $\pi\pi$ production)

PLB789, 413 (2019).

experimental data suggests a sequential process:

$$\gamma d \rightarrow R_{IS} \rightarrow \pi^0 R_{IV} \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$$

(rather flat angular distribution & 2.15-GeV peak in $M_{\pi d}$)

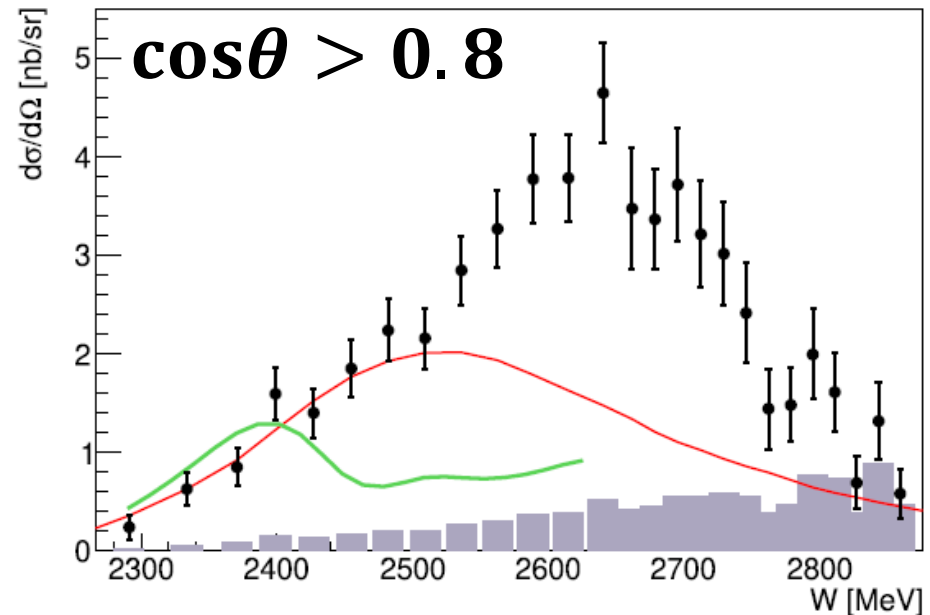
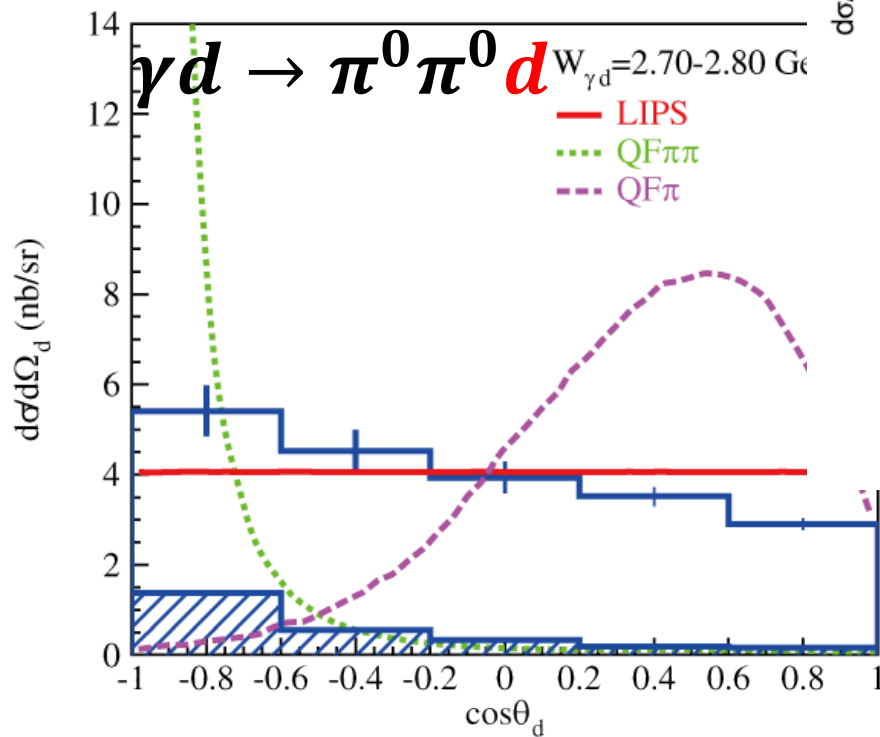




大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

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

Angular distribution of



**T.C. Jude et al., PLB832,
137277 (2022).**

PLB789, 413 (2019).

覆う角度領域は異なるが、前方に重陽子が放出される微分断面積は大きい



T. Ishikawa

4 Jul 2025



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

全断面積 σ

入射エネルギー 0.55~1.15 GeV

重心エネルギー 2.47 GeVと2.63 GeVにバンプ

この2ピーク構造は素過程 $\gamma N \rightarrow \pi^0 \pi^0 N$ と同じだが

重陽子の放出角分布から中間
状態はダイバリオン

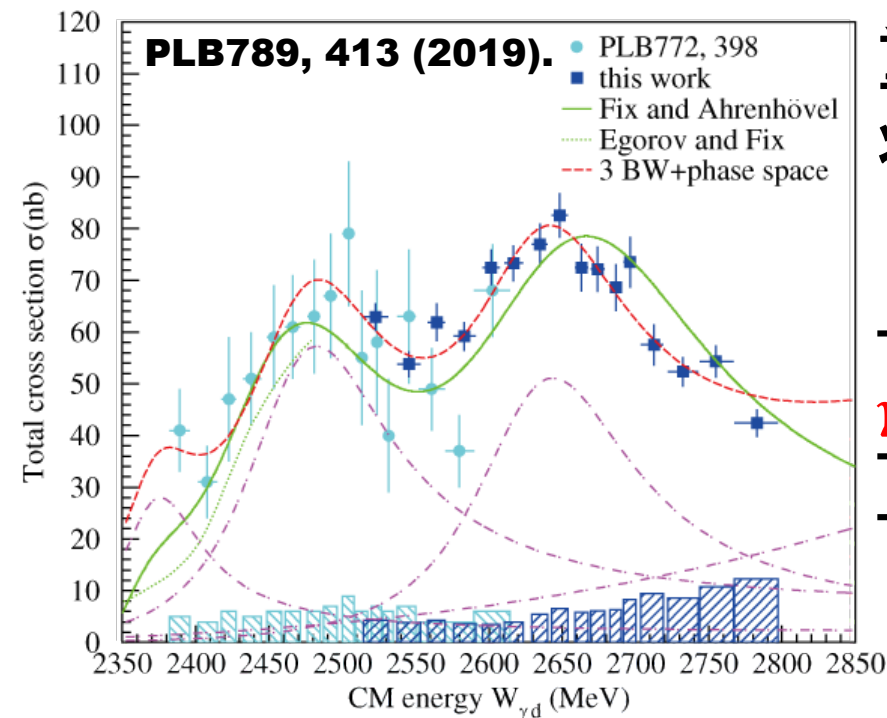
ドイツ Bonn BGO-OD 実験で追認

T.C. Jude et al., PLB832, 137277 (2022).

