



散乱長の導出を中心にした ω - N 相互作用の研究

R. Hashimoto

for FOREST collaboration

Department of physics, Yamagata University, Japan

KEK(東海) 研究会

原子核媒質中のハドロン研究 =魅力と課題=

Introduction

ω 中間子の物理

- Missing resonances の探索
- 原子核中でのベクトル中間子の性質

ω 中間子

$$J^P = 1^-$$

$$M = 782.65 \text{ MeV}$$

$$\Gamma = 8.49 \text{ MeV}$$

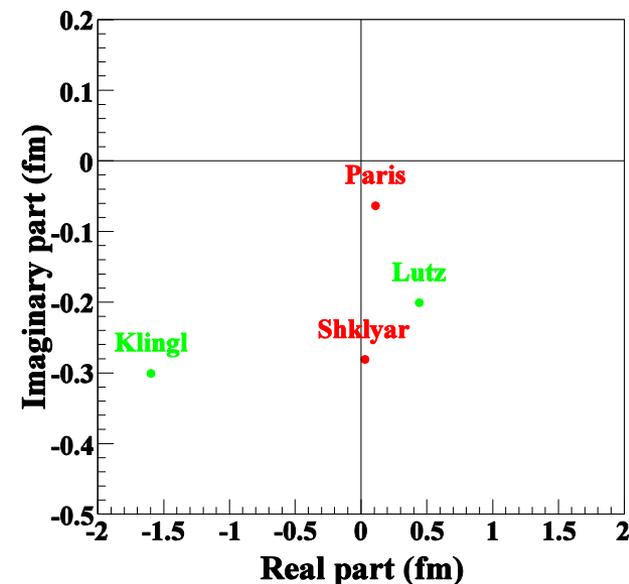
Decay mode	$\pi^+\pi^-\pi^0$	89.1%
	$\pi^0\gamma$	8.92%

核力の斥力部分を担う、良く知られた粒子。

Introduction

ω - N 相互作用の理解 - ωN 共鳴状態の研究や核媒質中での ω の性質を研究する上で重要。

しかし ω - N 間にどのような相互作用が働くかは良く分かっていない。



これまでに与えられた ω - N 散乱長

Introduction

(ω に限らず) 電磁相互作用や強い相互作用ですぐに崩壊する粒子の散乱実験は不可能。

→ πN 反応のように直接測定することができない。

$\omega N \rightarrow \omega N$ は不可能だが、 $\gamma N \rightarrow \underline{\omega N \rightarrow \omega N}$ を利用できる。

終状態相互作用

→ ω - N の相対運動量が小さいことが重要な条件。

ELPH での実験は最適な条件である。

Introduction

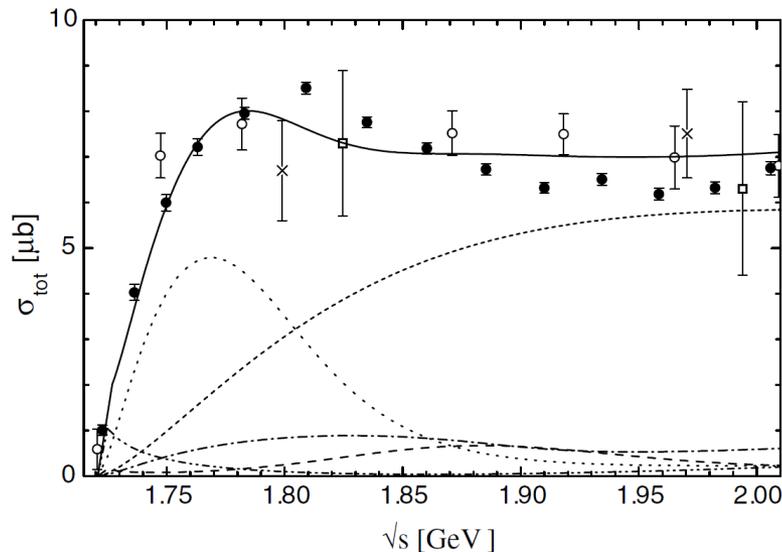
1 GeV 領域における ω 光生成

ELPH における ω 光生成

標識エネルギー 1-2 MeV 間隔のガンマ線を用いた実験。

$1.10 \leq \sqrt{s} \leq 1.74$ GeV で 30 点程のデータ点を測定可能

これまでに報告された光生成全断面積



Eur. Phys. J. A18, 117-127 (2003)

