

# 原子核中における φ中間子の性質と観測量

奈良女子大学

徳永 沙緒莉

共同研究者

関原(山縣) 淳子

(大島商船高等専門学校)

永廣 秀子

比連崎 悟

Acknowledgement

四日市 悟 氏 (理化学研究所)

澤田 崇広 氏

(中央研究院 物理研究所(台湾))

# 1, Introduction

- 原子核媒質中のベクトル中間子の性質変化 = 興味深い
    - T. Hatsuda and S. H. Lee, Phys. Rev. C46 (1992) R34  
...mass shift
  - 実験的な研究
    - KEK E325 : 12[GeV] p+A レプトン対のInvariant mass測定  
R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501
    - LEPS : 1.5-2.4[GeV]  $\gamma$ +A  $\phi$ 中間子のTransparency Ratio測定  
T. Ishikawa et al., Phys. Lett. B 608 (2005) 215-222  
T. Sawada, Doctor Thesis, Osaka University (2013)
- 実験結果の統一的な理解が難しい場合が存在

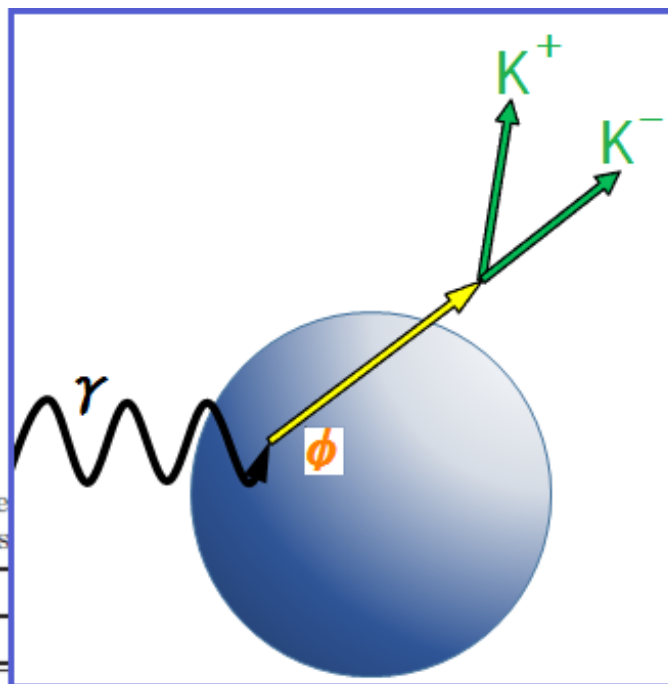
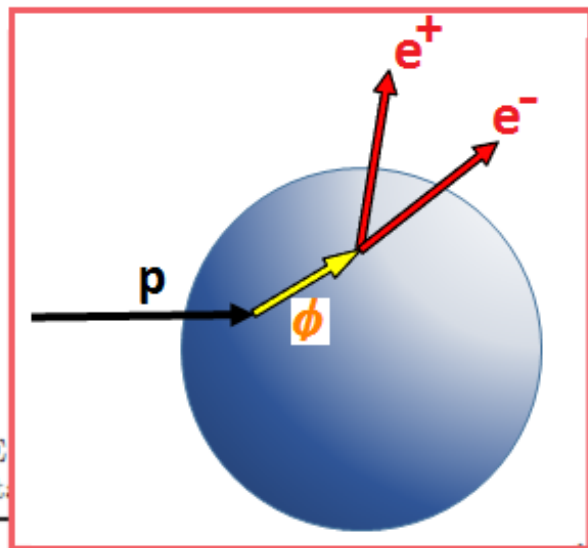


TABLE  
element

s on the  
periments

$\phi$  mesons produced with  
pared by Metag (2008a)

	E325 @ KEK	CLAS g7 @ Jlab			LEPS @ SPring-8
Reaction	pA 12 GeV	$\gamma A$ 0.6 – 3.8 GeV			$\gamma A$ 1.5 – 2.5 GeV
Momentum	$p > 0.5$ GeV/c	$p > 0.8$ GeV/c	$p < 0.5$ GeV/c	$0.4 < p < 1.7$ GeV/c	$1.1 < p < 2.2$ GeV/c
$\phi$	$\Delta m(\rho_0)/m = -3.4\%$ $\Gamma_\phi(\rho_0) \approx 15 \text{ MeV}/c^2$	– –	– –	– –	$\sigma_{\phi N} = 35 \text{ mb}$ $\rightarrow \Gamma_\phi(\rho_0) \approx 80 \text{ MeV}/c^2$

† This may change as a result of the ongoing reanalysis (Metag, 2008b).

-Ryugo S. Hayano and Tetsuo Hatsuda: Hadron properties in the nuclear medium

Rev. Mod. Phys. 82 (2010) 2949-2990

Mass shift: 3.4%

$$\Gamma_\phi(\rho_0) \approx 15 [\text{MeV}/c^2]$$

Mass shift: no mention

$$\sigma_{\phi N} = 35 [\text{mb}]$$

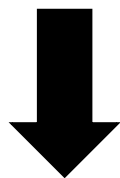
$$\rightarrow \Gamma_\phi(\rho_0) \approx 80 [\text{MeV}/c^2]$$

# 1, Introduction

- 目的

- $\phi$ 中間子の性質の変化と実験観測量の間の  
関係の理解を深める

- 異なる観測量を統一的に理解する



これらを目的とした

- 現象論的な定式化

- [ Transparency ratio (LEPS/SPring-8)    を統一的に扱う  
Invariant mass (KEK E325)

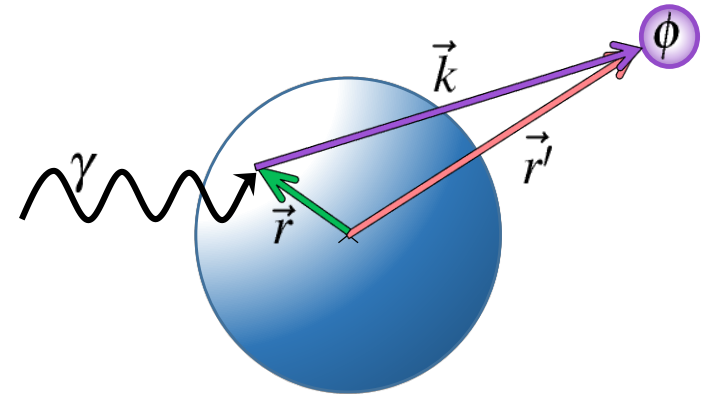
## 2, Transparency ratio –定式化–

-T. Ishikawa et al., Phys. Lett. B 608 (2005) 215-222

-T. Sawada, Doctor Thesis, Osaka University (2013)

Transparency ratio  $T_A$

$$T_A = \frac{1}{A} \int d^3r N_{in} S_i(\vec{r}) \rho(\vec{r}) S_f(\vec{r})$$



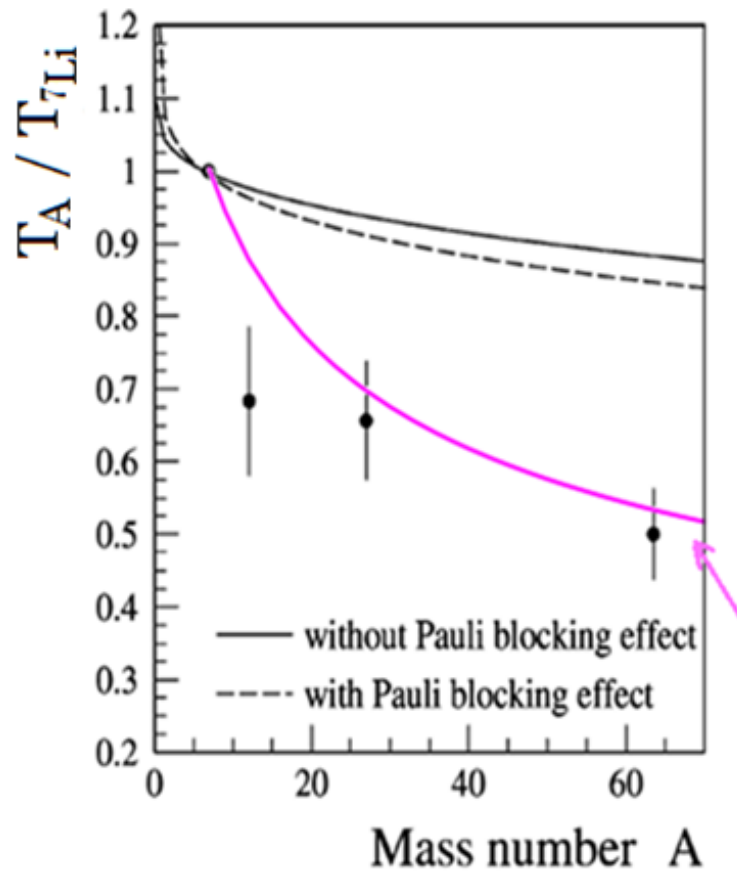
$A$  : 質量数       $N_{in}$  : 入射光子数

$S_i(\vec{r}) = \exp \left[ -\sigma_{\gamma N} \int_{-\infty}^z dz' \rho(\vec{b}, z') \right]$  : 入射光子の減少確率