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ でも重陽子の角分布は一樣

T. Ishikawa et al., PRC104, L052201(2021);

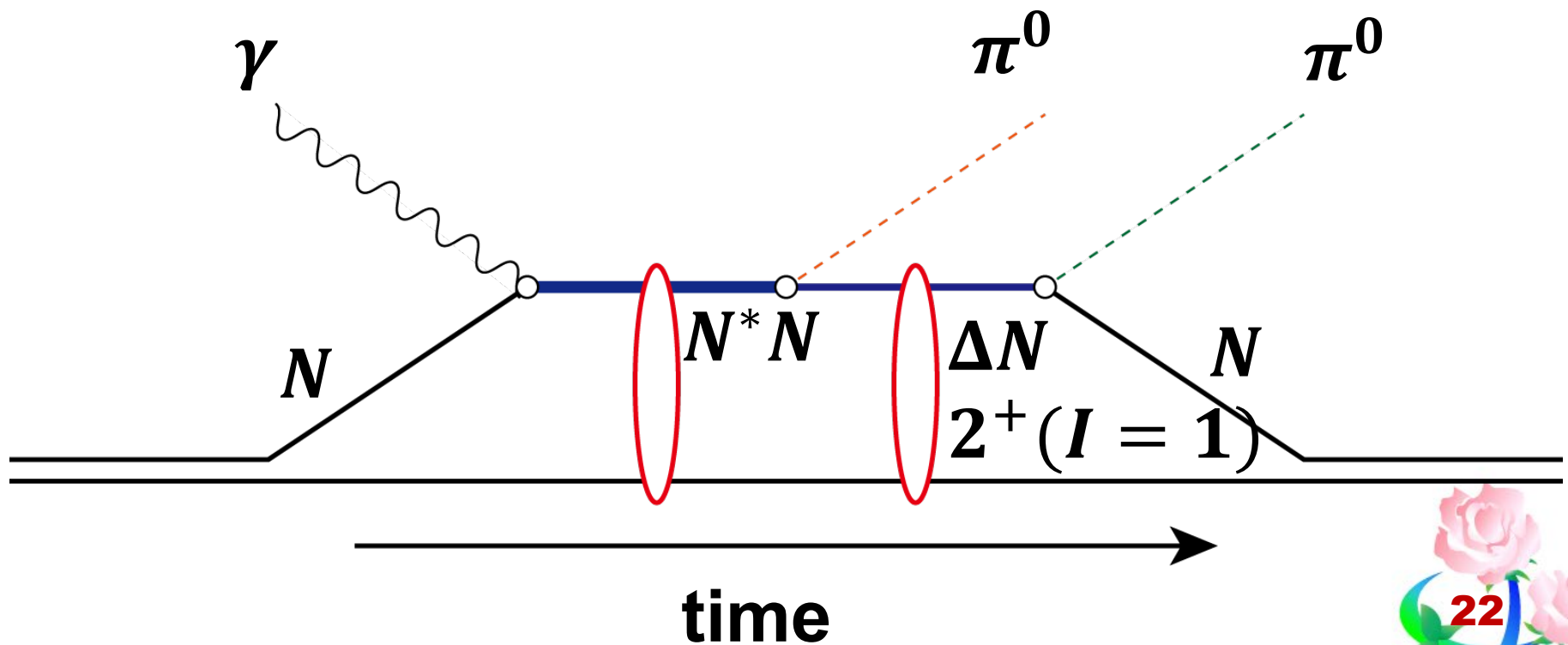
T. Ishikawa et al., PRC105, 045201 (2022).





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

重陽子の放出角分布は比較的一様
反応の各段階で二バリオン相関状態が形成されている?





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

励起スペクトル

$NP_{13}(1720)$
 $NF_{15}(1680)$ 2.62~2.66
 $ND_{15}(1675)$

$NS_{11}(1535)$ 2.46~2.47
 $ND_{13}(1520)$

$NP_{11}(1440)$ 2.38

doorway states?

