

# ニュートリノ振動精密測定のための ニュートリノ原子核反応の研究

---

作田 誠 (岡山大学)

平成19年12月15日 @ ICRR

## 1. ニュートリノ原子核反応の現象論的研究

1-1. 準弾性反応

1-2.  $\pi$  生成

1-3. 計算結果

## 2. まとめ

共同研究者: 中畑雅行、小汐夕介、中村博樹(早稲田)、作田誠(岡山)

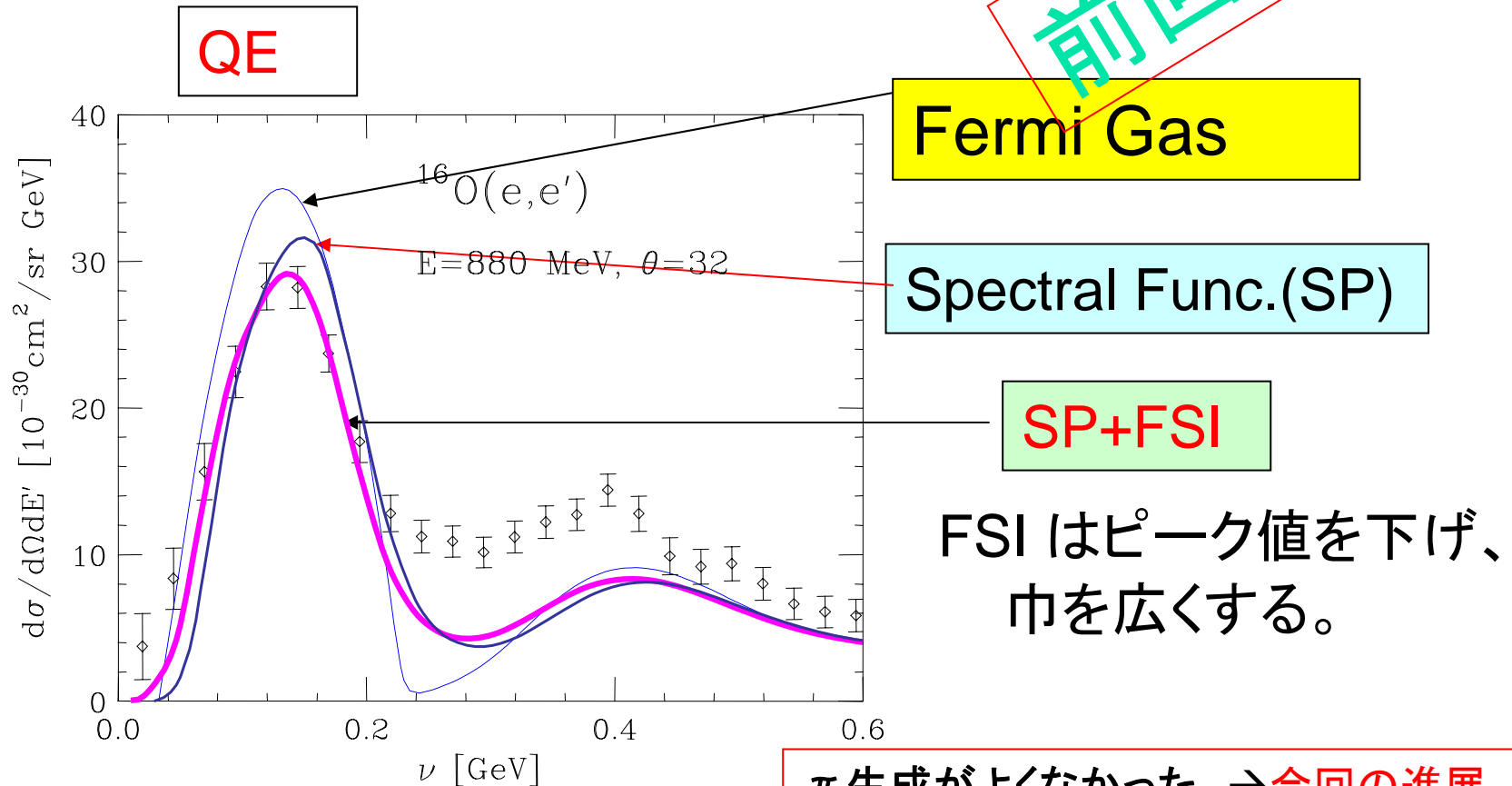
目的: 1) PMTの精密較正、2) ニュートリノ原子核反応の研究

経費: 旅費5万円(岡山一泊予定)

# 準弾性反応 $^{16}\text{O}(e,e')$ $E=880\text{MeV}$ , $32\text{deg}$ .

準弾性反応は良かった。Benhar, MS et al., PRD **72**, 053005 (2005)

