



# ダブルメソン光生成反応

## で探るダイバリオン共鳴

東北大学 電子光理学研究センター

石川 貴嗣

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応における

$\pi d$  系と  $\pi\pi d$  系で見られる共鳴らしき構造

T. Ishikawa et al.,

PLB772, 398 (2017);

arXiv: 1805.08928 (2018).

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$  反応のプリリミナリーな結果



# 発表内容

1. ダイバリオン
2. アイスカラー  $d^*(2380)$
3. アイソベクター  $d^*(2150)$
4. 実験セットアップ
5.  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応

全断面積～アイスカラーダイバリオン

微分断面積～**特異な重陽子の角分布**

$\pi d$  系のアイソベクターダイバリオン

質量・幅、スピン・パリティ

6.  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応
7. まとめ



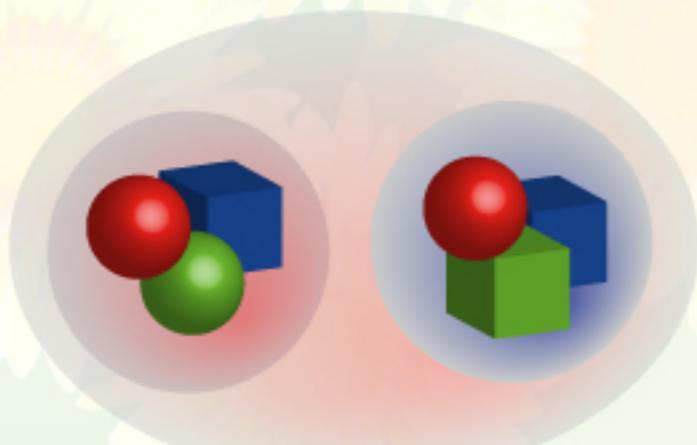
ダイハツ

ダイハツ

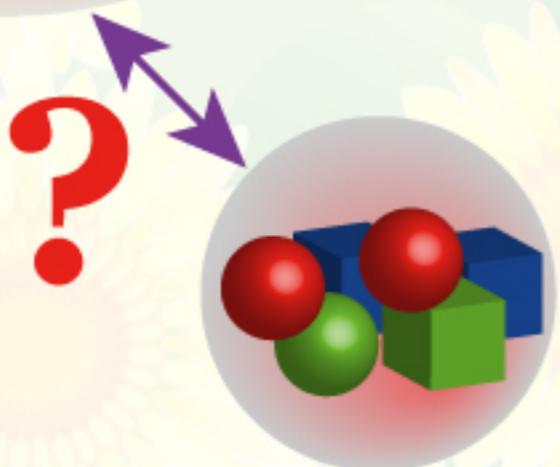


# ダイバリオン

ダイバリオン(二つのバリオンの系):  
クォーク配位の相転移の研究に重要



(例えば重陽子のような)  
二つのバリオンの**分子状態**



六つのクォークからなる  
ハドロン状態(**空間的に**  
**コンパクト**な粒子?)

クォークの閉じ込め: ハドロン物理の問題  
高密度下での状態方程式や中性子星の内部



# ダイバリオンの予想

1964 Dyson & Xuong: 6 non-strange states

**F.J. Dyson, N.-H. Xuong, PRL 13, 815 (1964).**

1977 Jaffe: H dibaryon (uuddss:  $\Lambda\Lambda$ )

**R.L. Jaffe, PRL 38, 195 (1977).**

その後は

非常にたくさんの理論予想、実験結果

**Dibaryon rush era**

**Nobody has seen a genuine, gold-plated dibaryons, yet.**

**Kamal Seth, “Dibaryons in Theory and Practice” (1988)**

非常に良くまとめられたレビュー

**H. Clement,**

**On the history of dibaryons and their final observation,  
Prog. Part. Nucl. Phys. 93, 195 (2017).**

アイソスカラー

$d^*(2380)$

# アイソスカラー $d^*(2380)$

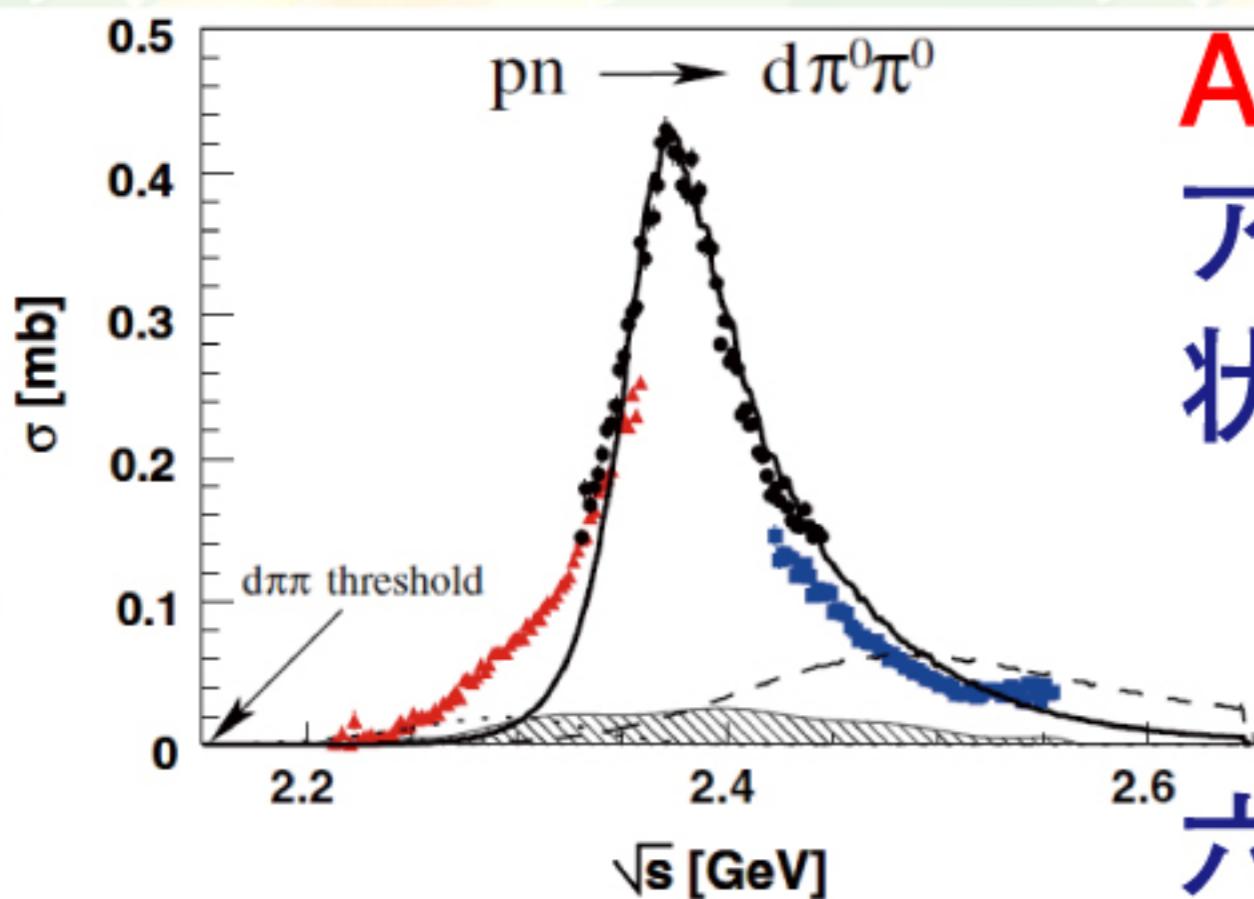
WASA で観測された  $d^*(2380)$

$pn \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応

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

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

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

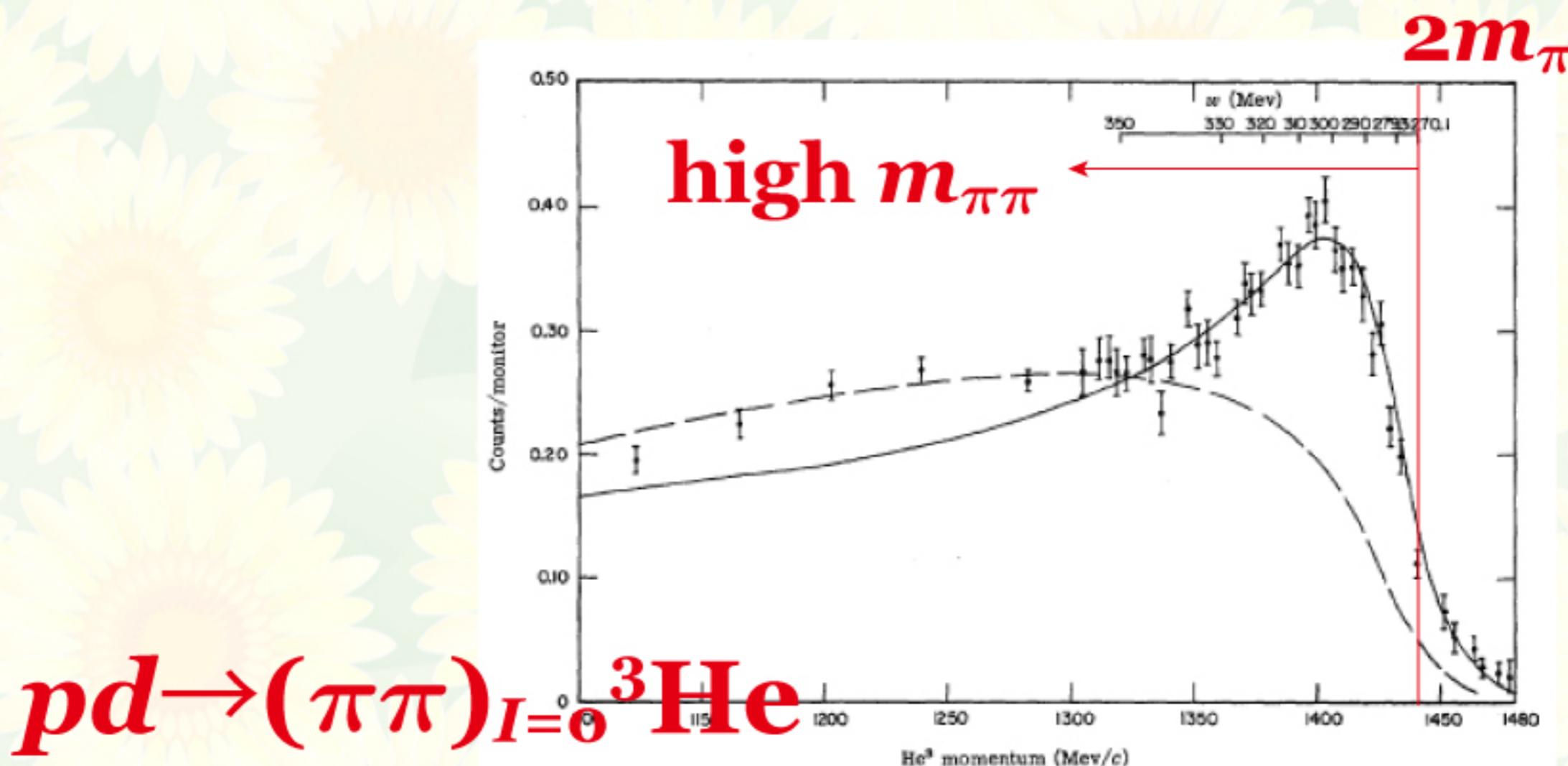


ABC 効果と関連  
アイソスカラー  $\Delta\Delta$  準束縛  
状態  $D_{03}$   
F.J. Dyson and N.-H. Xuong,  
PRL13, 815 (1964).  
and/or  
六つのクォークの状態

# アイソスカラー $d^*(2380)$

ABC 効果

長年パズルとされてきた



A. Abashian, N.E. Booth, K.M. Crowe, PRL 5 (1960) 258;  
N.E. Booth, A. Abashian, K.M. Crowe, PRL 7 (1961) 35.



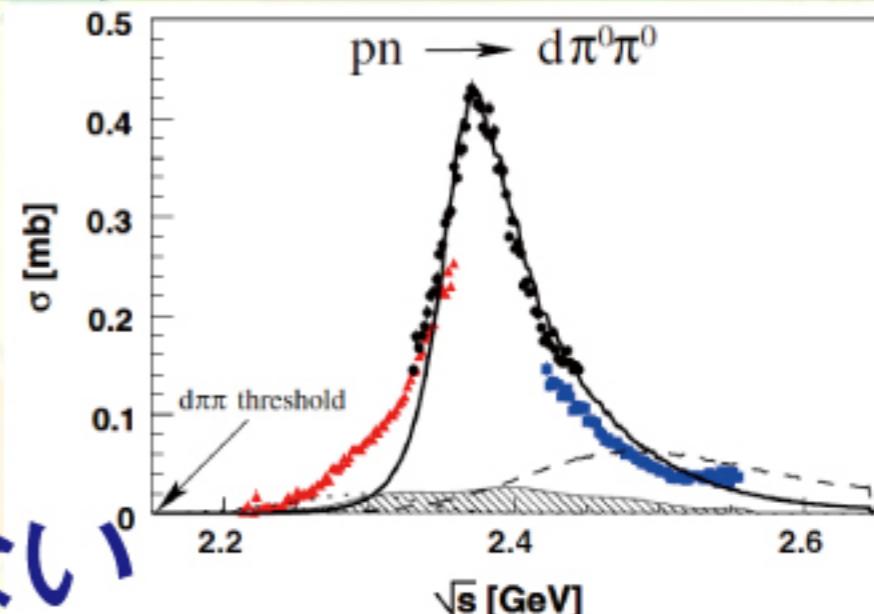
# アイソスカラー $d^*(2380)$

ABC 効果との関連

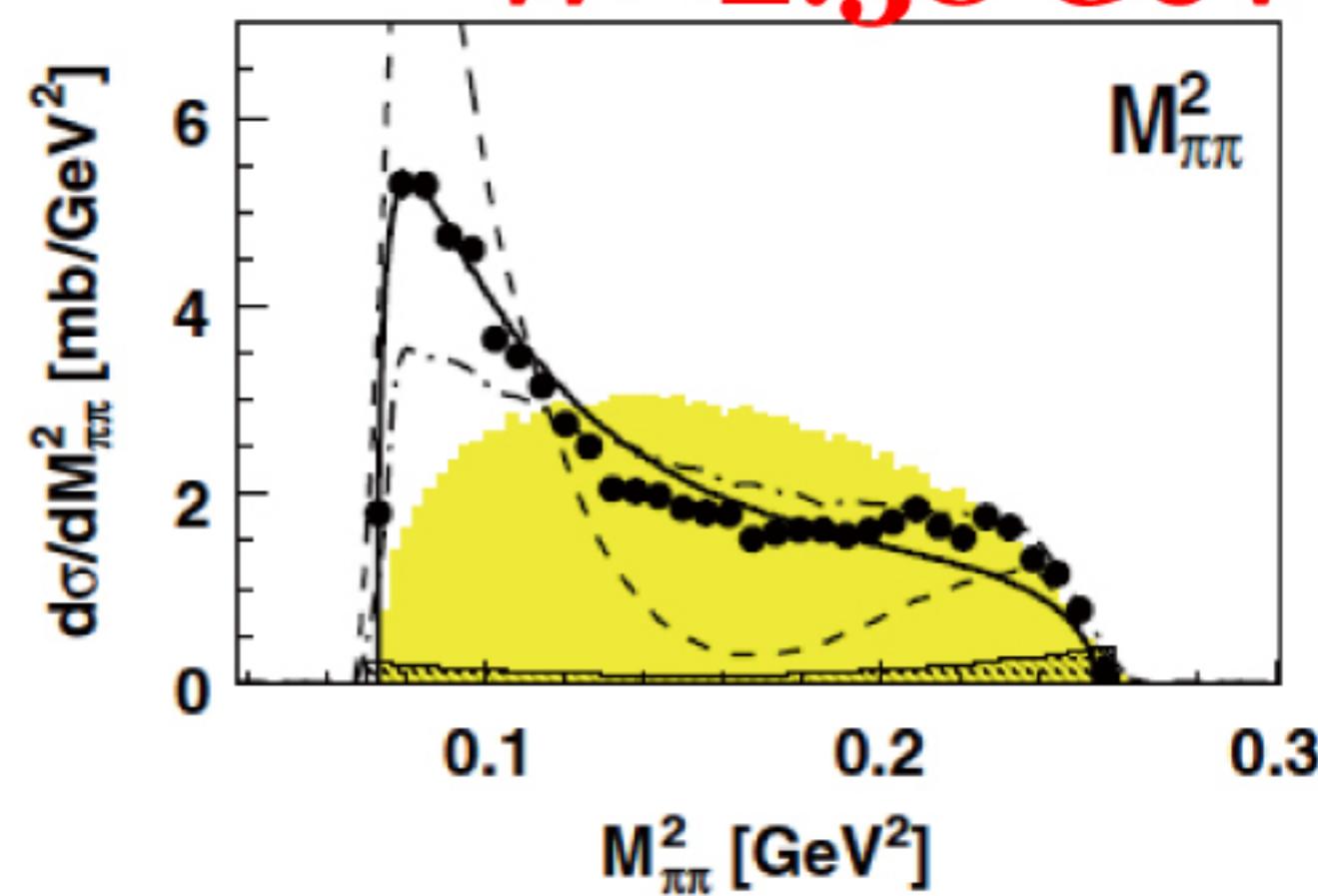
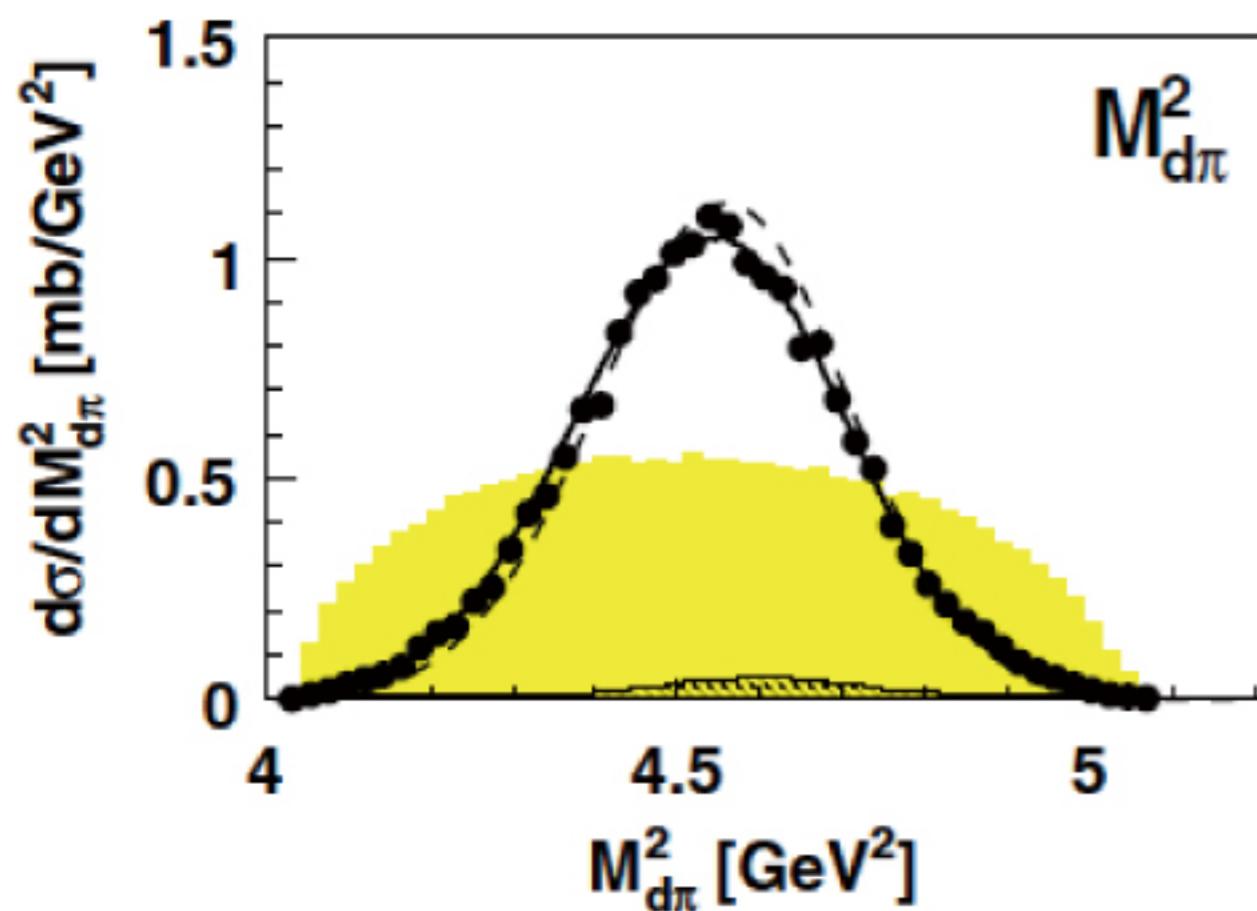
$pn \rightarrow \pi^0\pi^0d$  反応

$\pi^0\pi^0$ はアイソスカラー

$I=2$  は始状態から到達できない



$W=2.38$  GeV



P. Adlarson et al., PRL106, 242302 (2011).

# アイソスカラー $d^*(2380)$

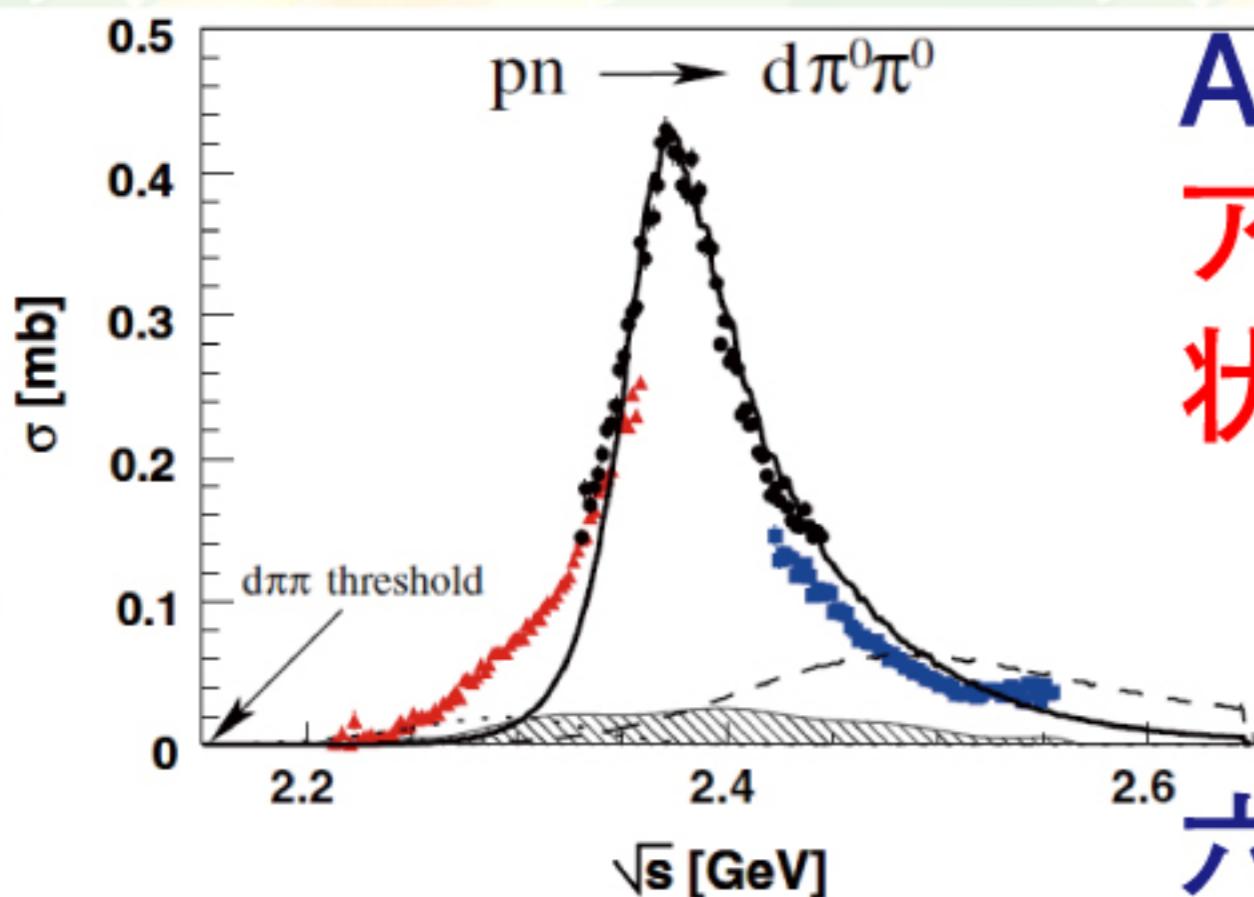
WASA で観測された  $d^*(2380)$

$pn \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応

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

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

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



ABC 効果と関連  
アイソスカラー  $\Delta\Delta$  準束縛  
状態  $D_{03}$   
F.J. Dyson and N.-H. Xuong,  
PRL13, 815 (1964).  
and/or  
六つのクォークの状態



# アイソスカラー $d^*(2380)$

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

$d^*(2380)$   
 ┌─────────  
 |

| $\mathcal{D}_{IS}$ | $\mathcal{D}_{01}$ | $\mathcal{D}_{10}$ | $\mathcal{D}_{12}$ | $\mathcal{D}_{21}$ | $\mathcal{D}_{03}$ | $\mathcal{D}_{30}$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $BB$               | $NN$               | $NN$               | $\Delta N$         | $\Delta N$         | $\Delta\Delta$     | $\Delta\Delta$     |
| $M$                | $A$                | $A$                | $A+6B$             | $A+6B$             | $A+10B$            | $A+10B$            |
|                    | <b>1878</b>        | <b>1878</b>        | <b>2160</b>        | <b>2160</b>        | <b>2348</b>        | <b>2348</b>        |

$$M = A + \{I(I+1) + S(S+1) - 2\}B$$

$$A = 1878 \text{ MeV}$$

$$B = 47 \text{ MeV}$$

$\mathcal{D}_{12}$  の質量は  $\pi^+ d \rightarrow pp$  反応  
 の部分波  ${}^1D_2$  の共鳴らしき構造

