

超新星爆発ニュートリノと炭素・酸素原子核との中性カレント γ 線生成反応事象数の評価

作田 誠(岡大理) @ SN研究会(ICRR柏の葉, 2020.01.07)

In collaboration with M.Reen (Akal/Okayama), T.Sudo, A.Tamii(RCNP), T.Suzuki(Nihon), K.Nakazato(Kyushu) and H.Suzuki(TUS), to appear in JPS Proceedings (OMEG15),2020.

→地下素核C01から地下宇宙E02へ活動は継続しています。

内容

1. 超新星爆発ニュートリノ検出と中性カレント γ 線生成反応
2. JUNO(20kton, LAB $\sim$ CH₂)とSK(32kton, H₂O)について
3. E398 ^{12}C , $^{16}\text{O}(p,p'\gamma)$ 巨大共鳴の γ 線生成率測定実験: $R_\gamma(E_x) = \sigma_{p,p'\gamma}/\sigma_{p,p'}$
4. 超新星爆発ニュートリノSN(10kpc)が作るNC O,C($\nu,\nu'\gamma$)事象数の評価
5. まとめ

Cf. 1) M.Reen et al.[E398 $^{12}\text{C}(p,p'\gamma)$], Phys.Rev.C100, 024615(2019).

2) K.Nakazato, T.Suzuki, M.S.[CC $^{16}\text{O}(\nu,e)^{16}\text{F}^{16}\text{N}$, PTEP2018,123E02(2018).

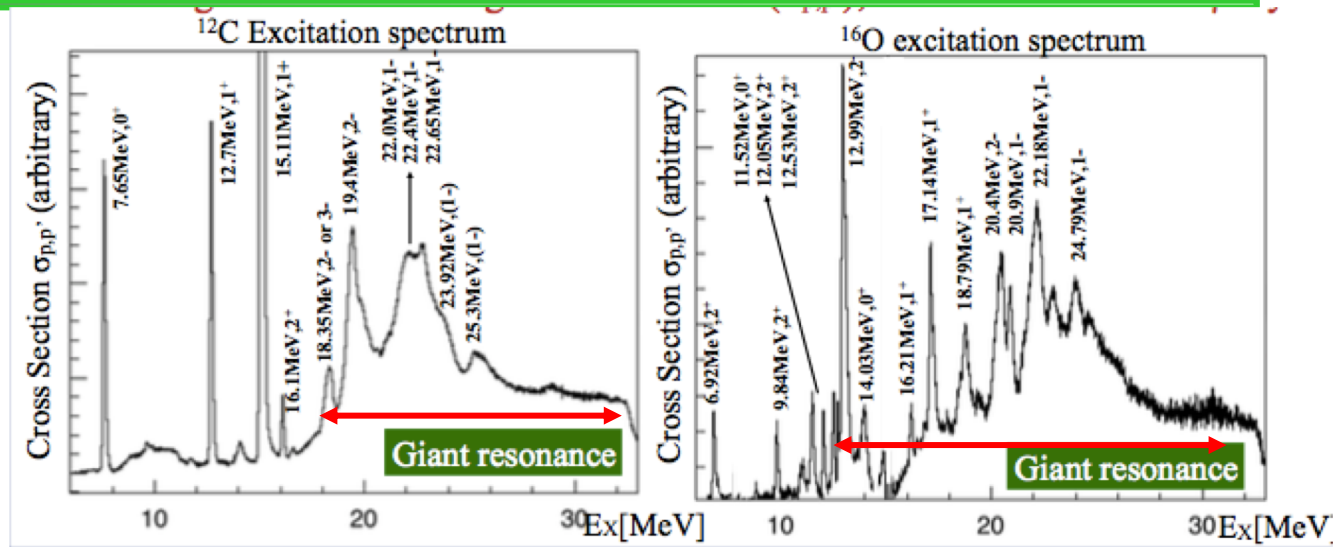
3) M.Sakuda, a talk at OMEG15 Workshop, July 2-5, 2019, Kyoto.

*謝辞: 新学術領域「地下素核C01、2014-2018」、「地下宇宙E02、2019-2023」.

キーワード:原子核の巨大共鳴(集団励起状態)

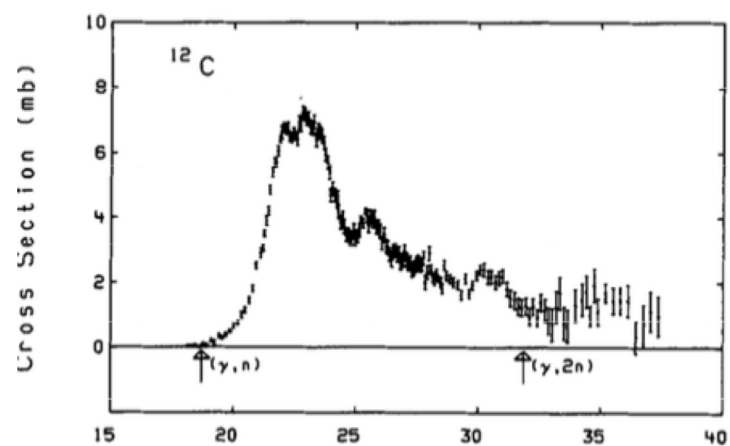
-低エネルギー原子核反応断面積で支配的寄与- $E_0 \sim 15\text{-}30\text{MeV}$

■ E398実験(392MeV)
 $^{12}\text{C}(p,p'), ^{16}\text{O}(p,p')$
分離エネルギー以上
 $15 < E_x < 35\text{MeV}$ で大きな
寄与。

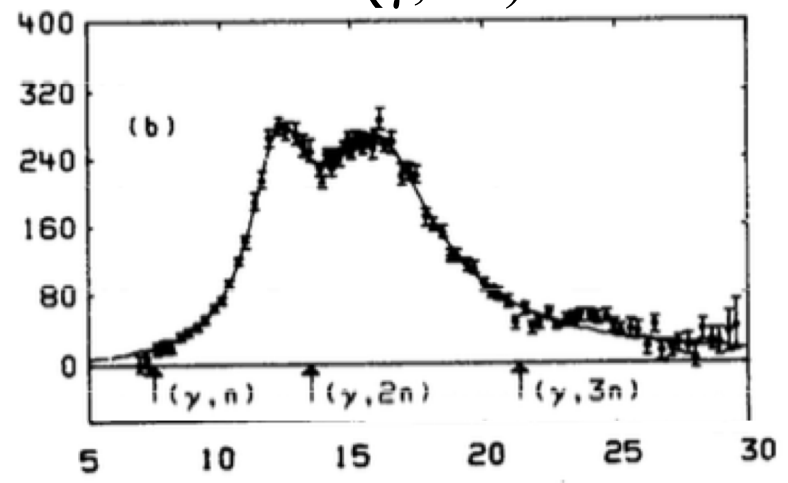


■ 巨大共鳴は、最初 $\gamma+A$ で発見された。

■ $^{12}\text{C}(\gamma, \text{tot})$



$^{160}\text{Gd}(\gamma, \text{tot})$

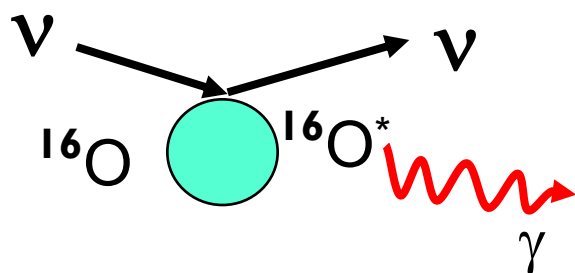


1. 超新星爆発のニュートリノの検出

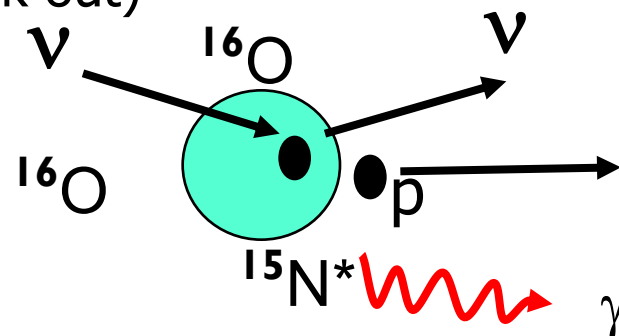
- SN1987A では、一番断面積の大きいIBD反応($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)による20個余りの $\bar{\nu}_e$ のみ検出された。次の超新星爆発の際には爆発機構の理解のため、 $\bar{\nu}_e$ のみならず全種類のニュートリノ: $\nu_e, \nu_x, \bar{\nu}_x$ ($x = \mu, \tau$)を検出すべきである。 ν_x ($\bar{\nu}_x$)はこのエネルギー領域では、荷電カレント(CC)反応は起こせず、中性カレント(NC)反応のみ。
- NC $^{16}\text{O}(\nu, \nu'\gamma)$ 断面積計算とSN検出の可能性は、Langanke他によって提案されていた。Langanke et al., PRL**76**(1996); Kolbe et al., NPA540(1992); Beacom-Vogel, PRD58,053010(1998).  
 - Cf: 過去に測定されたNC反応。  
- この発表: 2つの典型的な標的の検出器JUNO (CH_2 , 20kton)とSK(H_2O , 32kton)について、SN(10kpc) の場合に $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}(\nu, \nu'\gamma)$ の事象数を、SN ν 束(Nakazato et al.)+NC $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}(\nu, \nu')$ 断面積(SFO殻模型)+[E398実験 $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}(p, p'\gamma)$ で測定した γ 線生成率]、を使って評価した。
- Cf: NC $\nu p \rightarrow \nu p$ 弾性散乱はBNL E734(1.3 GeV)で測定され、Beacom-DasguptaらによりSN検出への応用が議論された。詳しくはJUNO実験提案(J.Phys.43,2016)参照。

1. ニュートリノと炭素・酸素原子核との中性カレント γ 線生成反応 (p2)

1) $E_\nu < 100 \text{ MeV}$: Elastic and **Inelastic**



2) $E_\nu > 100 \text{ MeV}$: Quasi-elastic (1N knock-out)



1) $E_\nu < 100 \text{ MeV}$: Inelastic scattering (**Giant resonances**)

- 理論計算: $\nu\text{C}, \text{O} \rightarrow \nu\text{C}^*, \text{O}^* \rightarrow \gamma$: Langanke et al., PRL**76**(1996). Kolbe et al., NPA540(1992) Beacom-Vogel, PRD58,053010(1998)

2) $E_\nu > 100 \text{ MeV}$: Nucleon knockout(Excitation of residual nucleus).

