

# SK-Gd実験での 超新星背景ニュートリノ探索における 大気ニュートリノ背景事象の研究

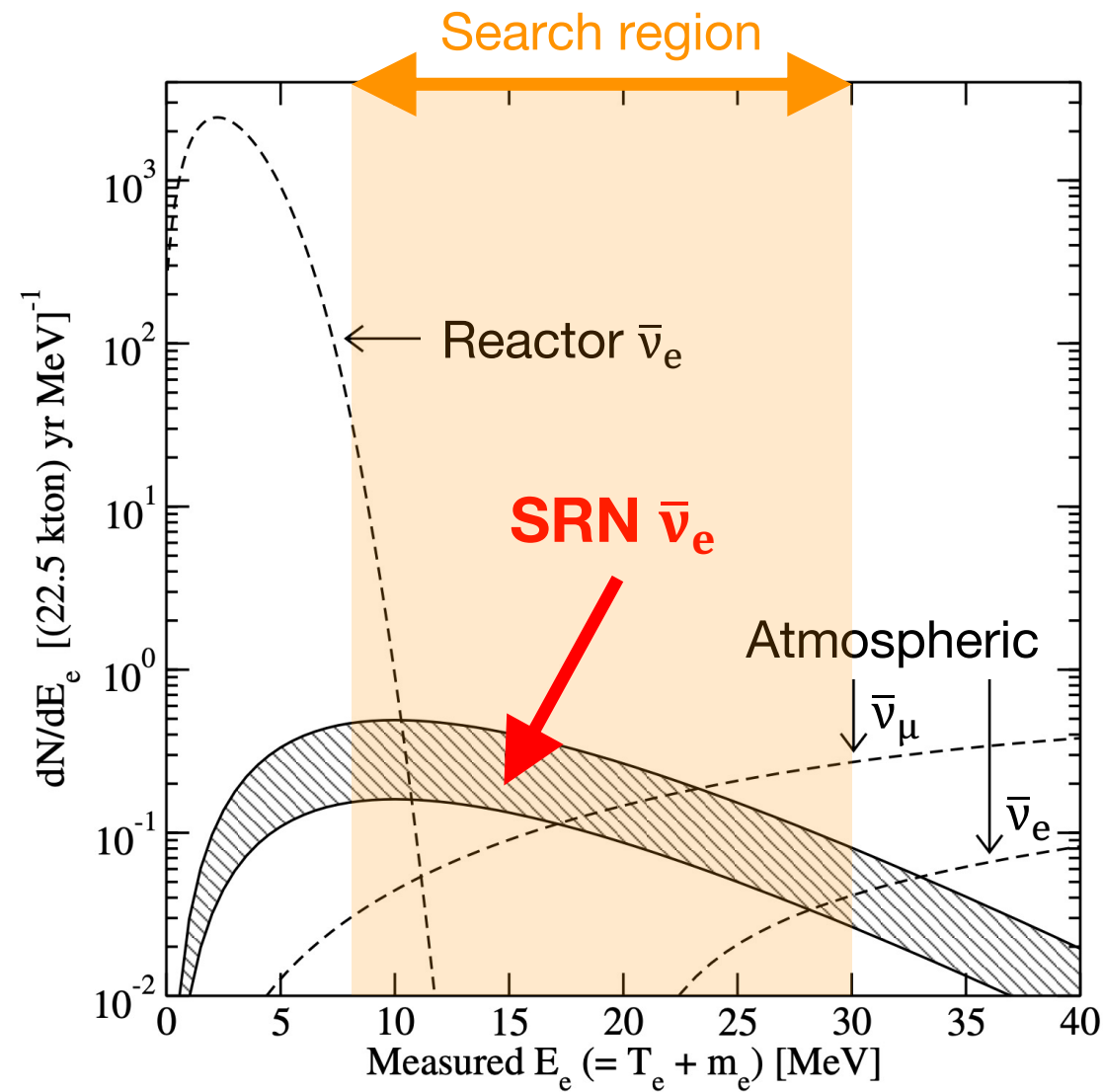
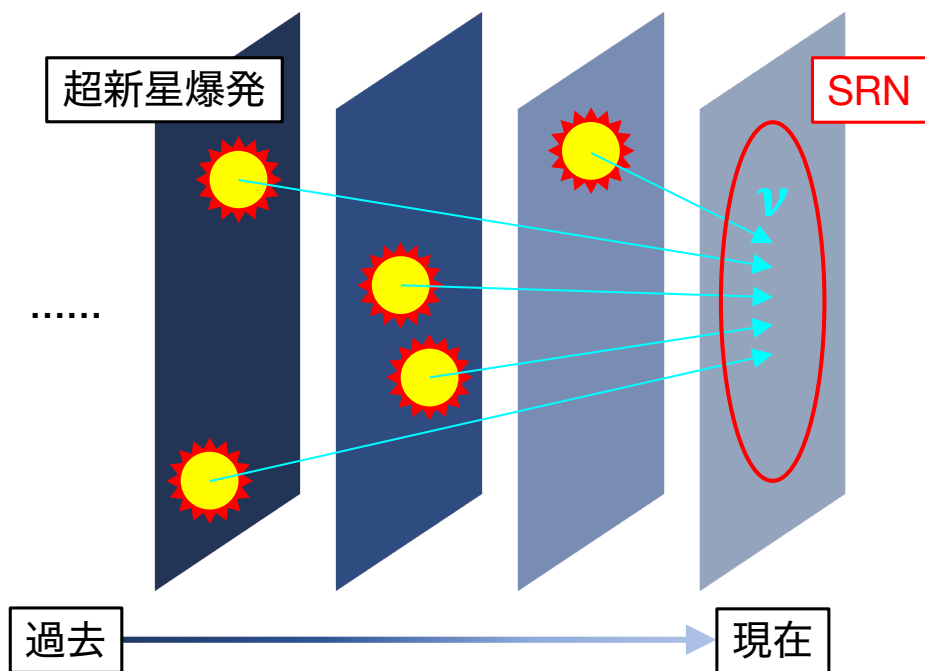
新学術「地下宇宙」第9回超新星ニュートリノ研究会

2023年3月3日

酒井聖矢 (岡山大学)

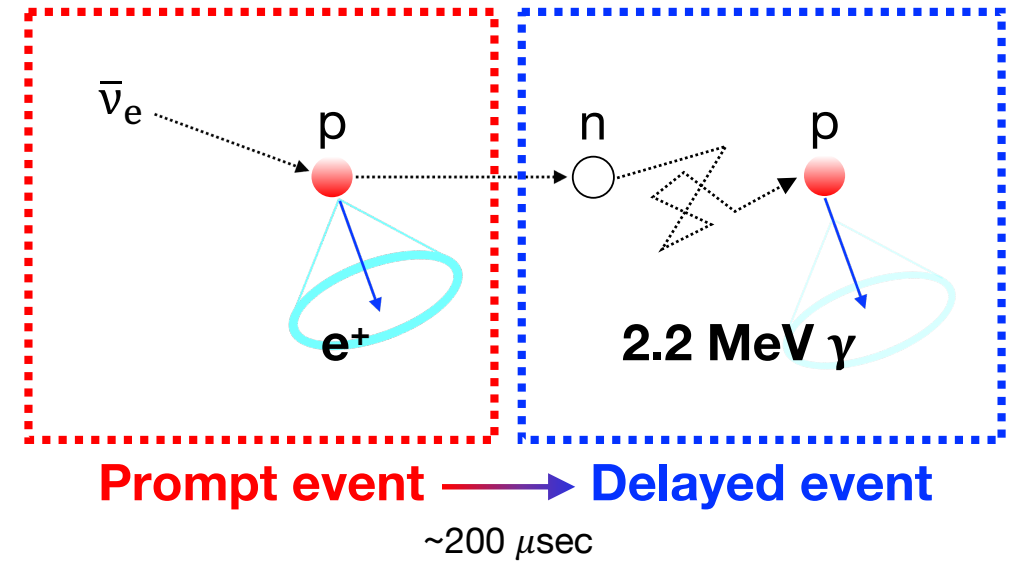
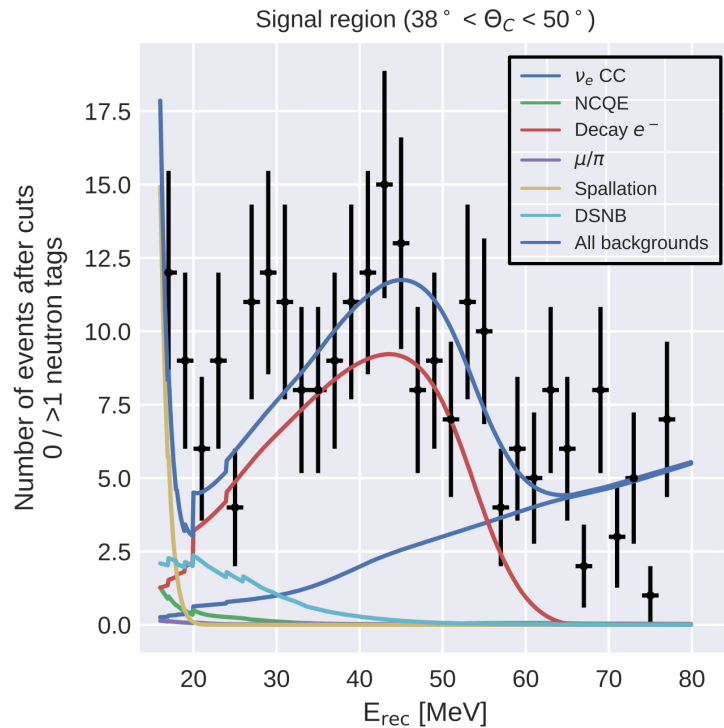
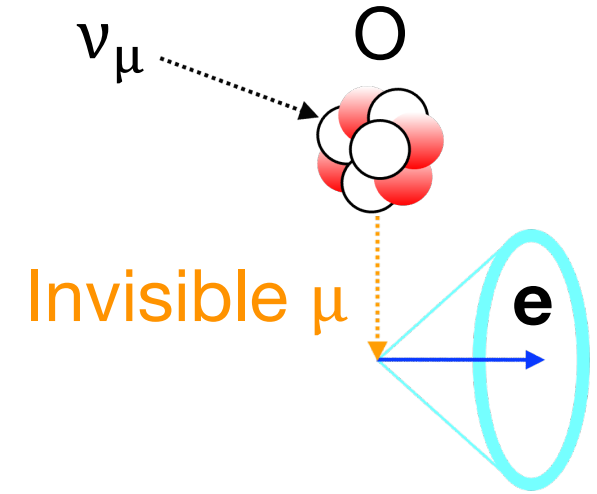
# 超新星背景ニュートリノ探索

- 目標：SK-Gd実験で超新星背景ニュートリノ (SRN) の世界初観測を実現
- 観測対象： $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  (8 - 30 MeV)



# なぜSK-Gd実験？

- 大気ニュートリノ背景事象 (Invisible  $\mu \rightarrow \text{Decay } e$ ) が多数存在
- 陽子の中性子捕獲で発生する2.2 MeV  $\gamma$ を同時遅延計測
  - 背景事象の削減に成功
  - 検出効率 ~20%



# なぜSK-Gd実験？

- Gdの熱中性子捕獲断面積は天然元素中で最大
- Gdの中性子捕獲で発生する~8 MeV  $\gamma$ を同時遅延計測

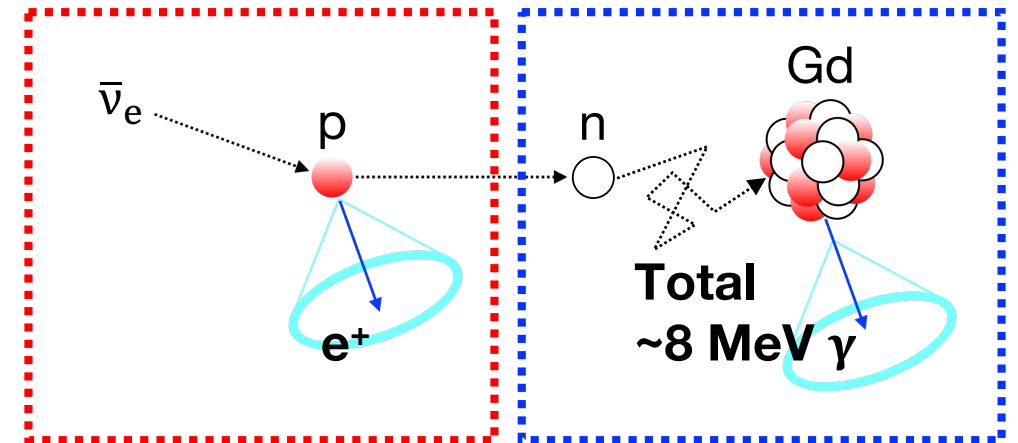
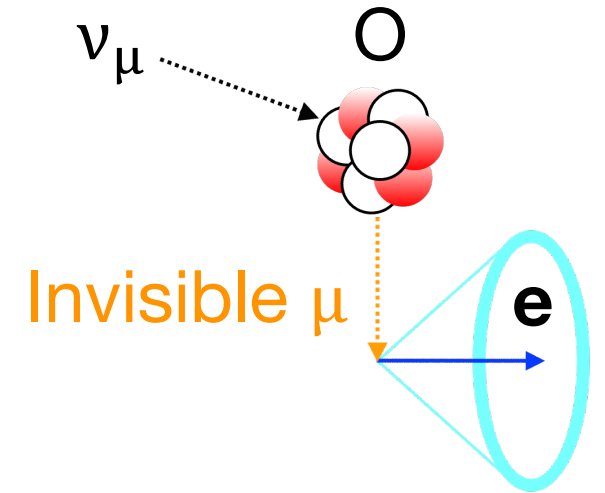
→ 検出効率が大幅に向上

