

(一般シンポジウム) 新生スーパーカミオカンデがもたらす超新星研究の新展開

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

小汐 由介 (岡山大)

2021年9月17日 / 日本物理学会・オンライン開催

科研費
KAKENHI

基盤研究(A) (一般) 20H00162

「超大型水チェレンコフ測定器で挑む超新星背景ニュートリノの発見と宇宙の進化の解明」



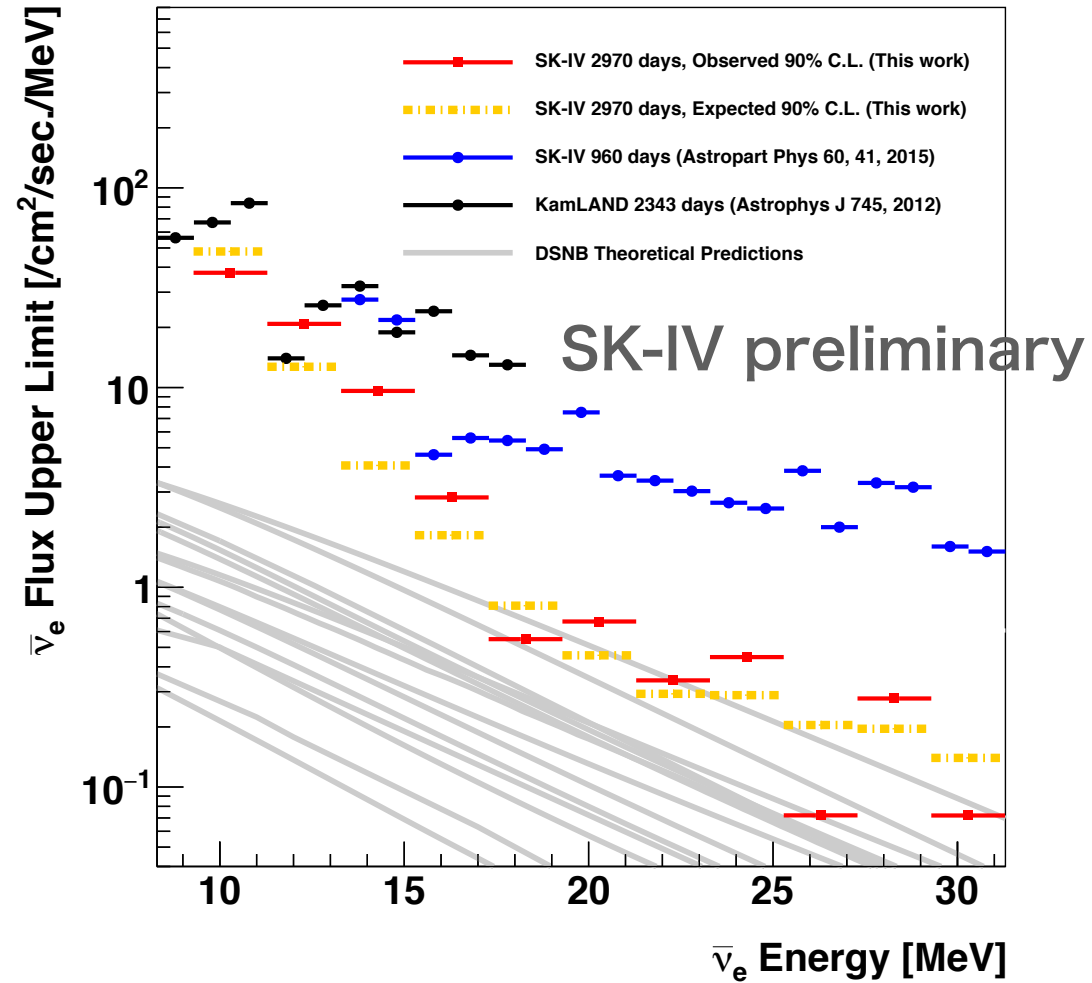
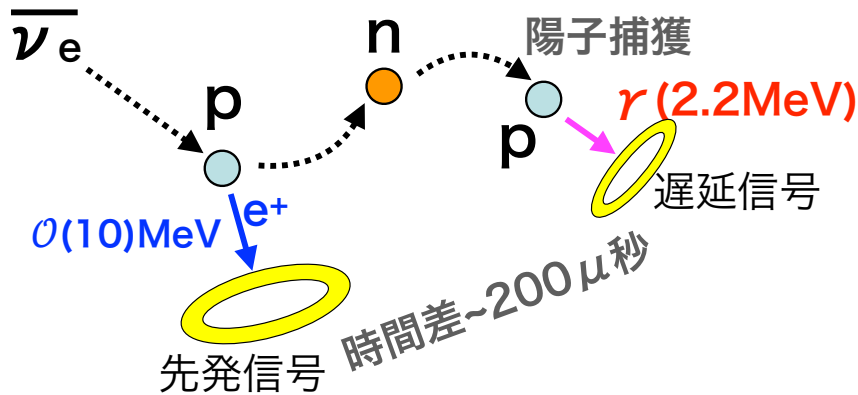
Introduction

超新星背景ニュートリノ観測

現状のおさらい

- SK-IV (pure water) での上限値は、理論予測値に近づいている。
- 陽子による中性子捕獲反応で発生する 2.2MeV ガンマ線 (検出効率~20%) を同時遅延計測で使用

Inverse Beta Decay (IBD)

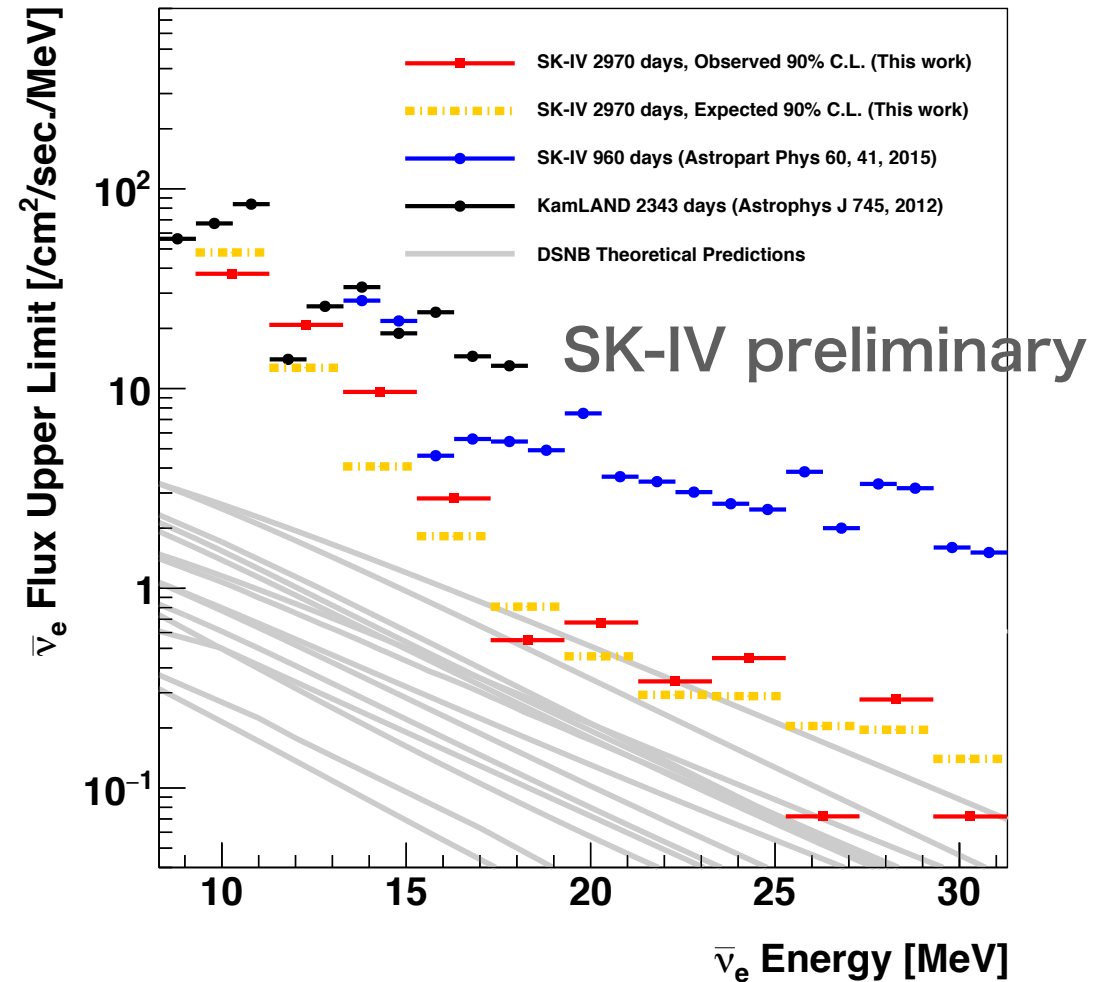
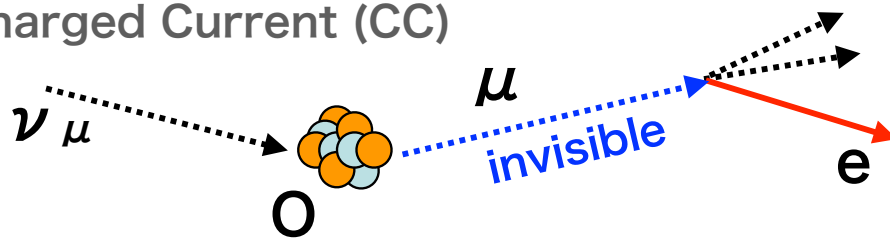


