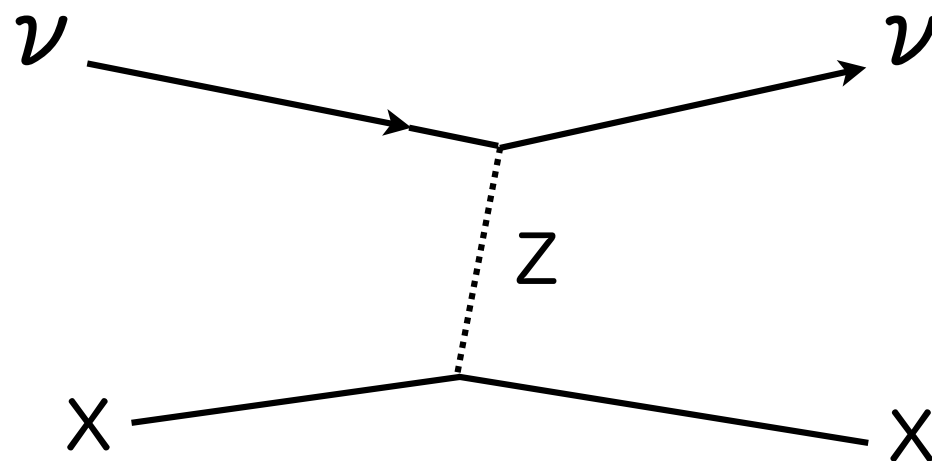


(一般シンポジウム) 軽中重核の電弱励起・崩壊と宇宙物理

中性カレントニュートリノ検出計画

(超新星ニュートリノに関して)



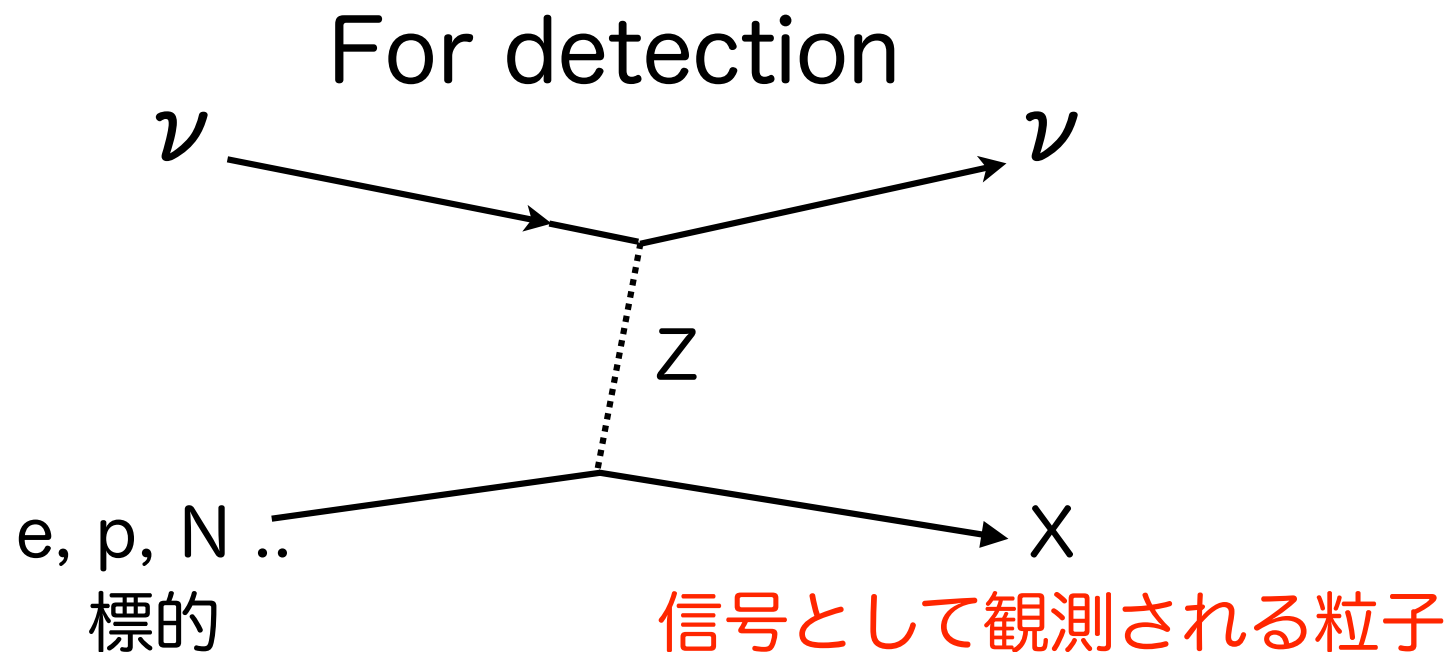
小汐由介 (岡山大)

日本物理学会

2020年9月17日 / オンライン開催



中性カレントニュートリノ反応



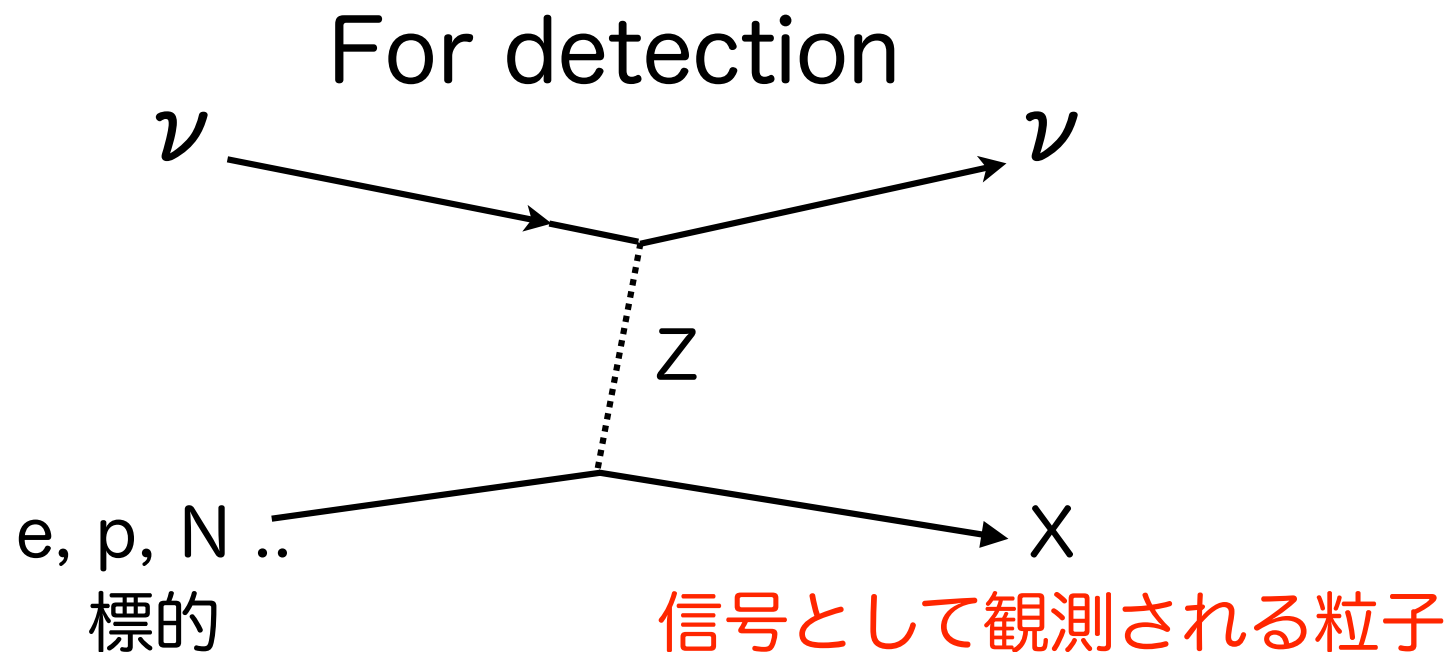
$$\nu + e \longrightarrow \nu + e$$

$$\nu + N \longrightarrow \nu + N' + \gamma$$

$$\nu + N \longrightarrow \nu + N' + \pi$$

...

中性カレントニュートリノ反応



Why neutral current interaction?

ニュートリノ振動によらない

中性カレントニュートリノ反応

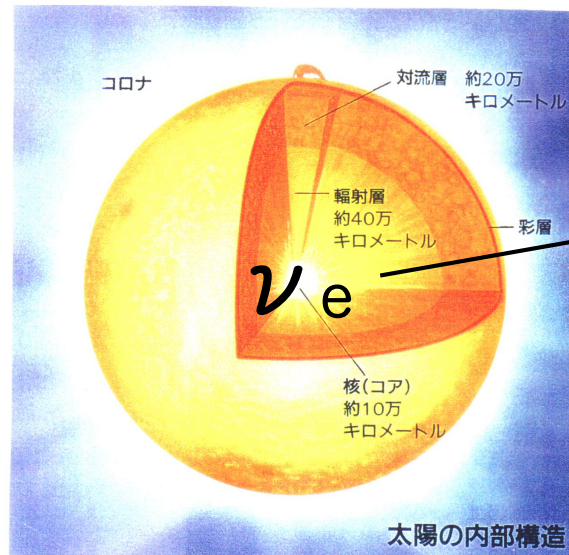
Why neutral current interaction?

ニュートリノ振動によらない



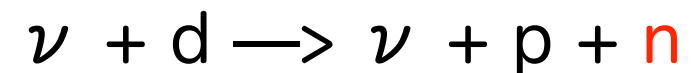
天体ニュートリノ観測では重要

太陽ニュートリノ



ν_x

(SNO experiment)



ニュートリノ振動によらない
太陽ニュートリノ Flux を測定

中性カレントニュートリノ反応

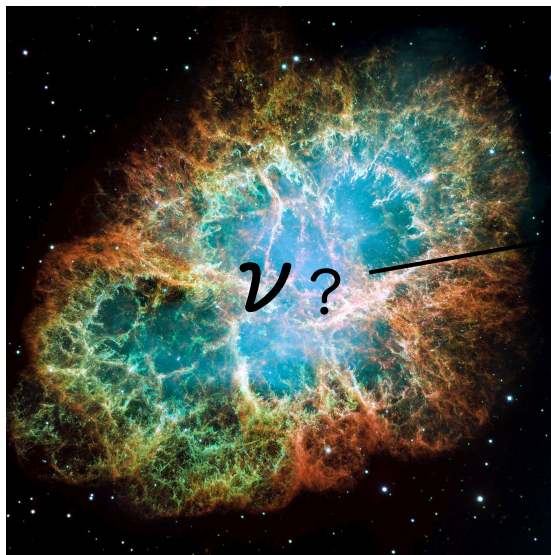
Why neutral current interaction?

ニュートリノ振動によらない

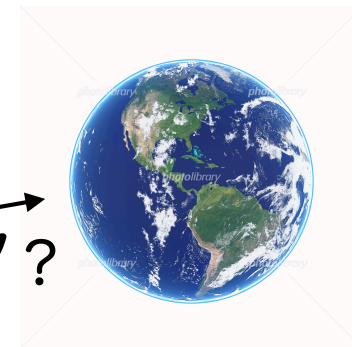


天体ニュートリノ観測では重要

超新星ニュートリノ



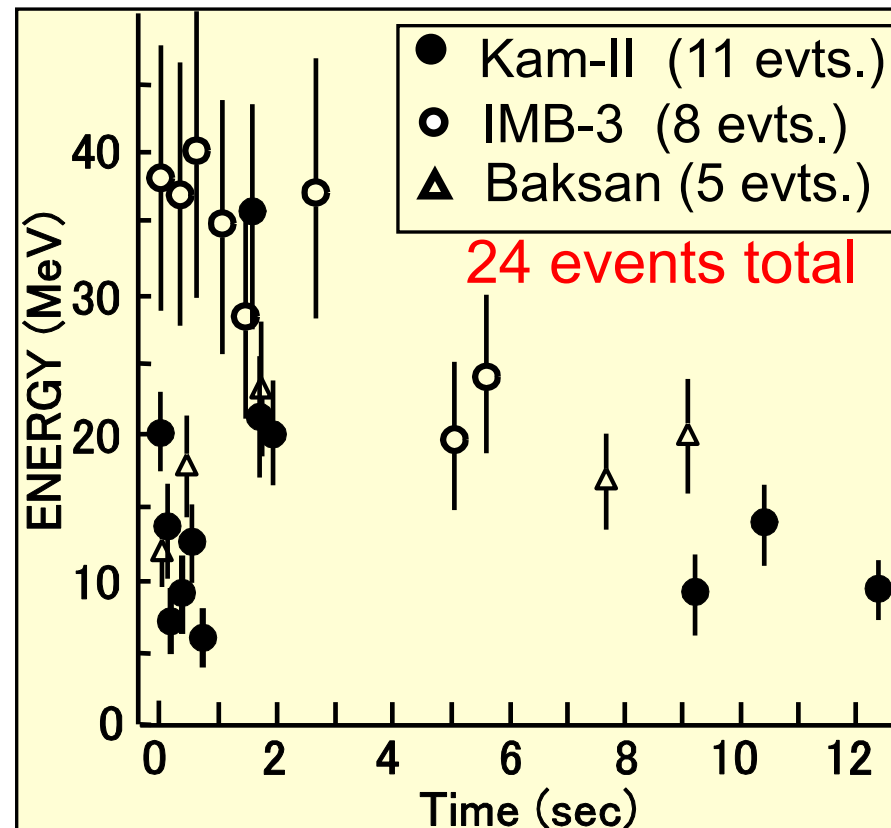
ν ?



ニュートリノ生成
ニュートリノ振動
共に複雑

超新星ニュートリノ

SN1987A in Large Magellanic Cloud



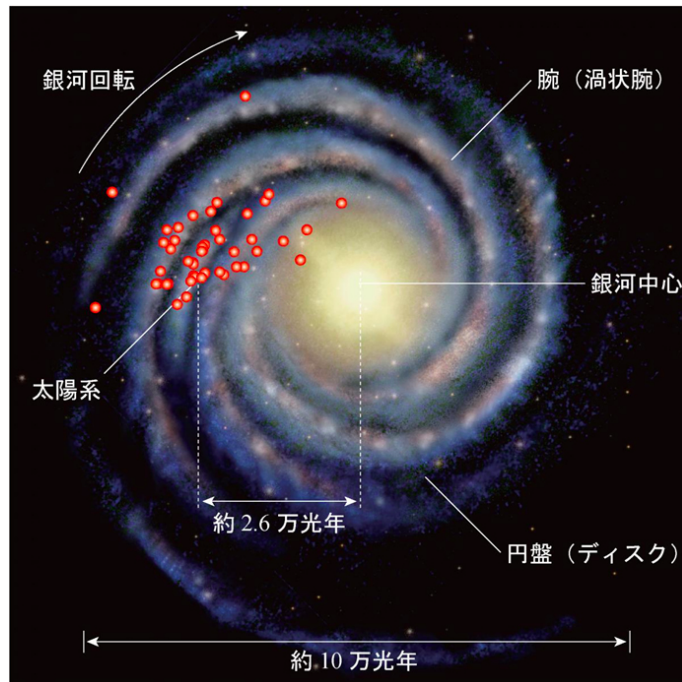
肉眼で見えるほど明るい超新星爆発は約400年ぶり
その後も30年以上起こっていない

次の超新星ニュートリノ観測まで
数百年待たないといけない??