$S_f(\vec{r}) = \exp \left[ -\sigma_{\phi N} \int_0^\infty dl \rho(|\vec{r}'|) \right]$  : 射出 $\phi$ 中間子の減少確率

$\vec{r}' = \vec{r} + l \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|}$  : 射出 $\phi$ 中間子の経路       $\vec{k}$  :  $\phi$ 中間子の運動量

### 3, Transparency ratio –計算結果–

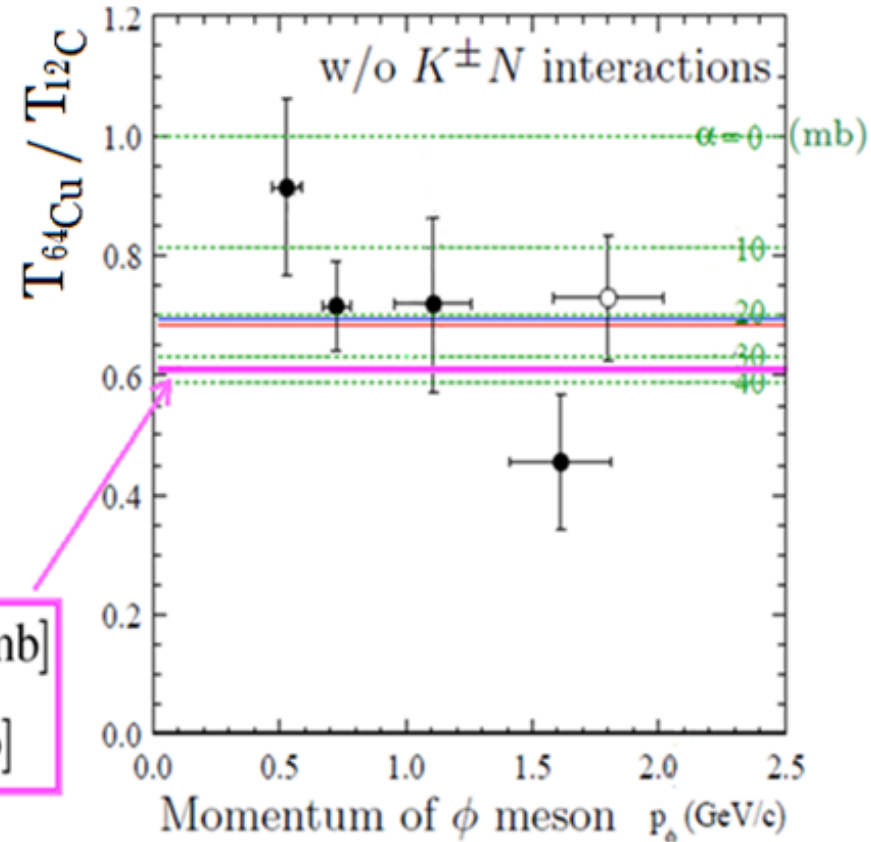


T. Ishikawa et al., PLB 608 (2005) 215-222

計算結果

input  
 $\sigma_{\gamma N} = 0.14 [\text{mb}]$

$\sigma_{\phi N} = 35 [\text{mb}]$



T. Sawada, Doctor Thesis, Osaka Univ. (2013)

# 4, Invariant mass –定式化–

- Transparency ratio と同様の定式化

→ Invariant mass 分布を Transparency ratio と同じパラメータで計算

$\phi$ 中間子の崩壊数  $N_{\phi}^{\text{decay}}$

$$N_{\phi}^{\text{decay}} = N_{\phi}(\vec{r}_{\text{pp}}) - N_{\phi}(\vec{r}_{\phi})$$

$\phi$ 中間子の生成量

$$\underline{N_{\phi}(\vec{r}_{\text{pp}})} = \exp \left[ -\sigma_{iN} \int_{-\infty}^{\vec{r}_{\text{pp}} = (\vec{b}, z_{\text{pp}})} dz \rho(\sqrt{|\vec{b}|^2 + z^2}) \right] \rho(|\vec{r}_{\text{pp}}|)$$

位置  $\vec{r}_{\phi}$  における  $\phi$ 中間子数

$$N_{\phi}(\vec{r}_{\phi}) = \underline{N_{\phi}(\vec{r}_{\text{pp}})} \exp \left[ -\sigma_{\phi N} \int_0^{\ell} d\ell' \rho(|\vec{r}_{\text{pp}} + \ell' \cdot \hat{p}_{\phi}|) \right] \exp \left[ -\frac{\sum_i (B.R.)_i \Gamma_{\text{full}}}{\beta \gamma} \ell \right]$$

$\vec{r}_{\text{pp}}$   $\phi$ 中間子の生成位置  $z_{\text{pp}}$  生成位置のz座標

$\ell$   $\phi$ 中間子の移動距離  $\vec{r}_{\phi} = \vec{r}_{\text{pp}} + \ell' \cdot \hat{p}_{\phi}$  移動距離  $\ell'$  での  $\phi$ 中間子の位置

$(B.R.)_i$  真空中での  $\phi$ 崩壊のbranching ratio ( $\sum_i (B.R.)_i = 1$ )

$\Gamma_{\text{full}}$  真空中での  $\phi$ 中間子の全幅

$\phi$ 中間子の単位飛距離あたりの崩壊数  $n_{\phi}^{\text{decay}}(\ell)$

$$n_{\phi}^{\text{decay}}(\ell) = \frac{d}{d\ell} N_{\phi}^{\text{decay}} = n_{\phi N} + n_{K^+ K^-} + n_{e^+ e^-} + \dots$$

崩壊チャンネル  $e^+ e^-$  pair への崩壊数  $n_{e^+ e^-}(\ell)$

$$n_{e^+ e^-}(\ell) = \frac{\Gamma_{e^+ e^-}}{\beta \gamma} \times N_{\phi}(\vec{r}_{\phi})$$

崩壊チャンネル  $e^+ e^-$  pair の観測で得られる不変質量の分布  $S_{e^+ e^-}(m)$

$$S_{e^+ e^-}(m) = \frac{\Gamma_{e^+ e^-}}{\beta \gamma} \int d^3 r_{\text{pp}} \int_0^{\infty} d\ell n_{e^+ e^-}(\ell) \frac{\Gamma(|\vec{r}_{\phi}|)}{2\pi} \frac{1}{\{m - m_{\phi} (1 - c\rho(|\vec{r}_{\phi}|)/\rho_0)\}^2 + \Gamma(|\vec{r}_{\phi}|)^2/4}$$

$\vec{r}_{\phi} = \vec{r}_{\text{pp}} + \ell \cdot \hat{\vec{p}}_{\phi}$  移動距離  $\ell$  での  $\phi$  中間子の位置

$m_{\phi}$  真空中での  $\phi$  中間子の質量

$$\Gamma(|\vec{r}_{\phi}|) = \Gamma_{\text{full}} + \beta \rho(|\vec{r}_{\phi}|) \sigma_{\phi N}$$



# 5, Invariant mass of $e^+e^-$ pair

- Input data

proton-distortion:  $\sigma_{iN} = \frac{1}{2}\{(\sigma_{pp}^{\text{tot}} - \sigma_{pp}^{\text{ela}}) + (\sigma_{pn}^{\text{tot}} - \sigma_{pn}^{\text{ela}})\}$

$= 29.52 \text{ [mb]}$

TABLE IV Compilation of experimental results on the in-medium mass and width of the  $\rho$ ,  $\omega$  and  $\phi$  mesons produced with elementary reactions, measured in different experiments. This is based on and updating the table prepared by Metag (2008a)

	Invariant mass		Attenuation	
	E325 @ KEK	CLAS g7 @ Jlab	CBELSA/TAPS	LEPS @ SPring-8
Reaction	pA 12 GeV	$\gamma A$ 0.6 – 3.8 GeV	$\gamma A$ 0.7 – 2.5 GeV	$\gamma A$ 1.5 – 2.5 GeV
Momentum	$p > 0.5 \text{ GeV}/c$	$p > 0.8 \text{ GeV}/c$	$p < 0.5 \text{ GeV}/c$	$1.1 < p < 2.2 \text{ GeV}/c$
$\rho$	$\uparrow$ $\Delta m(\rho_0)/m = -9\%$	$\Delta m \approx 0$ some broadening	–	–
$\omega$	$\downarrow$ no broadening	–	$\Delta m(\rho_0)/m = -14\%^{\dagger}$	$\Gamma_{\omega}(\rho_0)=130\text{-}150 \text{ MeV}/c^2$ $\rightarrow \sigma_{\omega N} \approx 70\text{mb}$
$\phi$	$\Delta m(\rho_0)/m = -3.4\%$ $\Gamma_{\phi}(\rho_0) \approx 15\text{MeV}/c^2$	–	–	$\sigma_{\phi N} = 35\text{mb}$ $\rightarrow \Gamma_{\phi}(\rho_0) \approx 80 \text{ MeV}/c^2$