超新星背景ニュートリノ観測

現状のおさらい

- SK-IV (pure water) での上限値は、理論予測値に近づいている。
- 陽子による中性子捕獲反応で発生する 2.2MeV ガンマ線 (検出効率~20%) を同時遅延計測で使用
- 特に大気ニュートリノ起源の崩壊電子背景事象の削減に成功

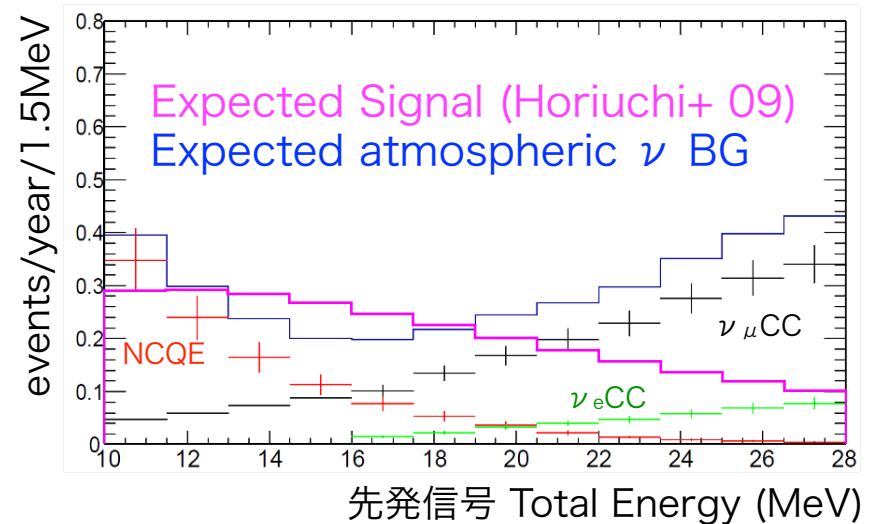
Charged Current (CC)



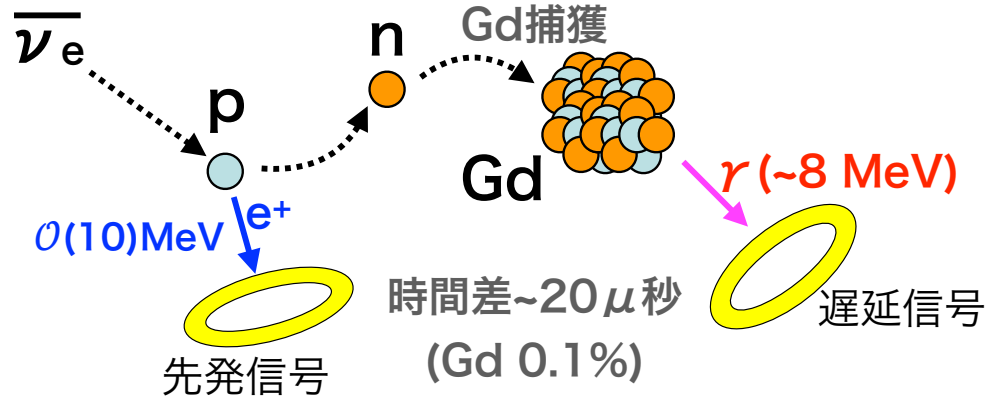
超新星背景ニュートリノ観測

SK-Gdでの発見に向けて

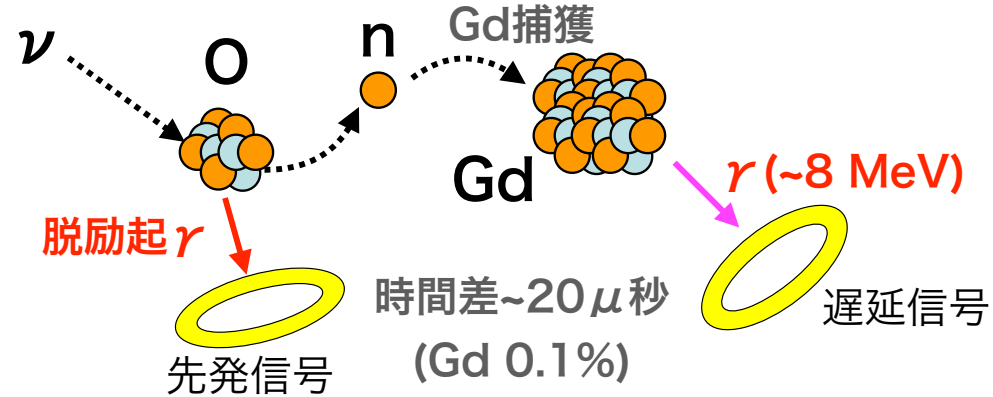
- Gdによる中性子捕獲反応の同時遅延計測では中性子検出効率が大きく向上
(現在~50%、最終目標~90%)
- 特に大気ニュートリノ起源の背景事象を理解する必要がある



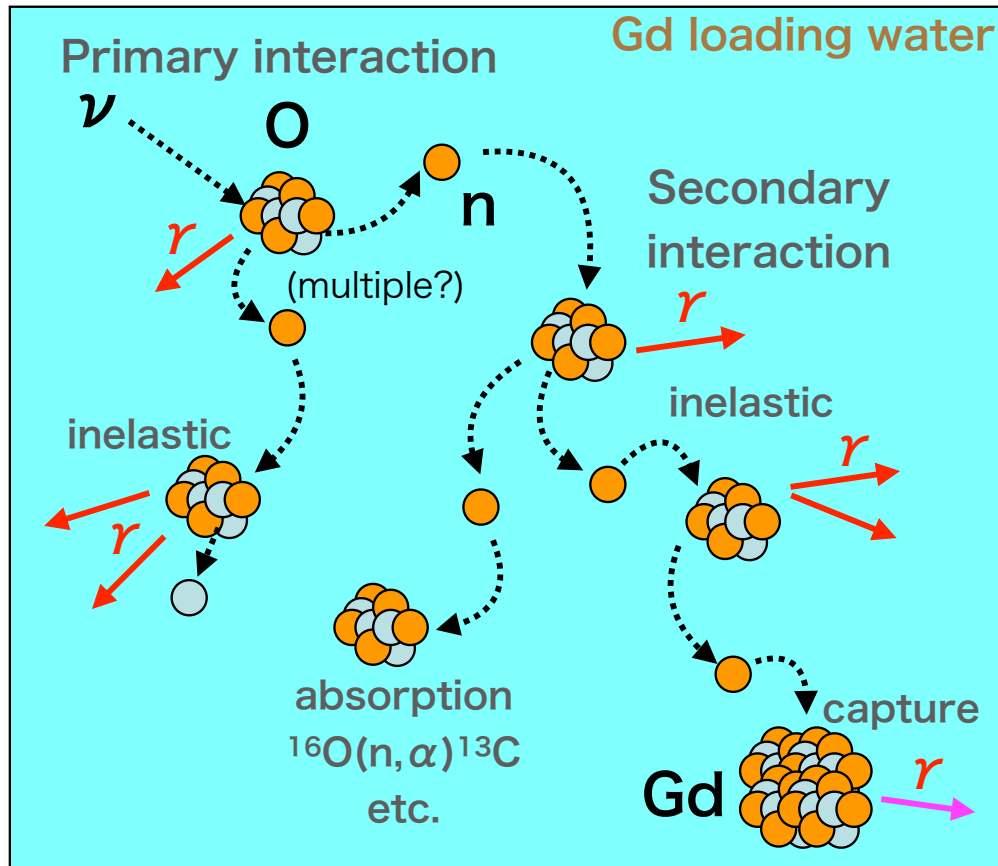
Inverse Beta Decay (IBD)



Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

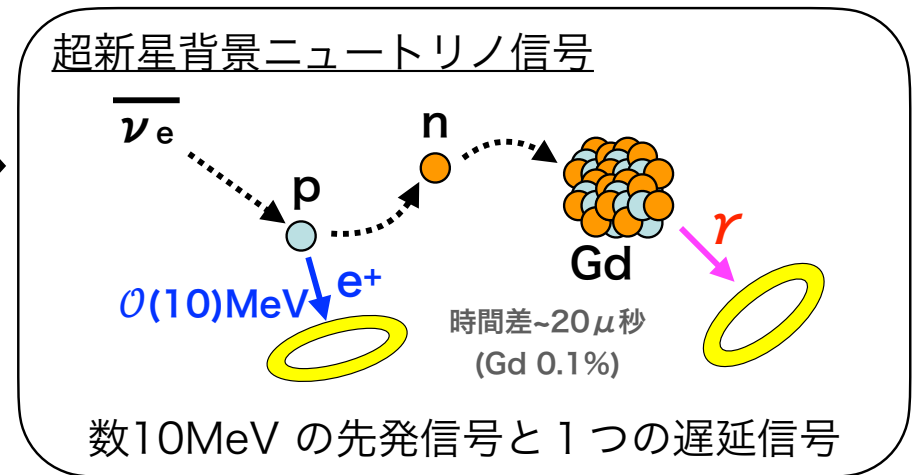


大気ニュートリノ反応 検出器内で何が起こる？



- 中性子の熱化中に発生する Secondary γ は Primary γ との時間差は小さく、SKでは同じ事象と判別される。
- それぞれのガンマ線（数MeV領域）の識別は非常に困難。
- 真の信号と同様な大気ニュートリノ起源信号の見積りをいかに高精度で行えるか。

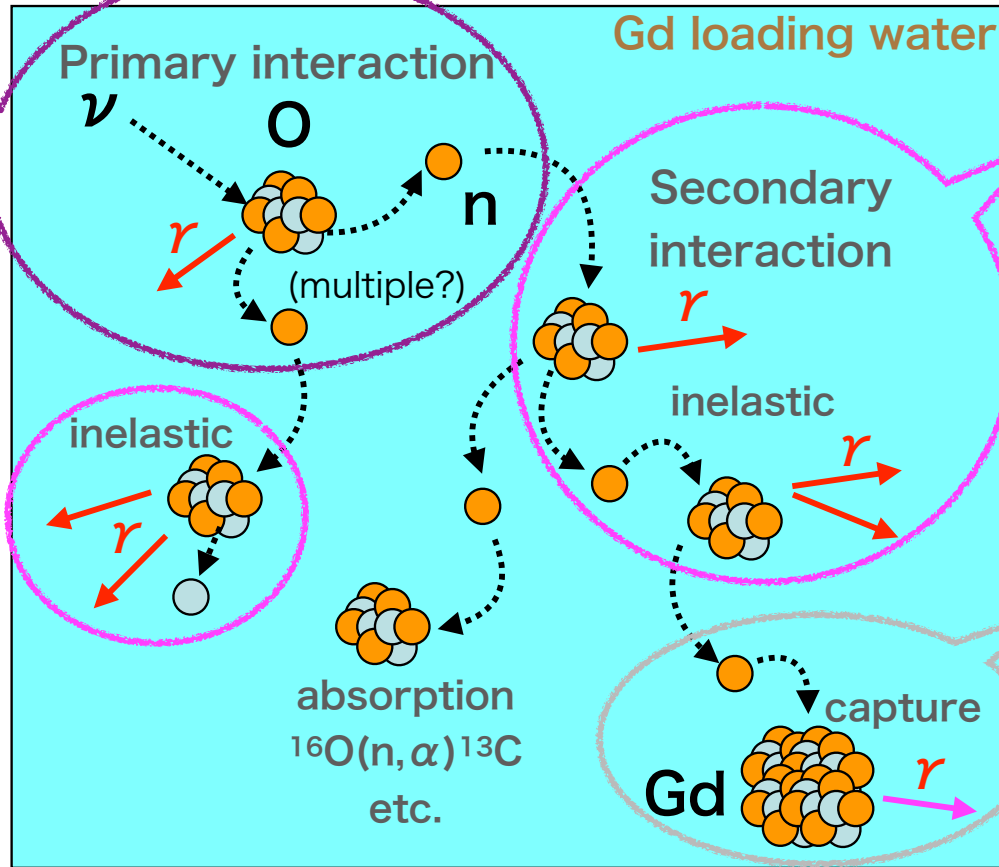
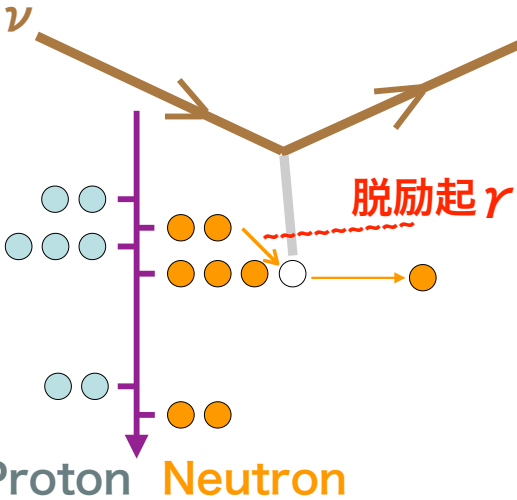
それぞれの反応を理解し、シミュレーションへ実装