Introduction

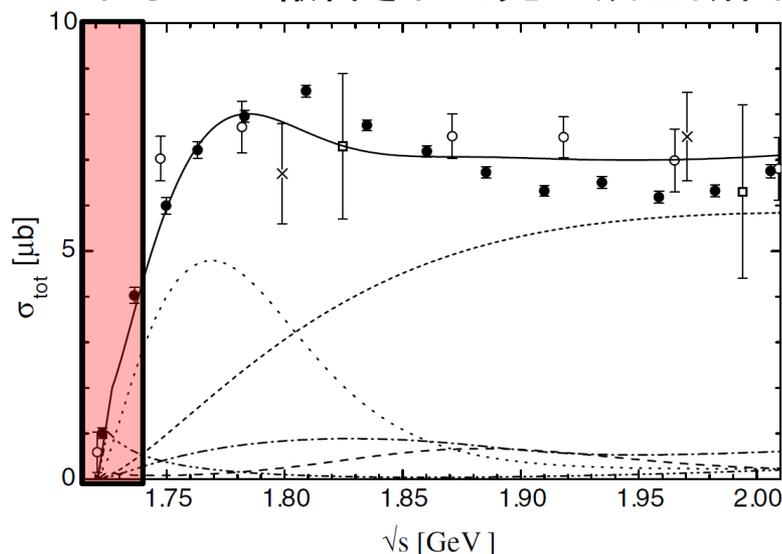
1 GeV 領域における ω 光生成

ELPH における ω 光生成

標識エネルギー 1-2 MeV 間隔のガンマ線を用いた実験。

$1.10 \leq \sqrt{s} \leq 1.74$ GeV で 30 点程のデータ点を測定可能

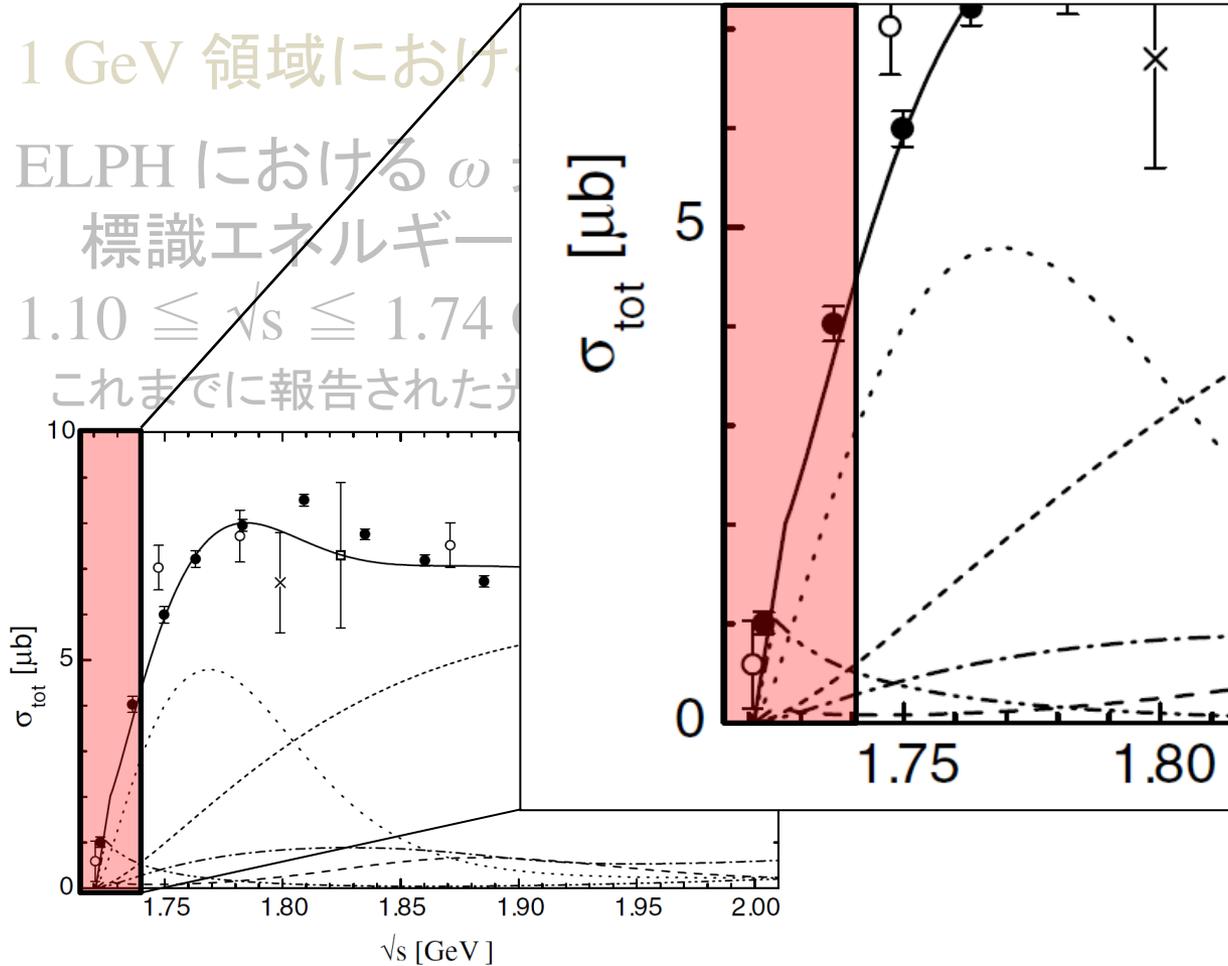
これまでに報告された光生成全断面積



Eur. Phys. J. A18, 117-127 (2003)

Introduction

1 GeV 領域における
 ELPH における ω -N
 標識エネルギー
 $1.10 \leq \sqrt{s} \leq 1.74$ GeV
 これまでに報告されたデータ



を用いた実験。
 を測定可能

赤塗りが ELPH の
 エネルギー領域
 さらに subthreshold
 まで測定可能

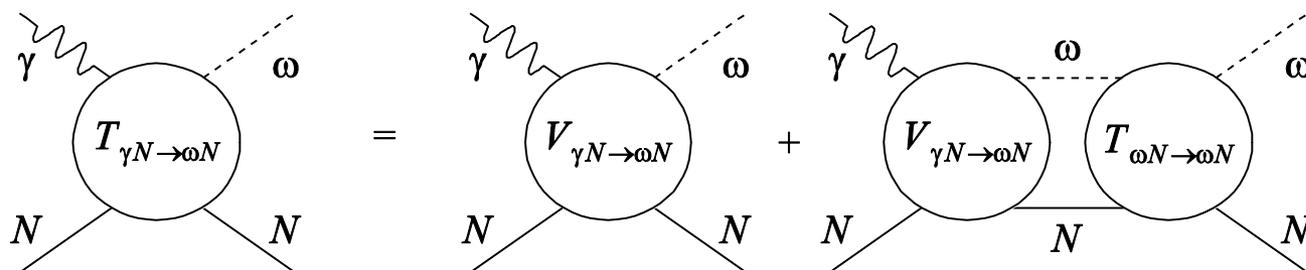
Eur. Phys. J. A18, 117-127 (2003)

Introduction

閾値近傍での ω 光生成反応

$\gamma p \rightarrow \omega p$ が主であると仮定

$\gamma p \rightarrow \omega p \rightarrow \omega p$ の終状態相互作用(FSI)を取り込んで定式化する



FSI パートを考慮した場合の T 行列 $T_{\gamma N \rightarrow \omega N}$

$$T_{\gamma N \rightarrow \omega N} = (1 + T_{\omega N \rightarrow \omega N} G) V_{\gamma N \rightarrow \omega N}$$