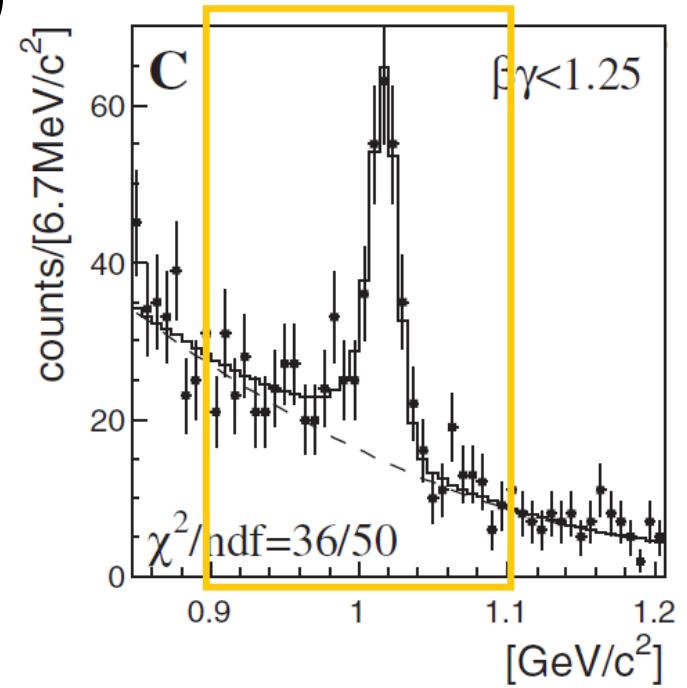
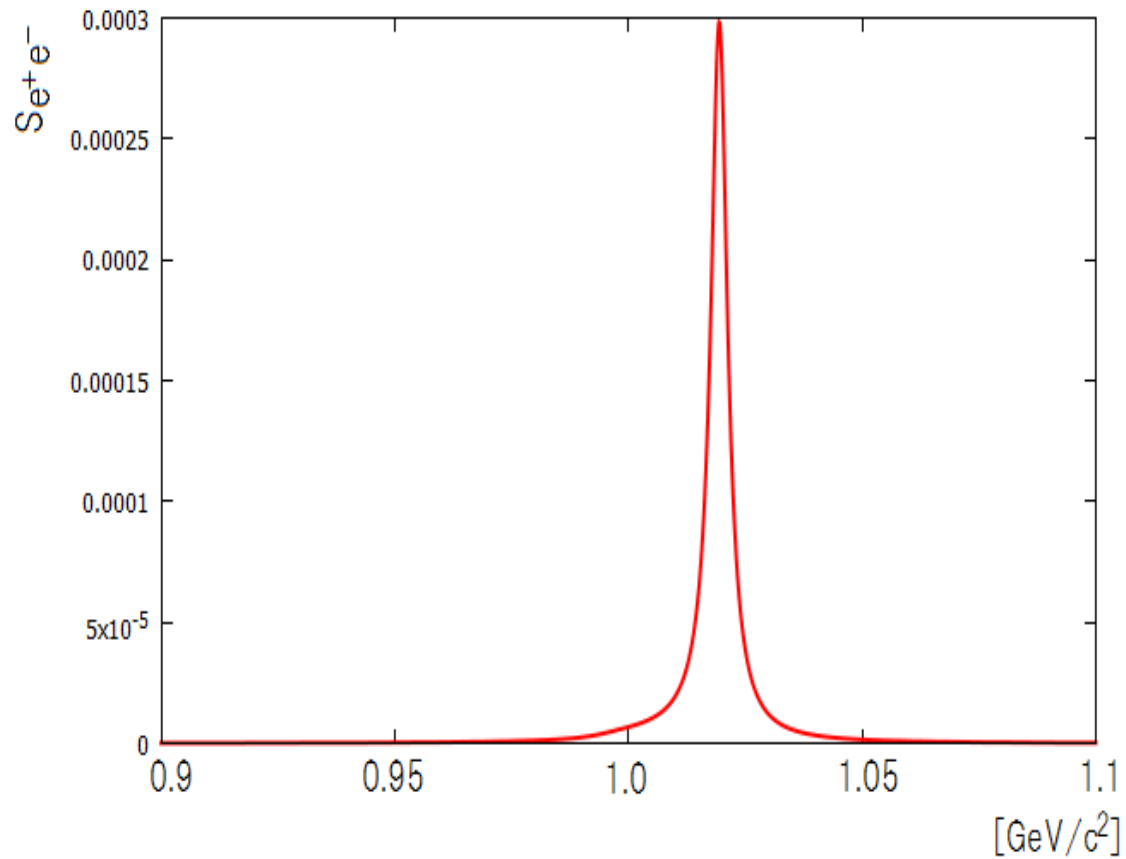
$\dagger$  This may change as a result of the ongoing reanalysis (Metag, 2008b).

-Ryugo. S. Hayano and Tetsuo Hatsuda: Hadron properties in the nuclear medium  
Rev. Mod. Phys. 82 (2010) 2949-2990

$$\Gamma_{\phi}(\rho_0) = \Gamma_{\text{full}} + \beta \rho_0 \sigma_{\phi N}$$

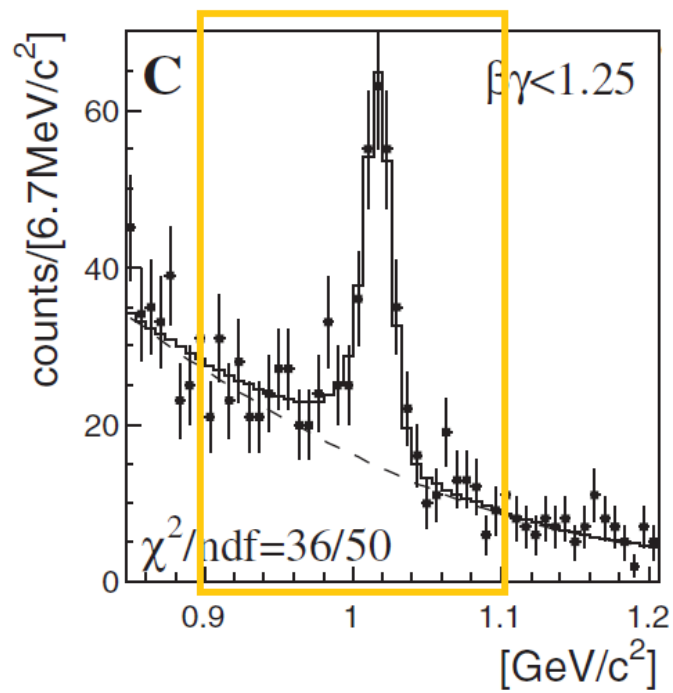
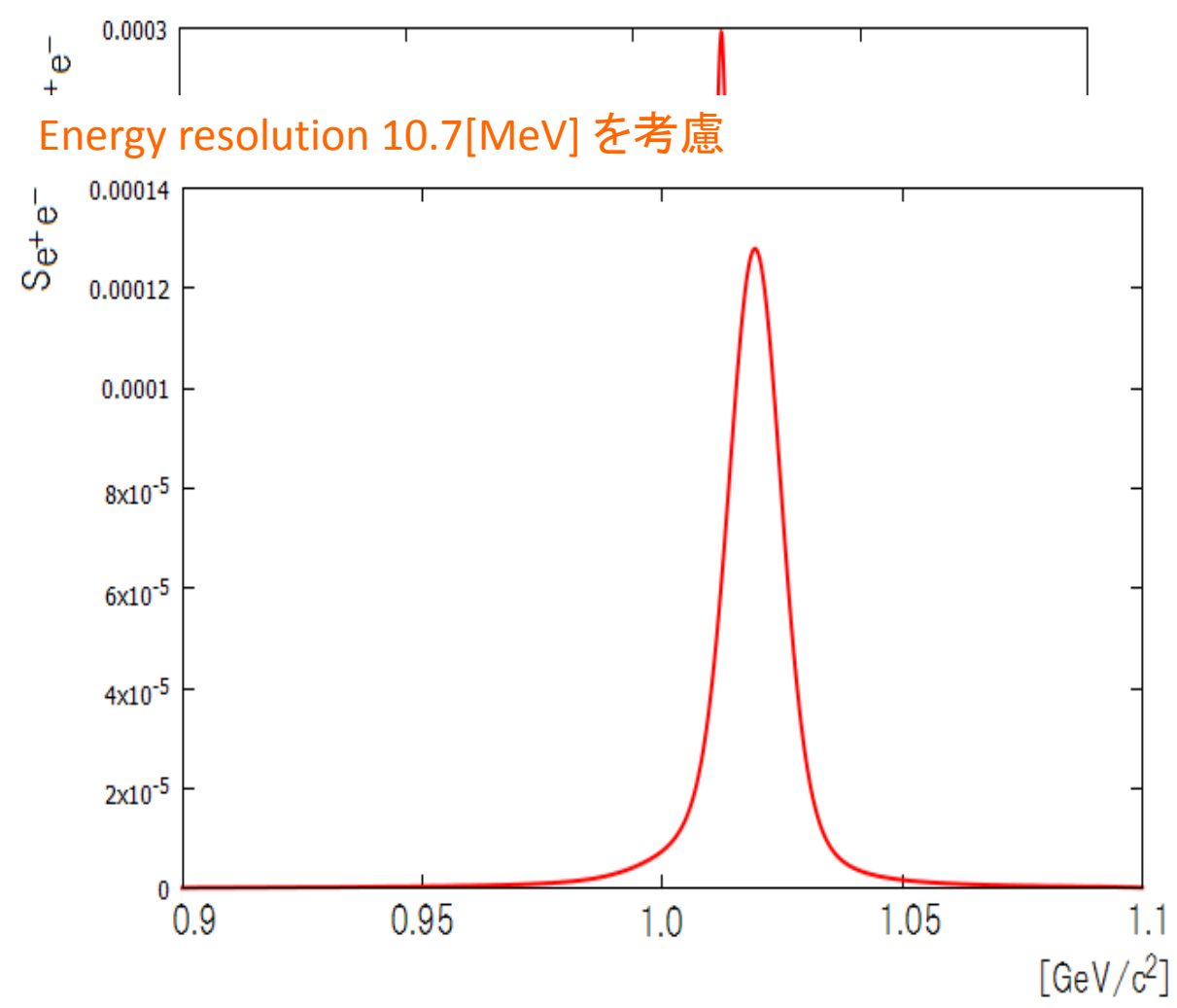
$$\left( \begin{array}{l} \beta \gamma = 1.0 \\ \rho_0 = 0.17 [\text{fm}^{-3}] \end{array} \right. \rightarrow \left. \begin{array}{l} \sigma_{\phi N} \simeq 4.7 [\text{mb}] \\ c = 0.034 \end{array} \right)$$