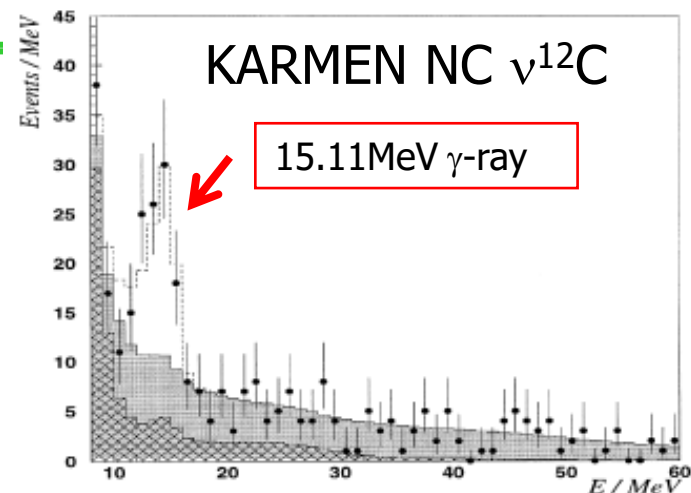
- 理論: $\nu\text{O} \rightarrow \nu + p/n + ^{15}\text{N}^*/^{15}\text{O}^*$ Ankowski, Benhar, MS et al. PRL**108**(2012)052505
- 実験: T2K K.Abe et al., PRD100,112009(2019). SRNバックグラウンド、Sterile探索に重要。

過去の低エネルギー中性カレント反応実験

(p5)

■ $^{12}\text{C}(\nu, \nu')^{12}\text{C}(15.1\text{MeV}, 1^+, T=1) @ E_\nu = 29.8\text{MeV}$
Armbruster et al.[KARMEN], PLB423(1998) 

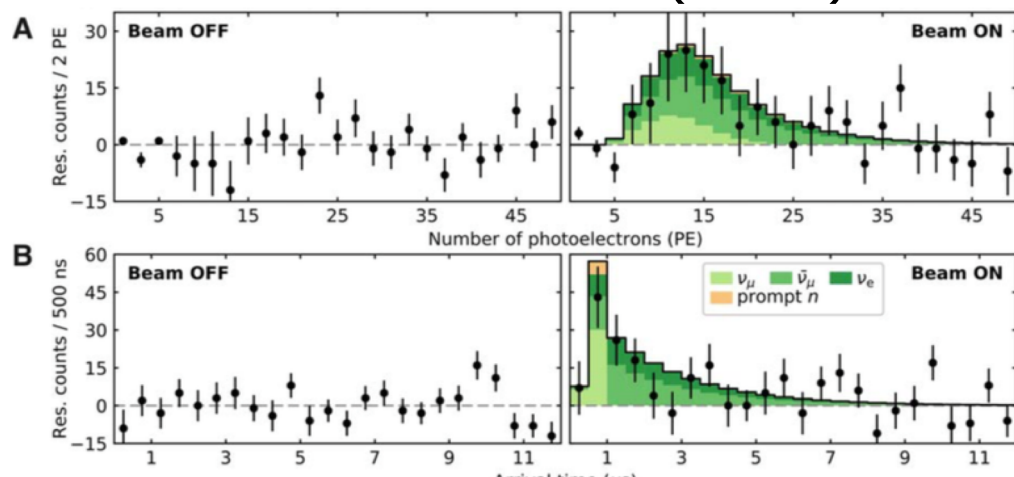
- 実験値 $\sigma_{\text{exp}} = (3.2 \pm 0.5 \pm 0.4) \times 10^{-42} \text{cm}^2$
- 理論値 $\sigma = 2.8 \times 10^{-42} \text{cm}^2$ と一致。
- 理論計算 NC $^{12}\text{C}(\nu, \nu')^{12}\text{C}(15.1\text{MeV}, 1^+, T=1)$, CC $^{12}\text{C}(\nu, e)^{12}\text{N}$ $^{12}\text{B}(1^+, T=1)$ は、
Fukugita, Kohyama, Kubodera, PLB212(1988) が初めて計算。今でも使われている。



■ COHERENT(ν -SNS)によるNC ν -CsI弾性散乱測定
Akimov et al.[COHERENT](2017). 

ν -CsI (ν -SNS)

■ Cf. KARMEN, LSND 実験によるCC反応実験
 $^{12}\text{C}(\nu, e)$ は多くあるが、ここでは触れない。

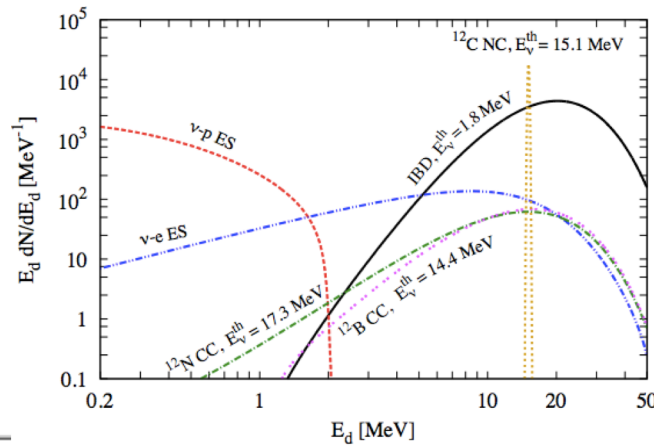


2-1. JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory), F.An et al.(JUNO)J.Phys.G43(2016).

- 検出器: 液体シンチ(Linear Alkylbenzene LAB), $\Delta E/E=3\%/\sqrt{E}$, 有効質量20 kton, $\sim 1.5 \times 10^{33}$ protons, 地下700m. 2020年稼働予定。

- 考慮されている反応:
IBD, NC νp elastic,
 νe elastic,
 $NC^{12}C(\nu, \nu)^{12}C^*(15.1MeV)$,
 $CC^{12}C(\nu, e)^{12}N, ^{12}B$.

👉 議論は後ほど。



Channel	Type	Events for different $\langle E_\nu \rangle$ values		
		12 MeV	14 MeV	16 MeV
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	CC	4.3×10^3	5.0×10^3	5.7×10^3
$\nu + p \rightarrow \nu + p$	NC	0.6×10^3	1.2×10^3	2.0×10^3
$\nu + e \rightarrow \nu + e$	ES	3.6×10^2	3.6×10^2	3.6×10^2
$\nu + ^{12}C \rightarrow \nu + ^{12}C^*$	NC	1.7×10^2	3.2×10^2	5.2×10^2
$\nu_e + ^{12}C \rightarrow e^- + ^{12}N$	CC	0.5×10^2	0.9×10^2	1.6×10^2
$\bar{\nu}_e + ^{12}C \rightarrow e^+ + ^{12}B$	CC	0.6×10^2	1.1×10^2	1.6×10^2

2-2. SK での超新星ニュートリノ検出

-Official SN monitor paper (Fid. 22.5kton)-

K. Abe et al. / Astroparticle Physics 81 (2016) 39–48

- 表のような反応が、考慮されている。IBD反応($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$), νe^- elastic, CC $^{16}\text{O}(\nu_e, e)$ 反応。 ☞ 議論は後ほど。
- Wilson (Old model) and NK1, NK2 (Typical recent model)
 - NK1: M=20, triv=200ms, Z=0.02 (~SN1987A)
 - NK2: M=13, triv=100ms, Z=0.004 (Smallest ν flux case)

	Wilson	NK1	NK2
	No osc.	No osc.	No osc.
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	4923	2076	1878
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$	74	43	39
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$	25	10	9
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	41	17	17
$\bar{\nu}_x + e^- \rightarrow \bar{\nu}_x + e^-$	34	14	13
$\nu_e + ^{16}\text{O} \rightarrow e^- + X$	8	22	16
$\bar{\nu}_e + ^{16}\text{O} \rightarrow e^+ + X$	64	27	20
Total	5169	2209	1992