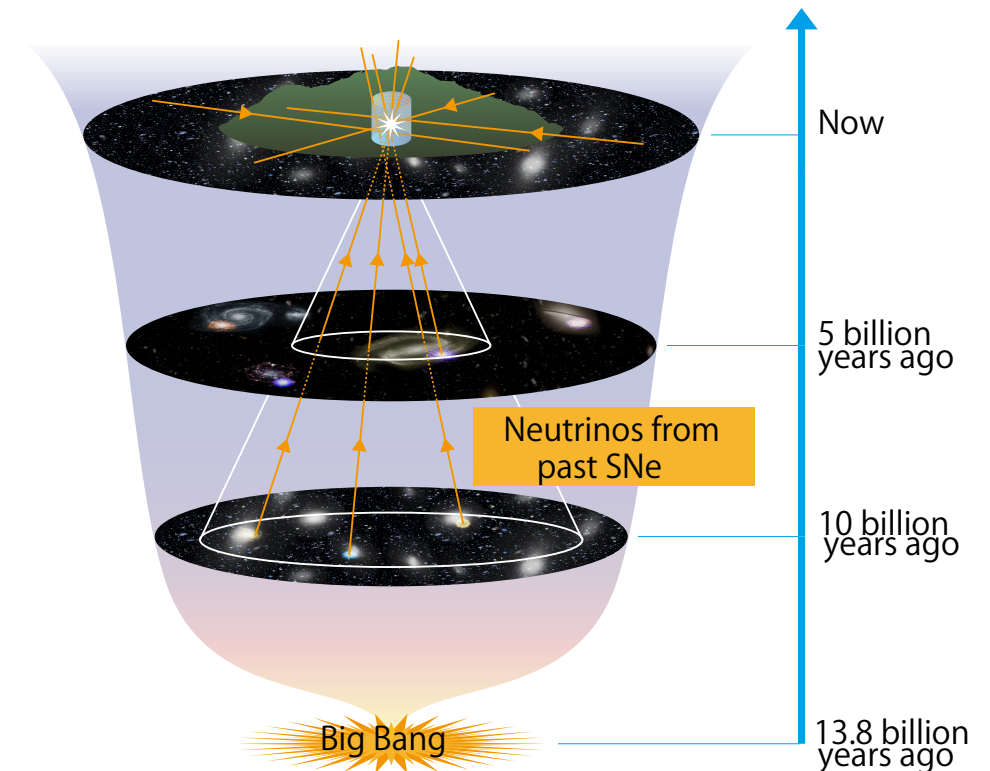


そんなことはないはず!

銀河系内超新星爆発
(a few per century)



超新星背景ニュートリノ



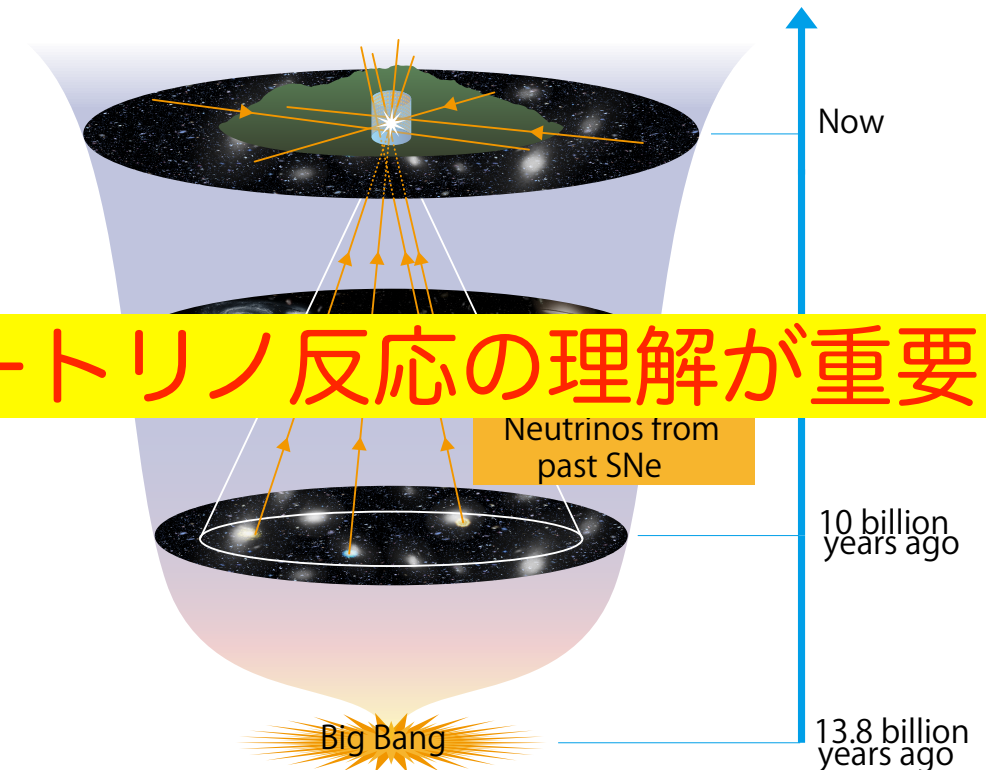
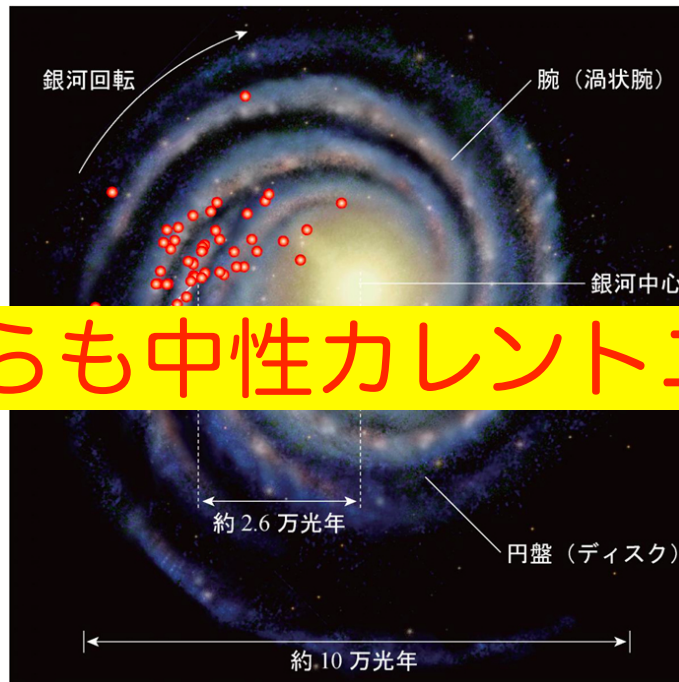
次の超新星ニュートリノ観測まで
数百年待たないといけない??



そんなことはないはず!

銀河系内超新星爆発
(a few per century)

超新星背景ニュートリノ

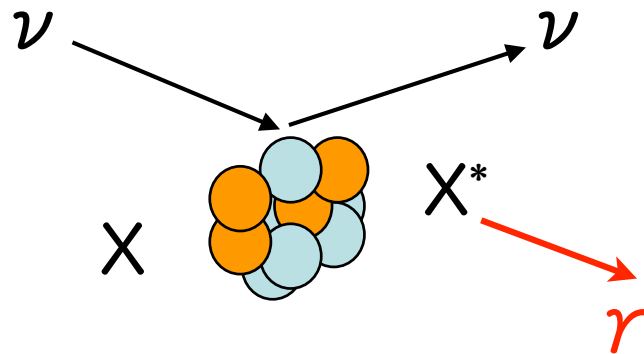


どちらも中性カレントニュートリノ反応の理解が重要

中性カレントニュートリノ反応

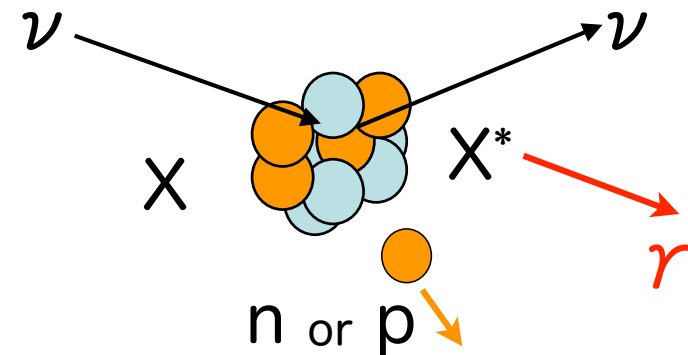
超新星ニュートリノ観測では、原子核との反応により
ガンマ線を発生する以下の2つの反応が重要

巨大共鳴 ($E_\nu < 100 \text{ MeV}$)



- ✓ C, O : Langanke et al., PRL76 (1996)
- ✓ $C^* \rightarrow \gamma (15.1 \text{ MeV})$, $O^* \rightarrow \gamma (> 5 \text{ MeV})$
- ✓ RCNP E398 : BR measurement
- ✓ 銀河系内超新星爆発ニュートリノ

準弾性散乱 ($E_\nu > 100 \text{ MeV}$)



- ✓ O : Ankowski, Benhar, Sakuda et al. PRL108 (2012)052505
- ✓ RCNP E148, K2K, T2K, SK atm.
- ✓ 超新星背景ニュートリノのBG
- RCNP E487/E525 : n-O reaction

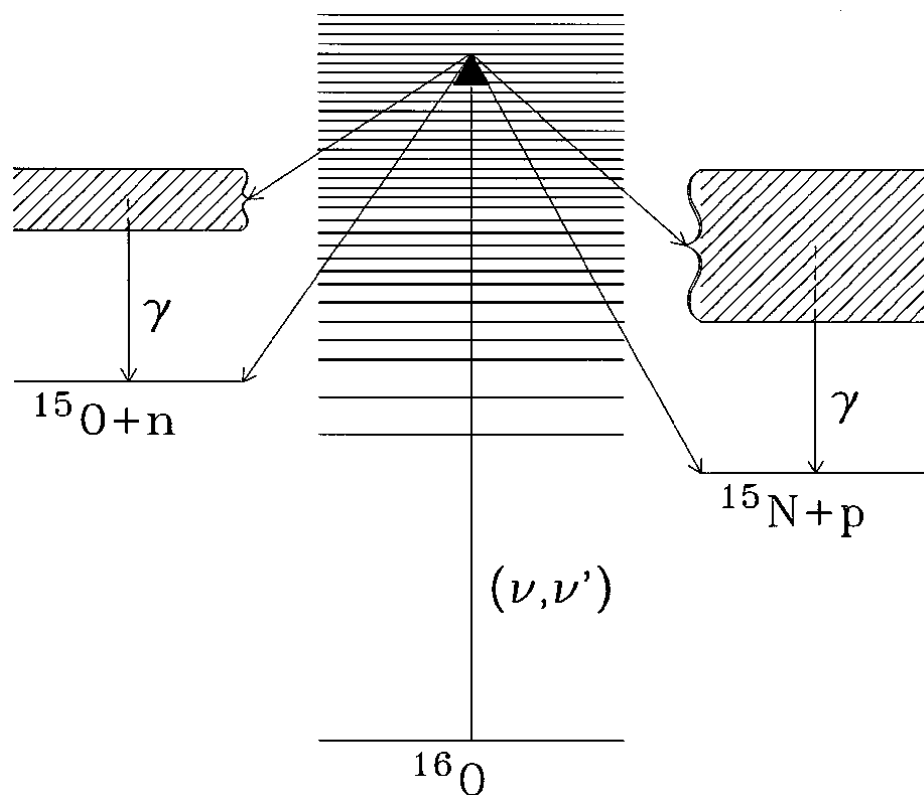
銀河系内 超新星爆発ニュートリノ

(中性カレント反応を直接測定)

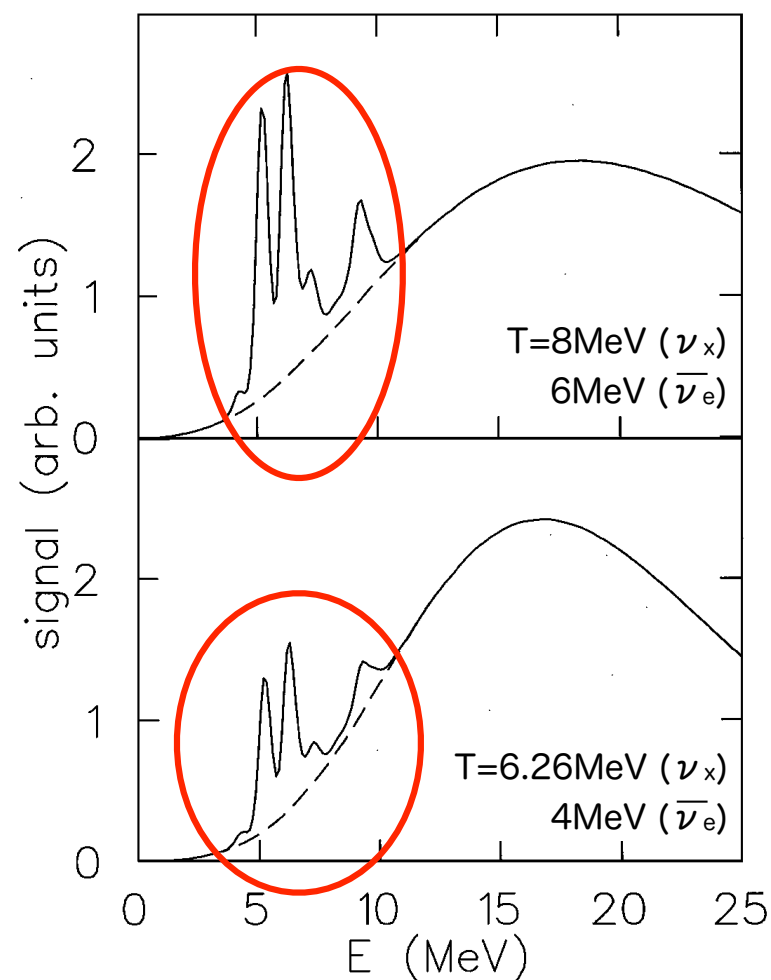
中性カレント反応 (巨大共鳴)

Langanke, Vogel, Kolbe PRL, 76, 2629 (1996)