現在 ~75% (Gd : 0.03%)

最終目標 ~90% (Gd : 0.1%)

- SK-Gd実験でも識別できない背景事象

大気ニュートリノの中性カレント準弾性散乱反応  
(NCQE反応)



**Prompt event** → **Delayed event**

~20  $\mu\text{sec}$  (Gd : 0.1%)

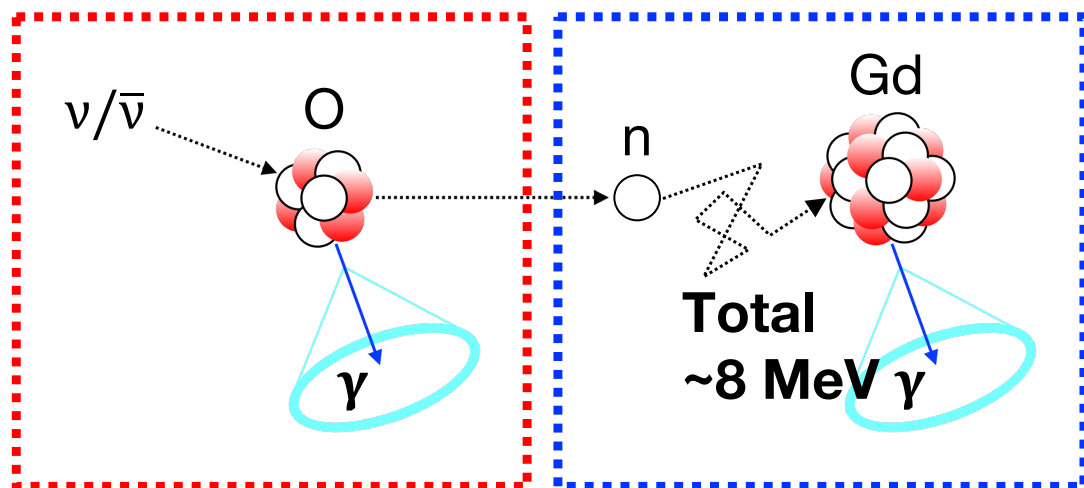
~60  $\mu\text{sec}$  (Gd : 0.03%)



# NCQE反応

- SRN事象と酷似  
→ NCQE事象数の正確な見積もりが重要

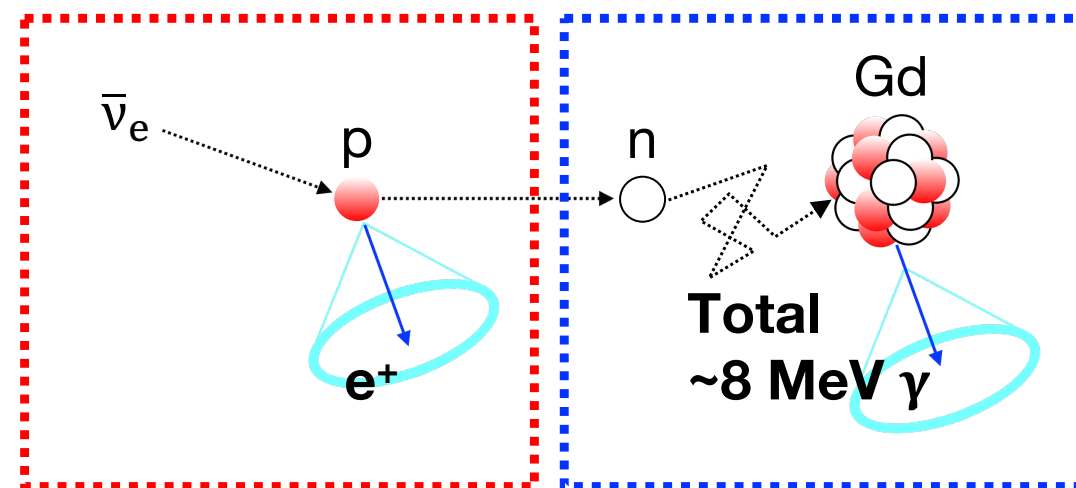
## NCQE



**Prompt event** → **Delayed event**

$\sim 20 \mu\text{sec}$  (Gd : 0.1%)  
 $\sim 60 \mu\text{sec}$  (Gd : 0.03%)

## SRN



**Prompt event** → **Delayed event**

$\sim 20 \mu\text{sec}$  (Gd : 0.1%)  
 $\sim 60 \mu\text{sec}$  (Gd : 0.03%)

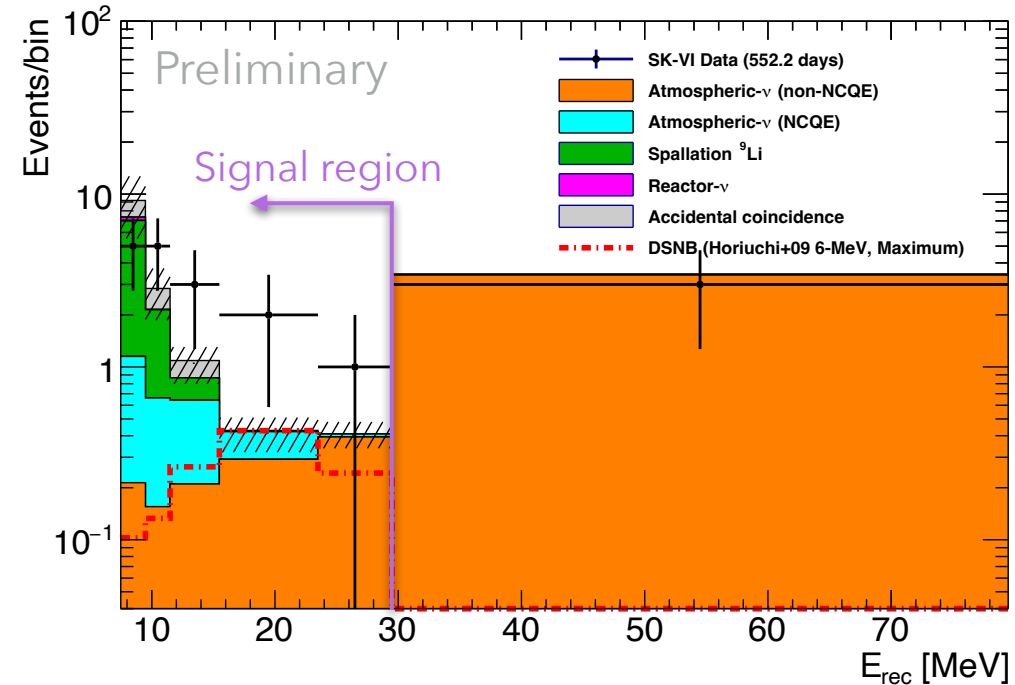
# 超新星背景ニュートリノ探索結果

6

- SK-Gdでの最新結果 (by 原田さん)
- 現在は統計誤差が大きい
- 統計量が増えると統計誤差は小さくなる
- 改善しない限り系統誤差はそのまま
- NCQE事象数に60 - 80%の系統誤差  
→ 系統誤差の削減が必須！

## Search result

- Totally 19 events are found < 80 MeV
  - 5 separated bins: [7.5, 9.5, 11.5, 15.5, 23.5-29.5] MeV



17

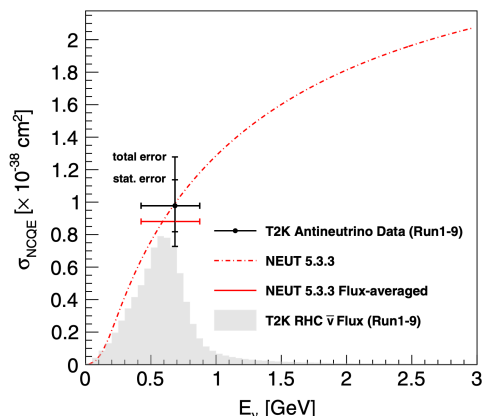
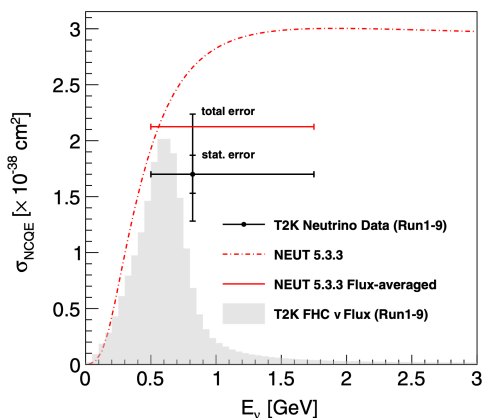
# NCQE反応断面積測定

• T2Kでの最新結果

→ 系統誤差が大きい

$$\langle \sigma_{\nu\text{-NCQE}} \rangle = 1.70 \pm 0.17(\text{stat.}) \begin{matrix} +0.51 \\ -0.38 \end{matrix}(\text{syst.})$$

$$\langle \sigma_{\bar{\nu}\text{-NCQE}} \rangle = 0.98 \pm 0.16(\text{stat.}) \begin{matrix} +0.26 \\ -0.19 \end{matrix}(\text{syst.})$$

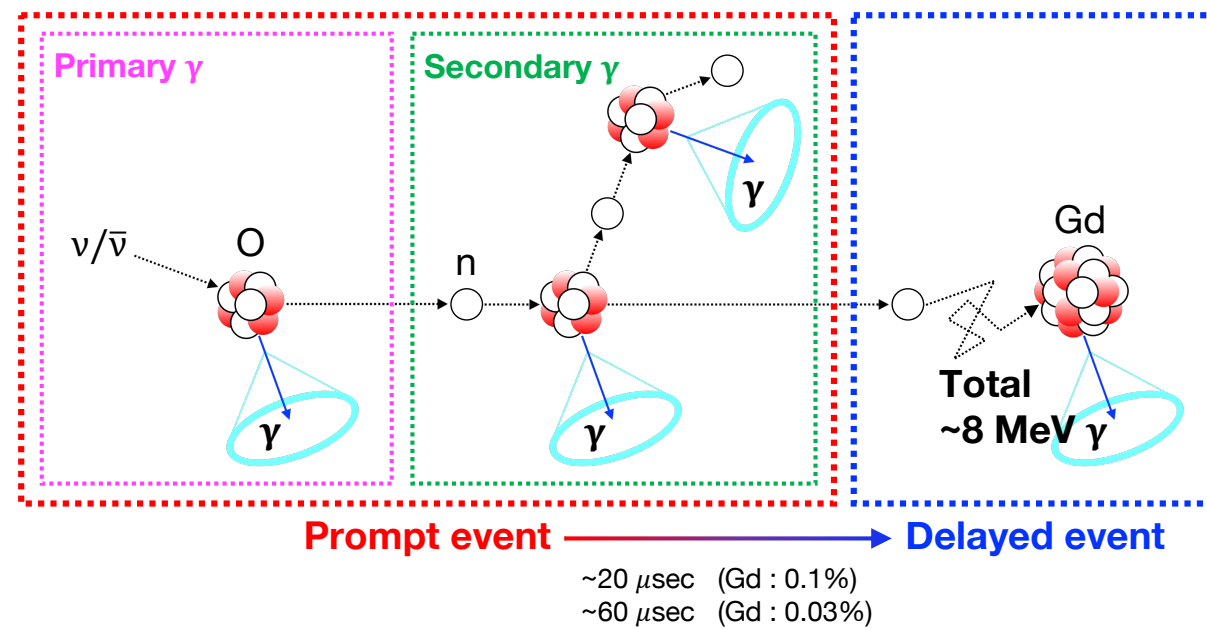


FHC	$\nu$ -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC-other	CC	Beam-unrelated
Event fraction	75.0	2.0	17.8	3.7	1.5
Neutrino flux	6.7	8.6	7.3	6.4	...
Neutrino interaction	3.0	3.0	8.2	16.5	...
Primary- $\gamma$ production	11.0	10.6	6.0	6.6	...
Secondary- $\gamma$ production	13.5	13.4	19.5	17.6	...
Oscillation parameter	...	...	...	4.1	...
Detector response	3.4	3.4	2.0	5.2	...
Total error	19.2	19.7	23.3	26.7	3.0