✓ proton-induced, target:  $^{12}\text{C}$  ,  $\beta\gamma=1.0$  (KEK E325)



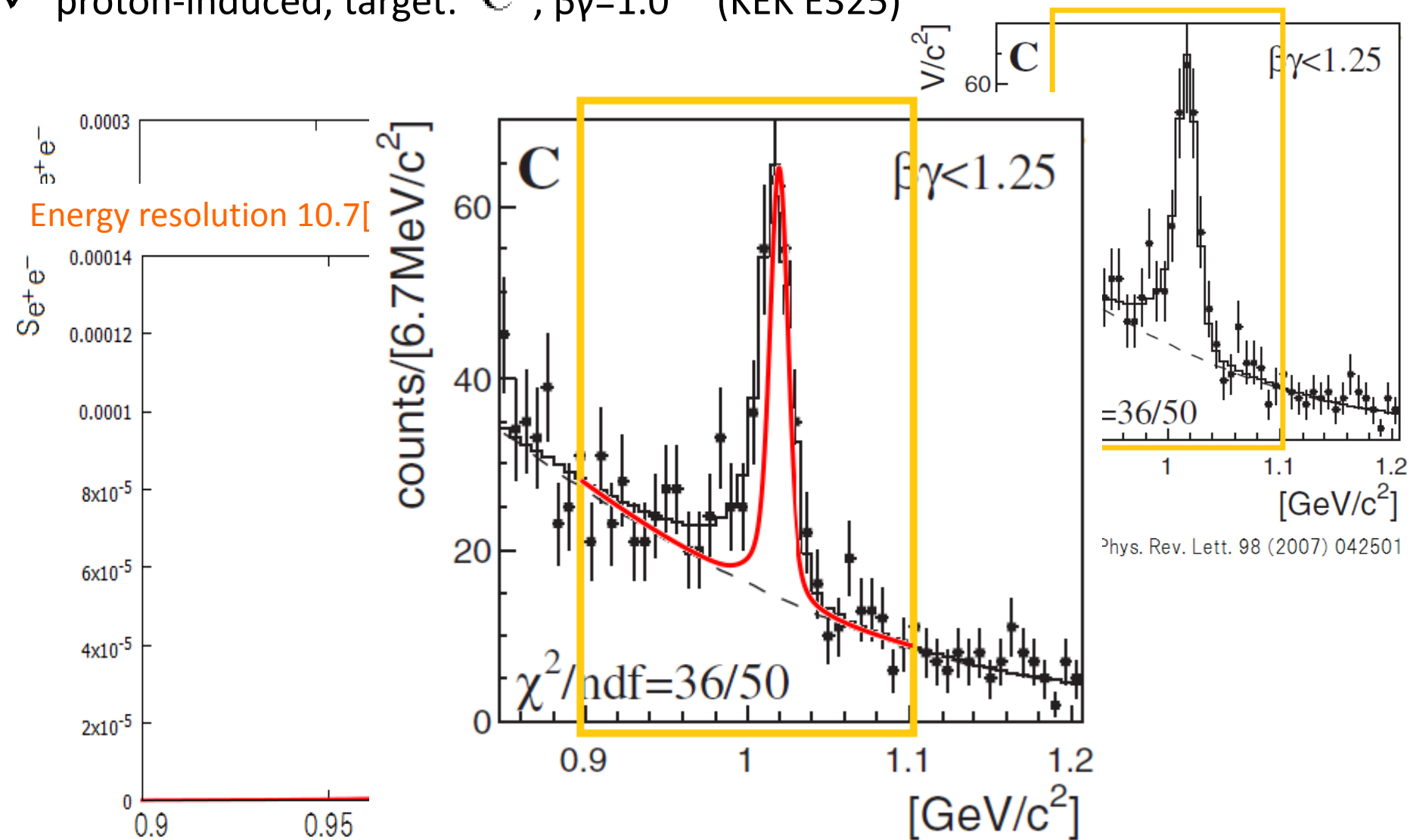
– R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

✓ proton-induced, target:  $^{12}\text{C}$  ,  $\beta\gamma=1.0$  (KEK E325)



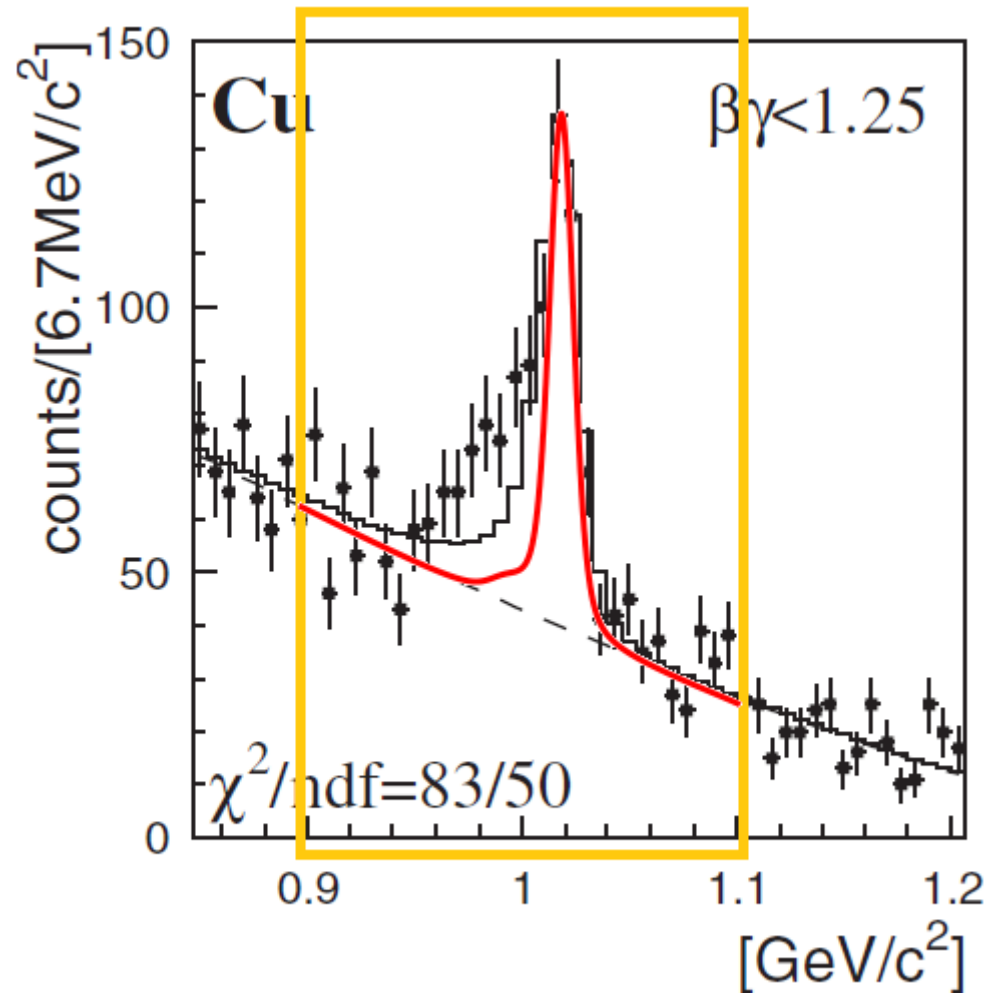
– R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

✓ proton-induced, target:  $^{12}\text{C}$  ,  $\beta\gamma=1.0$  (KEK E325)