${}^1S_0$  状態 :  $pp, pn, nn$

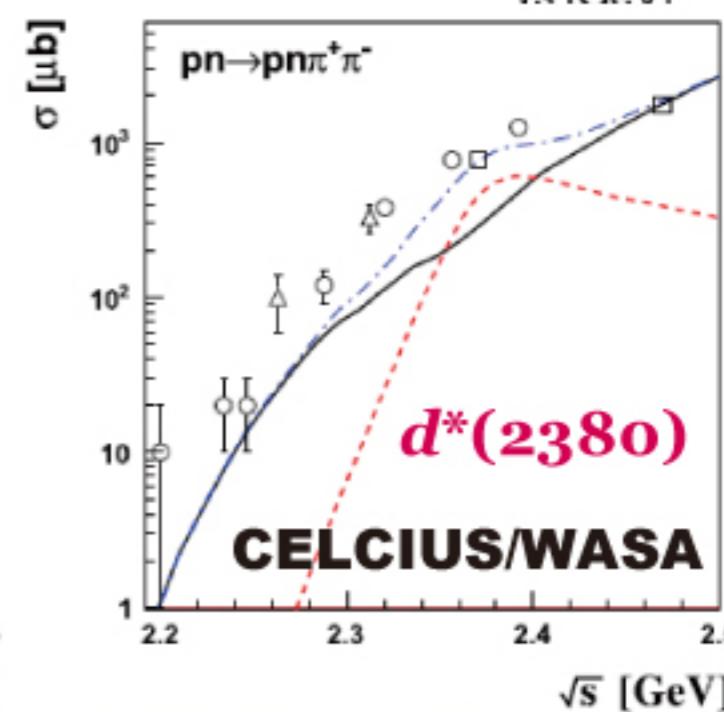
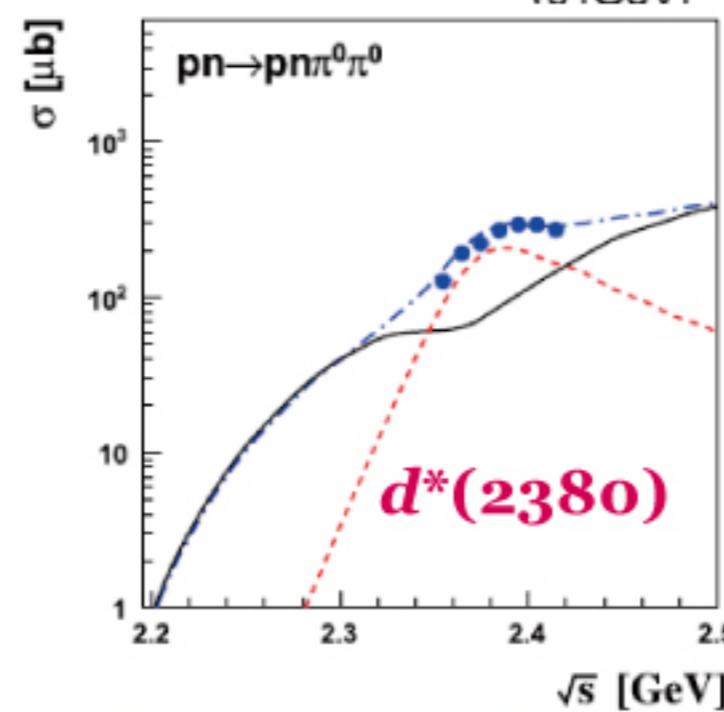
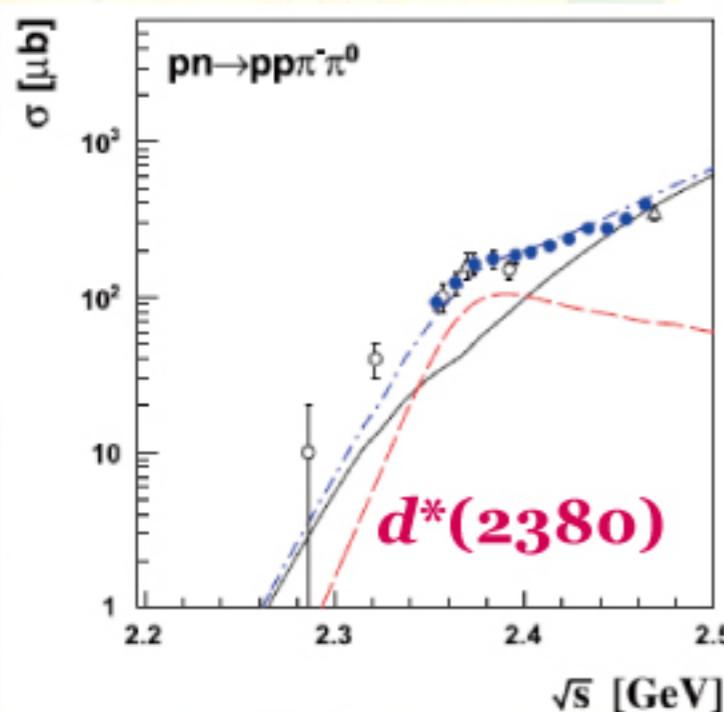
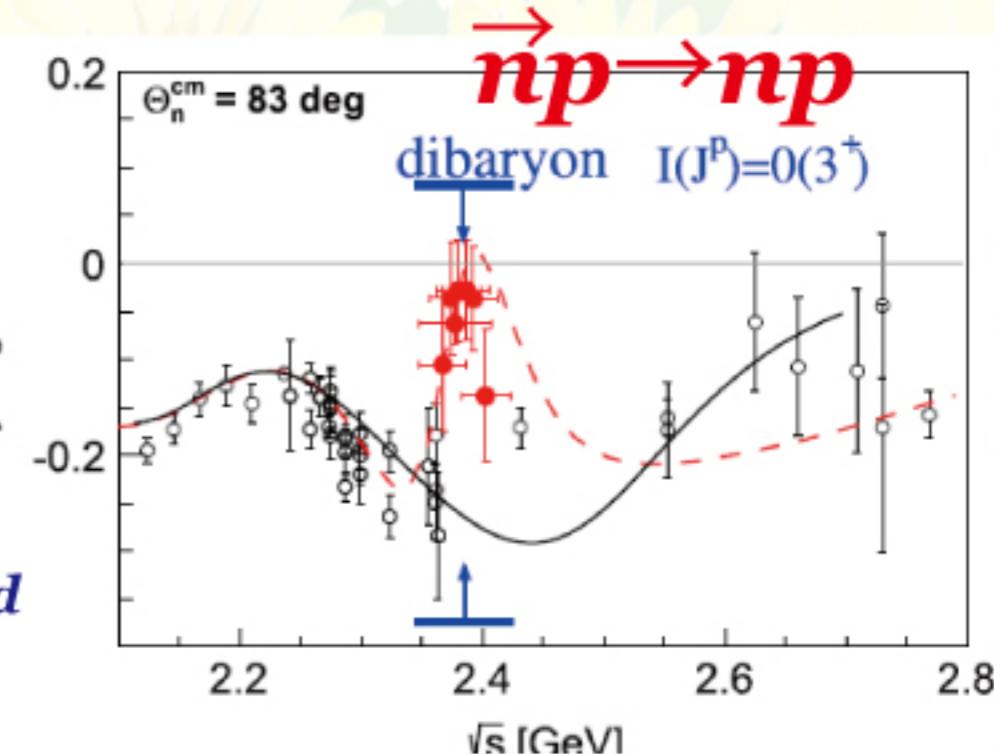
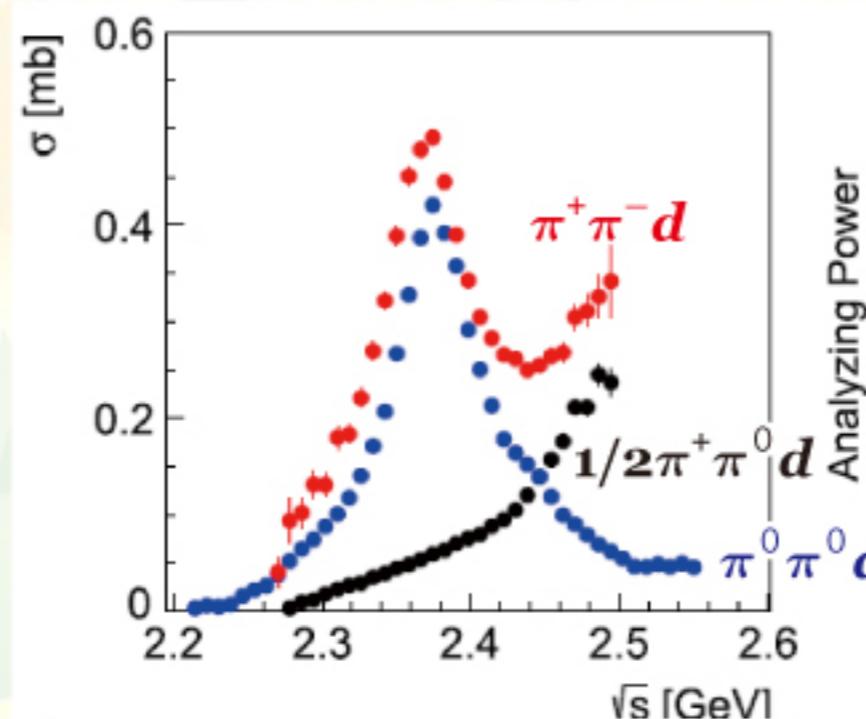
${}^3S_1$  状態 :  $d$

# アイソスカラード<sup>\*</sup>(2380)

他の反応でも見られている

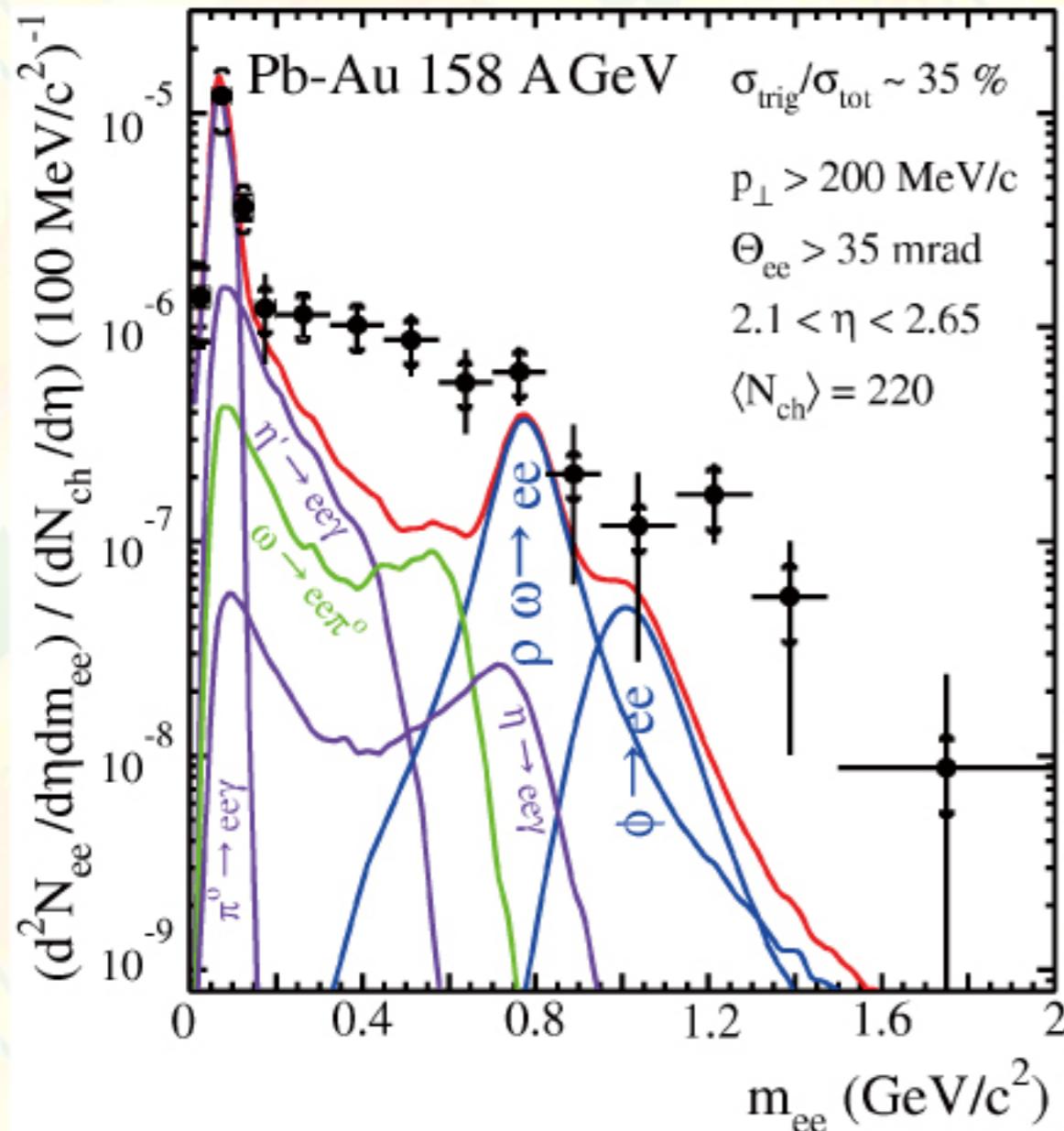
- $p\bar{n} \rightarrow \pi^+ \pi^- d$
- $\rightarrow \pi^0 \pi^- p\bar{p}$
- $\rightarrow \pi^0 \pi^0 p\bar{n}$
- $\rightarrow \pi^+ \pi^- p\bar{n}$
- $\rightarrow p\bar{n}$

H. Clement et al., Phys. Scr. T 166, 014016 (2015).



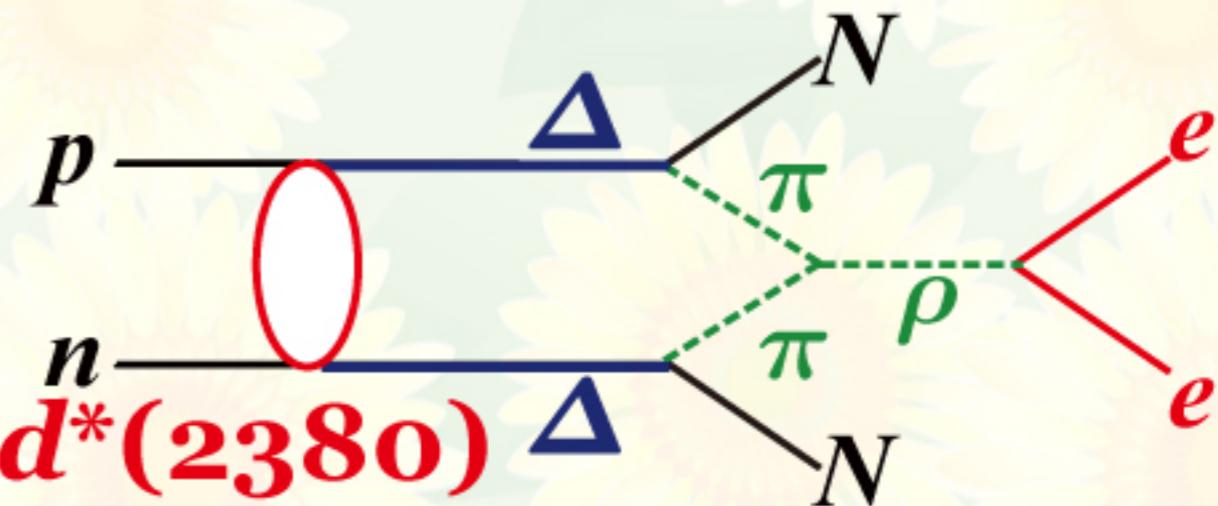
# アイソスカラー $d^*(2380)$

## DiLepton Spectroscopy (DLS) パズル



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

- 1) ベクターメソンの媒質効果
- 2)  $d^*(2380)$  生成



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

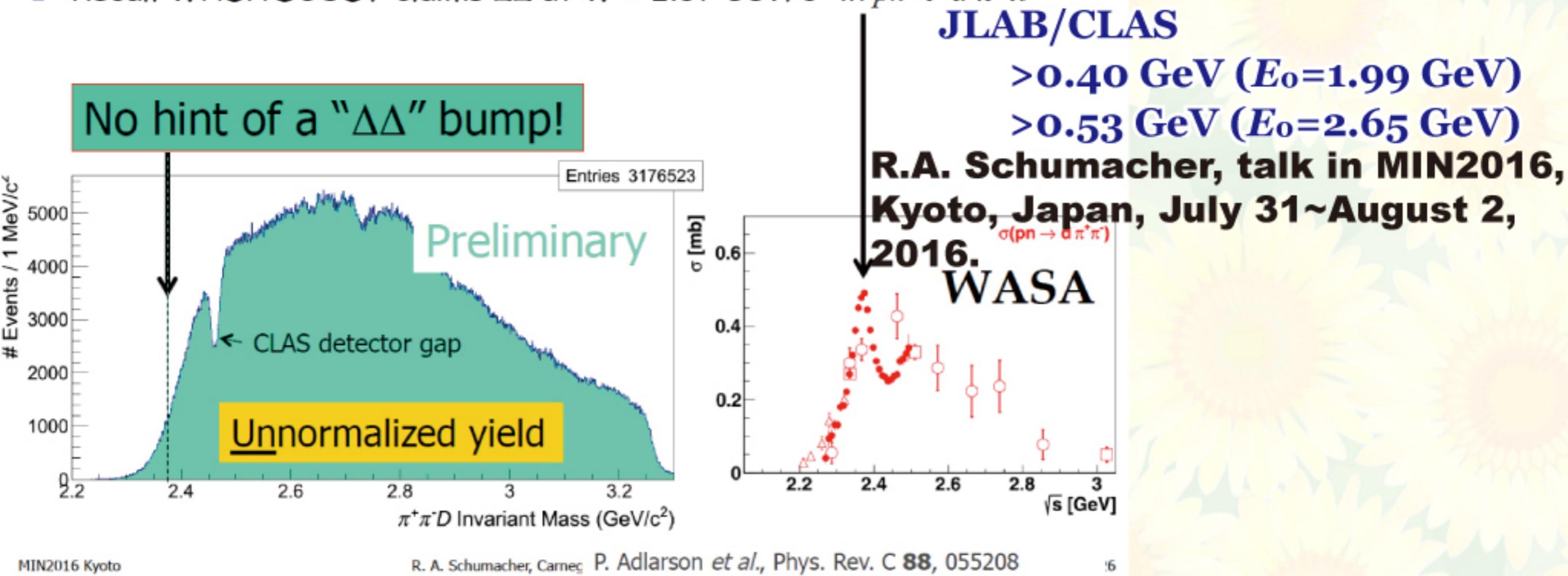
$d^*(2380)$  の  $s$  チャンネル光生成は?  
最終的には電荷半径 (電子散乱による遷移形状因子)

# ELPH アイソスカラー $d^*(2380)$

## $d^*(2380)$ の $s$ チャンネル光生成

$$\gamma d \rightarrow \pi^+ \pi^- d \text{ and } \gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$$

- Gash at  $W = 2.46 \text{ GeV}/c^2$ : known gap in CLAS photon energy coverage
- No obvious  $\Delta\Delta$  visible in CALS/g13 (maybe PWA, or not formed in  $\gamma d$ )
- Recall WASA@COSY claims  $\Delta\Delta$  at  $W = 2.37 \text{ GeV}/c^2$  in  $pn \rightarrow d \pi^+ \pi^-$

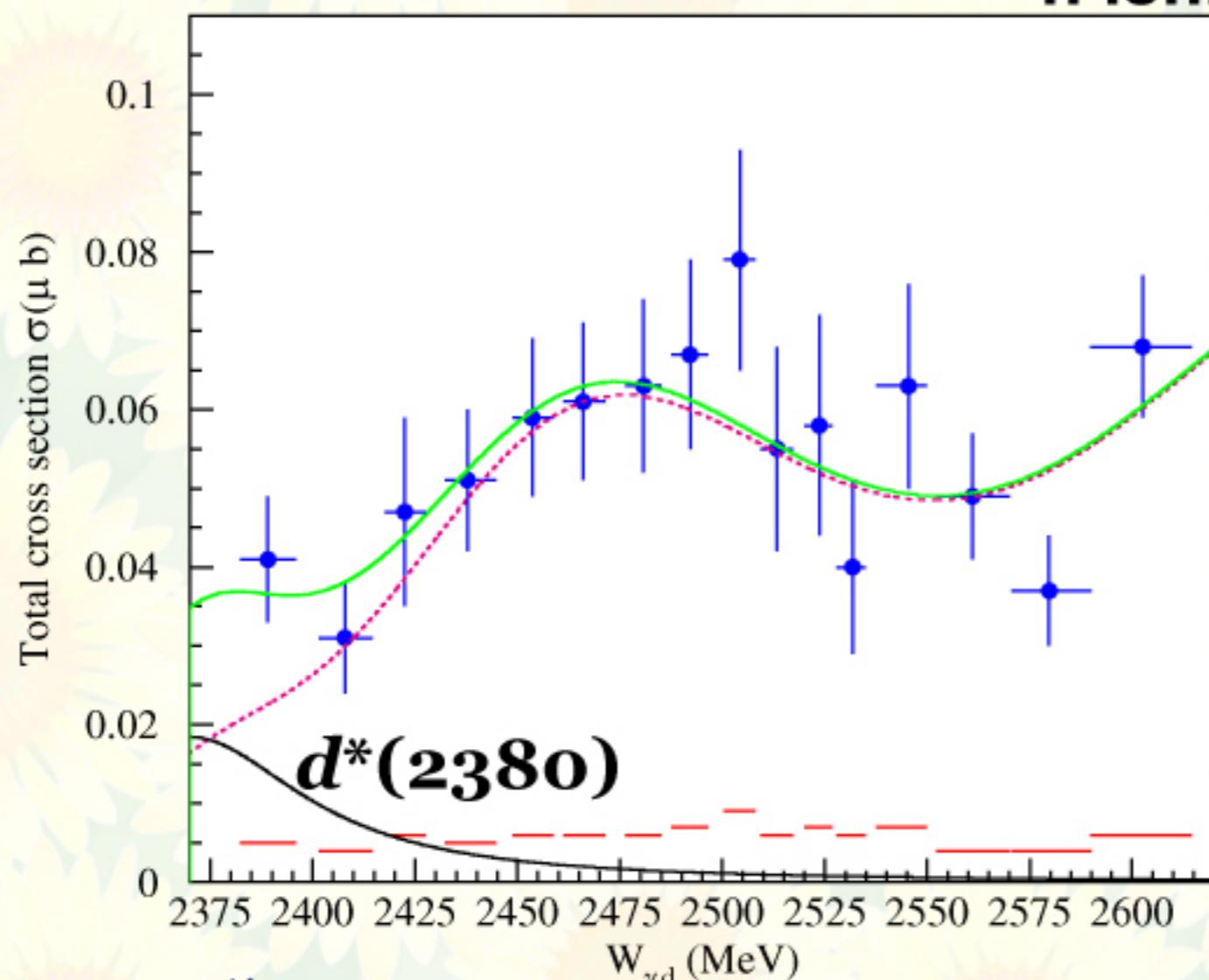


東北大学電子光理学研究センターで世界で初めて  
 $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応を測定 **T. Ishikawa et al., PLB772, 398 (2017);**  
**T. Ishikawa, 23 July 2018**

# アイソスカラー $d^*(2380)$

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応の全断面積を  
入射光子エネルギー 0.88 GeV 未満で測定

T. Ishikawa et al., PLB772, 398 (2017).



Breit-Wigner + 理論計算

A. Fix and H. Arenhövel,  
Euro. Phys. J. A 25, 115 (2005).

系統誤差

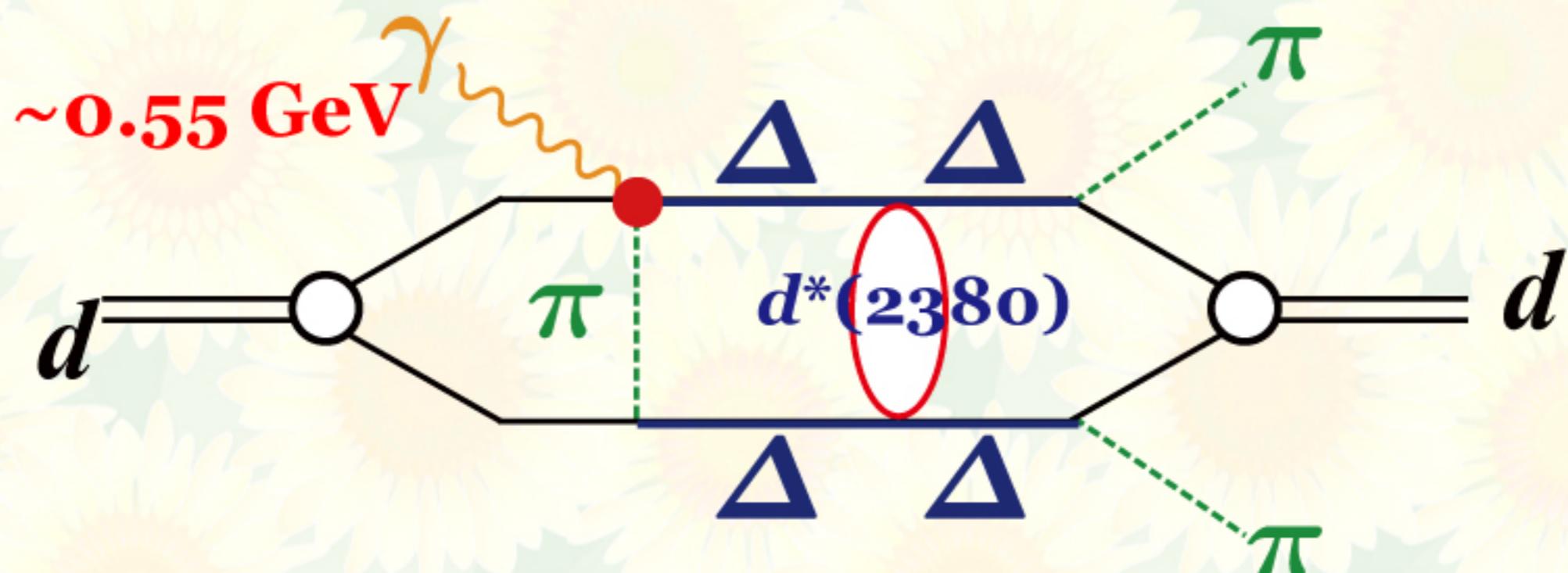
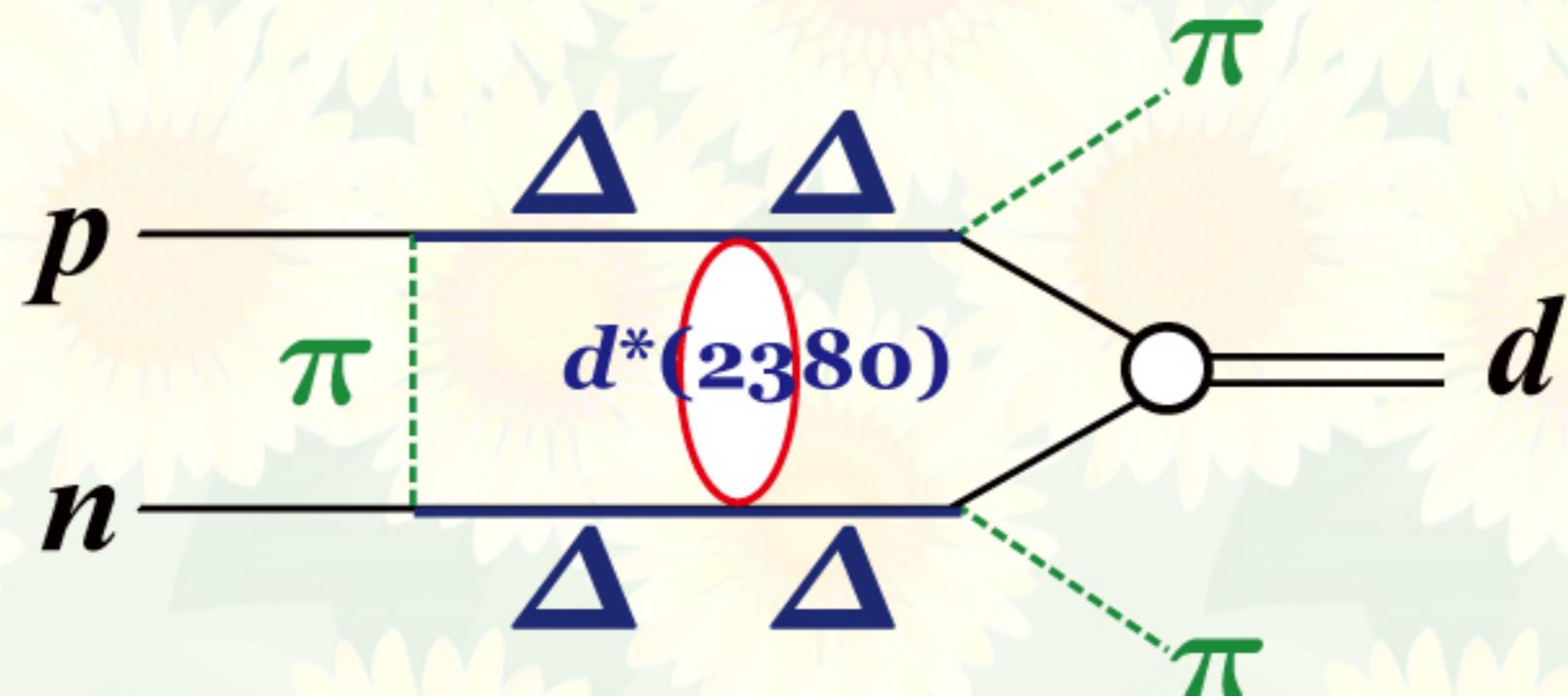
わずかなエンハンス

**18.4±9.2 nb (上限: 34 nb 90%CL)**



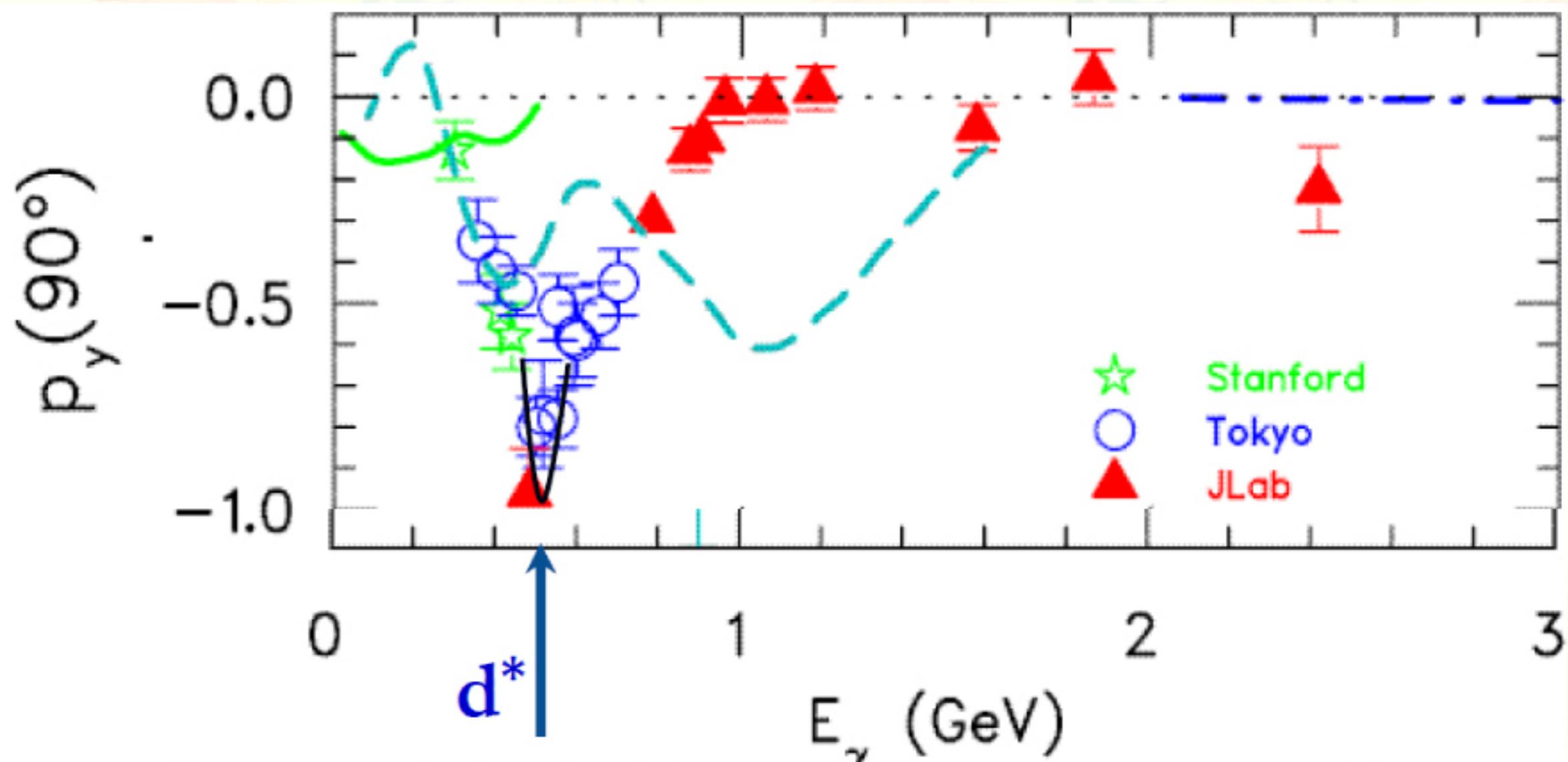
# アイソスカラー $d^*(2380)$

$\gamma d \rightarrow \pi\pi d$  反応ではなぜ見えにくいのか?



# アイソスカラー $d^*(2380)$

$\gamma d \rightarrow pn$ 反応の偏極分解能



- T. Kamae, T. Fujita, PRL38, 471 (1977);  
H. Ikeda et al., PRL42, 1321 (1979);  
R. Gilman and F. Gross, AIP Conf. Prof. 603, 55 (2001);  
K. Wijesooriya et al., PRL86, 2975 (2001).