RHC	$\nu$ -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC-other	CC	Beam-unrelated
Event fraction	19.0	59.9	16.5	2.5	2.1
Neutrino flux	7.0	6.4	7.0	6.5	...
Neutrino interaction	3.0	3.0	10.8	38.2	...
Primary- $\gamma$ production	12.2	11.4	3.5	0.5	...
Secondary- $\gamma$ production	13.6	13.1	19.3	21.4	...
Oscillation parameter	...	...	...	3.1	...
Detector response	3.4	3.4	2.0	5.2	...
Total error	20.1	19.0	23.4	44.7	3.9

# NCQE反応

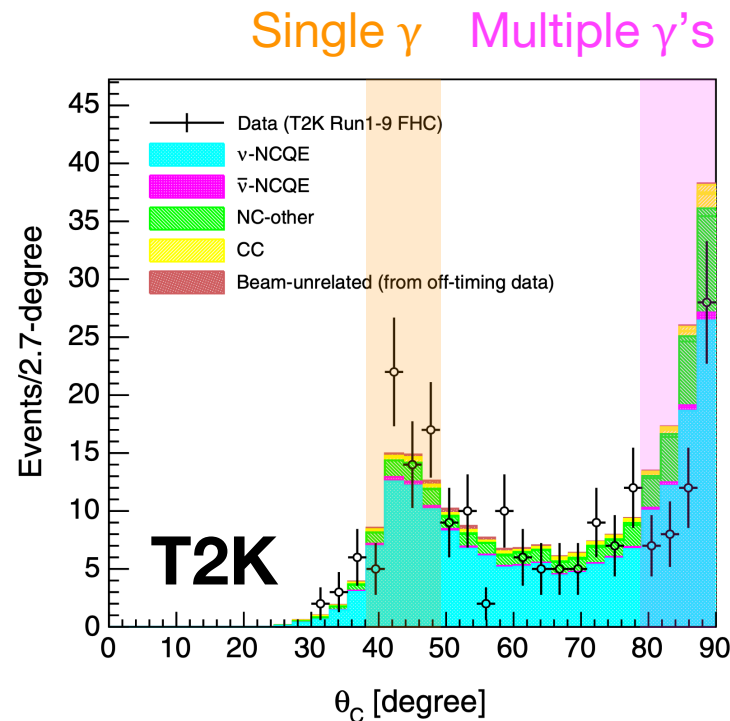
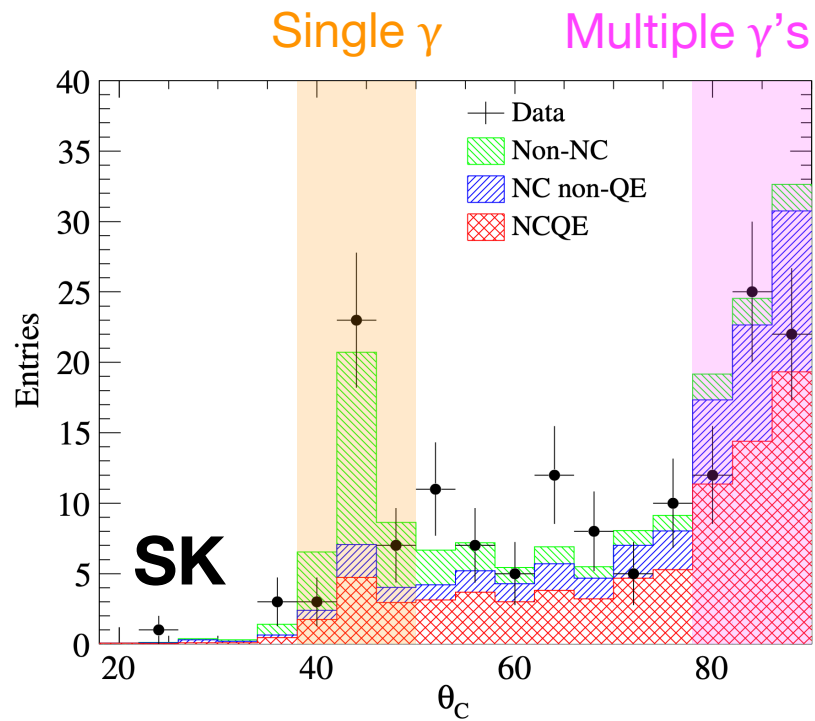
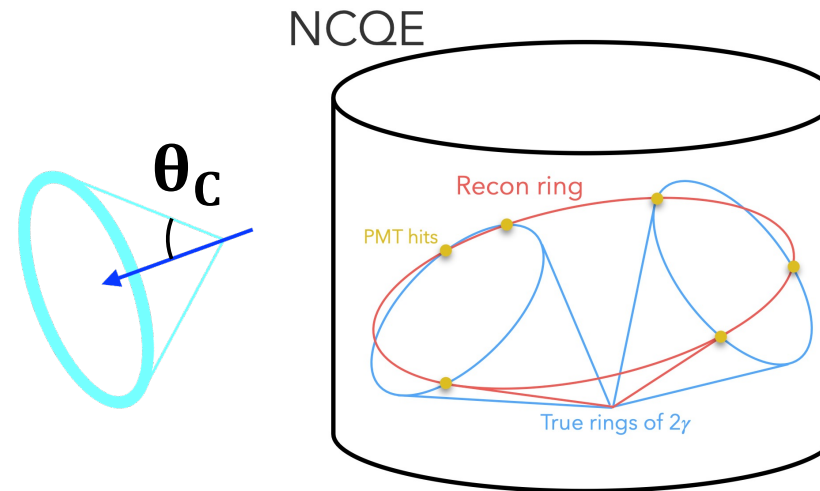
- 先発信号 = 一次ガンマ線 ( $\nu + O$ )  
+ 二次ガンマ線 ( $n(p) + O$ )
- 一次ガンマ線と二次ガンマ線の時間差が小さい  
→ 同じ事象と判別



各反応で生成される粒子の種類・数・エネルギーを  
如何に正確にシミュレーションへ導入できるかが系統誤差を減らす鍵  
現状は？改善すべき点は？

# 二次ガンマ線

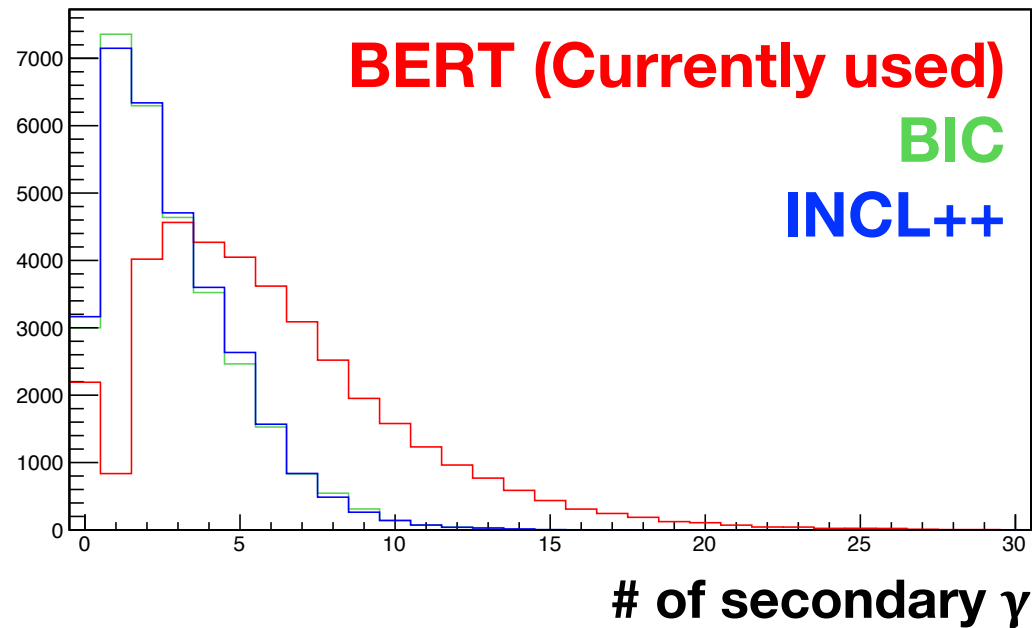
- チェレンコフ角度分布をデータとMCで比較
  - 大角度領域で合っていない
- 大角度成分は複数の二次ガンマ線による
  - 二次ガンマ線のシミュレーションは正しい？



