

# 重陽子における荷電 $\pi$ 中間子 光生成反応

神田 浩樹

on behalf of the NKS/NKS2 collaboration

東北大学大学院理学研究科

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# 内容

- はじめに
  - 光吸収反応とパイ中間子光生成反応
- 実験装置
  - LNS-STB, 中性K中間子スペクトロメータ (NKS)
- 結果
  - 重陽子標的での準自由反応
  - 重陽子標的での非準自由反応
- 現在進行中の実験計画
  - アップグレード版中性K中間子スペクトロメータ(NKS2)
  - LEPS
- ABC効果と $\Delta$   $\Delta$  相互作用
- まとめ

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# The NKS/NKS2 Collaboration

## *Department of Physics, Tohoku University*

N.Chiga, M.Ejima, T.Fujibayashi, Y.Fujii, K.Futatsukawa, O.Hashimoto, K.Hirose, K.Hosomi, A.Iguchi, S.Kameoka, H.Kanda, M.Kaneta, F.Kato, M.Kato, T.Kawasaki, D.Kawama, M.Kawai, S.Kinoshita, T.Kon, Y.Ma, K.Maeda, N.Maruyama, A.Matsumura, M.Mimori, Y.Miura, K.Miwa, Y.Miyagi, H.Miyase, S.N.Nakamura, H.Nomura, A.Ohtani, Y.Okayasu, M.Oyamada, K.Tsukada, T.Takahashi, H.Tamura, H.Tsubota, N.Terada, D.Uchida, M.Ukai, H.Yamauchi, K.Yawata, M.Wakamatsu, T.Watanabe

## *Department of Electrical and Electronic Engineering, Akita University*

A.Sasaki

## *Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University*

T.Ishikawa, T.Kinoshita, F.Miyahara, T.Nakabayashi, H.Shimizu, T.Tamae, T.Terasawa, H.Yamazaki

## *Department of Electrical Engineering, Ichinoseki National College of Technology*

O.Konno

## *Department of Nuclear Science, Lanzhou University, China*

T.Wang, Y.Han

## *Nuclear Institute, Czech Republic*

P.Bydzovsky, M.Sotona

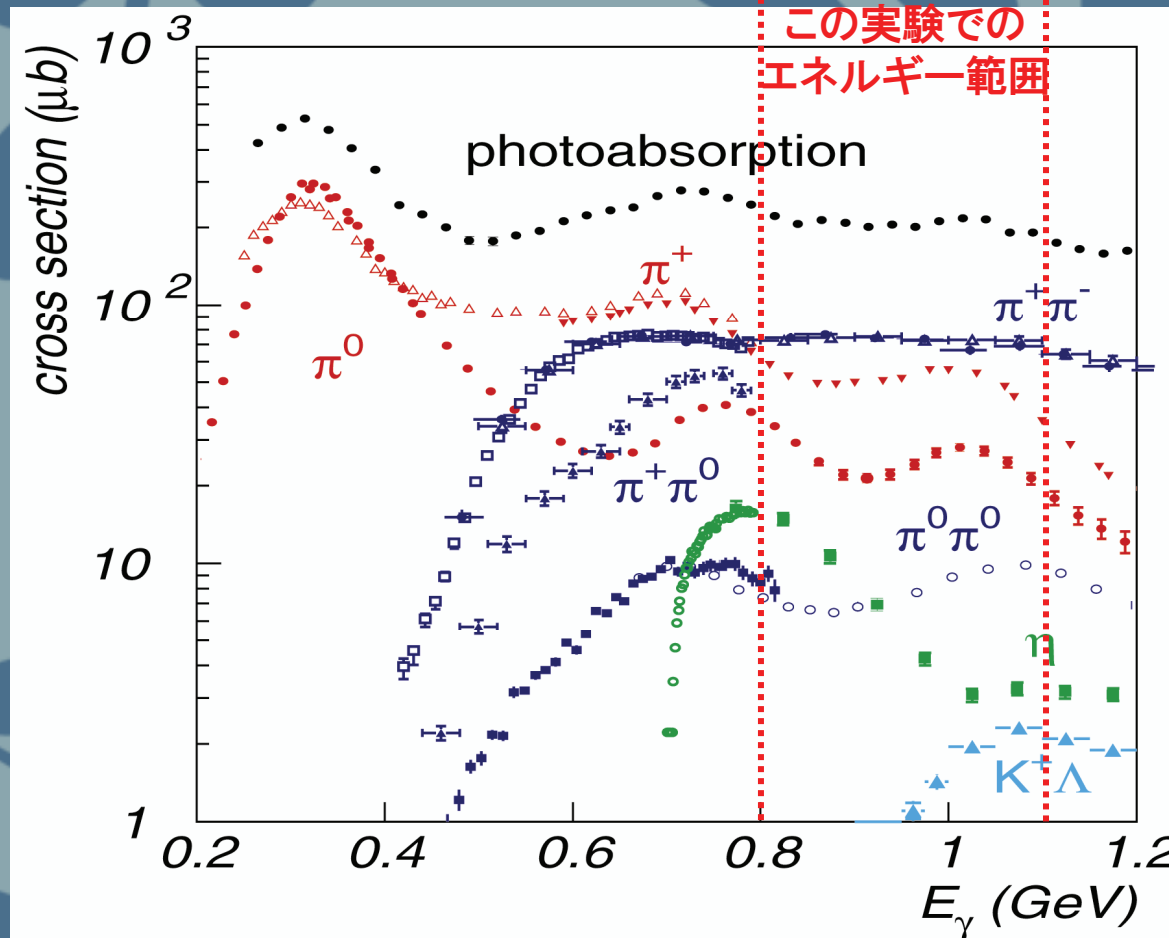
### NOTE:

People who belonged only to the NKS collaboration, only to the NKS2 collaboration and to both collaborations are included in this list.

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# 陽子の光吸収断面積



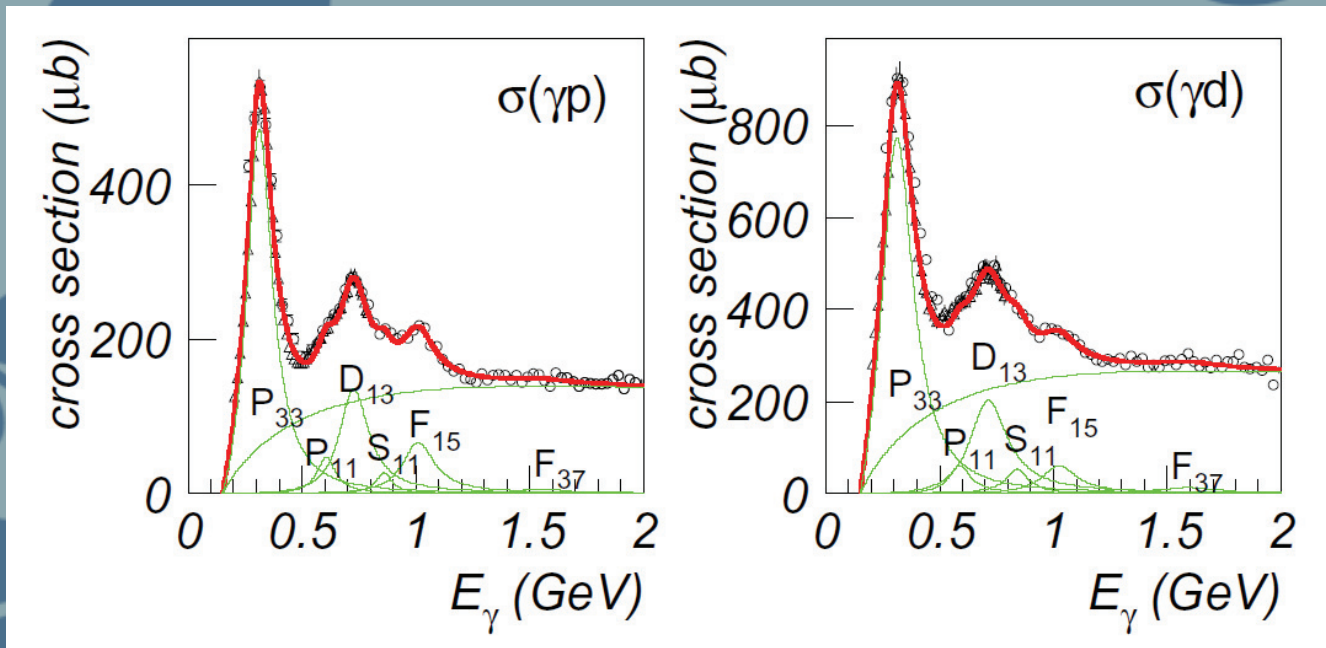
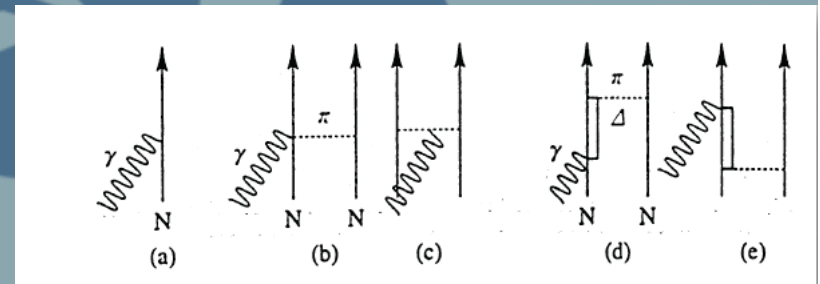
- 陽子の光吸収全断面積のうち、 $\pi^+\pi^-$  光生成反応断面積は 30% 程度で、0.8~1.1GeVでは最大の寄与
- 重水素の光反応に於いても  $\pi^+\pi^-$  光生成反応に注目するのが合理的だろう