photo-
excitation

2.63 $1^+, 2^-$

2.47

2.37 3^+

1.88 1^+

$I=0$

$\pi^0 \pi^0 (L=0,1)$

$\pi^0 \pi^0$

$\pi^0 \pi^0$

$\pi^0 (L=1)$

$I=1$

2.14 2^+

Dyson-Xuong
dibaryon
sextet $\mathcal{D}_{IJ}$

2.47 $\Delta\Delta$

2.35 $\mathcal{D}_{03}, \mathcal{D}_{30}$

2.16 $\mathcal{D}_{12}, \mathcal{D}_{21}$ 2.17 $N\Delta$

1.88 $\mathcal{D}_{01}, \mathcal{D}_{10}$ 1.88 NN

23



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

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



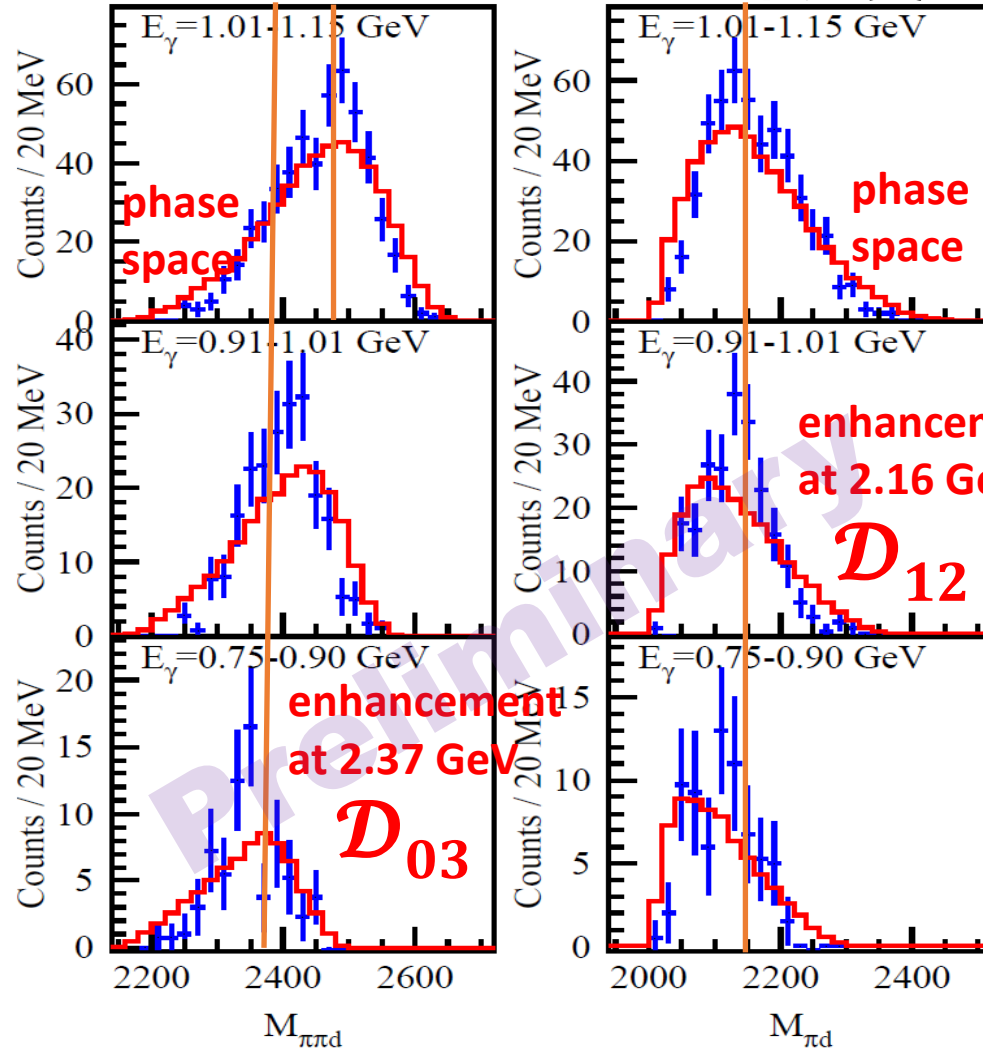


$$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 d$$

$\pi\pi d$ 不変質量分布と πd 不変質量分布

$\pi^0 \pi^0 d$ 不変質量分布

$\pi^0 d$ 不変質量分布



D_{03} に対応するピークが $\pi^0 \pi^0 d$ 不変質量分布の 2.37 GeV に見られる

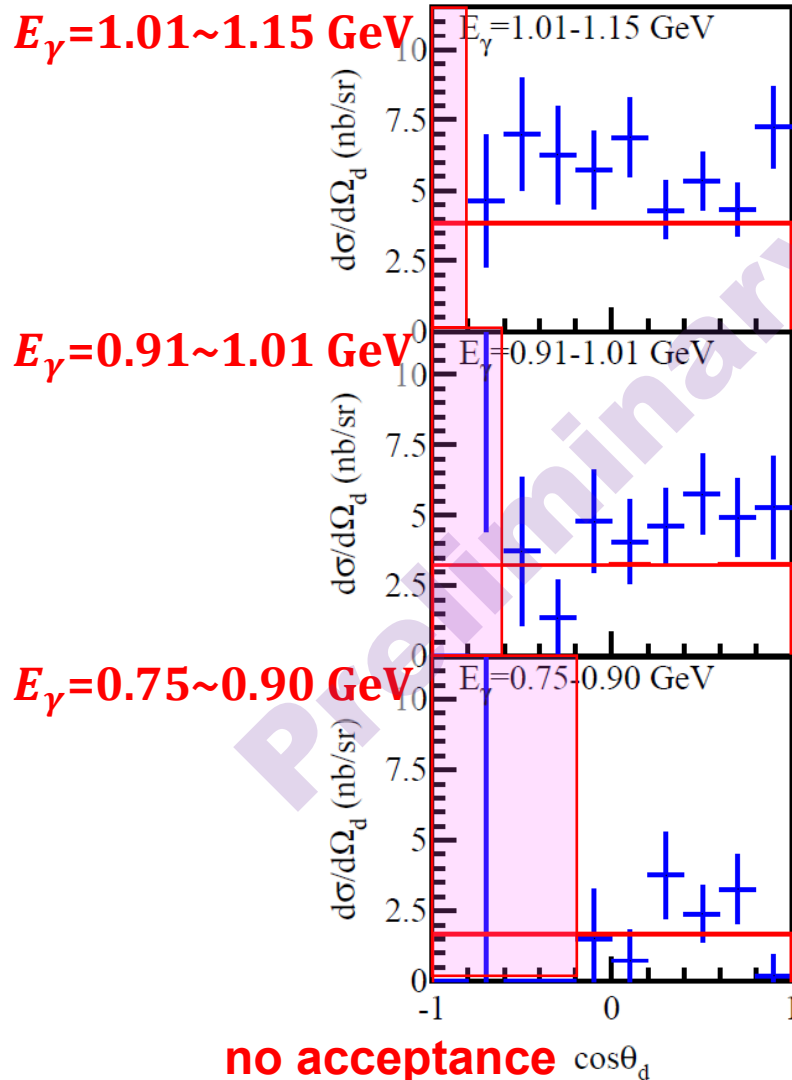
D_{12} に対応するピークが $\pi^0 d$ 不変質量分布の 2.16 GeV に見られる