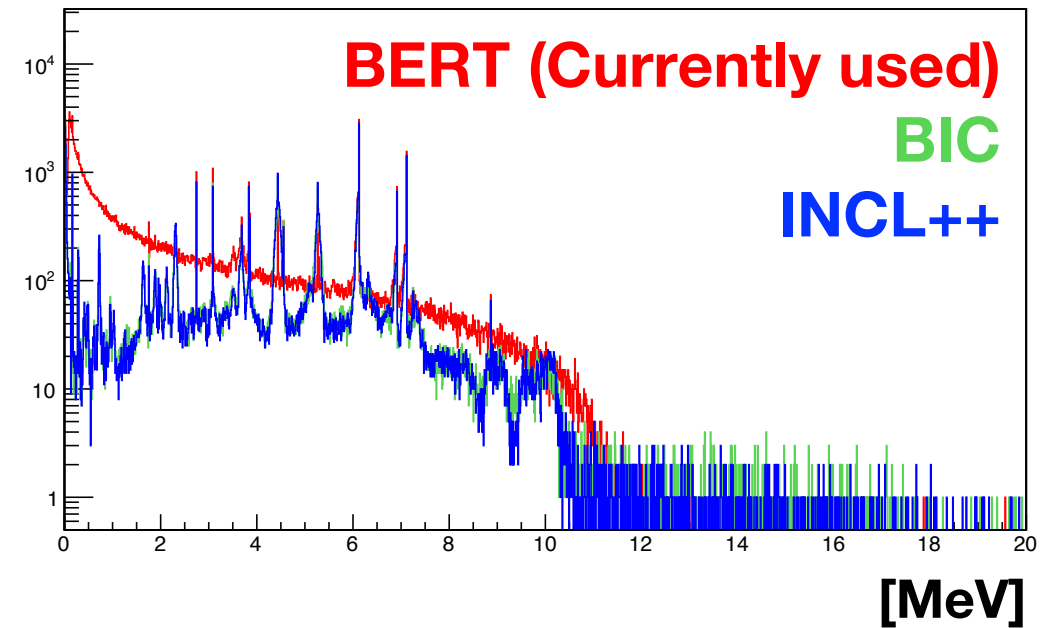
# 二次ガンマ線

- BERT (現在使用中のモデル) では二次ガンマ線が多く発生
- BERTでは脱励起ガンマ線のピークが少ない

# of secondary  $\gamma$  (MC, true)



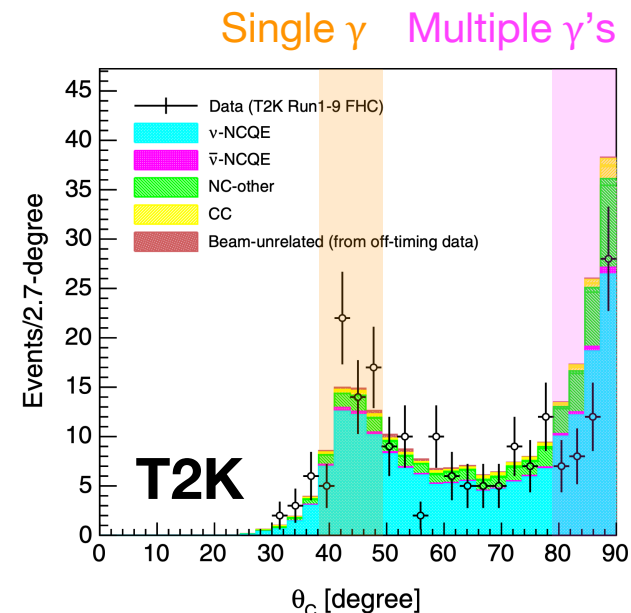
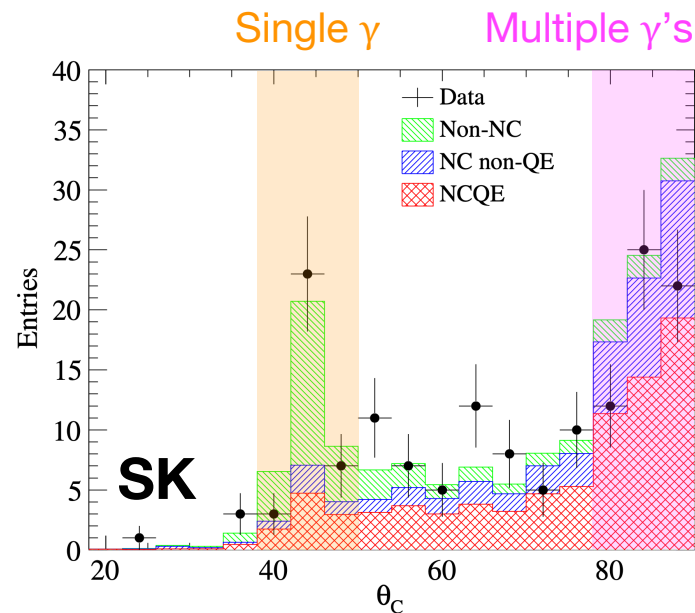
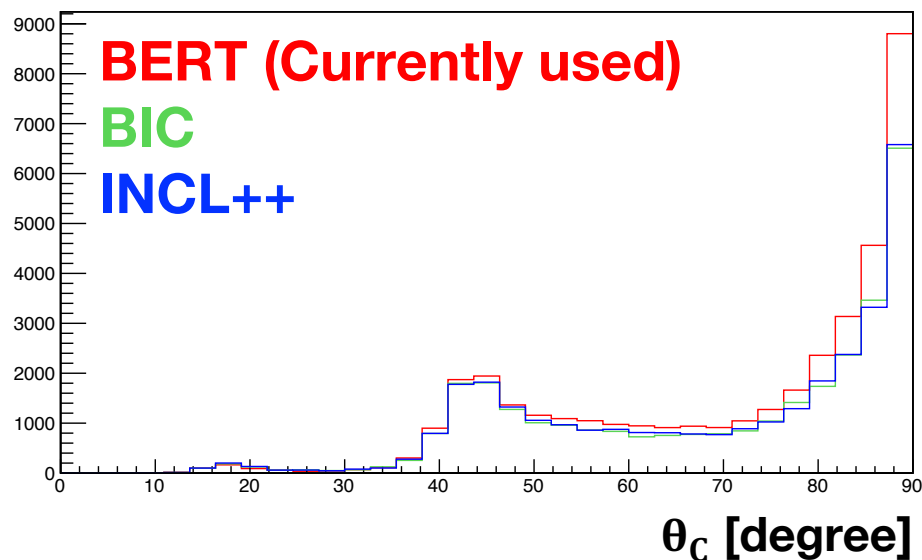
Energy of secondary  $\gamma$  (MC, true)



# 二次ガンマ線

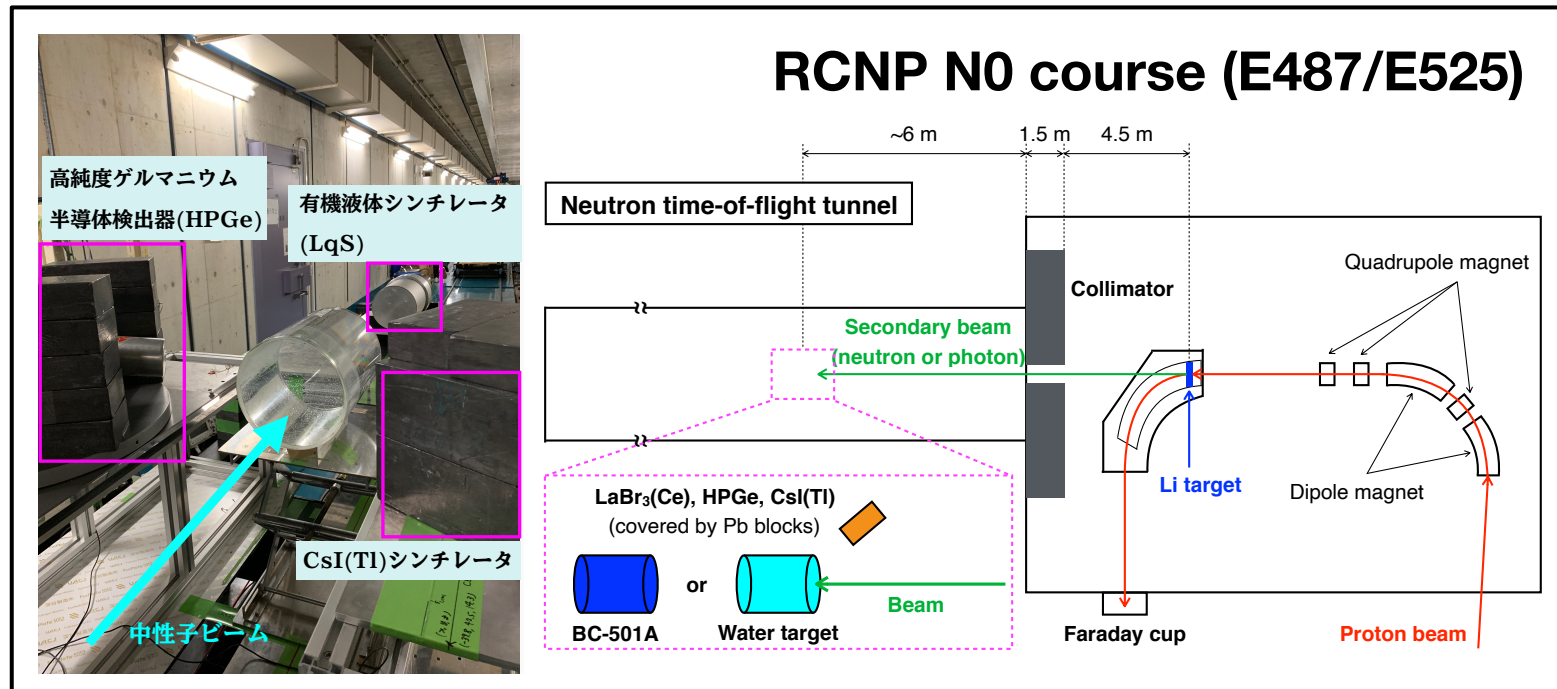
- BERT (現在使用中のモデル) では二次ガンマ線が多く発生
- BERTでは脱励起ガンマ線のピークが少ない
  - BICやINCL++のほうがデータを再現しそう
  - 中性子と酸素原子核の反応の実験データが欲しい

Cherenkov angle (MC, reconstructed)



# 二次ガンマ線

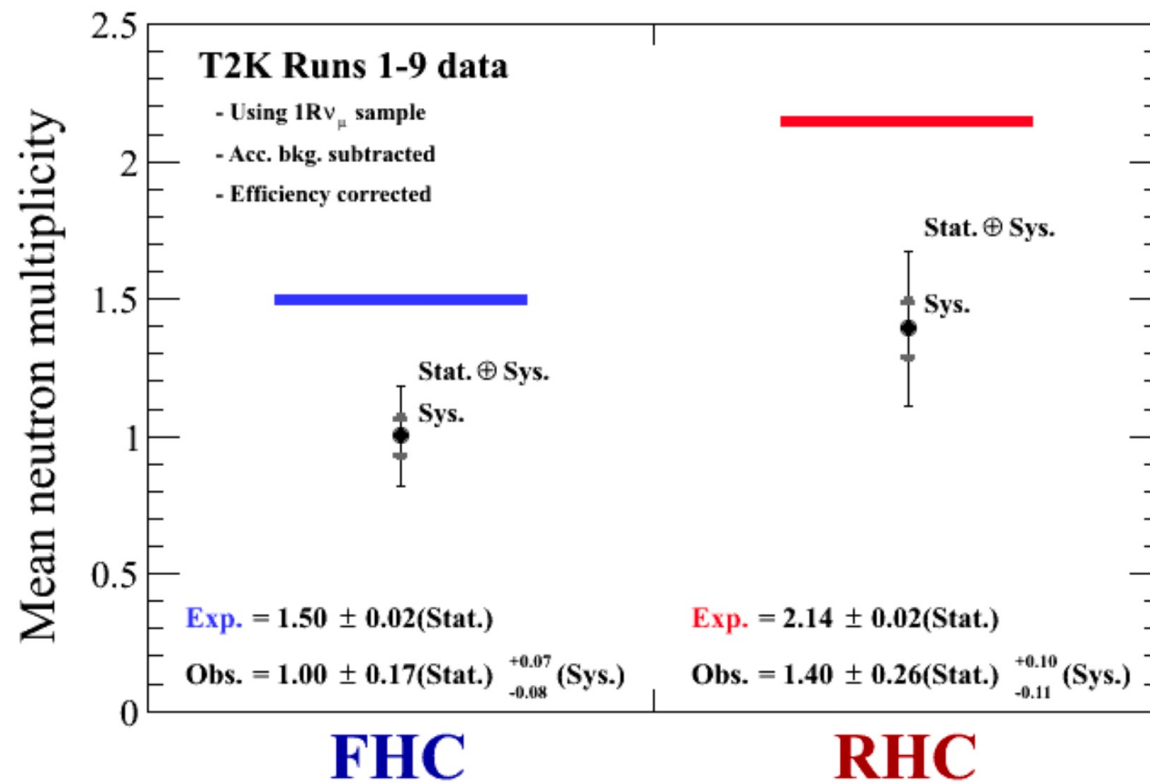
- RCNPで30, 80, 250 MeVの準単色中性子ビームを水標的に照射
  - 二次ガンマ線のエネルギー・生成断面積を測定 (詳しくは次の田野くんのトークで)
- 測定結果をシミュレーションに導入
  - 二次ガンマ線の系統誤差の削減が期待 (一次ガンマ線も?)





# 中性子多重度

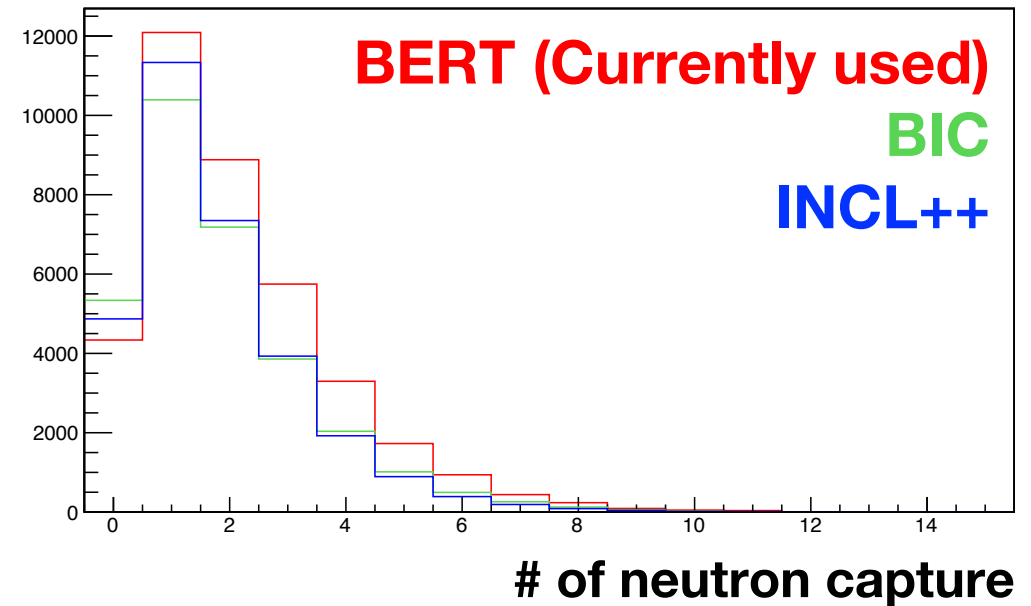
- T2Kで中性子多重度を測定
  - データがMC (BERT) より~34%少ない
- BICやINCL++の場合はどうなる？



# 中性子多重度

- T2Kで中性子多重度を測定
  - データがMC (BERT) より~34%少ない
- BICやINCL++の場合はどうなる？
  - データとの差を埋められない
  - 実験データを取得してより精密なモデルを構築しシミュレーションに導入する必要がある

# of neutron capture (MC, true)



	BERT	BIC	INCL++
# of neutron capture / event	2.152	1.827	1.776
Difference from BERT	-	-15.1%	-17.5%