アイソベクター

***d\*(2150)***



# アイソベクター $d^*(2150)$

ダイバリオンの励起スペクトル

ダイバリオンの内部構造を与える

$d^*(2380)$

| $\mathcal{D}_{IS}$ | $\mathcal{D}_{01}$ | $\mathcal{D}_{10}$ | $\mathcal{D}_{12}$ | $\mathcal{D}_{21}$ | $\mathcal{D}_{03}$ | $\mathcal{D}_{30}$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $BB$               | $NN$               | $NN$               | $\Delta N$         | $\Delta N$         | $\Delta\Delta$     | $\Delta\Delta$     |
| $M$                | $A$                | $A$                | $A+6B$             | $A+6B$             | $A+10B$            | $A+10B$            |
|                    | <b>1878</b>        | <b>1878</b>        | <b>2160</b>        | <b>2160</b>        | <b>2348</b>        | <b>2348</b>        |

$$M = A + \{I(I+1) + S(S+1) - 2\}B$$

$$A = 1878 \text{ MeV}$$

$$B = 47 \text{ MeV}$$

${}^1S_0$  状態 :  $pp, pn, nn$

${}^3S_1$  状態 :  $d$



# アイソベクター $d^*(2150)$

## ダイバリオン六重項の理論研究

### bag model

$\mathcal{D}_{03}$ : 2.36 GeV

strongly (weakly) coupling to  ${}^7S_3$ - $\Delta\Delta$  ( ${}^3D_3$ -NN) state

$\mathcal{D}_{12}$ : 2.36 GeV

coupling to  ${}^1D_2$ -NN ( ${}^5S_2$ -N $\Delta$ ) state

P.J. Mulders, A.T. Aerts, J.J. de Swart, Phys. Rev. D 21, 2653 (1980).

P.J. Mulders and A.W. Thomas, J. Phys. G 9, 1159 (1983).

パイオンクラウドの補正

### three-body hadronic model $\pi N \Delta$ ( $\pi NN$ )

$\mathcal{D}_{03}$ : 2.38 GeV

$\mathcal{D}_{12}$ : 2.15 GeV

A. Gal and H. Garcilazo, Nucl. Phys. A 928, 73 (2014).

# アイソベクター $d^*(2150)$

## $\mathcal{D}_{12}$ のヒント：部分波展開

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

$^3P_2$  振幅の2.18 GeV での振る舞い

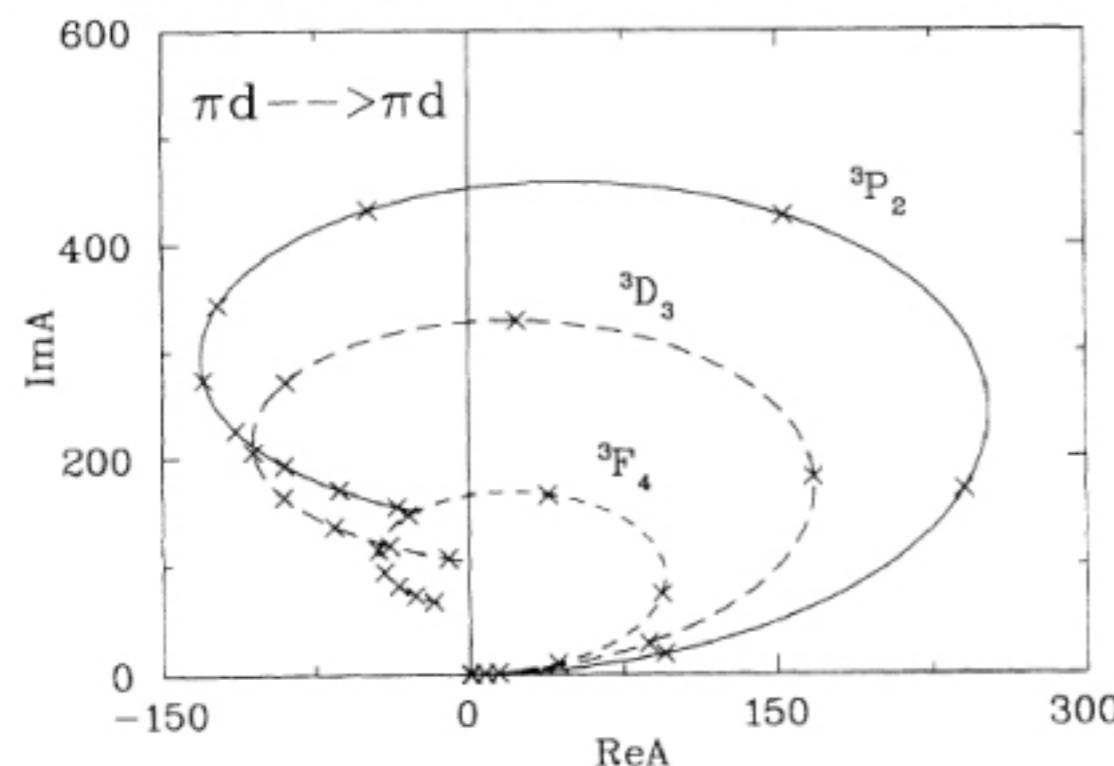


FIG. 7. Argand plot of the dominant  $\pi d$  partial-wave amplitudes  $^3P_2$ ,  $^3D_3$ , and  $^3F_4$  which correspond to the  $^1D_2$ ,  $^3F_3$ , and  $^1G_4$   $pp$  states, respectively. (Compare Fig. 7 of Ref. [3]). The X points denote 50 MeV steps. All amplitudes have been multiplied by a factor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

$\pi d \rightarrow \pi d$

R. Arndt et al.,  
PRC50, 1796 (1994).

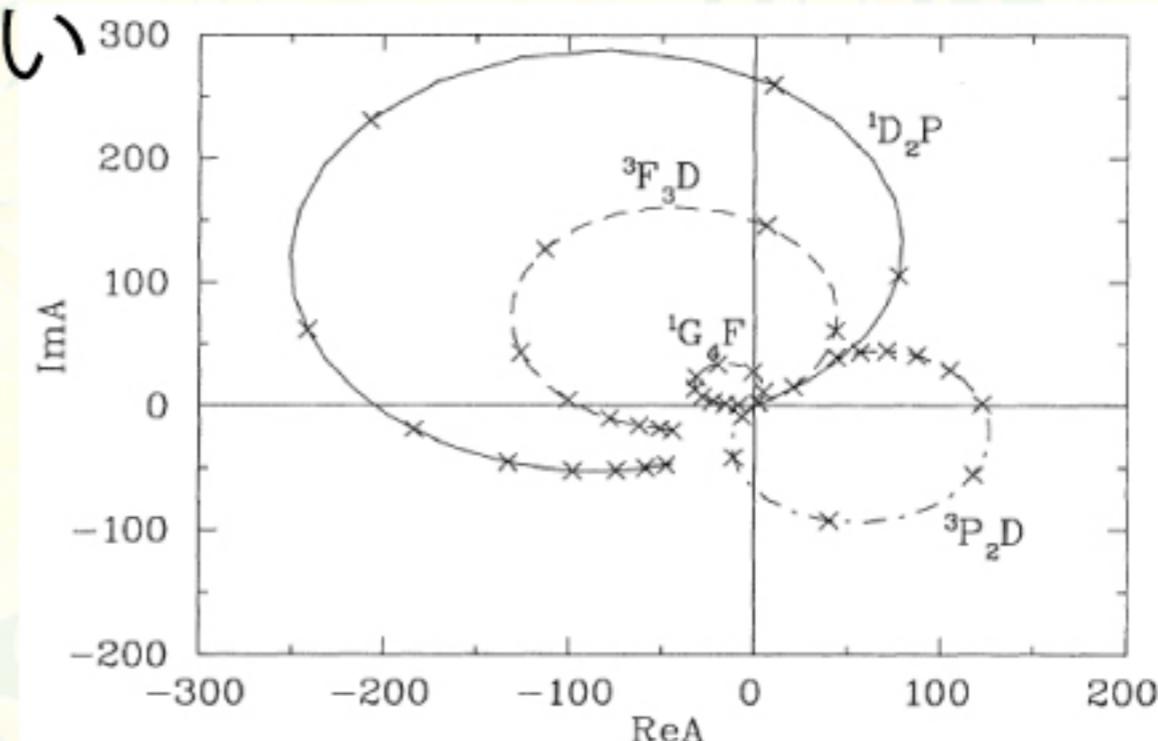


FIG. 7. Argand plot of dominant partial-wave amplitudes. The X points denote 50 MeV steps. All amplitudes have been multiplied by a factor of  $10^3$ .

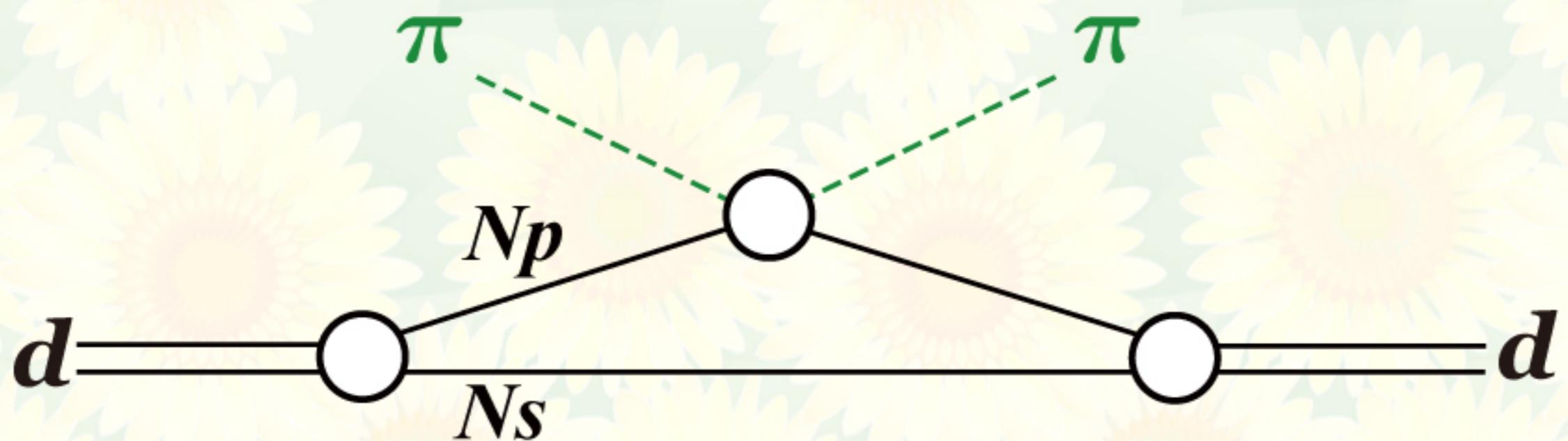
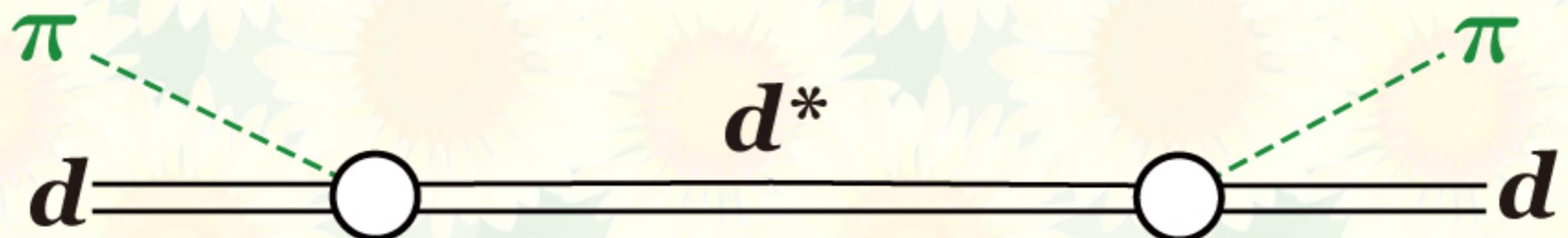
TABLE II. Notation conversion table.

| $2S_{pp}+1 L_J^{pp}$ | $S_\pi + S_d + 1 L_J^\pi$ | Notation  | $J^{\text{Parity}}$ |
|----------------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| $^1S_0$              | $^3P_0$                   | $^1S_0 P$ | $0^+$               |
| $^3P_1$              | $^3S_1$                   | $^3P_1 S$ | $1^-$               |
|                      | $^3D_1$                   | $^3P_1 D$ |                     |
| $^1D_2$              | $^3P_2$                   | $^1D_2 P$ | $2^+$               |
|                      | $^3F_2$                   | $^1D_2 F$ |                     |

# アイソベクター $d^*(2150)$

$\mathcal{D}_{12}$  のヒント：部分波展開

なぜ  ${}^3P_2$  は  $\mathcal{D}_{12}$  の確固たる証拠になり得ないのか？



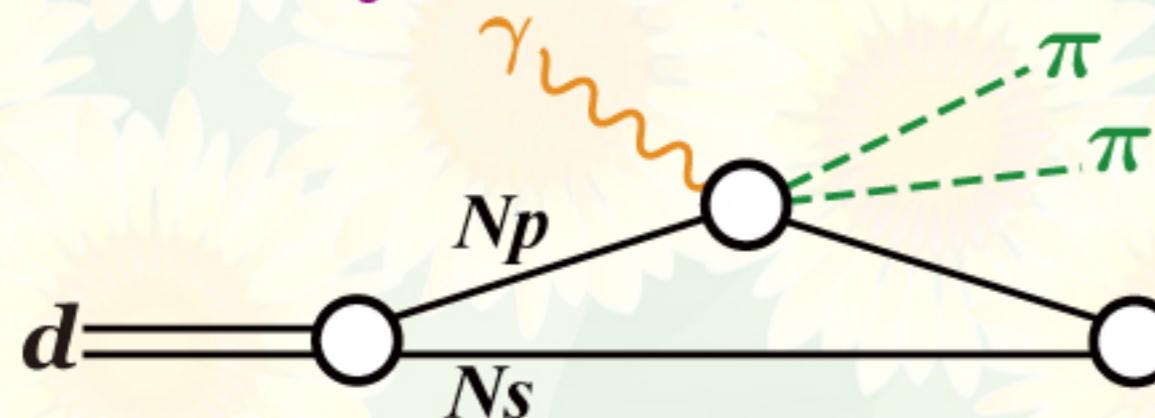
$\Delta\Delta$  と違って  $\Delta N$  状態では  
準自由過程の  $\Delta$  励起が運動学的に分離できない

# アイソベクター $d^*(2150)$

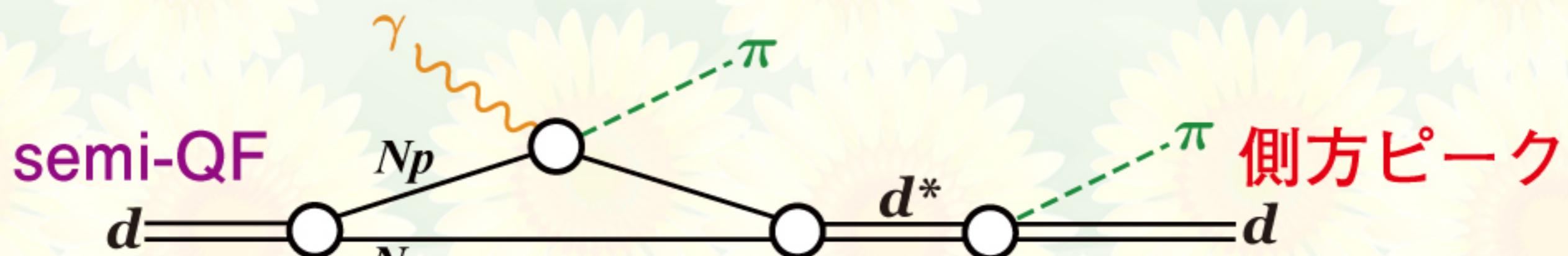
$\mathcal{D}_{12}$  の研究には  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  が有利！

quasi-free (QF)  $\pi\pi$  production on a nucleon  
followed by deuteron coalescence (QFC)

重陽子の角分布



強い後方ピーク



側方ピーク



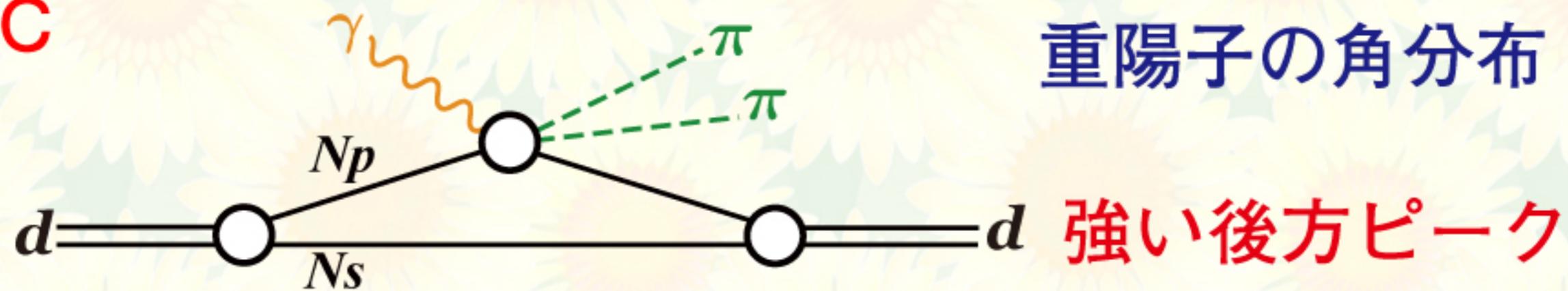
比較的  
フラット

必ずしも順次過程でなくてよい

# アイソベクター $d^*(2150)$

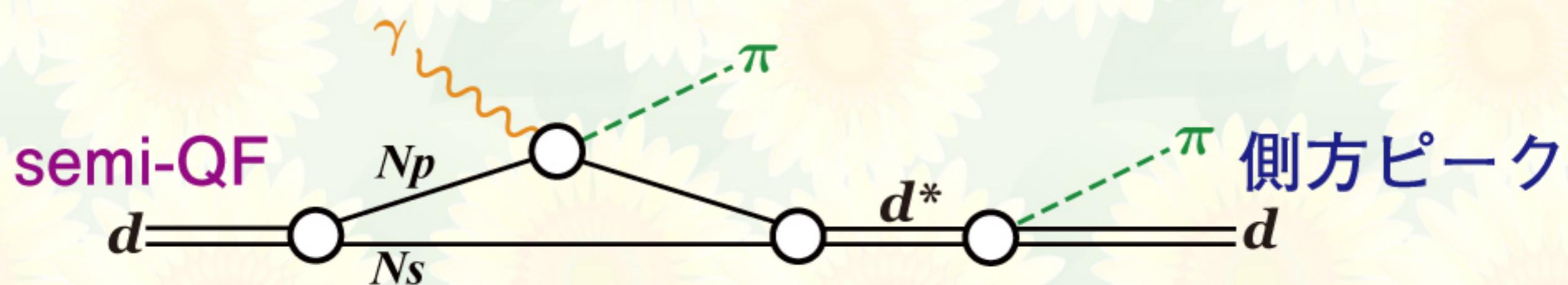
$\mathcal{D}_{12}$  の研究には  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  が有利！

QFC



重陽子の角分布

強い後方ピーク



dibaryon

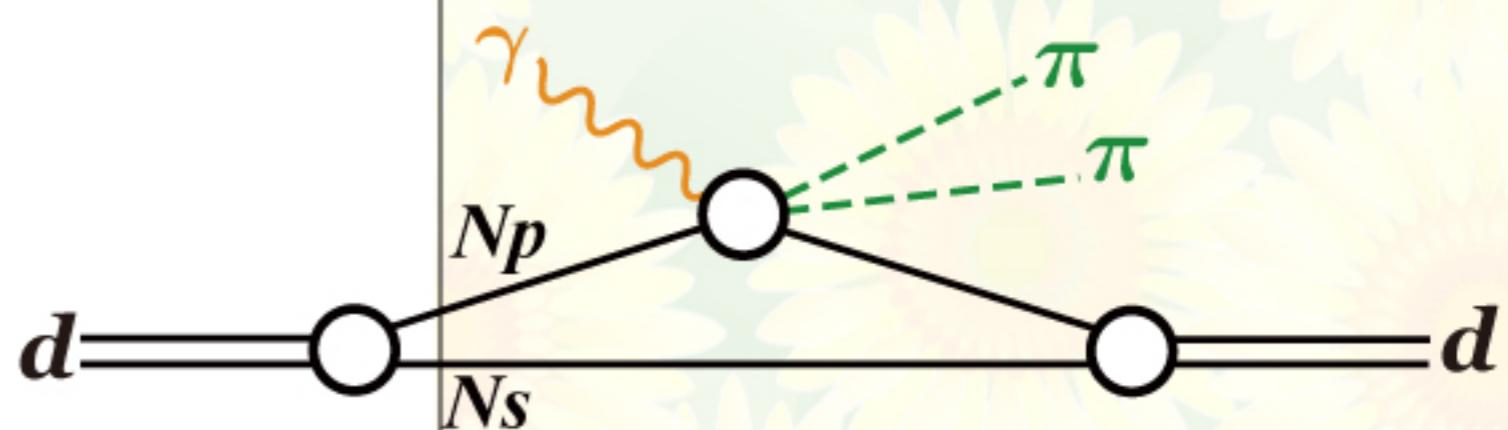
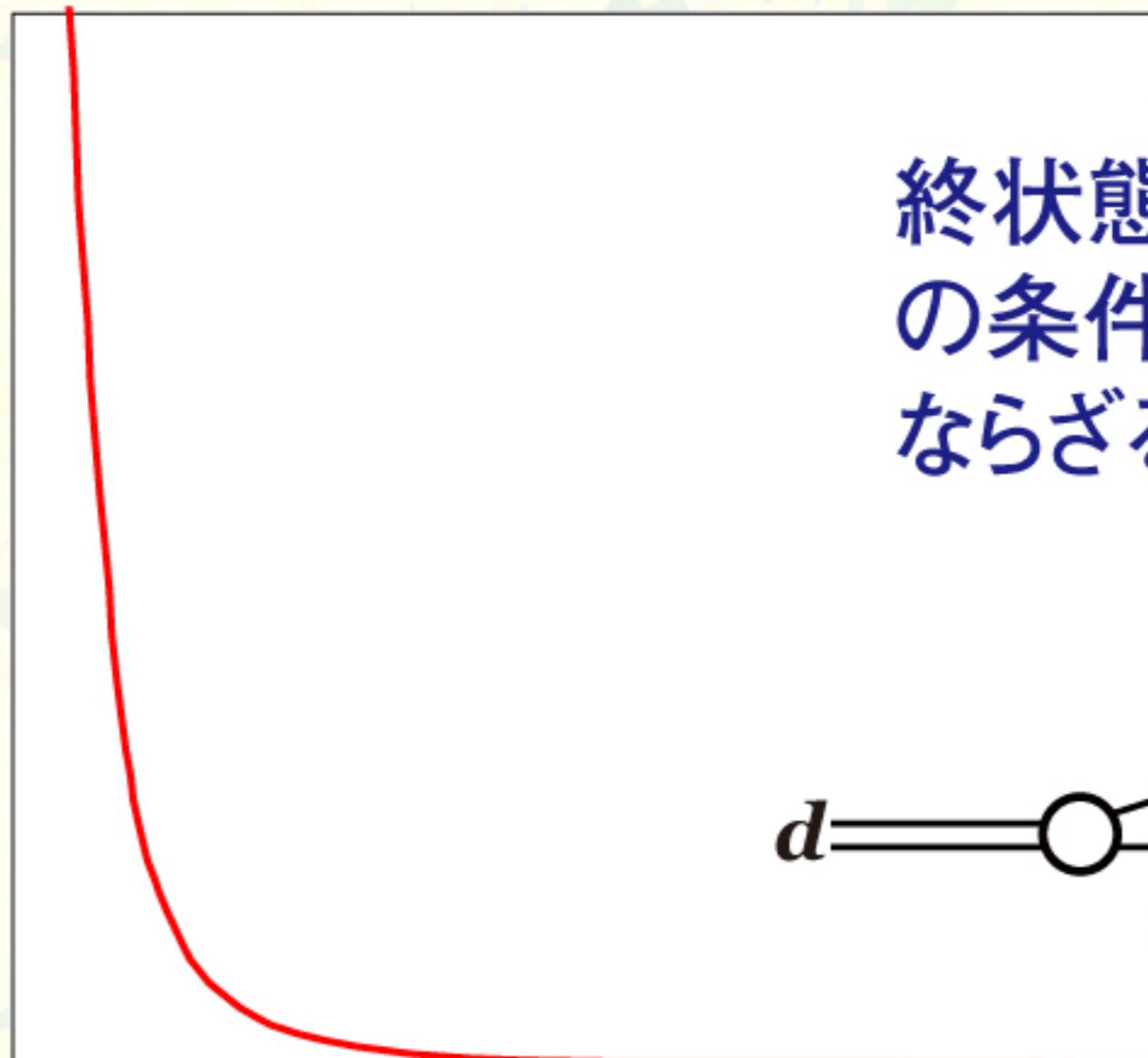


比較的  
フラット

# アイソベクター $d^*(2150)$

$\mathcal{D}_{12}$  の研究には  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  が有利！

QFC



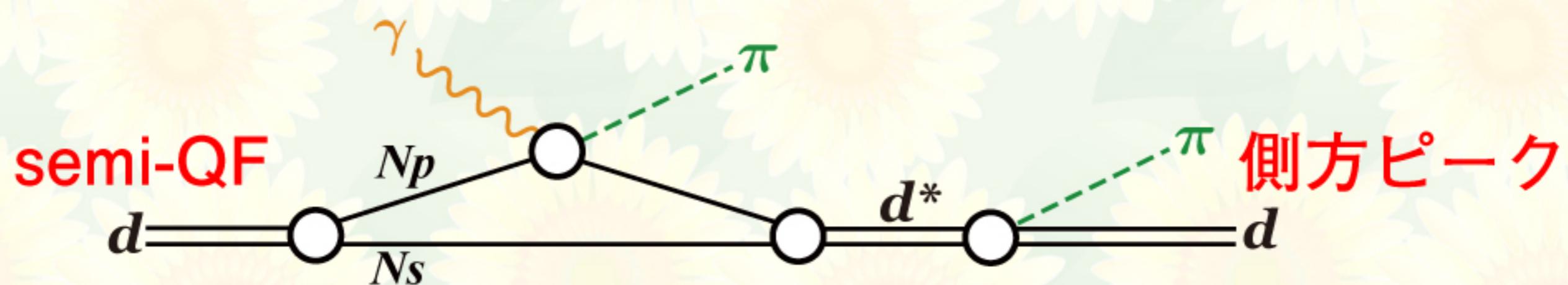
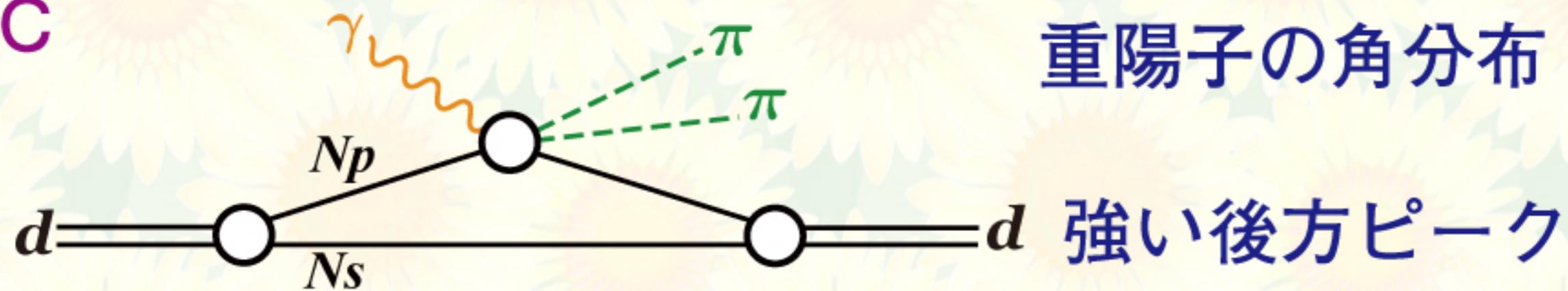
-1                    0                    +1

$\gamma d$  CM 系での重陽子の角分布

# アイソベクター $d^*(2150)$

$\mathcal{D}_{12}$  の研究には  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  が有利！