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# 光吸収と核子共鳴 (陽子と重陽子の比較)

- 重陽子標的での断面積は陽子標的の2倍よりは小さい
- 共鳴幅の増大、共鳴の消失
  - 「多体」効果によるものか？ ← フェルミ運動、終状態相互作用(FSI)、中間子交換流、 $\Delta$ 流

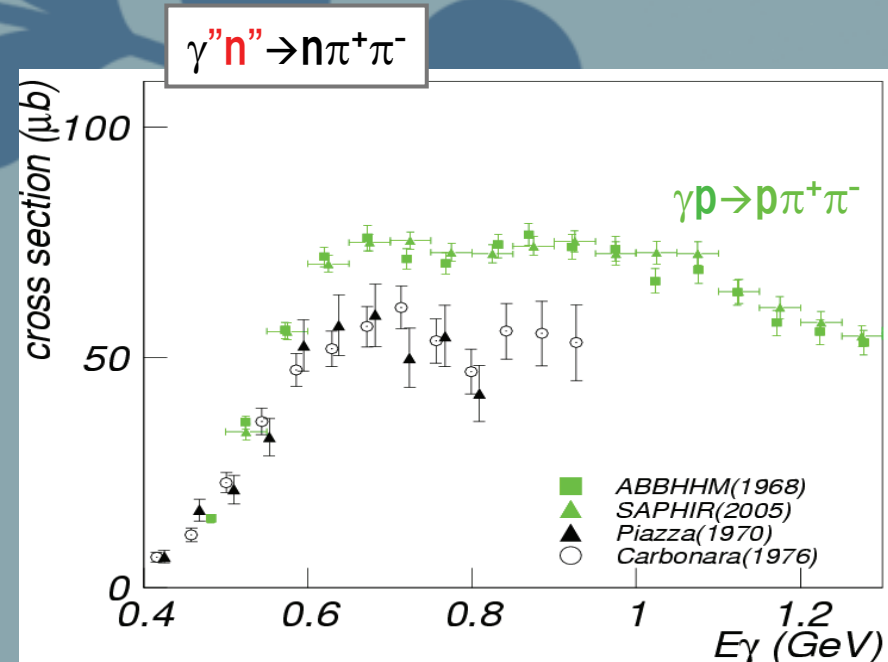
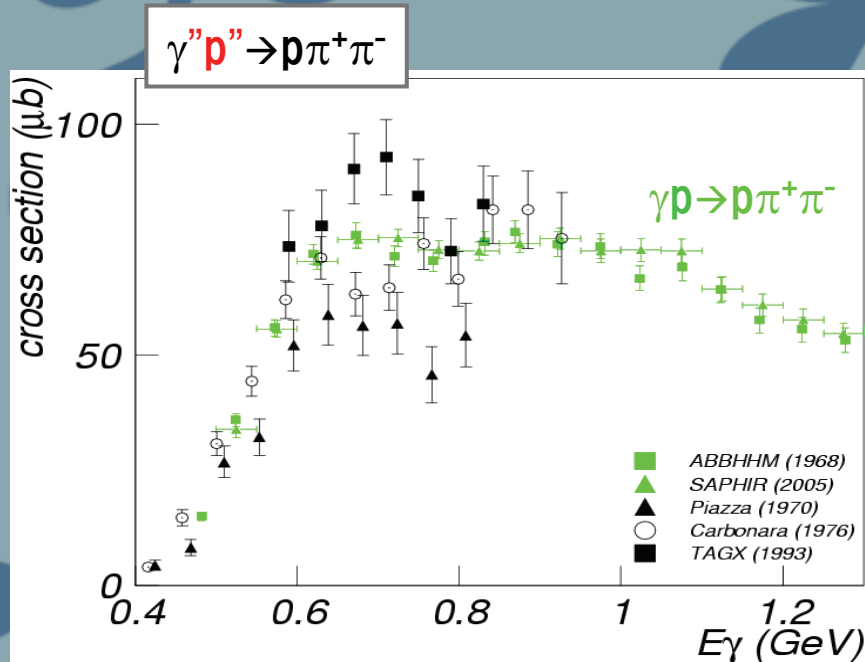


Data points:  
 PRD5(1972)1640  
 PRC53(1996) 41  
 Multipole analyses:  
 PR182(1969)1729  
 PRC54(1996)1688

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
 問題の統一的描像に向けて」

# 泡箱による2π光生成データ



ダブルクォートは束縛されている核子を示す

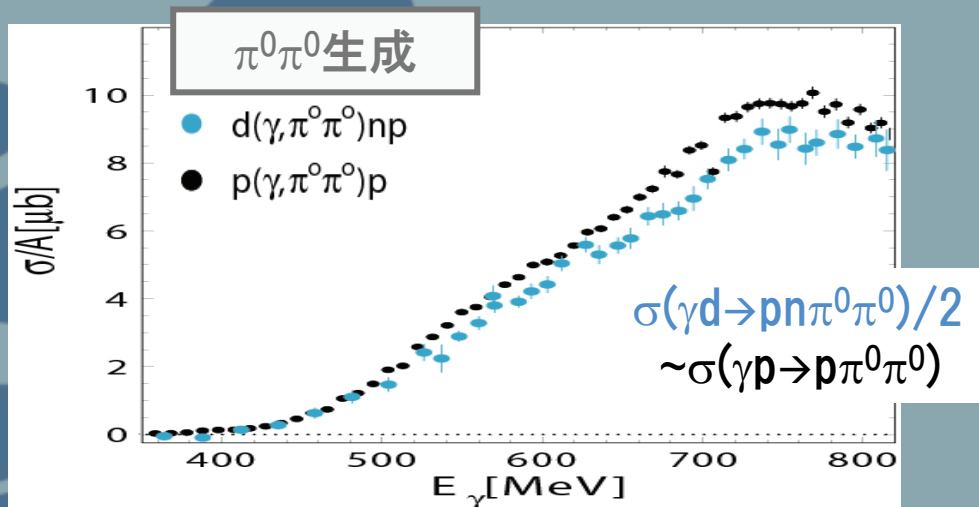
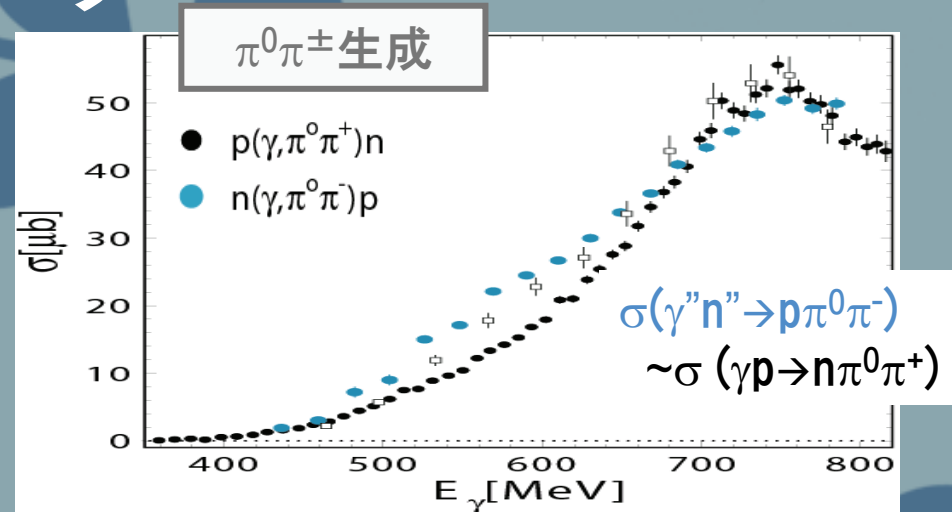
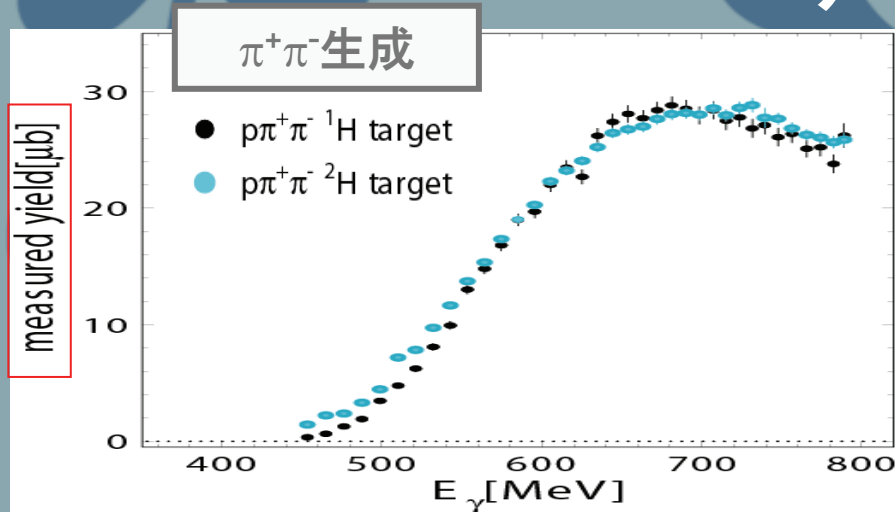
束縛陽子での断面積と自由陽子での断面積は、ほとんど同じ値を示す。とはいえ、誤差と実験毎のばらつきは大。