- SRNの世界初観測を実現するには大気ニュートリノ背景事象の精密な予測が欠かせない
- 特にニュートリノと酸素原子核の反応で発生するガンマ線や中性子、中性子の水中での反応の理解が重要

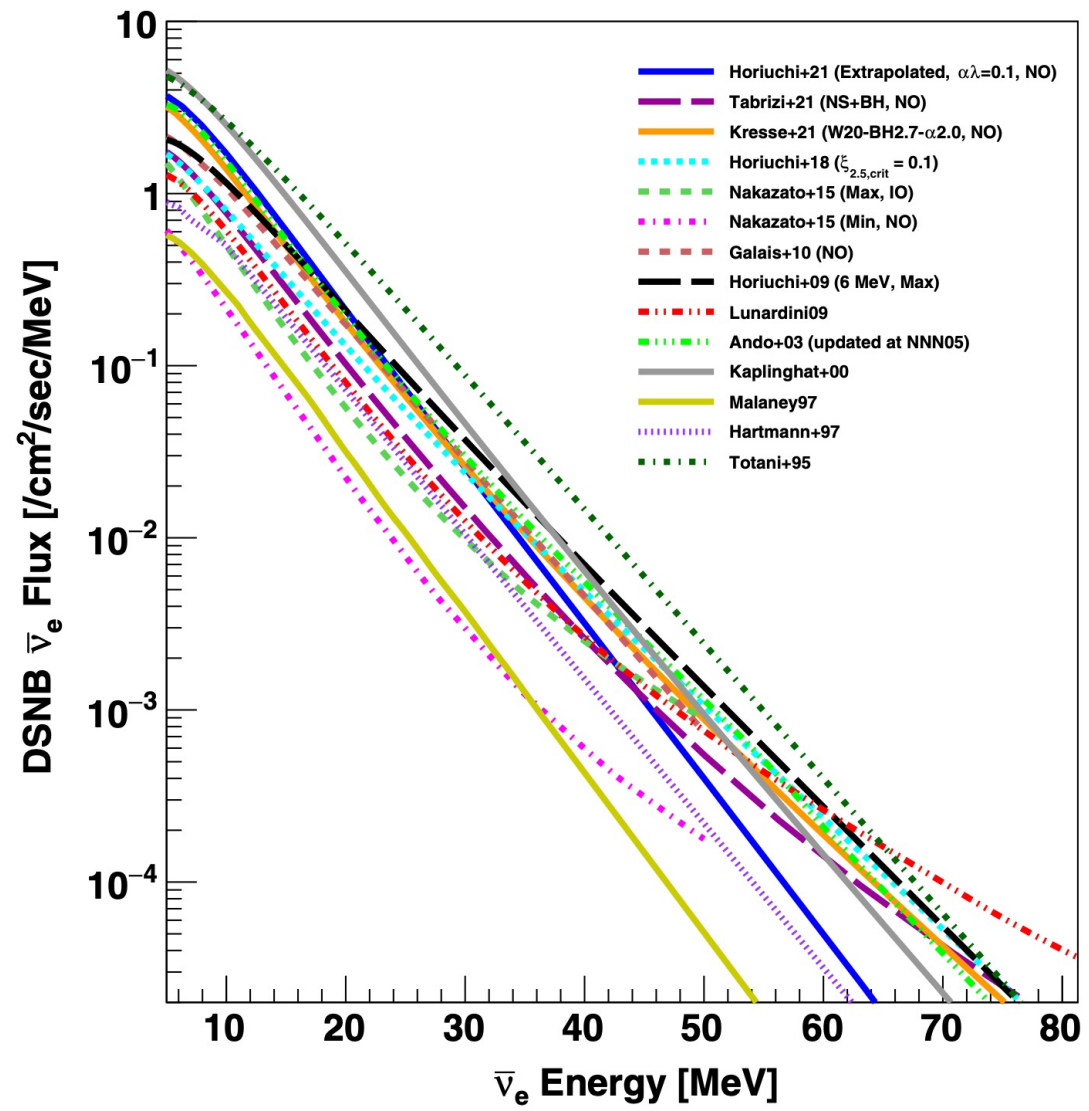
## 今後の方針

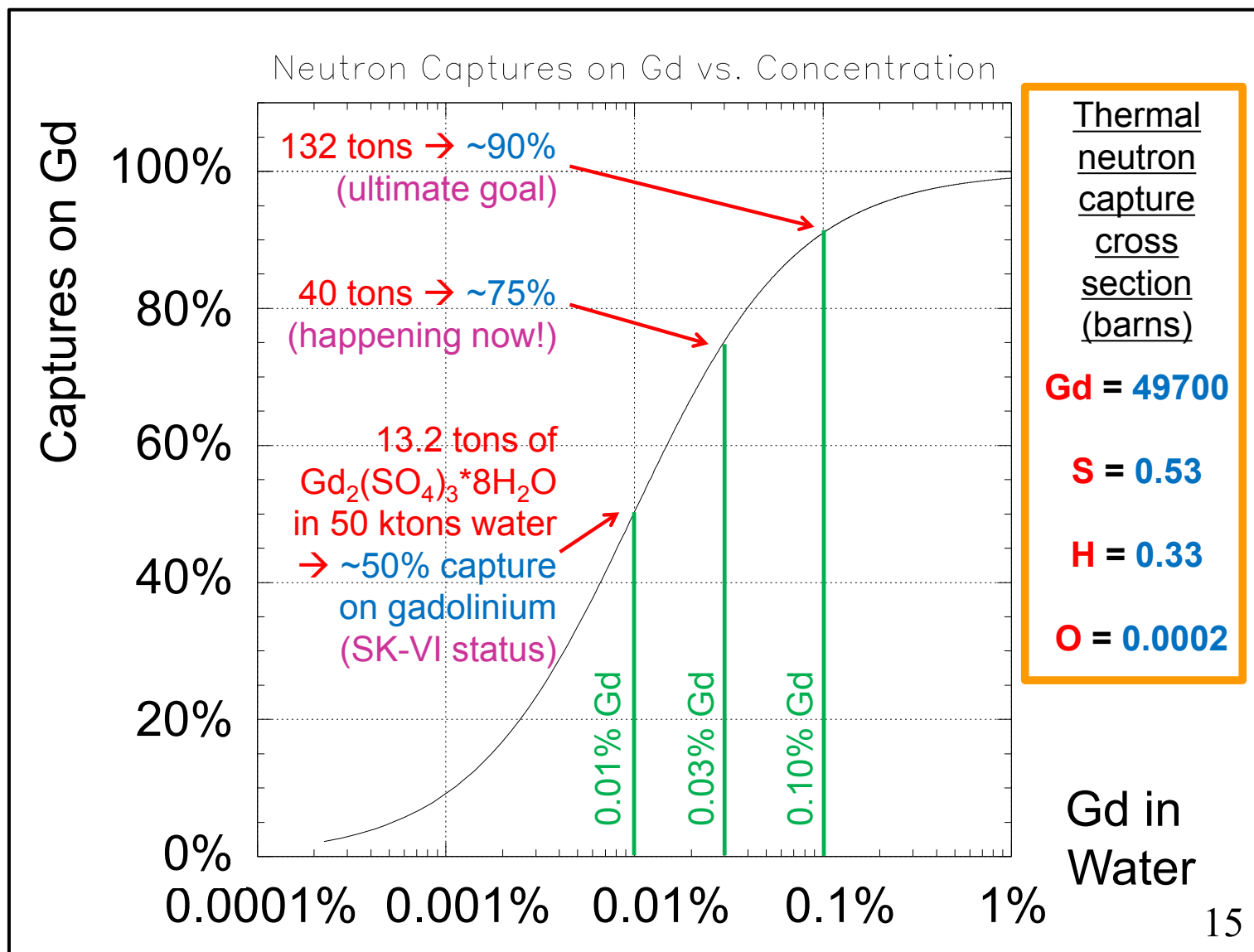
- 必要な実験データを取得して精密なモデルを構築し、シミュレーションに導入  
→ Gd導入後のT2K実験で検証
- SKのデータ解析でさらに大気ニュートリノ背景事象を削減できるか調査  
→ SRNの世界初観測を目指す