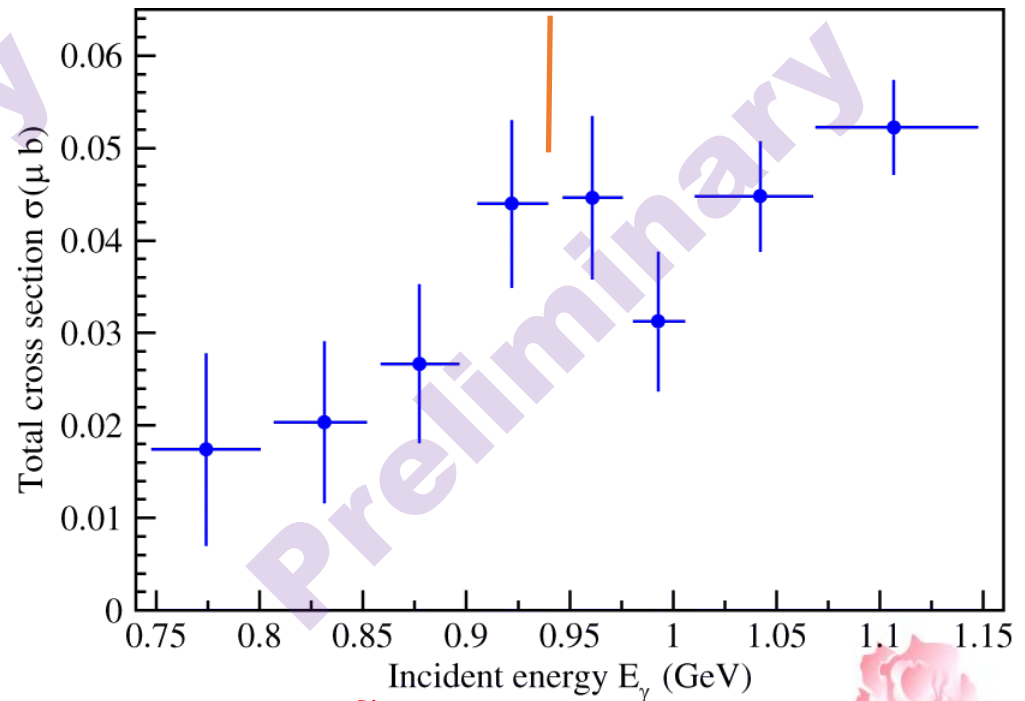


$$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 d$$

角分布と全断面積



CM系での重陽子の放出角分布:
等方的



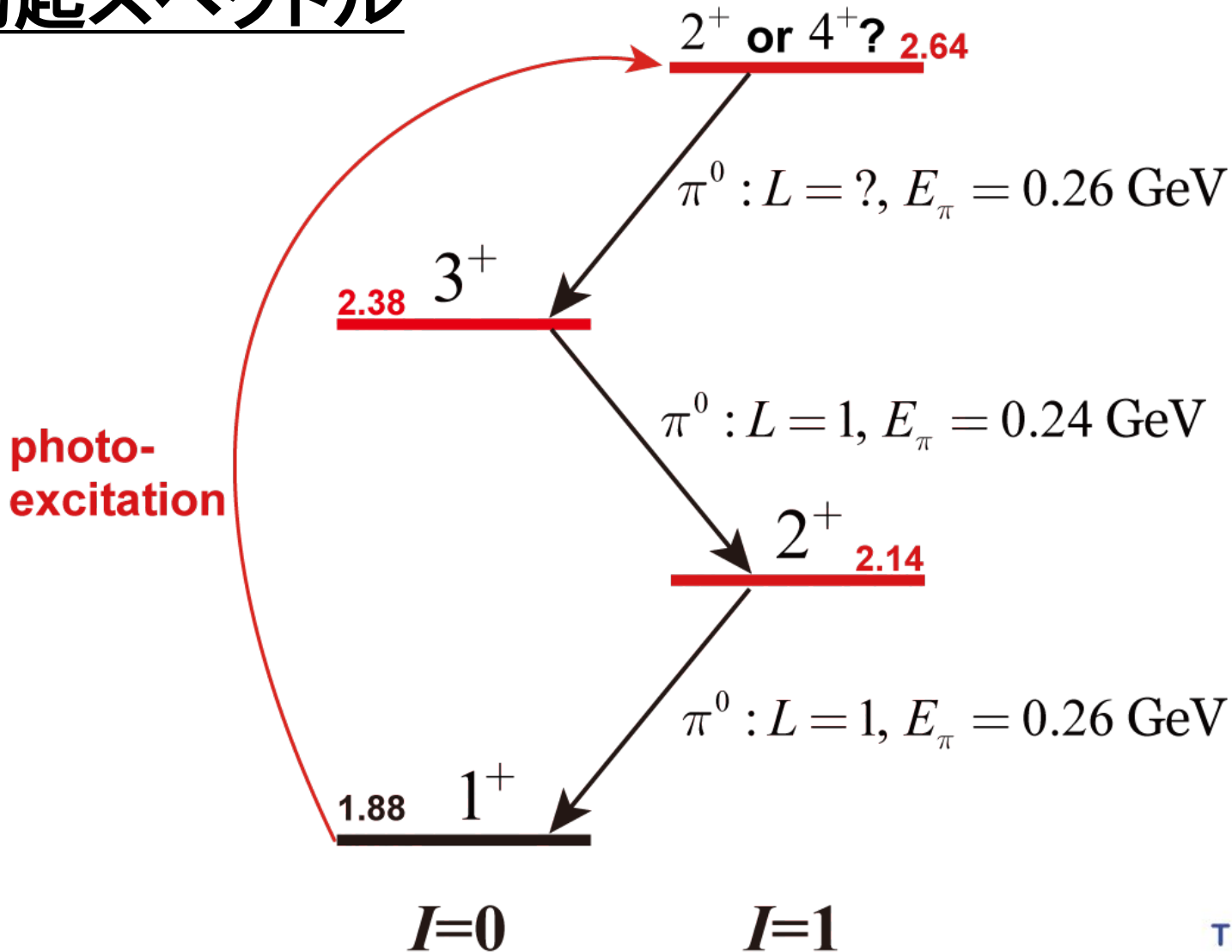
0.94 GeVで盛り上がり

$$W_{\gamma d} = M_{\pi\pi\pi d} \sim 2.64 \text{ GeV}^{26}$$



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

励起スペクトル





大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

今後の展望

今後の展望



T. Ishikawa

4 Jul 2025



今後の展望

ダイバリオンの内部構造

1. 空間的にコンパクトな6クォーク状態
2. バリオン・バリオンの分子状態

等間隔に見られる励起エネルギーが新たに

3. パイオンが有効自由度に

を示唆するように見える

スピン・アイソスピン鏡映状態で異なる質量予想

	MAS (1)	MT (1)	OY (2)	GG (3)	experiment
D_{03}	2.361 GeV	2.38 GeV	2.45 GeV	2.38 GeV	2.37 GeV
D_{30}	2.833 GeV	2.69 GeV	unbound	2.40 GeV	—





今後の展望

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

ダイバリオンの内部構造

未観測の $\mathcal{D}_{30}$ ダイバリオン ($I = 3, J = 0$)の質量がダイバリオンの内部構造に決定的な情報

1. 空間的にコンパクトな6クォーク状態
 $\mathcal{D}_{30}$ はスピン・アイソスピン鏡映状態の $\mathcal{D}_{03}$ よりずっと重い
P.J.G. Mulders, A.Th.M. Aerts, and J.J. de Swart, PRD21, 2653 (1980);
P.J.G. Mulders, and A.W. Thomas, JPG9, 1159 (1983).
2. バリオン・バリオンの分子状態
 $I = 3$ の $\Delta\Delta$ 間の相互作用は斥力
 $\mathcal{D}_{30}$ を形成しない
M. Oka, and K. Yazaki, PLB90, 41 (1980);
3. パイオンが有効自由度に
 $\mathcal{D}_{30}$ と $\mathcal{D}_{03}$ は似たような質量をもつ

A. Gal and H. Garcilazo, NPA928, 73 (2014).



T. Ishikawa

4 Jul 2025



今後の展望

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

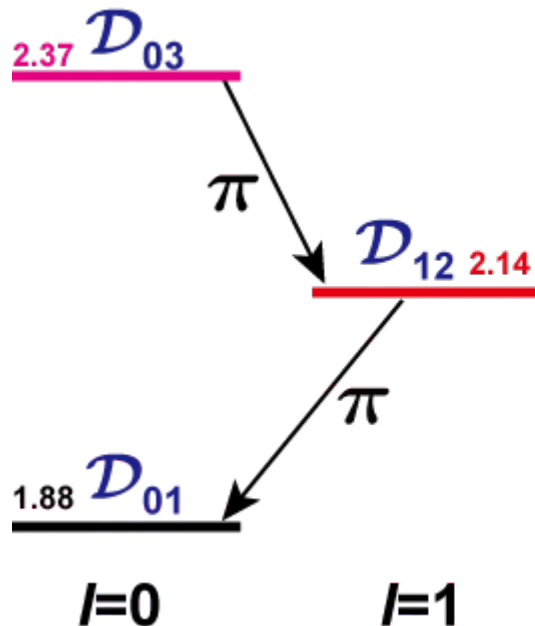
J-PARC E79 実験

T. Ishikawa *et al.*, J-PARC
proposal (2020-2021).

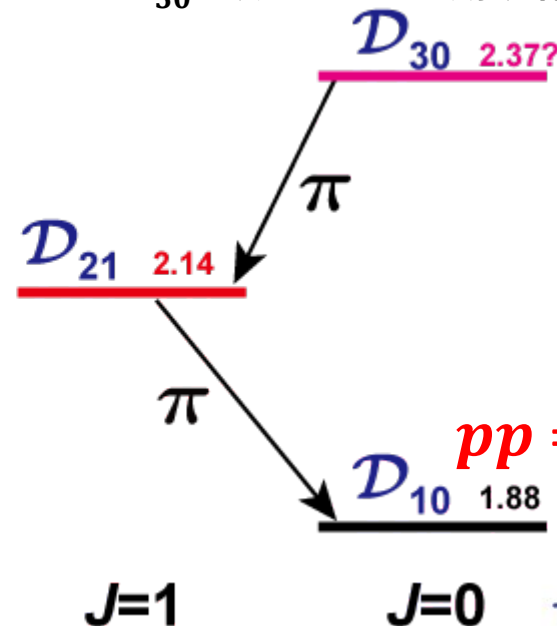
未観測の D_{30} は pp のアイソスピン状態で表されない
余剰な $\pi^- \pi^-$ 生成が必要

$$pp \rightarrow \pi^- \pi^- D_{30}^{++++} \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \pi^+ pp$$

D_{30} に期待される崩壊様式



$d^*(2380) = D_{03}$ の崩壊様式



$pp = {}^2\text{He}$



T. Ishikawa

4 Jul 2025



今後の展望

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

J-PARC E79 実験

Taskforce on the extension of the Hadron
Experimental Facility, arXiv:2110.04462 (2021).