束縛中性子での断面積は自由陽子での断面積より小さい。実験毎のばらつきも束縛陽子の場合よりは小さい。

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体問題の統一的描像に向けて」

# DAAPHNE, TAPSによる2π光生成 データ

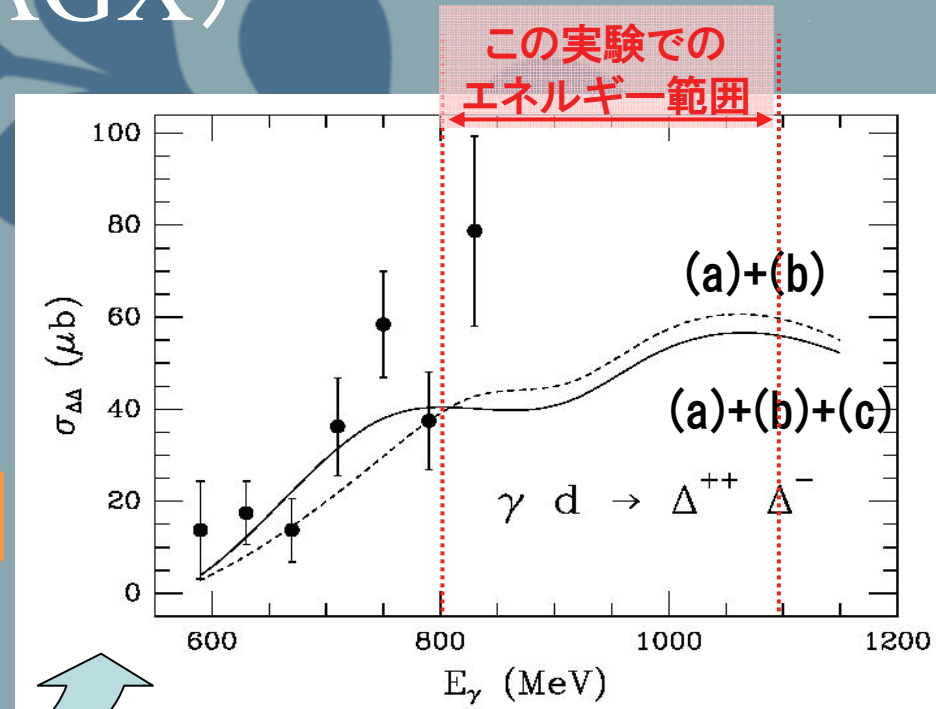
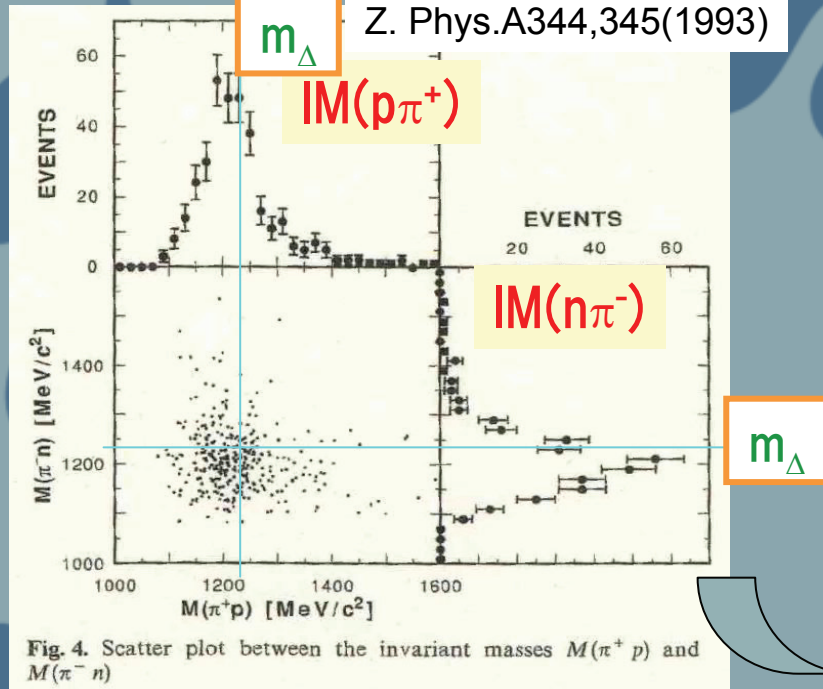


いずれのデータも、スペクテーター描像が成り立っていることを示している。ただし、π<sup>+</sup>π<sup>-</sup>生成データの縦軸の意味が不明確。アクセプタンスの補正をしていないということなのか、陽子標的の場合とエネルギー依存性が同様であることを示しているだけなのか？

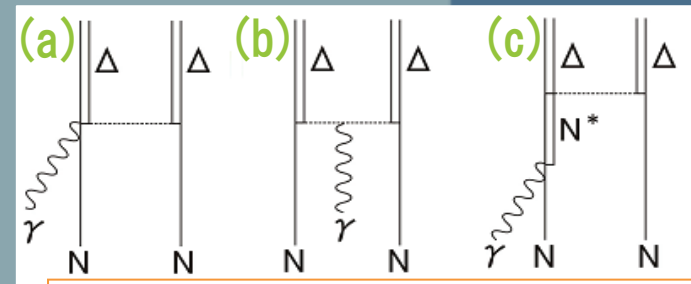
2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# 非準自由反応での2 $\Delta$ 生成 (TAGX)



- 陽子と中性子の運動量が、それぞれ  $p_p > 300 \text{ MeV}/c$  と  $p_n > 250 \text{ MeV}/c$  の領域で、2 $\Delta$ のピークが現れる
- 巨大な断面積: 準自由反応の8割程度



Gomez Tejedor, Oset, Toki, PLB346,240(1995)