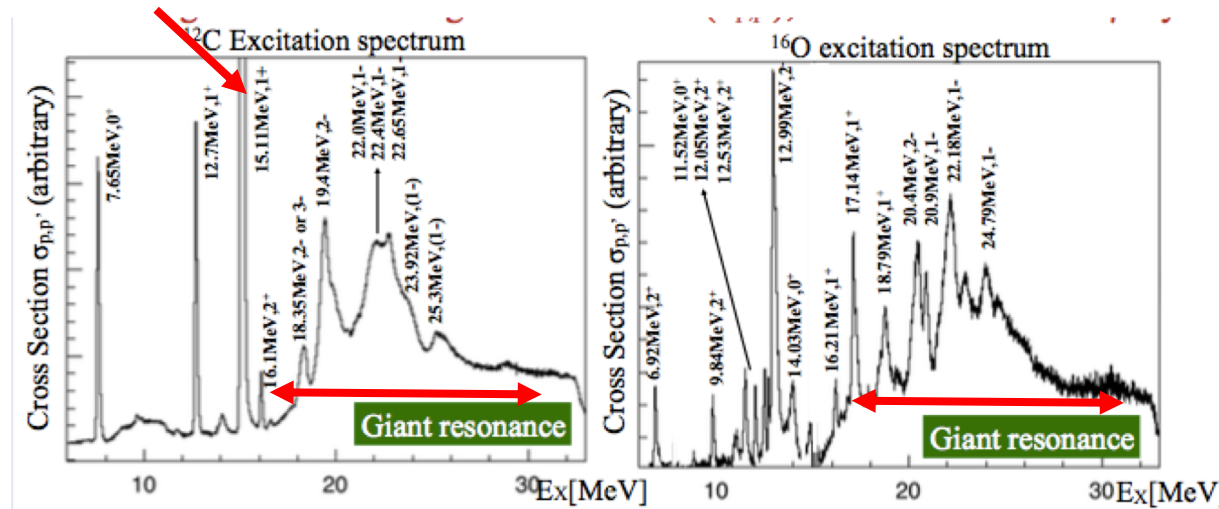
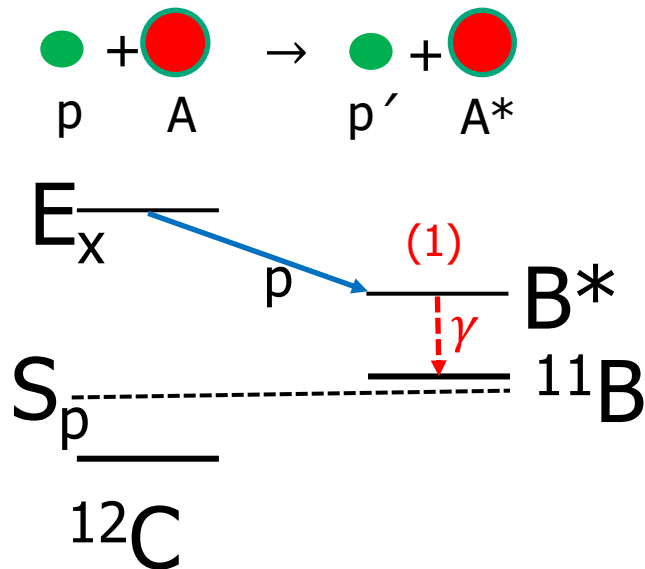
3. RCNP E398実験

(実験は2014年終了。現在研究員と博士学生が解析中。)

■ ^{12}C と ^{16}O は軽い安定原子核の典型である。ニュートリノ実験、素粒子原子核実験の標的として使われる。

✓ [原子核物理] 原子核反応での巨大共鳴からの γ 線生成率は定量的には分かってない。→測定する意義あり。(超安定核なので定量性に分野の興味少ない。)

✓ [超新星爆発のニュートリノ検出] 中性カレント事象は、IBDに次ぎ信号多い可能性があり、また ν_μ , ν_τ の情報あり、重要である。



3-1) E398 Experiment at RCNP(Osaka)

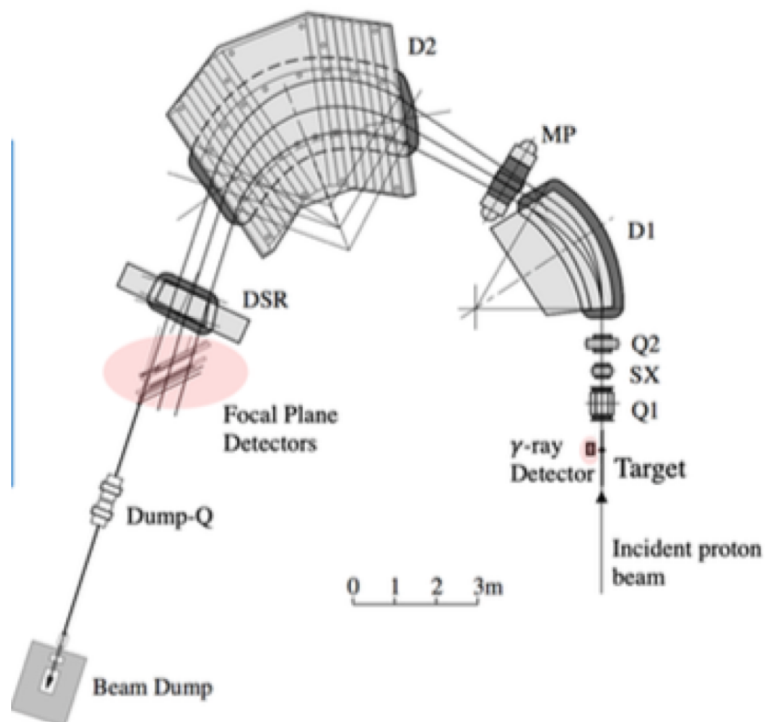
- Magnetic Spectrometer (E_x) and NaI array (E) -

Measurement of γ rays from giant resonances excited by the $^{12}\text{C}(p, p')$ reaction at 392 MeV and 0°

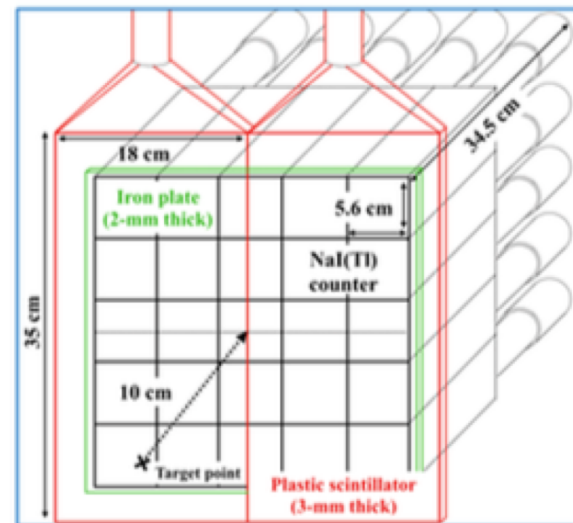
M. S. Reen^{1,*}, I. Ou,¹ T. Sudo,¹ D. Fukuda,¹ T. Mori,¹ A. Ali,¹ Y. Koshio,¹ M. Sakuda,^{1,†} A. Tamii,^{2,‡} N. Aoi,² M. Yosoi,²
E. Ideguchi,² T. Suzuki,² T. Yamamoto,² C. Iwamoto,³ T. Kawabata,⁴ S. Adachi,⁵ M. Tsumura,⁵ M. Murata,⁵ T. Furuno,⁵
H. Akimune,⁶ T. Yano,⁷ T. Suzuki,⁸ and R. Dhir⁹

- 励起エネルギー($E_x = E_p - E_{p'}$)が分解能($\Delta E_x = 100$ keV)で測定できる装置に γ 線検出器NaI(E)を追加。