前回の発表

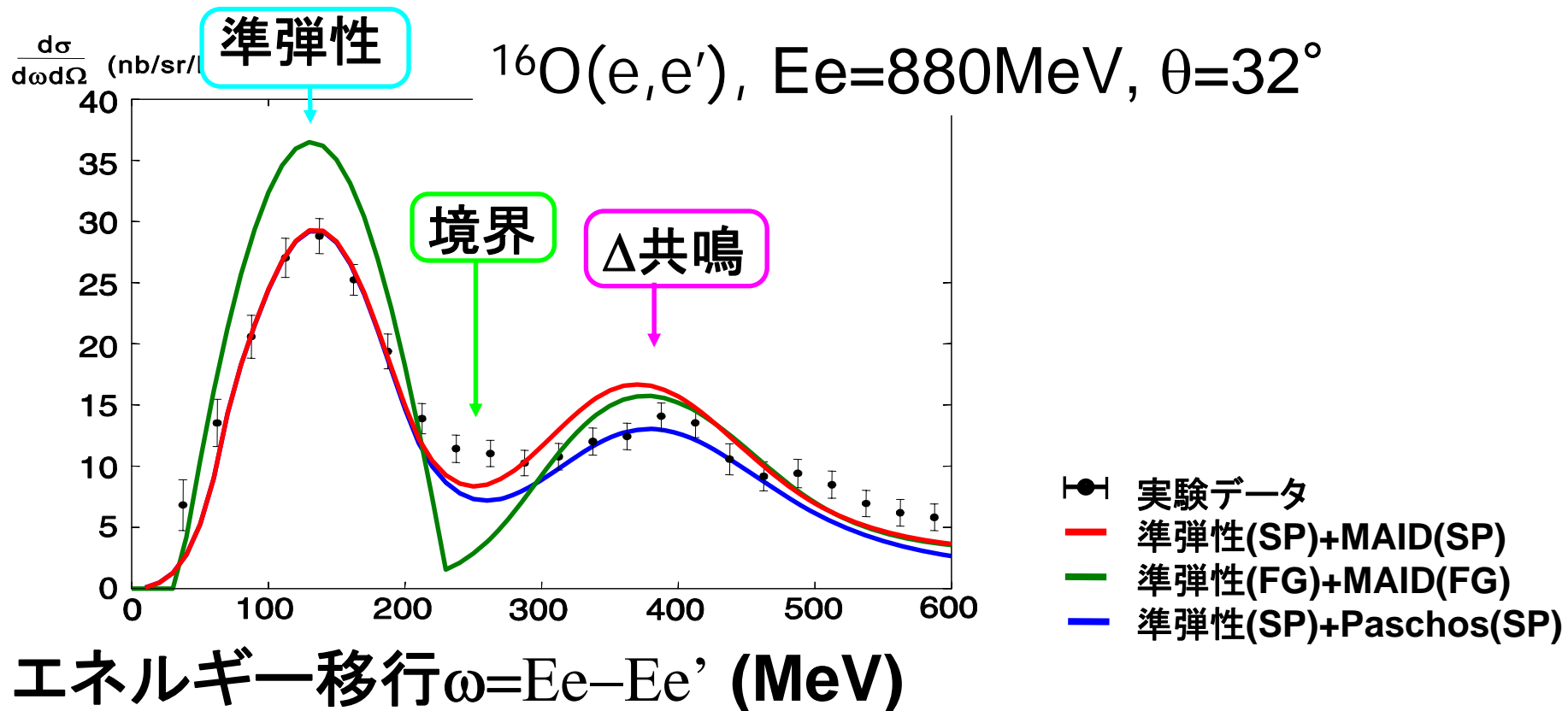


$\pi$  生成がよくなかった。→ 今回の進展。  
Nakamura, Nasu, MS and Benhar,  
[hep-ph/0705.3884](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0705.3884)  
(To appear Phys.Rev.C).

# 1. ニュートリノ原子核反応の現象論的研究

手法: 電子原子核散乱断面積を使う。

単色 $E=880$  MeV のニュートリノを酸素に当てて、 $32^\circ$ のニュートリノのエネルギーを測れるとすると(相対的な大きさを除き)同様なスペクトルが見えるはず。原子核効果を含むVector current 部分の精密なテストが可能。



# ニュートリノ反応の改良モデルのまとめ

## ■ これまで多く使われてきたモデル

準弾性反応 R.Smith and E.Moniz, Nucl.Phys.B43,605,1972.[引用81回]

$\pi$ 生成反応 D.Rein and L.Sehgal, Annals Phys.133, 79,1981.[引用243回]

Schreiner and von Hippel, NPB58,333,1973.[引用93回]

## ■ 最近開発されてきたモデル

### [1]準弾性反応

1) Benhar , Farina , Nakamura , **Sakuda** , and Seki, Phys.Rev.D72:053005, 2005. [引用31回]。

2) Gil, Nieves, and Oset, Nucl.Phys.A627, 543-598,1997. [引用42回];

### [2] $\pi$ 生成反応

1) Sato and Lee, Phys.Rev.C63, 055201, 2001. [引用95回]; Sato, Uno and Lee, Phys.Rev.C67,065201(2003). [引用31回]

2) Paschos, Yu and **Sakuda**, Phys.Rev.D69, 014013,2004. [引用41回]; Lalakulich, Paschos, and Piranishvili, Phys.Rev.D74, 014009 (2006). [引用18回]

3) Drechsel, Hanstein, Kamalov and Tiator, Nucl.Phys.A 645, 145, 1999. [引用240回]

### [3]深非弾性散乱

1) Hirai, Kumano , Miyama, Phys.Rev.D64,034003, 2001. [引用97回]

2) Kulagin and Petti, Nucl. Phys. A765, 126 (2006). [引用29回]

3) Bodek and Yang, Nucl.Phys.Proc.Suppl.112, 70-76,2002. [引用58回]

# 1-1. 準弾性反応

## 原子核効果 -スペクトル関数 $S(p,E)$ と 終状態相互作用-

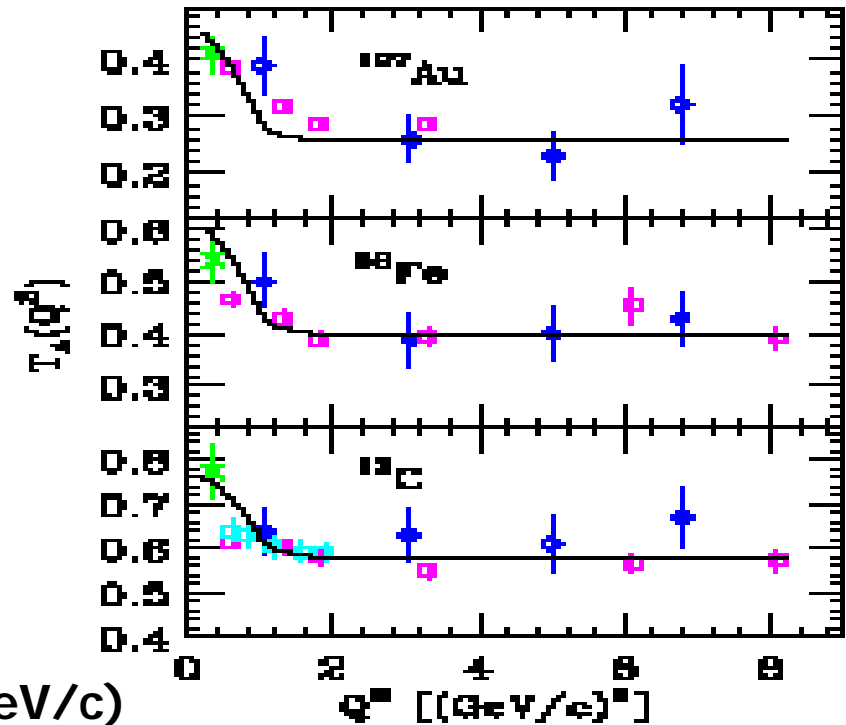
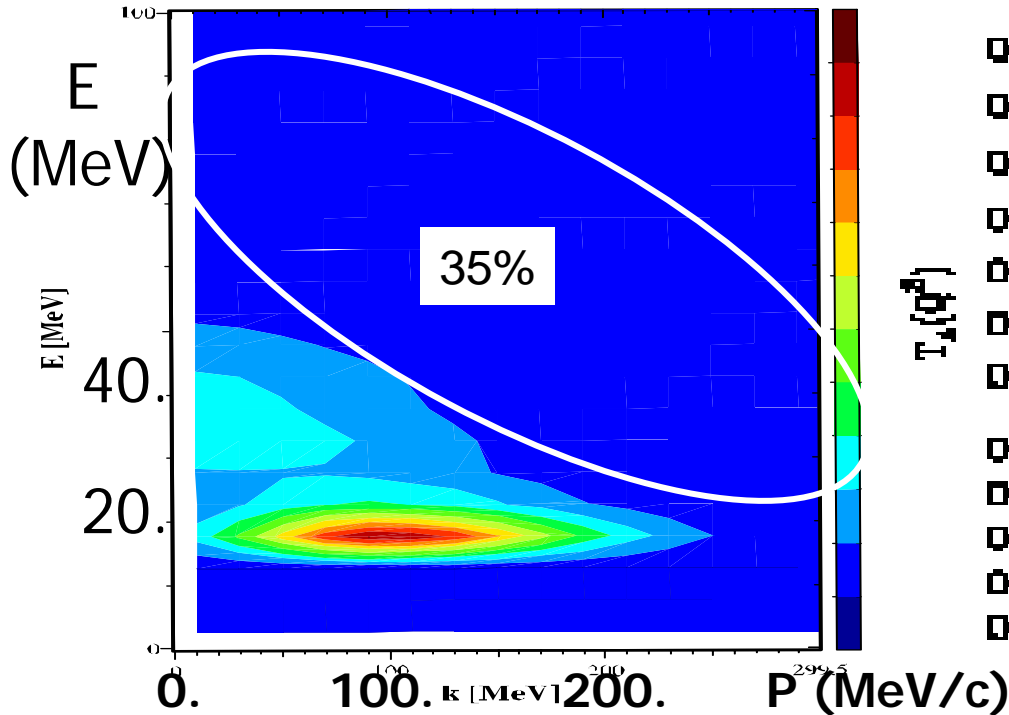
- 1) この反応領域では原子核中の核子の65%のみが殻模型で記述できる状態に居る。
- 2) 終状態相互作用(ReScattering効果)は $A(e,e'p)$ で確かめる。