QFC



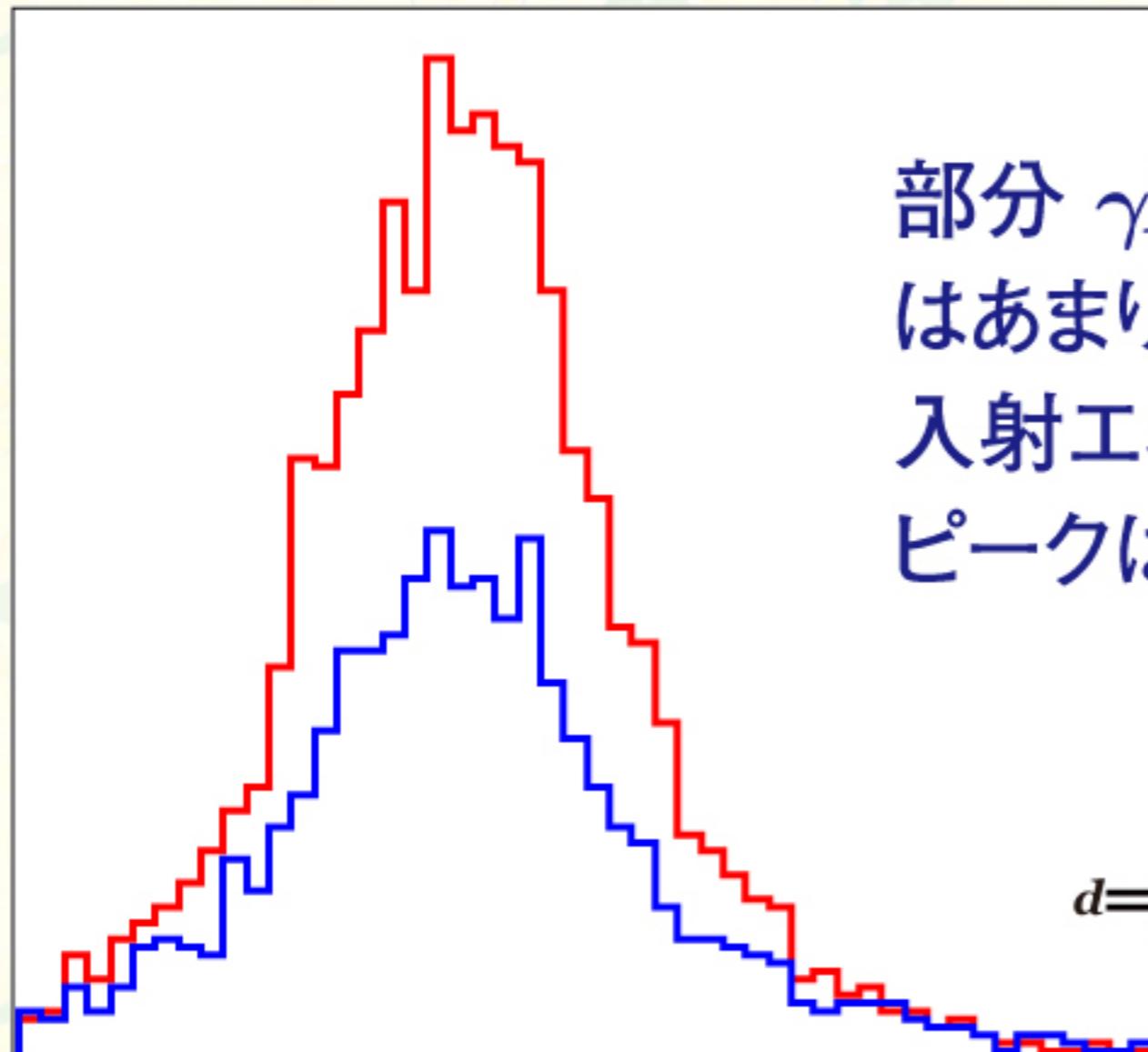
dibaryon



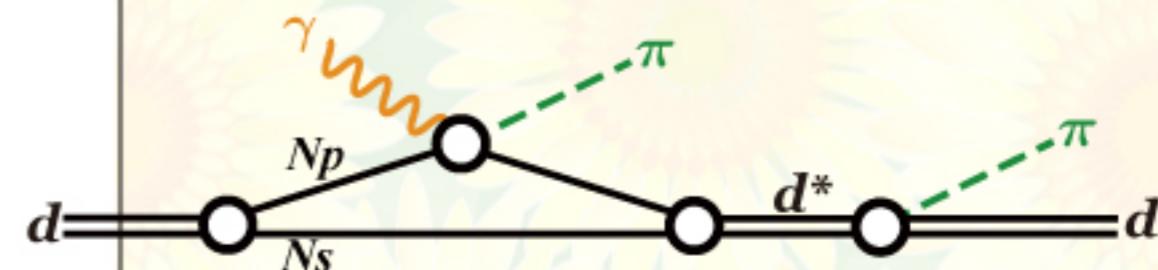
# アイソベクター $d^*(2150)$

$\mathcal{D}_{12}$  の研究には  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  が有利！

semi-QF



部分  $\gamma N$  CM エネルギーの違い  
はあまりない  
入射エネルギーが上がるにつれて  
ピークは右に



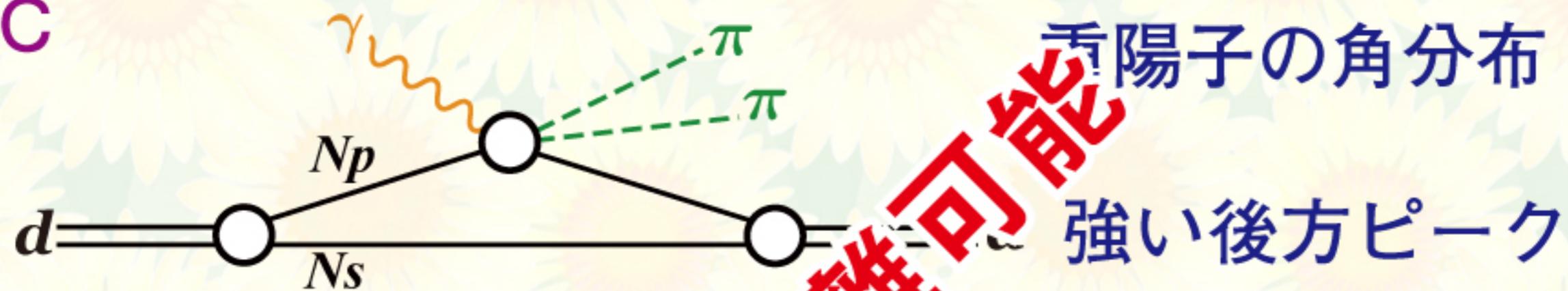
-1                    0                    +1

$\gamma d$  CM 系での重陽子の角分布

# アイソベクター $d^*(2150)$

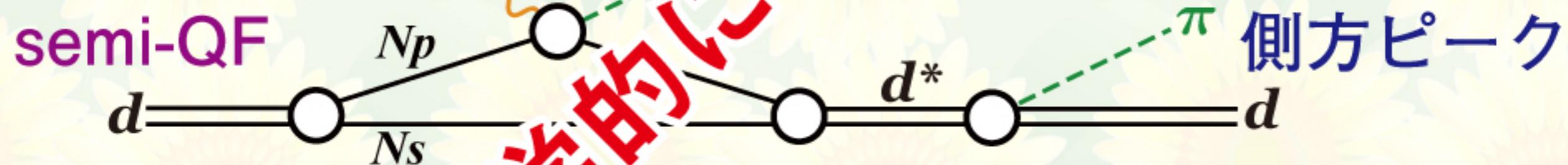
$\mathcal{D}_{12}$  の研究には  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  が有利！

QFC



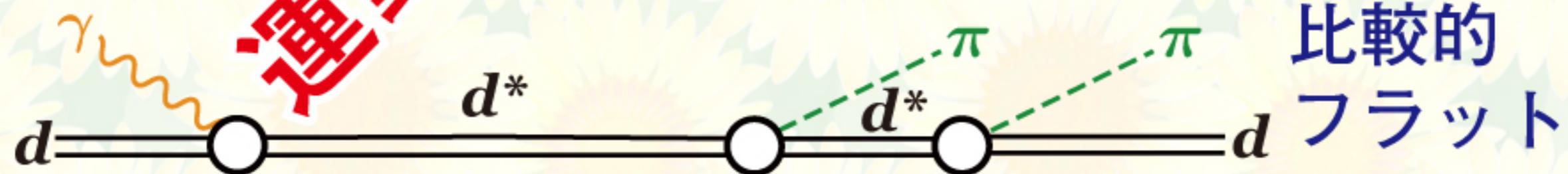
重陽子の角分布

強い後方ピーグ



側方ピーグ

dibaryon



比較的  
フラット



# 実験セットアップ

# 実験セットアップ

# 高エネルギー光子ビーム

2009年12月1日 **Laboratory of Nuclear Science (LNS)**

理学研究科附属原子核理学研究施設(核理研)が改組

2011年4月1日 **Research Center for Electron Photon Science (ELPH)**

全国共同利用・共同研究拠点に



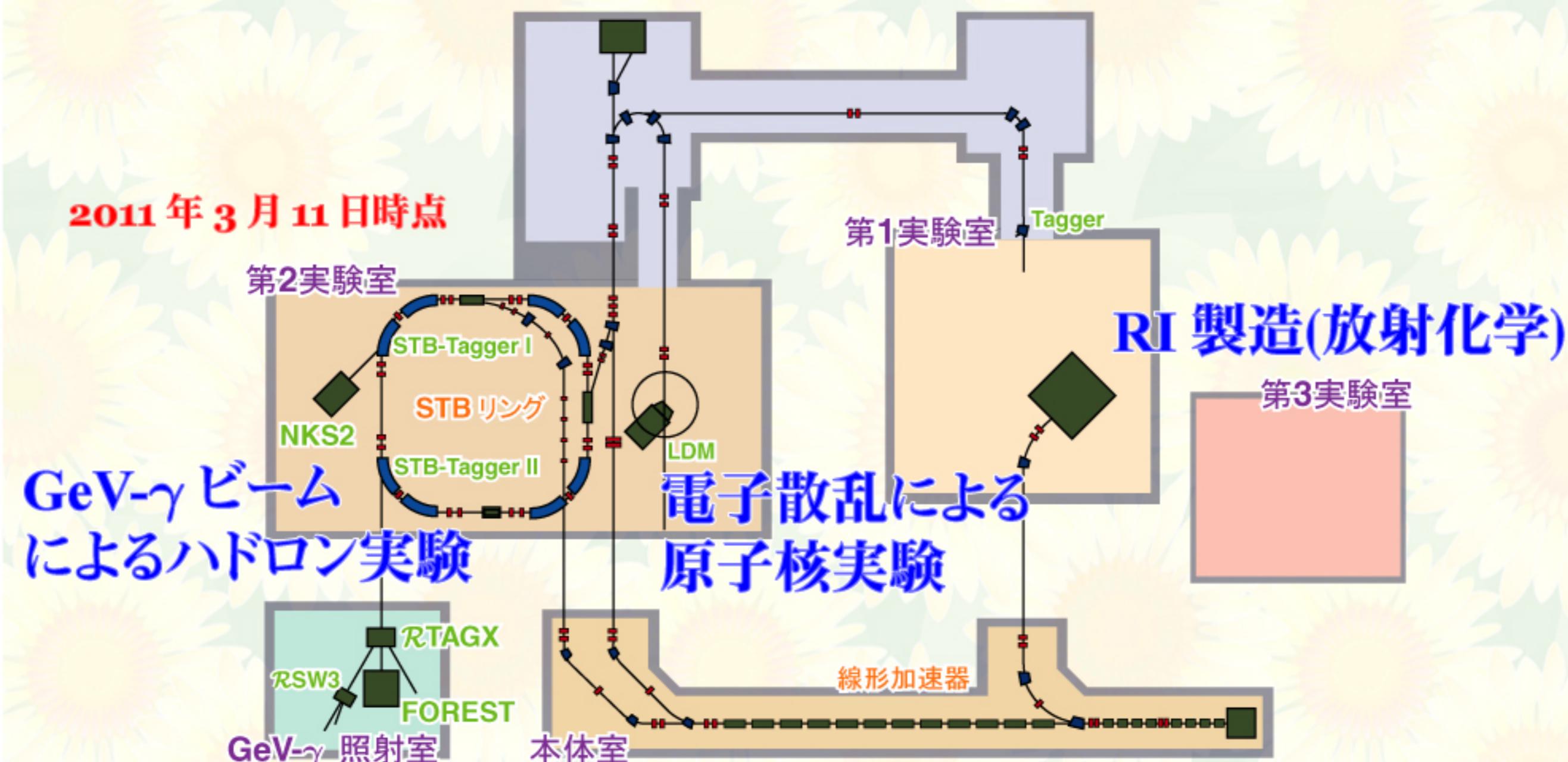
# 高エネルギー光子ビーム

2009年12月1日 **Laboratory of Nuclear Science (LNS)**

理学研究科附属原子核理学研究施設(核理研)が改組

2011年4月1日 **Research Center for Electron Photon Science (ELPH)**

全国共同利用・共同研究拠点に





# 高エネルギー光子ビーム

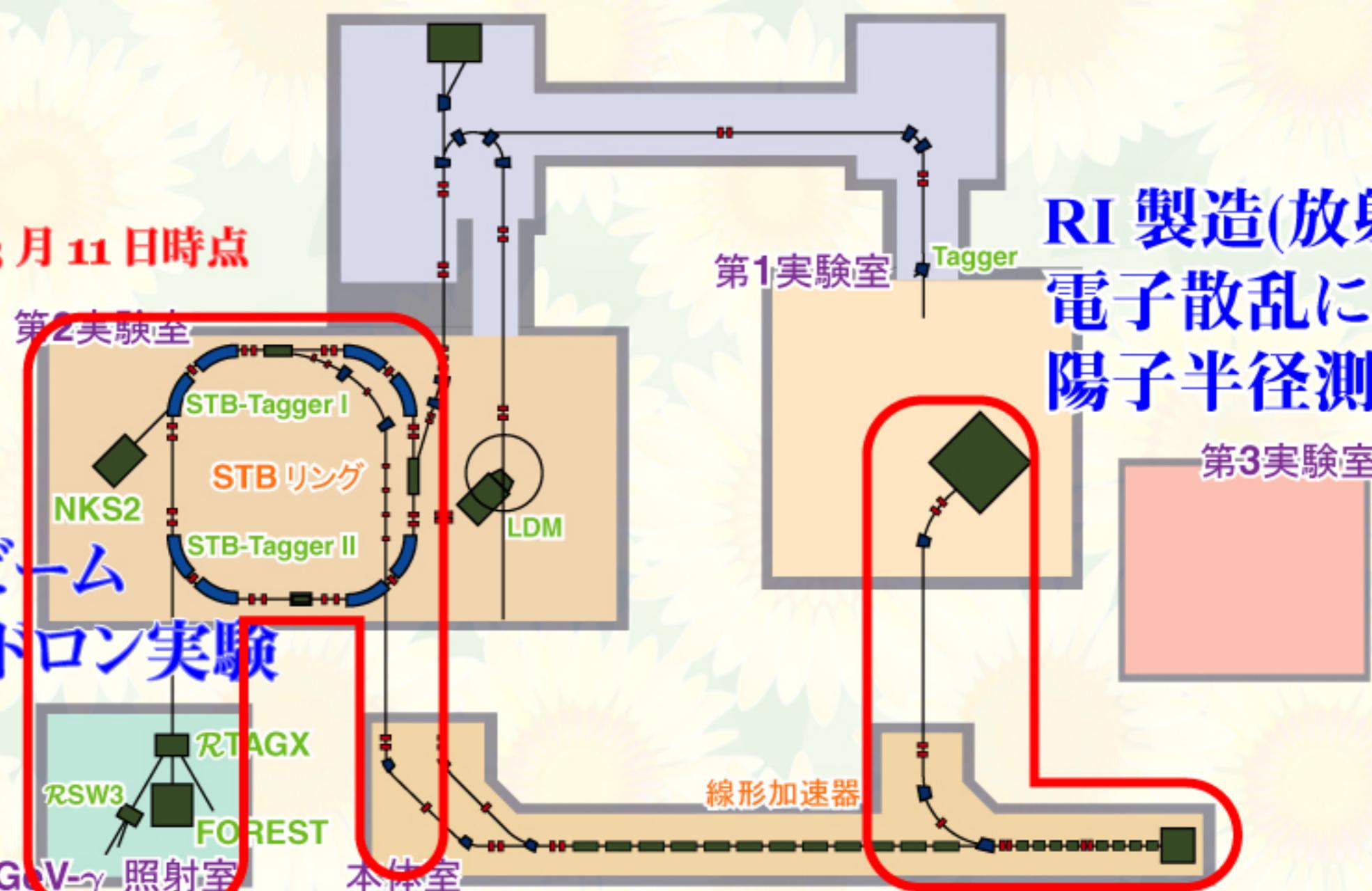
2009年12月1日 **Laboratory of Nuclear Science (LNS)**

理学研究科附属原子核理学研究施設(核理研)が改組

2011年4月1日 **Research Center for Electron Photon Science (ELPH)**

全国共同利用・共同研究拠点に

2011年3月11日時点



# 高エネルギー光子ビーム

電子線形加速器

150 MeV 震災後 93 MeV

電子シンクロトロン

最大 1.2 GeV

震災後 1.3 GeV

NKS2

大口径磁気

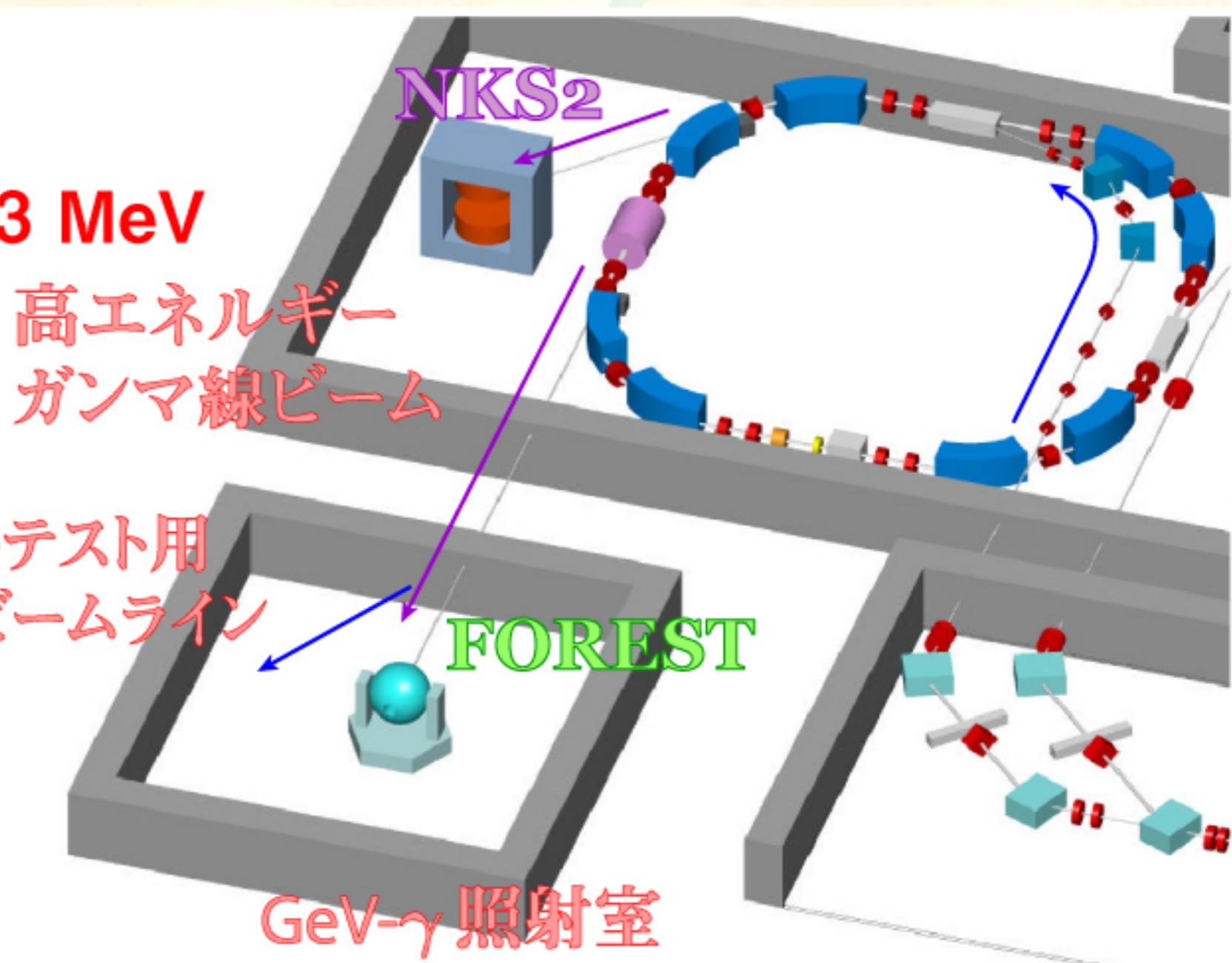
スペクトロメータ

$K^0$  光生成

FOREST

大立体角電磁カロリメータ

$\pi^0, \eta$  光生成

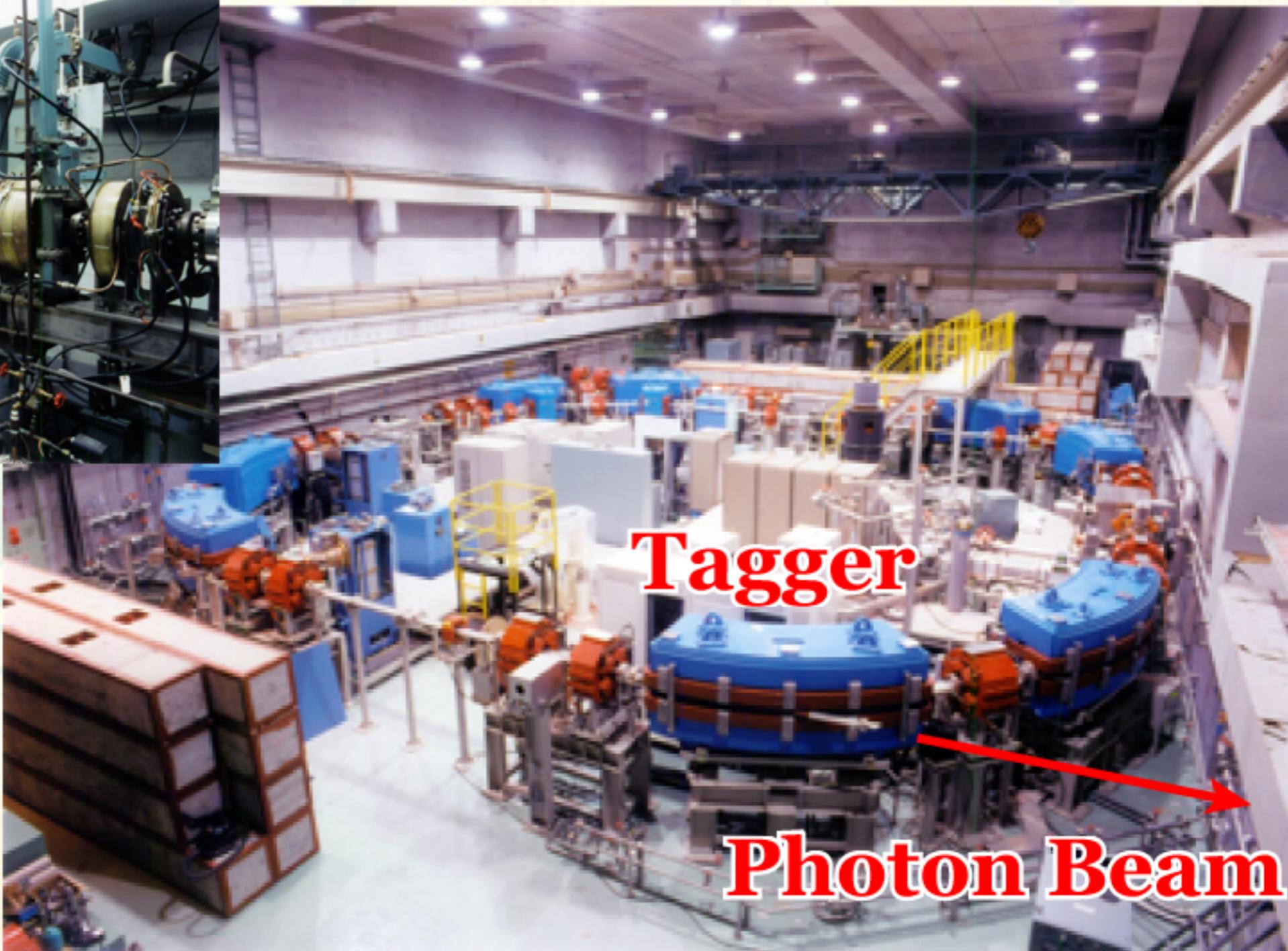


# 高エネルギー光子ビーム

震災前



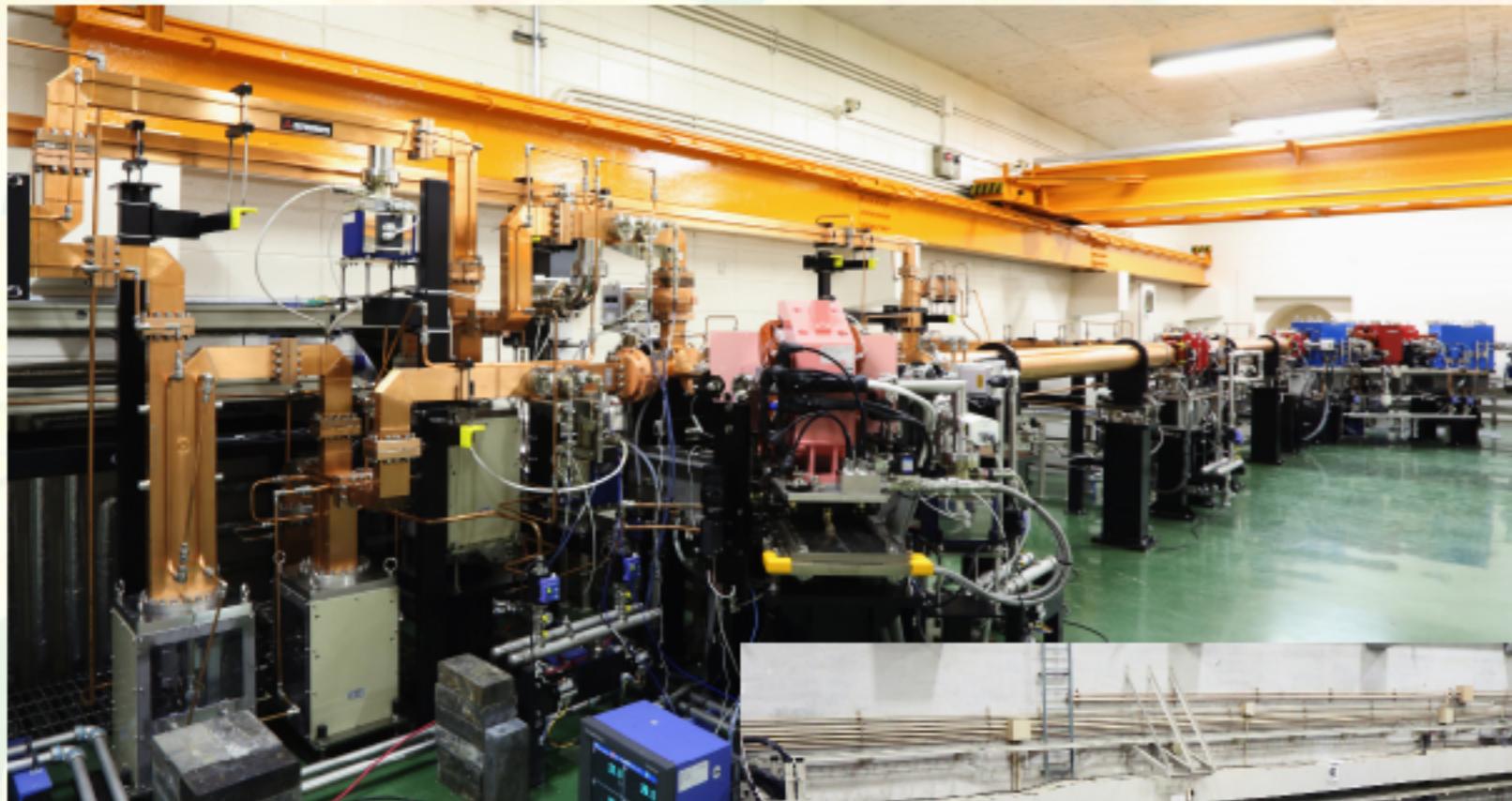
**300 MeV Linear Accelerator (LINAC)**



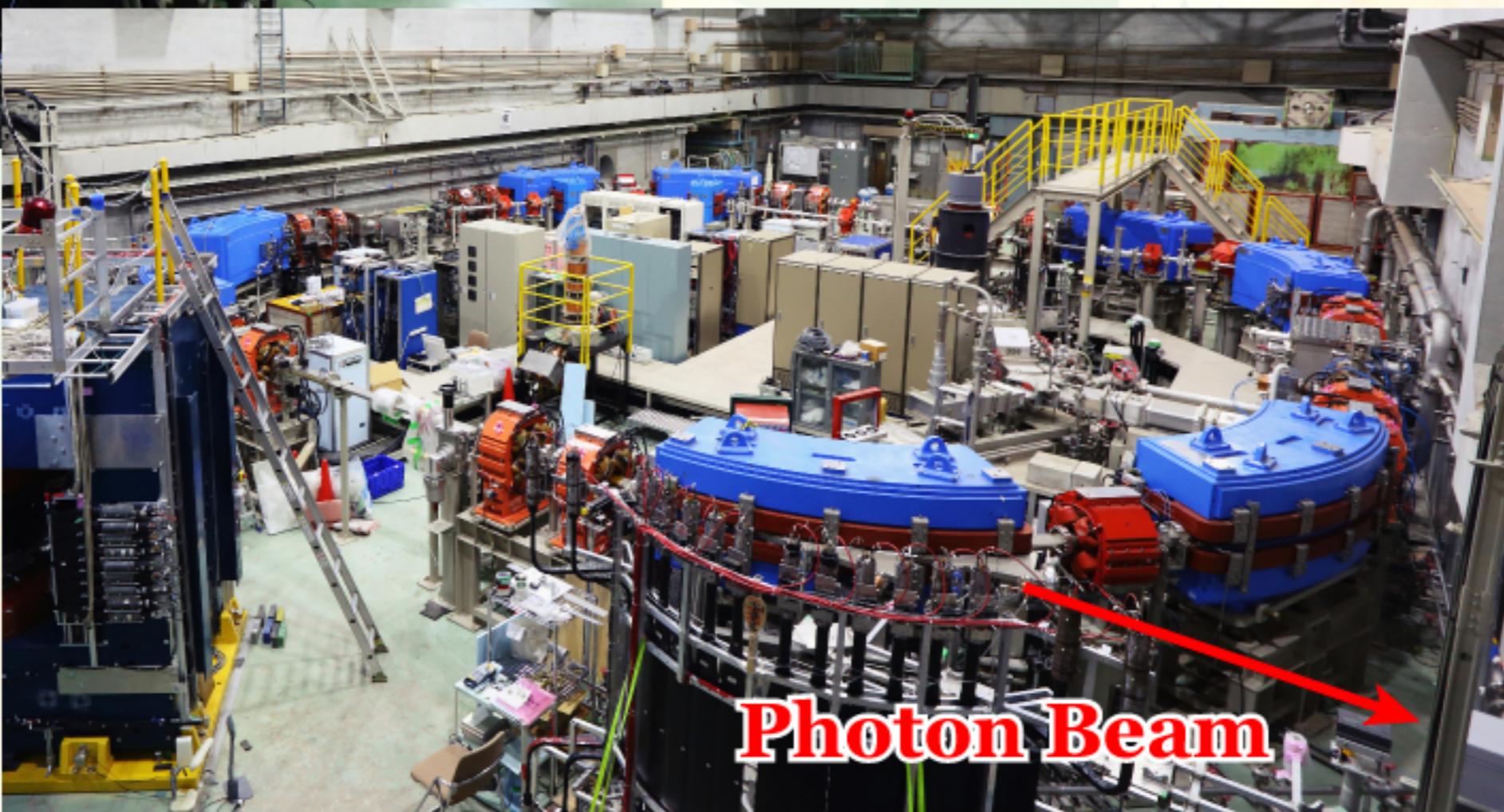
**1.2 GeV Streicher Booster Ring**

# 高エネルギー光子ビーム

現在



93 MeV injector



Photon Beam

# 高エネルギー光子ビーム

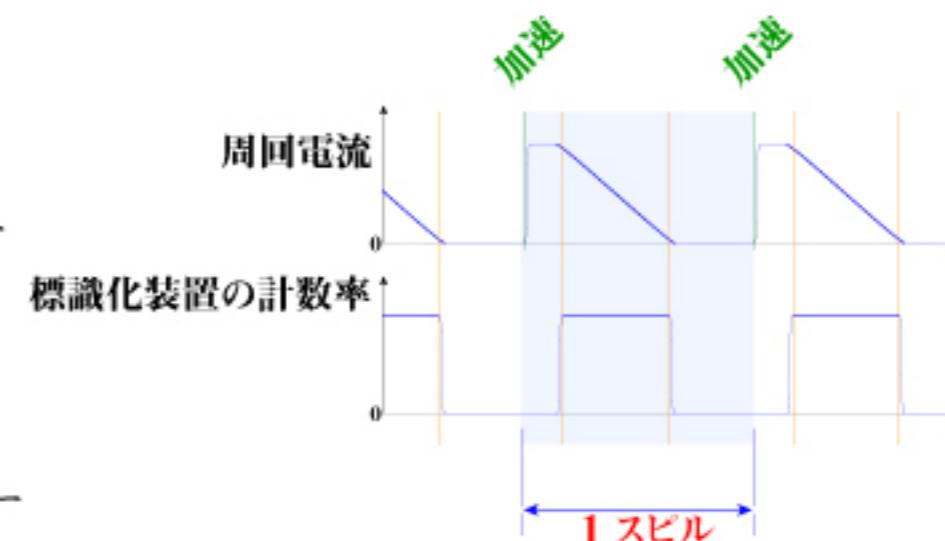
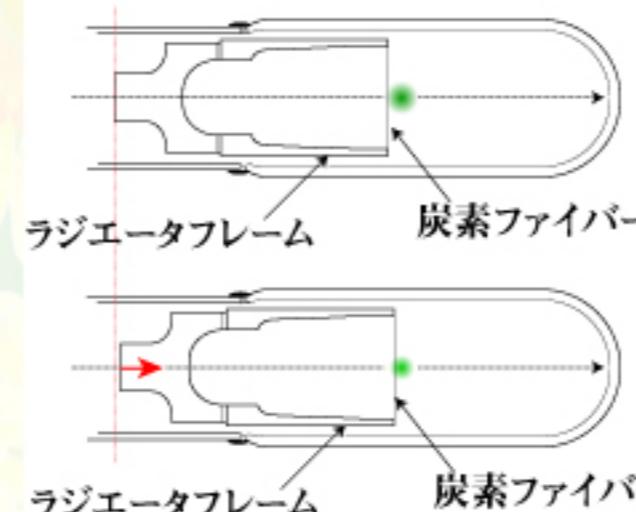
標識化ガンマ線ビーム