酸素原子核における巨大共鳴の模式図



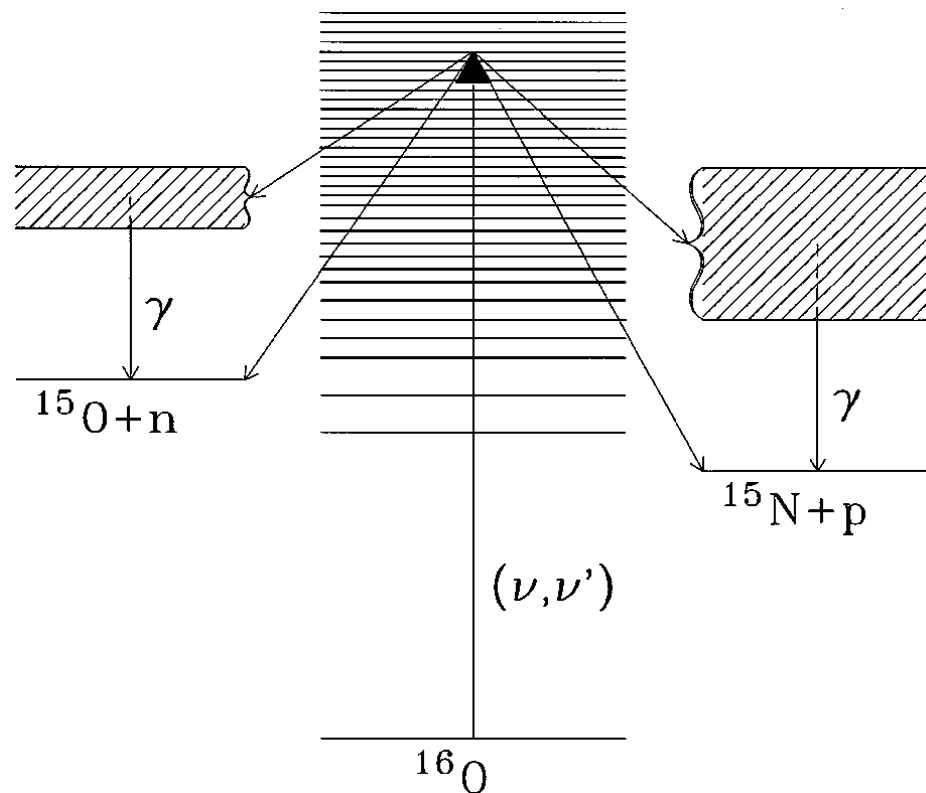
水チェレンコフ検出器で
期待されるエネルギー分布



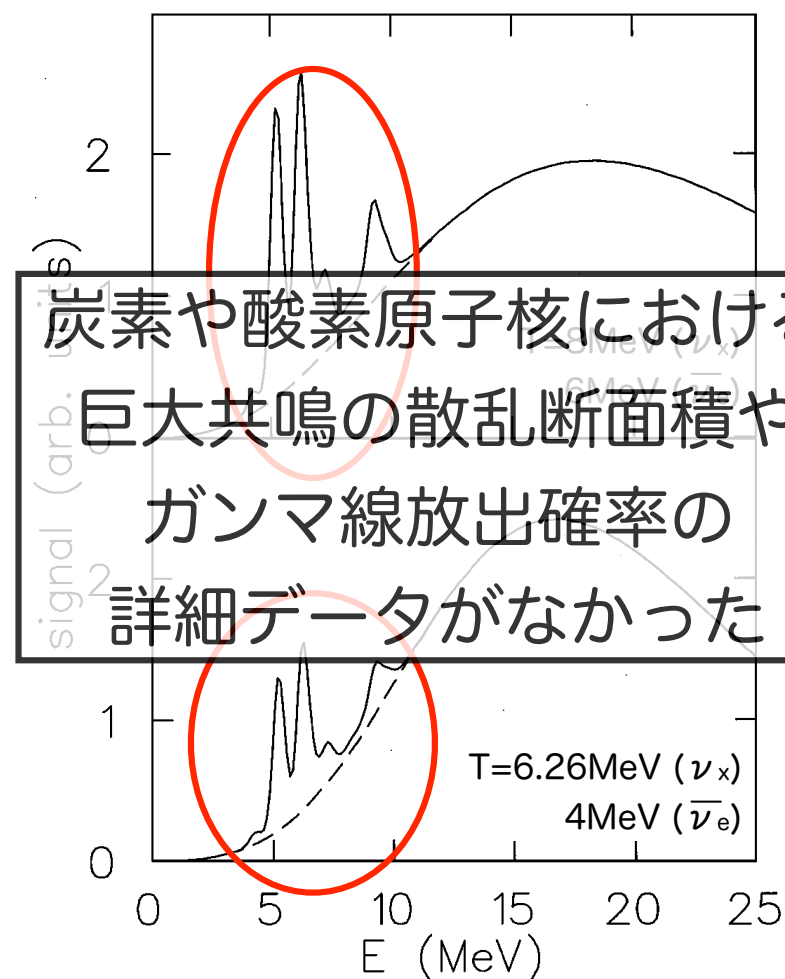
中性カレント反応 (巨大共鳴)

Langanke, Vogel, Kolbe PRL, 76, 2629 (1996)

酸素原子核における巨大共鳴の模式図



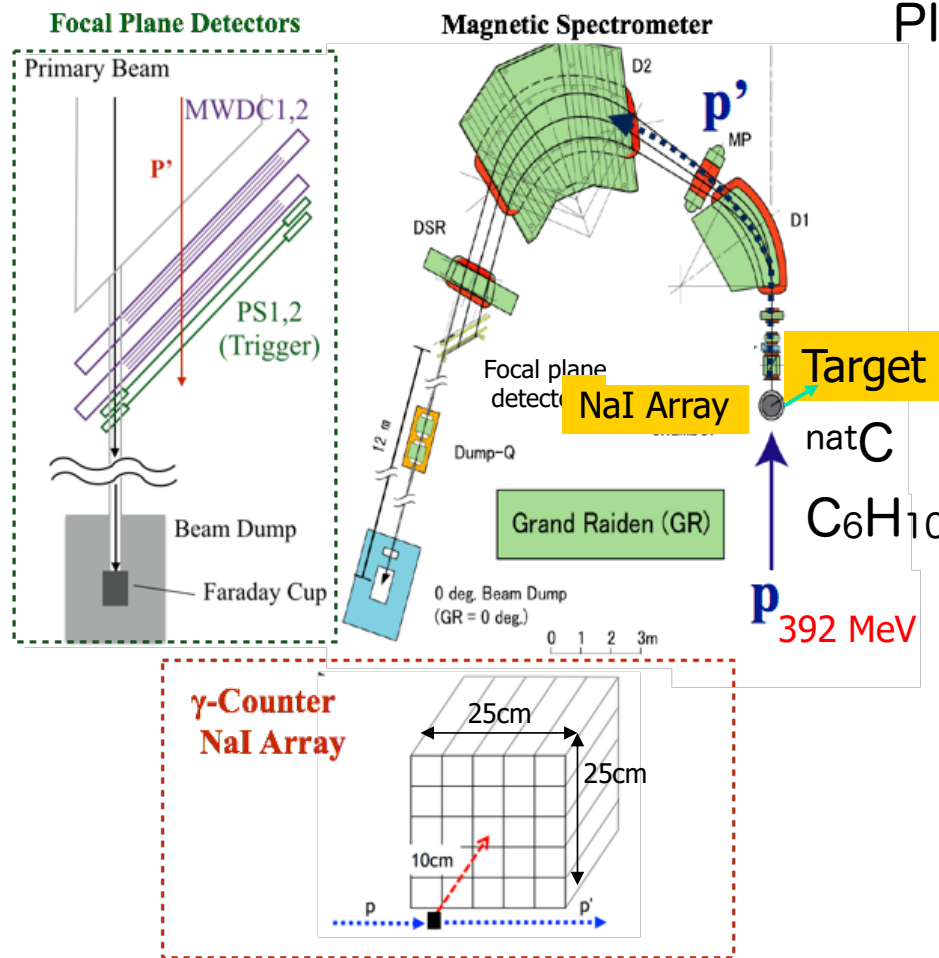
水チェレンコフ検出器で
期待されるエネルギー分布



RCNP E398 ^{12}C , ^{16}O (p,p' γ)

巨大共鳴散乱断面積とガンマ線放出確率の測定

PI : M. Sakuda (Okayama) / A. Tamii (Osaka)



— 励起エネルギー ($E_x = E_p - E_{p'}$) —

Magnetic Spectrometer “Grand Raiden”

$\Delta E_x = 100\text{--}200\text{keV}$

$\theta_{\text{scat}} = 0^\circ$ (covers $0^\circ\sim 3^\circ$)

— ガンマ線エネルギー (E) —

NaI(Tl) x 25 Array

Solid angle x Detection efficiency

$\sim 6\% @ 15.1\text{MeV}$

$\Delta E \sim 2.7\% @ 15.1\text{MeV}$

1.5MeV threshold, 5ns time resolution

OMEG15 presented by M. Sakuda

超新星爆発で期待される事象数

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

ガンマ線放出確率
(E398実験)

超新星爆発で放射されるニュートリノスペクトル

mMB : modified Maxwell-Boltzmann in $\langle E_{\nu} \rangle = 12 \text{ MeV}$

FD : Fermi-Dirac in $T = 3.5, 5, 8 \text{ MeV}$ for $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_x$

NK1 : ordinary Nakazato model $(M, Z) = (20 M_{\odot}, 0.02)$

NK2 : $(M, Z) = (30 M_{\odot}, 0.004)$ and black hole forming

巨大共鳴散乱断面積

SFO model

(with new p-shell Hamiltonian,
well reproduce LSND/KARMEN)

PRC 67, 044302 (2003)

PRC 98, 034613 (2018)

preliminary! Super-K 32.5kton @10kpc

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	-
νe elastic scattering [25]	-	140	-	514	-

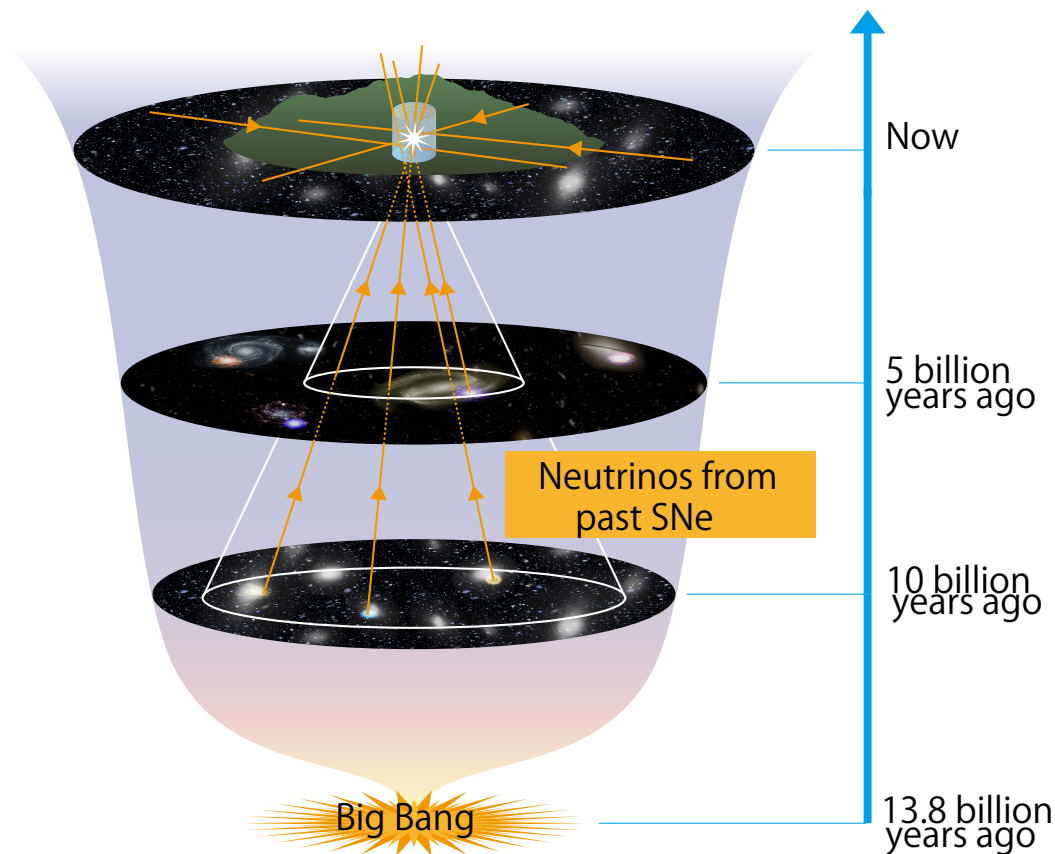
M.Reen et.al., JPS Conf. Proc. 31, 011014 (2020)

超新星背景ニュートリノ

(大気ニュートリノによる中性カレント反応がBG)

超新星背景ニュートリノ探索

Suprenova Relic Neutrino (SRN)



- ・約10秒間バースト的に発生する超新星爆発ニュートリノと異なり、常に漂っているフラックスの小さい信号の探索になる。したがってバックグラウンド事象との識別が鍵となる。
- ・バックグラウンド事象の識別には同時遅延計測手法が強力な武器

超新星背景ニュートリノ探索

Search in Super-Kamiokande IV (2008-2018)

50000トン水チェレンコフ検出器

17pSD-6 : Y. Ashida

SRN flux limit : preliminary!

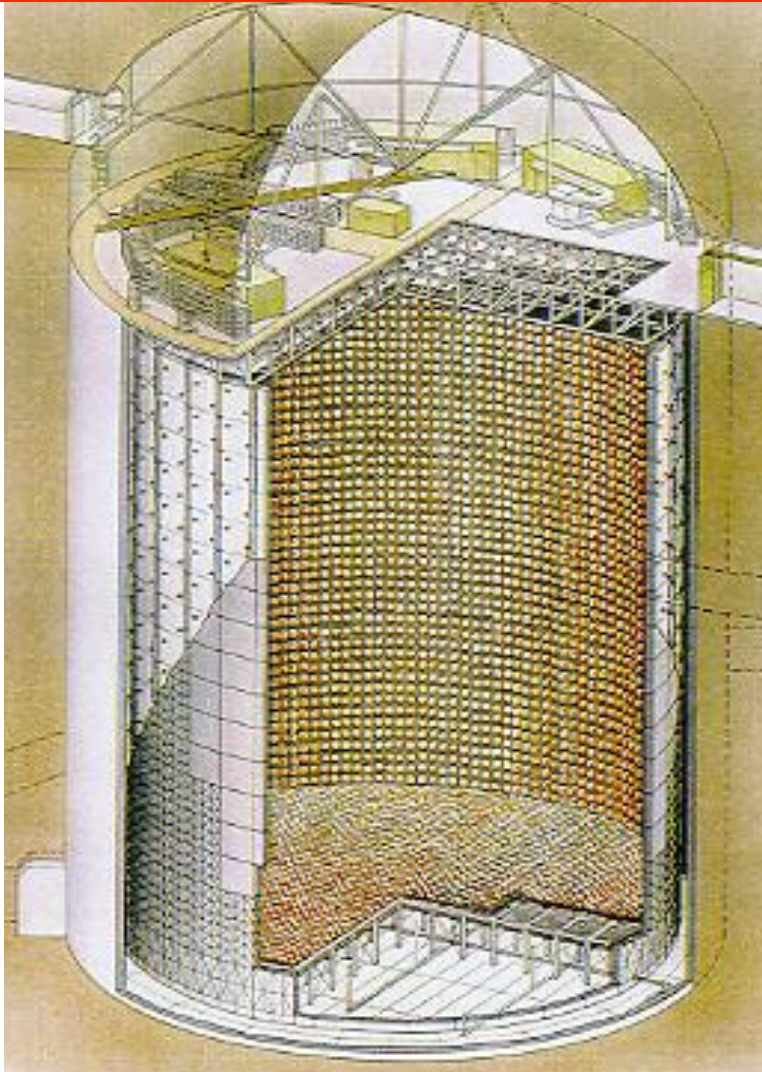
$$\phi_{90} < 2.7 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$$

(Ando model expected : $1.7 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$)