-D.Rohe et al (JLAB E97-006), PRC72,054602,2005

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_e d\Omega_p dE'_e dE'_p} = K \sigma_{ep} S(E_m, p_m) T_A$$

Transparency  $T(Q^2)$

$S(p,E)$  for  $^{16}\text{O}$   
Spectral Function,  $P(k,E)$ , of O



## 1-2. $\pi$ 生成モデルのチェック

---

(1) まず、原子核効果のない水素標的  $ep \rightarrow eX$  データを使い、 $\pi$  生成がどれだけ理解しているかを調べる。

(2) 原子核効果のある  $eO \rightarrow eX$  ではどうか。

- 1) 準弾性反応の高運動量の核子の寄与はどうか。
- 2)  $\Delta$  と非共鳴反応 (ボルン項) はそれぞれどれだけか

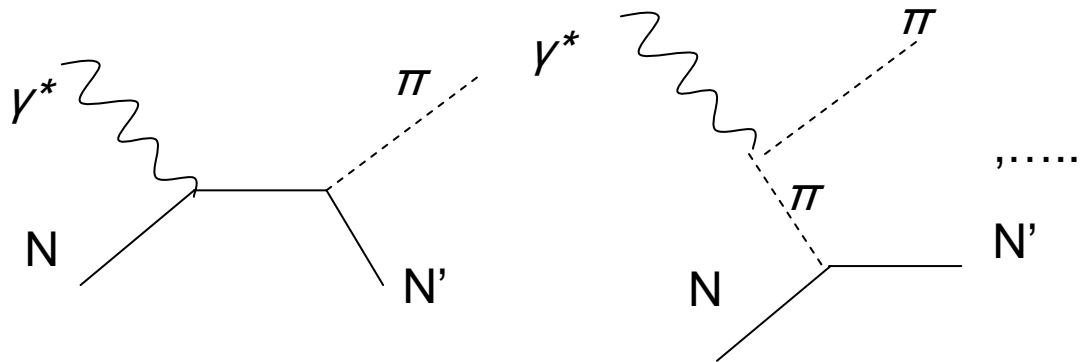
# MAID2003モデルとPaschos モデルを使う。

<http://www.kph.uni-mainz.de/MAID/maid2003/>

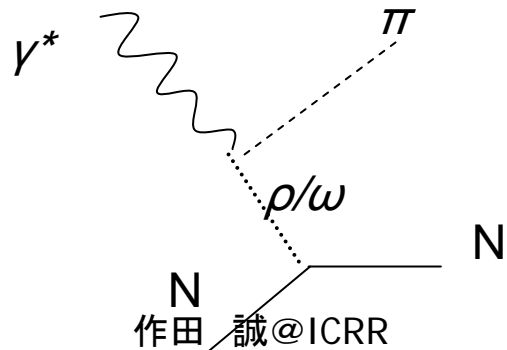
## ■ Resonances: P33(1232)

P11(1440) D13(1520) S11(1535)  
S31(1620) S11(1650)  
D15(1675) F15(1680) D33(1700)  
P13(1720) F35(1905) P31(1910)  
F37(1950)

## ■ Born terms:



## ■ $\rho/\omega$ Exchange



# 1-3. 計算結果

## H(e,e'): $\pi$ 生成での電子エネルギー分布

1) MAIDデータ (赤) はデータ (黒)と良く合う。

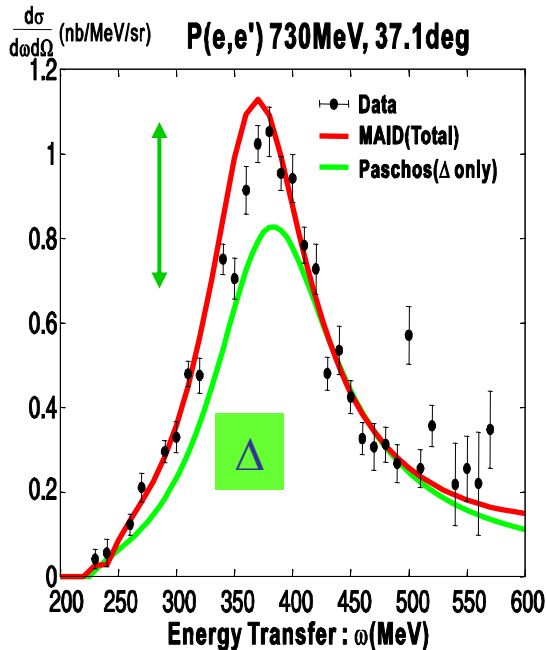
多少overestimates 気味(5%)