$E_\gamma = 740\text{-}1150 \text{ MeV}$

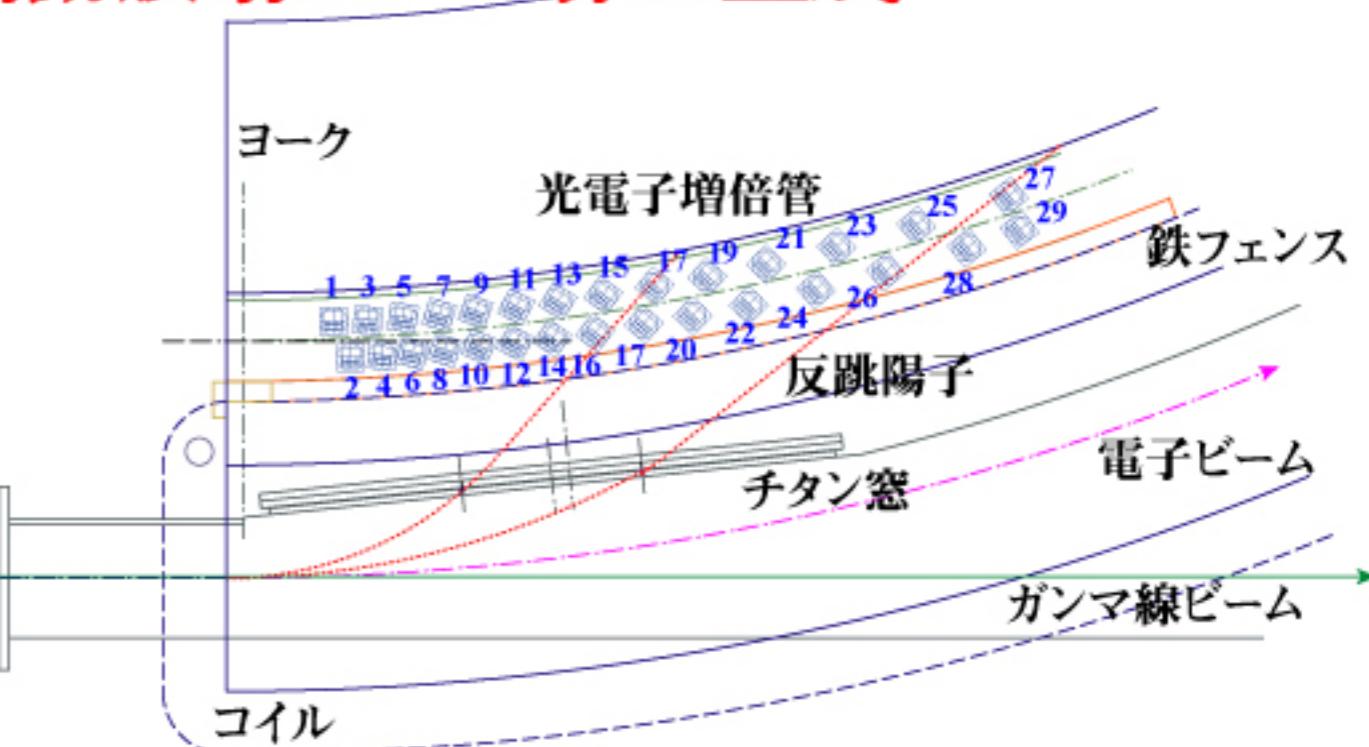
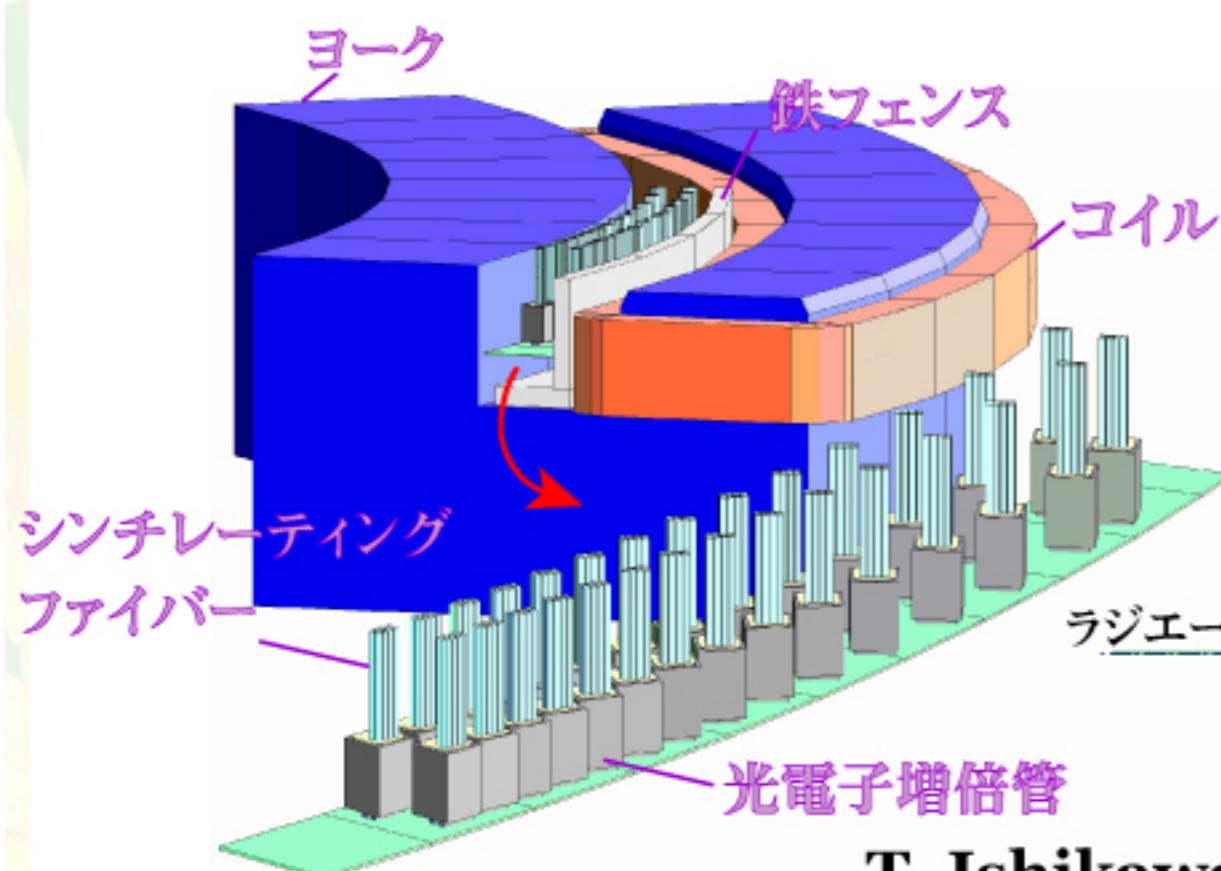
周回電子  $1200 \text{ MeV}$

$E_\gamma = 580\text{-}880 \text{ MeV}$

周回電子  $920 \text{ MeV}$



世界唯一の周回電子ビームによる  
制動放射ガンマ線の生成



- T. Ishikawa et al., Nucl. Inst. Meth. A 622, 1 (2010);  
 T. Ishikawa et al., Nucl. Inst. Meth. A 811, 124 (2015);  
 Y. Matsumura et al., Nucl. Inst. Meth. A 902, 103 (2018).

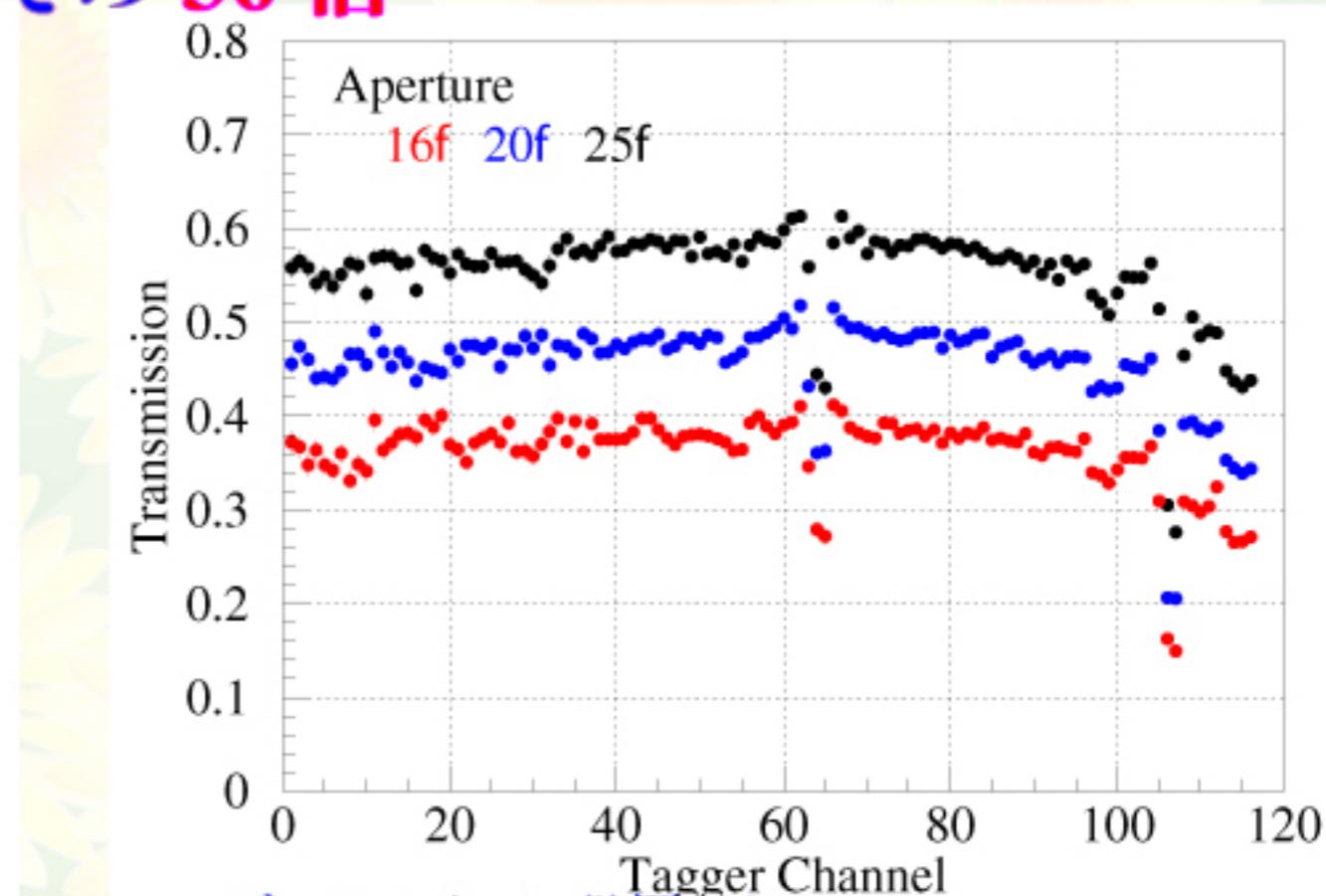
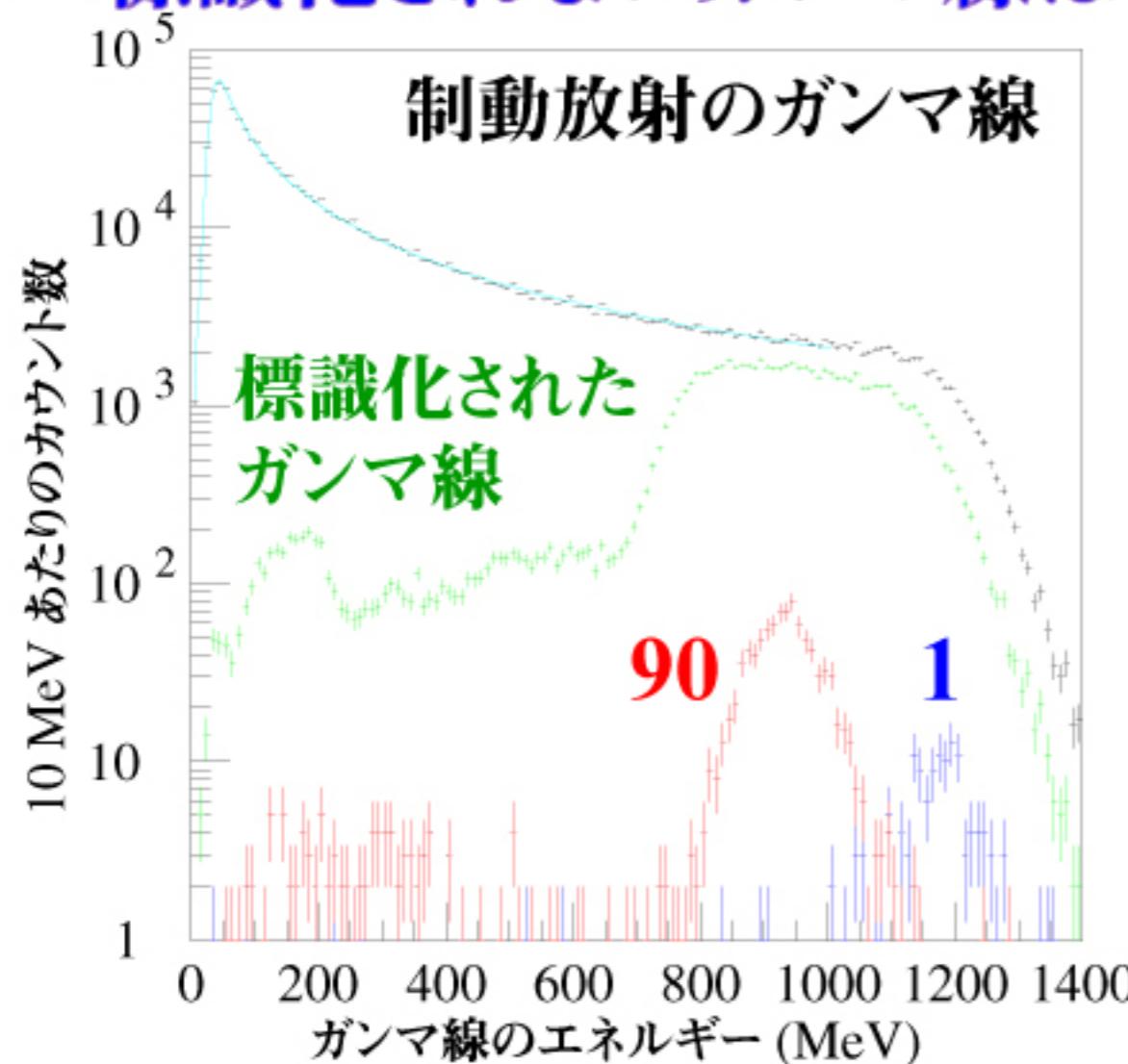
# 高エネルギー光子ビーム

Tagger のレート 20 MHz

ガンマ線透過率 ~50%

標識化ガンマ線のレート 10 MHz

標識化されないガンマ線はその 36 倍



GeV- $\gamma$  ビームラインに設置した SF5  
鉛ガラスチェレンコフ検出器で測定した  
制動放射のガンマ線が標識化される割合。

- T. Ishikawa et al., Nucl. Inst. Meth. A 622, 1 (2010);  
T. Ishikawa et al., Nucl. Inst. Meth. A 811, 124 (2015);  
Y. Matsumura et al., Nucl. Inst. Meth. A 902, 103 (2018).

# 高エネルギー光子ビーム

電子ビーム

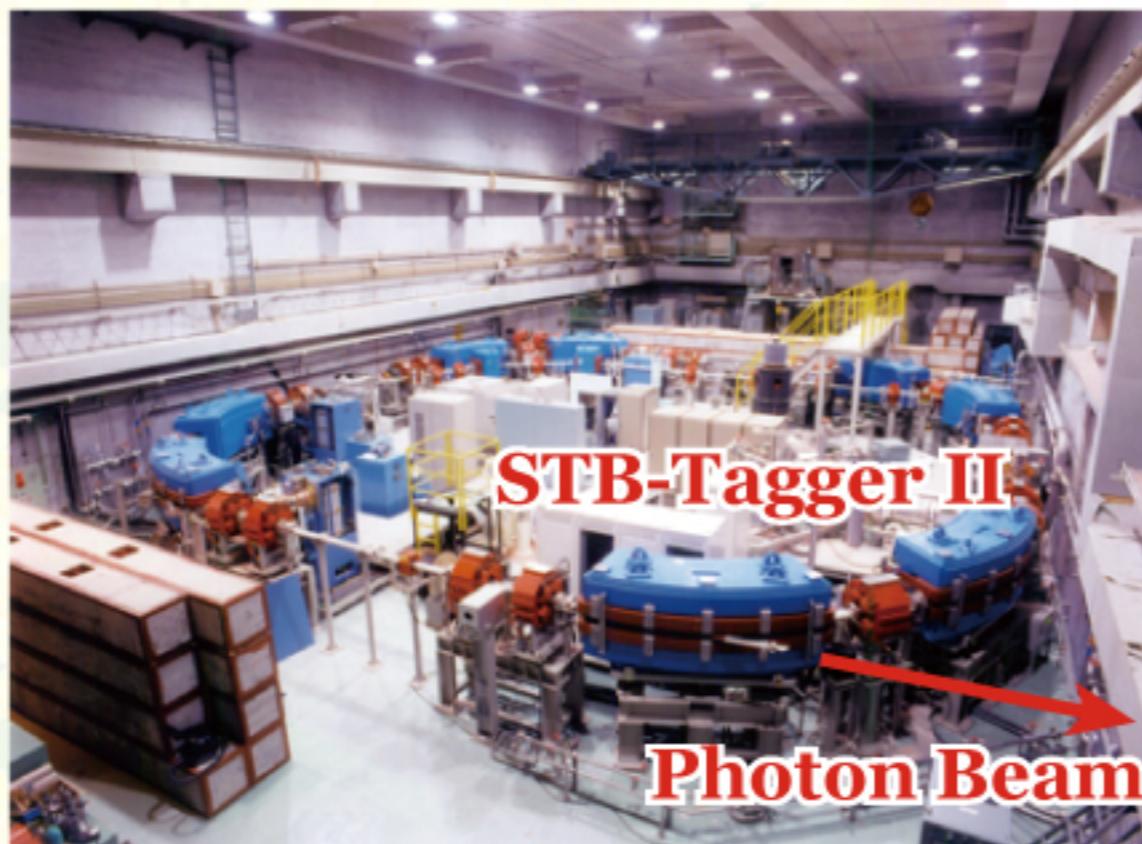
線形加速器 **150 MeV**

電子シンクロトロン **1200 MeV (max)**

光子ビーム

制動放射

エネルギー標識化

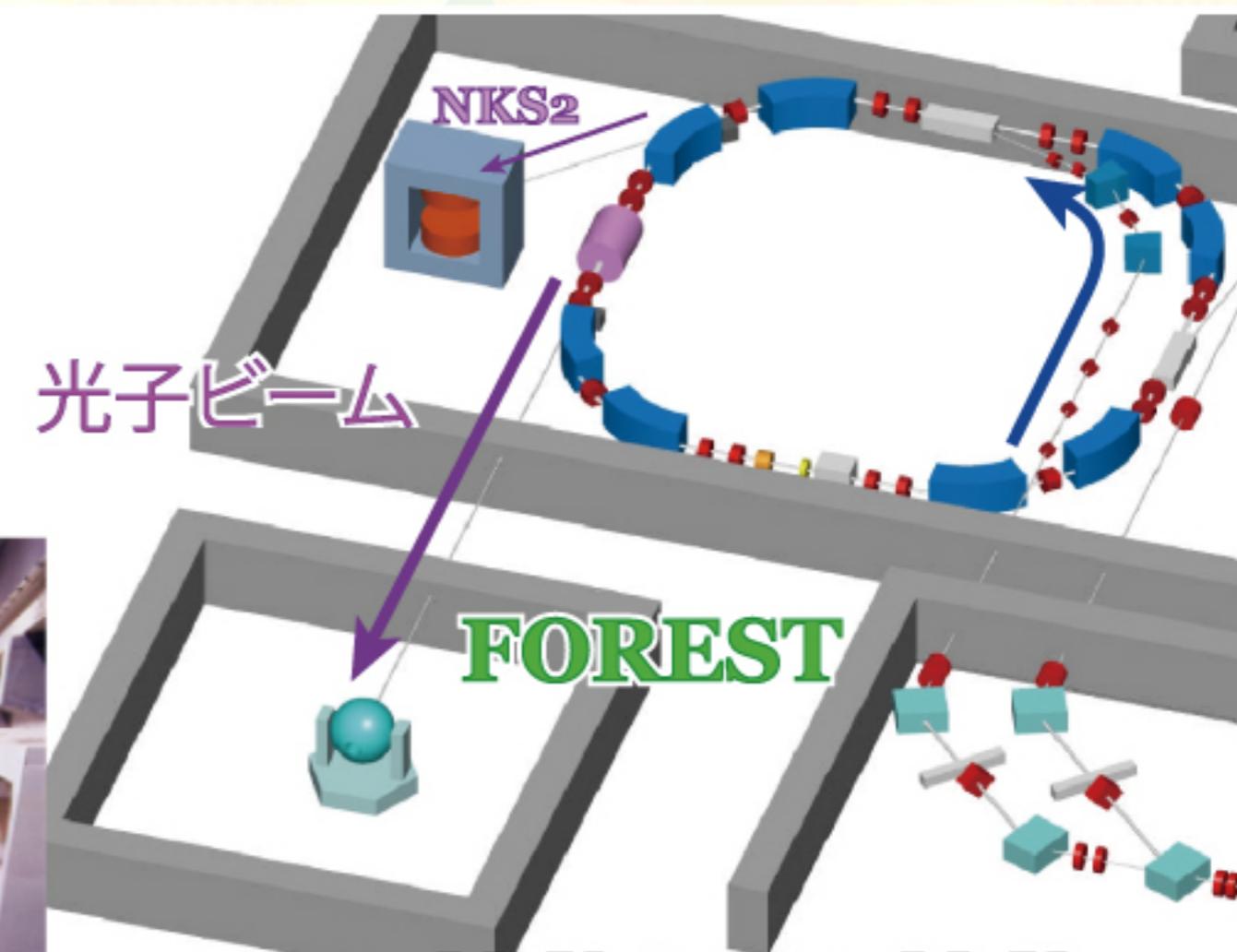


**1.2 GeV STretcher Booster Ring**

T. Ishikawa et al., Nucl. Instr. Meth. A 622, 1 (2010);

T. Ishikawa et al., Nucl. Instr. Meth. A 811, 124 (2016);

Y. Matsumura et al., Nucl. Instr. Meth. A 902, 103 (2018).



**740~1150 MeV @ 1200 MeV**

**~20 MHz (photon: 10 MHz)**

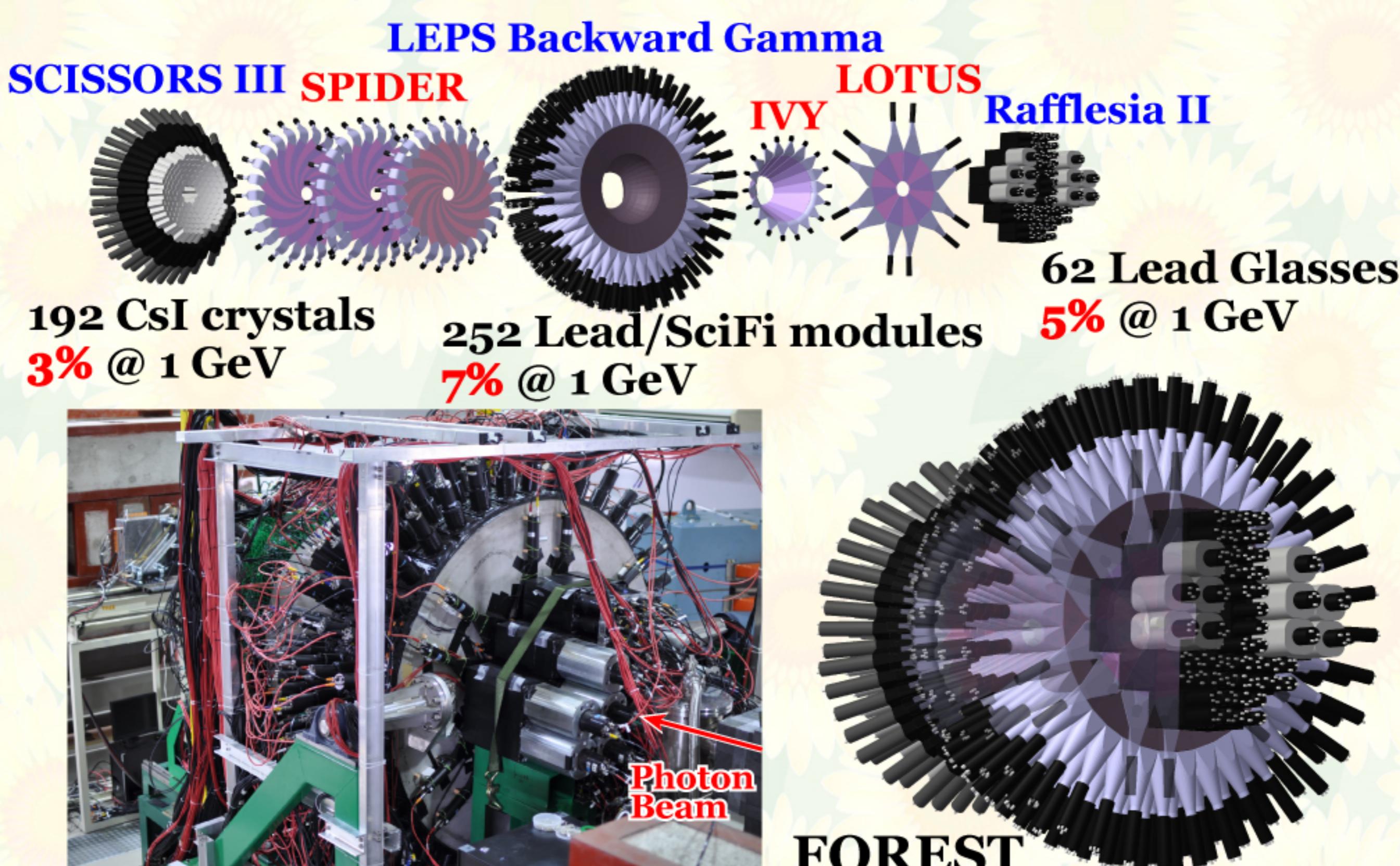
**$W_{\gamma d}=2.50\sim2.80 \text{ GeV}$**

**570~890 MeV @ 930 MeV**

**~2.8 MHz (photon: 1.2 MHz)**

**$W_{\gamma d}=2.38\sim2.61 \text{ GeV}$**

# 電磁力口リメータ FOREST



T. Ishikawa et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 832, 108 (2016).

T. Ishikawa, 23 July 2018

# 電磁力口リメータ FOREST

## 電磁力口リメータ

電磁シャワーを利用して数 100 MeV のガンマ線のエネルギーを測定する (破壊的な検出器)

対生成、制動放射のカスケード

## 無機シンチレータ結晶

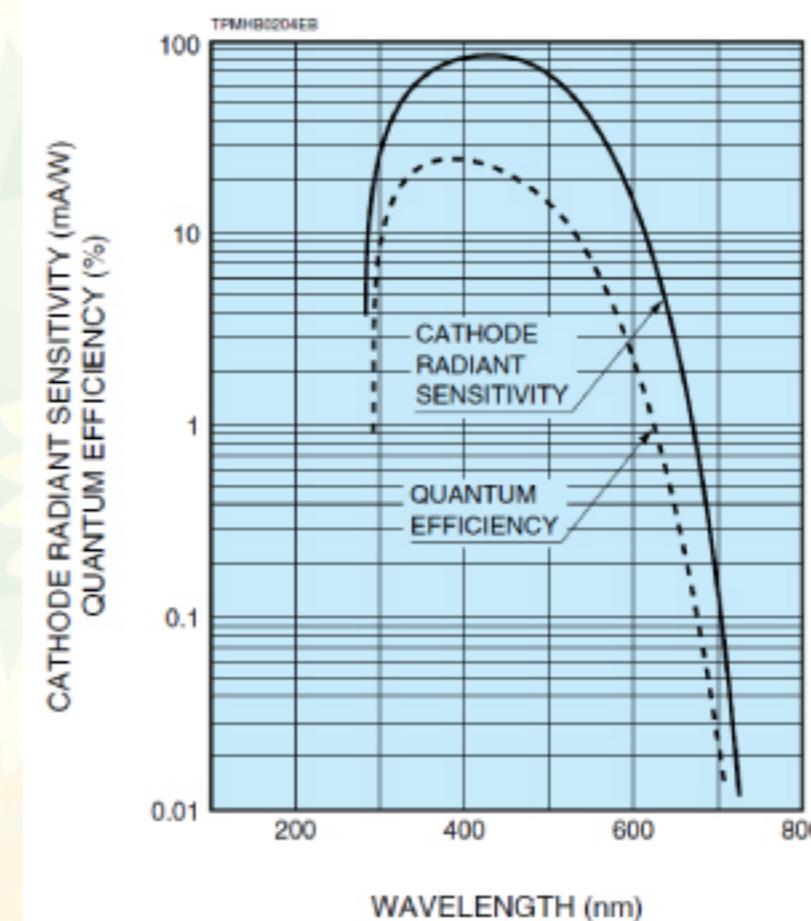
大きい Z、大きい密度 (短い放射長)