G : ωN Green's function

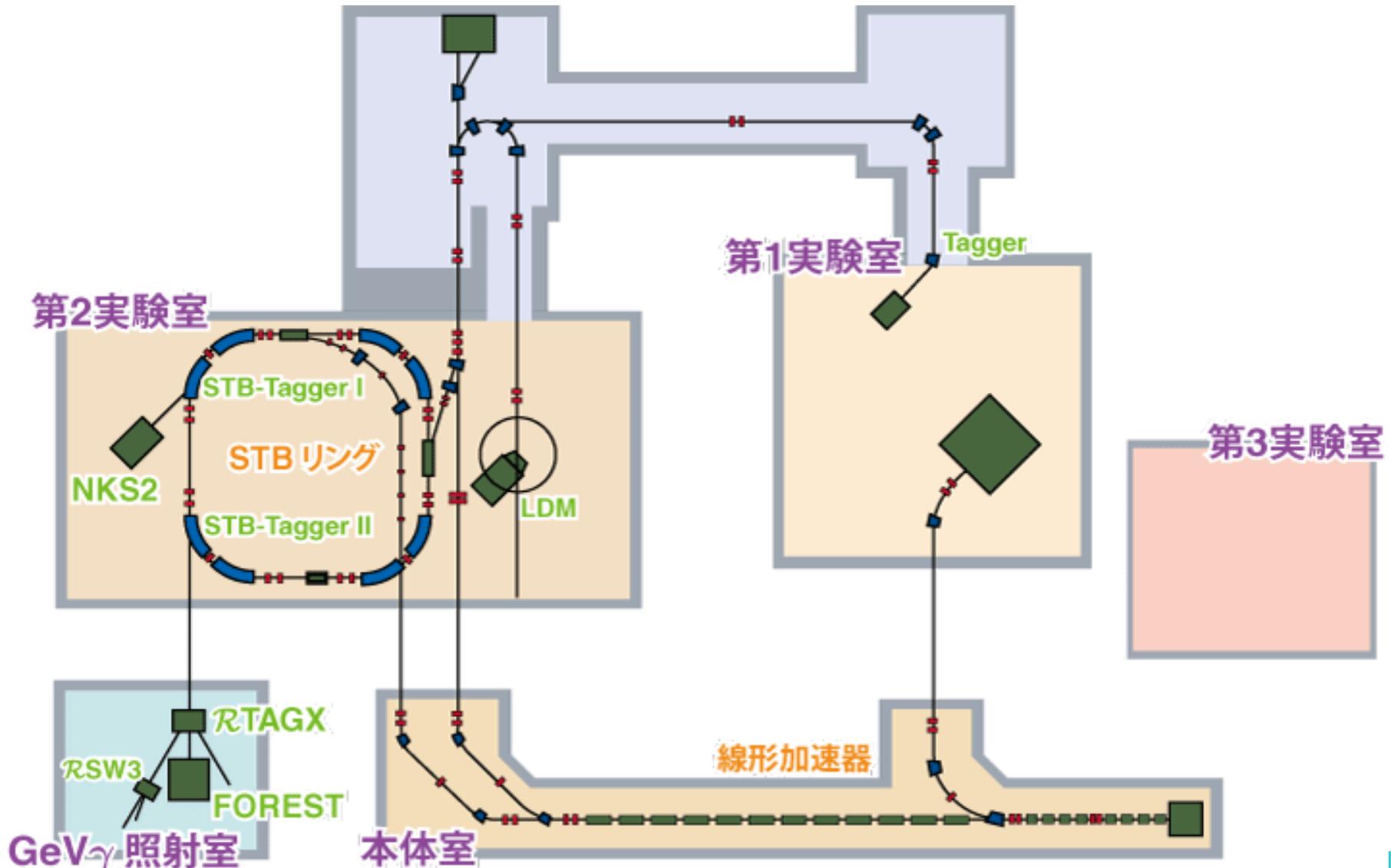
$V_{\gamma N \rightarrow \omega N}$: $\gamma N \rightarrow \omega N$ 相互作用

Introduction

本研究では、subthreshold から 1.15 GeV までの total cross section を測定し、そこに含まれる散乱長、有効距離の情報を抽出する。

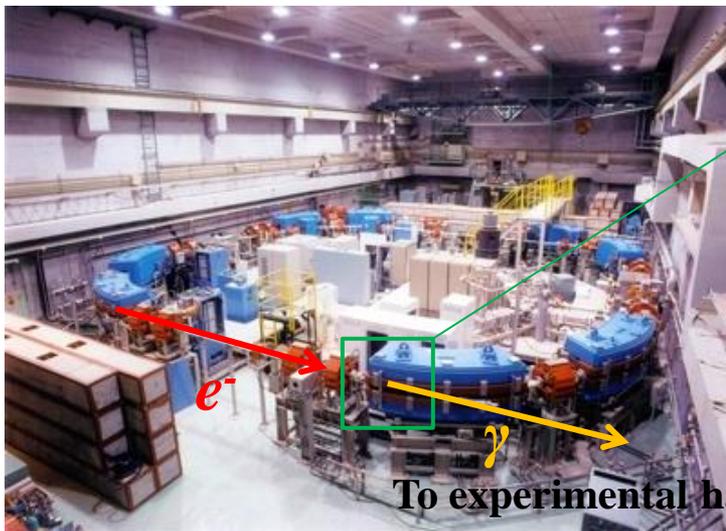
東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) GeV γ ビームライン

2013/8/5-6 KEK (東海) 研究会
原子核媒質中のハドロン研究
=魅力と課題=



Experimental Setup

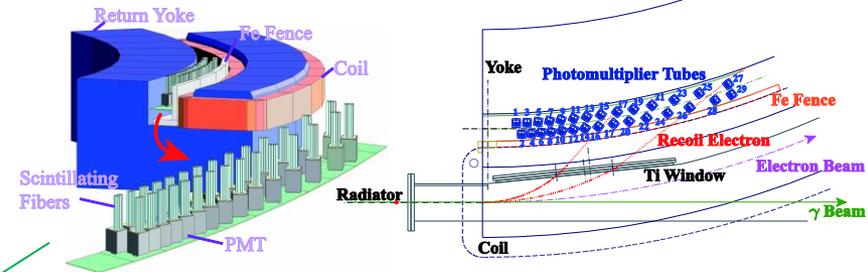
1.05 – 1.15 GeV の標識付光子
 (フルレンジ 0.74-1.15 GeV)
 1-2 MeV 程度のエネルギーステップ
 ~10 MHz のビーム強度



To experimental hall

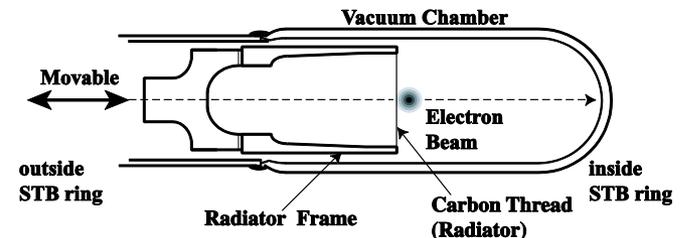
ストレッチャー・ブースタリング (STB-ring)
 周回電子の最大エネルギー : 1.2 GeV