Search Results & Integrated SRN Electron Antineutrino Flux [$\text{cm}^{-2}/\text{sec.}$]

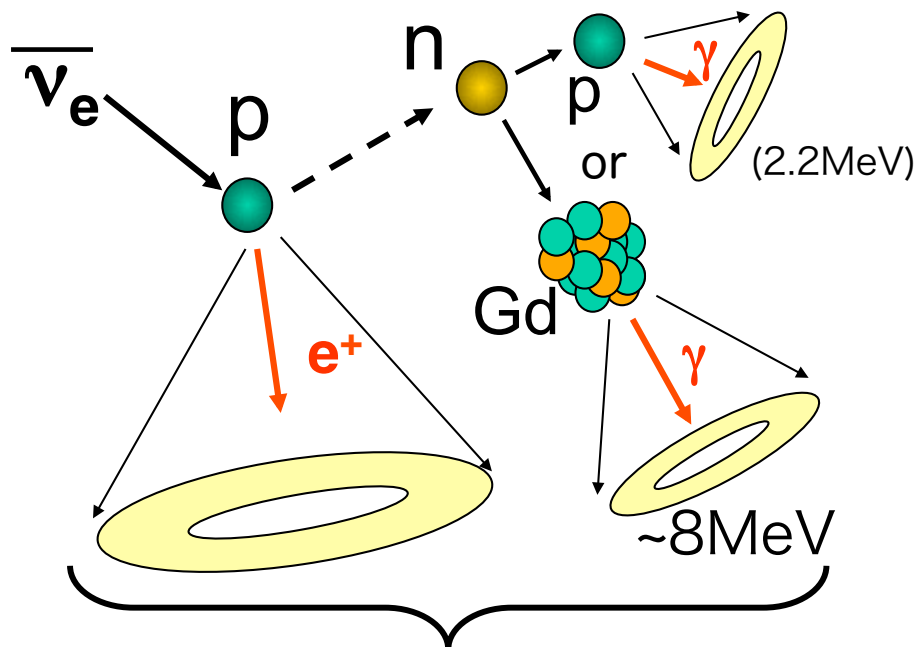
$E_{\bar{\nu}}$ region [MeV]	13.3–19.3	19.3–25.3	25.3–31.3
SK-IV 2970 days (Expected)	9.48	1.35	0.82
SK-IV 2970 days (Observed)	9.08	2.22	0.35
Nakazato+15 (Minimum, NH)	0.337	0.089	0.026
Horiuchi+09 (6 MeV, Maximum)	2.534	0.887	0.314
Ando+03 (updated at NNN05)	2.652	0.796	0.261

理論予測に迫っている



Super-Kamiokande with Gd

逆ベータ崩壊反応

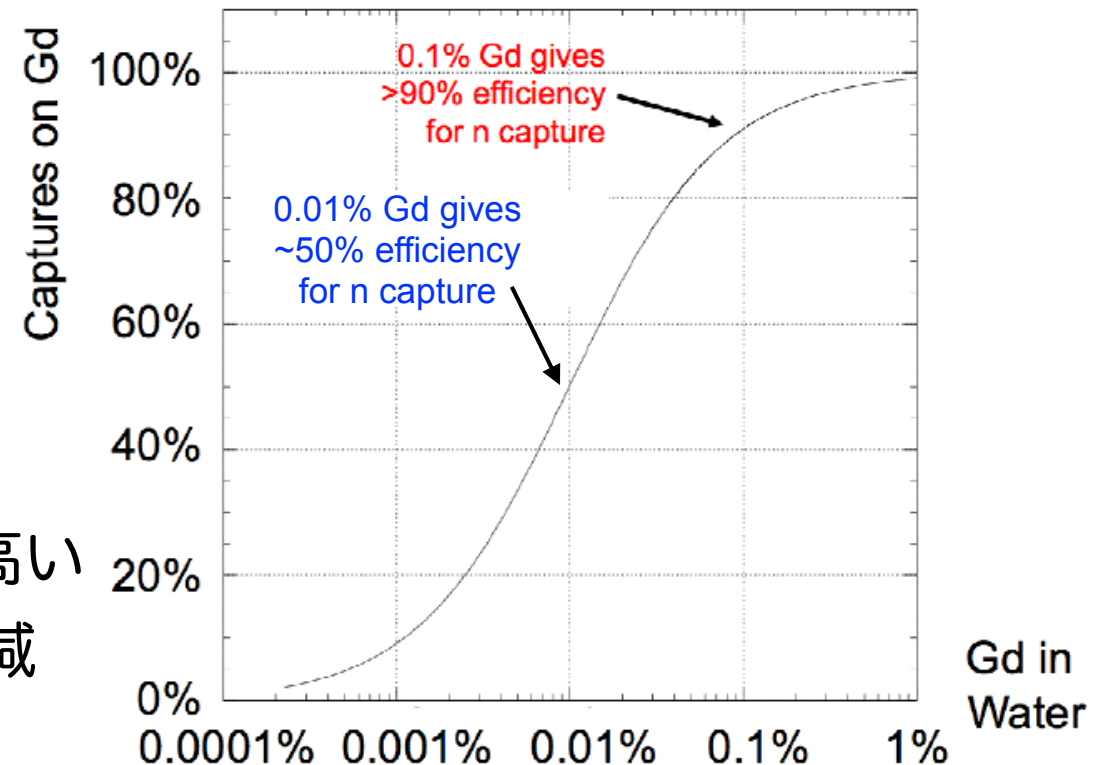


同時遅延計測

中性子捕獲信号のエネルギーが高い
 $\bar{\nu}_e$ 信号に対するBGを劇的に削減
 $\Delta T \sim 20 \mu\text{sec}$ (0.1% Gd)
 Vertices within $\sim 50\text{cm}$

Dissolve Gadolinium into Super-K

J.Beacom and M.Vagins,
 Phys.Rev.Lett.93 (2004) 171101



いよいよ始まるSK-Gd実験

2004 ● Proposed

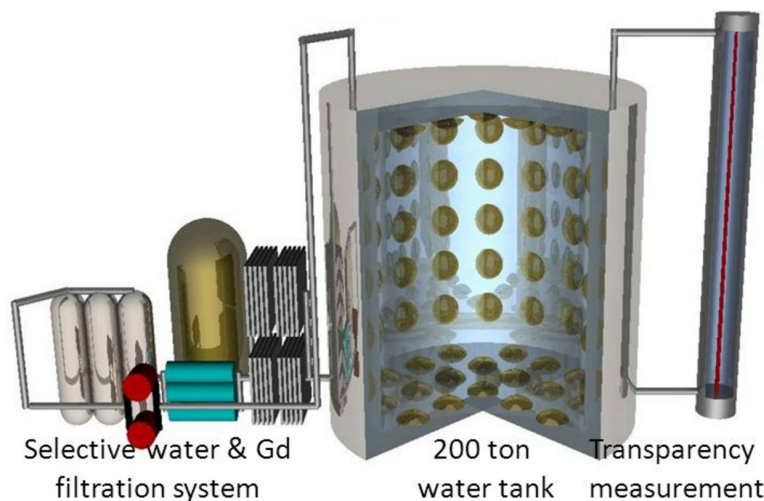
2009 ● EGADS start

2015 ● SK-Gd approved in collaboration

2018 ● Tank open work for leak fixing

2020 ● 0.01% Gd loading in SK!
More Gd loading in prep.

202X SRN discovery!?

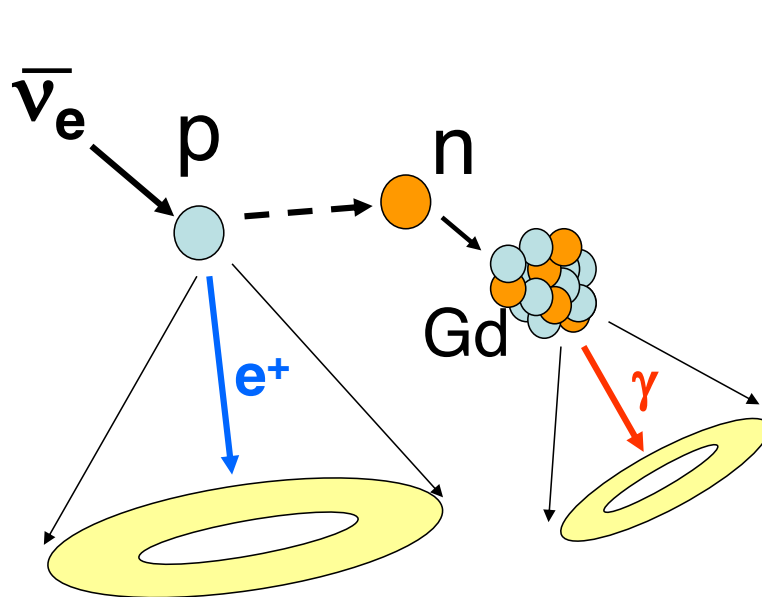


16pSN-1 : G. Pronost
16pSN-2 : S. Ito
16pSN-3 : L. M. Magro
16pSN-4 : M. Harada
16pSN-5 : S. Sakai

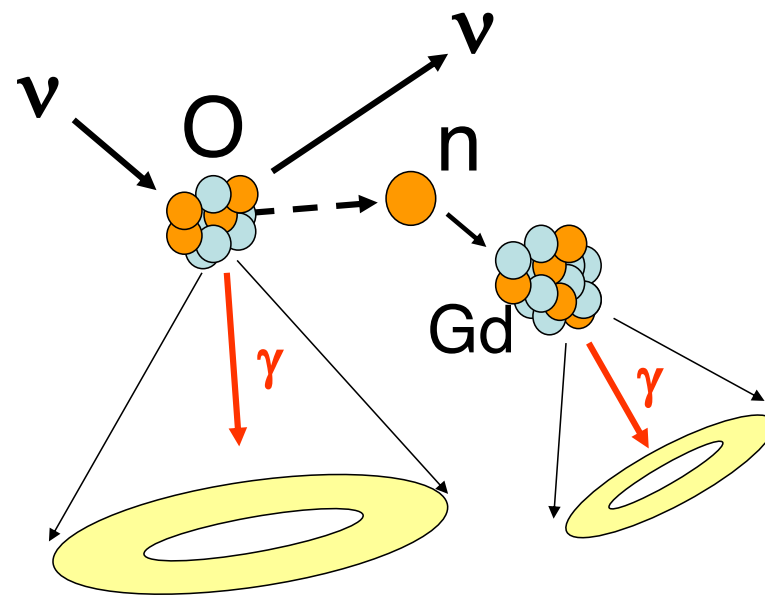


大気ニュートリノ起源 BG

超新星背景ニュートリノ信号
(逆ベータ崩壊)



大気ニュートリノ中性カレント反応
によるバックグラウンド事象



区別がつかない



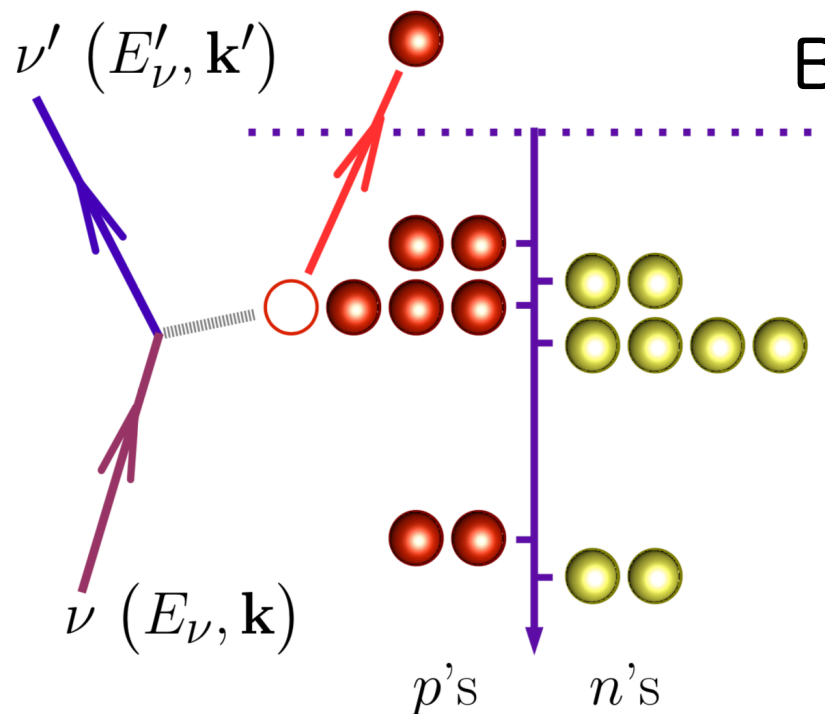
中性カレントニュートリノ反応を理解し
正確なバックグラウンドの見積もりが必要

中性カレント準弾性散乱反応

Neutral Current Quasi Elastic (NCQE)

反応により励起した原子核の脱励起ガンマ線

Typical energy < 10MeV → SRN 信号領域



Basic three states + Others state

$P_{1/2}$: no gamma-ray emission

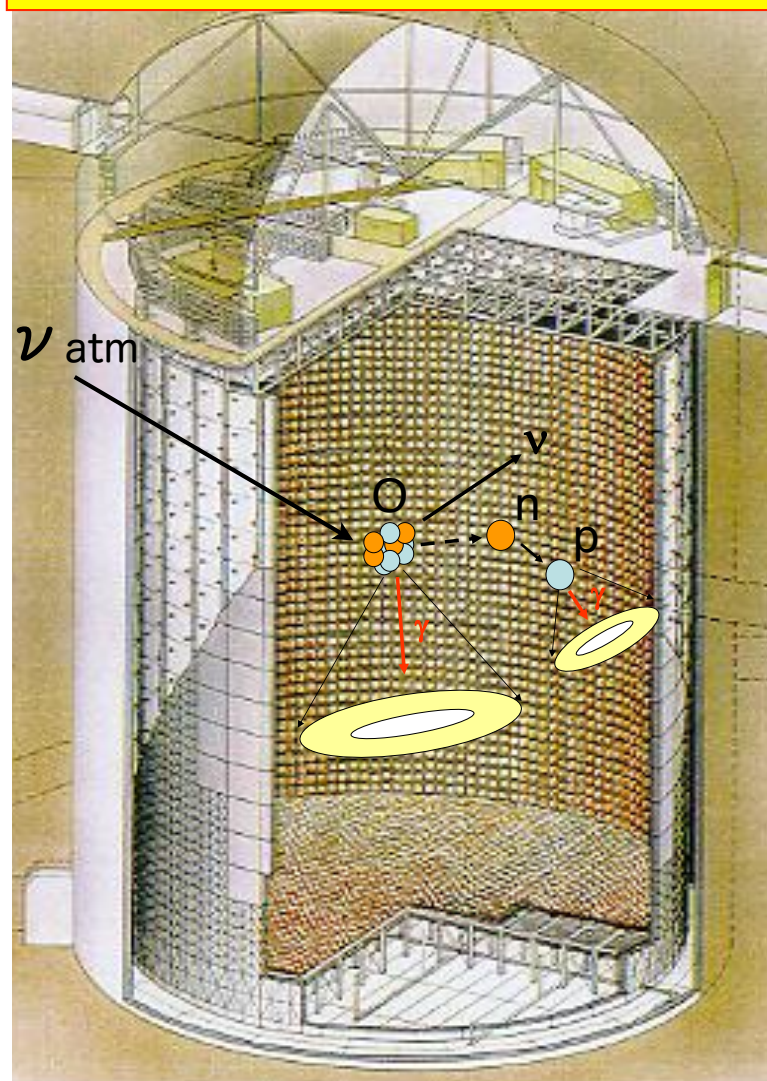
$P_{3/2}$: gamma-ray emission
(6.18, 6.32MeV, etc.)