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」



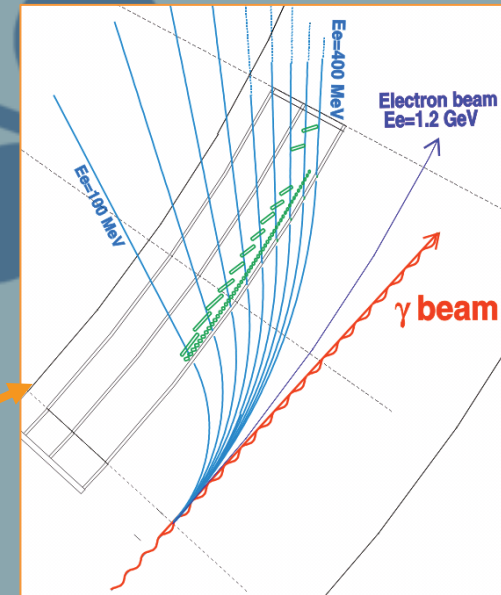
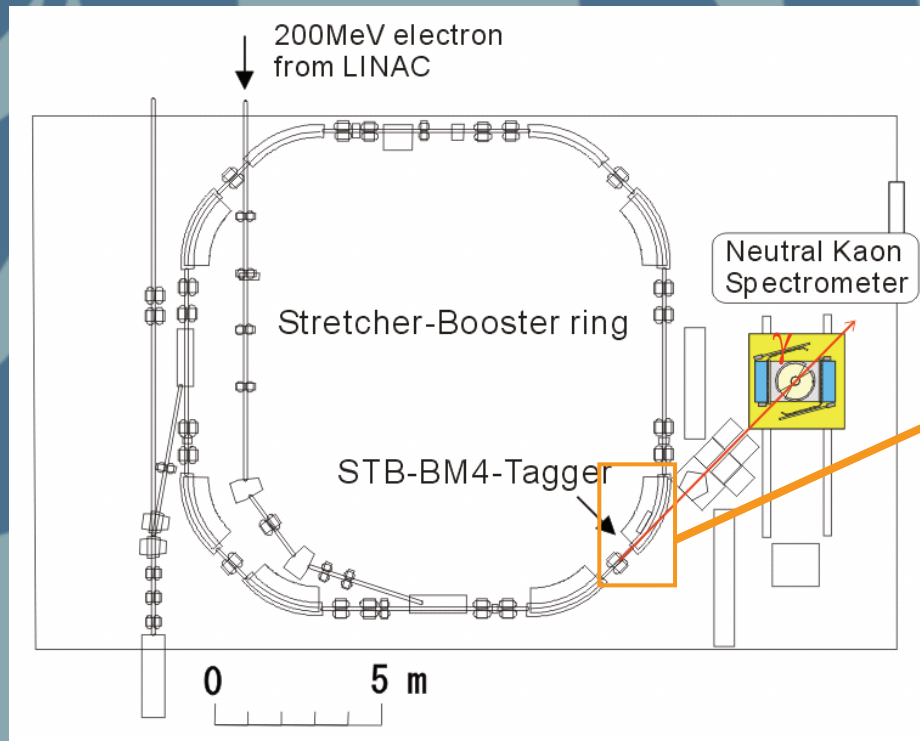
# 研究の目的

- 重陽子は2核子が緩く結合した原子核で、スペクテーター描像が良く成り立つと考えられている
- しかしながら、原子核である以上「多体」効果の影響、つまり2核子による光子の吸収、は必ずあるはず
- とはいえ、光生成反応の実験的にはよく分かっていないのではないか??
- 我々は0.8 to 1.1 GeVのエネルギー領域で  $\gamma d \rightarrow pn\pi^+\pi^-$  反応の断面積を測定した
  - 準自由反応 (QF) と非準自由反応 (NQF) の寄与を分離し、光子と重陽子の反応における「多体」効果の影響を調べる
  - 重要なNQF反応の一つである  $\gamma d \rightarrow \Delta^{++}\Delta^- \rightarrow pn\pi^+\pi^-$  反応の断面積を測定し、2核子による光の(同時)吸収のメカニズムに対する知見を得る。また、 $\Delta$ 間の相互作用の研究の可能性を探る

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# 東北大学核理研の実光子ビームライン



- 東北大学核理研の1.2 GeV Stretcher-Booster Synchrotron (STB) とBM4-Tagger
- 0.8 to 1.1 GeVの標識化光子ビームを供給

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体問題の統一的描像に向けて」

- 標識化エネルギー幅: 6 MeV
- 標識化レート(ビーム強度): 1.5 ~ 2.5 MHz
- 実験で照射した全光子数:

$2.64 \times 10^{12}$  (D<sub>2</sub> 標的ラン)  
 $6.77 \times 10^{11}$  (H<sub>2</sub> 標的ラン)

# 中性K中間子スペクトロメータ(NKS)

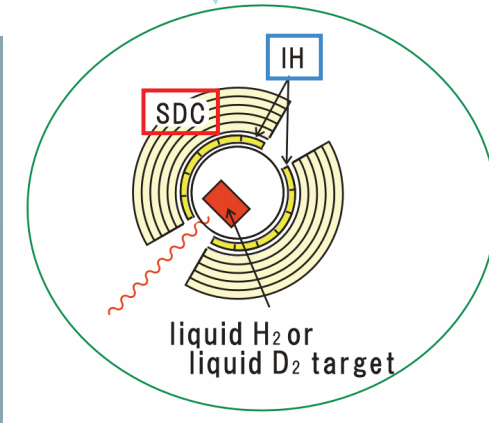
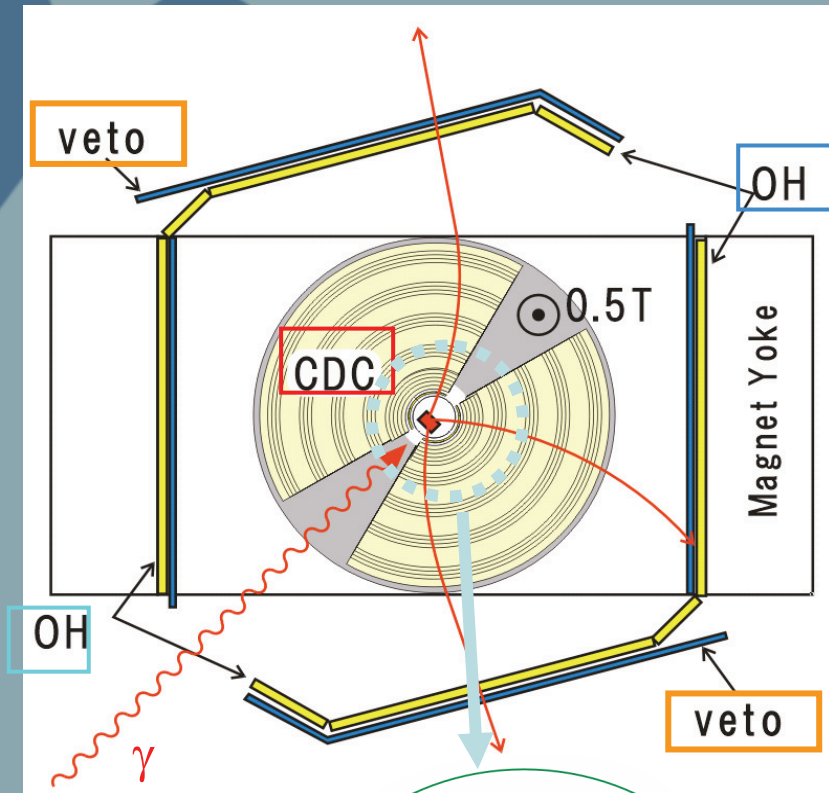
- ◆ Dipole magnet 0.5 T
- ◆ CDC (cylindrical drift chamber)  
SDC (straw drift chamber)
- ◆ IH (inner hodoscope)  
OH (outer hodoscope)
  - トリガーカウンタ
  - TOF測定
- ◆ EV (electron veto counter)
  - $e^+e^-$  バックグラウンド除去