(a) Grand Raiden Spectrometer



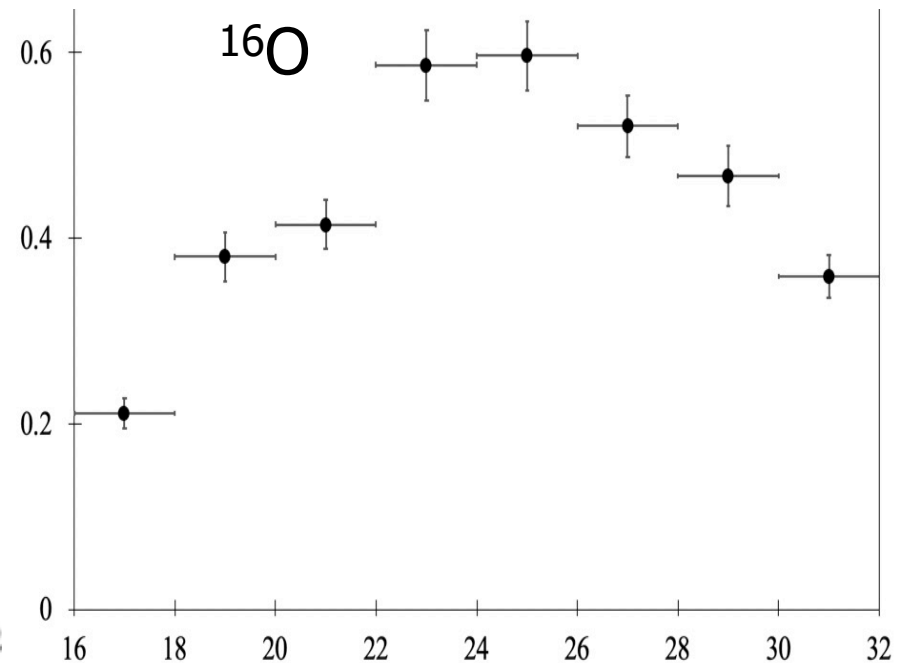
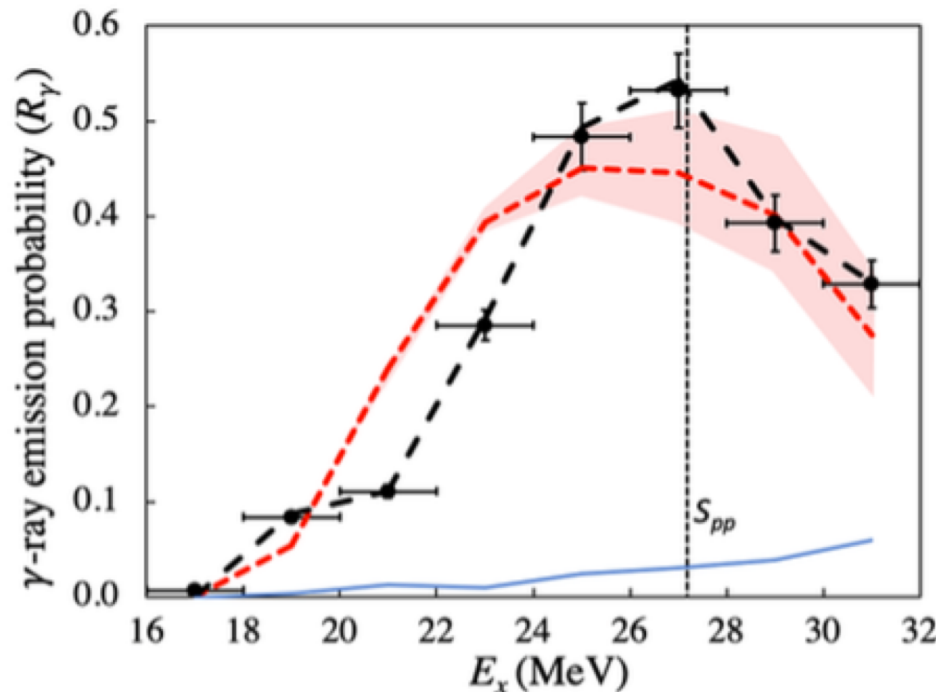
(c) γ -ray detector



3-3. 結果: RCNP E398実験: $R_\gamma(E_x) = \sigma_{p,p\gamma}/\sigma_{p,p} = N_\gamma/N_x \epsilon$ -現在、M.Reen(Akal大助教),須藤高志(阪大D)で解析中。 p10

- Data(---)と光学模型によるHauser-Feshbach統計計算(---).計算は30-40%過大評価気味。我々はデータを使う。

$$T(E_x \rightarrow a + (A, i)) = \sum_{S=|J_A^i - s_a|}^{J_A^i + s_a} \sum_{L=|J_x - S|}^{J_x + S} T_L^a(\epsilon_a);$$



4. NC C,O($\nu,\nu'\gamma$) 事象数の評価 (SN@10kpc) (p11 ↓

■ NC 事象数 = $N_{\text{標的}} * F_{\text{SN}\nu\text{束}}(E_\nu) * d\sigma(E_\nu)/dE_x * R_\gamma$ (γ 線生成率、我々の実験)

$$N_\gamma^{NC} = \int_{E_x=16 \text{ MeV}}^{E_x=32 \text{ MeV}} dE_x \left[n_{tar} \int_0^{E_\nu^{max}} dE_\nu F(E_\nu) \cdot \frac{d\sigma(E_\nu)}{dE_x} \right] \cdot R_\gamma(E_x).$$

- (1) $\text{SN}\nu\text{束}F(E_\nu)$: Fermi-Dirac FD(Old) and New Flux NK1, NK2(BH)/ mMB. 
- New Flux Nakazato et al., ApJS.205,2(2013)~Keil-Raffelt-Janka flux(2003)

ν flux Model	$\langle E_{\nu_e} \rangle$ (MeV)	$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle$ (MeV)	$\langle E_{\nu_x} \rangle$ (MeV)	$E_{\nu_e}^{tot}$ (10^{52} erg)	$E_{\bar{\nu}_e}^{tot}$ (10^{52} erg)	$E_{\nu_x}^{tot}$ (10^{52} erg)
mMB	12.0	12.0	12.0	5.0	5.0	5.0
Ordinary SN (NK1)	9.32	11.1	11.9	3.30	2.82	3.27
Fermi-Dirac	11.0	16.0	25.0	5.0	5.0	5.0
Blackhole (NK2)	17.5	21.7	23.4	9.49	8.10	4.00

(2) 断面積 $d\sigma(E_\nu)/dE_x$ by SFO殻模型: ^{12}C [T.Yoshida et al., ApJ686,448(2008)] and ^{16}O [T.Suzuki et al. PRC98,034613(2018)].

(3) The γ -ray emission rate $R_\gamma(E_x)$: 我々のデータをつかう。

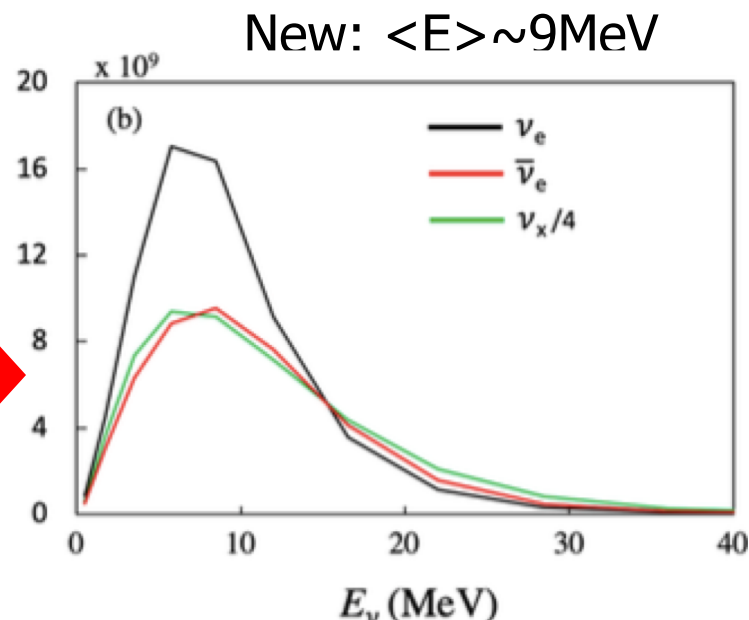
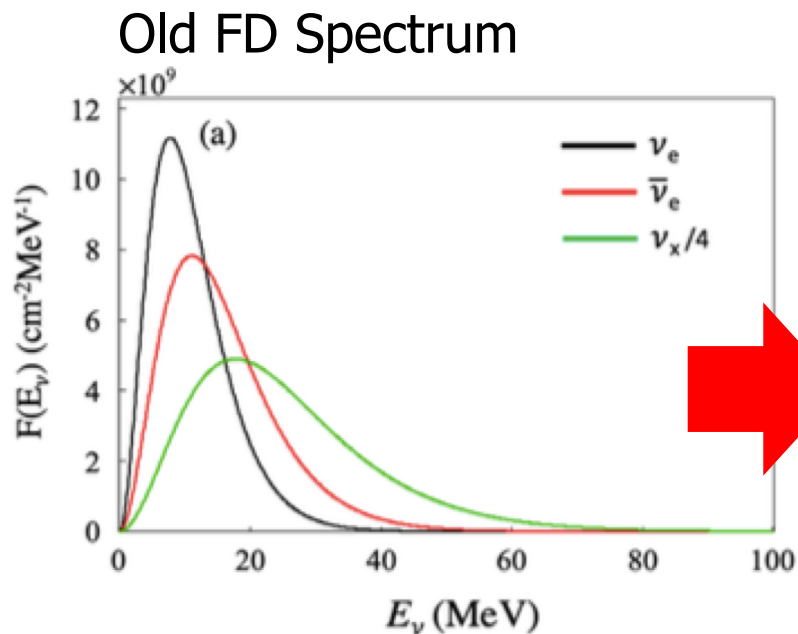
(1) SN ν 束 $F(E_\nu)$ @検出器(10kpc)

2003年以前のSNモデルは**エネルギーの階層差**を予言: $\bar{E}_{\nu_e} < \bar{E}_{\bar{\nu}_e} < \bar{E}_{\nu_x}$ [Left]

最近のSNモデルでは**エネルギーの階層差がなくなった**. $\bar{E}_{\nu_e} \sim \bar{E}_{\bar{\nu}_e} \sim \bar{E}_{\nu_x}$ [Right]

➤ **理由**: Coreで次の3つの反応を正しく計算: $NN \rightarrow NN\nu\bar{\nu}$, $\nu_e\bar{\nu}_e \rightarrow \nu_x\bar{\nu}_x$, $e^+e^- \rightarrow \nu_x\bar{\nu}_x$.
 $NN \rightarrow NN\nu\bar{\nu}$: H.Suzuki(1991,1993)が提案.