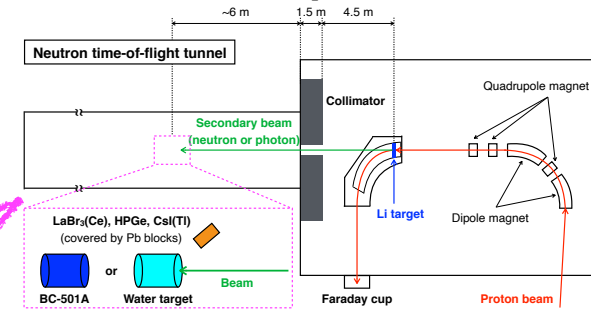
大気ニュートリノ反応

検出器内で何が起る？

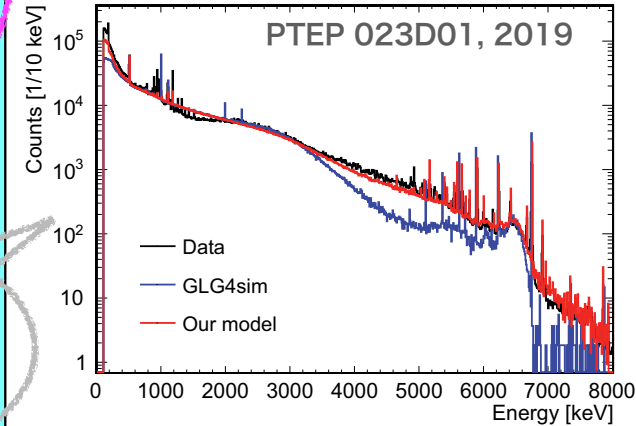
Nucleon knockout and de-excitation



Neutron exp. at RCNP



ANRRI exp. at J-PARC MLF



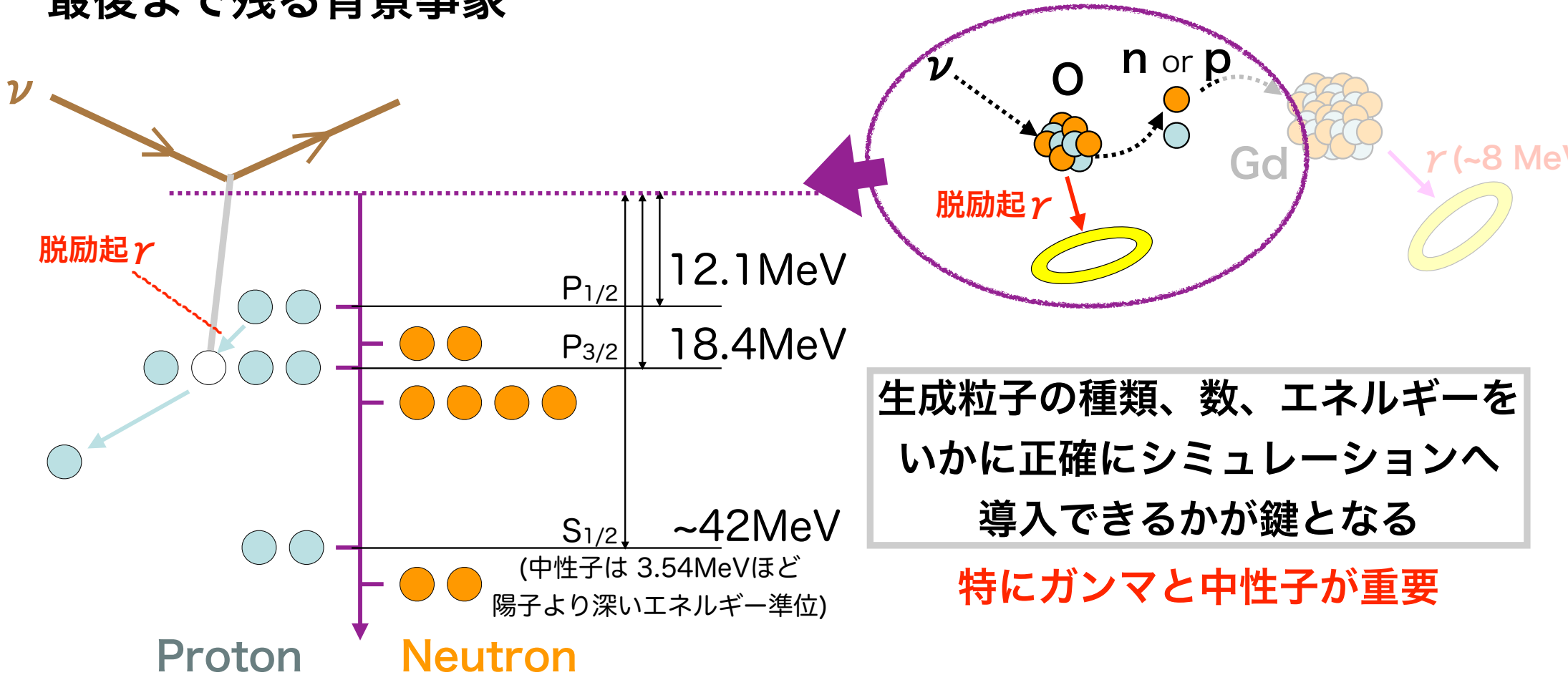
implemented into Geant4

それぞれの反応を理解し、シミュレーションへ実装

NCQE interaction

Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

最後まで残る背景事象

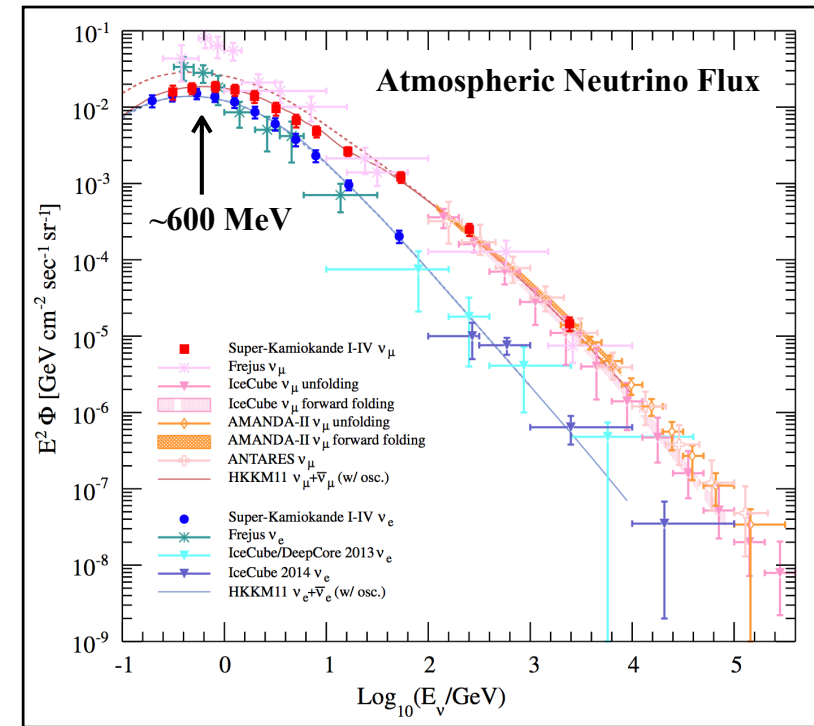
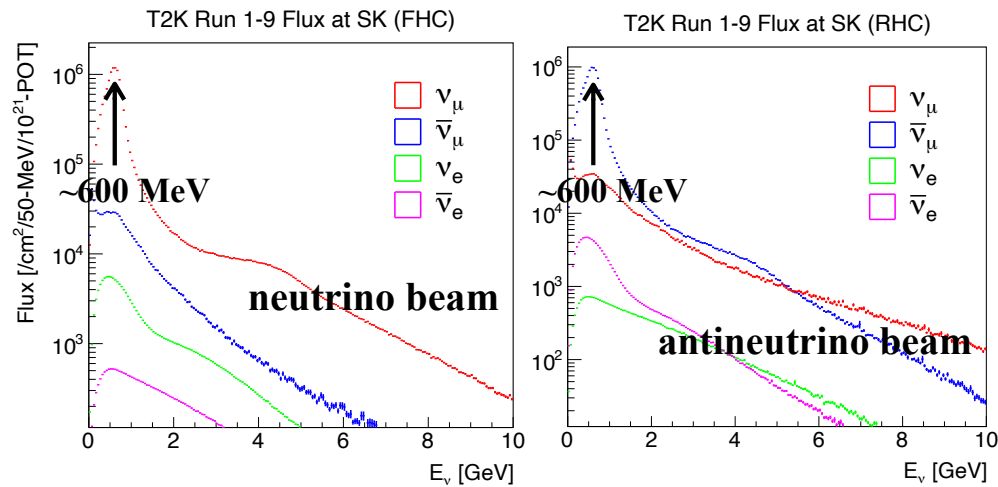
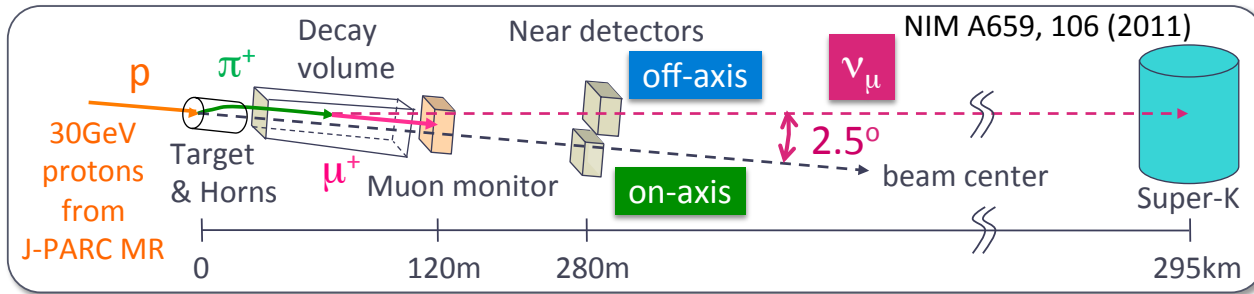


生成粒子の種類、数、エネルギーを
いかに正確にシミュレーションへ
導入できるかが鍵となる

特にガンマと中性子が重要

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

T2K実験における NCQE 測定

最新結果 PRD 100, 112009 (2019)

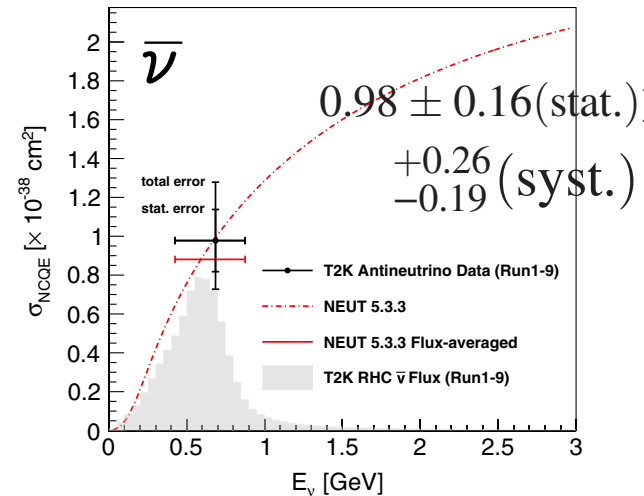
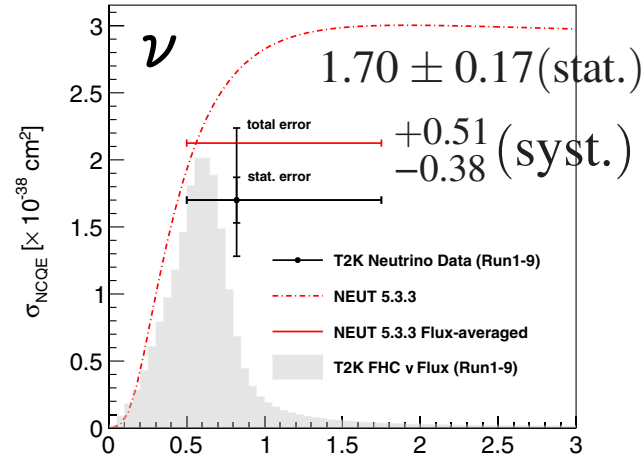


TABLE II. Summary of systematic uncertainties on the observed event rate in percent for each sample component. The fraction of each component, listed as “Event fraction,” is also shown in percent. For beam-unrelated events the total error entry represents the statistical uncertainty.