$S_{1/2}$: particle (p, n, α , etc) decay
+ gamma-ray emission

Others : short range correlation
or higher excited state

大気ニュートリノNCQE測定

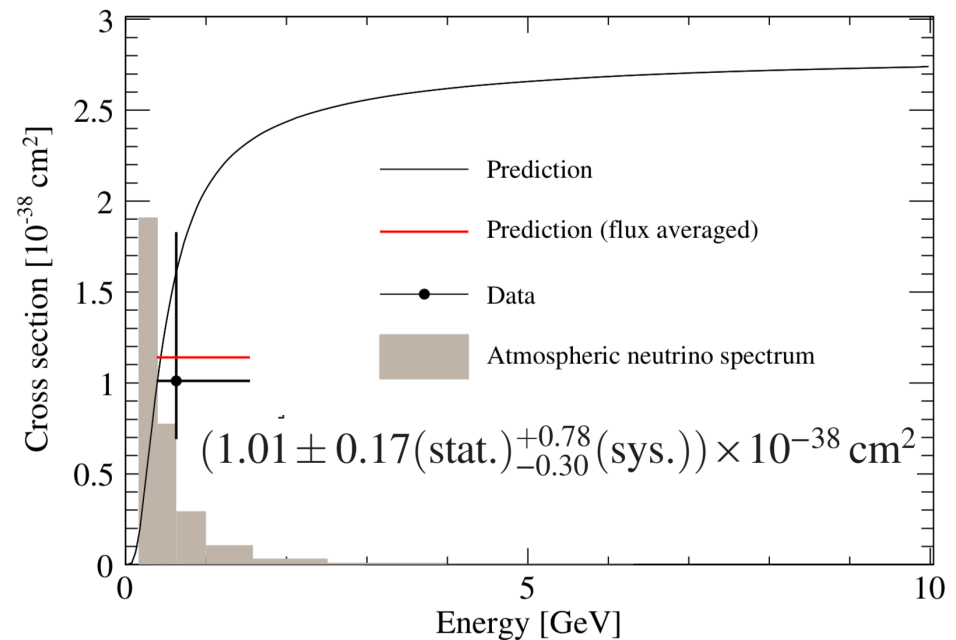
50000トン水チェレンコフ検出器



SK-IVで観測成功

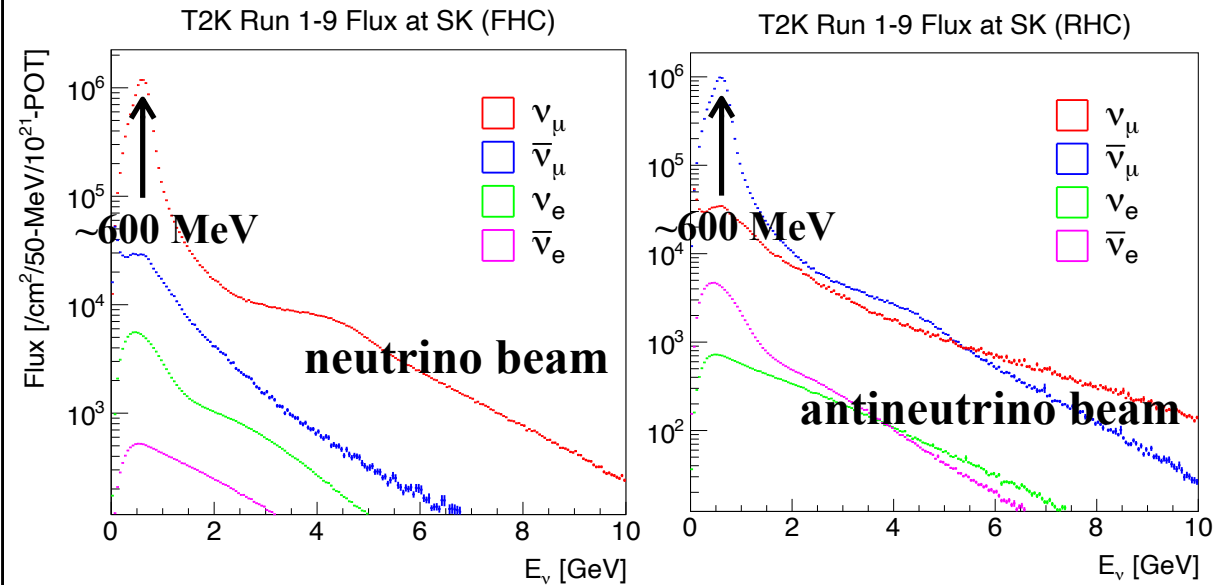
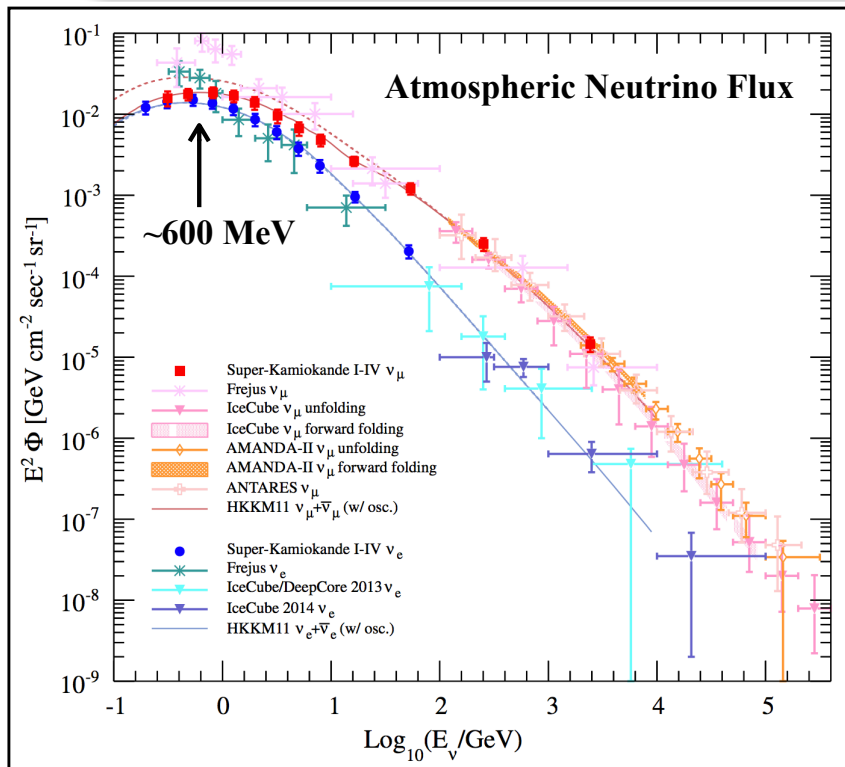
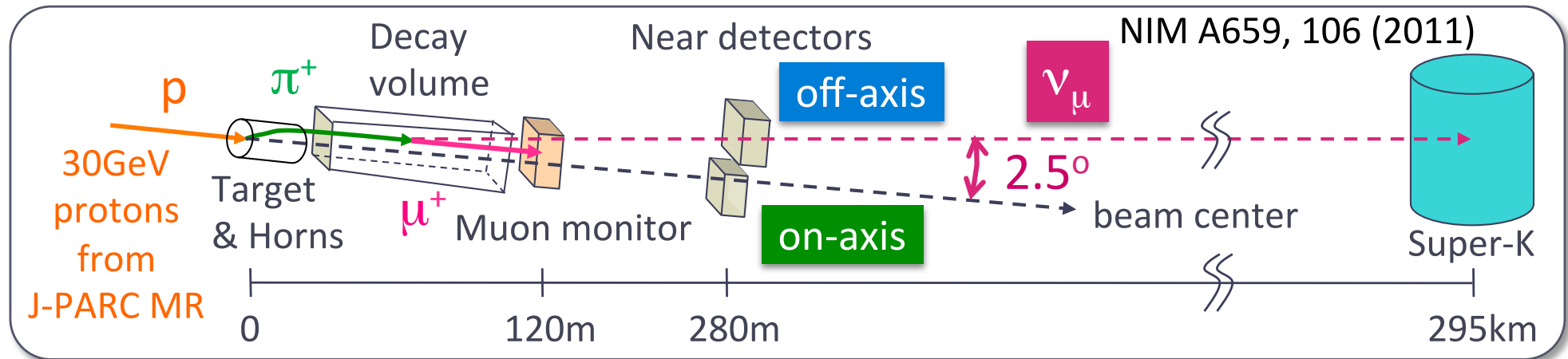
L.Wan et al. (SK collaboration), PRD 99, 032005 (2019)

NCQE cross section in
atmospheric neutrino energy range



More than 70% systematic error..

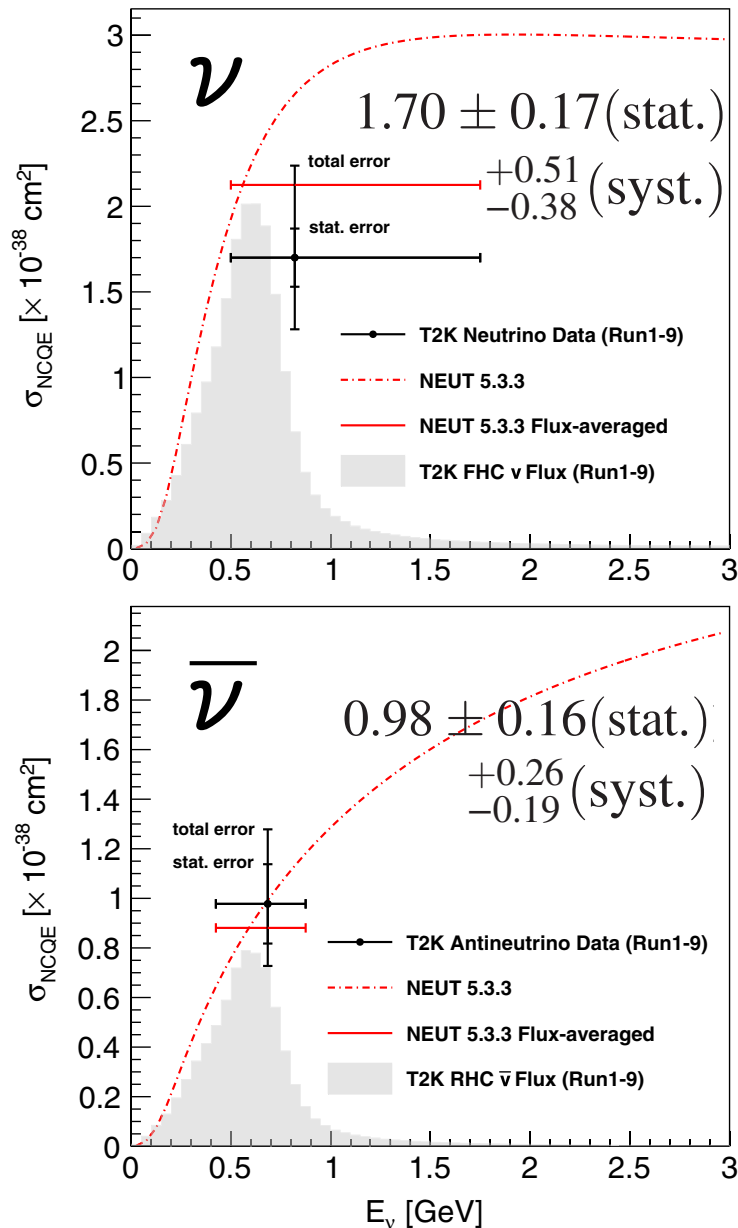
T2K実験での NCQE 測定



T2K beam has similar energy region as atmospheric neutrinos

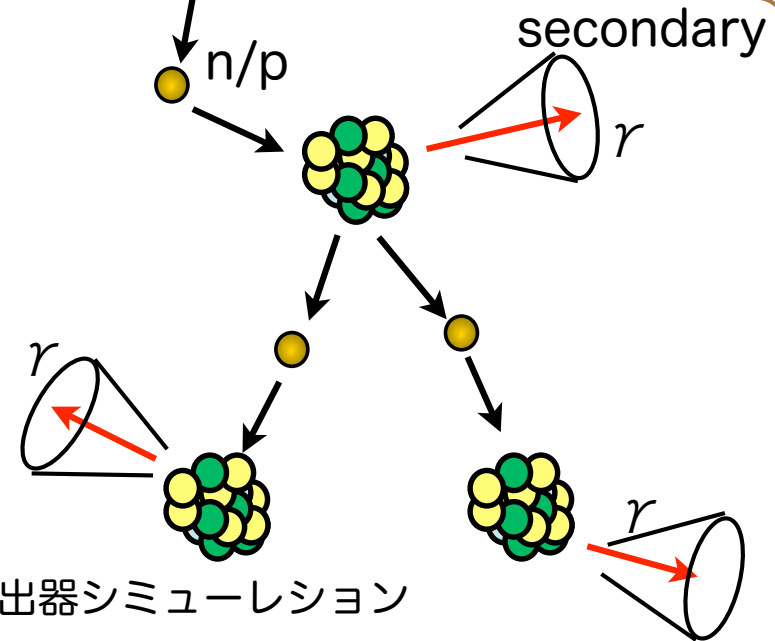
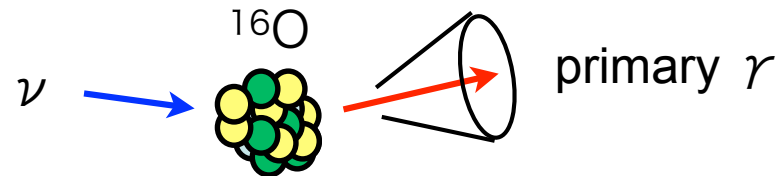
T2K実験での NCQE 測定

K.Abe et al. (T2K collaboration) PRD 100, 112009 (2019)