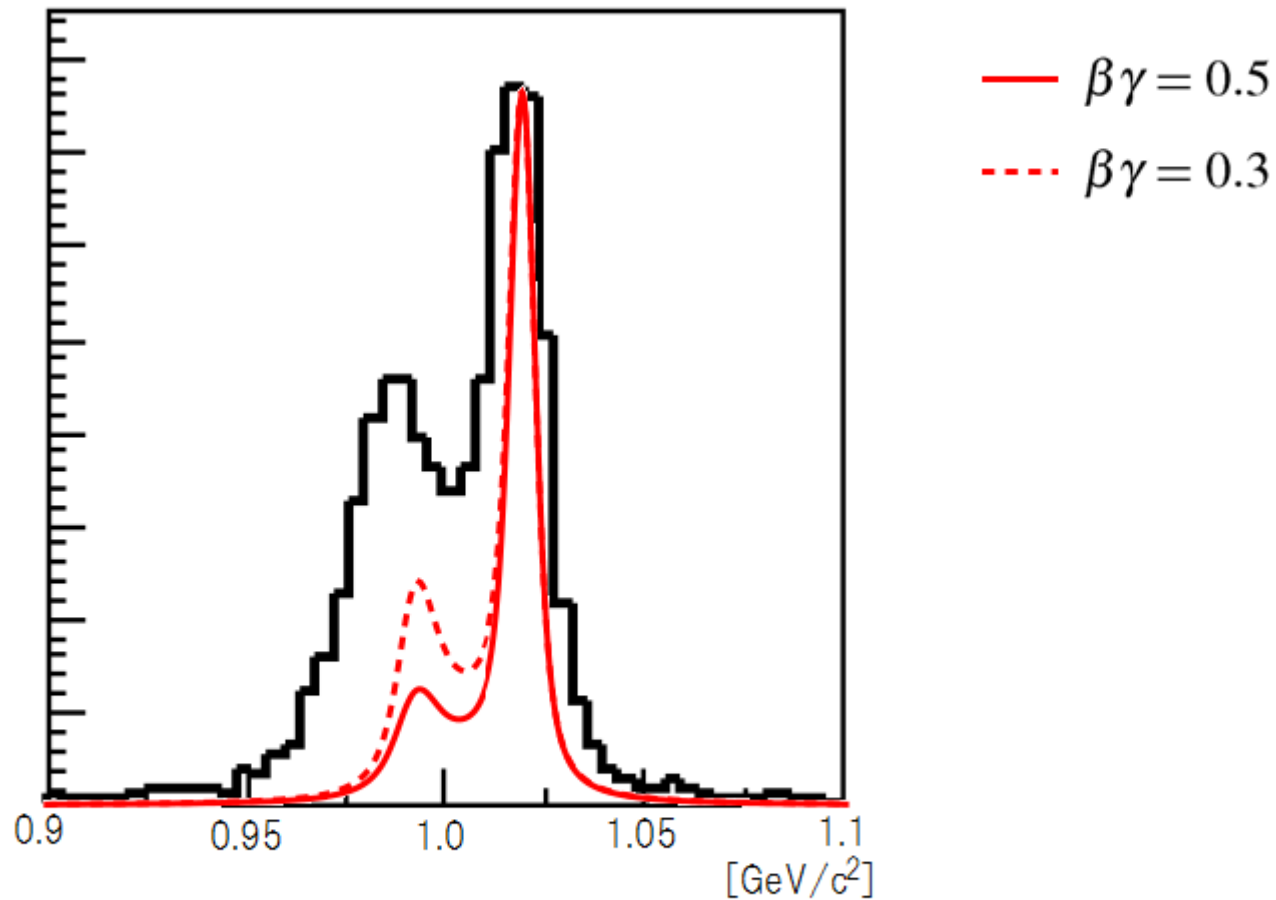
-R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

✓ proton-induced, target:  $^{64}\text{Cu}$ ,  $\beta\gamma=1.0$  (KEK E325) \* Energy resolution 10.7 [MeV]



-R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

- ✓ proton-induced, target:  $^{208}\text{Pb}$ ,  $\beta\gamma \leq 0.5$  (J-PARC E16 のケースを想定)  
\* Energy resolution 5 [MeV]



-S. Yokkaichi,  
Workshop and Informal meeting on  
“Hadrons in Nuclear medium” (27<sup>th</sup>, Oct., 2014) slide  
slide No. 26

## 6, Results with a theoretical $\text{Im}\Pi_\phi$

- D. Cabrera and M. J. Vicente Vacas Phys. Rev. C 67 (2003) 045203
- D. Cabrera, et al., Nucl. Phys. A 733 (2004) 130-141

理論的なself energy,  $\Pi_\phi$  の導入

$$\sigma_{\phi N} \rho(|\vec{r}_\phi|) \rightarrow - \frac{\text{Im}\Pi_\phi(\rho(|\vec{r}_\phi|))}{|\vec{p}_\phi|}$$

### 1. $\phi$ -N interaction の項

$$\exp \left[ -\sigma_{\phi N} \int_0^\infty d\ell' \rho(|\vec{r}_{pp} + \ell' \cdot \hat{p}_\phi|) \right]$$

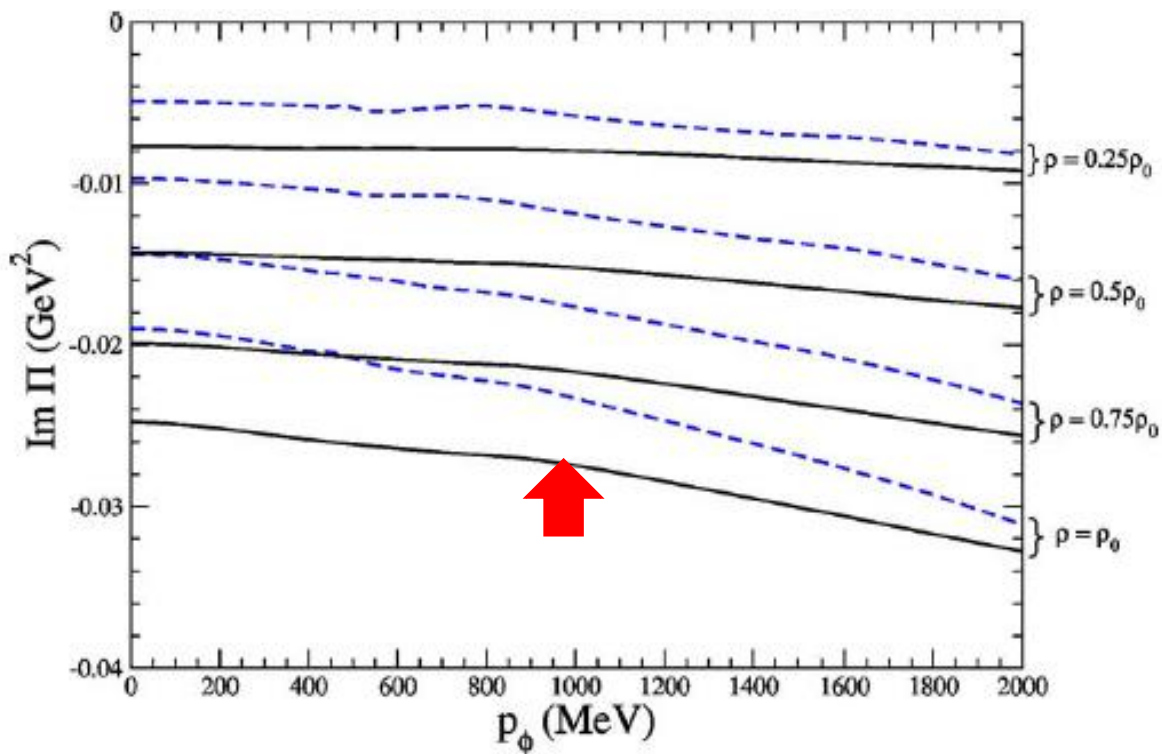


$$\exp \left[ \int_0^\infty d\ell' \frac{1}{|\vec{p}_\phi|} \text{Im}\Pi_\phi(\rho(|\vec{r}_{pp} + \ell' \cdot \hat{p}_\phi|, P^0, |\vec{p}_\phi|)) \right]$$

### 2. Invariant mass 分布の幅

$$\Gamma(|\vec{r}_\phi|) = \Gamma_{\text{full}} + \beta \rho(|\vec{r}_\phi|) \sigma_{\phi N} \quad \Rightarrow \quad \Gamma = \Gamma_{\text{full}} - \frac{\text{Im}\Pi_\phi(\rho(|\vec{r}_\phi|))}{E_\phi}$$