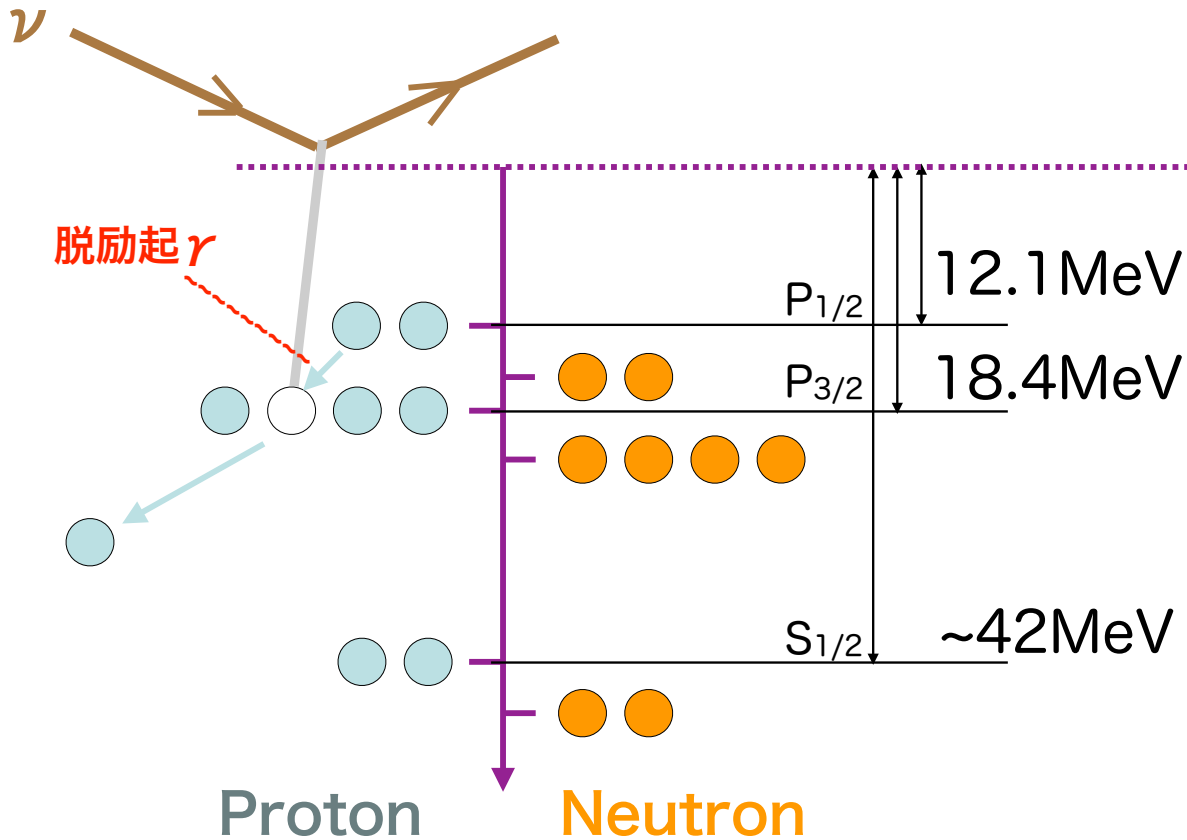
FHC	ν -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC-other	CC	Beam-unrelated
Event fraction	75.0	2.0	17.8	3.7	1.5
Neutrino flux	6.7	8.6	7.3	6.4	...
Neutrino interaction	3.0	3.0	8.2	16.5	...
Primary- γ production	11.0	10.6	6.0	6.6	...
Secondary- γ production	13.5	13.4	19.5	17.6	...
Oscillation parameter	4.1	...
Detector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

RHC	ν -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- γ production	12.2	11.4	3.5	0.5	...
Secondary- γ production	13.6	13.1	19.3	21.4	...
Oscillation parameter	5.1	...
Detector response	3.4	3.4	2.0	5.2	...
Total error	20.1	19.0	23.4	44.7	3.9

Primary gamma production

Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

Primary gamma production



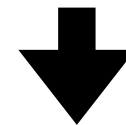
$$\sigma_{\gamma} = \sigma(\nu + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow \nu + \gamma + Y + N)$$

$$= \sum_{\alpha} \sigma(\nu + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow \nu + X_{\alpha} + N) \times \text{Br}(X_{\alpha} \rightarrow \gamma + Y)$$

X_{α} : α 準位の残留原子核

Y : 原子核 X_{α} による EM decay

${}^{15}_8\text{O}, {}^{15}_7\text{N}, {}^{14}_7\text{N} + n, {}^{14}_6\text{C} + p, \dots$



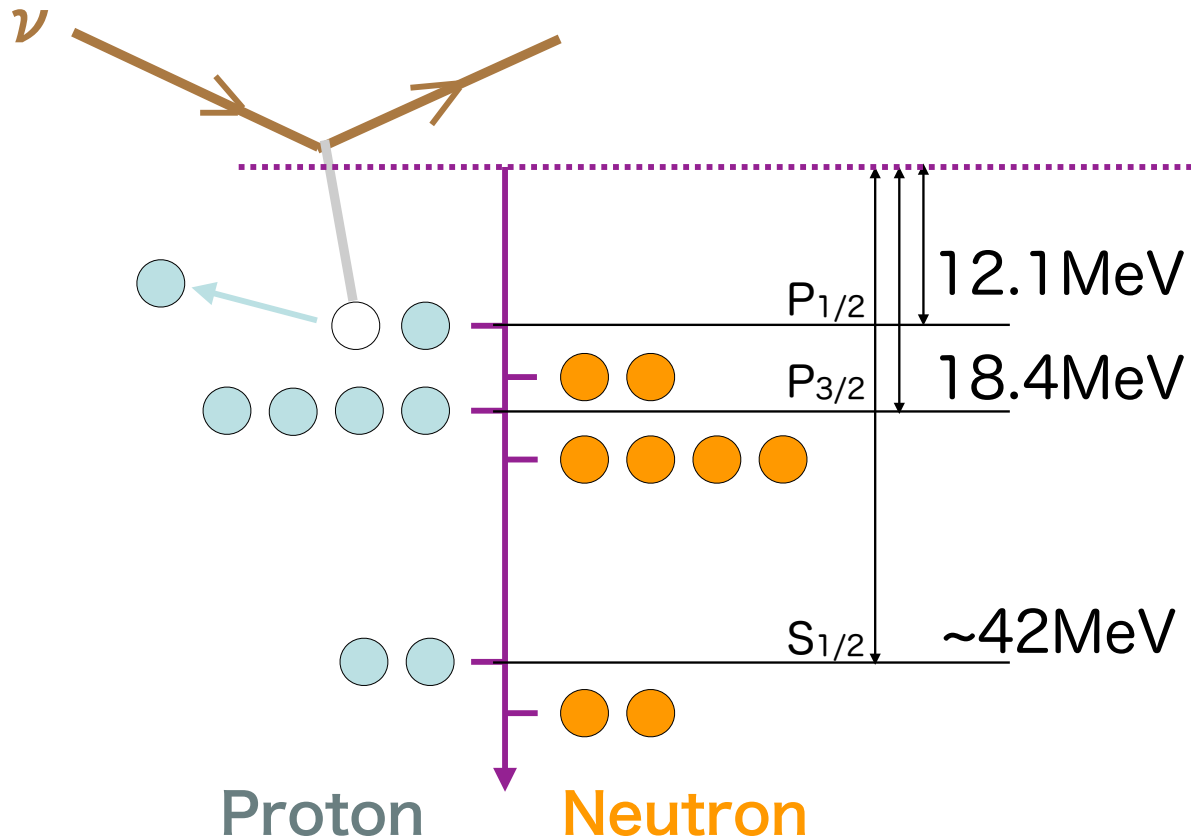
シミュレーションへの導入には
原子核実験の結果を用いる

Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

$P_{1/2}$ 核子の knock out

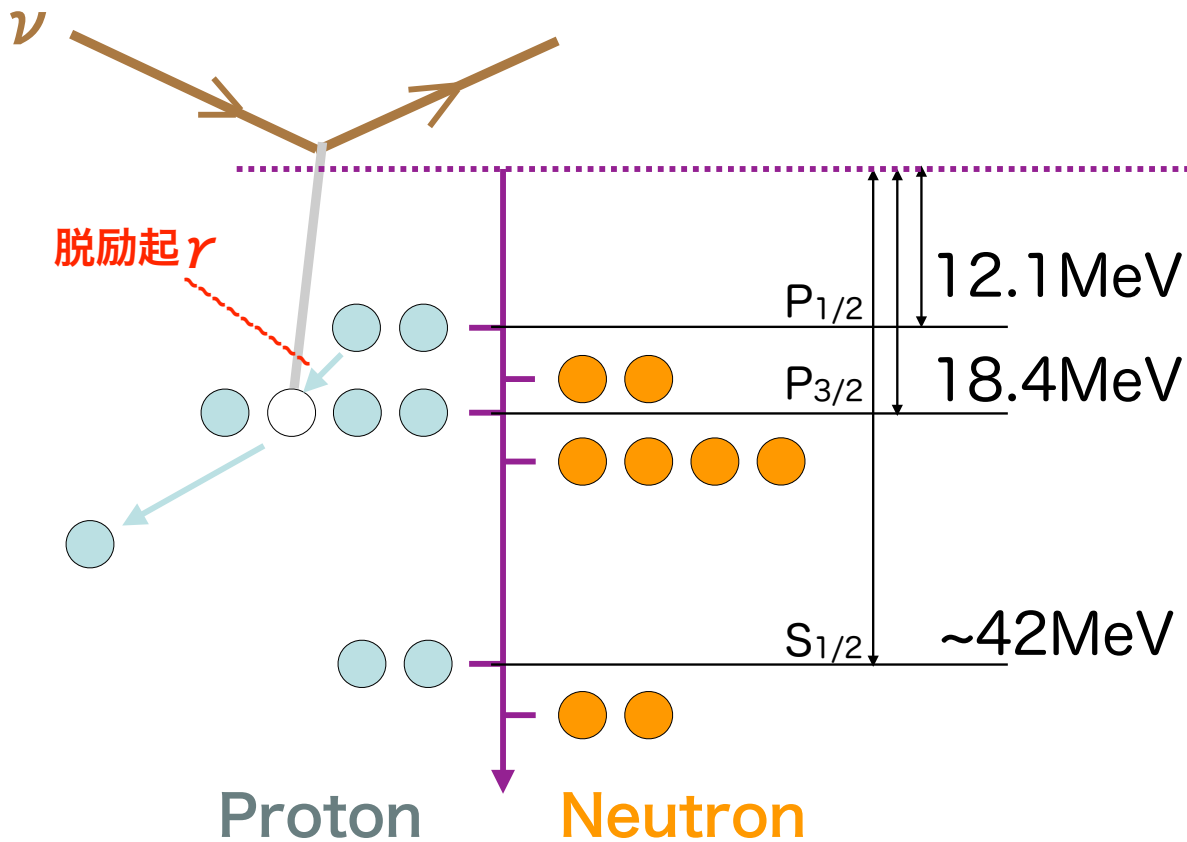
残留原子核は基底状態 (^{15}N , ^{15}O)