Dominant systematic error is **primary** and **secondary** gamma-ray production

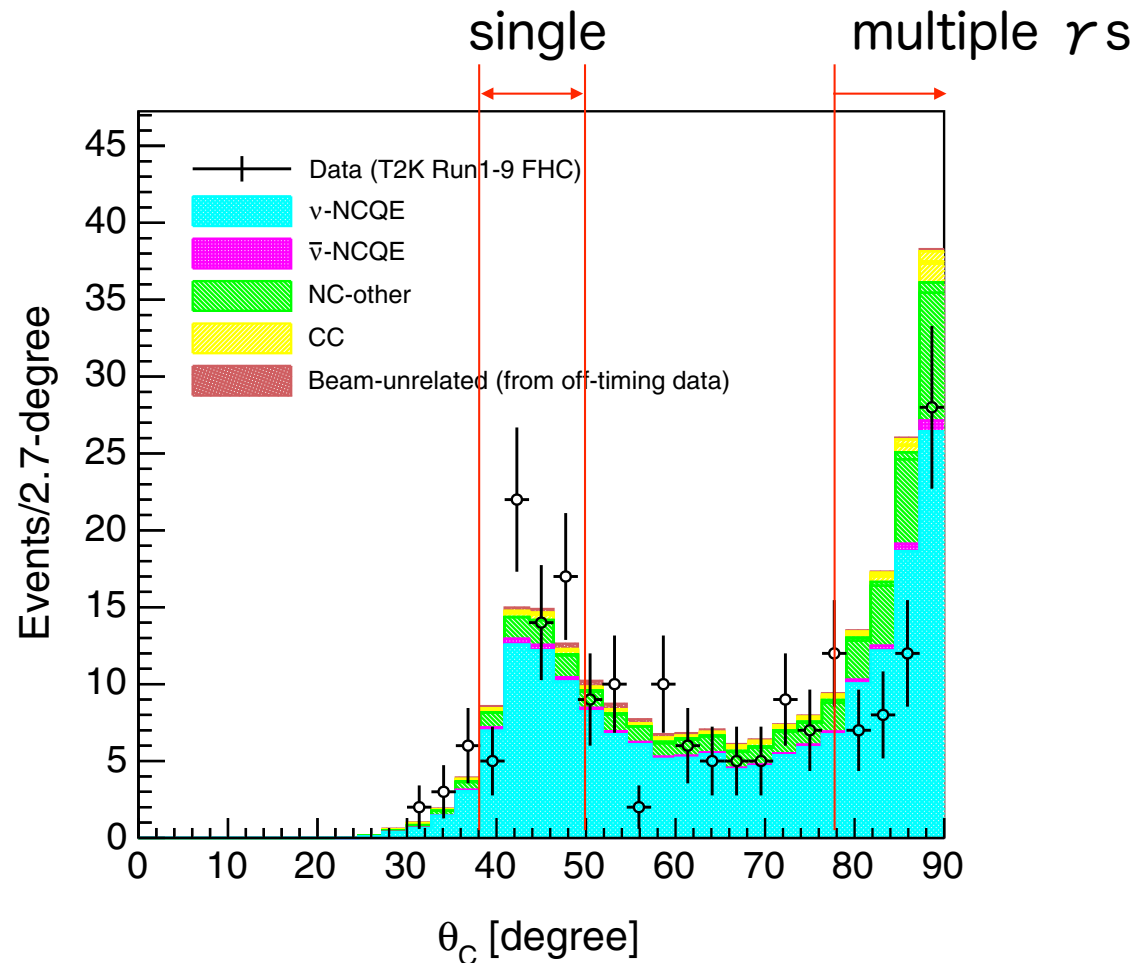
ニュートリノ反応 (Ankowski et al.)



検出器シミュレーション
(GEANT3 based - GCALOR)

T2K実験での NCQE 測定

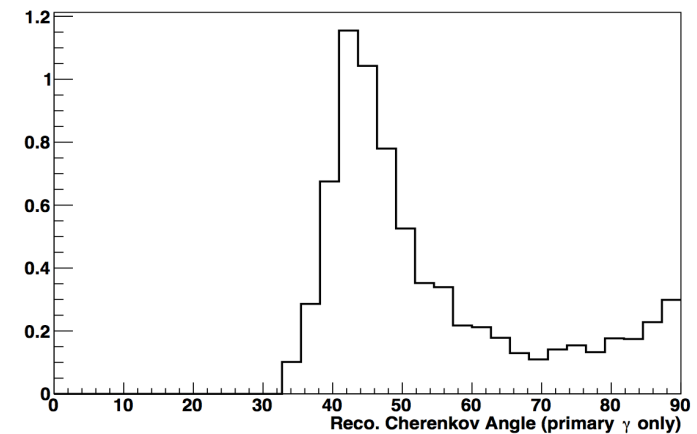
K.Abe et al. (T2K collaboration) PRD 100, 112009 (2019)



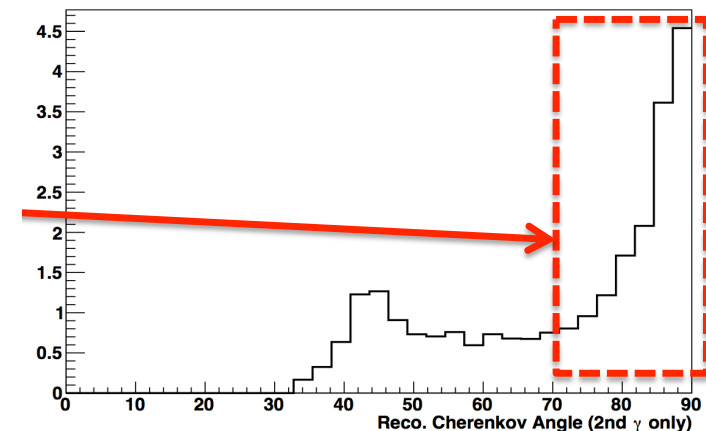
~42° と大角度の比が
データとMCで合いが悪い

(シミュレーション)

一次ガンマ線

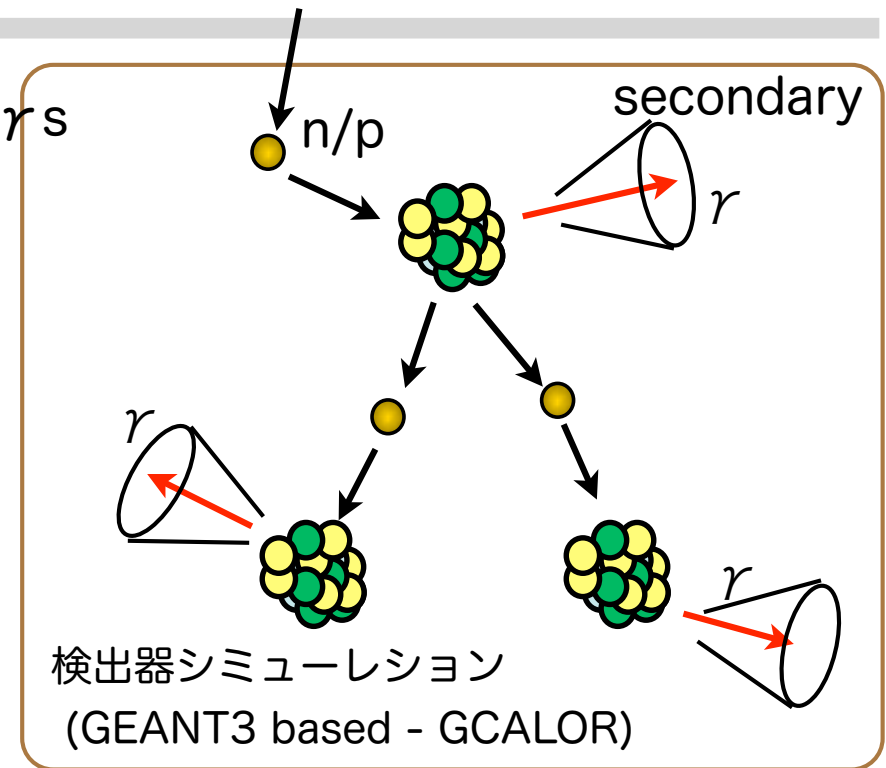
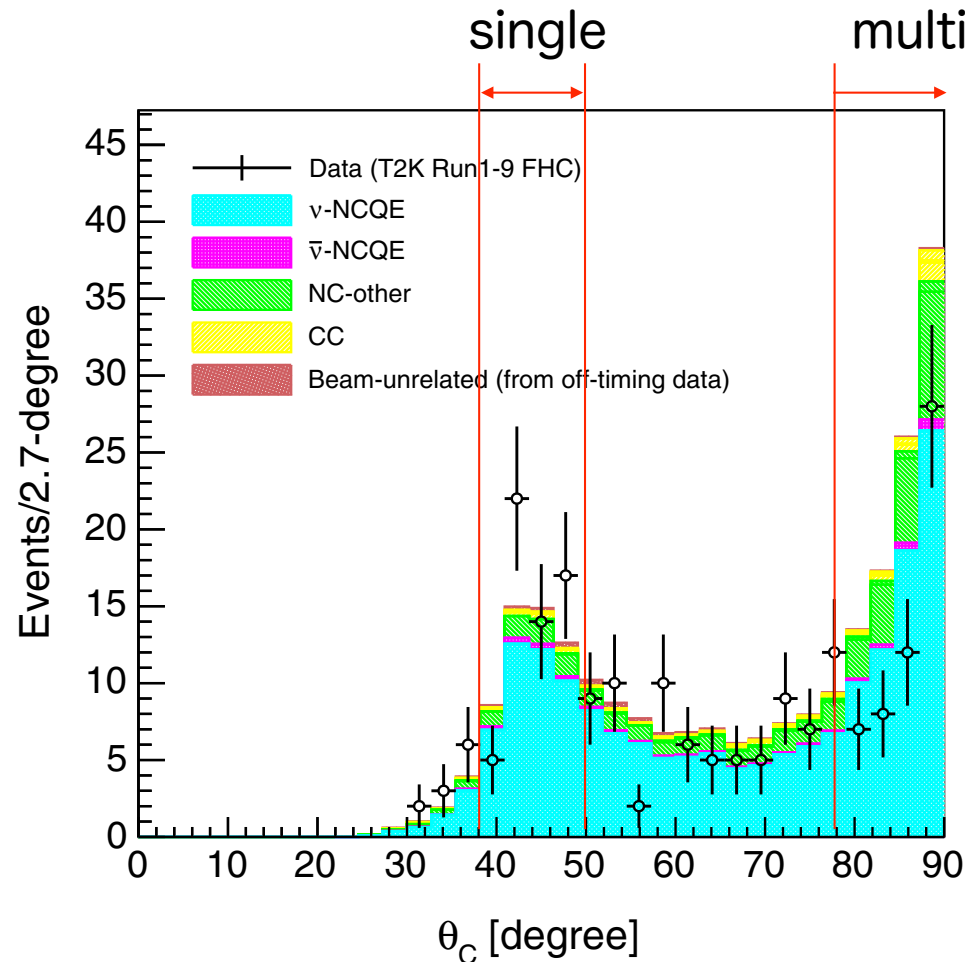


二次ガンマ線

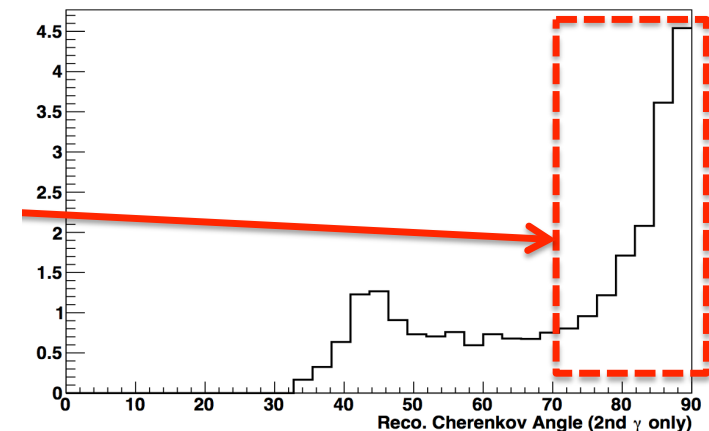


T2K実験での NCQE 測定

K.Abe et al. (T2K collaboration) PRD 100, 112009 (2019)



二次ガンマ線

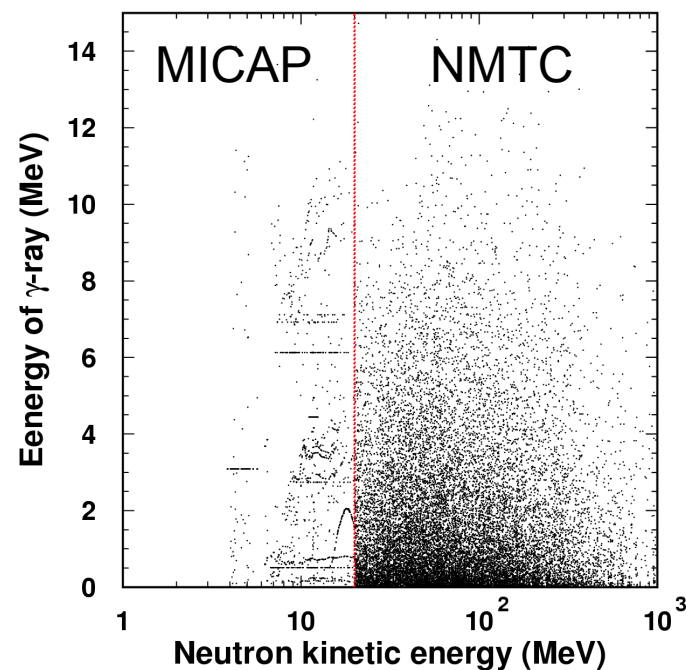


Secondary gamma-ray の
シミュレーションは正しい？

水中での中性子反応

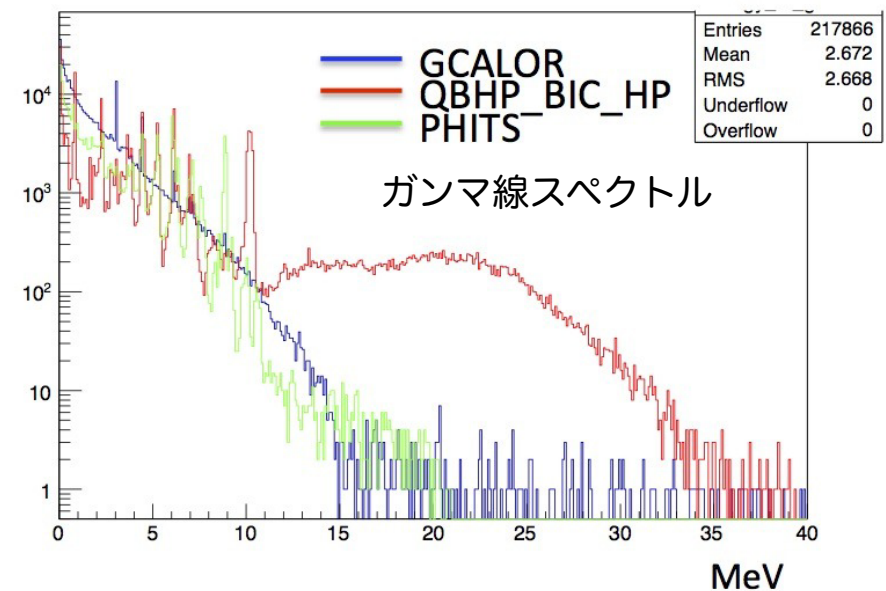
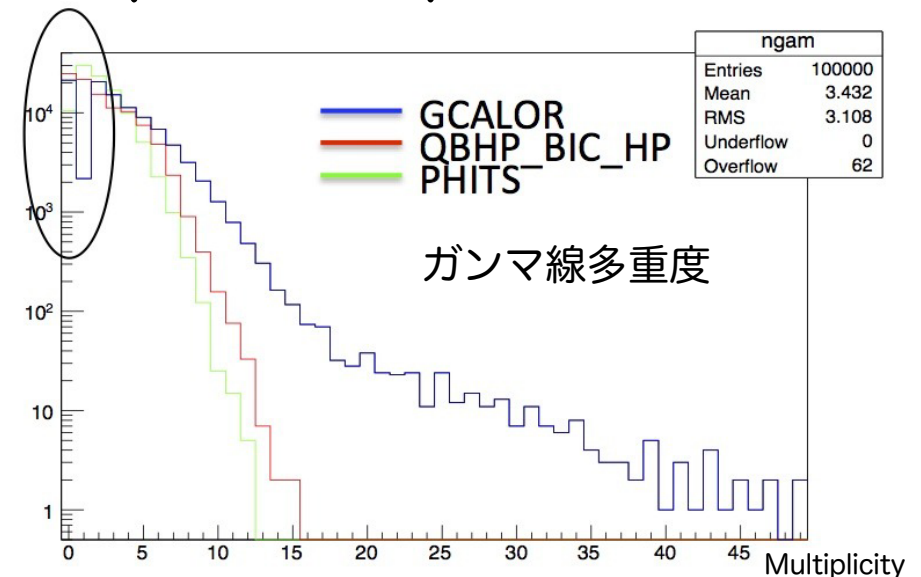
水中での核子の反応は GCALOR (GEANT3)を使用

(GEANT3 based - GCALOR)



Unnatural boundary?