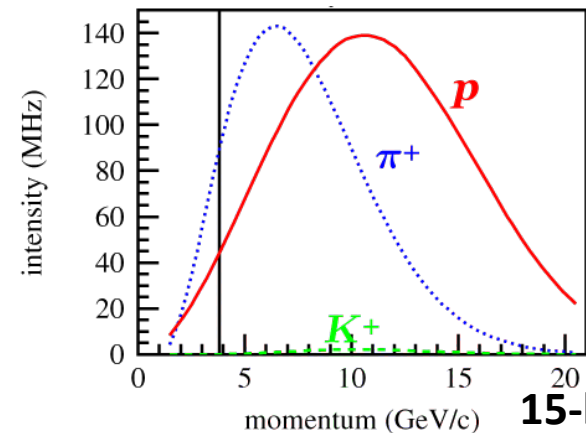
1-MHz の二次粒子である陽子を仮定

一次陽子ビーム

二次粒子生成標的

運動量: 最大 20 GeV/c
運動量の広がり: 0.1%

H. Takahashi,
private communication



T. Ishikawa

4 Jul 2025



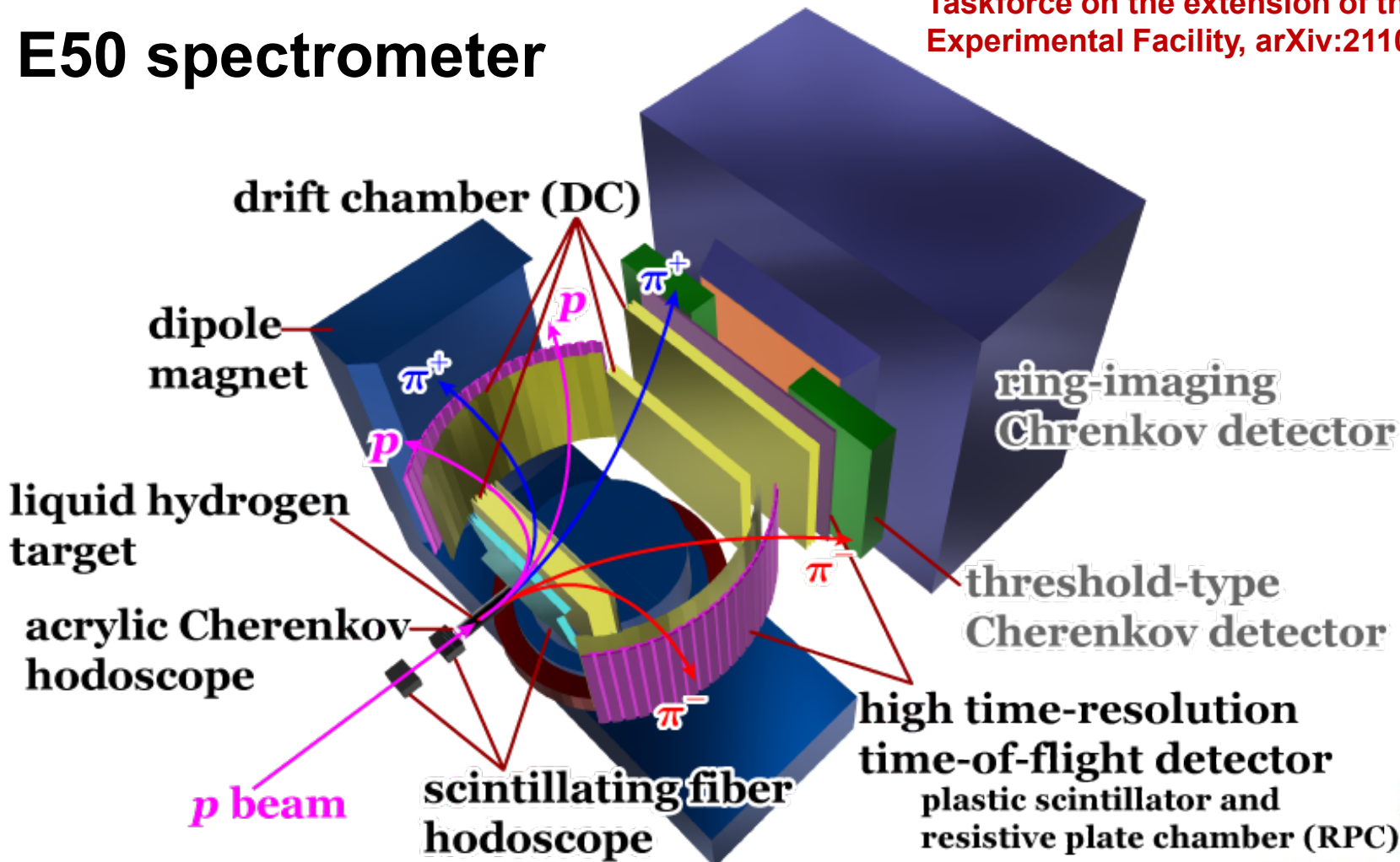
大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

今後の展望

J-PARC E79 実験

E50 spectrometer

H. Noumi *et al.*, J-PARC proposal (2013);
Taskforce on the extension of the Hadron
Experimental Facility, arXiv:2110.04462 (2021).