knock out 核子以外の粒子生成は無し

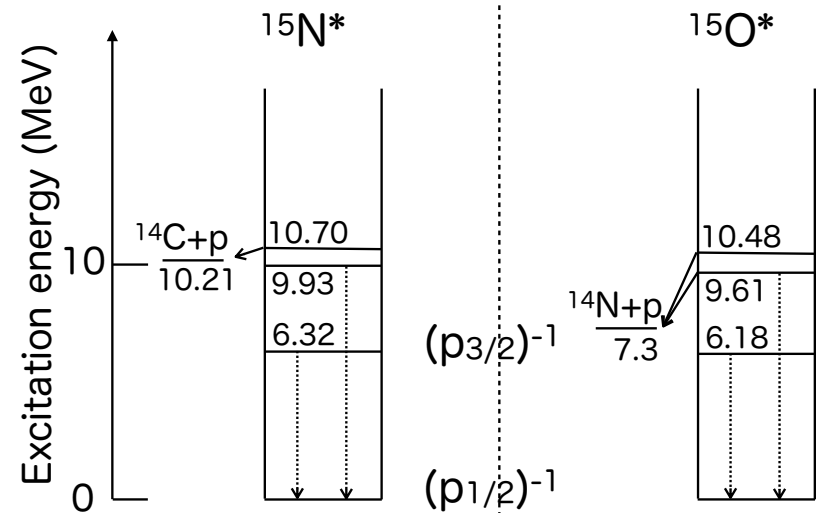


Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

P_{3/2}核子の knock out



励起状態 (脱励起ガンマ線 / 粒子崩壊 (一部))



Energy level (MeV)	J_i^π	E_γ (MeV)	Ratio (%)	Energy level (MeV)	J_i^π	E_γ (MeV)
6.32	$\frac{3}{2}^-$	6.32	100	6.18	$\frac{3}{2}^-$	6.18
9.93	$\frac{3}{2}^-$	9.93	77.6 ± 1.9	9.61	$\frac{3}{2}^-$	-
		$5.27+5.30$	15.4 ± 1.5	10.48	$\frac{3}{2}^-$	-
		6.32	4.9 ± 0.8			
		7.30	2.1 ± 0.8			
10.70	$\frac{3}{2}^-$	-				

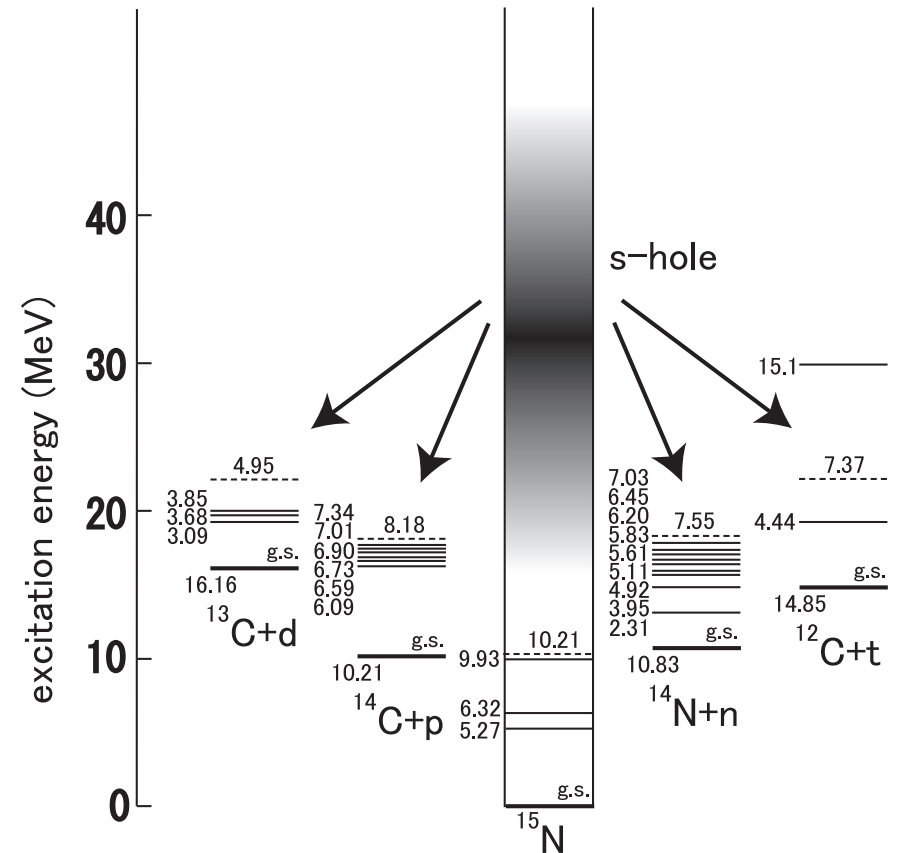
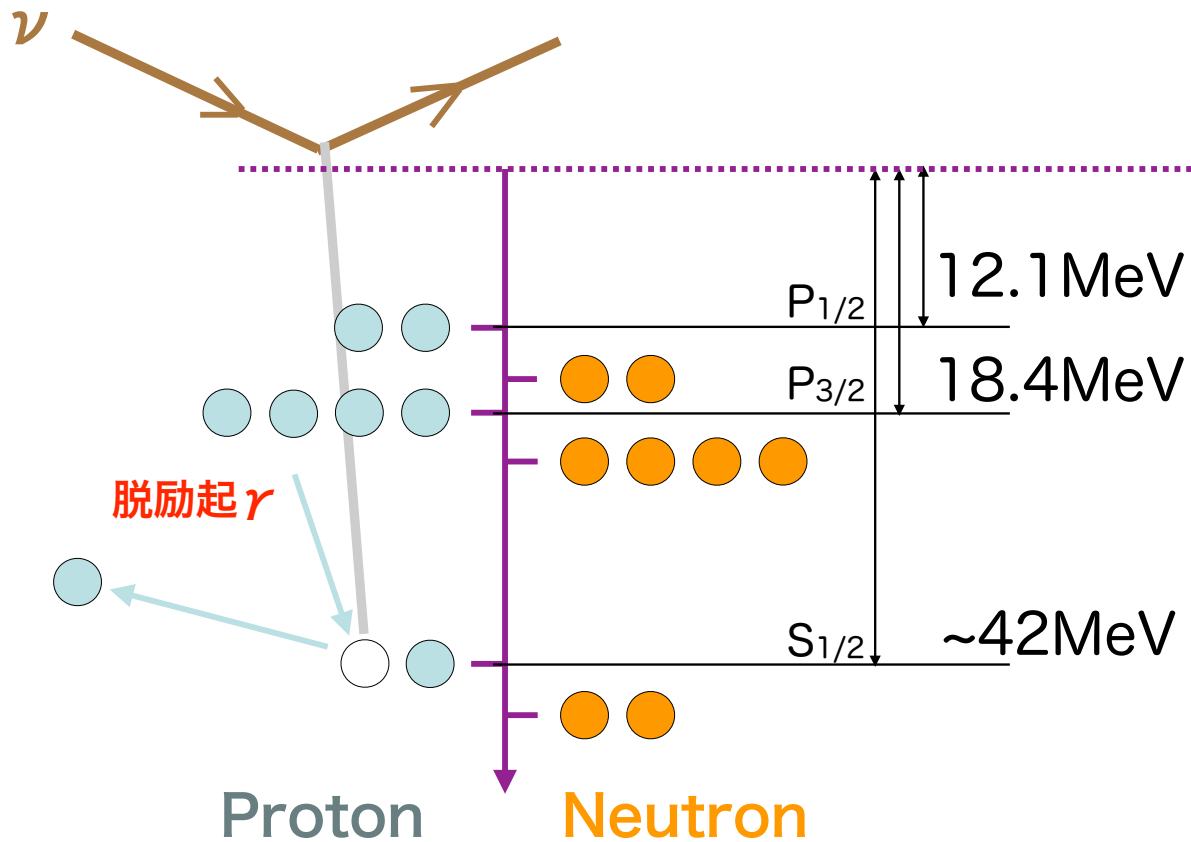
Nucl. Phys. A523, 1 (1991)