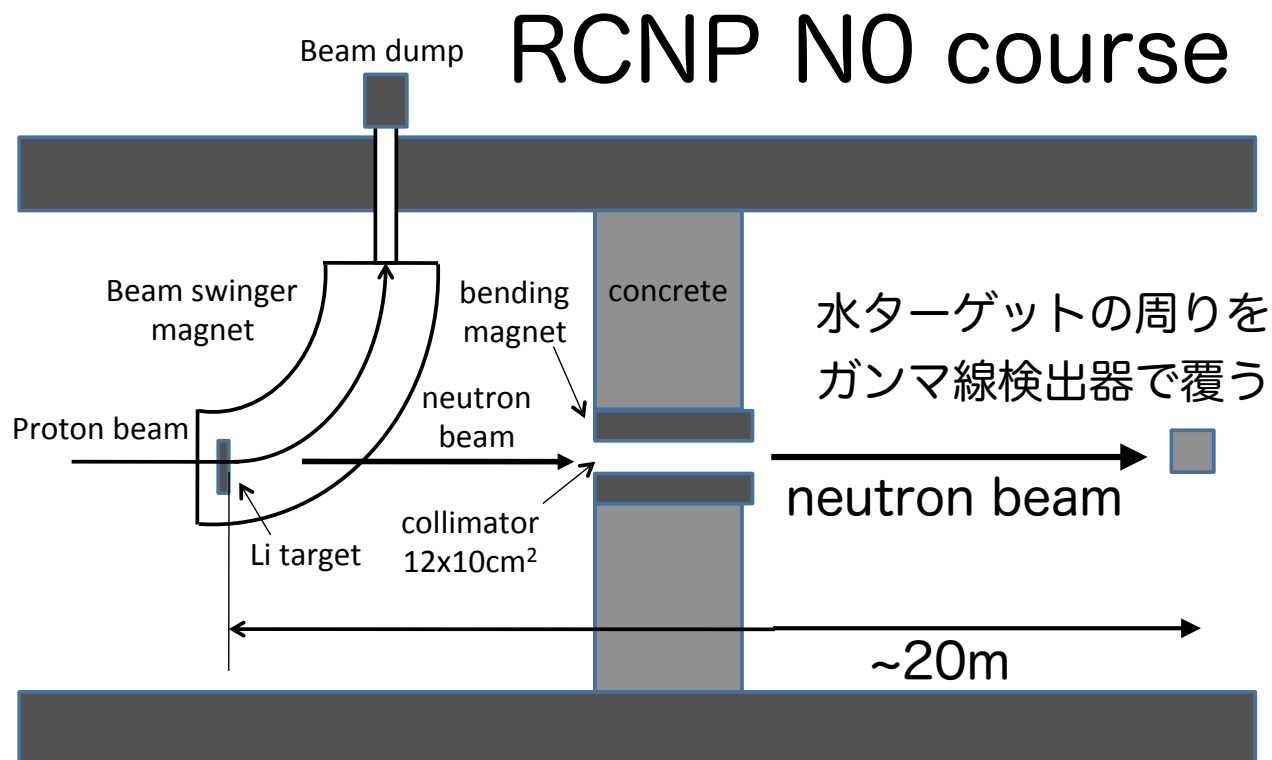
特に中性子と水中の酸素原子核
との反応の実験データがほしい



RCNP E487 / E525実験

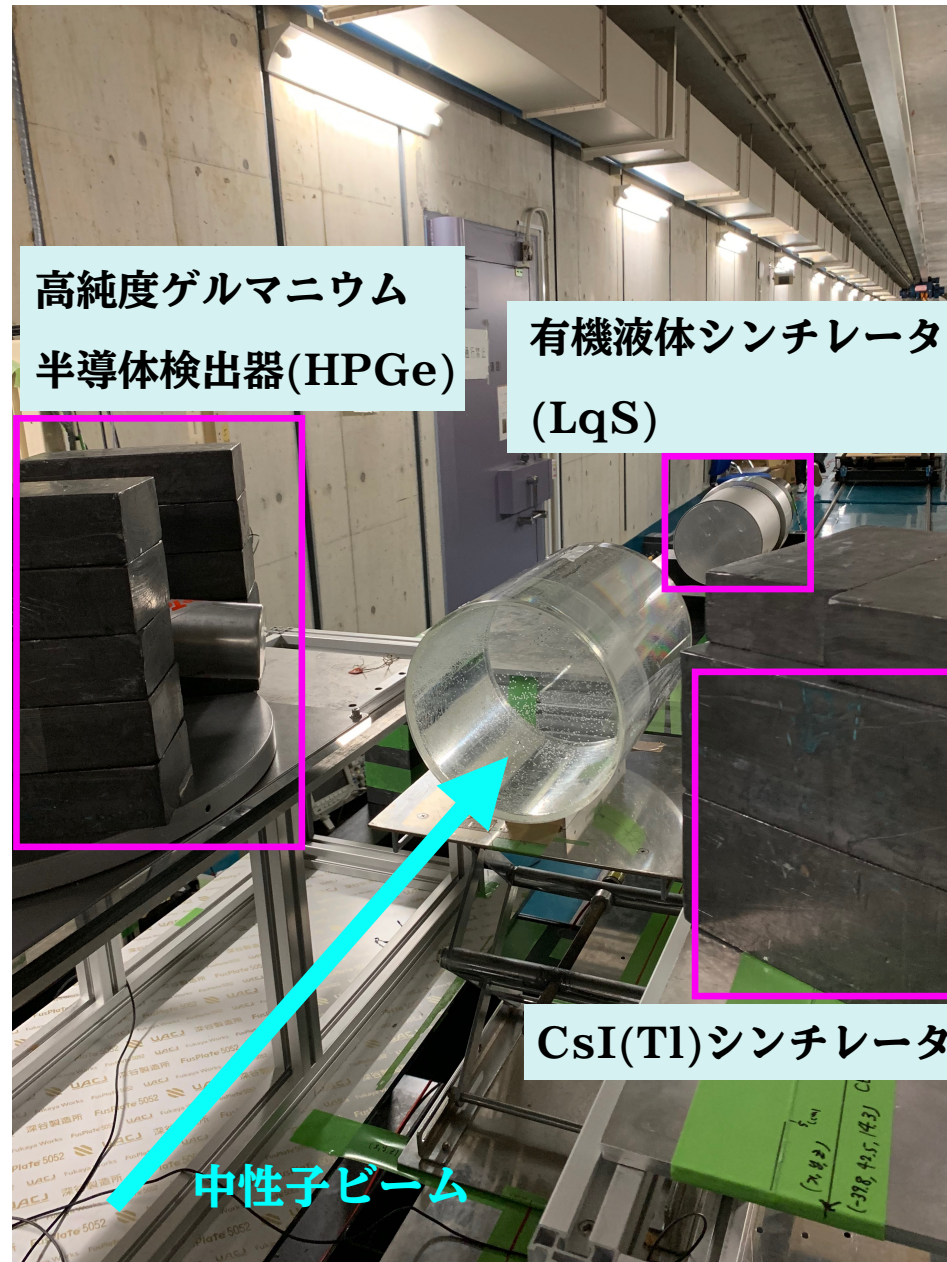
水をターゲットにした中性子反応により放出する
ガンマ線のエネルギーや数を測定

照射体系(0°)



- ✓ 準単色中性子
- ✓ 様々なエネルギーの測定が可能で、かつ、T2Kのニュートリノビームにより発生する中性子エネルギーと近い
- ✓ Tofを使って雑音事象の弁別が可能
- ✓ 大きなトンネルなので検出器の設定がやりやすい

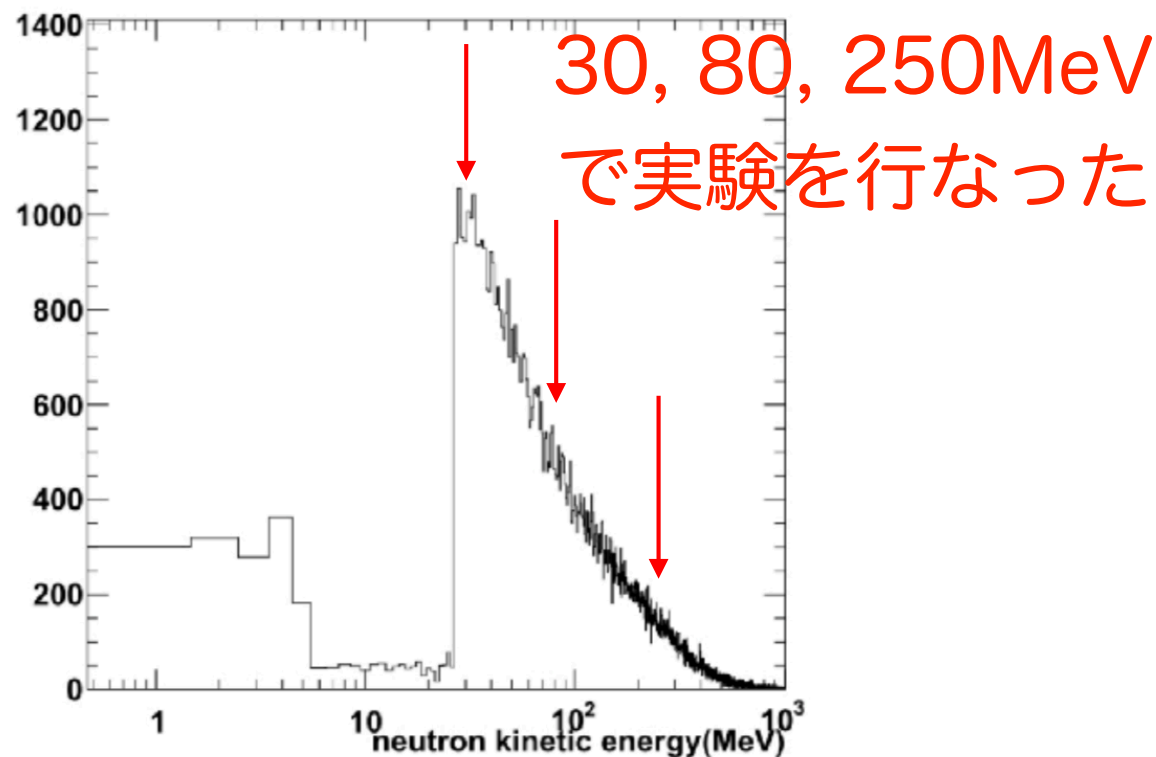
RCNP E487 / E525実験



RCNP E487 / E525実験

水をターゲットにした中性子反応により放出する
ガンマ線のエネルギーや数を測定

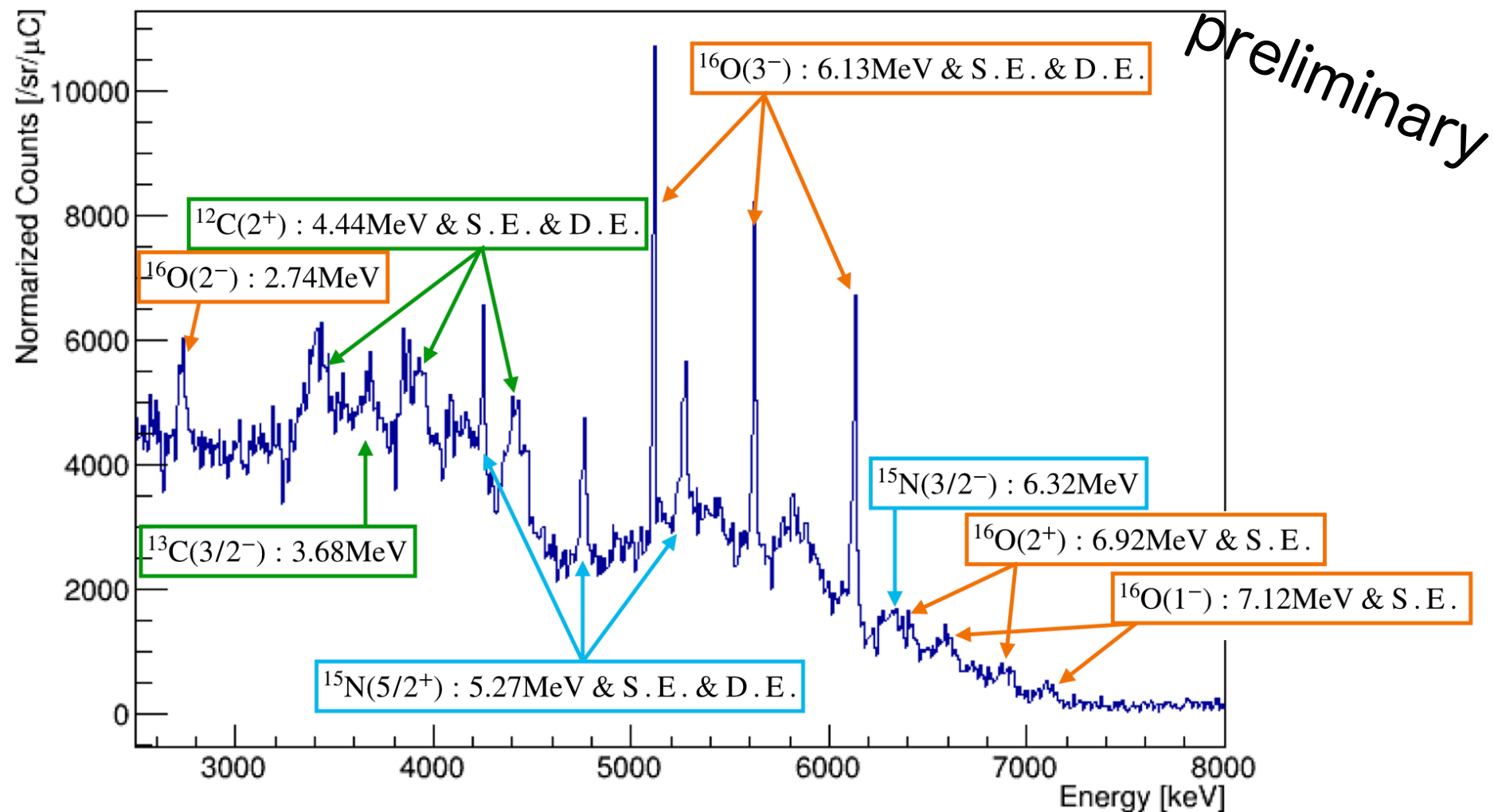
T2K実験 NCQE 反応後に発生する
中性子の運動エネルギー



- ✓ 準単色中性子
- ✓ 様々なエネルギーの測定が可能で、かつ、T2Kのニュートリノビームにより発生する中性子エネルギーと近い
- ✓ Tofを使って雑音事象の弁別が可能
- ✓ 大きなトンネルなので検出器の設定がやりやすい