## Gd導入後初のNCQE反応断面積測定に向けて

- SK-Gdのデータ解析を進める
- 物理モデルの違いを理解し、系統誤差を見積もる

Backup

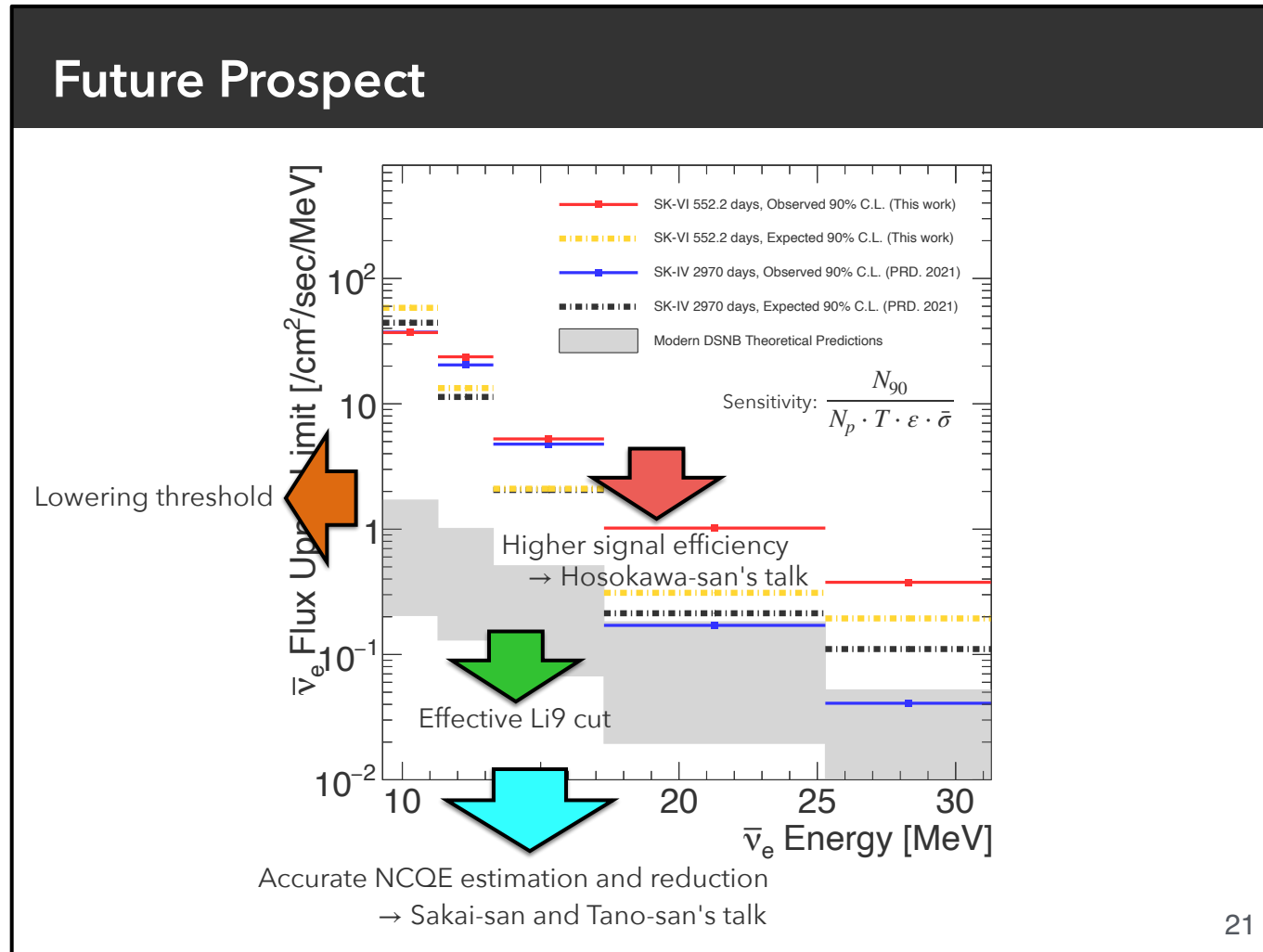




15

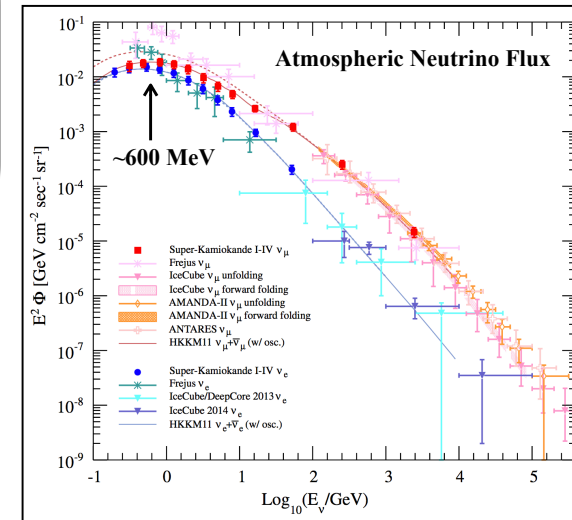
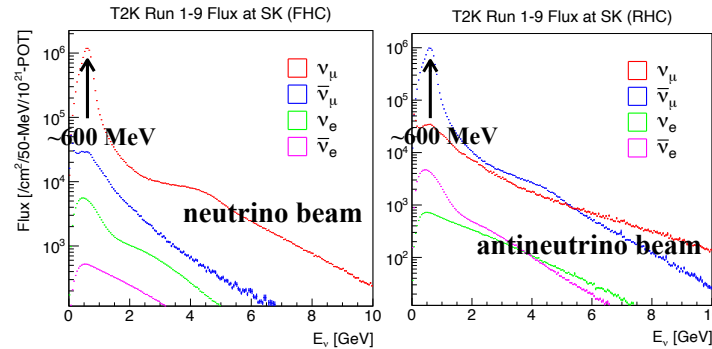
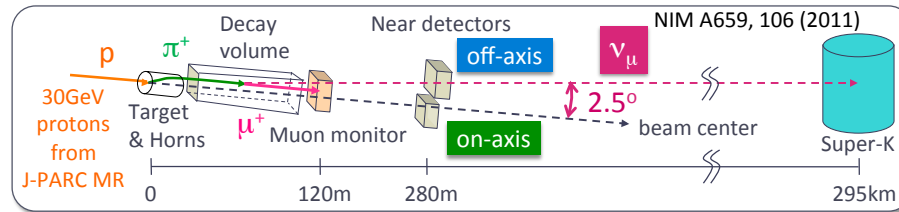
# $\bar{\nu}_e$ フラックスの上限値

- SK-Gdでの最新結果 (by 原田さん)





## T2K実験における NCQE 測定 反応を理解する



T2Kのニュートリノエネルギーは大気ニュートリノのエネルギーに近い



# NCQE反応断面積測定

- SKでの最新結果
  - 系統誤差が圧倒的に大きい

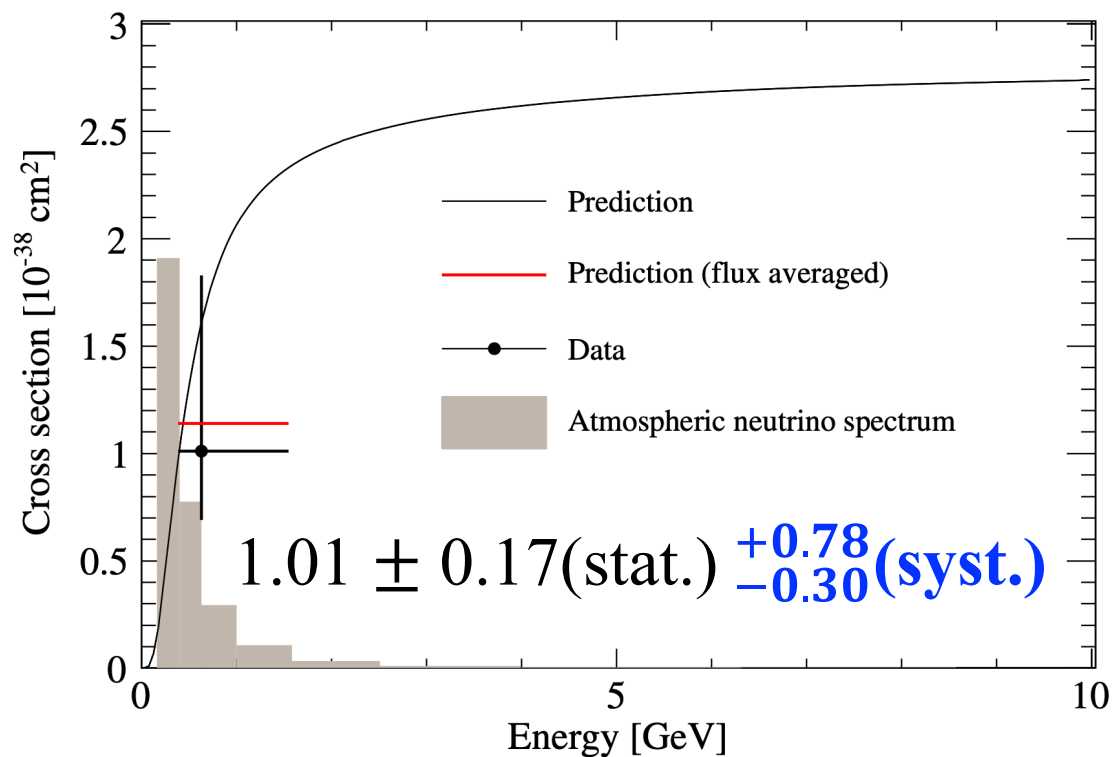


TABLE IV. Uncertainties in NCQE measurement.

	NCQE	NC non-QE
$\nu_{\text{atm}}$ flux		18%
$\nu/\bar{\nu}$ ratio		5%
Cross-section		18%
Primary $\gamma$ 's	15%	3%
Secondary $\gamma$ 's	13%	13%
Neutron multiplicity	21%	16%
Neutron energy	18%	14%
Neutron transportation	+7%	+4%
Data reduction		3%
Neutron tagging		10%
Others		0.7%

## Bertini-style Cascade Model

- A classical (non-quantum mechanical) cascade
  - average solution of a particle traveling through a medium (Boltzmann equation)
  - no scattering matrix calculated
  - can be traced back to some of the earliest codes (1960s)
- Core code:
  - elementary particle collisions with individual protons and neutrons: free space cross sections used to generate secondaries
  - cascade in nuclear medium
  - pre-equilibrium and equilibrium decay of residual nucleus
  - target nucleus built of three concentric shells

## Binary Cascade Model

- Modeling sequence similar to Bertini, except
  - it's a time-dependent model
  - hadron-nucleon collisions handled by forming resonances which then decay according to their quantum numbers
  - particles follow curved trajectories in smooth nuclear potential
- Binary cascade is currently used for incident p, n and  $\pi$ 
  - valid for incident p, n from 0 to 10 GeV
  - valid for incident  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  from 0 to 1.3 GeV
- A variant of the model, G4BinaryLightIonReaction, is valid for incident ions up to  $A = 12$  (or higher if target has  $A < 12$ )

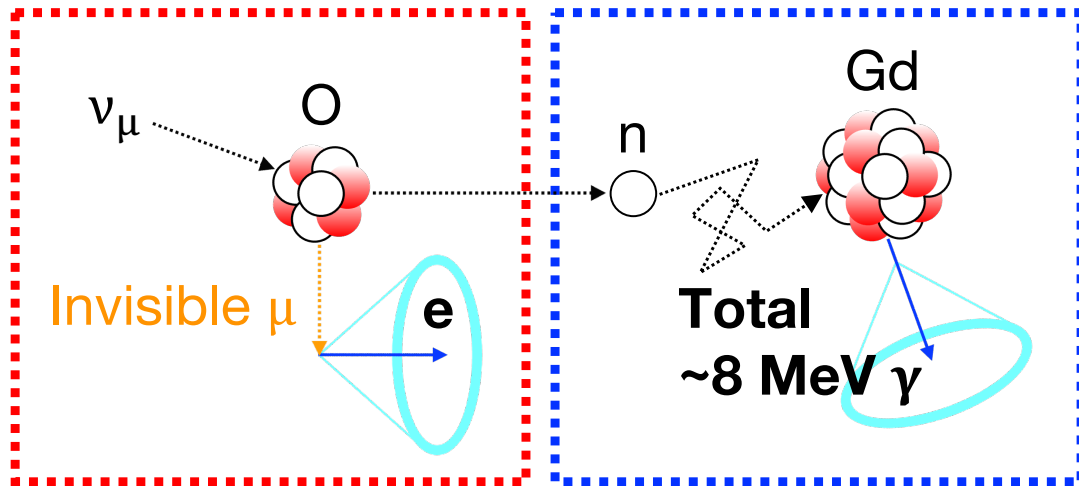
## INCL++ Cascade Model

- Model elements
  - time-dependent model
  - smooth Woods-Saxon or harmonic oscillator potential
  - particles travel in straight lines through potential
  - delta resonance formation and decay (like Binary cascade)
- Valid for incident p, n and  $\pi$ , d, t,  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$  from 150 MeV to 10 GeV
  - also works for projectiles up to  $A = 12$
  - targets must be  $11 < A < 239$
  - ablation model (ABLA) can be used to de-excite nucleus
- Used successfully in spallation studies
  - also expected to be good in medical applications

26

	BERT	BIC	INCL++
# of neutron capture	81,567	56,267	55,130
# of event	37,898	30,799	31,047
# of neutron capture / event	2.152	1.827	1.776
Difference from BERT	-	-15.1%	-17.5%

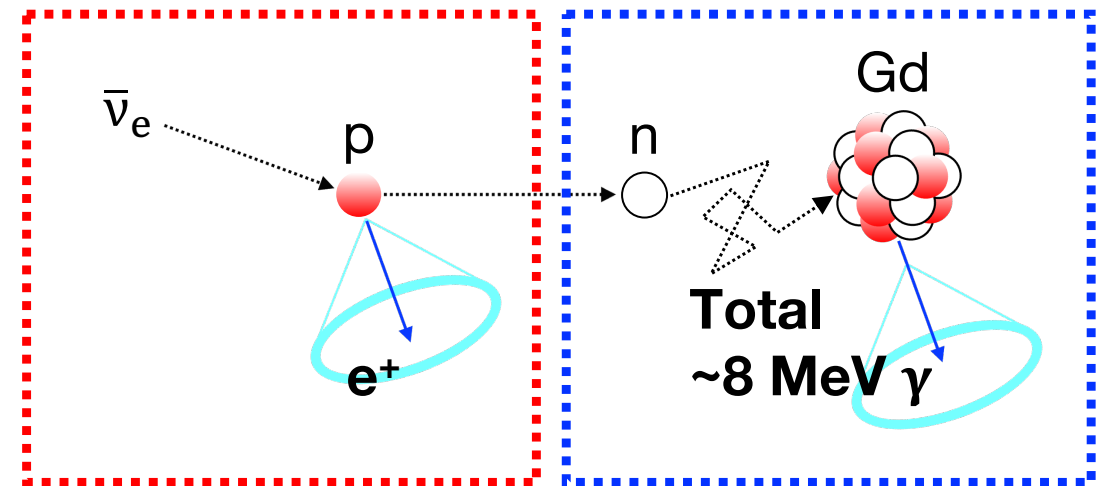
## CCQE



**Prompt event** → **Delayed event**

~20  $\mu\text{sec}$  (Gd : 0.1%)  
 ~60  $\mu\text{sec}$  (Gd : 0.03%)

## SRN



**Prompt event** → **Delayed event**

~20  $\mu\text{sec}$  (Gd : 0.1%)  
 ~60  $\mu\text{sec}$  (Gd : 0.03%)