STB-tagger II [1]



制動放射後の反跳電子を検出

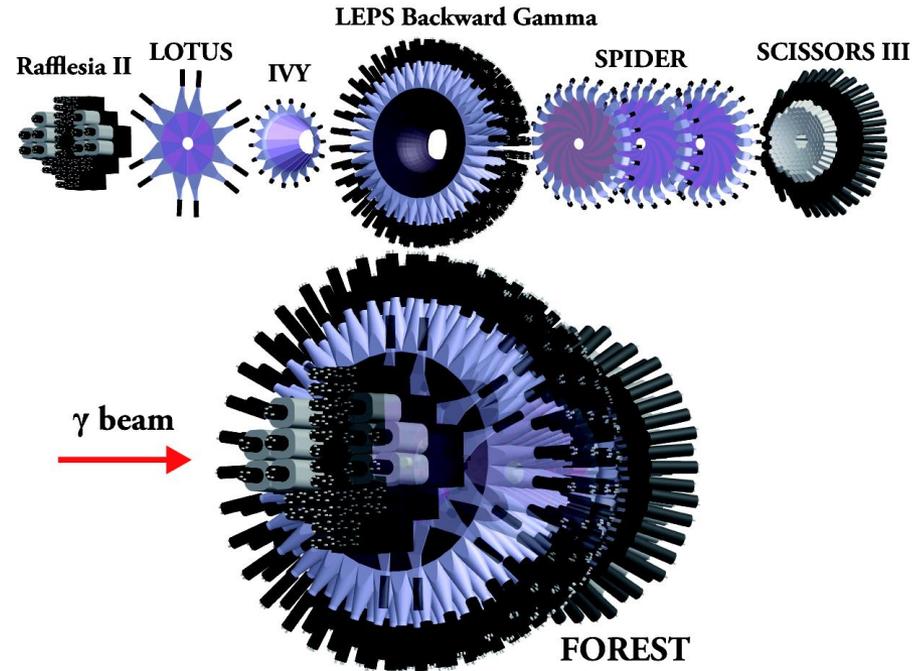
Radiator : 11 $\mu\text{m}\phi$ のカーボンファイバー



[1] T. Ishikawa et al.,
 Nucl. Instr. and Meth. A622, 1-10 (2010).

Experimental Setup

電磁カロリメータ FOREST



EM Calorimeter

SCISSRS III pure-CsI crystal
 300 mm ($16.2X_0$) × 144
 250 mm ($13.5X_0$) × 48

Backward Gamma

Lead/Scintillating-fiber modules
 220 mm ($13.8X_0$) × 252

Rafflesia II

Lead-glass cherenkov detector
 SF5 type 300 mm ($11.8X_0$) × 10
 SF6 type 250 mm ($11.8X_0$) × 52

PS hodoscope

SPIDER PS × 24 (× 3-layer)
 IVY PS × 18
 LOTUS PS × 12
 thickness 5 mm

Experimental Setup

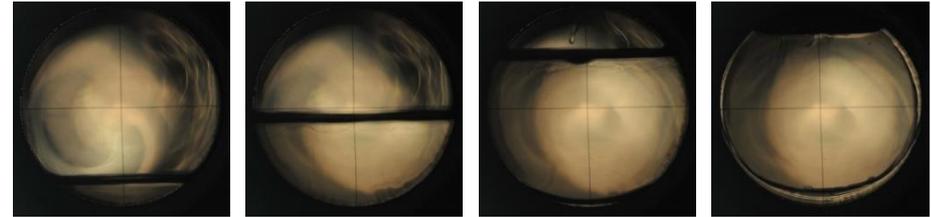
液体水素標的
 45 mm 厚、直径 61 mm



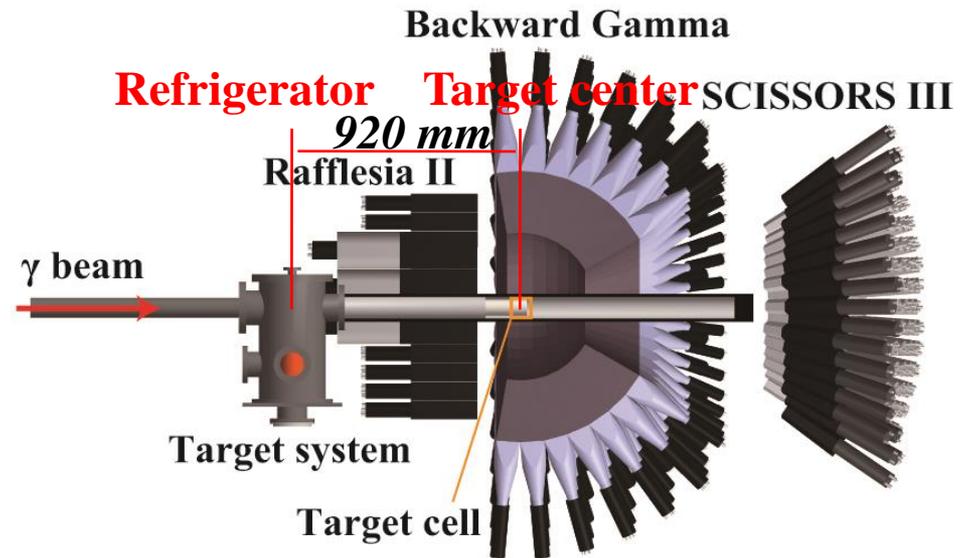
液体水素標的生成システム



標的パイプ



液体水素生成の様子



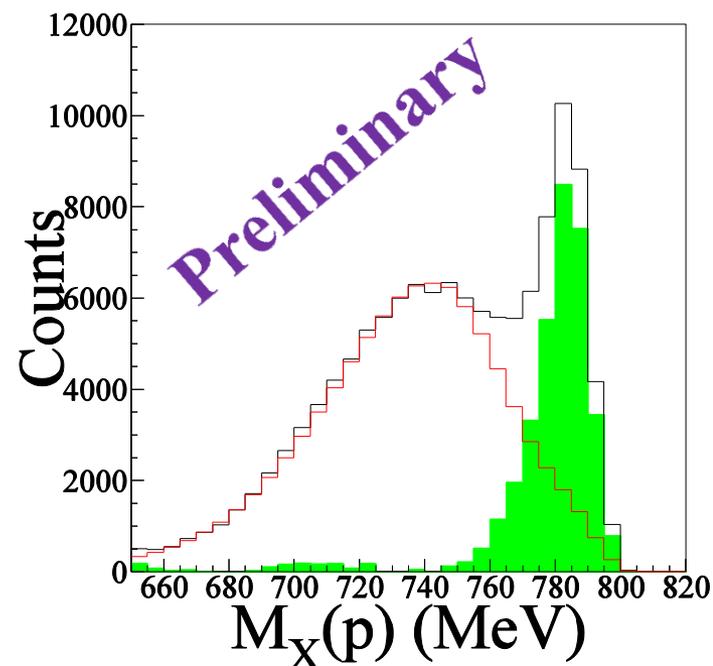
FOREST との位置関係

Analysis - identification of ω events

$$\gamma p \rightarrow \omega p \quad (\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0)$$