## $\text{Im}\Pi_\phi$ の振る舞い

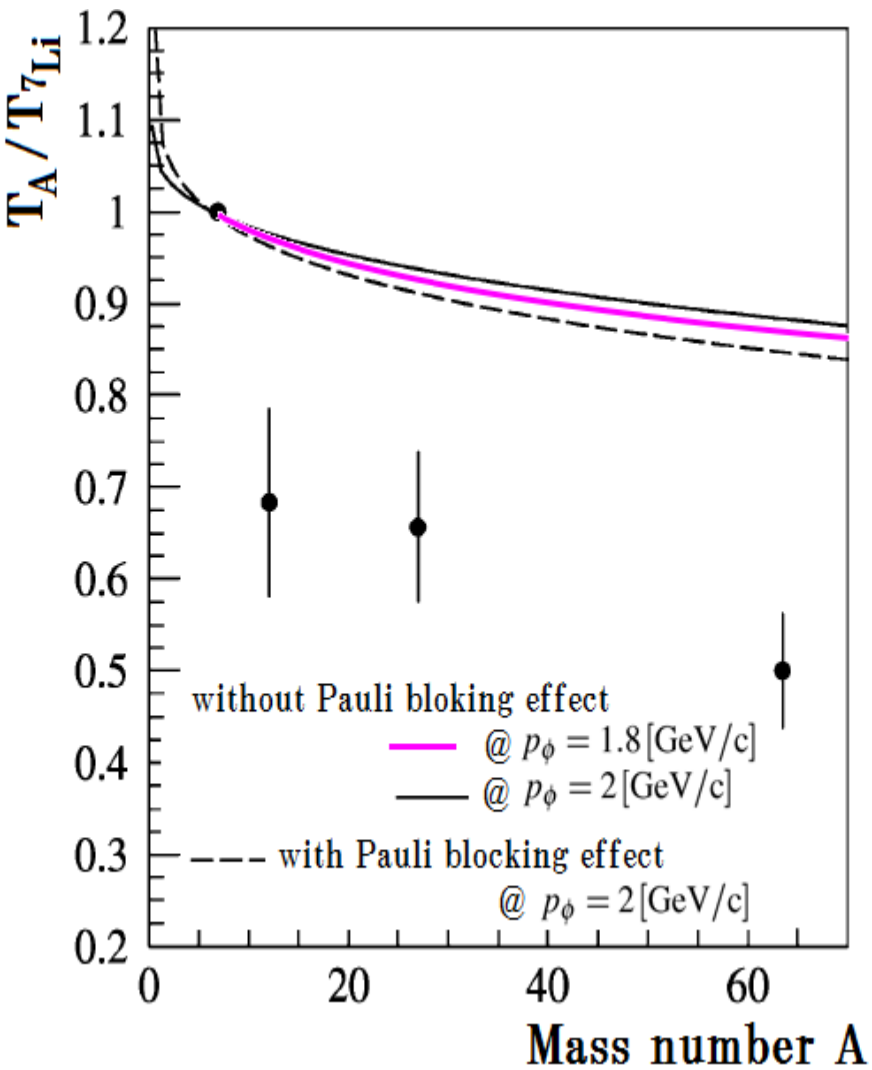


D. Cabrera, et al., Nucl. Phys. A 733 (2004) 130-141, Fig.4

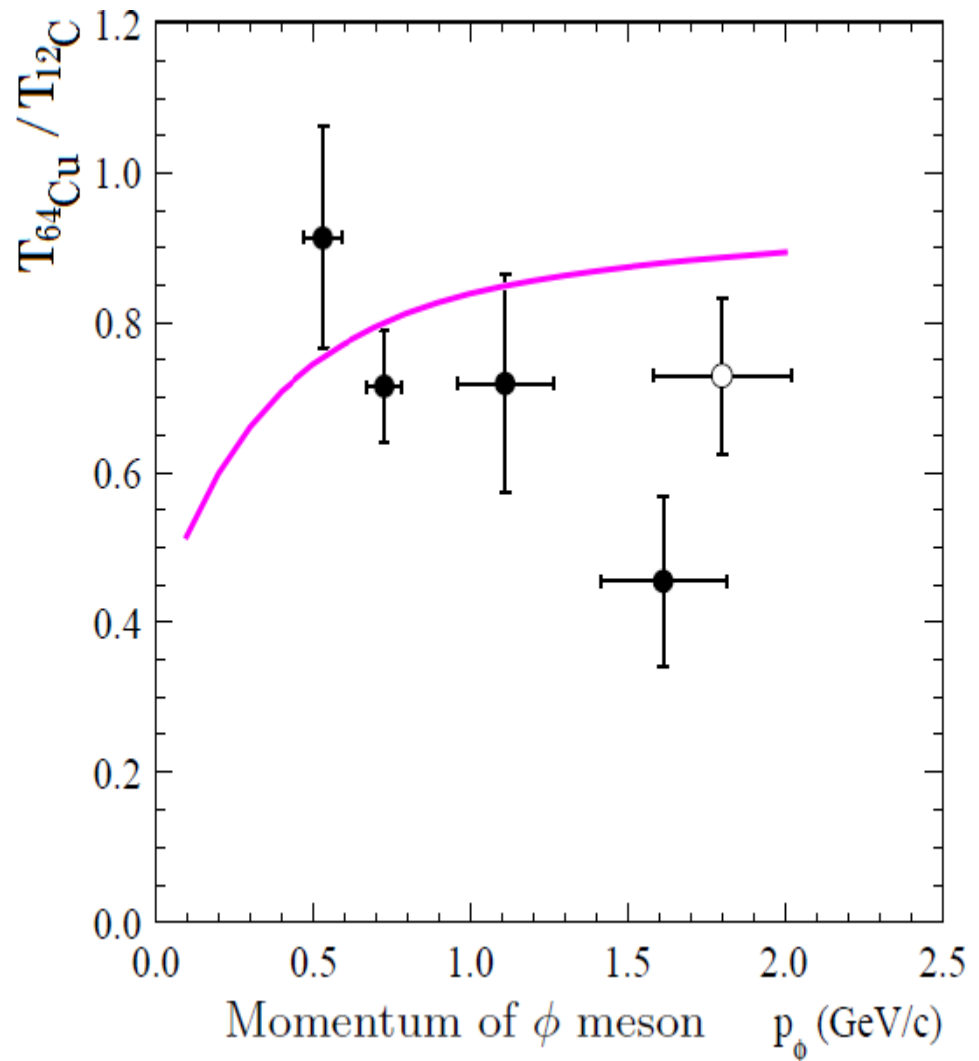
- $\Pi_\phi$  は  $|\vec{p}_\phi|, \rho, P_\phi^0$  依存性を持つ
- 今回の計算は論文の図から値を読み取った、近似的な  $\Pi_\phi$  を使用
- $\text{Re}\Pi_\phi$  は使用しない (mass shift はパラメータで扱う)
- 今後プログラムに  $\Pi_\phi$  を組み込む予定
- 近く理論模型の改良も予定されている



# 6-1, Transparency ratio ( $\gamma$ -induced: $\sigma_{\gamma N} = 0.14[\text{mb}]$ )



-T. Ishikawa et al., Phys. Lett. B 608 (2005) 215-222

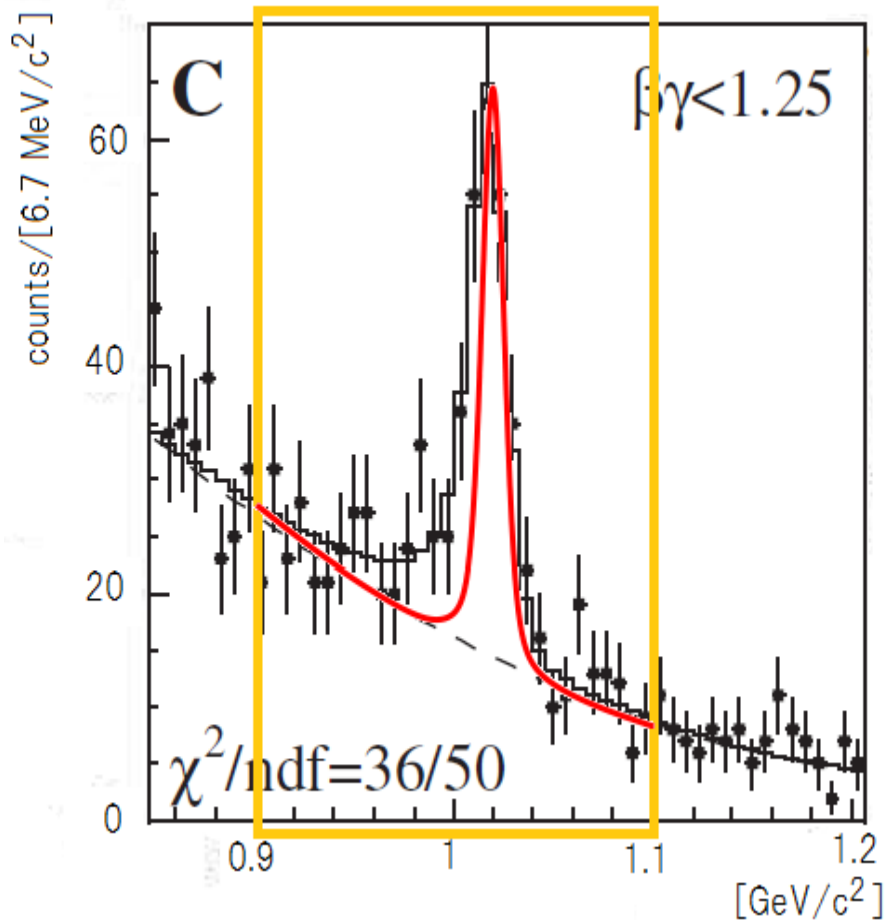


-T. Sawada, Doctor Thesis, Osaka Univ. (2013)