アクセプタンス  $\sim \pi$  sr

TOF分解能  $\sim 0.5$  nsec

運動量分解能  $\sim 9\%$

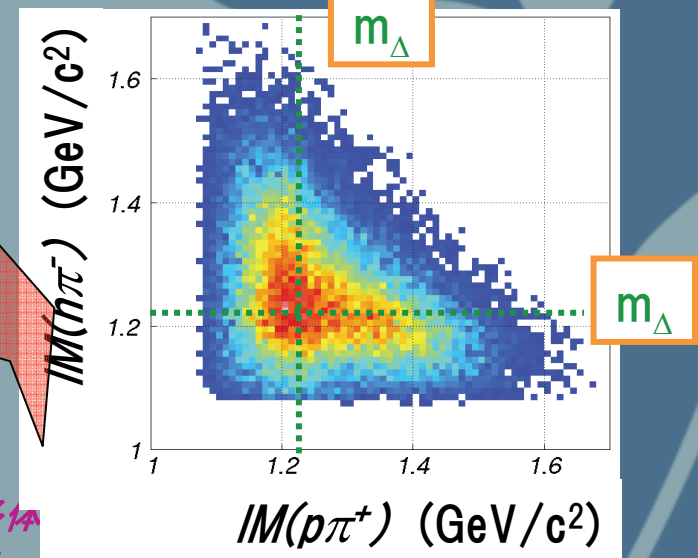
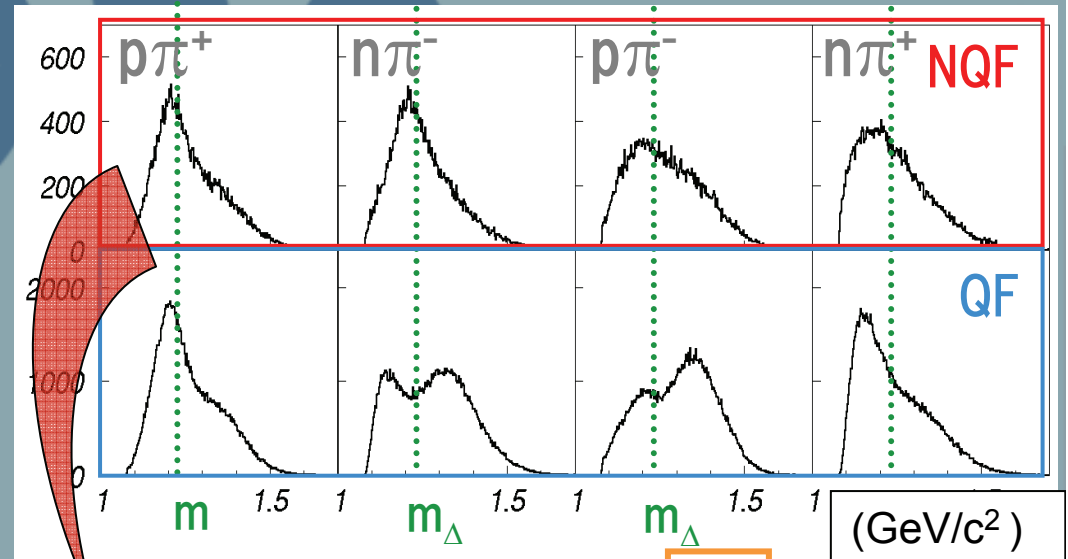
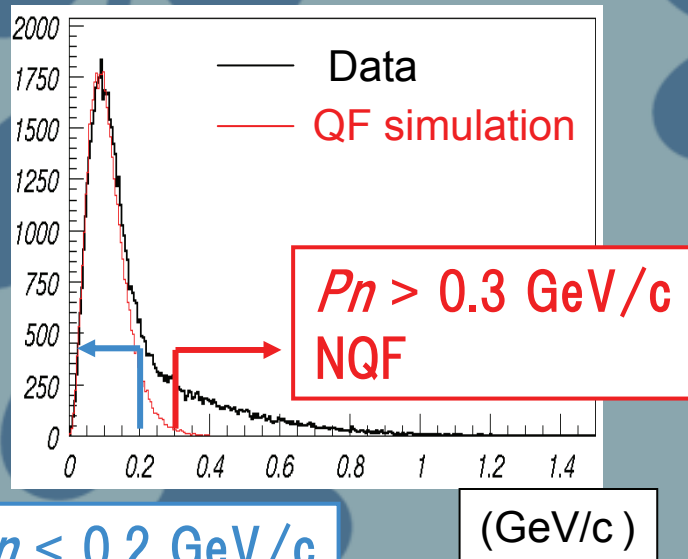
中性子検出器は使用せず  $\rightarrow$   
 $\gamma d \rightarrow pn \pi^+ \pi^-$  反応の終状態の  $p, \pi^+, \pi^-$   
のみ検出



2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# QF と NQF の分離



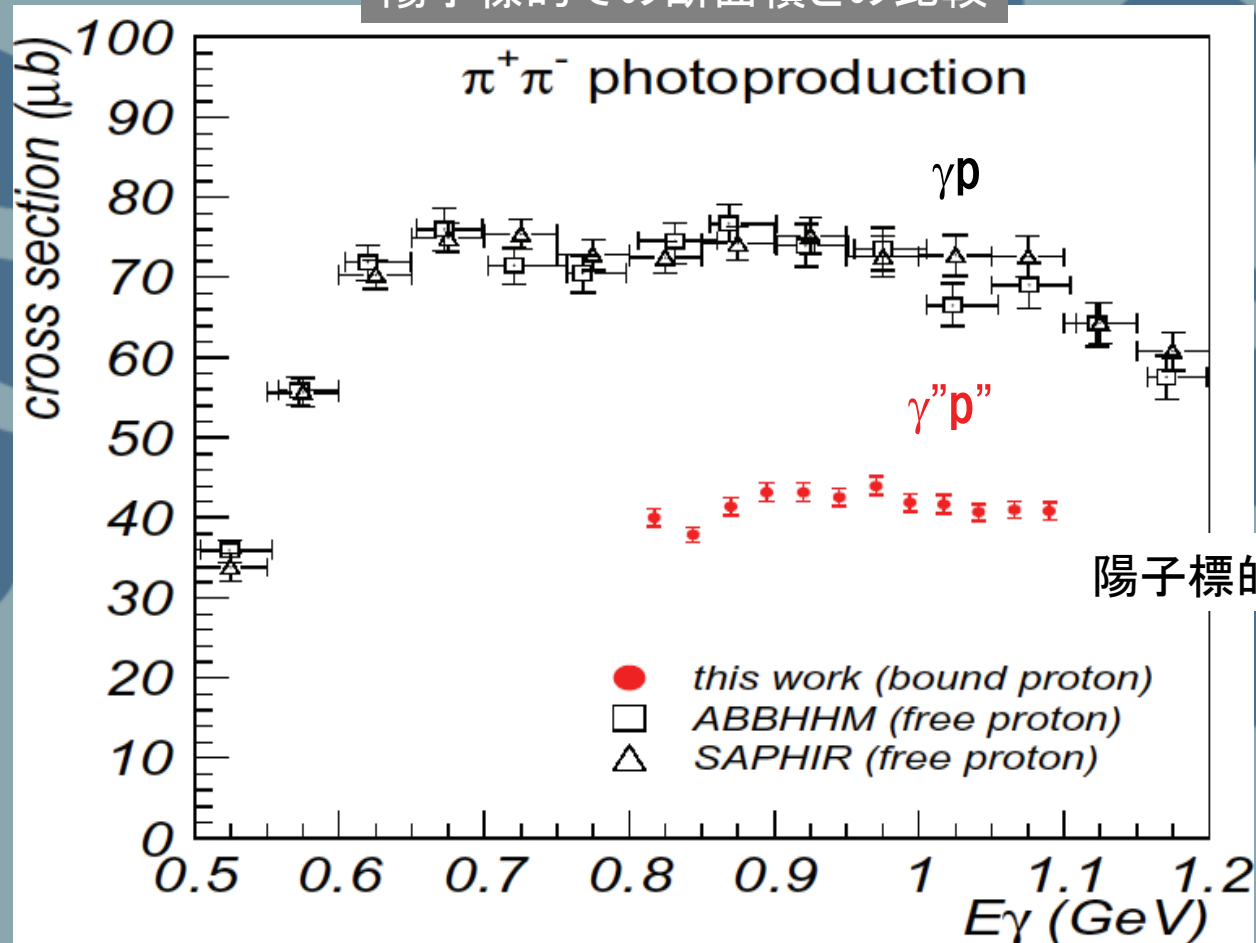
- QFとNQFは中性子運動量を用いることで分離可能
- $p\pi^+$  と  $n\pi^-$  の不変質量分布に、 $\Delta^{++}\Delta^-$  励起の様子が見られる
- 一方  $\Delta^+\Delta^0$  には目立ったピークは無い