$p, \gamma\gamma$ ($\leftarrow \pi^0$), 2 charged particles を検出

$\gamma p \rightarrow Xp$ 反応を仮定した欠損質量
 を用いて ω を同定



Missing mass of $\gamma p \rightarrow Xp$

Background

ω peak

Analysis

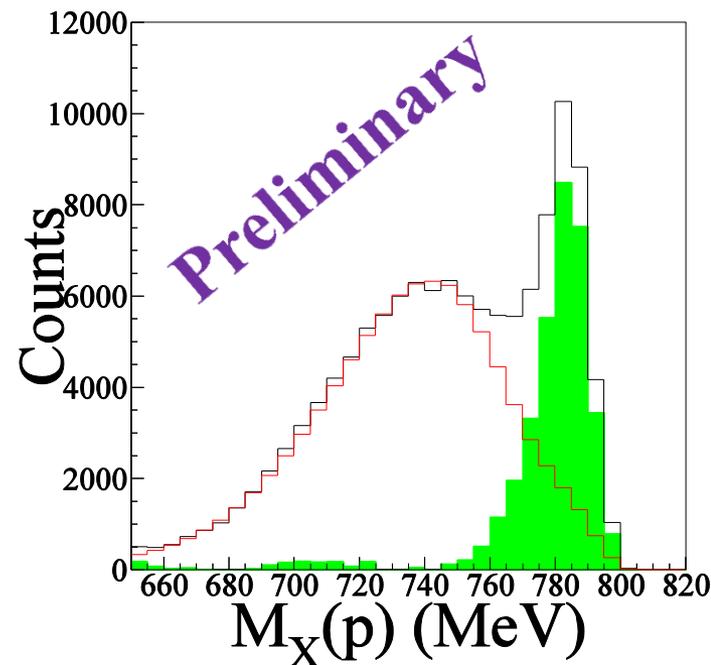
バックグラウンド事象の評価 二種類の方法でバックグラウンド事象を評価

- 適当な関数を仮定

$$f(x) = \exp(c_0 + c_1 x) \left(1 - \text{freq} \left(\frac{x - \mu_{bg}}{\sigma_{bg}} \right) \right) + (p_0 + p_1 x) \text{freq} \left(\frac{x - \mu_{bg}}{\sigma_{bg}} \right)$$

$c_0, c_1, p_0, p_1, \mu_{bg}, \sigma_{bg}$ は E_γ の関数としてデータから導出

- バックグラウンドとなる反応を仮定し、
 モンテカルロシミュレーションにより導出



Missing mass of $\gamma p \rightarrow Xp$

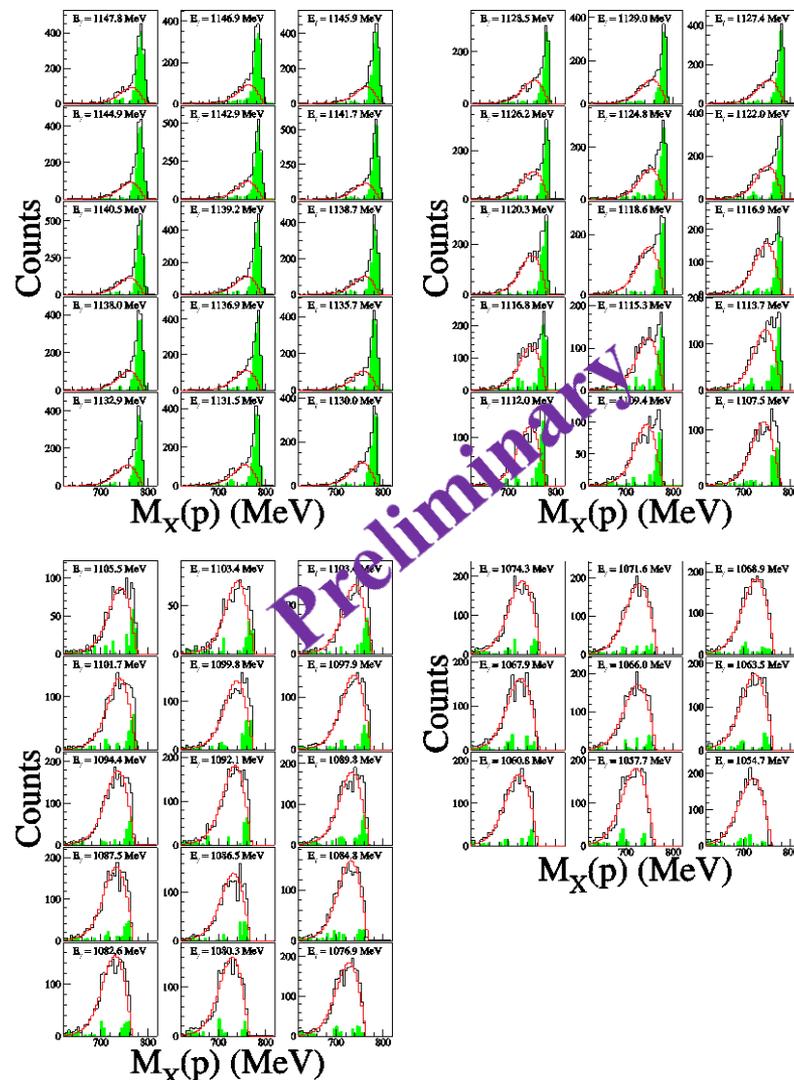
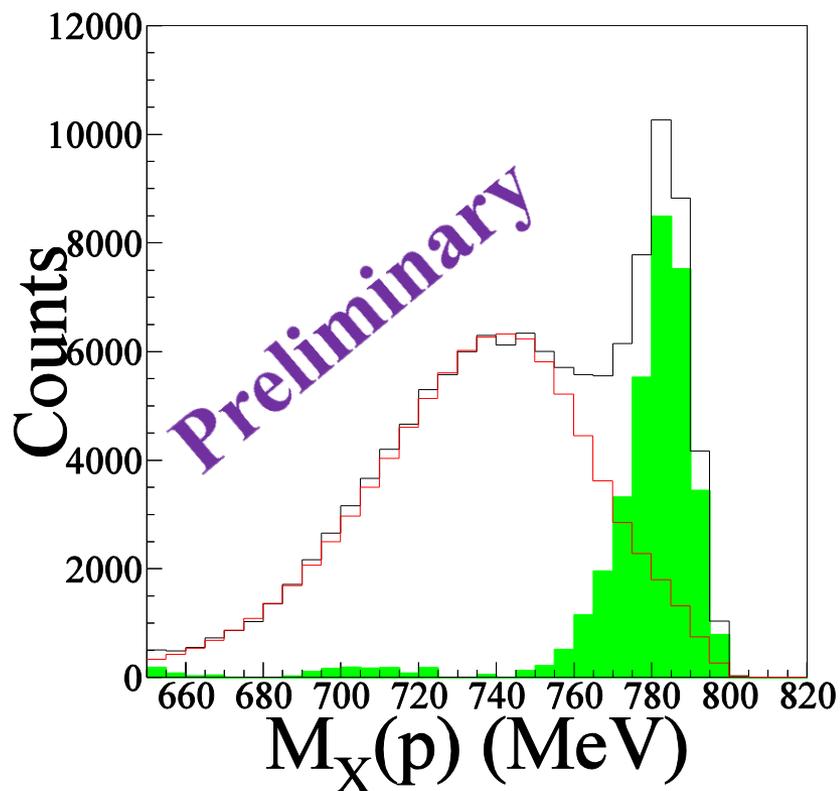
Background