荷電粒子でシンチレーション光を発生

BGO (可視光)、CsI (近紫外線) などは  
光電子増倍管の感度にマッチ



光電子増倍管  
近紫外線、可視光を  
電気信号に変換する



T. Ishikawa et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 832, 108 (2016).

T. Ishikawa, 23 July 2018

# 電磁力口リメータ FOREST

## サンプリング型カロリメータ

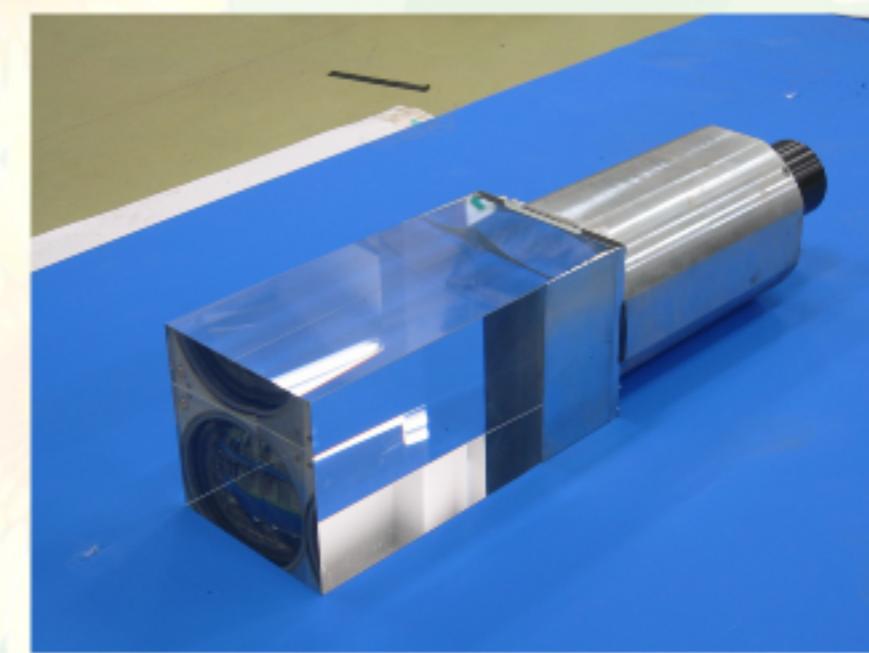
電磁シャワーを起こす短い放射長の物質(鉛)など  
シンチレーション光を発生するプラスチックシンチレータなど



比較的安価だがエネルギー分解能はよくない

## チェレンコフ型カロリメータ

鉛ガラスなど  
エネルギー分解能は悪くはない  
電荷をもったハドロンに対する応答に難あり



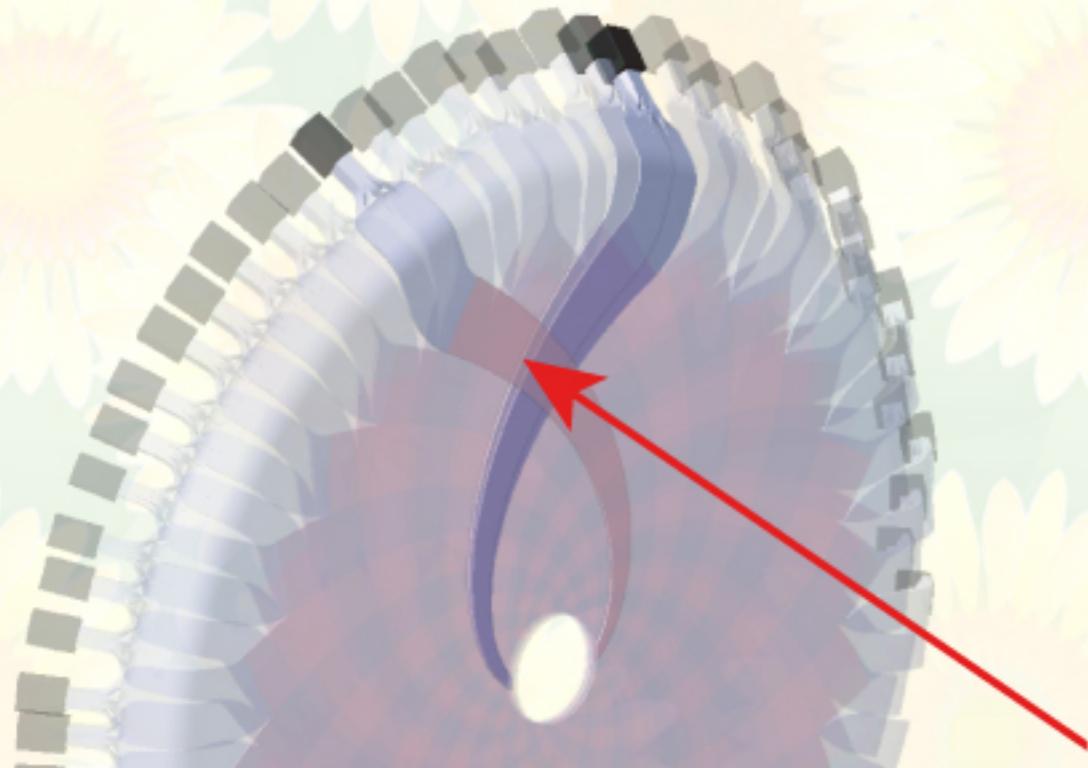


# 電磁カロリメータ FOREST

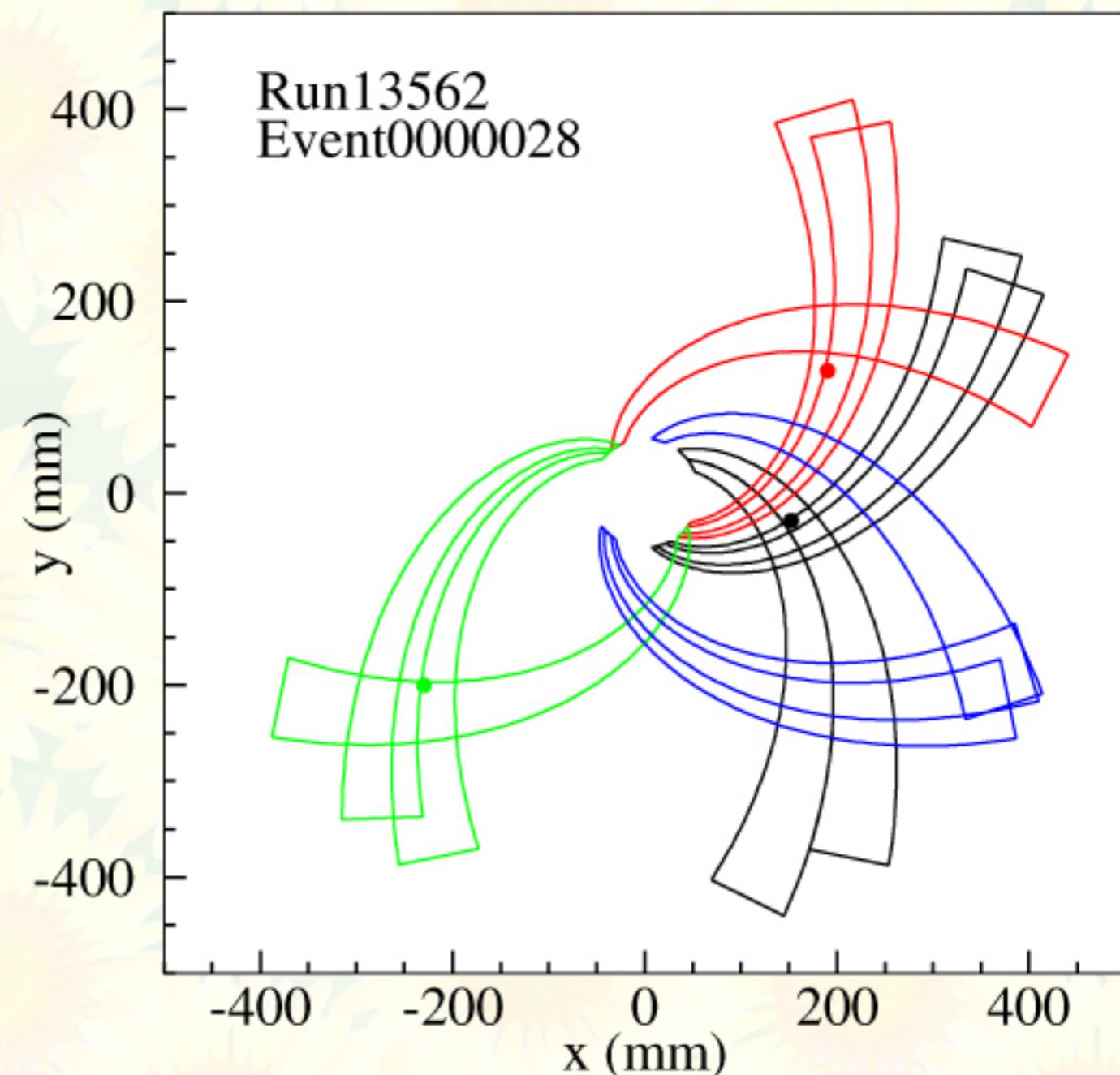
荷電粒子の識別

複数の粒子に対応するために  
ホドスコープ構造

前面に配置したホドスコープの応答の生む



特に前方電磁カロリメータ用の  
ホドスコープは  
右巻き 2 層、左巻き 1 層の  
螺旋型プラスチックシンチレータ  
で入射位置が測定できる



T. Ishikawa et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 832, 108 (2016).

T. Ishikawa, Ignite 2018

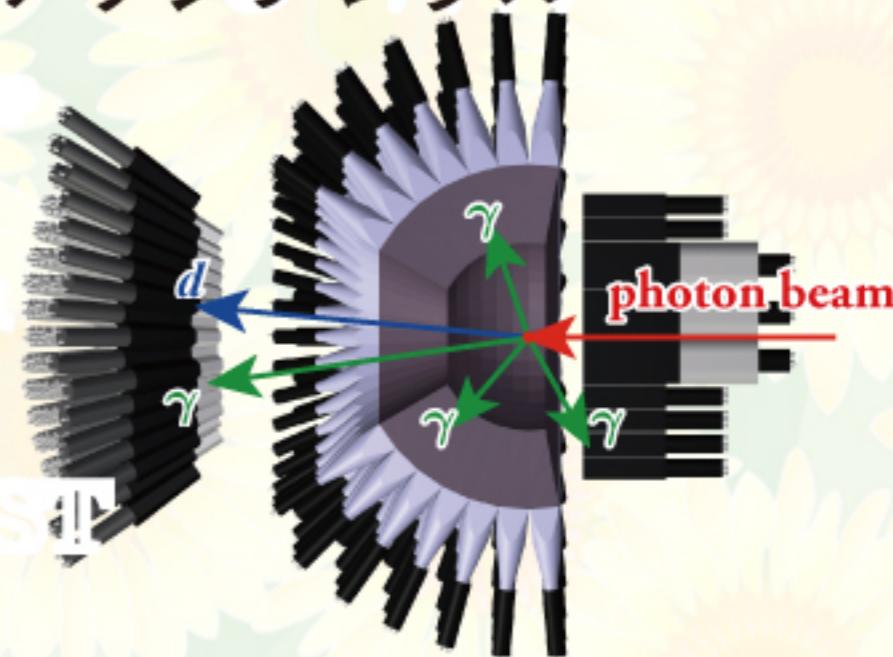


$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応

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

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：イベント選別

1. 中性クラスター 4 つと荷電クラスター 1 つ
2. 中性パイオンは  $\gamma\gamma$  崩壊で同定  
4 つの中性クラスターのどの二つに対しても、  
時間差が組み合わせに応じた時間分解能  $\sigma_t$  に対して  $3\sigma_t$  未満
3. 重陽子は前方ホドスコープ SPIDER で検出 **PID なし**  
SCISSORS III の応答は要求せず  
ガンマ線に対する遅延: 1 ns 以上  
測定エネルギーは:  $2E_{\text{mip}}$  以上
4. FOREST と光子ビーム標識化検出器のアクシデントル  
コインシデンスはサイドバンドを使って  
バックグラウンドの差し引き



# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：イベント選別

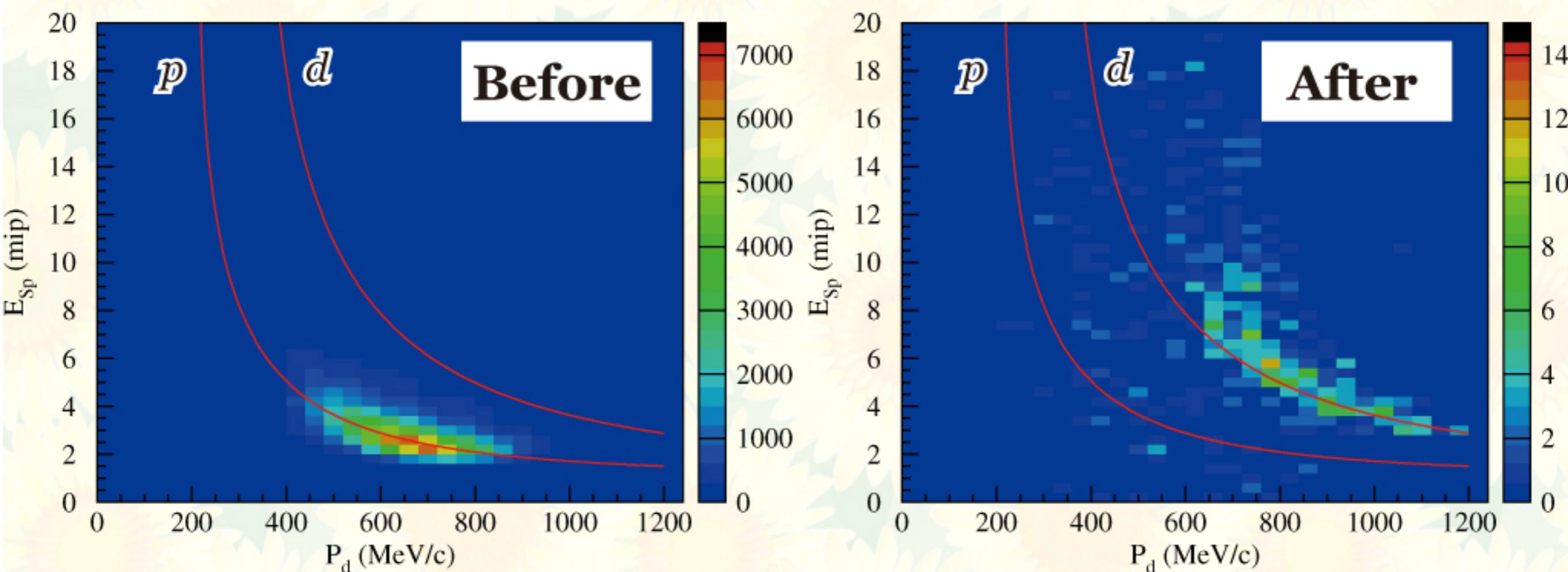
さらなるイベント選別

拘束条件が 6 つの運動学的フィット

エネルギー・運動量の保存: 4

$\gamma\gamma$  不変質量が  $m_{\pi^0}$ : 2

$\chi^2$  確率が **0.4** 以上



欠損運動量から求めた重陽子の運動量

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：イベント選別

さらなるイベント選別

拘束条件が 6 つの運動学的フィット

エネルギー・運動量の保存: 4

$\gamma\gamma$  不変質量が  $m_{\pi^0}$ : 2

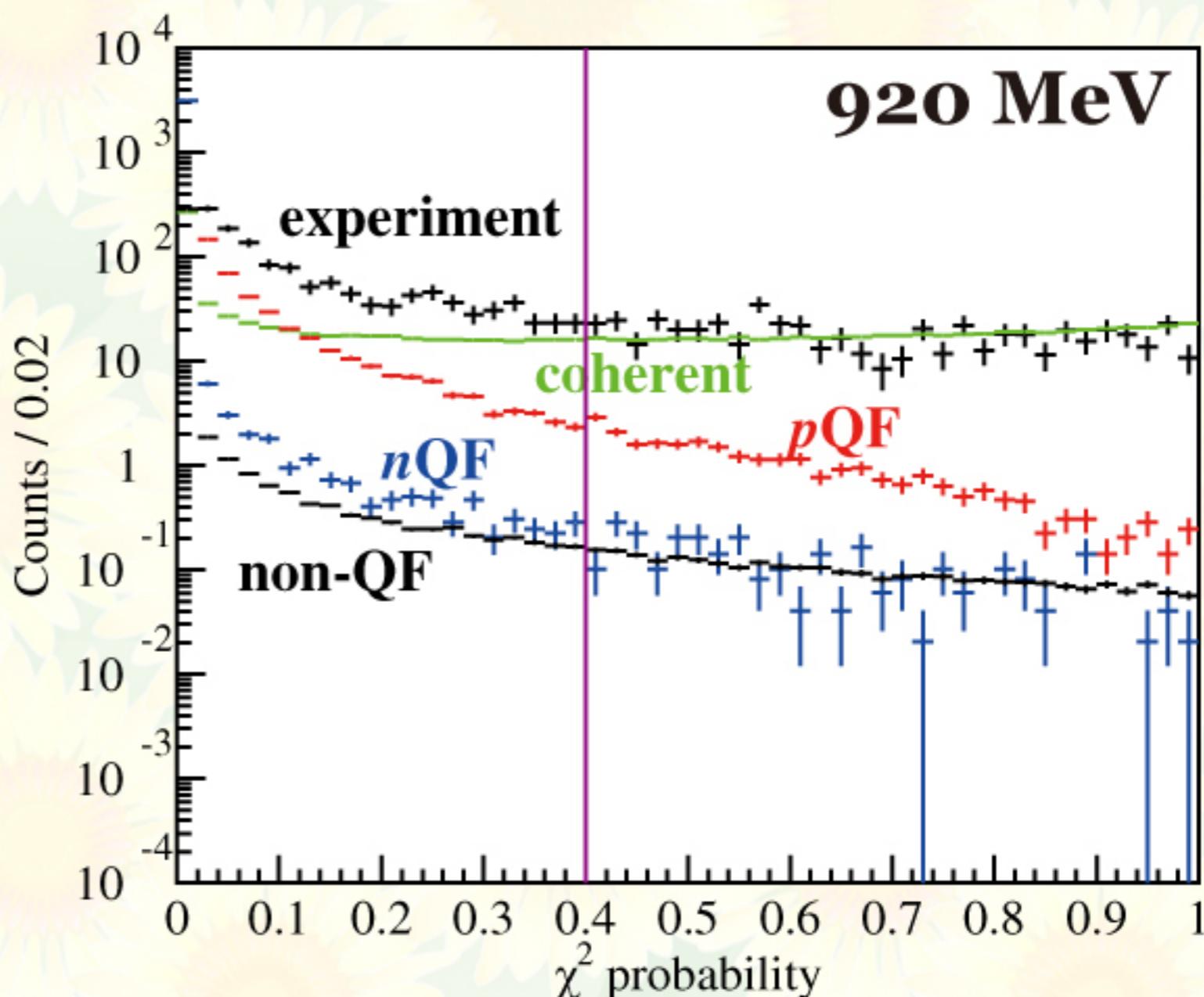
$\chi^2$  確率が **0.4** 以上

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  (coherent)

$\gamma p' \rightarrow \pi^0 \pi^0 p$  (pQF)

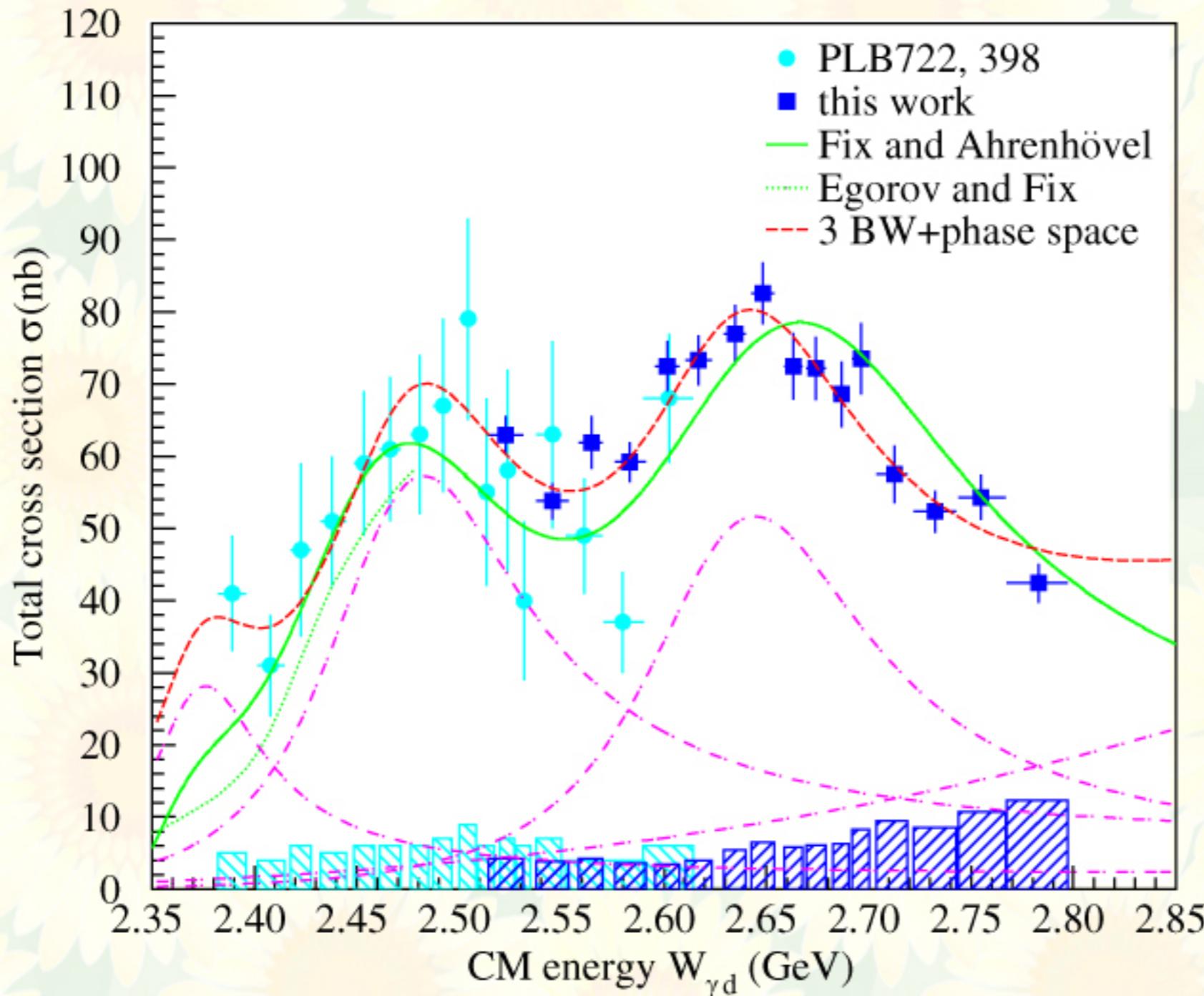
$\gamma n' \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$  (nQF)

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 pn$  (non QF)



# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：全断面積

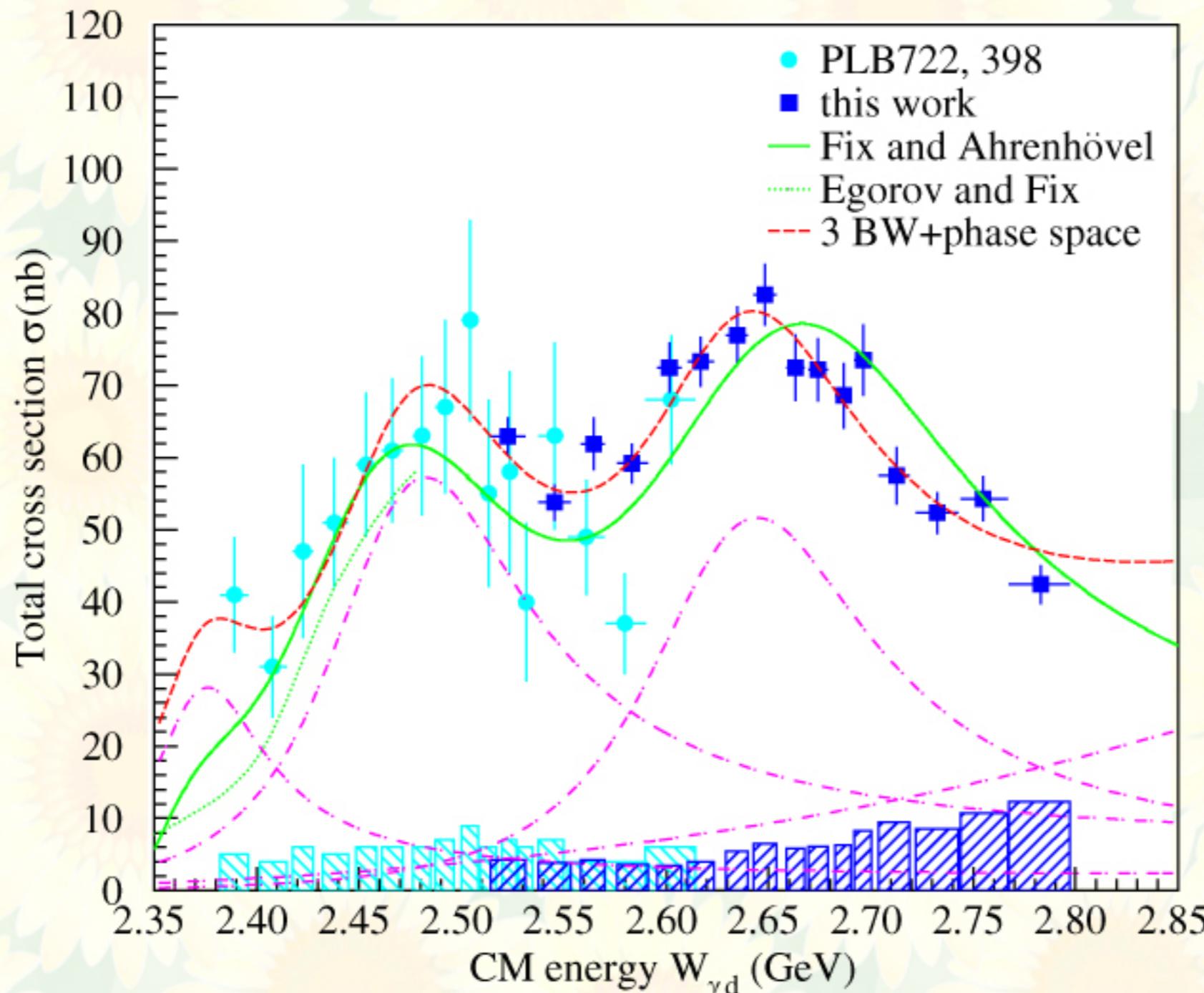
入射エネルギー 0.55~1.15 GeV



励起関数は単調増加ではない  
2.38 GeV に加えて 2.47、2.63 GeV にピーク構造

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：全断面積

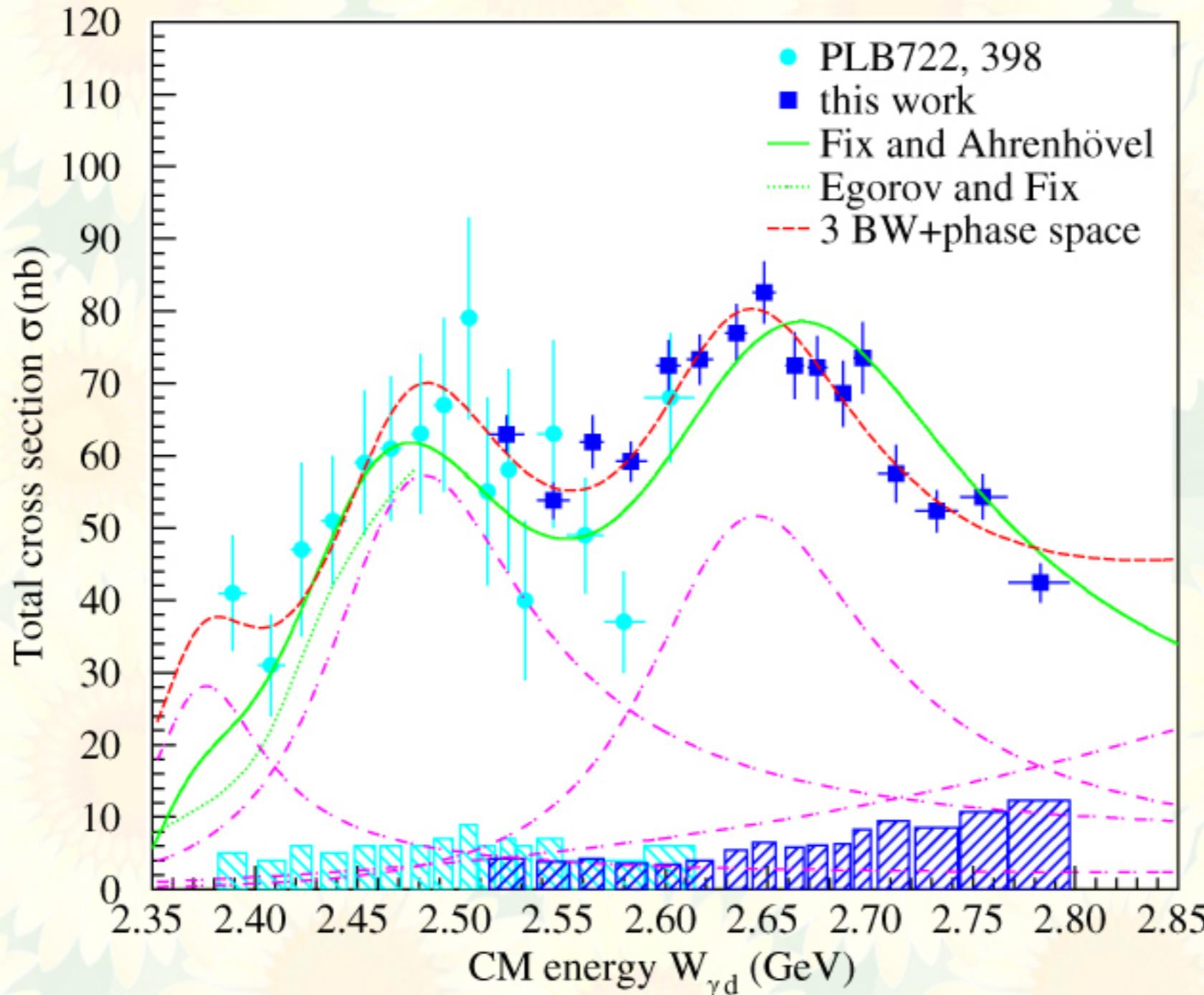
入射エネルギー 0.55~1.15 GeV



1.5、1.7 GeV にピークをもつ  $\gamma N \rightarrow \pi^0 \pi^0 N$  の励起関数に類似  
ナイーブな解釈は準自由過程での  $\pi^0 \pi^0$  生成