# 6-2, Invariant mass of $e^+e^-$ pair

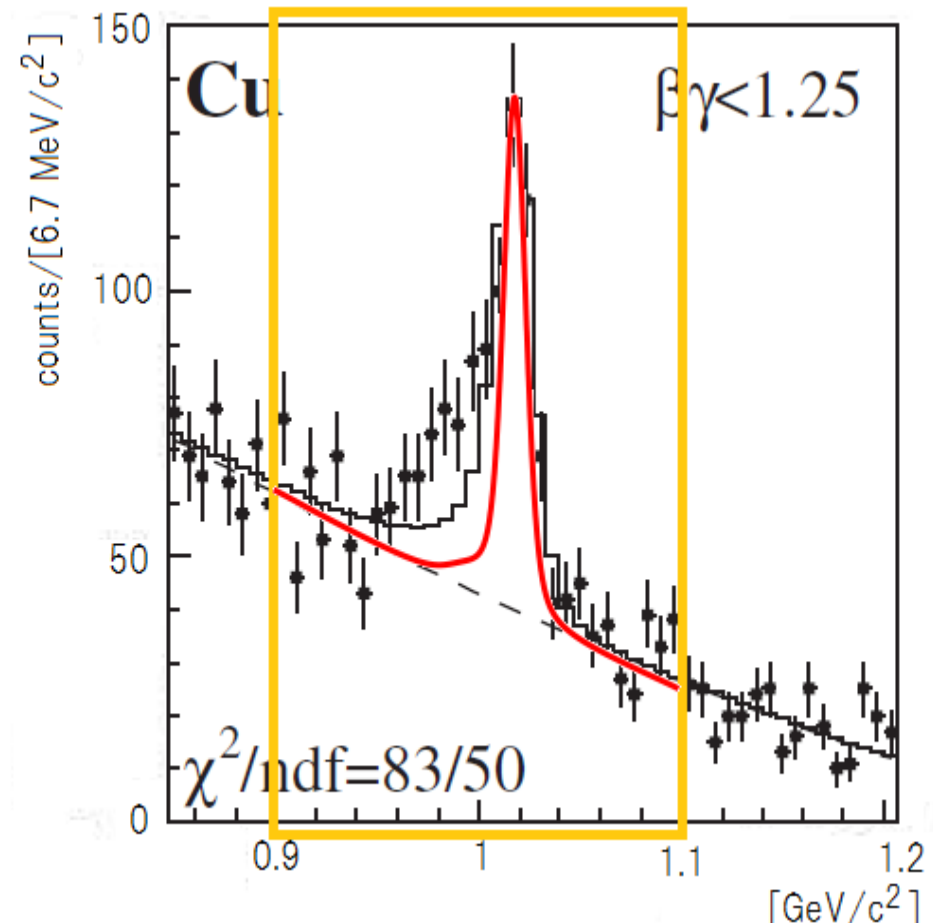
(mass shift: 3.4%, proton-induced:  $\sigma_{pN} = 29.52[\text{mb}]$ )

target:  $^{12}\text{C}$   $\beta\gamma = 1$



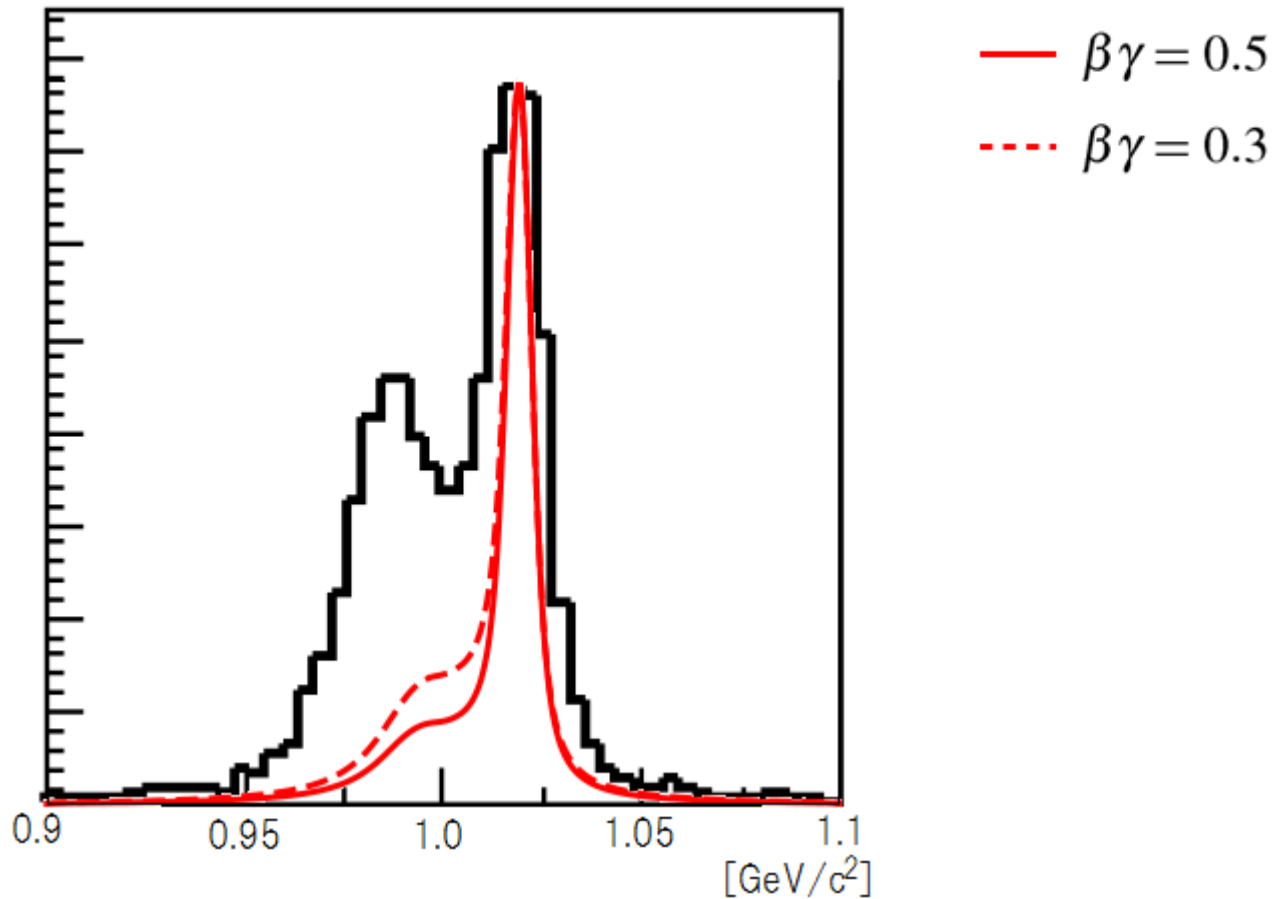
-R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

target:  $^{64}\text{Cu}$   $\beta\gamma = 1$



-R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

target:  $^{208}\text{Pb}$



-S. Yokkaichi,  
Workshop and Informal meeting on  
“Hadrons in Nuclear medium” (27<sup>th</sup>, Oct., 2014) slide  
slide No. 26

Im $\Pi_\phi$ を大きくする → 核外に到達する中間子数が減少  
 → 相対的に核内崩壊の寄与が強調される  
 可能性の検証

試験的に  $\begin{cases} \text{Im}\Pi_\phi \times 4.3 \\ \text{Im}\Pi_\phi \times 10 \end{cases}$  を用いる

$$\Gamma(\rho_0) = \Gamma_{\text{full}} - \frac{\text{Im}\Pi_\phi(\rho_0)}{E_\phi} = \Gamma_{\text{full}} + \beta\rho_0\sigma_{\phi N}$$

$$\rightarrow \sigma_{\phi N} \simeq 8.1[\text{mb}] @ \beta\gamma = 1.0$$

TABLE IV Compilation of experimental results on the in-medium mass and width of the  $\rho$ ,  $\omega$  and  $\phi$  mesons produced with elementary reactions, measured in different experiments. This is based on and updating the table prepared by Metag (2008a)

	Invariant mass		Attenuation	
	E325 @ KEK	CLAS g7 @ Jlab		Pring-8
Reaction	pA 12 GeV	$\gamma A$ 0.6 – 3.8 GeV		2.5 GeV
Momentum	$p > 0.5 \text{ GeV}/c$	$p > 0.8 \text{ GeV}/c$	$p < 0.5 \text{ GeV}/c$	2 GeV/c
$\rho$	$\uparrow$ $\Delta m(\rho_0)/m = -9\%$	$\Delta m \approx 0$ some broadening	–	
$\omega$	$\downarrow$ no broadening	–	$\Delta m(\rho_0)/m = -14\%^\dagger$	
$\phi$	$\Delta m(\rho_0)/m = -3.4\%$ $\Gamma_\phi(\rho_0) \approx 15 \text{ MeV}/c^2$	–	–	