ω peak

Analysis

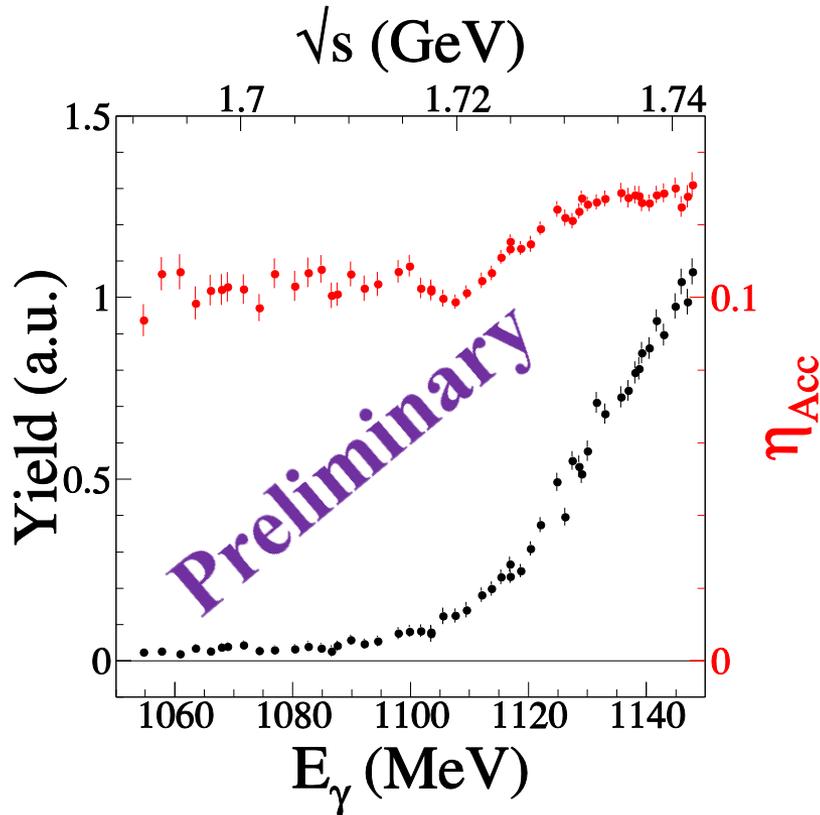
2013/8/5-6 KEK (東海) 研究会
 原子核媒質中のハドロン研究
 =魅力と課題=

バックグラウンドの差し引き



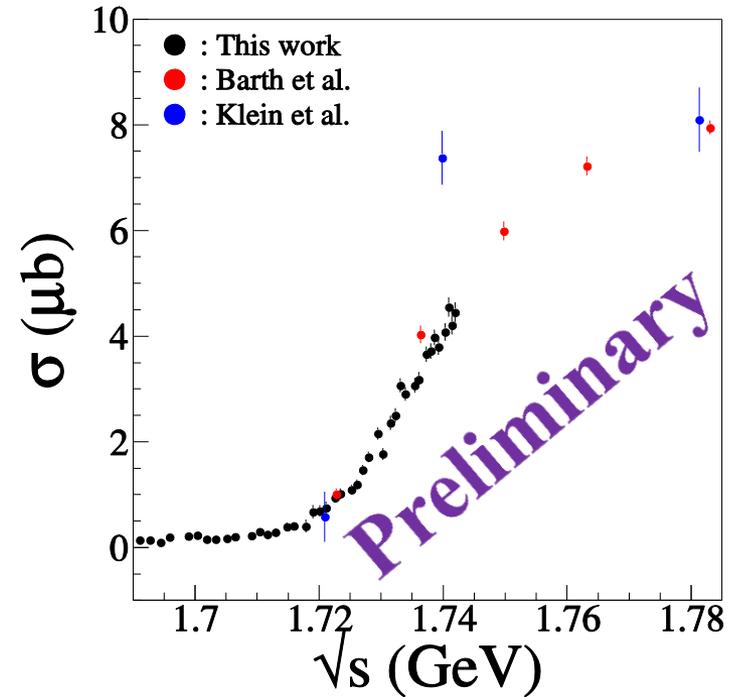
Analysis - Cross section の導出

検出器のアクセプタンス補正



Geant 4 シミュレーションでアクセプタンスを評価

ω photoproduction cross section



- J. Barth *et al.*,
Eur. Phys. J. A18, 117-127 (2003).
- F. J. Klein *et al.*,
 πN Newsl. 14, 141 (1998).