2)  $\Delta$  only では(緑) データを説明できない。非共鳴反応が寄与している↑(赤-緑)。 $\rho/\omega$  の寄与は小さい。

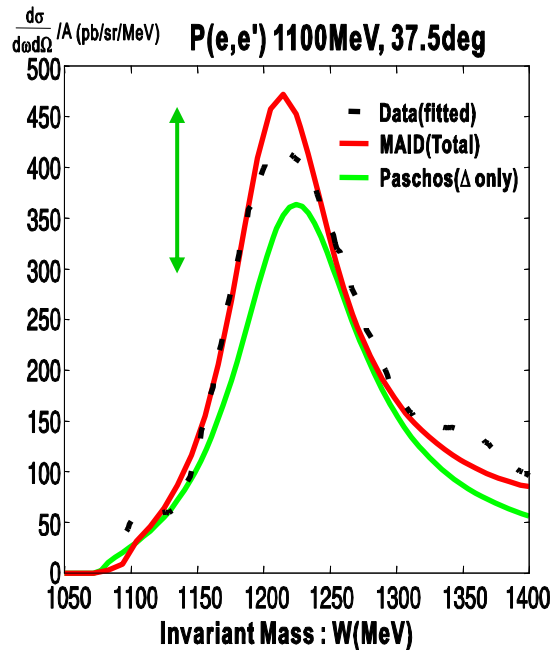
730MeV, 37.1° ,

1100MeV, 37.5° ,

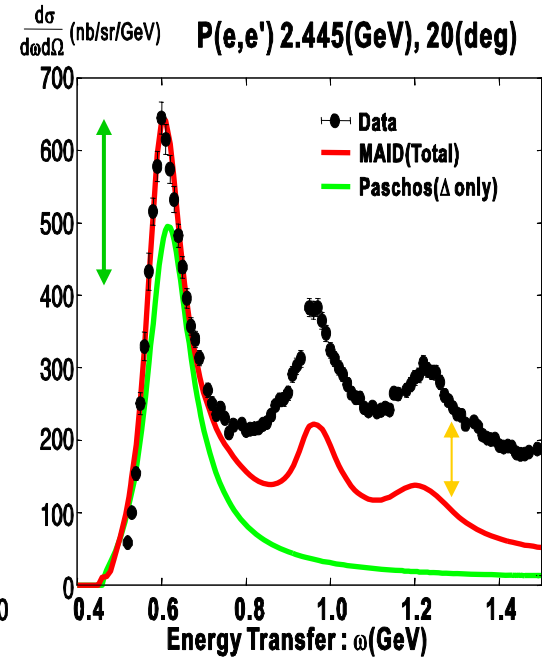
2445MeV, 20°



15 Dec, 2007



作田 誠@ICRR



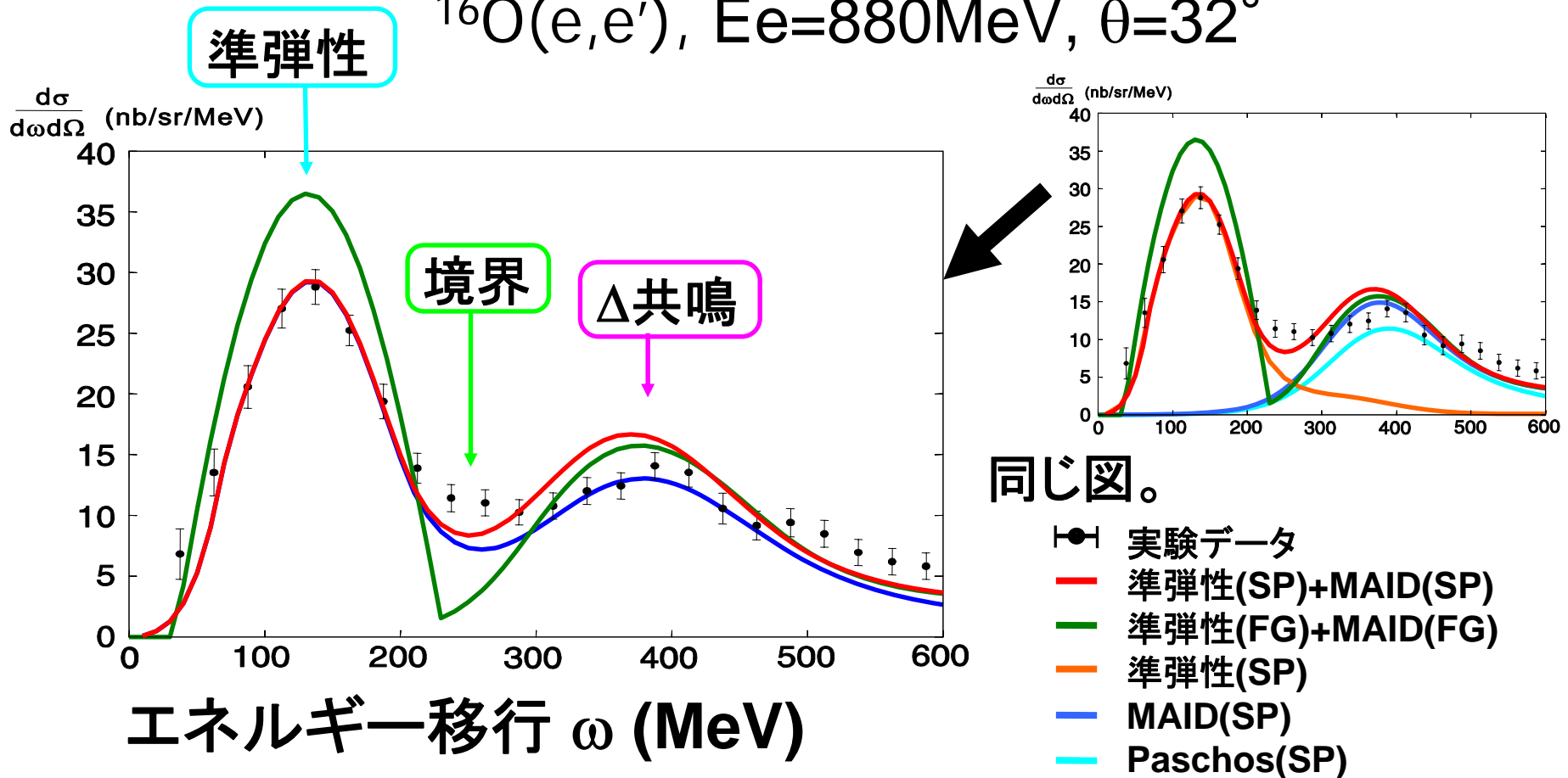
DIS