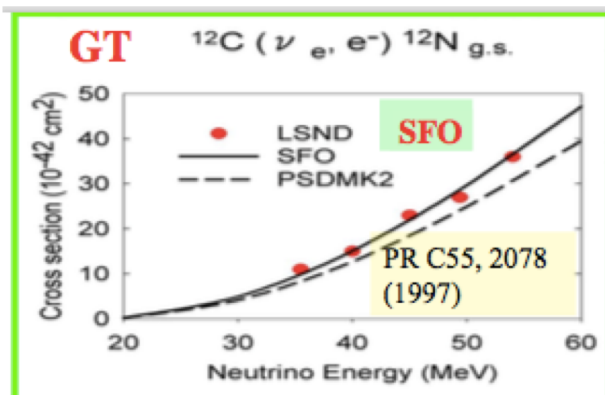
我々は、最近のFluxを使い、事象数を計算する。比較のためOld Fluxも使う。



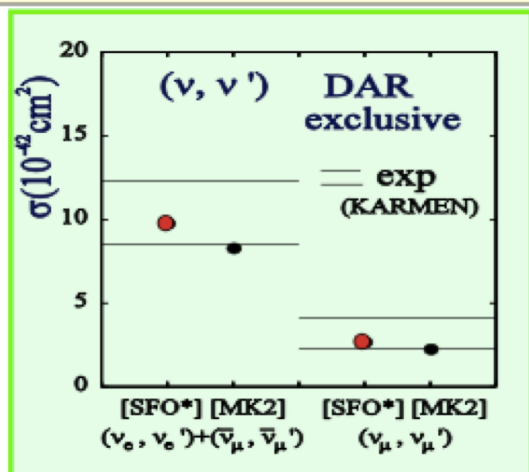
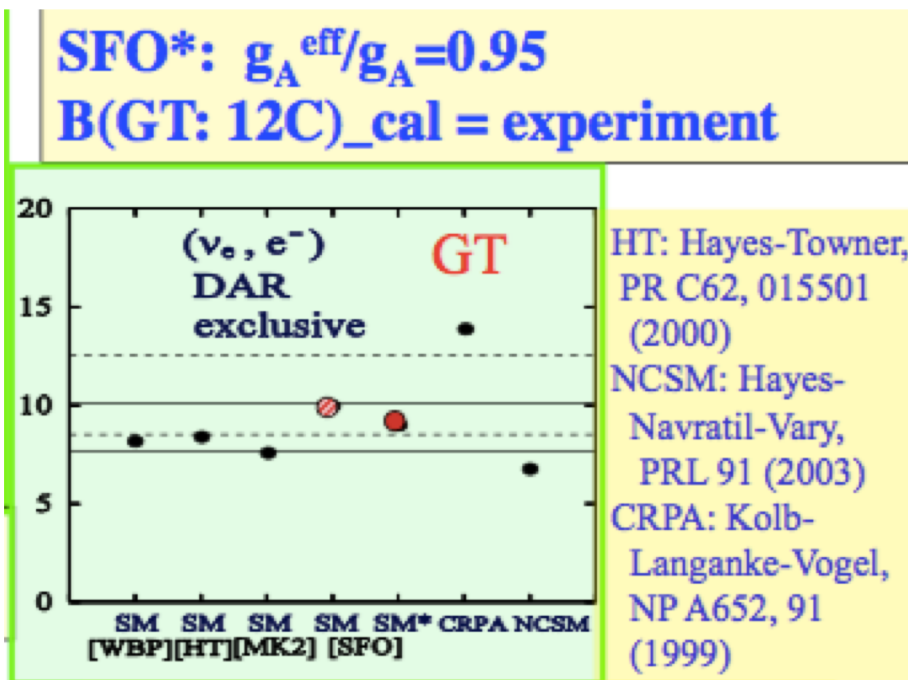
(2) SFO殻模型(PRC74, 034307) at $E_\nu < 100\text{MeV}$

- この計算は、殻模型の強みで、巨大共鳴のエネルギー準位を他のモデル (CRPA)よりデータを良く再現している.

All Figures from T.Suzuki (2017, Hakone).



Suzuki, Chiba, Yoshida, Kajino, Otsuka, PR C74, 034307, (2006).



(2) NC ν - ^{16}O , ^{12}C Reaction

■低エネルギーNC ν - ^{16}O , ^{12}C 反応では、V-Aの内、
Axial Current ($\gamma_5 \rightarrow \sigma$) が支配的.かつ低エネル
ギー反応断面積では、巨大共鳴($T=1$)が支配的.
 $\Delta S=1$, $\Delta T=1$.

✓ Jachowicz(上)、TSuzuki(下): ν - ^{16}O ($E_\nu=50\text{MeV}$)

■原子核物理では、“Spin-Isospin ($\sigma\tau$)” 支配的と
表現.

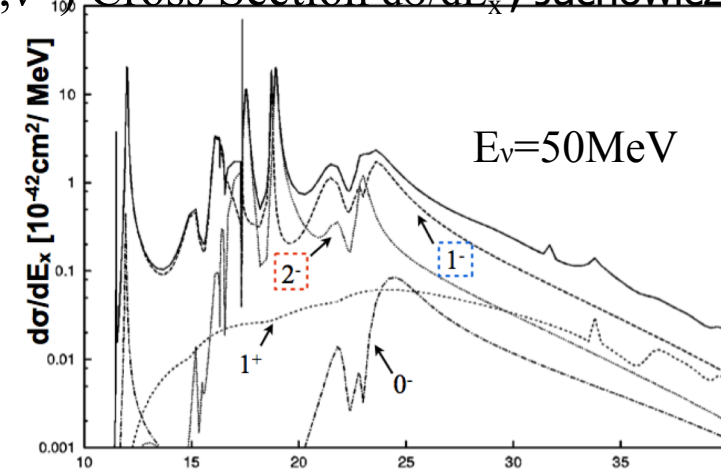
➤Spin Dipole 共鳴 SDR ($\Delta T=1, \Delta S=1, \Delta L=1$)

$J^p=1^-, 2^-$ が断面積に寄与する.

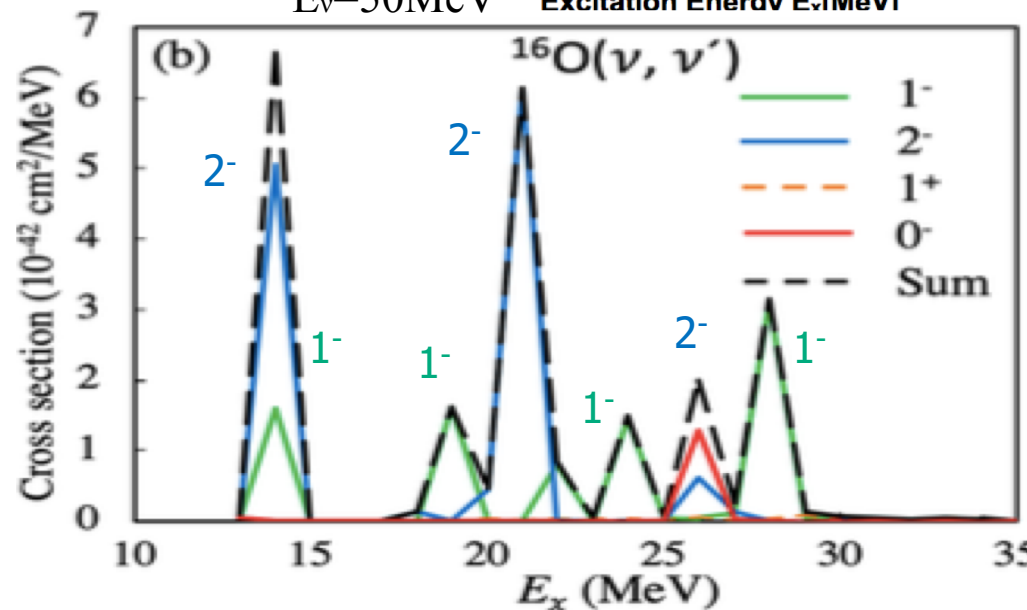
➤ ^{12}C の場合は、15.1MeV, ($1^+, T=1$)

$\Delta T=1, \Delta S=1, \Delta L=0$ も大きく寄与。

$^{16}\text{O}(\nu, \nu')$ Cross Section $d\sigma/dE_x$, Jachowicz



$E_\nu=50\text{MeV}$ Excitation Energy E_x [MeV]