Analysis - expression of total cross section

ω photoproduction cross section の定式化

$$\sigma(\sqrt{s}; m, p) = \frac{8\pi p E_\omega E_N}{\sqrt{s}} |T_{\gamma N \rightarrow \omega N}|^2$$

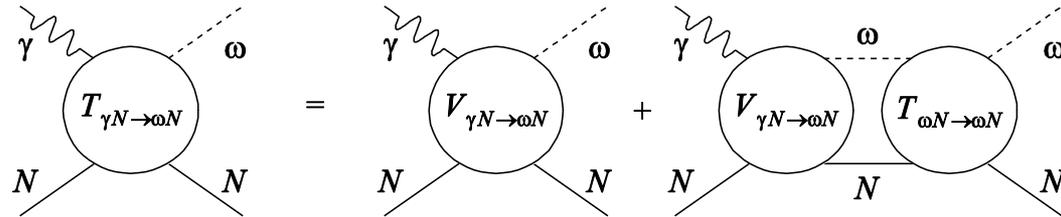
m : ω meson mass

p : relative momentum

E_ω, E_N : energy of ω and nucleon

\sqrt{s} : invariant mass of the initial γN system and final ωN system

$T_{\gamma N \rightarrow \omega N}$: transition matrix of $\gamma N \rightarrow \omega N$ reaction



ω の幅 $\Gamma = 8.5$ MeV を考慮し

$$\sigma(\sqrt{s}) = \frac{\int_{m_{3\pi}}^{m_{\max}} \sigma(\sqrt{s}; m, p) f(m) dm}{\int_{m_{3\pi}}^{\infty} f(m) dm}$$

$f(m)$: Breit-Wigner distribution
for ω meson.

Analysis - expression of total cross section

$$T_{\gamma N \rightarrow \omega N} = (1 + T_{\omega N \rightarrow \omega N} G) V_{\gamma N \rightarrow \omega N}$$

FSI パートは
$$\begin{aligned} T_{\omega N \rightarrow \omega N} &= -\frac{1}{(2\pi)^2 \mu p} \frac{1}{p} e^{i\delta} \sin \delta \\ &= -\frac{1}{(2\pi)^2 \mu p} \frac{1}{p} \frac{1}{e^{-i\delta}} \sin \delta \\ &= -\frac{1}{(2\pi)^2 \mu p} \frac{\sin \delta}{(\cos \delta - i \sin \delta)} \\ &= -\frac{1}{(2\pi)^2 \mu p} \frac{1}{\cot \delta - ip} \end{aligned}$$

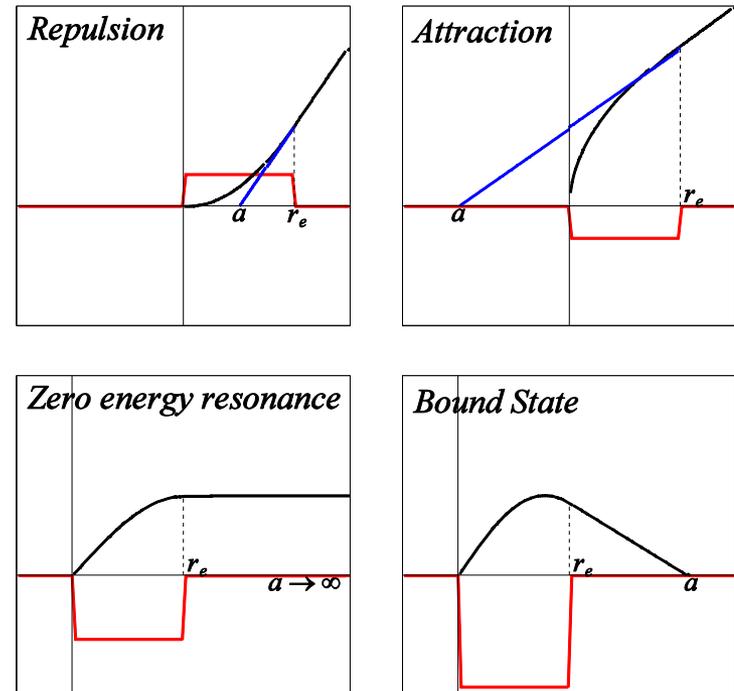
γN 相互作用パートは、共鳴の寄与が無視できると仮定し、 $l=0$ の球ベッセル関数で表す。 $l=0$ では運動量 p に対し定数で近似できるため

$$|V_{\gamma N \rightarrow \omega N}|^2 = B$$

散乱長の符号は以下

$$k^{2l+1} \cot \delta_{ls} = -\frac{1}{a_{ls}} + \frac{1}{2} r_{e,ls} k^2 + \dots$$

散乱長と有効距離の関係



δ の複素数への拡張

δ は通常複素数で与えられ弾性散乱部分を ($AB \rightarrow AB$)、
虚部は非弾性散乱部分を ($AB \rightarrow CB$) を表わす。

$$\begin{cases} \delta &= \Re\delta + i \Im\delta \\ a &= \Re a + i \Im a \\ r_e &= \Re r_e + i \Im r_e \end{cases}$$

と書けば、 $T_{\omega N \rightarrow \omega N} = \Re T + i \Im T$ に対し、

$$\begin{cases} \Re T &= -\frac{1}{(2\pi)^2\mu} \frac{1}{A} \left(-\frac{\Re a}{(\Re a)^2 + (\Im a)^2} + \frac{p^2}{2} \Re r_e \right) \\ \Im T &= -\frac{1}{(2\pi)^2\mu} \frac{1}{A} \left(-\frac{\Im a}{(\Re a)^2 + (\Im a)^2} - \frac{p^2}{2} \Im r_e + p \right) \end{cases}$$