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体問題の統一的描像に向けて」

# 重陽子標的での2 $\pi$ 光生成 (QF)

陽子標的での断面積との比較

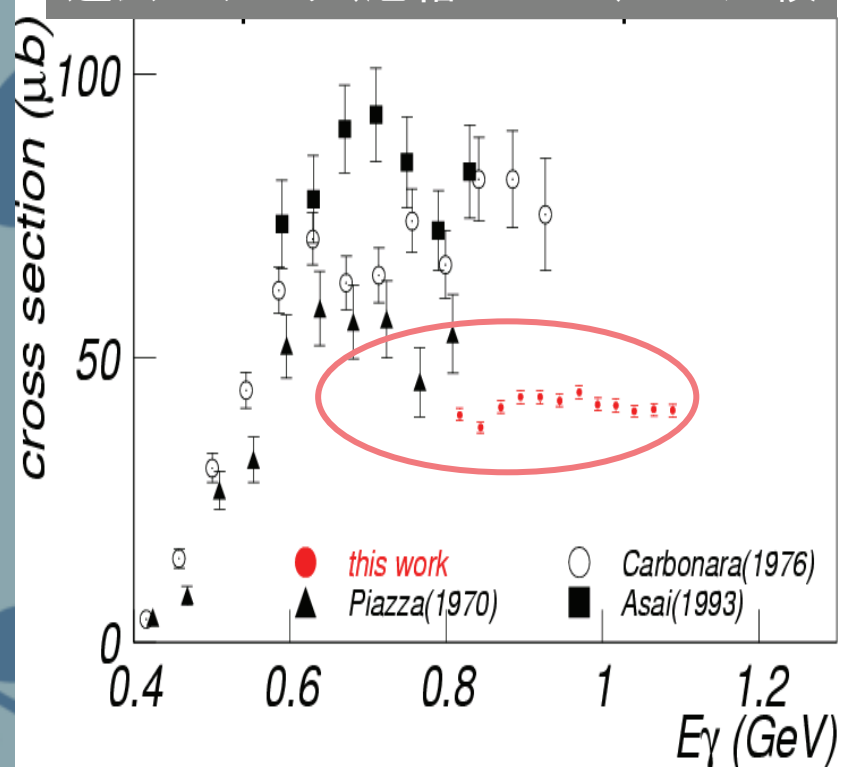


2007年12月15日

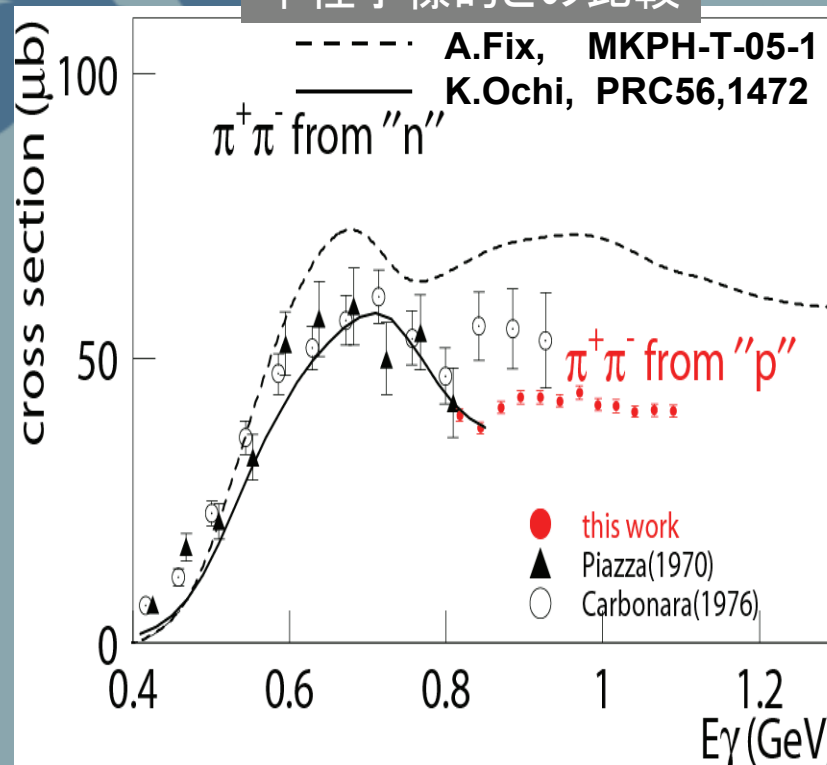
神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

# 重陽子標的での2π光生成 (QF)

過去のデータ(泡箱・TAGX)との比較



中性子標的との比較



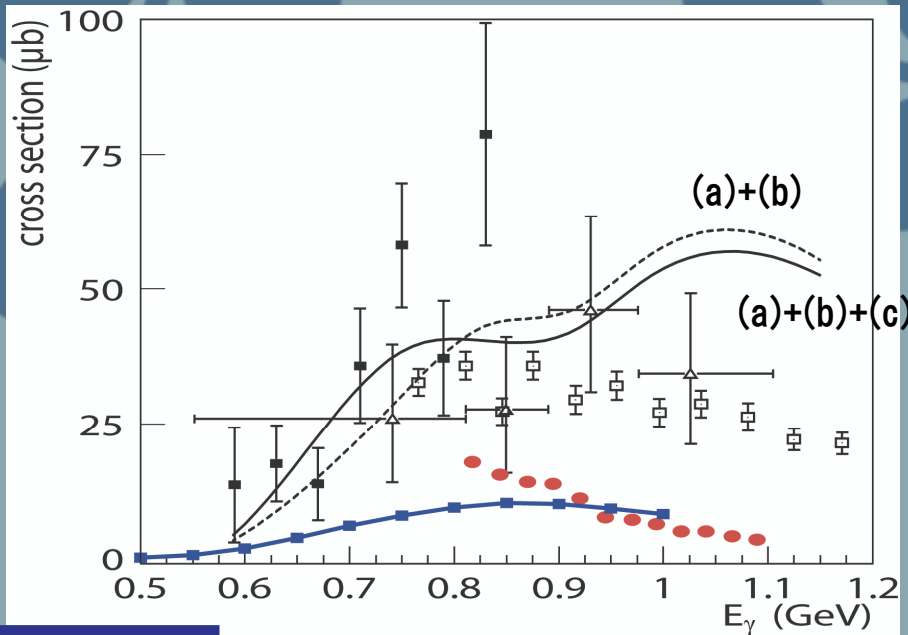
- 過去のデータより小さい値を示しているが、泡箱データのうち Piazza's のものとは連続性がある

- 中性子標的のデータとは比較的良く合っている→束縛されていることの影響があるのでは？

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

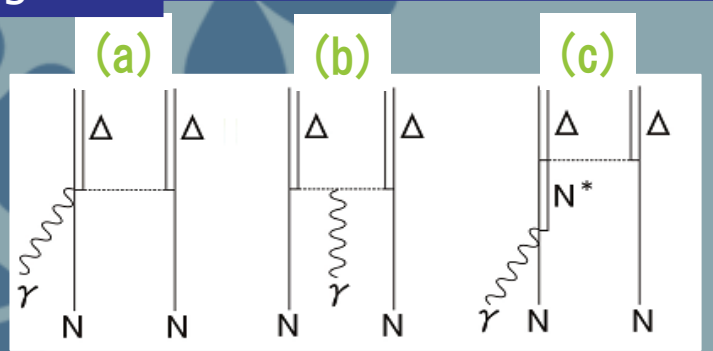
# $\gamma d \rightarrow \Delta^{++} \Delta^{-}$ 反応断面積



- this work
- Asai (TAGX)
- Wada (SAPHIR, PANIC'96, preliminary)
- △ Shinozaki (TAGX, private communication)
- J. A. Gomez Tejedor
- ⋯ J. A. Gomez Tejedor
- A. Fix (very preliminary)

- 我々のデータは、過去のデータや J. A. Gomez Tejedor らによる計算結果とは異なる値を示している
- ただし、Gomez Tejedor の論文によると  $E > 800 \text{ MeV}$  での結果は多分に不確定であるとのこと