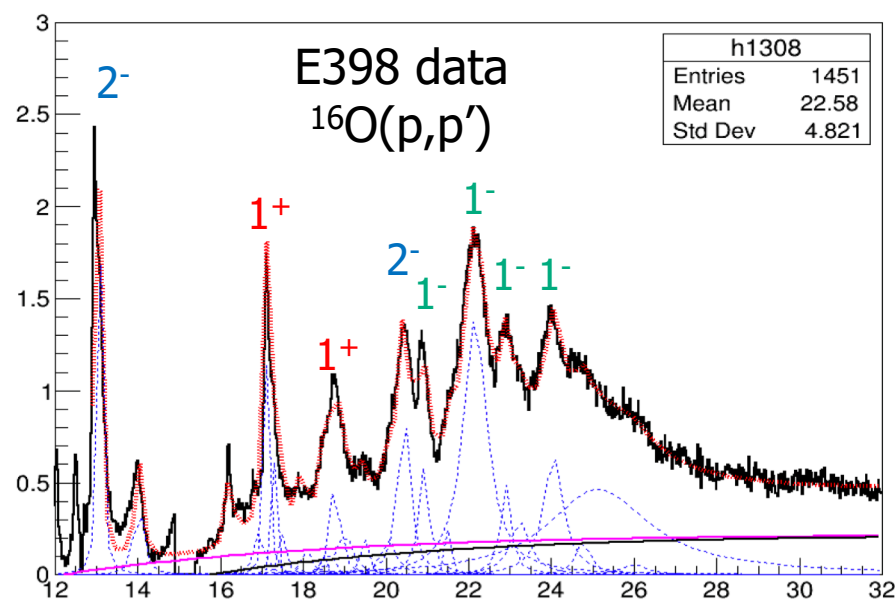
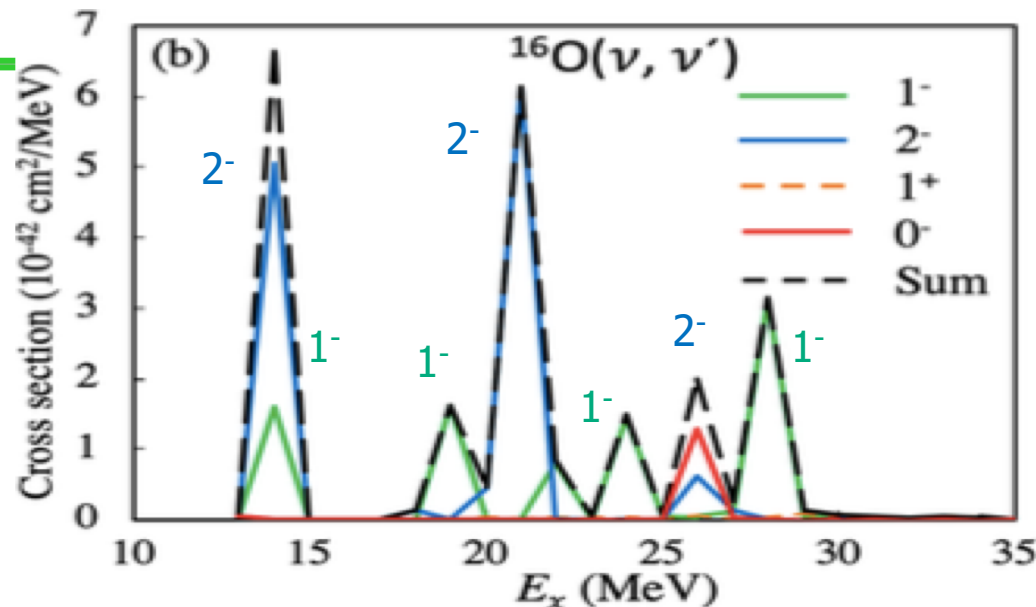
$^{16}\text{O}(\nu, \nu')$ と $^{16}\text{O}(p, p')$: $d\sigma/dE_x$ [T.Suzuki計算] vs [E398 Data]

-実験で同定できている状態1-,2-は計算に現れている。

- (ν, ν') : 弱い力。
- (p, p') : 原子核力 + クーロン力。

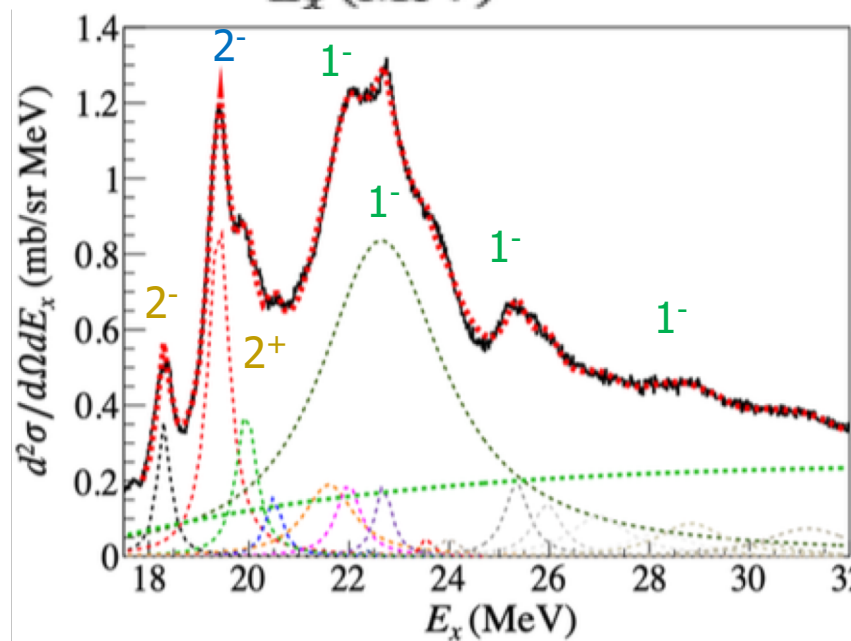
■ 表は
Our Data.

E_x (MeV)	$J^\pi; T$	Γ_m (MeV)	σ_m (mb/sr MeV)
12.80	$0^-; 1$	0.10 ± 0.01	0.04 ± 0.01
12.97	$2^-; 1$	0.10 ± 0.01	2.18 ± 0.06
13.09	$1^-; 1$	0.13 ± 0.01	1.74 ± 0.04
13.98	$2^-; 1$	0.10 ± 0.01	0.26 ± 0.01
14.03	$0^+; 1$	0.18 ± 0.04	0.47 ± 0.04
16.21	$1^+; 1$	0.10 ± 0.02	0.61 ± 0.00
16.35	$2^+; 1$	0.10 ± 0.01	0.03 ± 0.00
16.44	$2^+; 1$	0.10 ± 0.01	0.19 ± 0.01
17.09	$1^-; 1$	0.38 ± 0.04	0.47 ± 0.04
17.14	$1^+; 1$	0.10 ± 0.01	0.99 ± 0.04
17.28	$1^-; 1$	0.10 ± 0.01	0.54 ± 0.04
17.51	$1^-; 1$	0.18 ± 0.06	0.17 ± 0.00
17.61	$2^+; 1$	0.11 ± 0.01	0.06 ± 0.04
18.09	$0^+; 1$	0.29 ± 0.04	0.17 ± 0.02
18.43	$2^+; 0$	0.10 ± 0.04	0.17 ± 0.02
18.48	$1^-; 1$	0.10 ± 0.02	0.17 ± 0.00
18.60	$1^-; 1$	0.15 ± 0.00	0.28 ± 0.06
18.77	$1^+; 1$	0.21 ± 0.04	0.64 ± 0.01
19.00	$2^-; 1$	0.42 ± 0.05	0.24 ± 0.05
19.26	$2^+; 1$	0.15 ± 0.03	0.05 ± 0.02
19.47	$1^-; 1$	0.20 ± 0.07	0.20 ± 0.03
20.05	$2^+; 0$	0.40 ± 0.03	0.30 ± 0.03
20.43	$2^-; 1$	0.19 ± 0.02	1.11 ± 0.04
20.95	$1^-; 1$	0.30 ± 0.01	0.70 ± 0.03
21.50	$1^-; 1$	0.12 ± 0.00	0.23 ± 0.01
22.15	$1^-; 1$	0.68 ± 0.01	1.40 ± 0.03
22.89	$1^-; 1$	0.30 ± 0.01	0.48 ± 0.04
23.23	$1^-; 1$	0.56 ± 0.15	0.31 ± 0.03
24.07	$1^-; 1$	0.55 ± 0.04	0.65 ± 0.04
24.76	$2^+; 1$	0.34 ± 0.06	0.19 ± 0.01
25.12	$1^-; 1$	3.00 ± 0.30	0.46 ± 0.03
26.00	$1^-; 1$	0.75 ± 0.25	0.06 ± 0.01