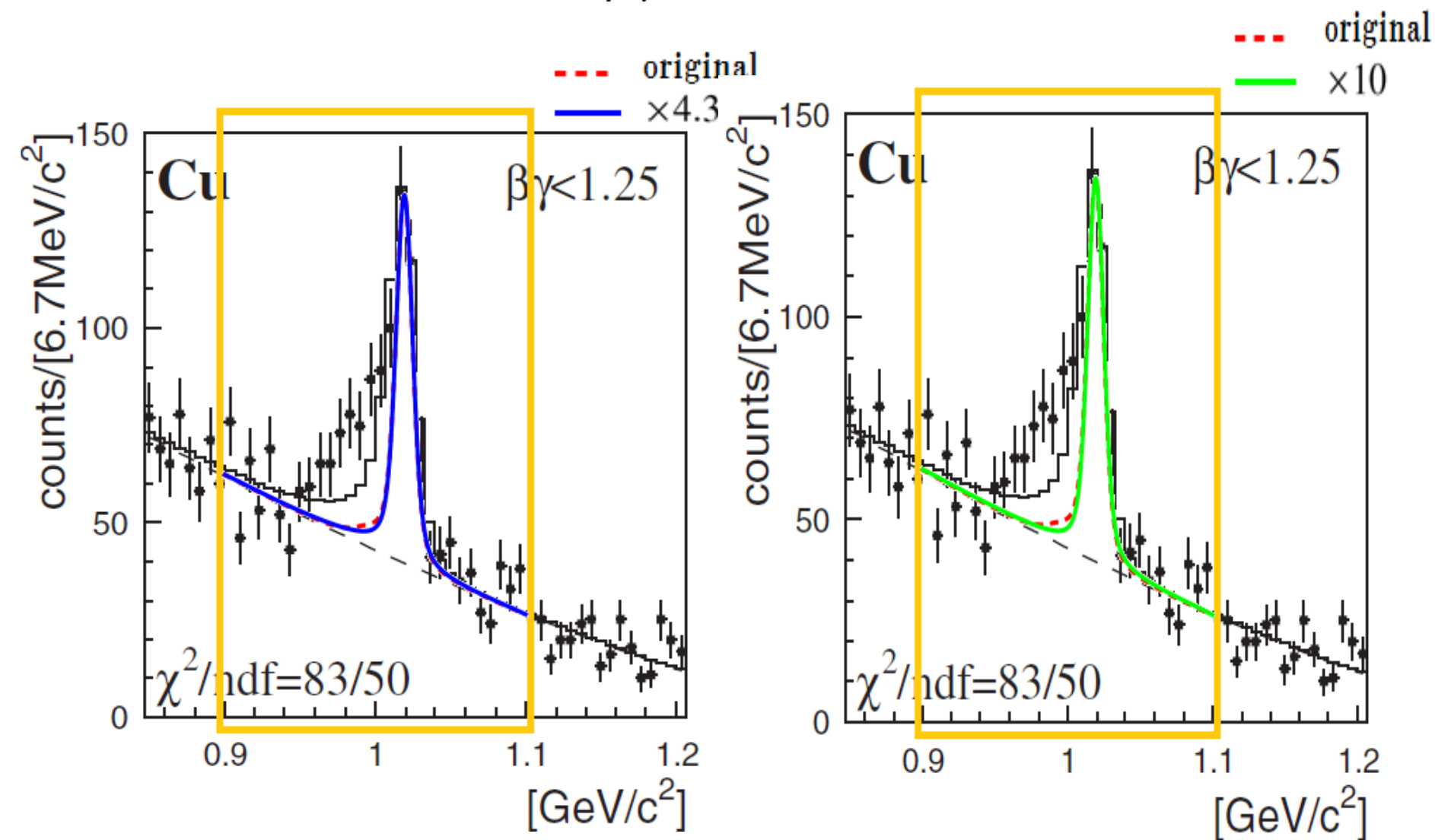
$\sigma_{\phi N} = 35 [\text{mb}]$   
 $\rightarrow \Gamma_\phi(\rho_0) \approx 80 [\text{MeV}/c^2]$

$\Gamma_\omega(\rho_0) = 130\text{--}150 \text{ MeV}/c^2$   
 $\rightarrow \sigma_{\omega N} \approx 70 \text{ mb}$

$\sigma_{\phi N} = 35 \text{ mb}$   
 $\rightarrow \Gamma_\phi(\rho_0) \approx 80 \text{ MeV}/c^2$

$^\dagger$  This may change as a result of the ongoing reanalysis (Metag, 2008b).

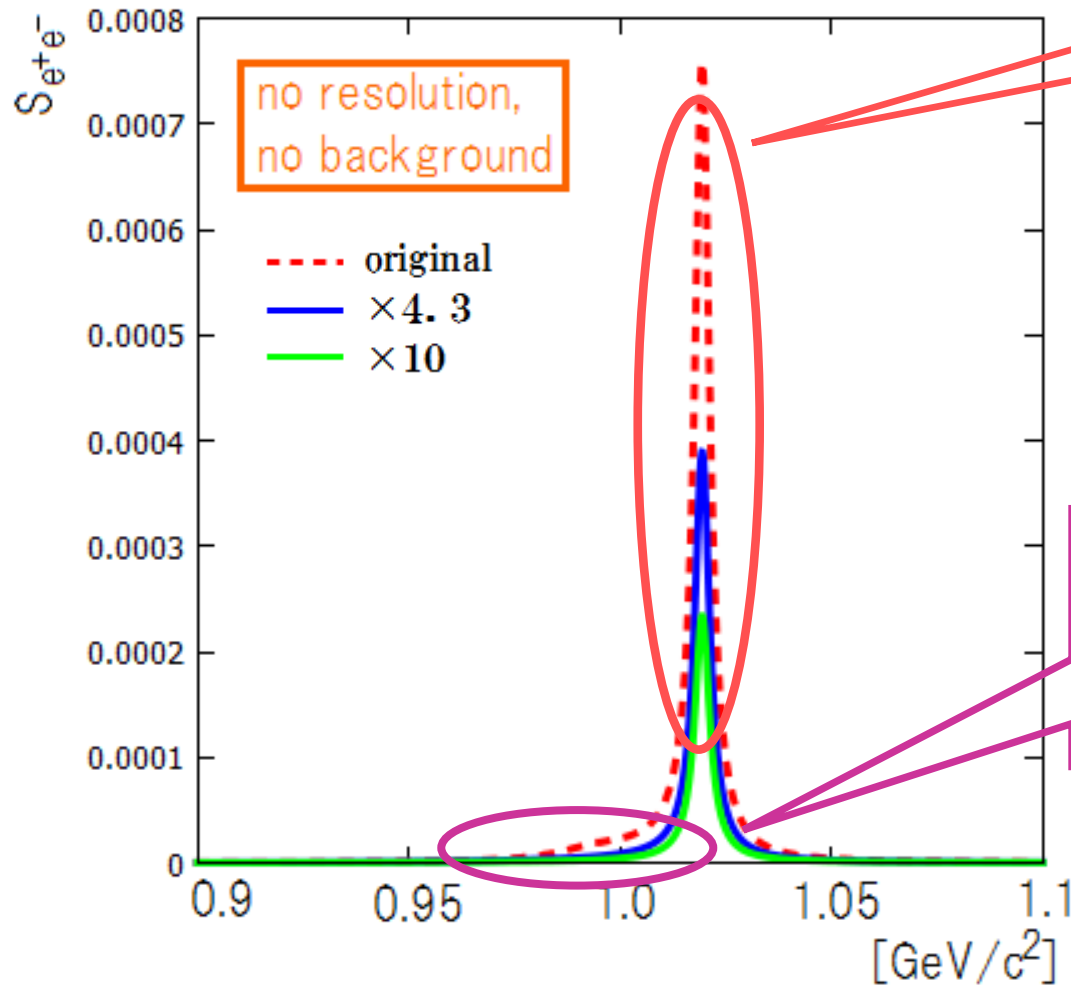
Sample Case... target:  $^{64}\text{Cu}$   $\beta\gamma = 1$



-R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

-R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501

$\text{Im}\Pi_\phi$  を大きくすると...



核外崩壊のピークは小さくなる

$$\Gamma(\rho) = \Gamma_{\text{full}} - \frac{\text{Im}\Pi_\phi(\rho)}{E_\phi}$$

→ 核内での幅が広がる

Invariant mass 分布に2つの効果を及ぼす

→ 一概に核内崩壊の寄与が大きく見えるとは言えない

# 7, まとめ

## 動機

- 原子核媒質中のベクトル中間子の性質変化 = 面白い
  - 複数の実験的な研究が存在
  - 実験結果の統一的な理解が困難な場合が存在

## 今回の研究

- $\phi$  中間子に注目し、既存のデータを統一的に扱うことを目的とした、現象論的な定式化を行った
  - Invariant mass 分布を Transparency ratio と同様に計算  
KEK E325 と LEPS/SPring-8 の実験結果に対応した計算、  
振る舞いを比較
- $\phi$  中間子の理論的なself energy を用いた計算

## 計算結果・考察

✓ Transparency ratio と Invariant mass分布を

各々の実験結果のパラメータで計算

→ Invariant mass分布に関しては、実験から得られたパラメータで  
自身の実験データを再現しない

→ ー現象論的な定式化が単純すぎる？

ーTransparency ratio測定の結果と Invariant mass測定の実験  
結果の単純な比較は困難？



- ✓ 微視的な  $\Pi_\phi$  を用いた計算
  - Transparency ratioもInvariant mass分布も再現することができない
    - ➡ ー使用した  $\Pi_\phi$ ・定式化は十分なものか？
- ✓  $\text{Im}\Pi_\phi$  の変化に対する依存性
  - Transparency ratioは依存性が大きく、Invariant mass分布は小さい
    - ➡ ー  $\text{Im}\Pi_\phi$  のみ変化させて  
Invariant mass分布を再現するのは困難