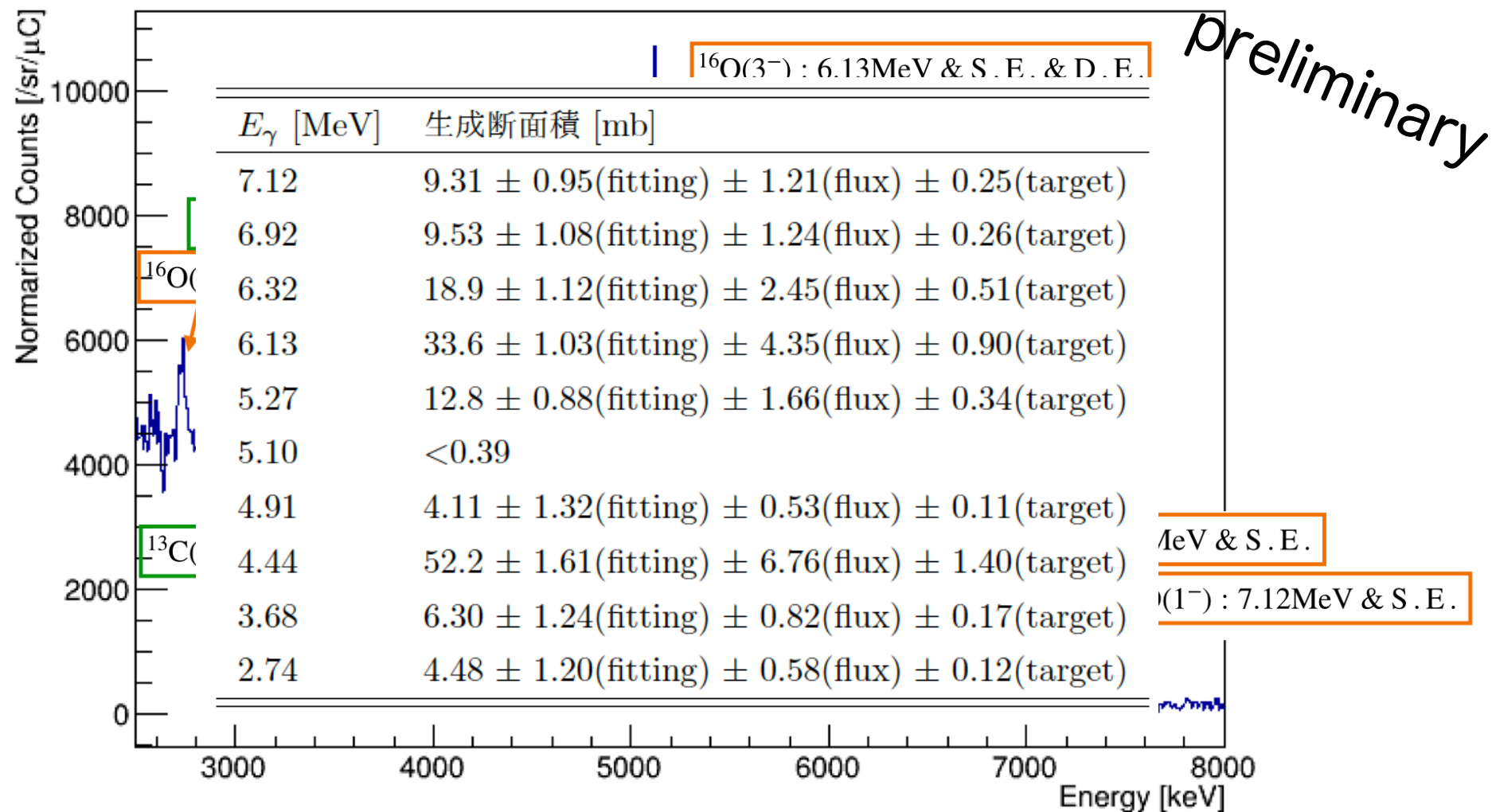
RCNP E487 / E525実験

ガンマ線スペクトル (30MeV 中性子ビーム)



RCNP E487 / E525実験

ガンマ線スペクトル (30MeV 中性子ビーム)

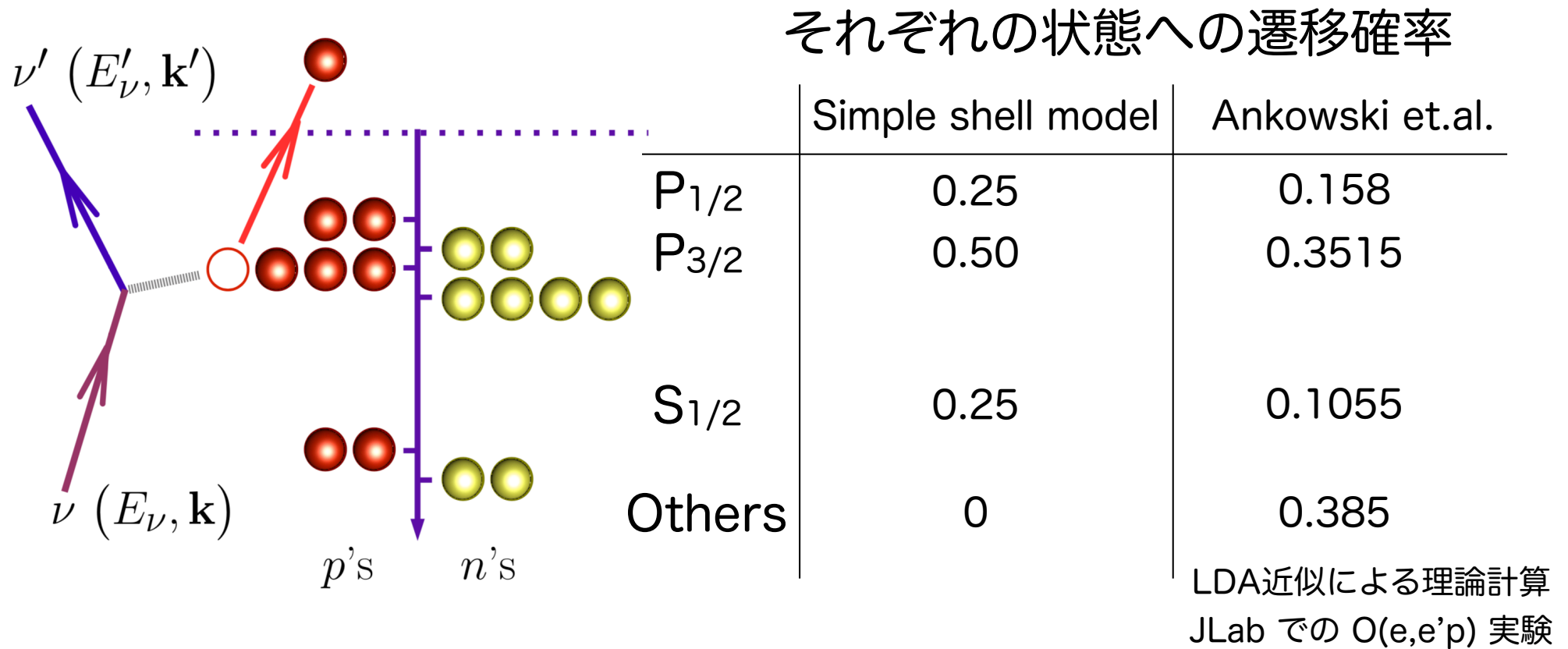


RCNP E487 / E525実験

- データ解析の状況
 - 80MeVデータ：PRCへ投稿中 (arXiv :1902.08964)
 - 30MeVデータ：解析は終了。論文執筆中
 - 250MeVデータ：データ解析中
- 本実験による中性子と酸素原子核との反応によるガンマ線生成断面積の結果をSK-Gdシミュレーションに導入する。
- Secondary gamma-ray の系統誤差は十分削減できると期待できる。

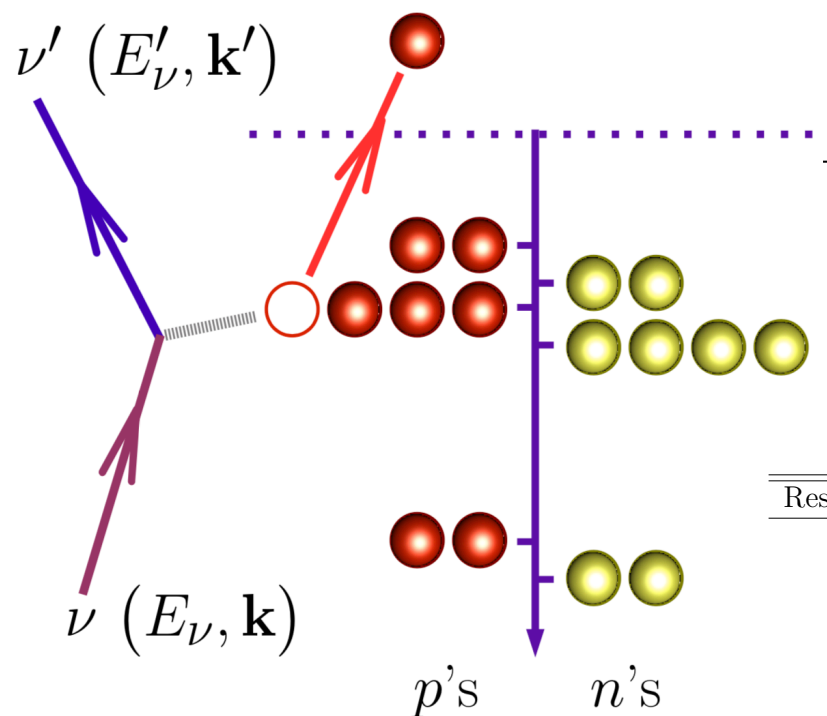
さらなる系統誤差削減に向けて

Primary gamma-ray の不定性を落とせないか



さらなる系統誤差削減に向けて

Primary gamma-ray の不定性を落とせないか



それぞれの状態への遷移確率

	Simple shell model	Ankowski et.al.
$P_{1/2}$	0.25	0.158
$P_{3/2}$	0.50	0.3515 (5.4%)

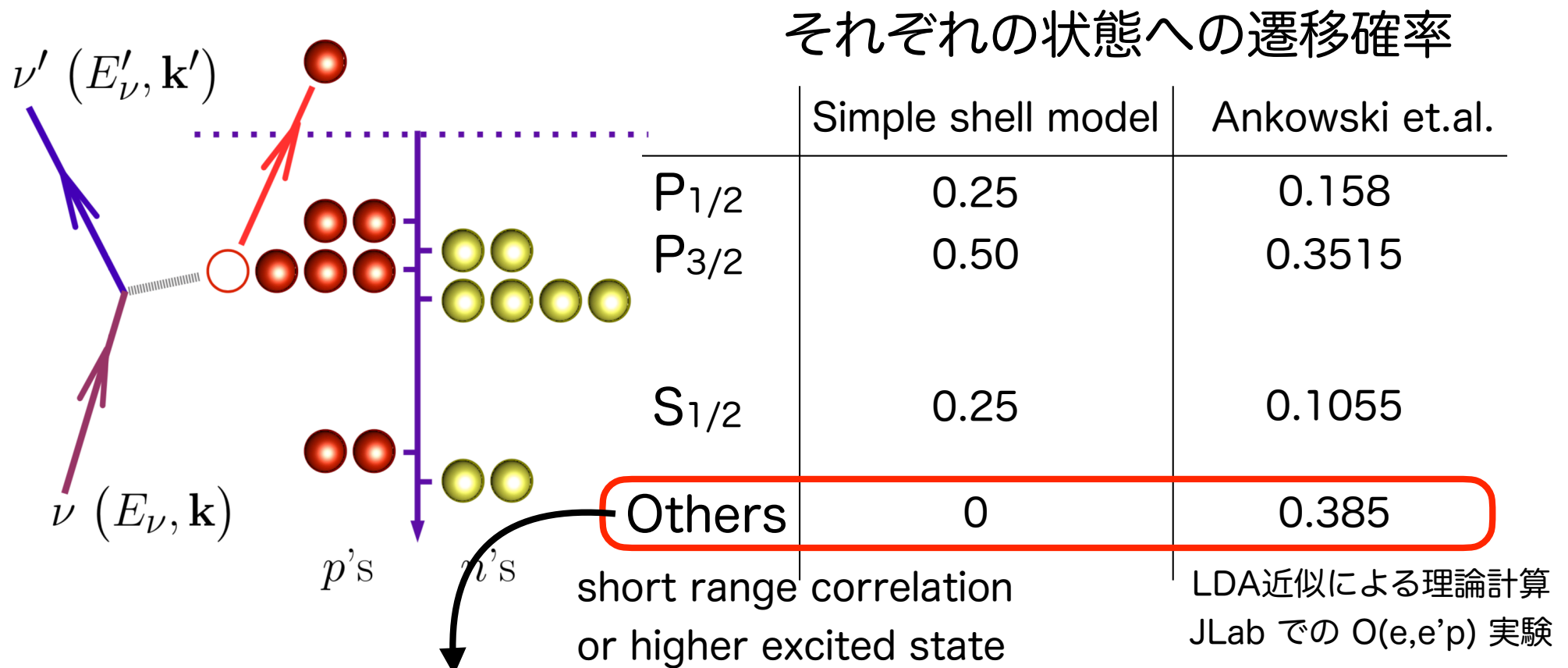


Residual nucleus	E_{ex} [MeV]	J^π	E_γ [MeV]	E_p [MeV]	R_γ [%]	$\text{Br}(X^* \rightarrow Y + \gamma)$ [%]
^{15}N	6.32	$(\frac{3}{2})^-$	6.32	-	100	86.2
	9.93	$(\frac{3}{2})^-$	5.30	-	15.3	1.1
			6.32	-	4.9	0.3
			7.30	-	2.1	0.1
			9.93	-	77.6	5.4
	10.70	$(\frac{3}{2})^-$	-	0.5	-	6.9
^{15}O	6.18	$(\frac{3}{2})^-$	6.18	-	100	100

Not so large systematic error, but..

さらなる系統誤差削減に向けて

Primary gamma-ray の不定性を落とせないか



この state からのガンマ線分岐比を測りたいが..

まとめ

- 超新星ニュートリノ観測において中性カレントニュートリノ反応の理解は重要である
- 銀河系内超新星爆発
 - 巨大共鳴反応による直接観測
 - RCNP-E398でガンマ線放出確率を測定
- 超新星背景ニュートリノ (SRN) 観測
 - その発見に向けて SK-Gd 実験が始まった
 - 大気ニュートリノの中性カレント反応がBGになる
 - 散乱断面積はT2K実験で測定された。その測定の系統誤差は酸素原子核との反応によって発生するガンマ線放出の不定性が支配的
 - この系統誤差を削減して、SRNの発見につなげたい。