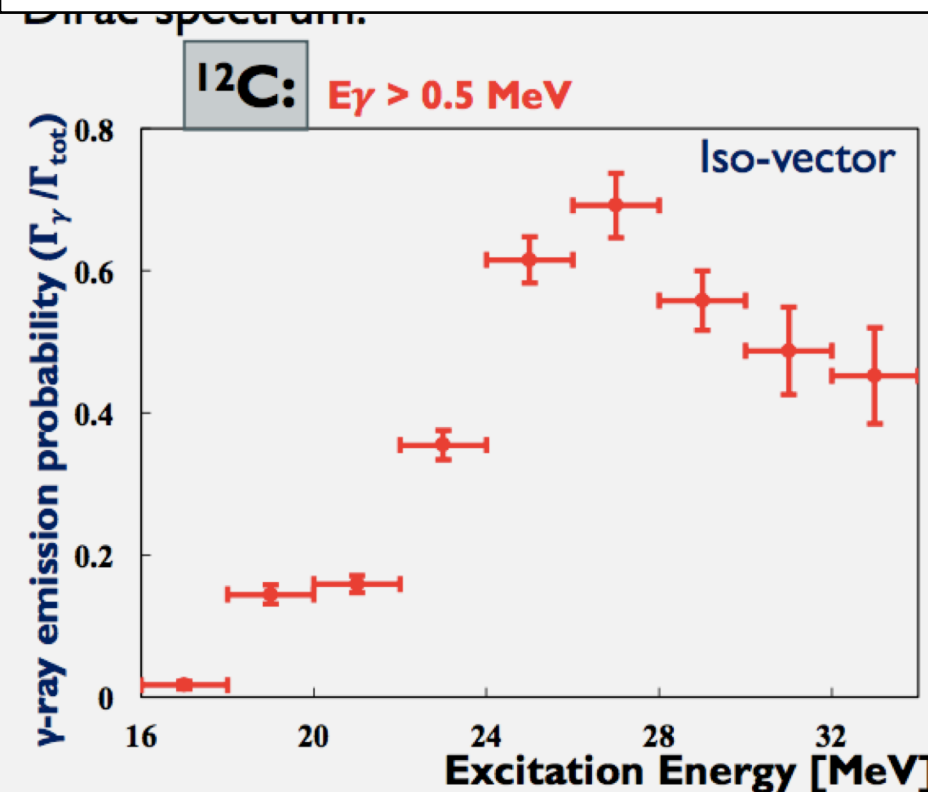


-dσ/dE_x [T.Suzuki計算] vs [Our Data] -

quasifree	-	-	$\mu =$
			1.07 ± 0.05

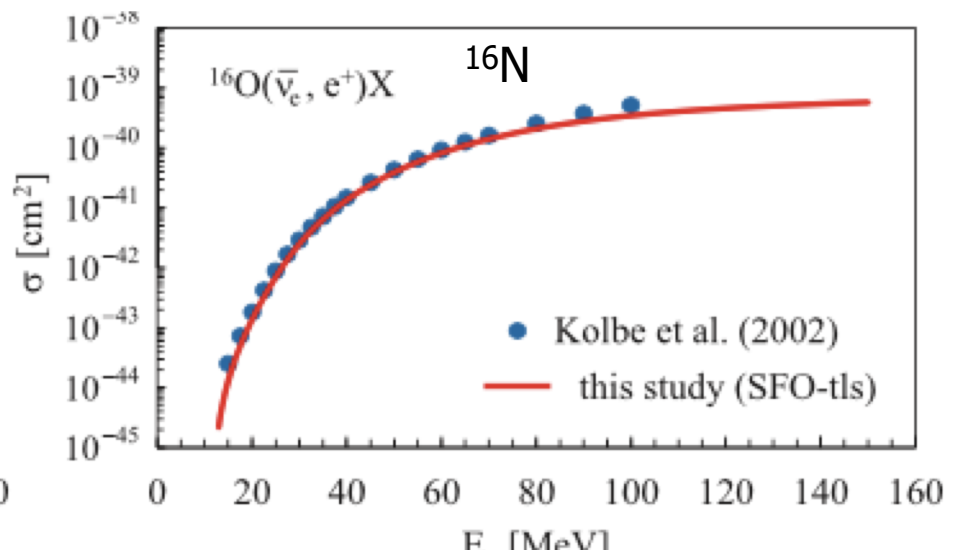
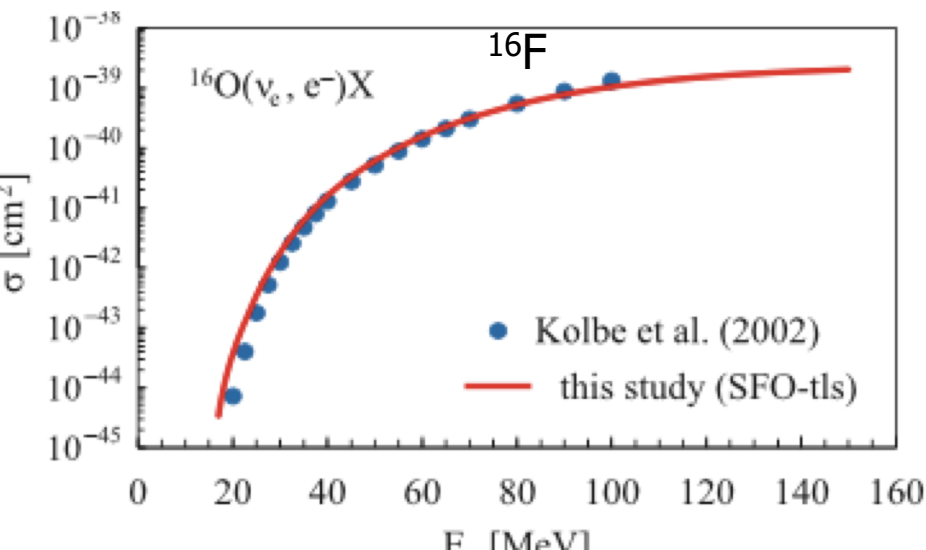
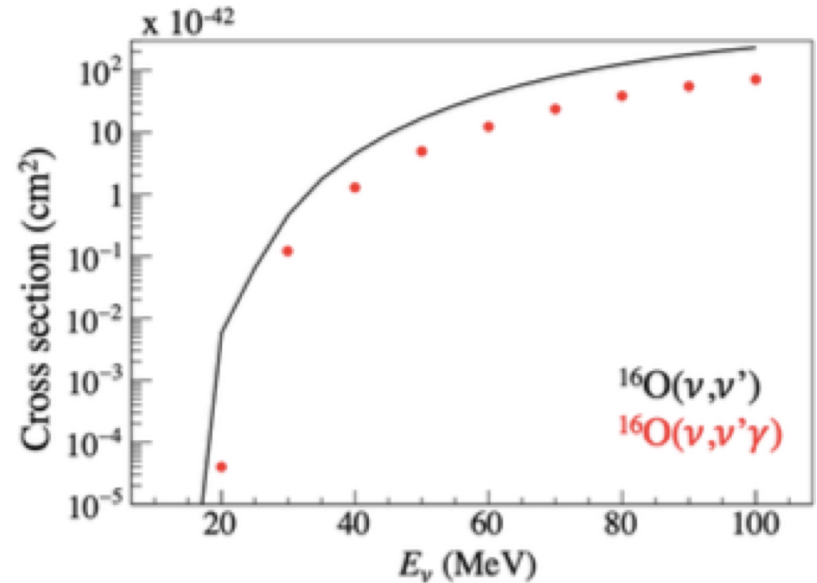


(3) SN 評価のためには、 $R_\gamma(E_x)$ において、 $T=1$ 状態の寄与のみ考慮する。 $T=0$ の寄与を外す。



NC $^{16}\text{O}(\nu, \nu')$, $(\nu, \nu' \gamma)$ とCC $^{16}\text{O}(\nu, e)^{16}\text{F}$, ^{16}N の比較 p15

- 断面積はSFO模型。 $R_\gamma(E_x)$: Ours.
- SN_ν のスペクトルの高い成分 $E_\nu = 20\text{--}30\text{MeV}$ で断面積が急激に増加。
 - CC, NC 同じ傾向. CC: $\nu_e, \bar{\nu}_e$ のみ。
 - CC: ν_e 反応の $E_{\text{th}} = 15.4\text{MeV}$.
 - CC: $\bar{\nu}_e$ 反応の $E_{\text{th}} = 10.4\text{MeV}$
 - NC: ν 反応の巨大共鳴 $E > 16\text{MeV}$.
 - NCは、Flavorの種類6個寄与。



4. (1)*(2)*(3)=SN 事象数評価: JUNO と SK (p19)

赤枠が新しい評価。黒(左)も確認のため計算。<E>の順にモデルを並べる。

■ JUNO (20 kton).

Reaction	mMB	Present work			JUNO Collab. [13] mMB
		NK1	FD	NK2	
$p(\bar{\nu}_e, e^+)n$	4140	2310	6950	12820	4300
NC $^{12}\text{C}(\nu, \nu')^{12}\text{C}^*(15.1 \text{ MeV})$	150	170	1030	840	170
NC $^{12}\text{C}(\nu, \nu')^{12}\text{C}^*(E_\gamma > 16 \text{ MeV})$	5	21	190	230	-

■ Super-K (32kton).

Reaction	mMB	Present work			Beacom-Vogel [8] FD
		NK1	FD	NK2	
$p(\bar{\nu}_e, e^+)n$	5900	3290	7960	18290	8300
NC $^{16}\text{O}(\nu, \nu')^{16}\text{O}^*(E_\gamma > 5 \text{ MeV})$	12	62	500	980	710
Cf. CC $^{16}\text{O}(\nu_e, e^-) + ^{16}\text{O}(\bar{\nu}_e, e^+)(E_e > 5 \text{ MeV})$ [25]	-	77	-	3831	-
νe elastic scattering [25]	-	140	-	514	-

■ Charged-current scattering off ^{16}O nucleus as a detection channel for SN neutrinos, K.Nakazato, T.Suzuki, MS, PTEP 2018,123E02. (32kton)

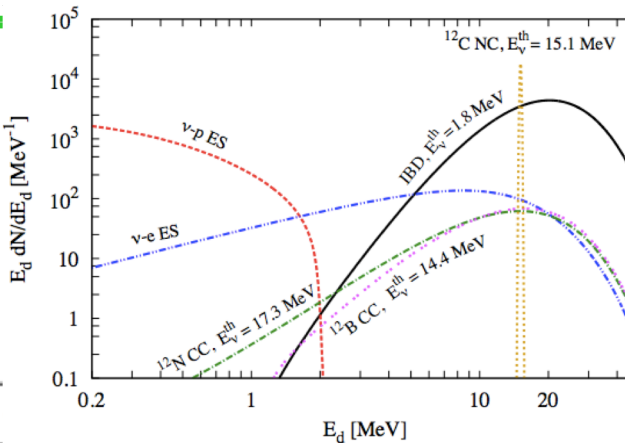
reaction	ordinary supernova			black hole formation		
	no osc.	normal	inverted	no osc.	normal	inverted
$^{16}\text{O}(\nu_e, e^-)X$	41	178	134	2482	2352	2393
$^{16}\text{O}(\bar{\nu}_e, e^+)X$	36	58	103	1349	1255	1055
electron scattering	140	157	156	514	320	351
inverse β -decay	3199	3534	4242	17525	14879	9255
total	3416	3927	4635	21870	18806	13054

■ エネルギー<E>によりNC事象数は、かなり変わりうる。CC ^{16}O とNC γ 事象は、無視できない数。

4-2) JUNO, F.An et al.(JUNO)J.Phys.G43(2016).