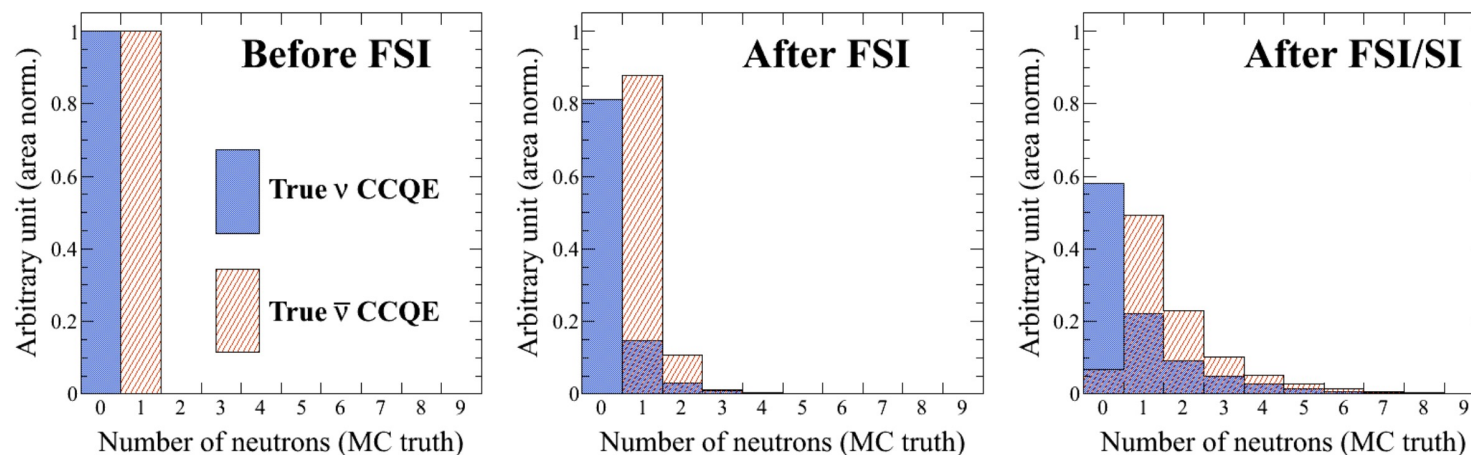
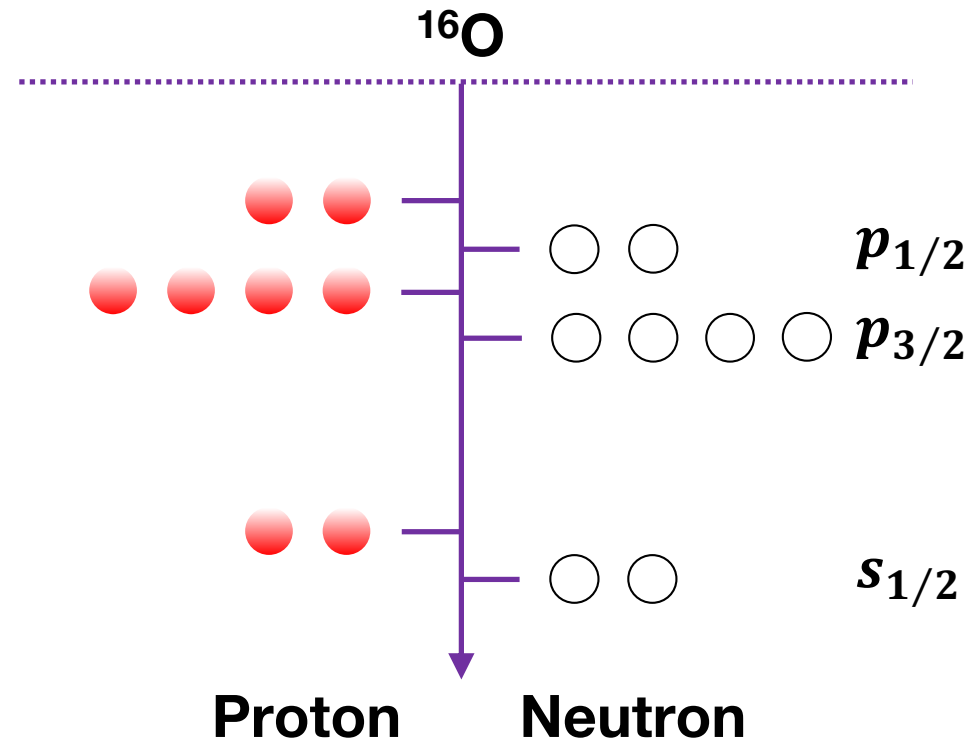


Figure 1.8: An example of neutron multiplicity using true CCQE  $\nu$  (cyan) and  $\bar{\nu}$  (orange) interactions in water. The left, middle, right correspond to neutron multiplicities after primary interaction, after FSI, and after SI, respectively. T2K beam neutrino flux is assumed.

# 一次ガンマ線

- 3つの準位 ( $p_{1/2}$ ,  $p_{3/2}$ ,  $s_{1/2}$ )  
→ どの準位の核子が弾かれるかによって生成粒子が変化

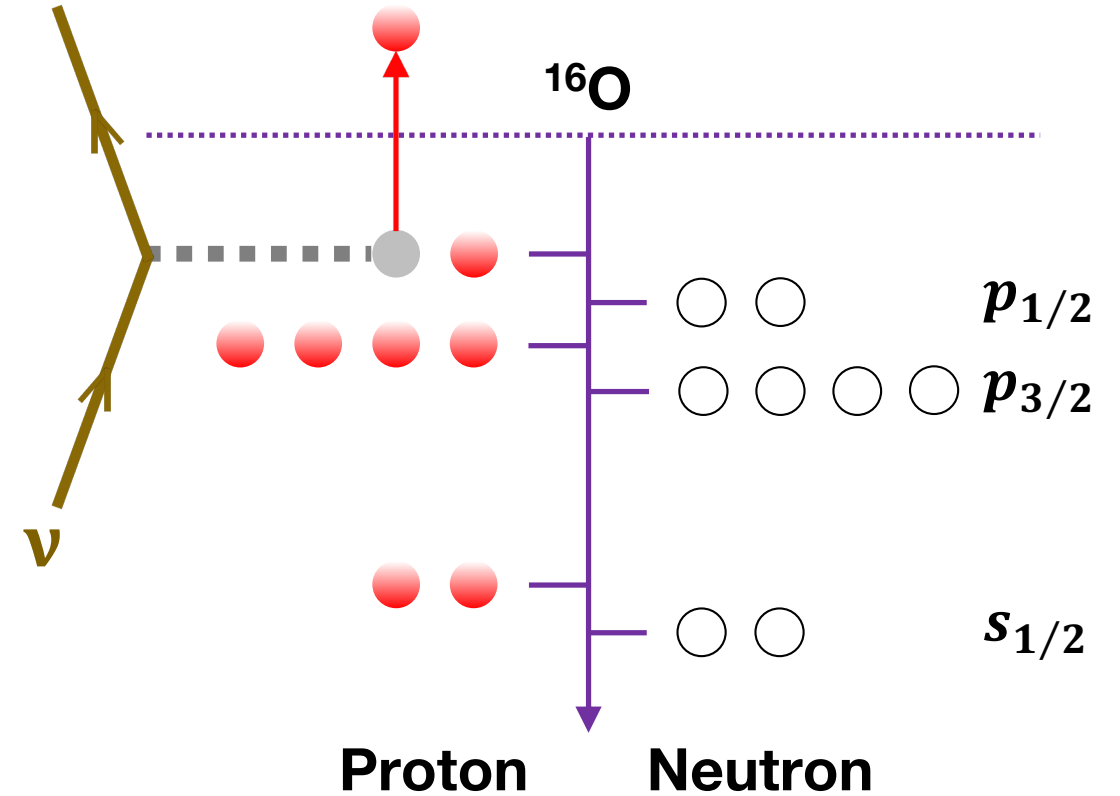




# 一次ガンマ線

$p_{1/2}$ の核子が弾かれた場合

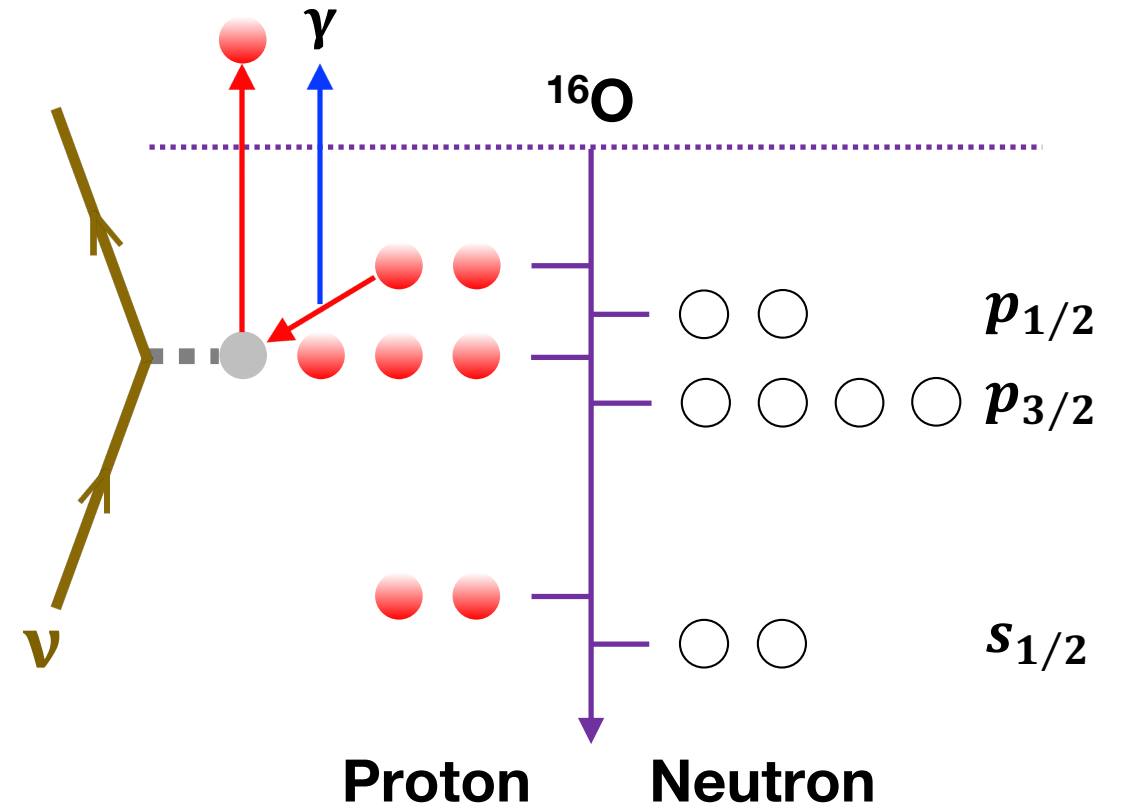
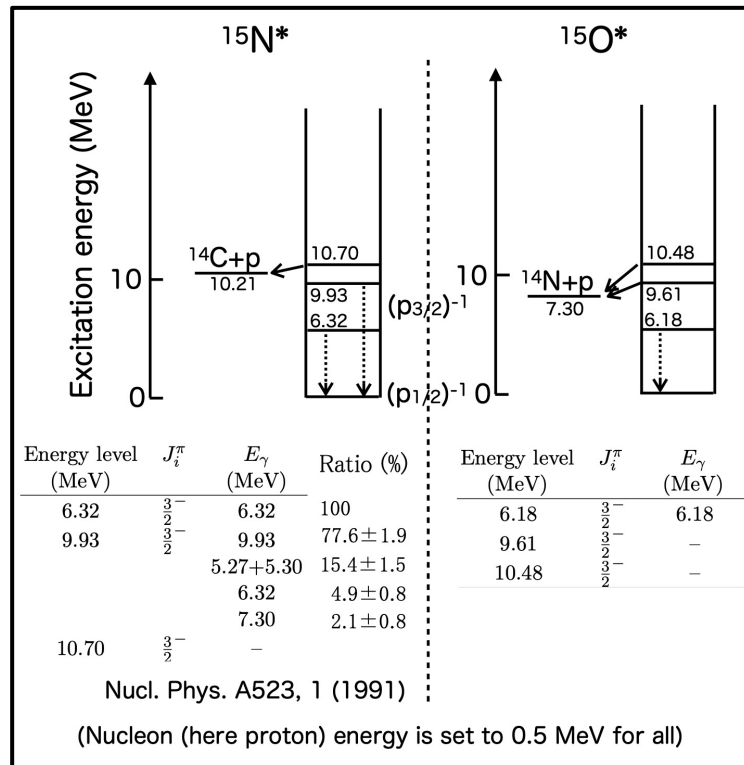
- 残留原子核は基底状態 ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ )  
→ 核子が1個だけ発生