T. Ishikawa



4 Jul 2025



今後の展望

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

J-PARC E79 実験

T. Ishikawa et al., J-PARC proposal (2020-2021).

反応: $pp \rightarrow \pi^- \pi^- D_{30}^{++++} \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \pi^+ pp$

ビーム: 1 MHz の陽子 (5.2 s サイクルで 2 s のビーム)

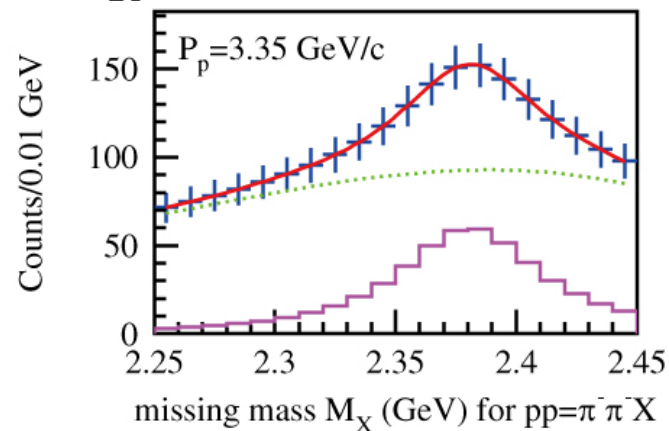
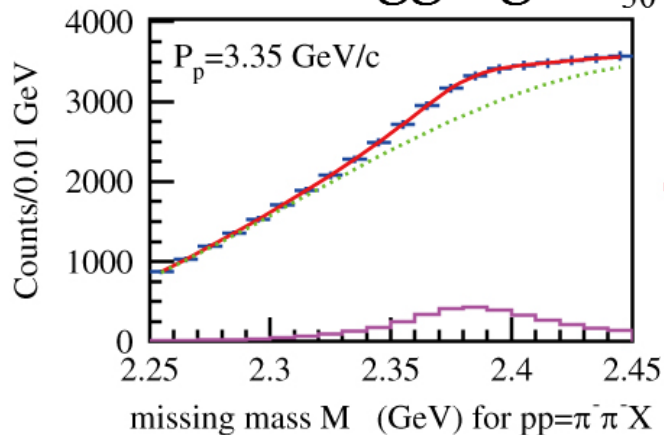
標的: 570 mm 厚の液体水素標的

検出器: E50 スペクトロメータ

測定時間: 一つの入射運動量で3日

2.85, 3.35, 3.60, 3.80, 4.00, 4.50 GeV/c

^2He tagging: $D_{30}^{++++} \rightarrow \pi^+ D_{21}^{+++} \rightarrow \pi^+ \pi^+ {}^2\text{He}$



T. Ishikawa



4 Jul 2025



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

まとめ

まとめ



T. Ishikawa

4 Jul 2025



まとめ

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

重陽子標的からのコヒーレントな $\pi^0\pi^0$ 光生成反応 $\gamma d \rightarrow \pi^0\pi^0 d$ で3つのダイバリオンを発見

$\gamma d \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0 d$ 反応での等間隔の励起エネルギーの状態が観測される = パイオンが有効自由度に？

J-PARC E79実験で観測する D_{30} ダイバリオン ($I = 3, J = 0$)の質量がダイバリオンの内部構造に決定的な情報

1. 空間的にコンパクトな6クォーク状態
2. バリオン・バリオンの分子状態
3. パイオンが有効自由度



T. Ishikawa

4 Jul 2025



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

Backup

Backup



T. Ishikawa

4 Jul 2025



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

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

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



T. Ishikawa

38
4 Jul 2025



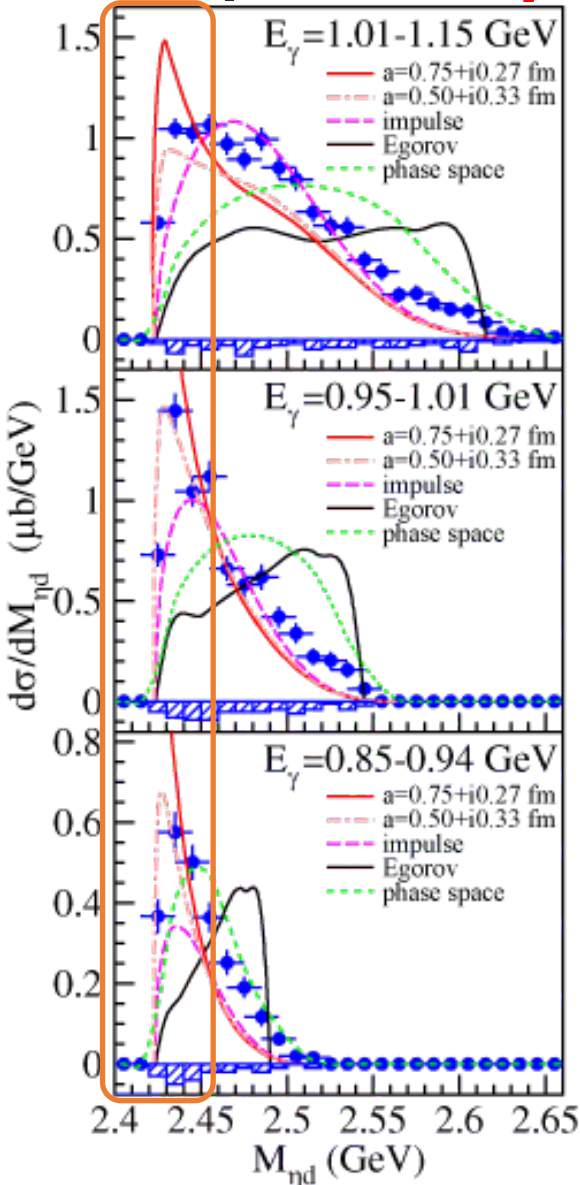
大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

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

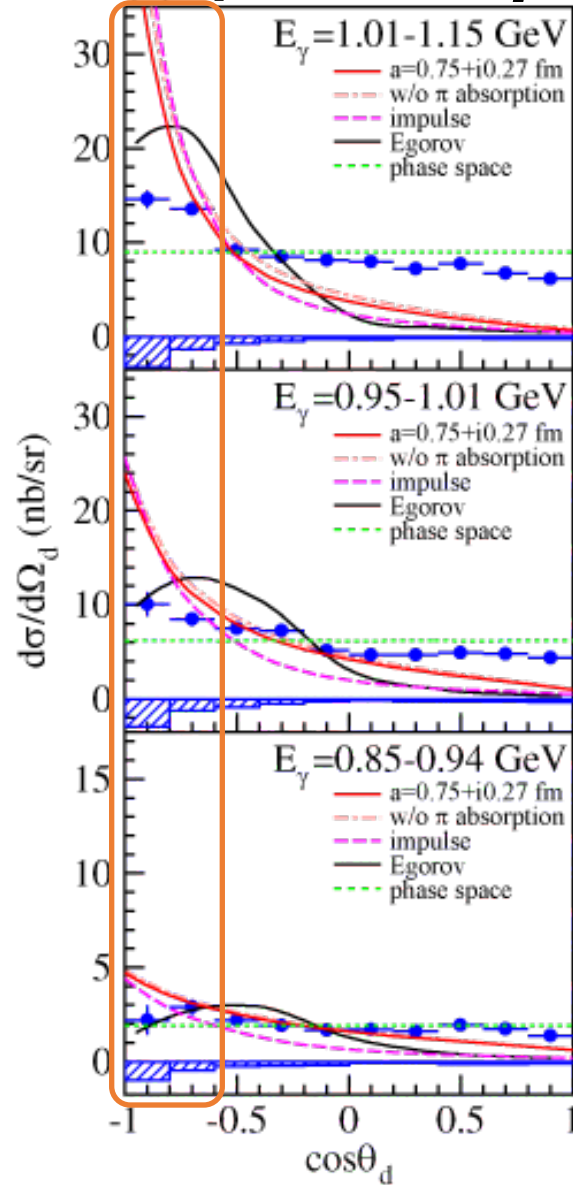
M. Egorov, A. Fix, Phys. Rev. C88, 054611 (2013).