# 電子原子核散乱断面積の計算結果

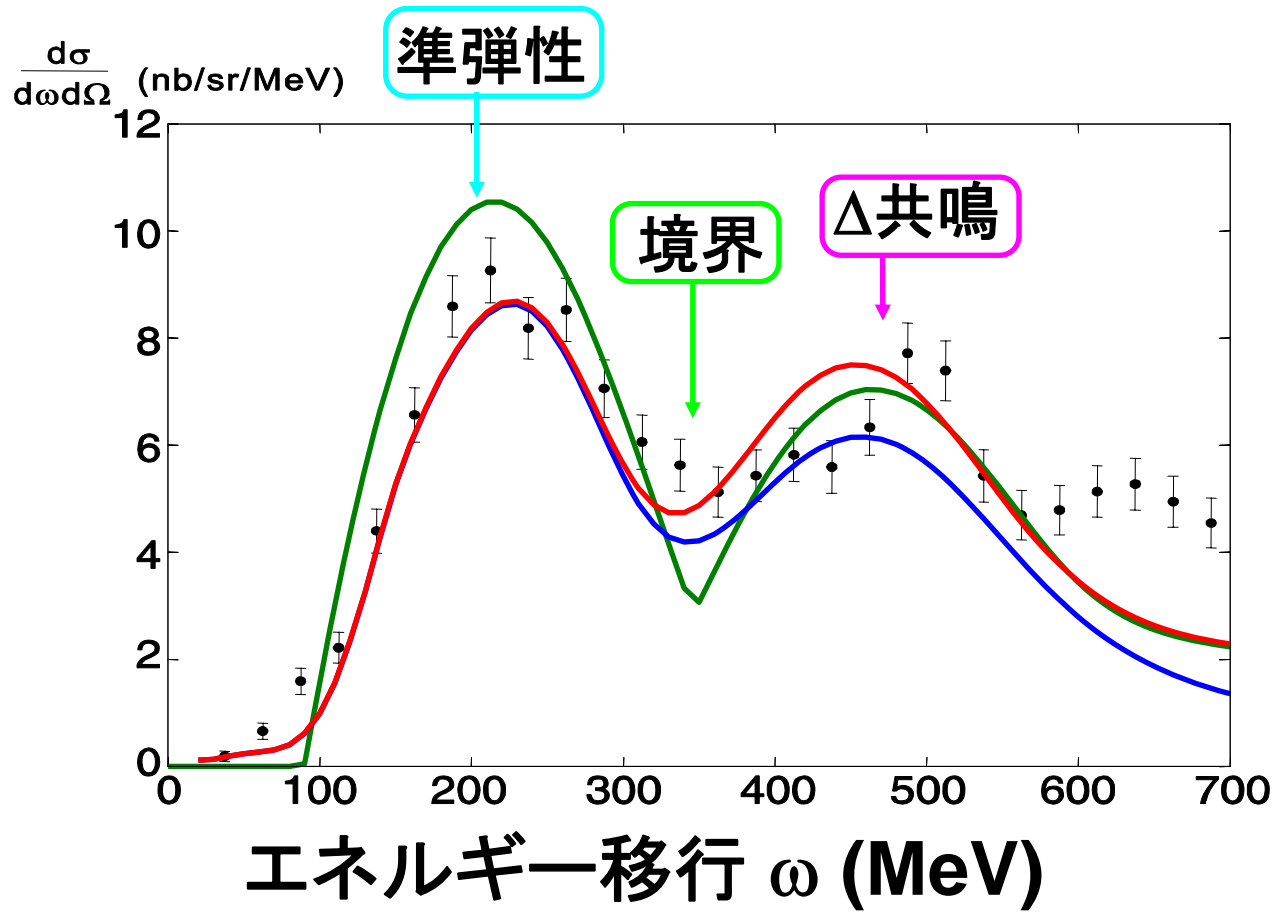
フェルミガス模型は準弾性散乱のピークも合わず、境界領域も合わないが、スペクトル関数では準弾性散乱のピーク、境界領域、共鳴領域も合っている。

$^{16}\text{O}(e, e'), E_e=880\text{MeV}, \theta=32^\circ$



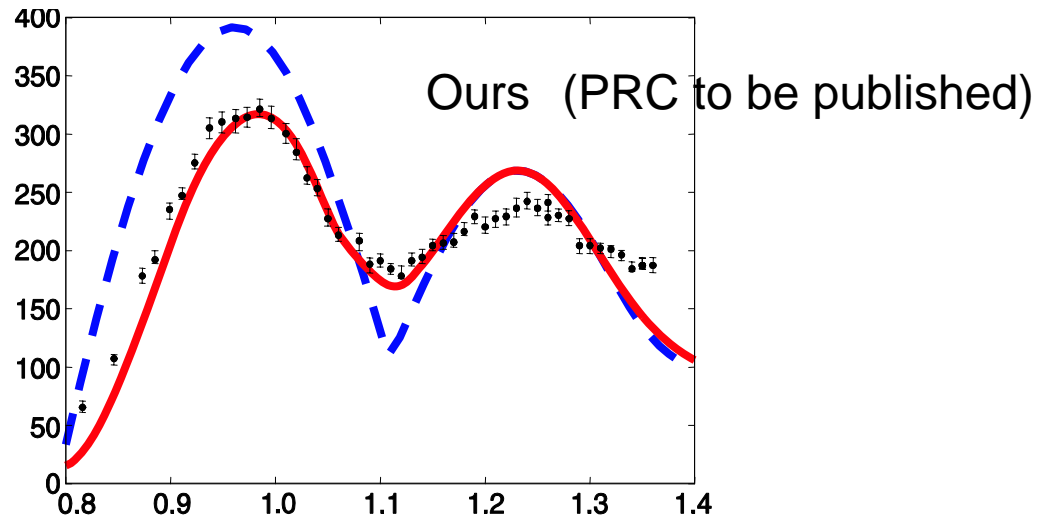
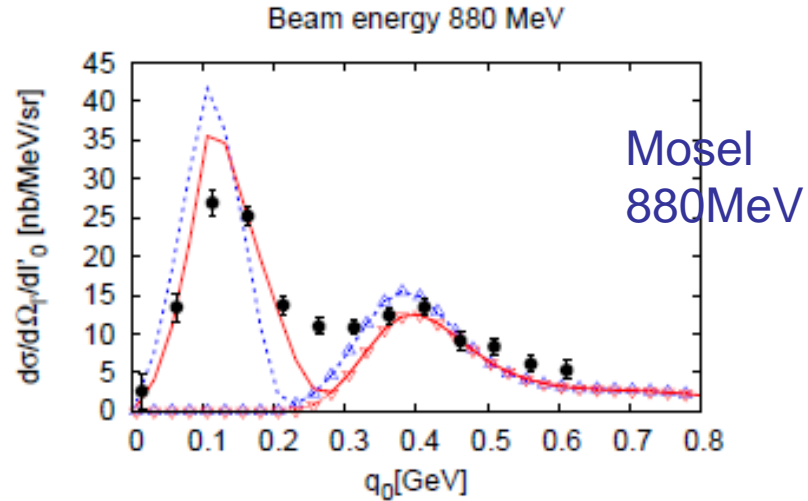
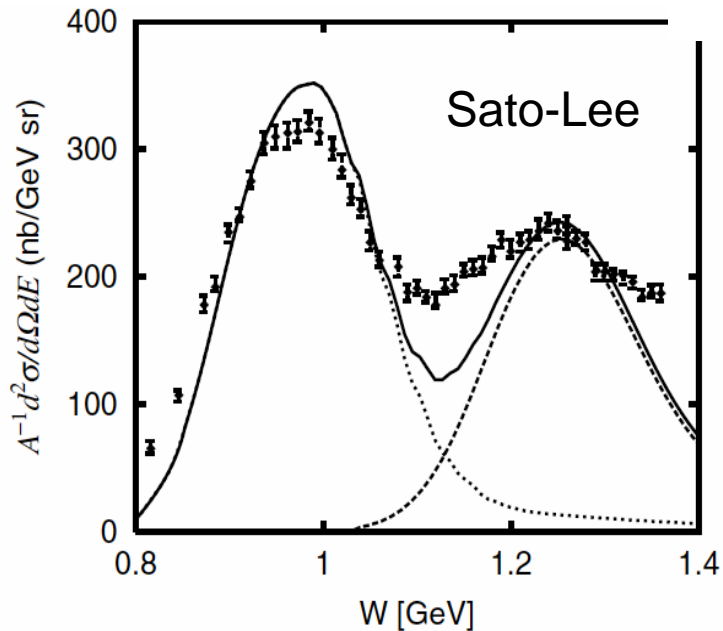
同じ図。