P20-skip

- NC_γ 事象はNC(15.1MeV γ 線)に比べてmMBでは少ない。
- 高いエネルギー成分があると、比率が増える。



Channel	Type	Events for different		
		12 MeV	14 MeV	16 MeV
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	CC	4.3×10^3	5.0×10^3	5.7×10^3
$\nu + p \rightarrow \nu + p$	NC	0.6×10^3	1.2×10^3	2.0×10^3
$\nu + e \rightarrow \nu + e$	ES	3.6×10^2	3.6×10^2	3.6×10^2
$\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{12}\text{C}^*$	NC	1.7×10^2	3.2×10^2	5.2×10^2
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{12}\text{N}$	CC	0.5×10^2	0.9×10^2	1.6×10^2
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^+ + {}^{12}\text{B}$	CC	0.6×10^2	1.1×10^2	1.6×10^2

Reaction	mMB	Present work			JUNO Collab. [13] mMB
		NK1	FD	NK2	
$p(\bar{\nu}_e, e^+)n$	4140	2310	6950	12820	4300
NC ${}^{12}\text{C}(\nu, \nu'){}^{12}\text{C}^*(15.1 \text{ MeV})$	150	170	1030	840	170
NC ${}^{12}\text{C}(\nu, \nu'){}^{12}\text{C}^*(E_x > 16 \text{ MeV})$	5	21	190	230	-

4-2) SK-Official SN monitor paper-

K. Abe et al. / Astroparticle Physics 81 (2016) 39–48

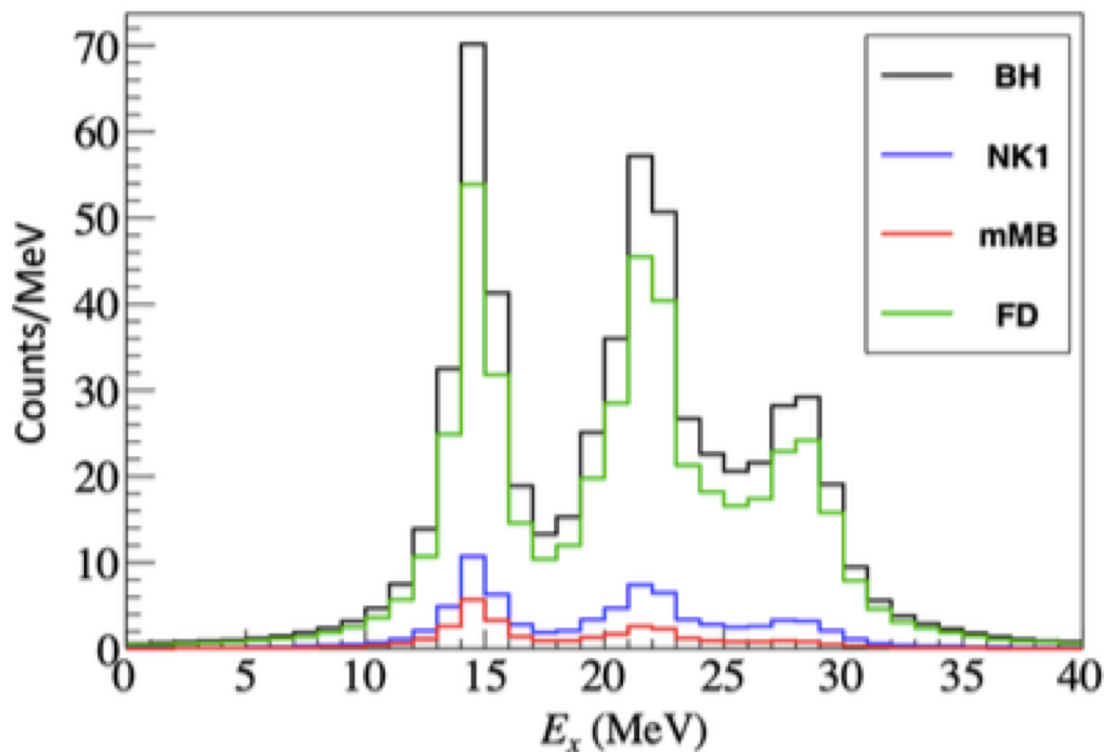
- NC γ 事象は、FD分布で、統計計算を使うと、Beacom-Vogelの評価をほぼ再現。我々の γ 線分岐比は統計計算より30%ほど小さい。
- NC γ 事象は、高いエネルギー成分があると、数が増える。精度が上がれば、CC $\nu_e^{16}\text{O}$ や ν_e elastic散乱と比べ、無視できない数である。

Reaction	mMB	Present work			Beacom-Vogel [8]
		NK1	FD	NK2	FD
$p(\bar{\nu}_e, e^+)n$	5900	3290	7960	18290	8300
NC $^{16}\text{O}(\nu, \nu')^{16}\text{O}^*(E_\gamma > 5 \text{ MeV})$	12	62	500	980	710
Cf. CC $^{16}\text{O}(\nu_e, e^-) + ^{16}\text{O}(\bar{\nu}_e, e^+)(E_e > 5 \text{ MeV})$ [25]	-	77	-	3831	-
ν_e elastic scattering [25]	-	140	-	514	-

	Wilson	NK1	NK2
	No osc.	No osc.	No osc.
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	4923	2076	1878
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$	74	43	39
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$	25	10	9
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	41	17	17
$\bar{\nu}_x + e^- \rightarrow \bar{\nu}_x + e^-$	34	14	13
$\nu_e + ^{16}\text{O} \rightarrow e^- + X$	8	22	16
$\bar{\nu}_e + ^{16}\text{O} \rightarrow e^+ + X$	64	27	20
Total	5169	2209	1992

4. SN NC $\nu^{16}\text{O}$ N_γ 事象数 vs 励起状態 E_x at SK

- mMB, NK1, FD の違いは、高いエネルギー成分の差と考えられる。mMBは、高い成分が少ない。Bias なしに計算する必要あり。
- BH の場合は元々の E_{tot} も大きいので、事象数が多い。



5. まとめと今後

23)

- 超新星爆発でのニュートリノ炭素・酸素中性カレントによる γ 線生成 NC_γ 事象数評価を行った。
 - 中里 et al. Flux+SFO 殻模型断面積計算 + E398 実験結果 $R_\gamma(E_x)$
- ^{12}C : NC_γ 事象数は $NC(15.1\text{MeV}\gamma\text{線})$ に比べて mMB では少ない。高いエネルギー成分があると、比率が増える。
- ^{16}O : NC_γ 事象は、高いエネルギー成分があると、数が増える。精度が上がれば、 $CC_{\nu_e^{16}\text{O}}$ や ν_e elastic 散乱と比べ、無視できない数である。
- 事象数評価は、モデル依存のないような計算が多くなっている。
- 今後：
 - (実験側) ^{12}C の $R_\gamma(E_x)$ は、PRC へ出版した。 ^{16}O の $R_\gamma(E_x)$ 結果もまとめ中。
 - (実験側) 我々は $R_\gamma(E_x)$ の系統誤差を少なくする解析努力。
 - (SN 評価) [要相談] 1) ^{12}C の $NC_\gamma + CC$ を合わせて出版。2) ^{12}O は、解析努力中。
- 原子核物理としての $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}(p, p')$ 測定：
 - We will measure $R_\gamma(E_x) = \sigma_{p, p'\gamma} / \sigma_{p, p'}$ over $E_x = 16\text{--}33\text{ MeV}$ for both Hadronic decays and Electromagnetic decays more precisely.
 - $^{12}\text{C}^* \rightarrow p + ^{11}\text{B}$, $n + ^{11}\text{C}$, $^{16}\text{O}^* \rightarrow \alpha + ^{12}\text{C}^* \rightarrow p + ^{11}\text{B}$, $n + ^{11}\text{C}$ の分岐比も定量的に測れている。元素合成に関わる?。HF 法よりは良いと思う。



T2K γ production from NC $\nu^{16}\text{O}$ reaction

skip

- T2K 6 MeV γ ray @ $E_\nu \sim 600\text{MeV}$
- Important for SRN background estimation, Proton decay, Sterile ν Search.

T2K 6MeV γ