## Diagrams



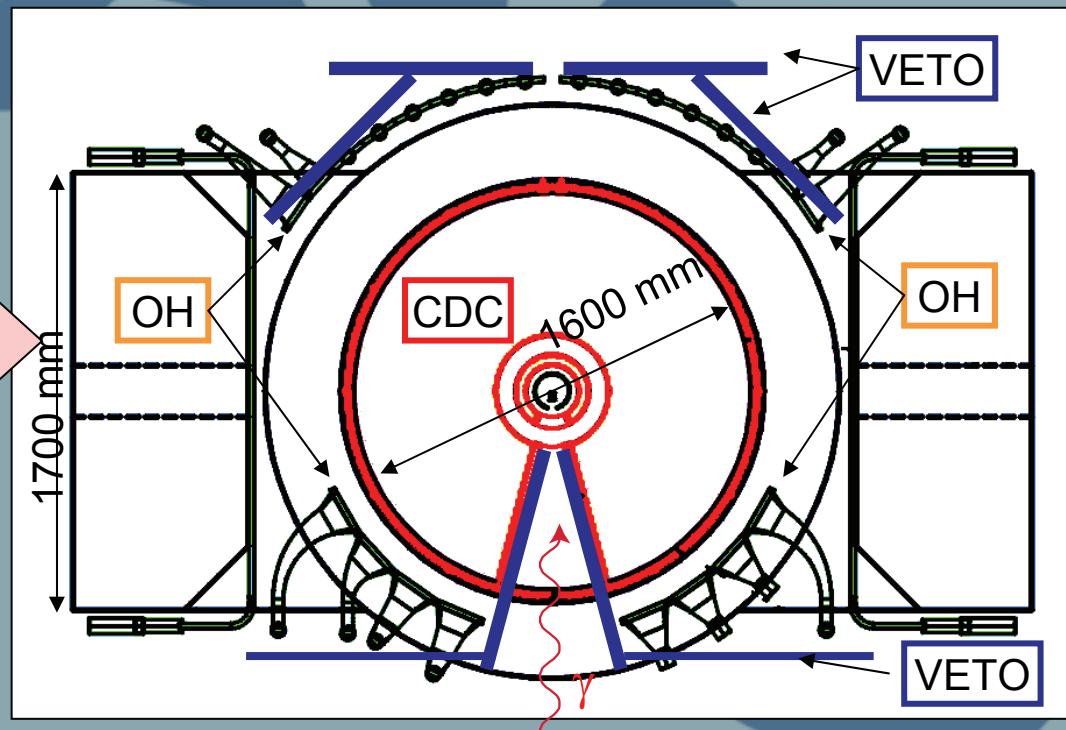
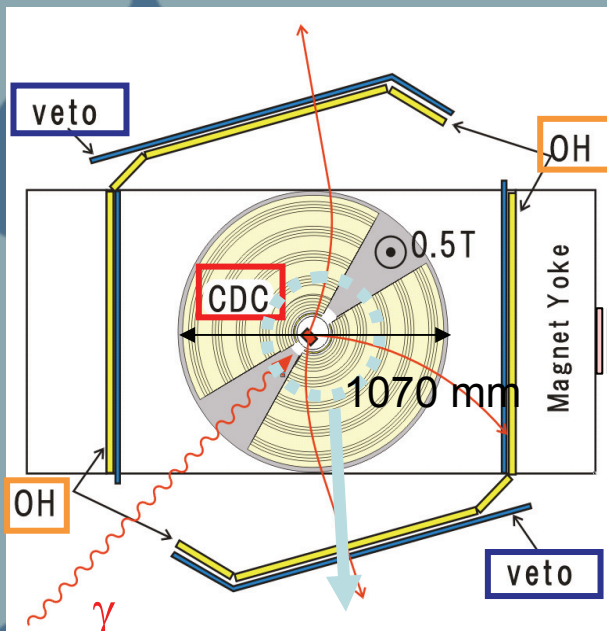
A. Fix による計算は左記の(a)のダイアグラムのみ考慮 (very preliminary result).

Gomez Tejedor, Oset, Toki, PLB346,240(1995) 「核子と中間子の多体問題の統一的描像に向けて」

# アップグレード版NKS (NKS2)

NKS (2001 ~ 2004)

NKS2 (2005 ~)



- 磁極半径が6割増 -> 精度良い粒子識別と運動量測定
- 前方にアクセプタンス
- 低いエネルギー領域 (0.55 to 0.92 GeV) における測定が認可されている

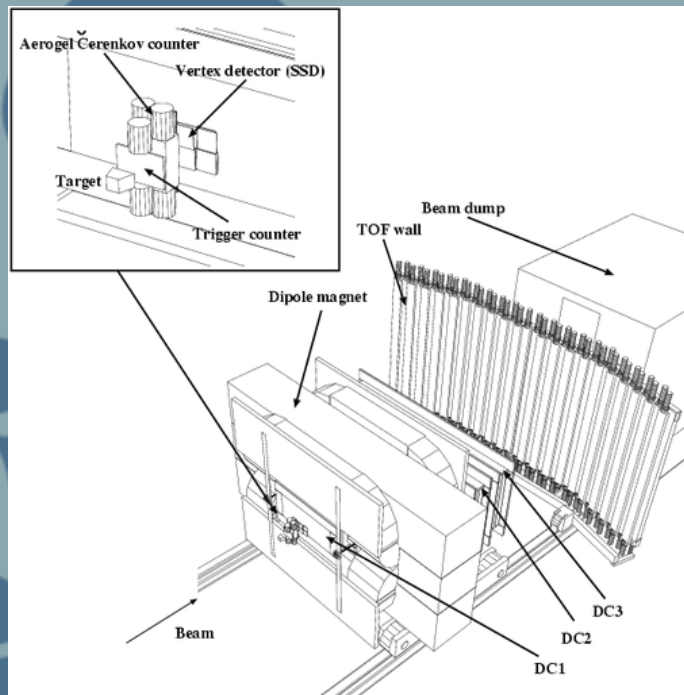
2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

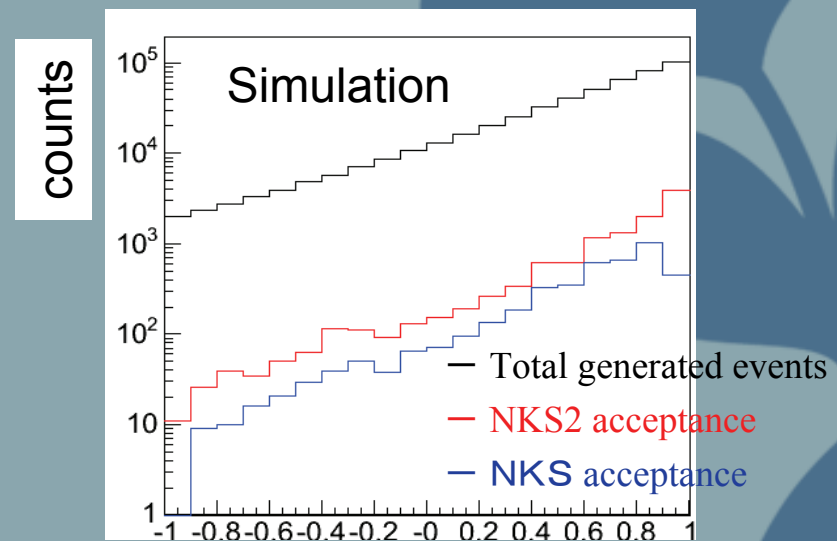


# LEPSの使用

- $2\pi$  光生成反応の研究の高エネルギー側への延長
- LEPS のアクセプタンスは前方のみ
- 生成する陽子は前方に集中するのでLEPSを用いても、それほど効率は悪くないのではないかとはいえTPCは使用した方が良さそう
- Monte Carlo シミュレーションが必要



$\Delta^{++}\Delta^{-}$  光生成反応における陽子の各分布。



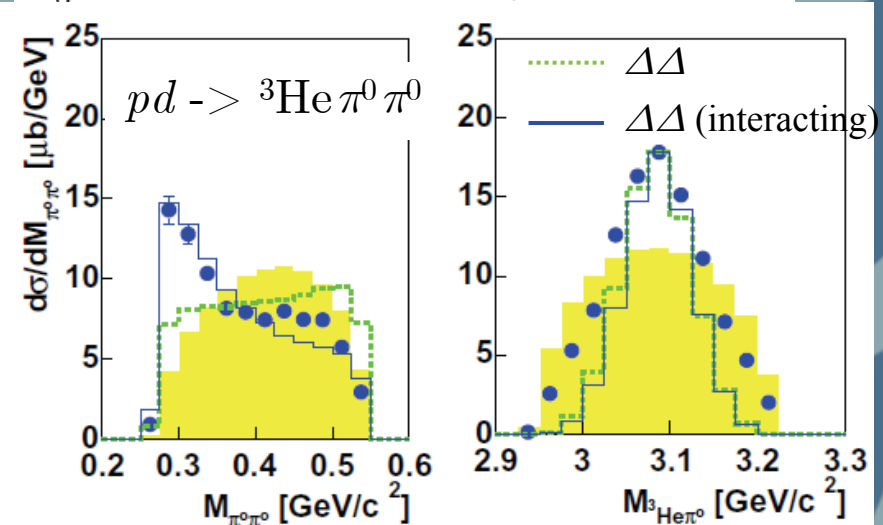
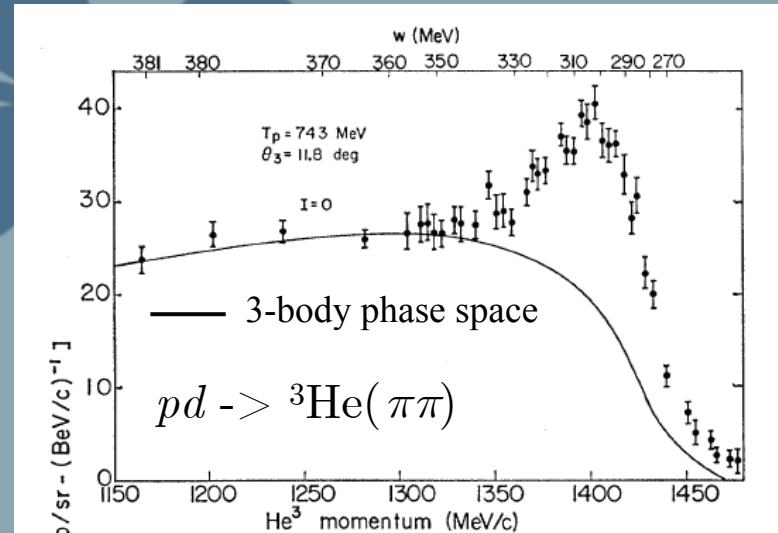
2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