# $^{16}\text{O}(e, e'), E_e=1200\text{MeV}, \theta=32^\circ$



# Sato-Lee (PLB 2007), Mosel (PRC 2007) and Nieves (NuIr

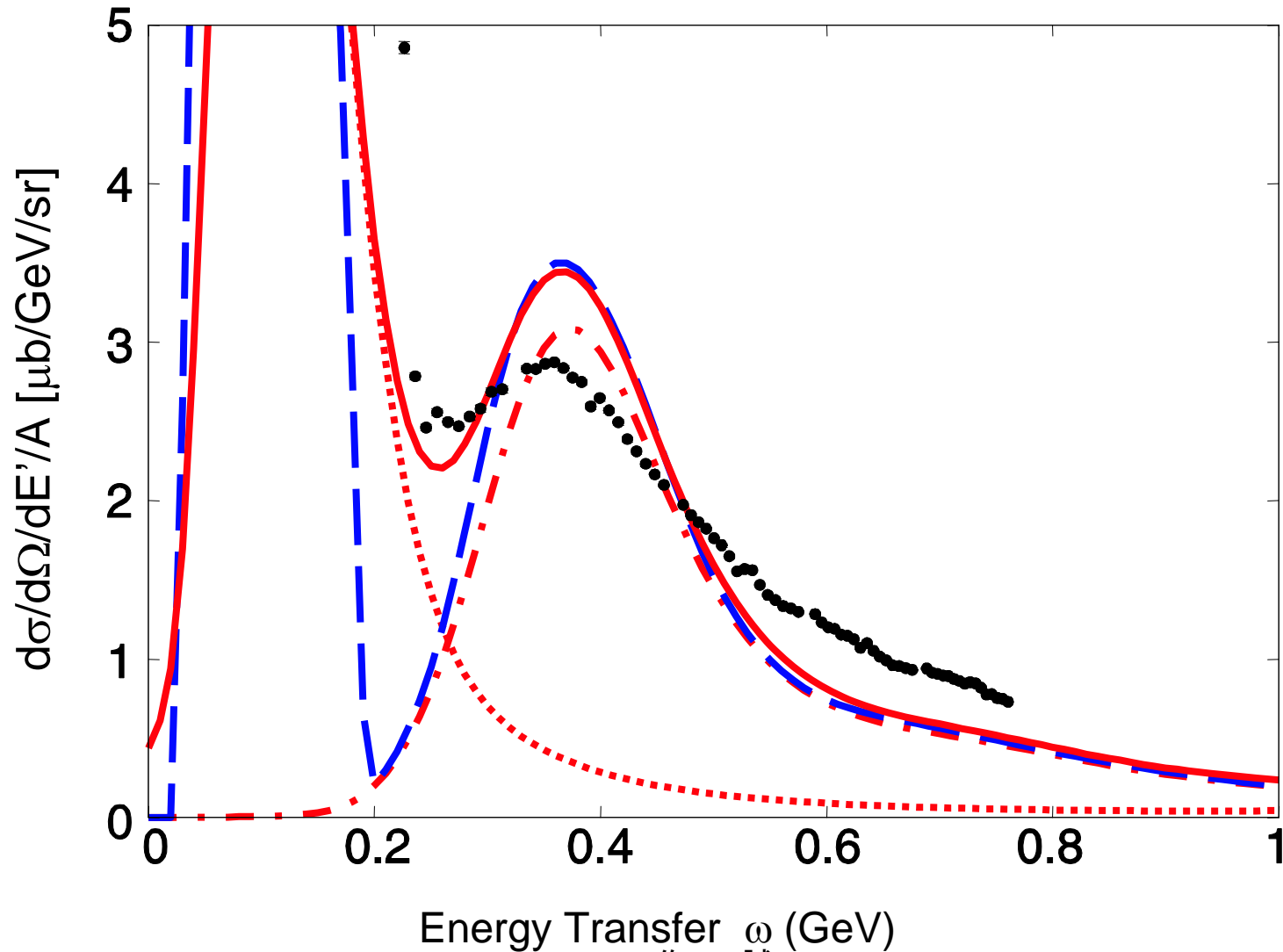
C(e,e') 1100MeV, 37.5deg:



C(e,e') 1.2GeV, 19deg (JLAB E04-001 データ)

超前方  $Q^2 = 0.11$  (GeV<sup>2</sup>)

FG モデルは大きな溝を作る。



### 3. まとめ

---

1. 電子核子散乱断面積の計算結果より、 $\Delta(1232)$ 共鳴生成反応領域で $\Delta(1232)$ 共鳴のみでなく、非共鳴の計算の寄与が10–20%あることがわかった。
2. 電子原子核散乱断面積の計算結果より、境界領域でスペクトル関数による高運動量の効果+  $\Delta(1232)$ 共鳴+非共鳴で埋まることがわかった。準弾性領域から共鳴領域まで定量的にもある程度合う。