M. Egorov, Phys. Rev. C101, 065205 (2020).

(a) $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$



(b) $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$



for the first time

$d\sigma/dM_{\eta d}$:

maximum at $M_{\eta d} \approx M_{\eta} + M_d$

→ ηd attraction

$a_{\eta N} = 0.50 + i0.33$ fm
reproduces the data well

$d\sigma/d\Omega_d$:

rather uniform
~~coherent sum of elementary amplitudes~~



T. Ishikawa

4 Jul 2025



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

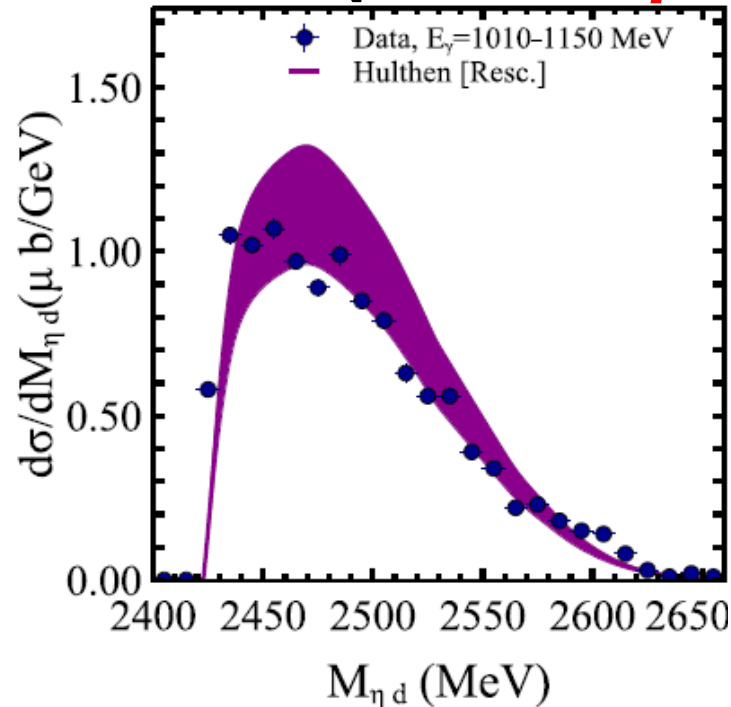
$$\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$$

New interpretation of $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$

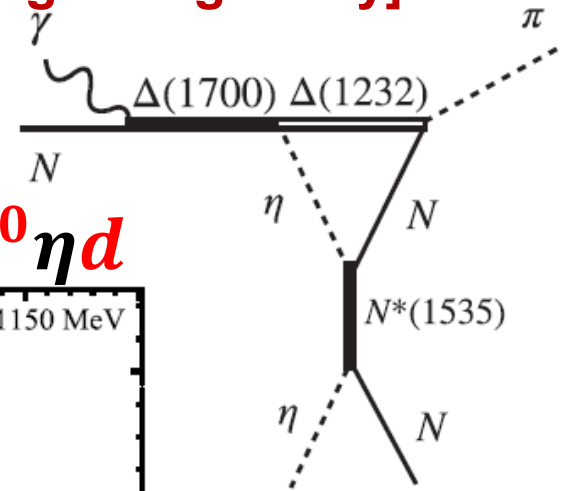
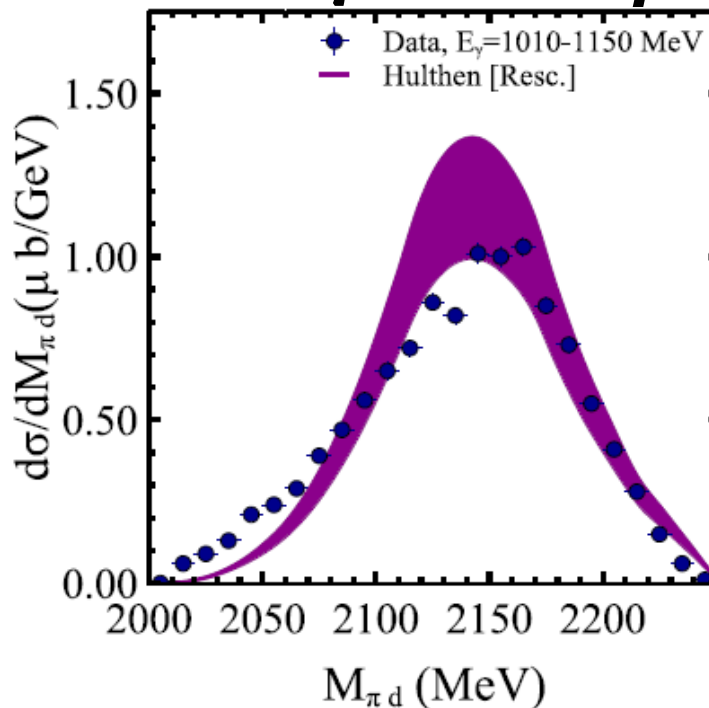
Martinez Torres, K. P. Khemchandani and E. Oset,
PRC107, 025202 (2023) [various diagrams + triangle singularity].

The features of the mass distributions are reproduced.