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：全断面積

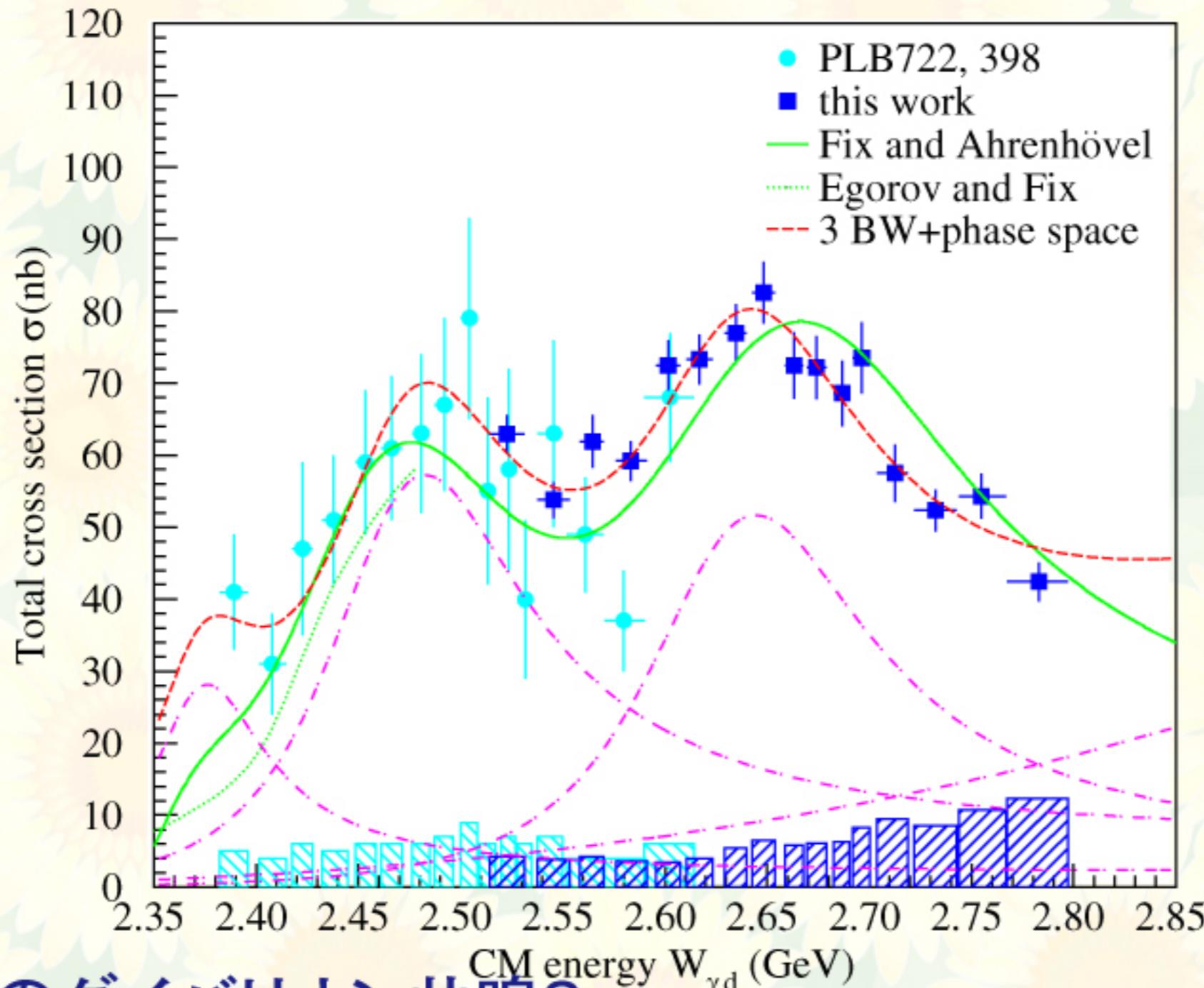
入射エネルギー 0.55~1.15 GeV



実際 QFC に基づいた理論計算は非常によく実験データを再現  
でも重陽子の角分布はほとんどフラット

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：全断面積

入射エネルギー 0.55~1.15 GeV



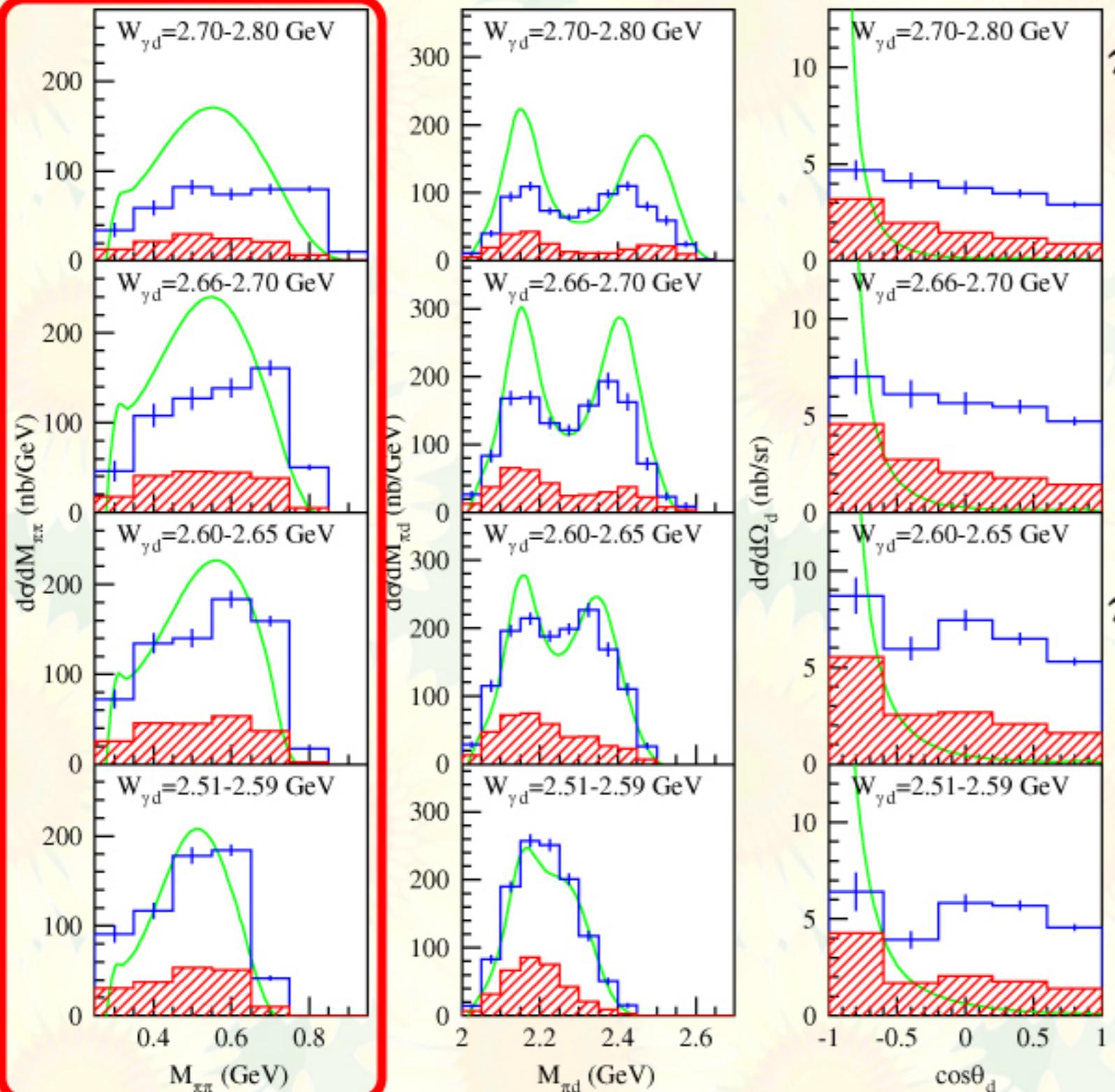
三つのダイバリオン共鳴?

質量 2.38 GeV、幅 0.07 GeV

質量 2.47 GeV、幅 0.12 GeV

質量 2.63 GeV、幅 0.14 GeV

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：微分断面積

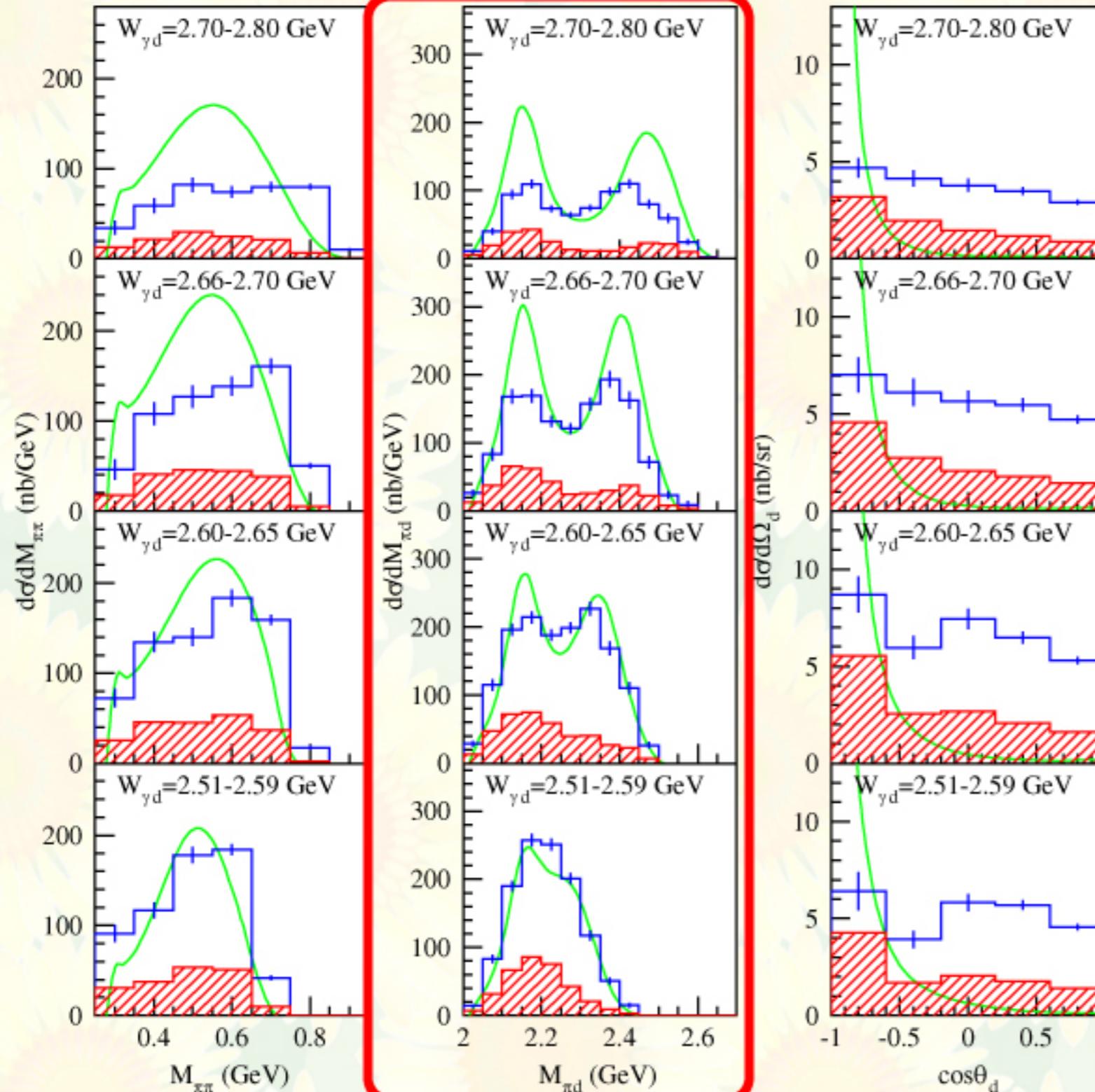


$\pi^0 \pi^0$  不変質量分布 [ 実験 ]  
あまり際だった特徴がない  
 $M_{\pi\pi}$  の増加に対して  
単調増加  
許されたエネルギーの範囲  
での広がり

$\pi^0 \pi^0$  不変質量分布 [QFC]  
中心がバンプに  
重陽子再結合のため  
 $\pi^0 \pi^0$  運動量に相関

The data points are compare with calculations  
by Fix and Arenhövel (FA calculation).

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：微分断面積



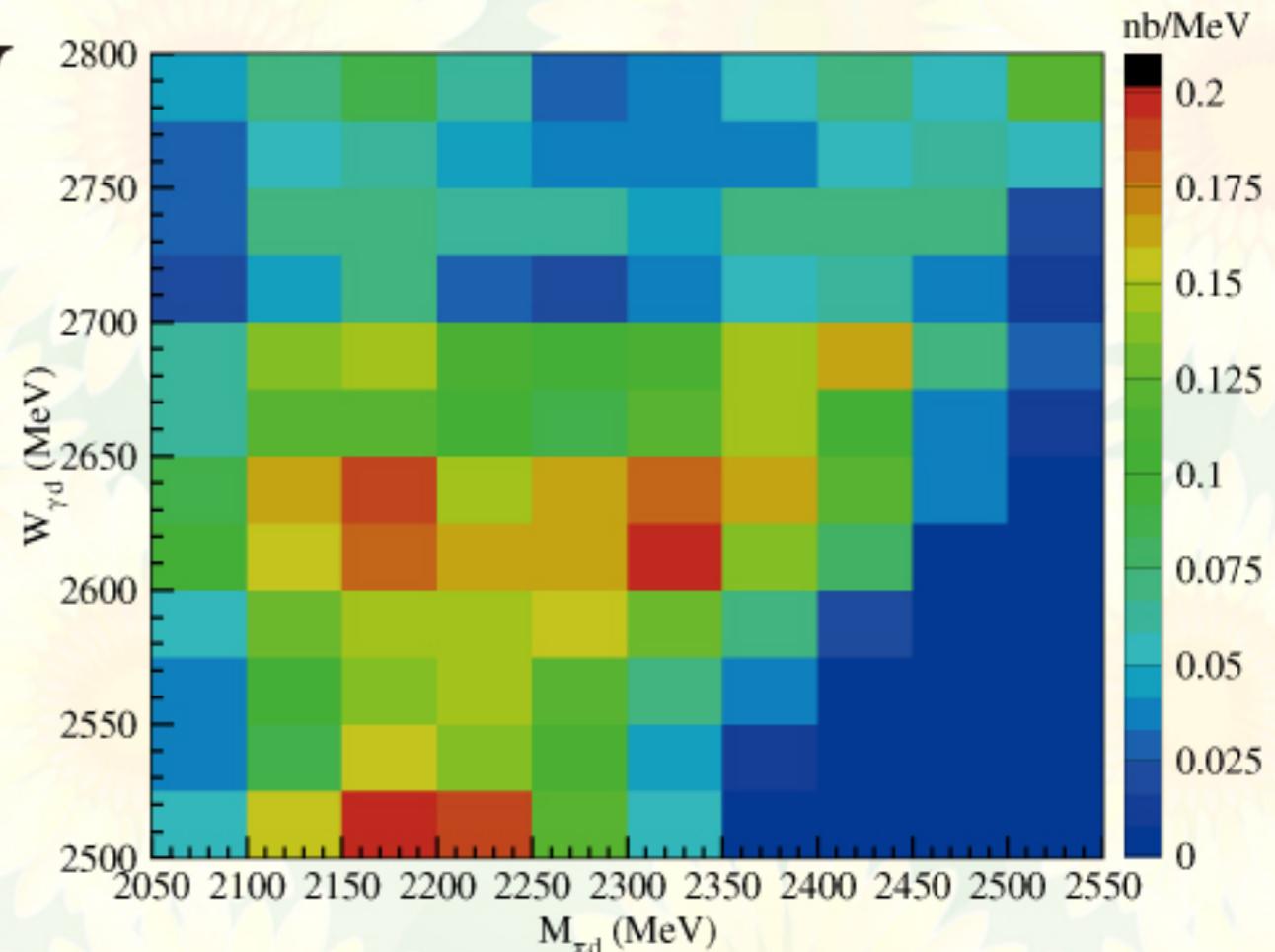
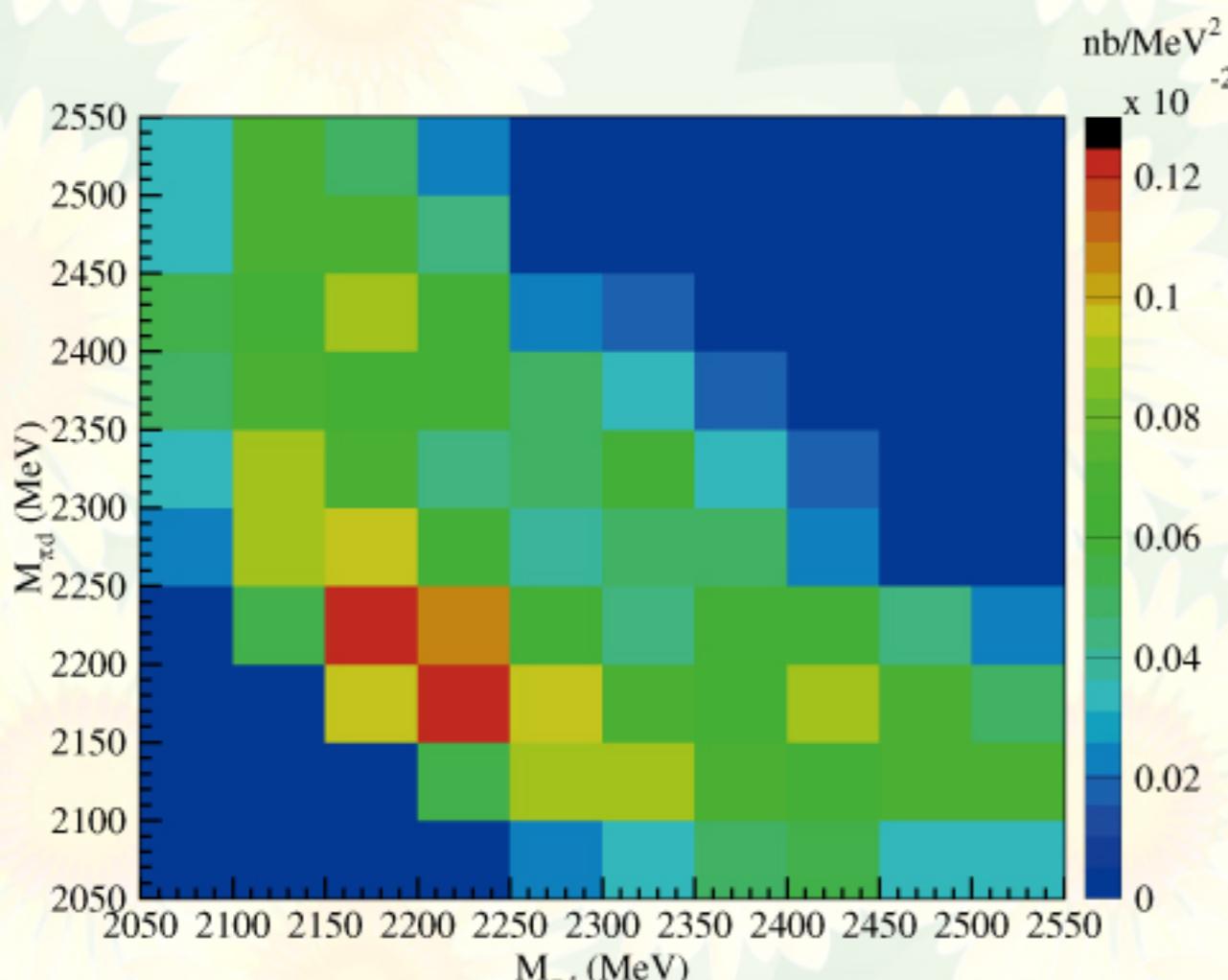
$\pi^0 d$  不変質量分布 [ 実験 ]  
 ニつのピーク構造  
 下は 2.15 GeV で一定  
 上は  $E_\gamma$  の増加に対して  
 単調増加

$\pi^0 d$  不変質量分布 [ QFC ]  
 実験とよく似ているが  
 こちらは準自由過程の  
 $\pi^0 \Delta$  生成が要因

The data points are compare with calculations  
 by Fix and Arenhövel (FA calculation).

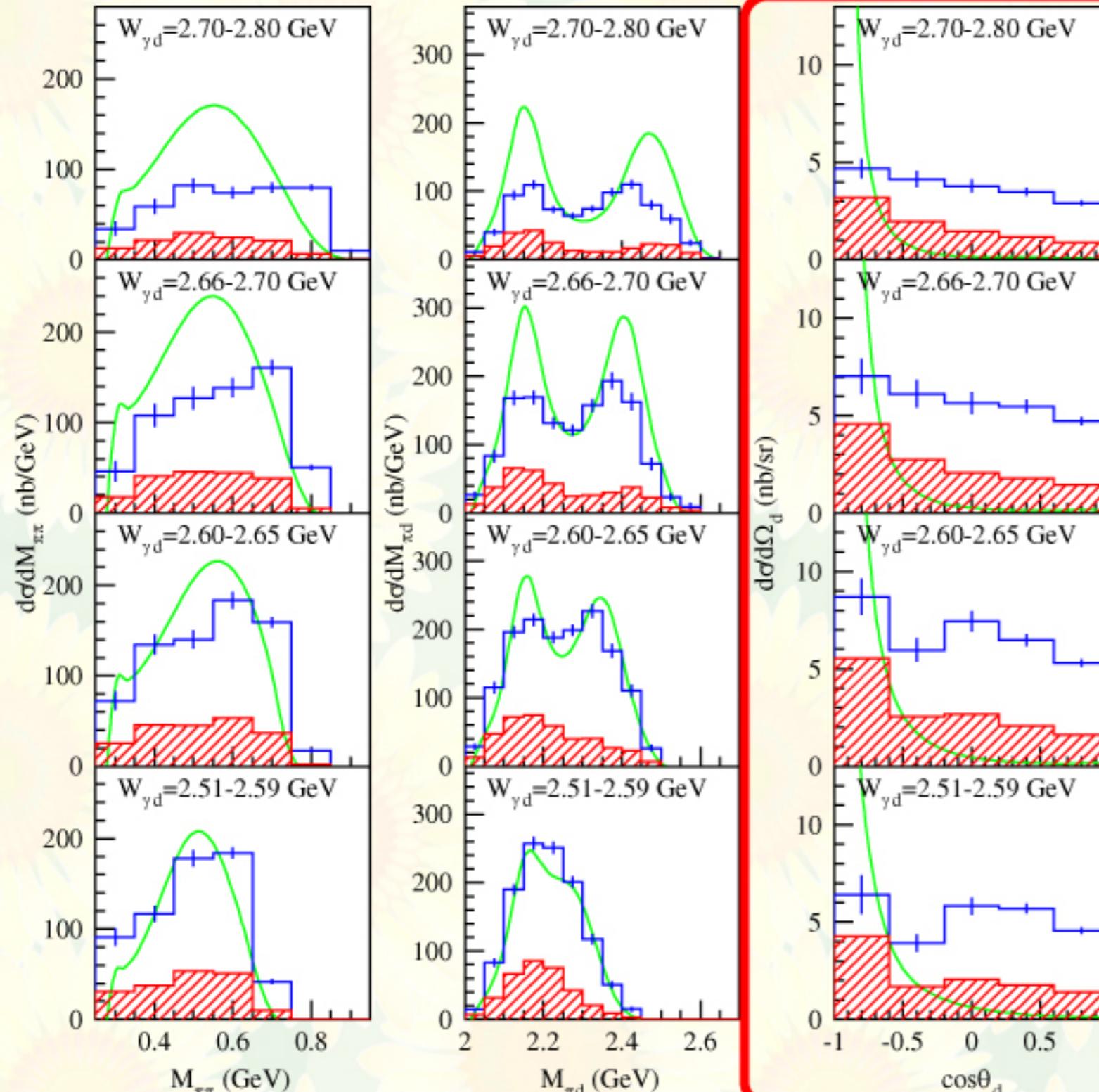
# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：微分断面積

$W_{\gamma d}$  によらず  $M_{\pi d} = 2150$  MeV  
にイベント集中



高エネルギーのピークは  
別の組み合わせ  
 $M_{\pi d} = 2150$  MeV の  
リフレクション

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：微分断面積



$d$  角分布 [ 実験 ]

ほぼフラット

緩やかな後方ピーク

$d$  角分布 [ QFC ]

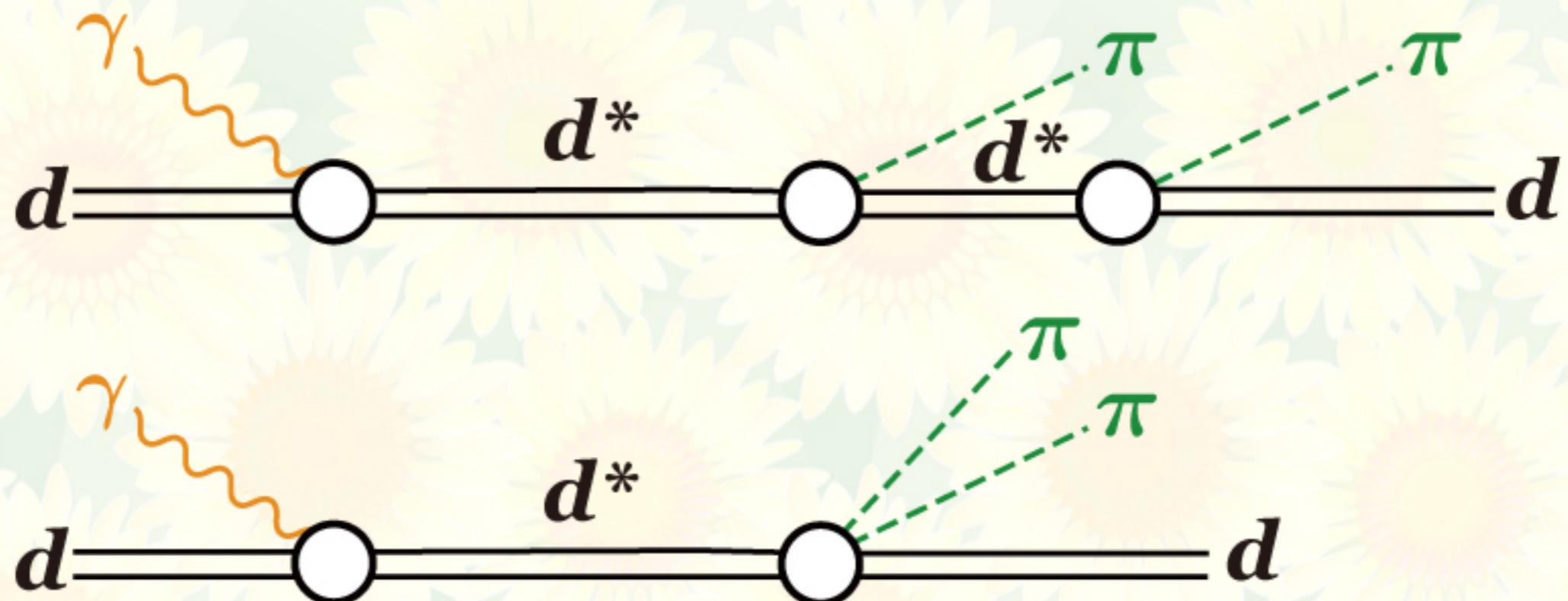
鋭い後方ピーク

計算とは絶対を含めて  
比較している！  
(定数倍したりは  
していない)

The data points are compare with calculations  
by Fix and Arenhövel (FA calculation).