→漸く、各過程の寄与が分かってきた。

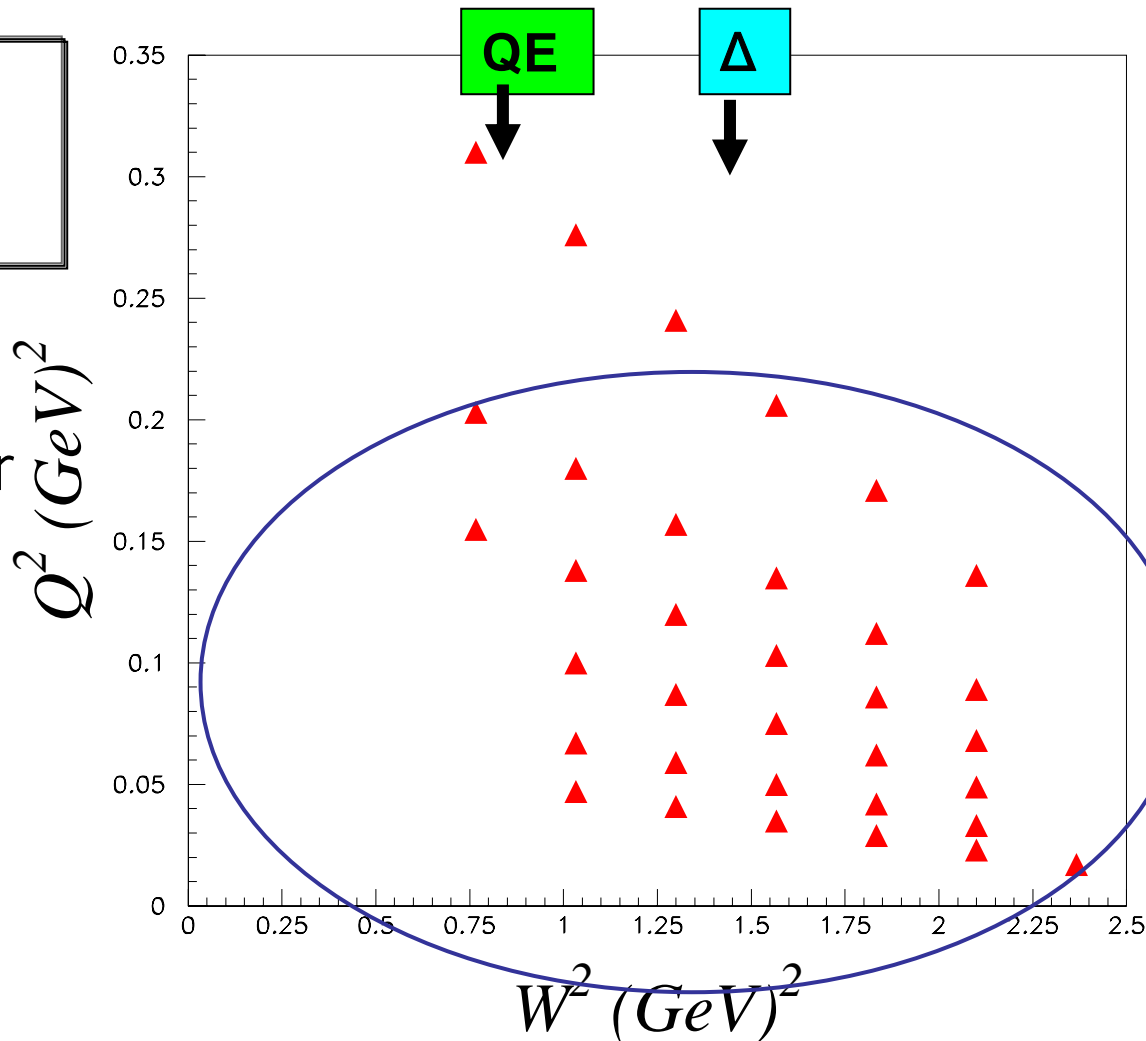
#### 次の目標

- 準弾性反応のBenharモデル、 $\pi$ 生成のSato-Leeモデル(一部Paschosモデル)と深部非弾性散乱の熊野モデルを統一的に結びつけ、テストモデルを作成してみる。
- ニュートリノ原子核反応計算に取って重要な運動量移行  $Q^2=0.02-0.3$  (GeV)<sup>2</sup>領域の情報をもたらすJLAB-E04-001の電子原子核反応データを解析して、統一モデルを高精度にする。

# JLAB E04-001 1.2 GeV data $A(e,e')$ , $A=H,D,C,Al$ in the low $Q^2$ region

Uncertainties in preliminary data  
estimated at ~3 - 8%  
(Much larger RCs and rates)

$Q^2 < 0.04 - 0.2$  (GeV/c) $^2$  is very  
Important for the nuclear  
Effects.



## 電子核子散乱断面積の公式

$$\frac{d\sigma_{eN}}{d\Omega dE'_e} = \frac{\alpha^2}{Q^4} \frac{E'_e}{E_e} L_{\mu\nu} W_N^{\mu\nu}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\mu\nu} = 2[k_\mu k'_\nu + k_\nu k'_\mu - g_{\mu\nu}(kk')] \\ W_N^{\mu\nu} = W_1^N \left( -g^{\mu\nu} + \frac{q^\mu q^\nu}{q^2} \right) + \frac{W_2^N}{M^2} \end{array} \right.$$

## 電子原子核散乱断面積の公式

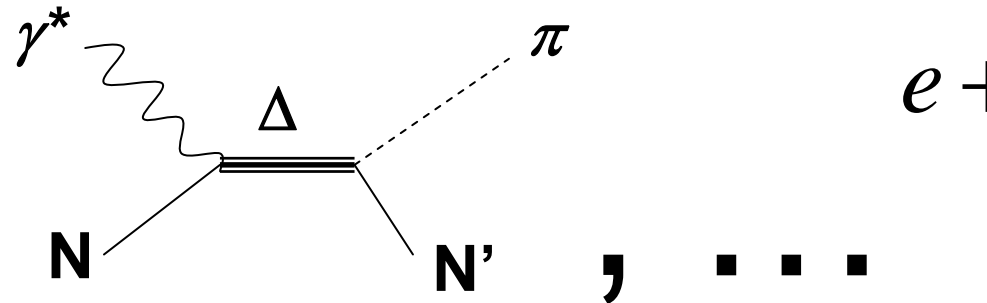
$$\frac{d\sigma_{eA}}{d\Omega dE'_e} = \int d^3\mathbf{p} dE P(\mathbf{p}, E) \frac{M}{p_0} \cdot A \cdot \left( \frac{d\sigma_{eN}}{d\Omega dE'} \right)_{\text{実験室系}}$$

$$= \int d^3\mathbf{p} dE P(\mathbf{p}, E) \frac{M}{p_0} \frac{E'_e}{E_e} \cdot A \cdot \left( \frac{E_R}{E'_R} \frac{d\sigma_{eN}}{d\Omega_R dE'_R} \right)_{\text{標$$

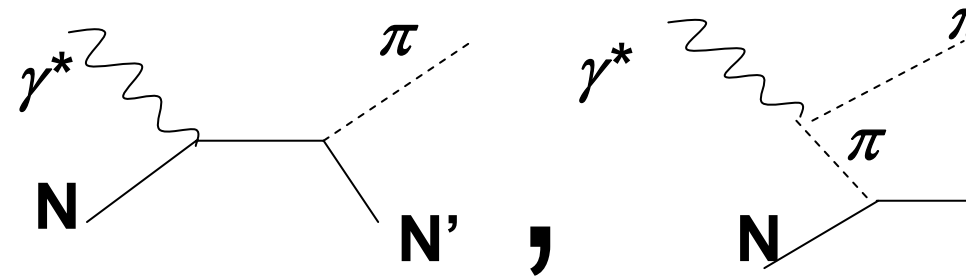
# 3. 共鳴生成反応

## MAIDモデル GeV 領域の電子データを一番良く再現した半現

共鳴：  $\Delta(1232)$  , ....



非共鳴による  $\pi$  生成：



計算形式：

$$\frac{d\sigma_{eN}}{d\Omega_R dE'_R} = \Gamma(\sigma_T + \varepsilon\sigma_L) \quad \Gamma = \frac{\alpha}{2\pi^2} \frac{E'_R}{E_R} \frac{k_\gamma}{Q^2} \frac{1}{1-\varepsilon}$$