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



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



T. Ishikawa

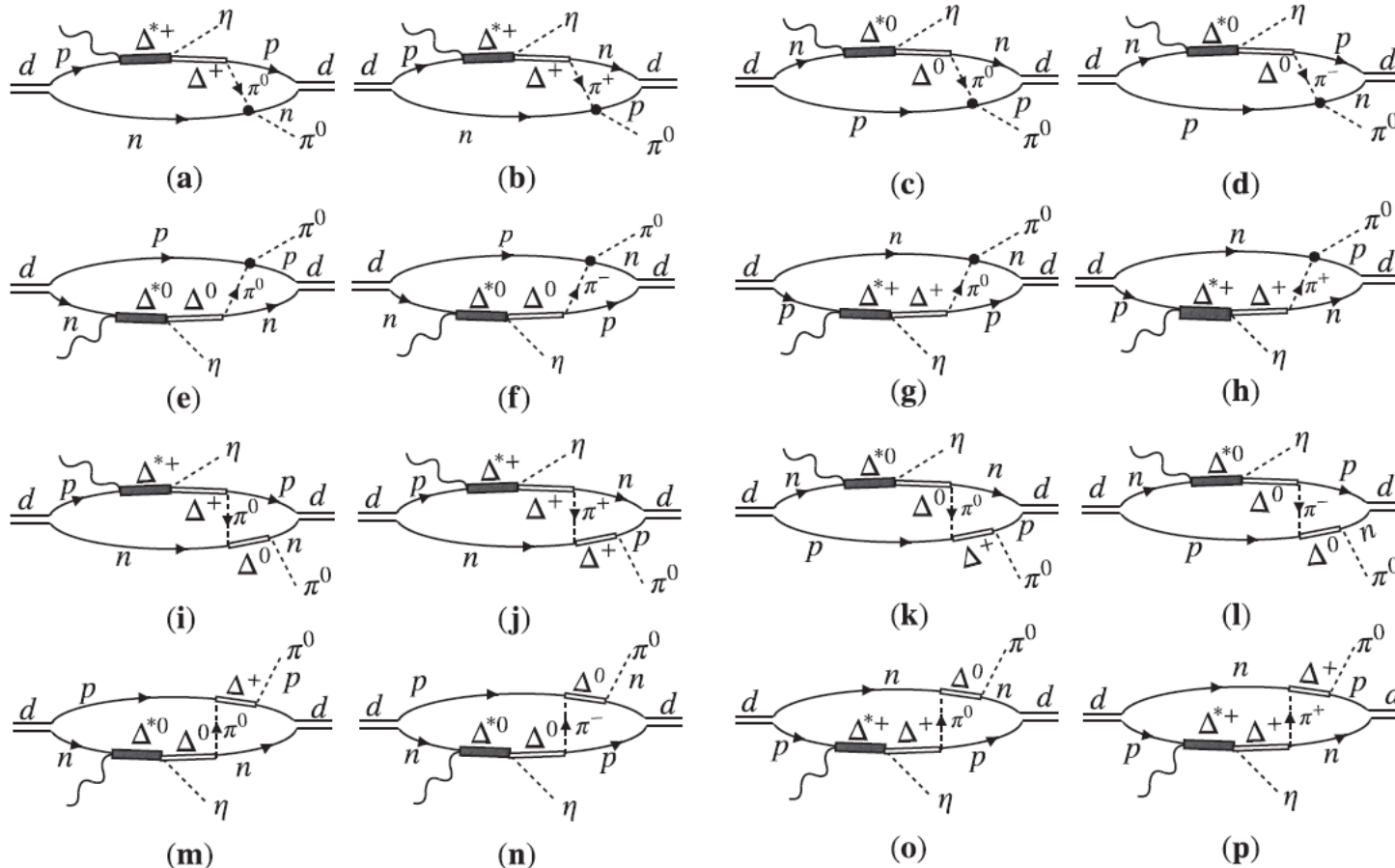
4 Jul 2025



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

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

**Martinez Torres, K. P. Khemchandani and E. Oset,
PRC107, 025202 (2023) [various diagrams + triangle singularity].**



**Calculations include pion scattering on the
spectator nucleon**

T. Ishikawa

41
4 Jul 2025

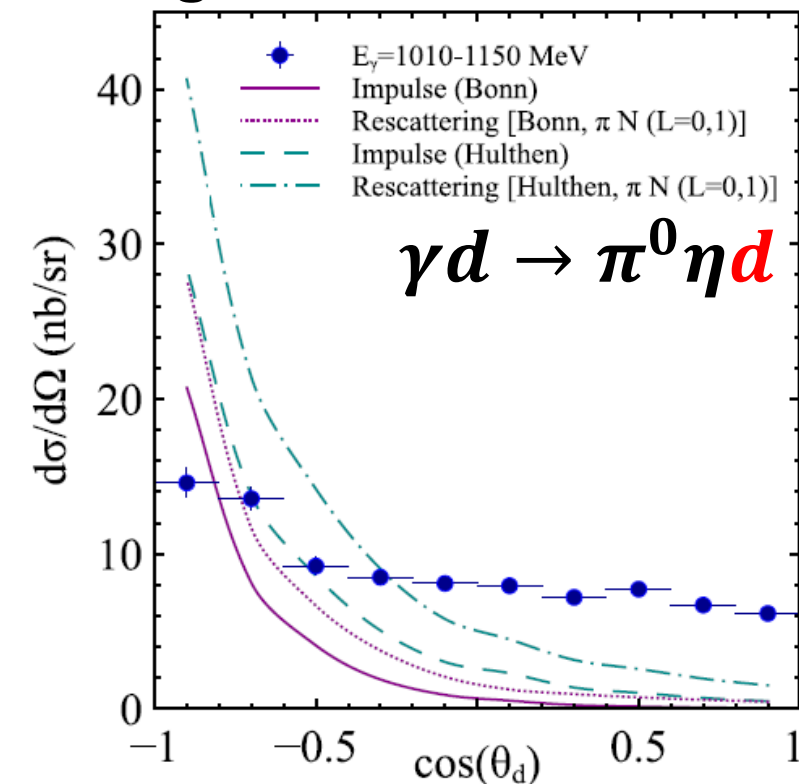


大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

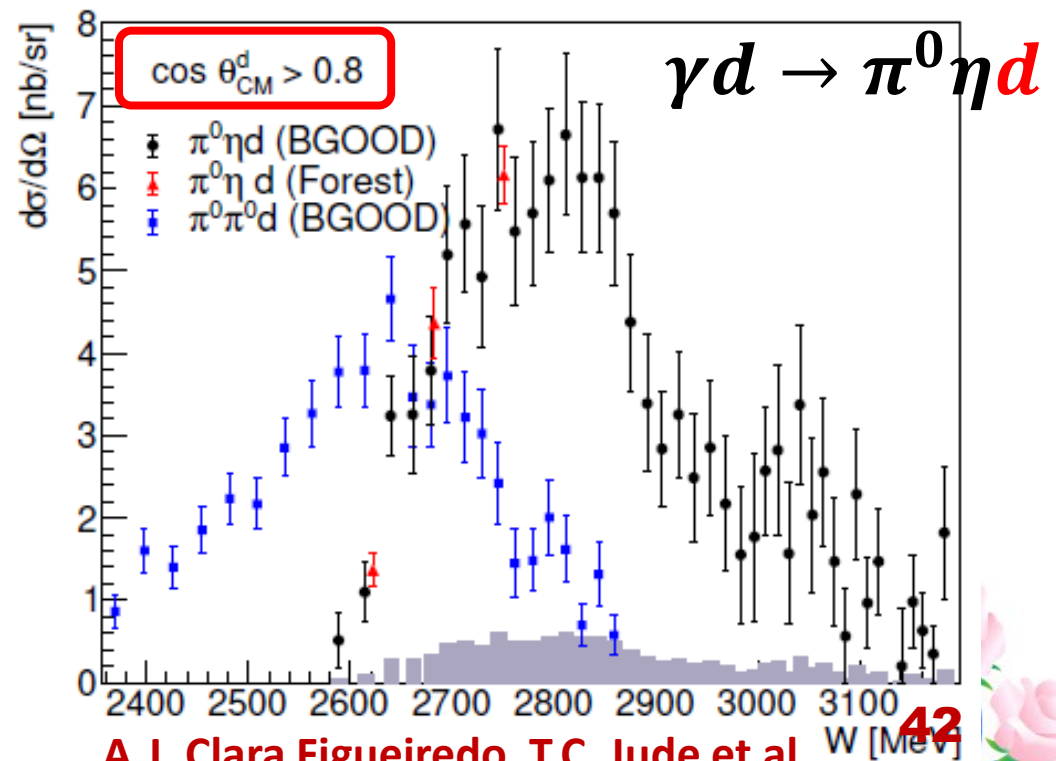
$$\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$$

no theoretical calculations reproduce
unexpected large cross sections at forward
angles of deuteron emission

Triangular calculation



Results from BGOOD



A.J. Clara Figueiredo, T.C. Jude et al.,
arXiv: 2405.09392 (2024).

T. Ishikawa

42
4 Jul 2025



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

Rather uniform angular distribution of deuteron emission suggests the formation of correlated state at each step