# 一次ガンマ線

$p_{3/2}$ の核子が弾かれた場合

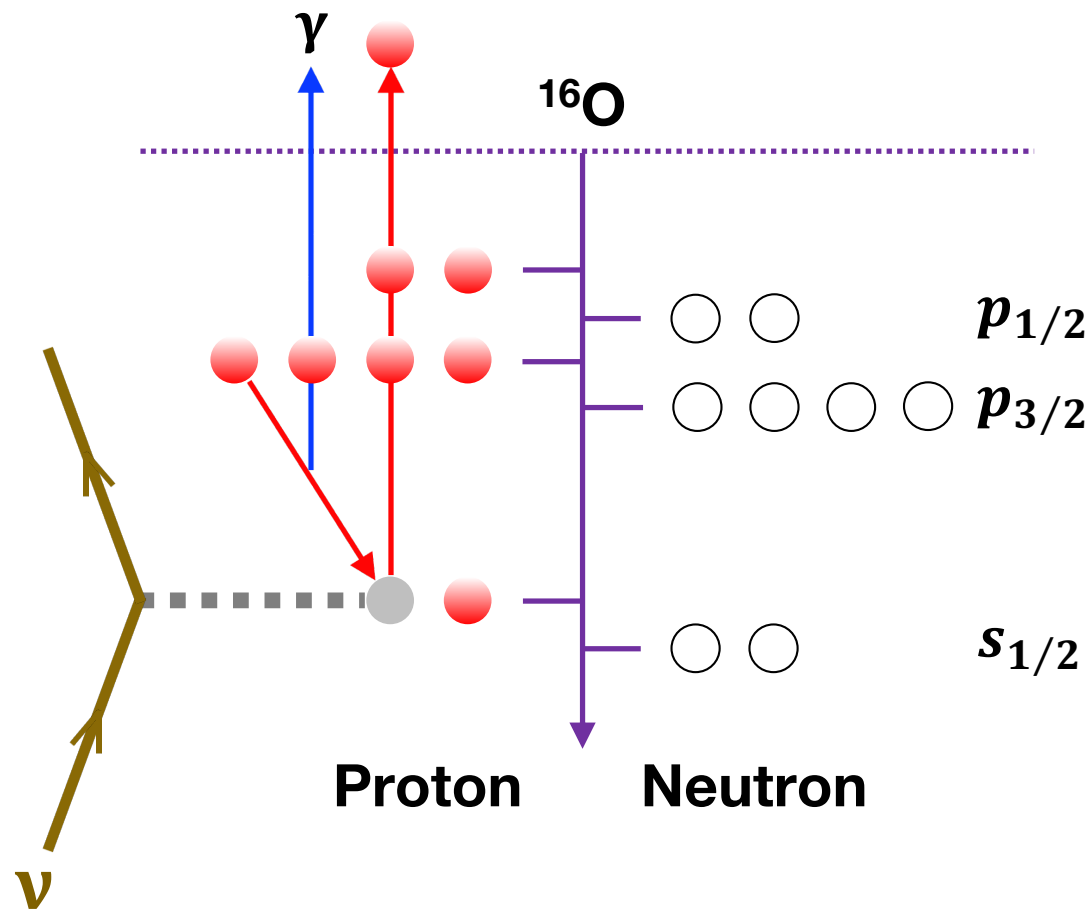
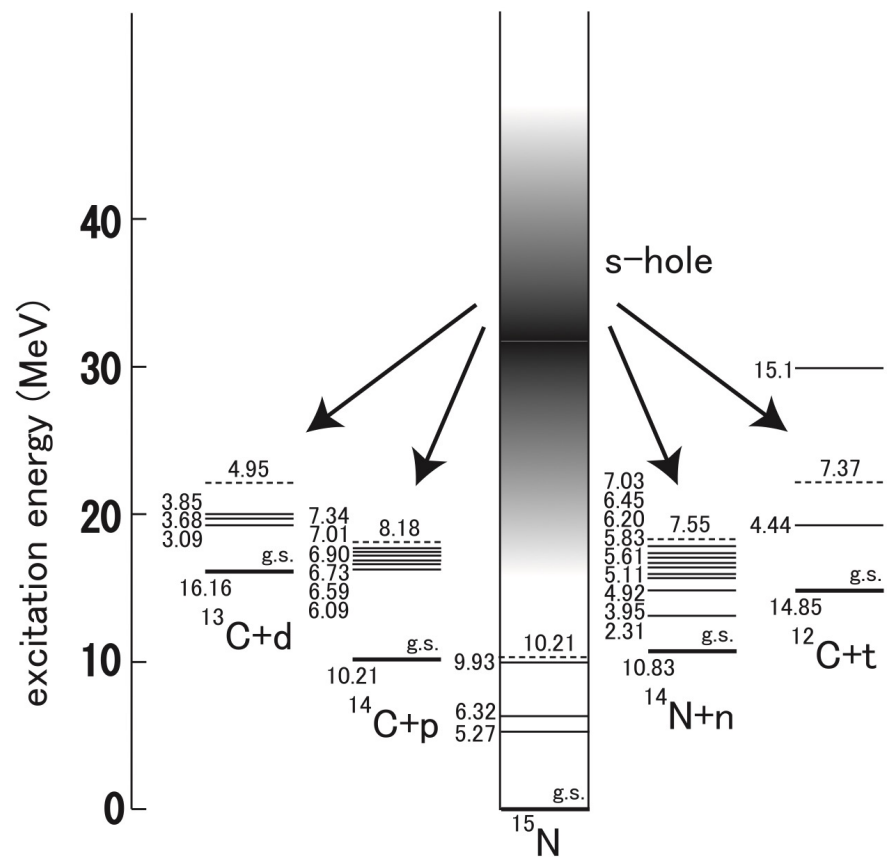
- 残留原子核は励起状態 ( $^{15}\text{N}^*$ ,  $^{15}\text{O}^*$ )
- 核子・脱励起ガンマ線が発生



# 一次ガンマ線

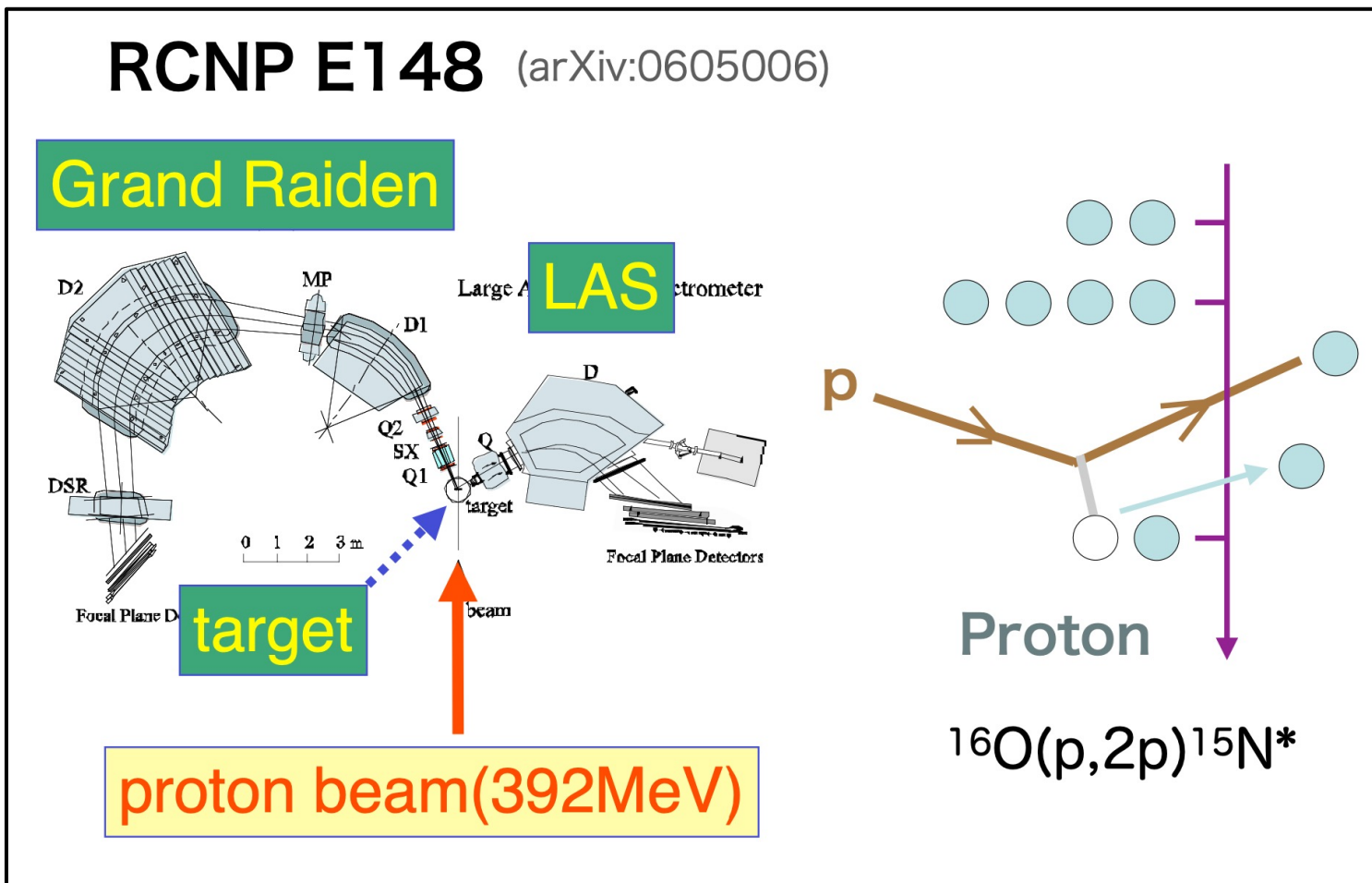
$s_{1/2}$ の核子が弾かれた場合

- 核子・脱励起ガンマ線が発生



# 一次ガンマ線

$s_{1/2}$ の核子が弾かれた場合



Decay scheme	Energy level $\gamma$ -ray energy		$N(k)/N_{\text{tot}}$
	MeV ( $J^\pi$ )	MeV (ratio)	
$^{13}\text{C}+d$	3.09 ( $1/2^+$ )	3.09 (100%)	3.0%
$^{13}\text{C}+d$	3.68 ( $3/2^+$ )	3.68 (99.3%)	4.2%
$^{13}\text{C}+d$	3.85 ( $5/2^+$ )	3.09 (1.20%)	4.6%
		3.68 (36.3%)	
		3.85 (62.5%)	
$^{12}\text{C}+t$	4.44 ( $2^+$ )	4.44 (100%)	5.8%
$^{14}\text{N}+n$	4.92 ( $0^-$ )	4.92 (97%)	5.2%
$^{14}\text{N}+n$	5.11 ( $2^-$ )	5.11 (79.9%)	0.0%
$^{14}\text{N}+n$	5.69 ( $1^-$ )	3.38 (63.9%)	4.5%
		5.69 (36.1%)	
$^{14}\text{N}+n$	5.83 ( $3^-$ )	5.11 (62.9%)	0.54%
		5.83 (21.3%)	
$^{14}\text{N}+n$	6.20 ( $1^+$ )	3.89 (76.9%)	0.0%
		6.20 (23.1%)	
$^{14}\text{N}+n$	6.45 ( $3^+$ )	5.11 (8.1%)	2.8%
		6.44 (70.1%)	
$^{14}\text{N}+n$	7.03 ( $2^+$ )	7.03 (98.6%)	(6.7%)
$^{14}\text{C}+p$	6.09 ( $1^-$ )	6.09 (100%)	(0.0%)
$^{14}\text{C}+p$	6.59 ( $0^+$ )	6.09 (98.9%)	(0.0%)
$^{14}\text{C}+p$	6.73 ( $3^-$ )	6.09 (3.6%)	0.43%
		6.73 (96.4%)	
$^{14}\text{C}+p$	6.90 ( $0^-$ )	6.09 (100%)	(0.0%)
$^{14}\text{C}+p$	7.01 ( $2^+$ )	6.09 (1.4%)	(6.7%)
		7.01 (98.6%)	
$^{14}\text{C}+p$	7.34 ( $2^-$ )	6.09 (49.0%)	5.7%
		6.73 (34.3%)	
		7.34 (16.7%)	

# 一次ガンマ線

- ニュートリノがある準位の核子を弾く確率に大きな不定性
  - othersをどの準位に含めるかで核子の個数が大きく変化
  - 二次ガンマ線・中性子多重度に影響
- 核子の準位によらずガンマ線と中性子を包括的に測定できる実験はできないか？
  - 理研で酸素原子核ビームを水素標的に当てる実験を計画中

State	Probability
$p_{1/2}$	15.80%
$p_{3/2}$	35.15%
$s_{1/2}$	10.55%
others	38.50%

- [1](#) 小汐由介, “超新星背景ニュートリノ精密観測 鍵となる素粒子・原子核実験について”, 日本物理学会 2021年秋季大会 (2021)
- [2](#) J. F. Beacom and M. R. Vagins, Phys. Rev. Lett. 93, 171101 (2004)
- [3](#) K. Abe *et al.*, Phys. Rev. D 104, 122002 (2021)
- [4](#) K. Abe *et al.*, Phys. Rev. D 100, 112009 (2019)
- [5](#) L. Wan *et al.*, Phys. Rev. D 99, 032005 (2019)
- [6](#) R. Akutsu, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo (2019)
- [7](#) M. Vagins, “A Gadolinium-loaded Super-Kamiokande”, Neutrino 2022 (2022)
- [8](#) D. Wright, “Hadronic Physics I”, Geant4 Tutorial at Sao Paulo (2019)
- [9](#) Y. Koshio, “NEUT for NC elastic” (2021)
- [10](#) K. Kobayashi *et al.*, arXiv:nucl-ex/0604006 (2006)