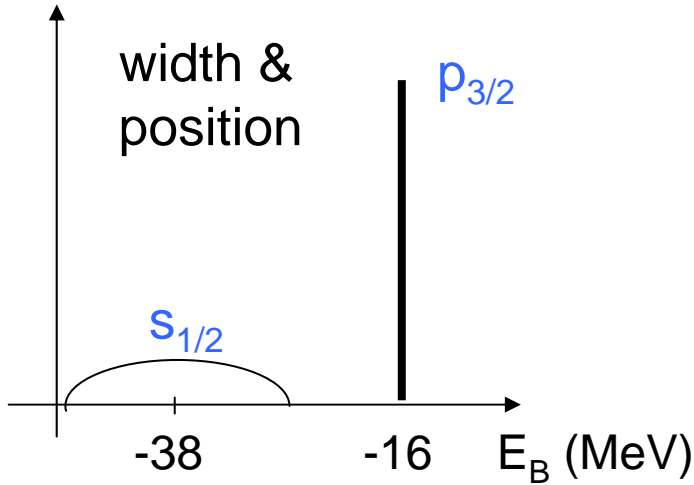


# finite nuclei:

- shell structure

experimental result:

example:  $^{12}\text{C}$



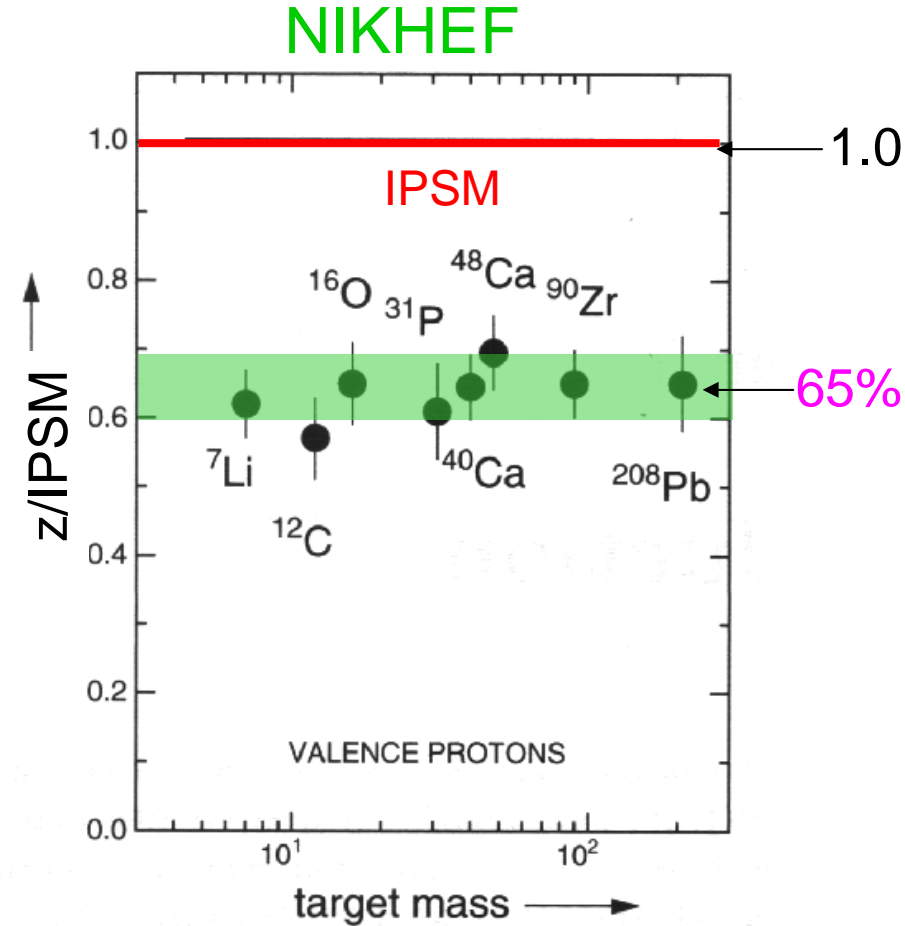
- definite number of nucleons in each shell (IPSM):  $\leq 2j + 1$

## Spectroscopic factor $Z_\alpha$

$$Z_\alpha = 4\pi \int_0^{k_F} dE dk k^2 S(E, k)$$

single particle state  $\alpha$

= number of nucleons in shell



# QE and $\Delta$ with target H,D,C( $e,e'$ ) at $E_e=1.2$ GeV

One data point consists of 600K events.  $Q^2=0.05-0.6$  (GeV/c)<sup>2</sup>.

---

**E' (GeV)**

	$Q^2$	-1.15	-0.966	-0.811	-0.682	-0.573	-0.481	-0.404
10.8	0.0499	C	C	C	C	C	C	C
13	0.0715	H2,D2	H2,D2,C,Al	H2,D2,C,Al	H2,D2,C,Al	H2,D2,C,Al	H2,D2,C,Al	H2,C
16	0.1063	H2,Al	D2,C,Al	D2,C,Al	D2,C,Al	D2,C,Al	D2,C,Al	
19	0.1467		D2	C	C	C	C	
22	0.1918		H2,D2,C,Al	D2,C,Al	H2,D2,C,Al	H2,D2,C,Al	H2,D2,C,Al	
28	0.2932	H2,C,Al	C	C	H2	C	C	
45	0.6136		H2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe	H2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe
55	0.7946			H2,D2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe	H2,D2,Al,Fe
60	0.8782				D2			
70	1.029				H2,D2,C,Al,Fe	H2,D2,C,Al,Fe	C ,Al ,Fe	

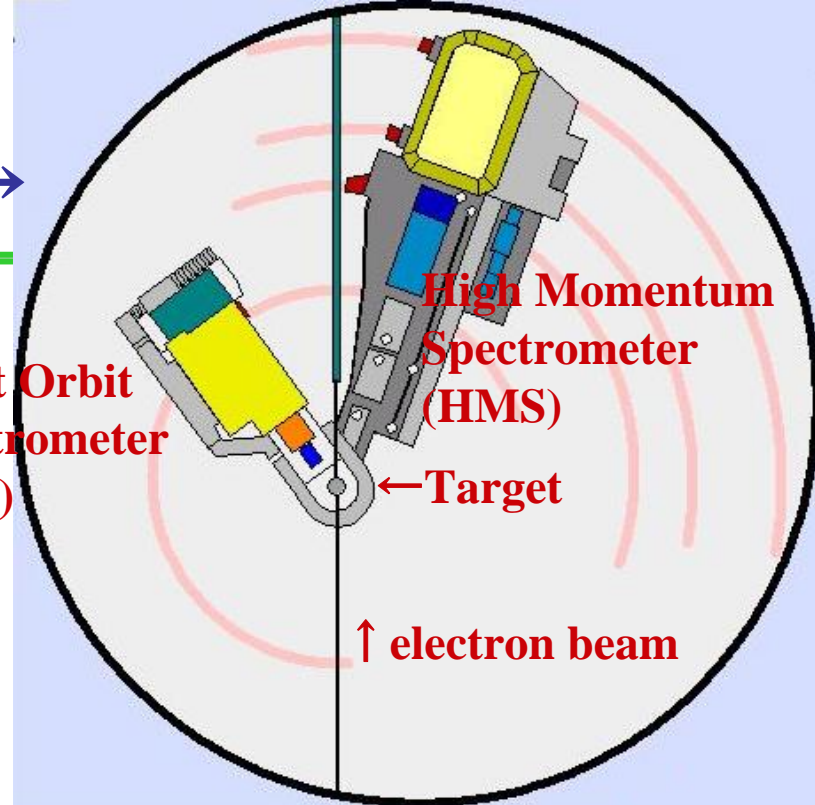
# Detector's outline →

Short Orbit  
Spectrometer  
(SOS)

High Momentum  
Spectrometer  
(HMS)

← Target

↑ electron beam



Hall-C 内部 ↓