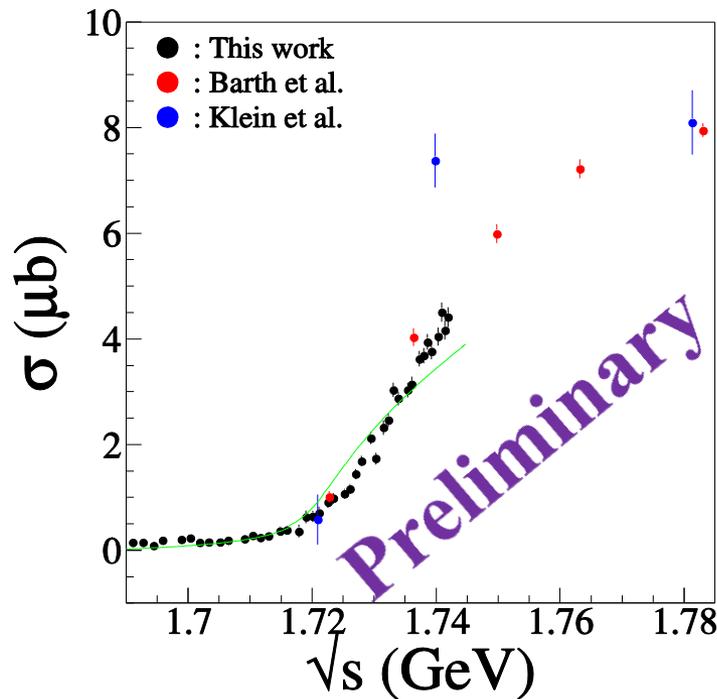
$$A = \left(-\frac{\Re a}{(\Re a)^2 + (\Im a)^2} + \frac{p^2}{2} \Re r_e \right)^2 + \left(\frac{\Im a}{(\Re a)^2 + (\Im a)^2} + \frac{p^2}{2} \Im r_e - p \right)^2$$

を得る。

Analysis

FSI 有/無 についてフィットを行う

FSI 無しのフィット - $\sigma(\sqrt{s})$ の形は固定



$$\sigma(\sqrt{s}; m, p) = \frac{8\pi p E_\omega E_N}{\sqrt{s}} |T_{\gamma N \rightarrow \omega N}|^2$$

$$T_{\gamma N \rightarrow \omega N} = (1 + T_{\omega N \rightarrow \omega N} G_{\omega N}) V_{\gamma N \rightarrow \omega N}$$

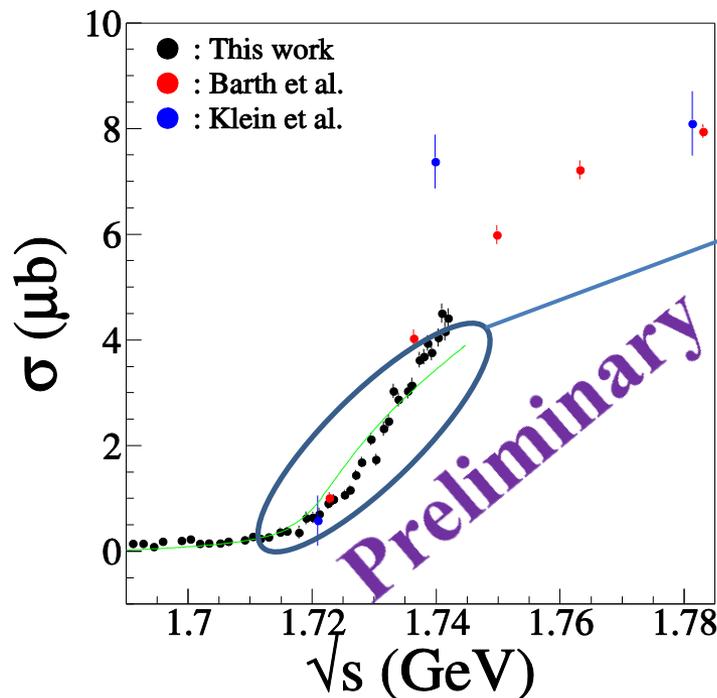
Analysis

FSI 有/無 についてフィットを行う

FSI 無しのフィット - $\sigma(\sqrt{s})$ の形は固定

$$\sigma(\sqrt{s}; m, p) = \frac{8\pi p E_\omega E_N}{\sqrt{s}} |T_{\gamma N \rightarrow \omega N}|^2$$

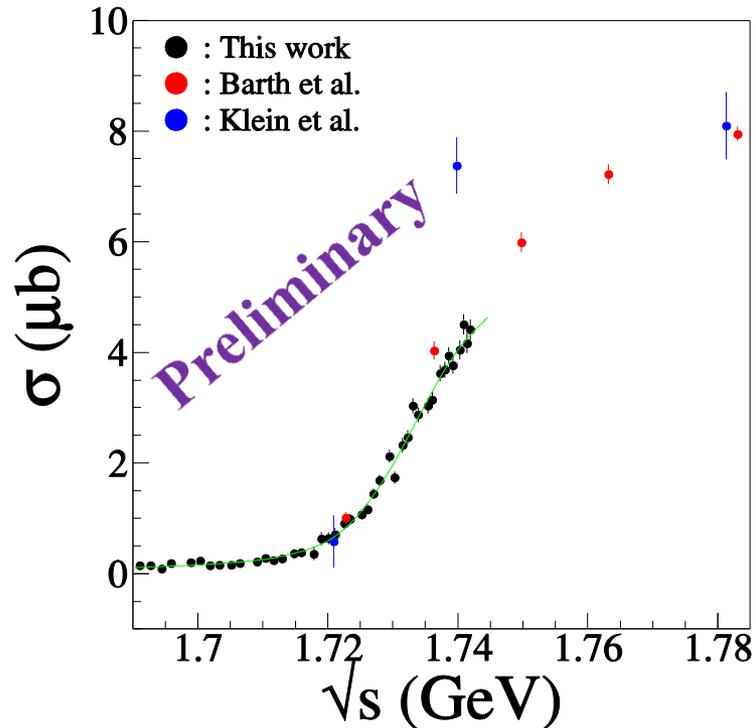
$$T_{\gamma N \rightarrow \omega N} = (1 + T_{\omega N \rightarrow \omega N} G_{\omega N}) V_{\gamma N \rightarrow \omega N}$$



カーブはデータを overestimate ?

Analysis

FSI 有りのフィット
 スピン平均の a と r_e を導出



Summary

東北大 ELPH で液体水素を標的とした ω 光生成実験を行った。

入射ガンマ線エネルギーは 1.05 – 1.15 GeV で、subthreshold 領域から ω の閾値をカバーしている。

陽子の欠損質量分布から ω を識別し total cross section を導出。

スピン平均の ωN 散乱長 a と有効距離 r_e を導出し、それらの関係や total cross section の形状から ω - N 間に斥力が働ことを示唆される。