COS $\theta$

# ABC 効果

- $p(d, {}^3\text{He})X$  実験で、 $pd \rightarrow {}^3\text{He}(\pi\pi)$  反応にみられたアイソスカラー中間子状態  
 Abashian, Booth and Crowe. (PRL 7 (1961) 35).  
 右上図は PRC 132 (1963)2314より.
- CELSIUS-WASAでエクスクルーシブな測定結果有り・  
 COSY-WASAでも計画中  
 右下図は arXiv:nucl-ex/0706.4026 より引用



もともとはスカラー中間子の励起と考えられていた

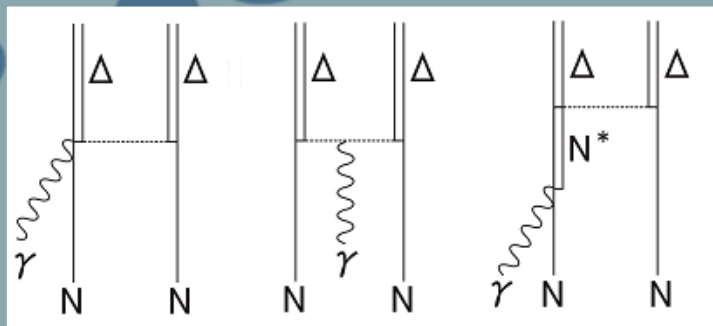
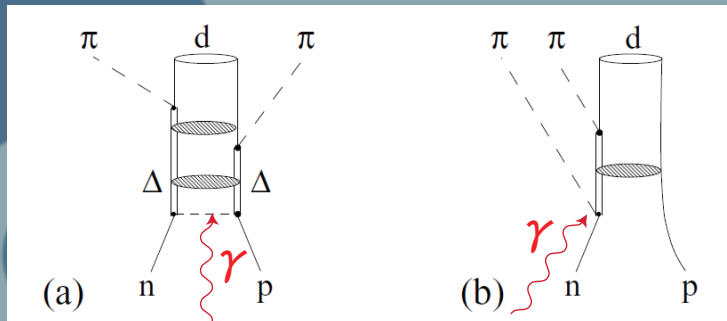
2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体問題の統一的描像に向けて」

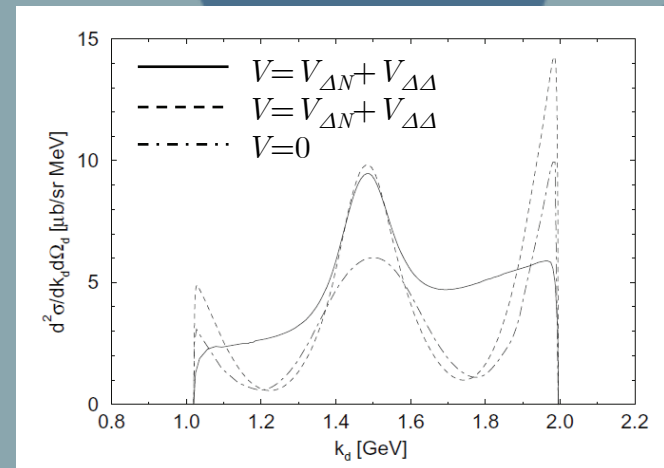
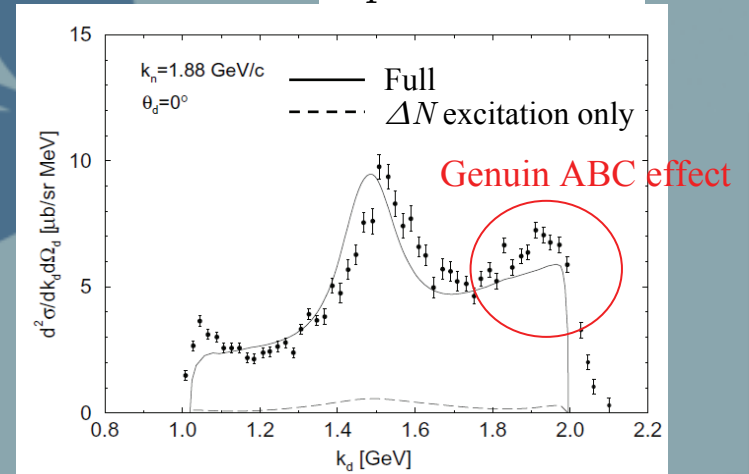
# ABC 効果と $\Delta\Delta$ 相互作用

- ABC 効果の起源は  $\Delta\Delta$  励起と考えられていた  
 $\Delta$ - $\Delta$  もしくは  $\Delta$ - $N$  相互作用が重要らしい

$\Rightarrow E_\gamma \sim 0.67$  GeV for  $\Delta\Delta$  threshold



$$np \rightarrow d\pi^+\pi^-$$



2007年12月15日

神田浩樹 @ 「核子と中間子の多体問題の統一的描像に向けて」

C. A. Mosbacher and F. Osterfeld,  
nucl-th/9903064

# まとめ

- $\Delta$ の相互作用の研究に $2\pi$ を含む終状態の観測(ABC効果)は重要
- ハドロンビームでのABC効果の系統的(ビーム・標的・偏極)な実験には、より高いエネルギー( $> 1\text{ GeV}$ )のビームと終状態の複数の粒子を観測する大立体角スペクトロメータが必要

- 陽子ビームと水素標的の  $pp$  衝突により、 $\pi, \sigma, \omega$  の各中間子を生成する素過程実験が行なえるエネルギーまでの陽子ビームを可変エネルギーにて供給できること。
- 陽子、重陽子、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$  の各軽イオンが加速できること。
- 偏極陽子、偏極重陽子が加速できること。偏極イオン源の製作が可能であれば、偏極  $^3\text{He}$ 、偏極  $^6\text{Li}$  のイオンが加速できること。

- $\pi$  中間子などの生成中間子自身もしくはその崩壊粒子の測定を可能にする  $4\pi$  検出器を有すること。

- 光子ビームによる $2\Delta$ 生成はABC効果と同様の反応機構を含むとも想像され、ハドロンビームの実験とは相補的な関係にある
- RCNPはバリオンビーム・光子ビーム・理論家の揃ったユニークな研究施設

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」

## まとめ（その2）

- 東北大学核理研BM4標識化光子ビームとNKSを用いて、 $\gamma d \rightarrow pn \pi^+ \pi^-$  反応の断面積を0.8 to 1.1 GeV の範囲で測定した
- 重陽子標的におけるQF  $\pi^+ \pi^-$  反応( $n$ -spectator) 断面積は陽子標的の断面積の60%程度
- 重陽子での  $\Delta^{++} \Delta^-$  光生成は重要な NQF 過程であるが過去のデータや理論計算とは合わない。A. Fix の計算結果とは近い様子
- これらの違いは終状態相互作用によるものか？？ $2N-2\pi$  系に関する理論的なアドバイスを切に望みます

kanda@mail.tains.tohoku.ac.jp

- NKS2を用いて低いエネルギーに展開中
- 高いエネルギーでの研究にはLEPSの使用も視野に

2007年12月15日

神田浩樹@「核子と中間子の多体  
問題の統一的描像に向けて」