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：微分断面積

重陽子の重心系での角分布がほぼフラットであることから  
ダイバリオン生成のダイアグラムが正しいだろう  
重陽子中の二核子は  $\pi^0 \pi^0$  放出前に相互作用し続いている  
( ダイバリオンの形成 )  
スペクテーター核子はない



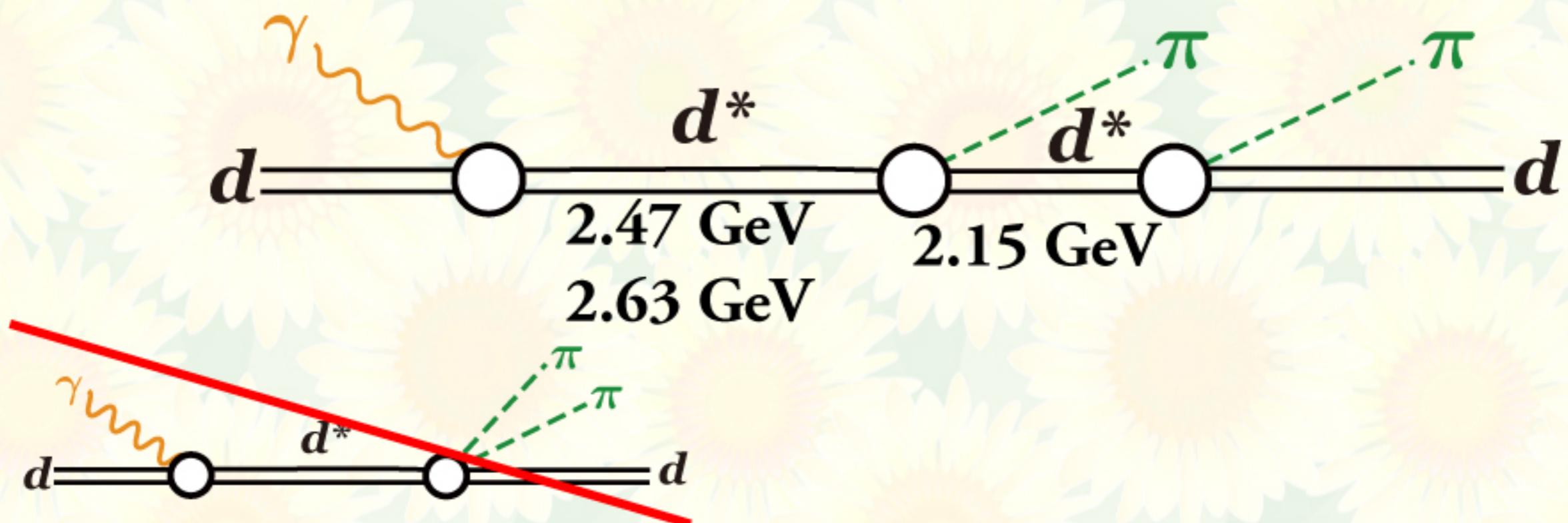
# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：微分断面積

重陽子の重心系での角分布がほぼフラットであることから  
ダイバリオン生成のダイアグラムが正しいだろう

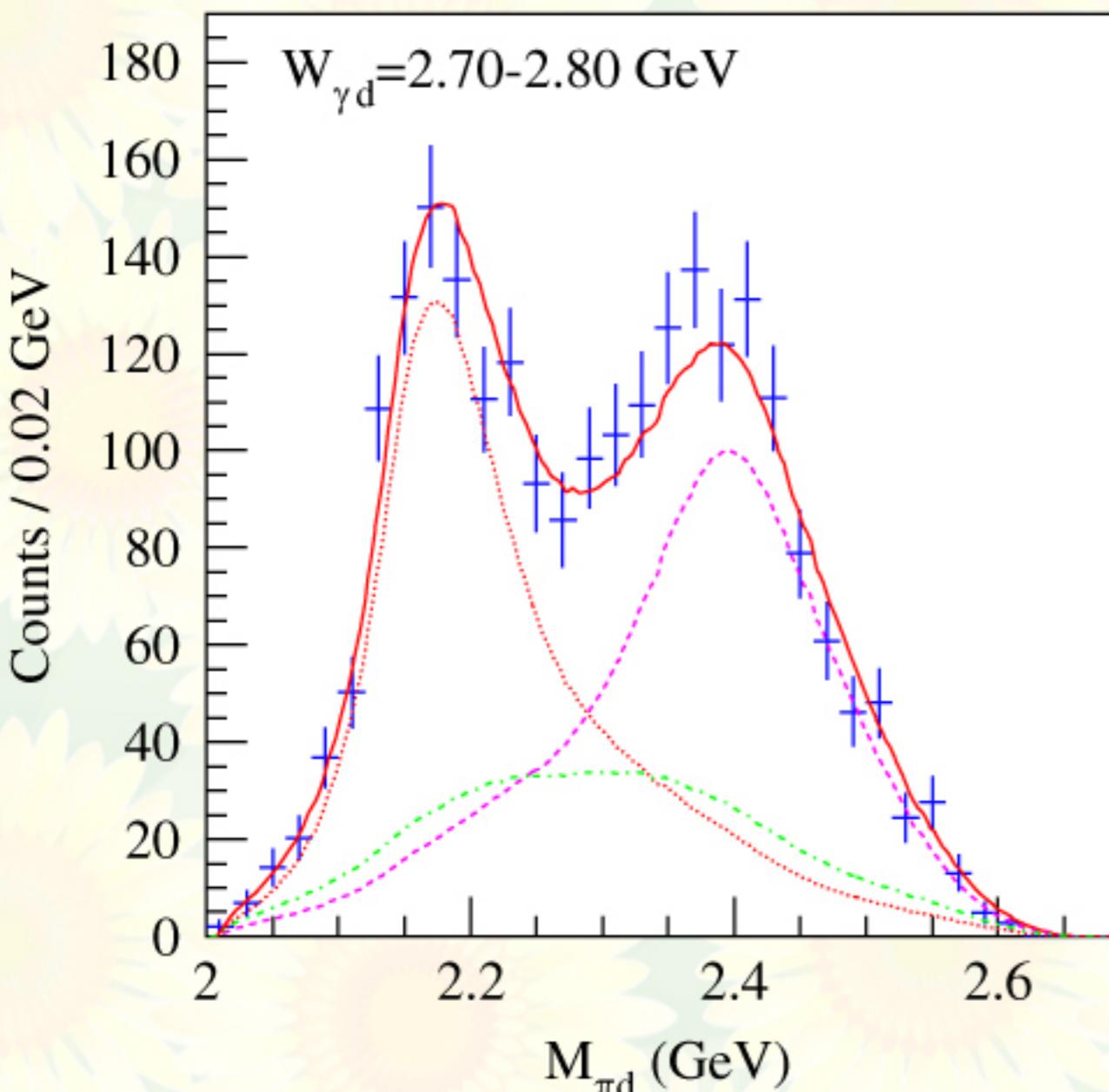
重陽子中の二核子は  $\pi^0 \pi^0$  放出前に相互作用し続いている  
( ダイバリオンの形成 )

スペクテーター核子はない

$\pi^0 d$  不変質量分布が 2.15 GeV でピーク

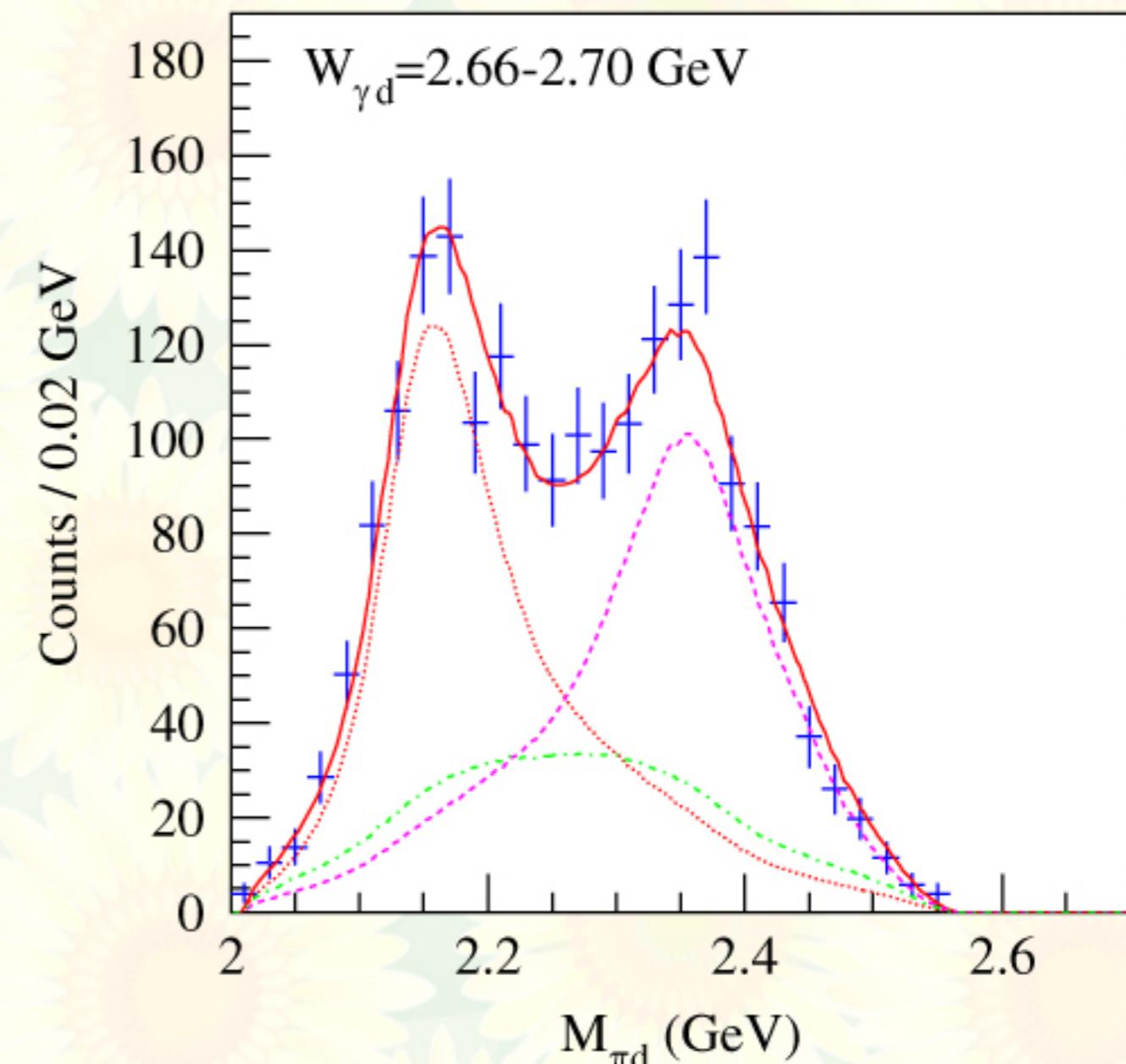


# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：質量と幅



**Breit-Wigner convoluted with 11-MeV- $\sigma$  Gaussian  
mass  $2160 \pm 3$  MeV  
width  $119 \pm 6$  MeV**

**質量  $2.15 \pm 0.01$  GeV & 幅  $0.11 \pm 0.01$  GeV**



**Breit-Wigner convoluted with 11-MeV- $\sigma$  Gaussian  
mass  $2146 \pm 3$  MeV  
width  $110 \pm 3$  MeV**

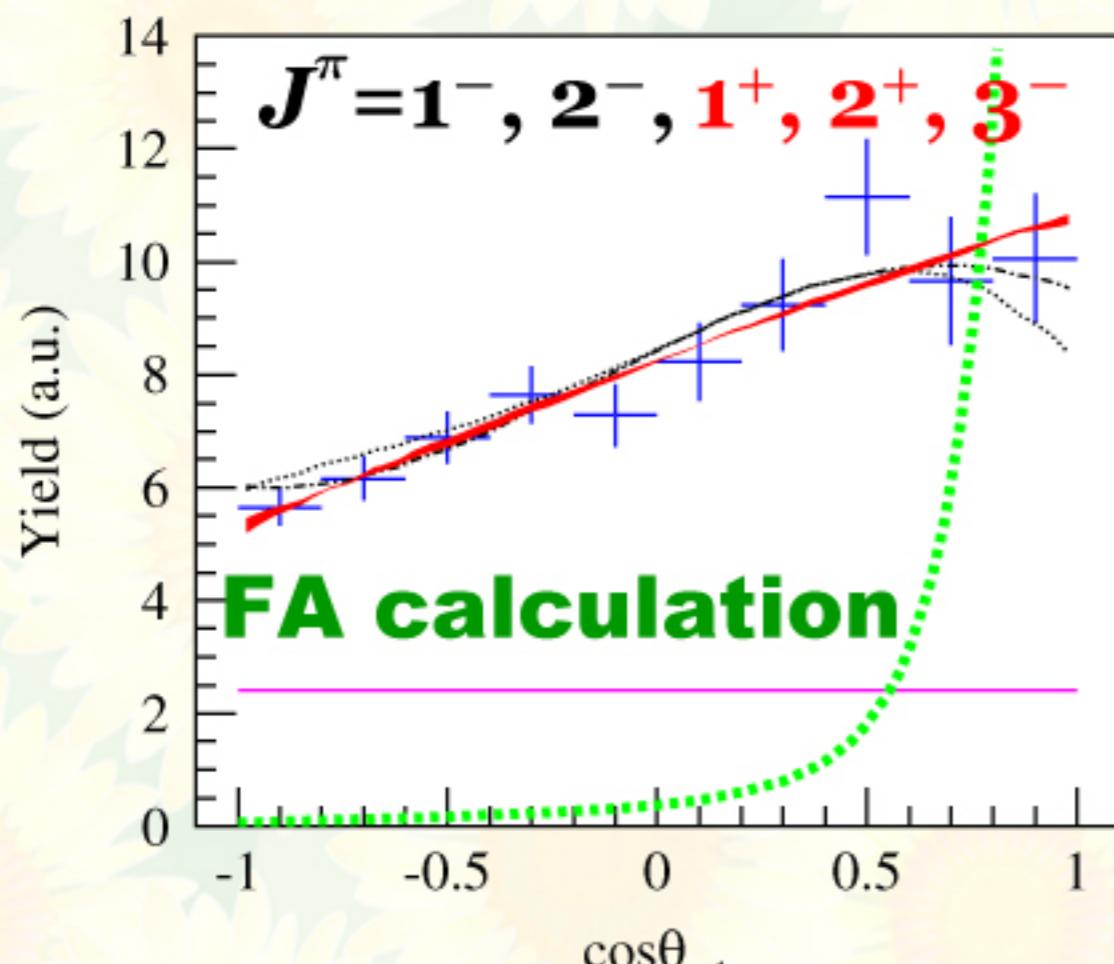
# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：スピン・パリティ

順次過程:  $\gamma d \rightarrow R_1 \rightarrow \pi_1 R_2 \rightarrow \pi_1 \pi_2 d$

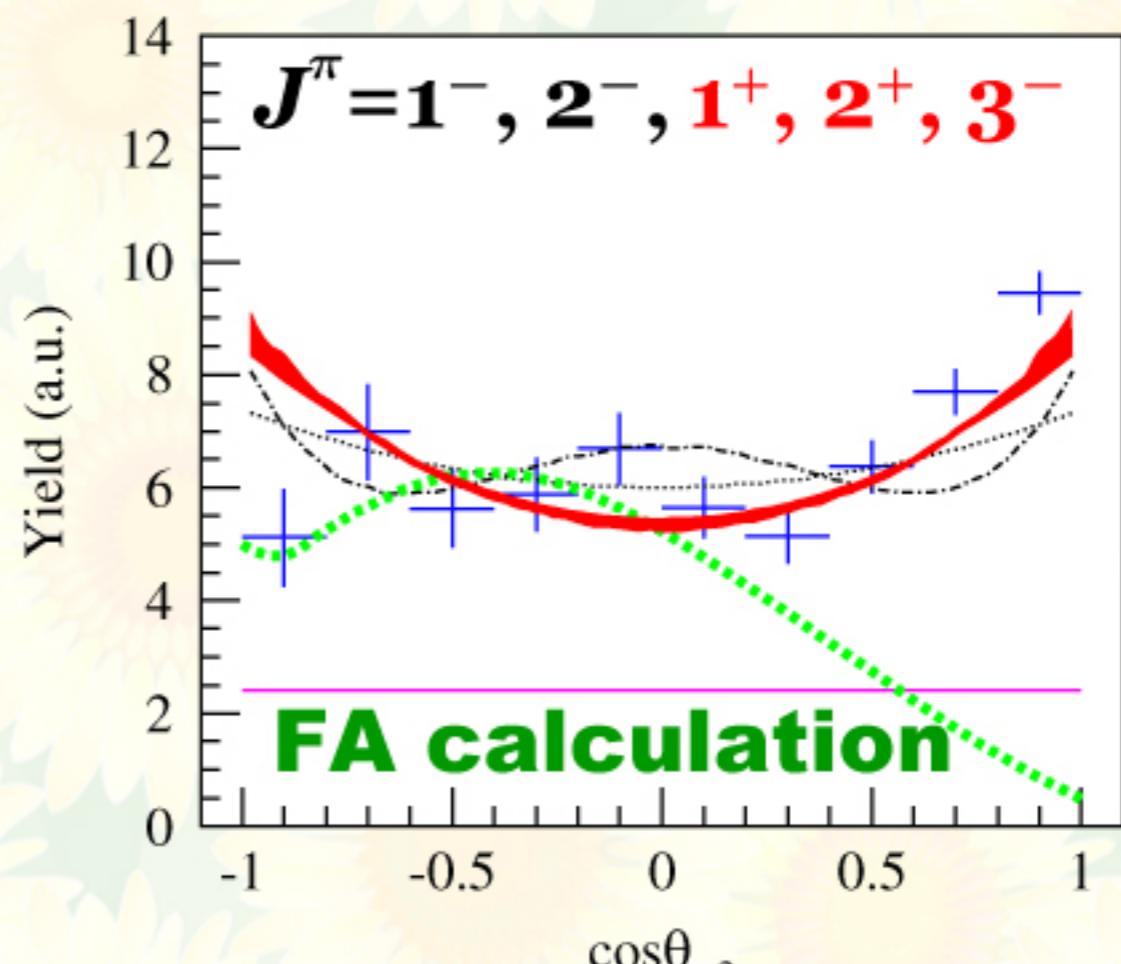
$R_2$  (2050~2250 MeV) は単一の状態  $\pi_2$  角分布が左右対称

順次過程と非順次過程 (位相空間) はインコヒーレントに和した  
戸口状態が S 波の N-N\* として  $R_1$  のスピン・パリティに制限

$N^*$ : D<sub>15</sub>(1675)、F<sub>15</sub>(1680)、P<sub>13</sub>(1720)



$\pi_1$  角分布 ( $\gamma d$  重心系、z:  $\gamma$ )



$\pi_2$  角分布 ( $\pi_2 d$  静止系、z:  $-\pi_1$ )

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：スピン・パリティ

スピン・パリティを仮定したときの角分布は

密度行列（統計テンサー）をつかって計算

$J_0, J_0' \rightarrow J_1, J_1'$  ( $L_1, L_1'$  の放射)

$$\rho_{kq}(J_0, J'_0) = \sum_{k_J, q_J, k_L, q_L} \rho_{k_J q_J}(J_1, J'_1) \rho_{k_L q_L}(L_1, L'_1) (k_J q_J k_L q_L | kq) \hat{J}_0 \hat{J}'_0 \hat{k}_J \hat{k}_L$$

$$\times \left\{ \begin{array}{ccc} J_1 & L_1 & J_0 \\ J'_1 & L'_1 & J'_0 \\ k_J & k_L & k \end{array} \right\} \langle J_1 || L_1 || J_0 \rangle \langle J'_1 || L'_1 || J'_0 \rangle^*$$

$L, L'$  の放射テンソル

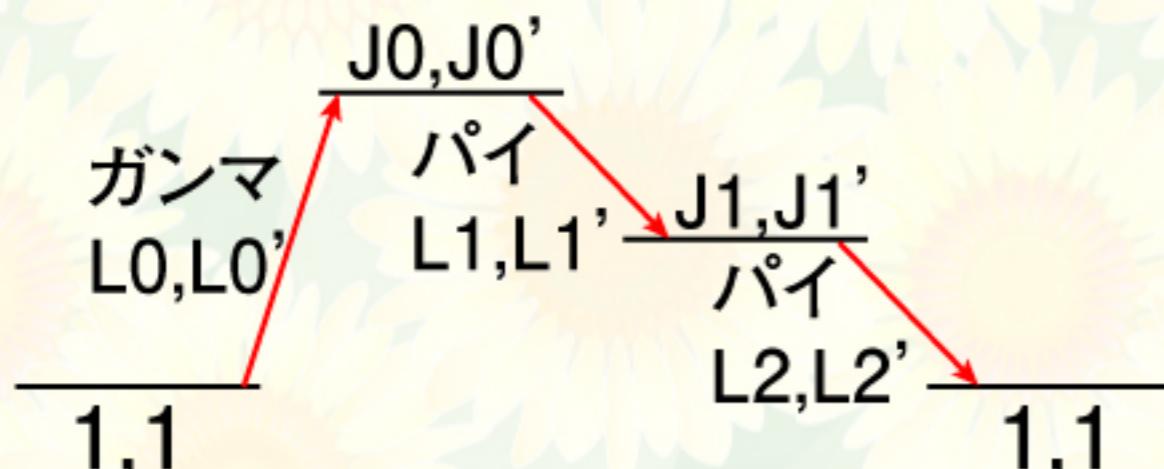
$$\rho_{kq}(L, L') = \frac{\sqrt{4\pi}}{\hat{k}} Y_{kq}^*(\theta, \phi) c_{k0}(L, L')$$

ガンマ

$$c_{k0}(L, L') = \frac{\hat{L} \hat{L}'}{8\pi} (-)^{L'-1} (L 1 L' - 1 | k 0)$$

パイ

$$c_{k0}(L, L') = \frac{\hat{L} \hat{L}'}{4\pi} (-)^{L'} (L 0 L' 0 | k 0)$$



無偏極測定での角相関は、最後に得られたテンサーで  $k=0, q=0$  とする



# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応：スピン・パリティ

スピン・パリティを仮定したときの角分布は  
密度行列（統計テンサー）をつかって計算

$\pi_1$  角分布と  $\pi_2$  角分布を同時フィット

$R_2$  のスピン・パリティ       $\gamma d \rightarrow R_1 \rightarrow \pi_1 R_2 \rightarrow \pi_1 \pi_2 d$

**1<sup>-</sup>, 2<sup>-</sup>: rejected (CL 99.7%)**

**1<sup>+</sup>, 2<sup>+</sup>, 3<sup>-</sup>: possible**

1<sup>+</sup>, 2<sup>+</sup>での親粒子は 1<sup>+</sup> (70%), 2<sup>-</sup> (20%)

3<sup>-</sup>での親粒子は 1<sup>+</sup>, 2<sup>±</sup>, 3<sup>+</sup> がまんべんなく

**2<sup>+</sup>:  ${}^3P_2$ - $\pi d$  部分波と一致**

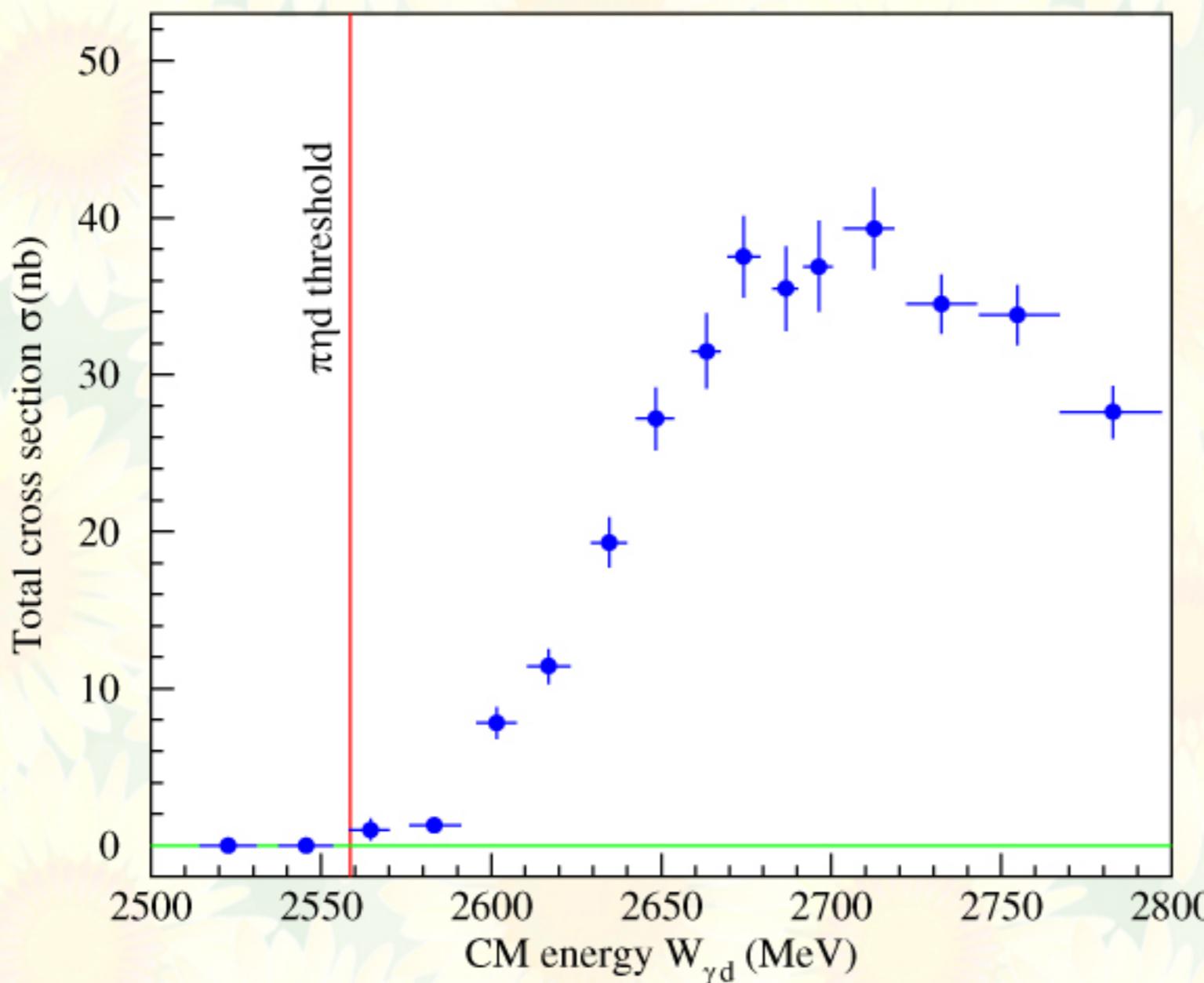


$\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$  反応

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

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応：全断面積

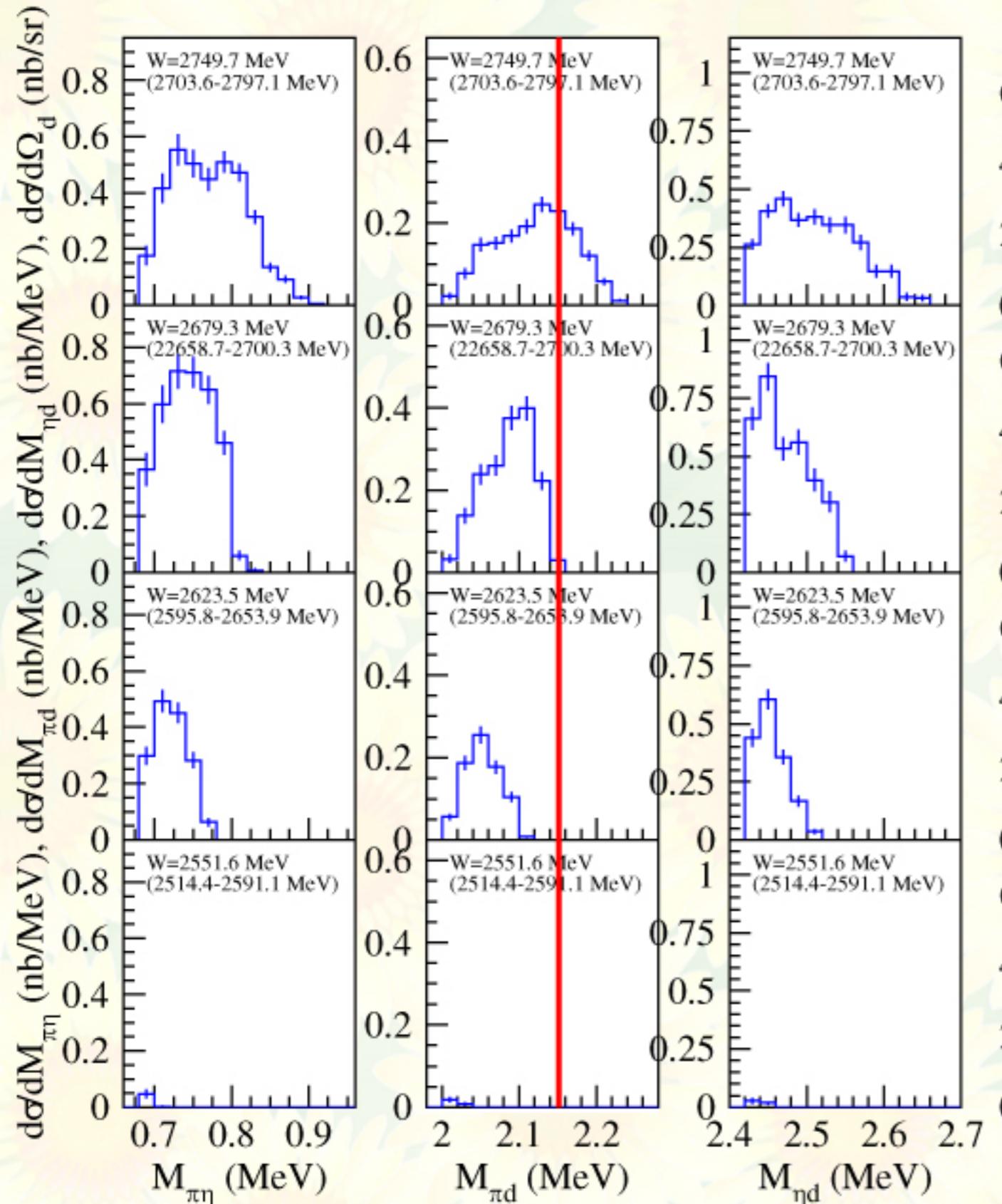
total cross section for  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$   
at the incident energy 0.74~1.15 GeV



angular distribution of  
deuteron emission:  
rather flat  
  
isovector dibaryon?

# $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応：微分断面積

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



angular distribution of  
deuteron emission:  
rather flat

$\pi d$  invariant mass  
shows a peak at  
2.15 GeV.



まとめ

まとめ



# まとめ

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応の全断面積を世界で初めて測定した

( $W_{\gamma d} = 2.38 \sim 2.80 \text{ GeV}$ )

わずかに  $d^*(2380) \sim D_{03}$  候補~ に対応するピークが見られた

T. Ishikawa et al., PLB772, 398 (2017).

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応における  $\gamma d$  重心系での重陽子の角分布は  
ほぼフラットであった

準自由過程の  $\pi^0 \pi^0$  生成に引き続き重陽子再形成が行われる  
過程 (QFC過程=理論計算)では説明できない

ダイバリオンの発現の証拠

質量 (幅) **2.47 (0.12) GeV** と **2.63 (0.14) GeV** のアイソスカラーダイバリオンを観測 ( $\pi^0 \pi^0 d$  系)

**2.15 (0.11) GeV** のアイソベクターダイバリオンを観測~ $D_{12}$  候補~  
を観測 ( $\pi^0 d$  系)

T. Ishikawa et al., arXiv: 1805.08928 (2018).