(崩壊陽子のエネルギーは 0.5 MeV に設定)

Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

$S_{1/2}$ 核子の knock out

励起状態 (脱励起ガンマ線 / 粒子崩壊)

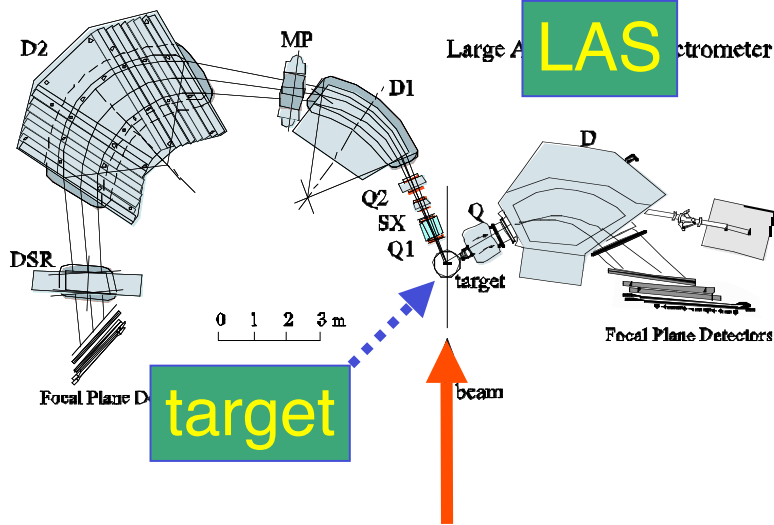


Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

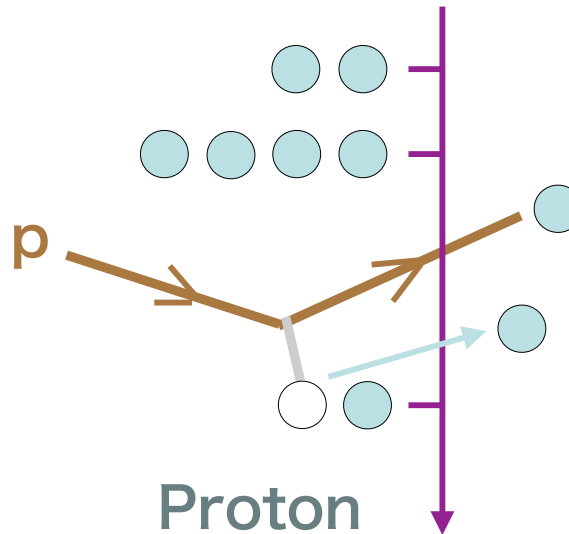
$S_{1/2}$ 核子の knock out

RCNP E148 (arXiv:0605006)

Grand Raiden



proton beam(392MeV)



$^{16}\text{O}(p,2p)^{15}\text{N}^*$

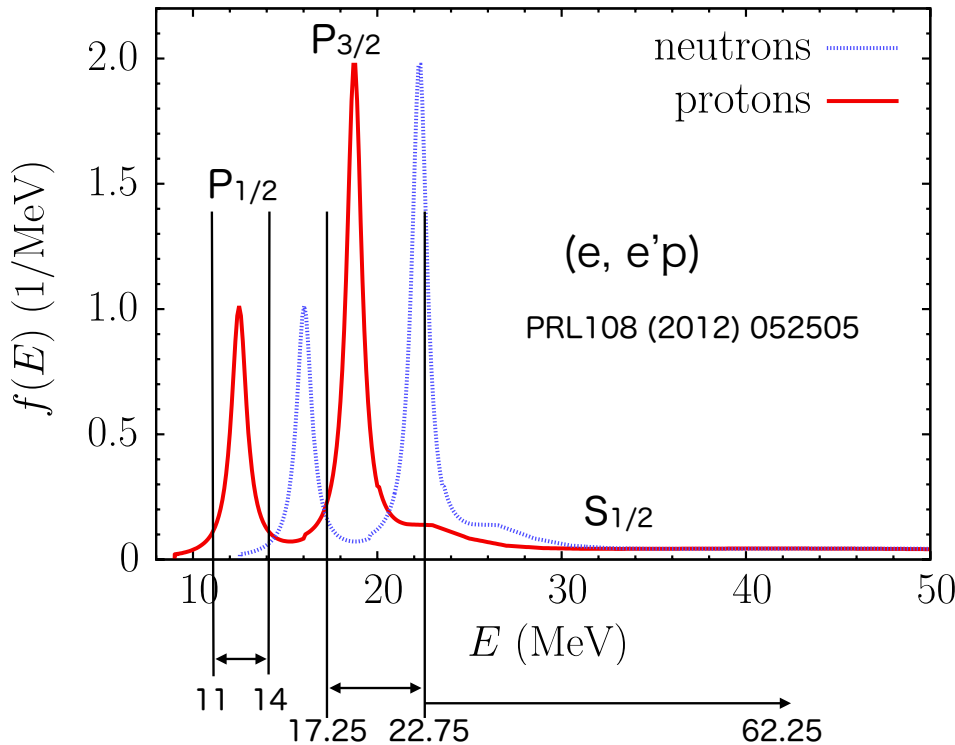
分岐比 (二体崩壊)

	Energy level (MeV)	J^π	E_γ (MeV)	Ratio	$\text{Br}(^{15}\text{N}^* \rightarrow \gamma + Y)$
$^{13}\text{C}+d$	3.09	$1/2^+$	3.09	100%	3.0%
	3.68	$3/2^+$	3.68	99.3%	4.2%
	3.85	$1/2^+$	3.09	1.20%	< 0.1%
$^{14}\text{N}+n$			3.68	36.3%	1.7%
			3.85	62.5%	2.9%
$^{12}\text{C}+t$	4.44	2^+	4.44	100%	5.8%
	g.s.	2^+	—	—	6.7%
$^{14}\text{C}+p$	4.92	0^-	4.92	97%	5.0%
	5.11	2^-	5.11	79.9%	< 0.1%
	5.69	1^-	3.38	63.9%	2.9%
			5.69	36.1%	1.6%
	5.83	3^-	5.11	62.9%	0.3%
			5.83	21.3%	0.1%
	6.20	1^+	3.89	76.9%	< 0.1%
		6.20	23.1%	< 0.1%	
$^{16}\text{O}(p,2p)^{15}\text{N}^*$	6.45	3^+	5.11	8.1%	0.2%
			6.44	70.1%	2.0%
	7.03	2^+	7.03	98.6%	(6.6%)
	g.s.	2^+	—	—	1.1%
	6.09	1^-	6.09	100%	< 0.1%
	6.59	0^+	6.09	98.9%	< 0.1%
	6.73	3^-	6.09	3.6%	< 0.1%
		6.73	96.4%	0.4%	
$^{16}\text{O}(p,2p)^{15}\text{N}^*$	6.90	0^-	6.09	100%	< 0.1%
	7.01	2^+	6.09	1.4%	< 0.1%
			7.01	98.6%	(6.6%)
	7.34	2^-	6.09	49.0%	2.8%
			6.73	34.3%	2.0%
			7.34	16.7%	1.0%

Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

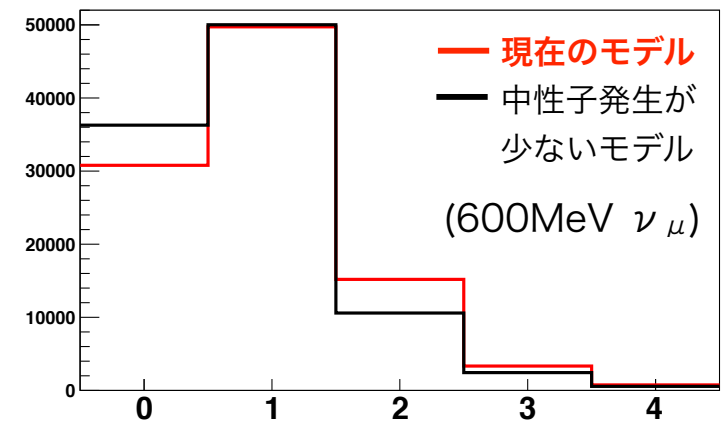
どの準位の核子が knock out されるか？

Removal energy distribution



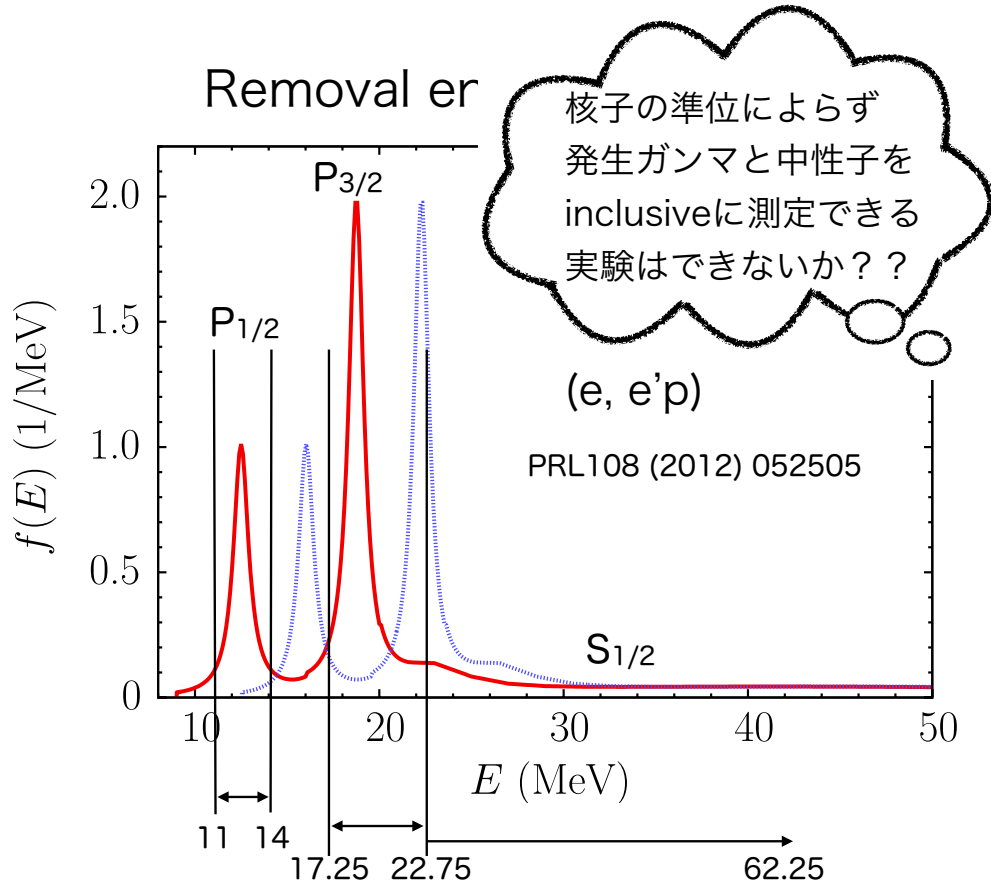
- knock out される核子の準位の不定性は、ガンマ線 (Primary gamma) 生成自体には大きく寄与しない。
- しかし発生中性子の個数に違いが生ずる。
- 中性子による Secondary gamma (次セクション) は Primary gamma と区別できず、それが系統誤差の原因となっている。

中性子多重度



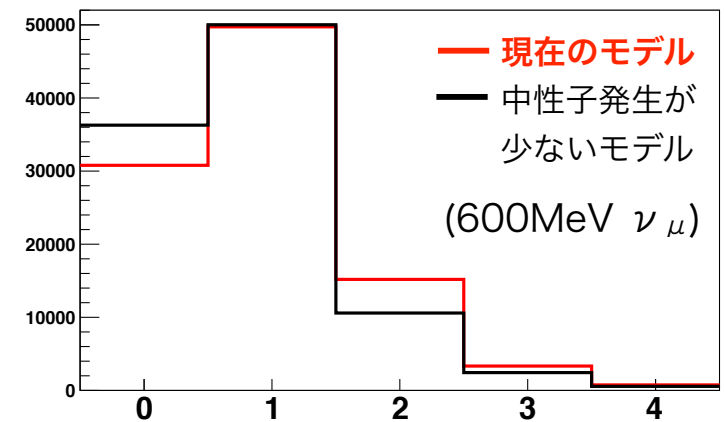
Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

どの準位の核子が knock out されるか？



- knock out される核子の準位の不定性は、ガンマ線 (Primary gamma) 生成自体には大きく寄与しない。
- しかし発生中性子の個数に違いが生ずる。
- 中性子による Secondary gamma (次セクション) は Primary gamma と区別できず、それが系統誤差の原因となっている。

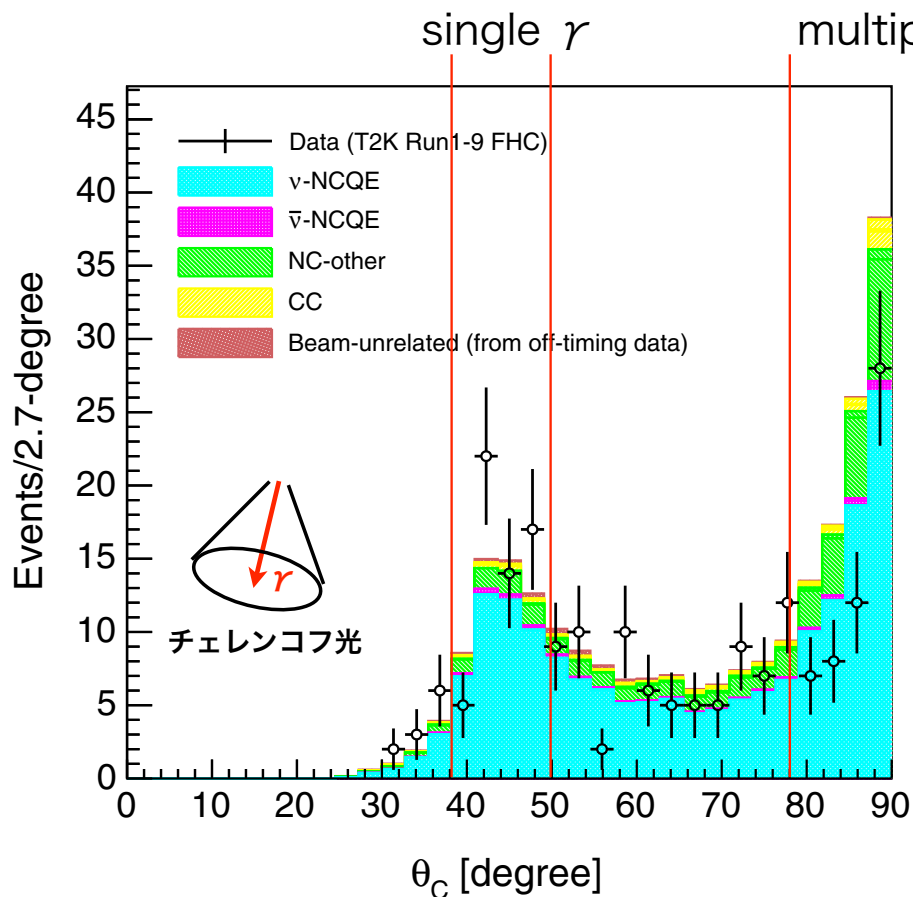
中性子多重度



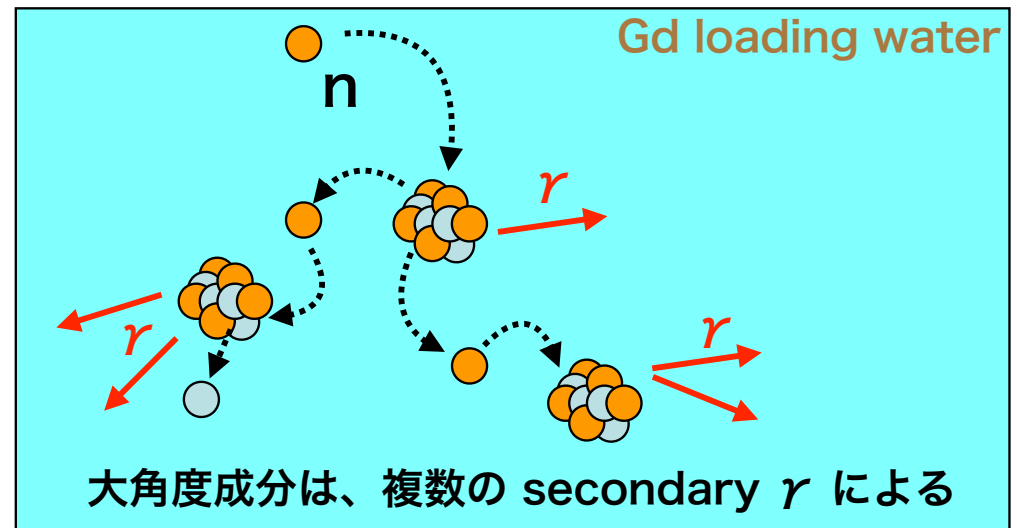
Secondary gamma production

Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE)

Secondary gamma production in T2K PRD 100, 112009 (2019)

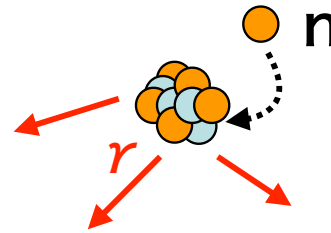


42°付近と大角度の比が
データとMCで合っていない

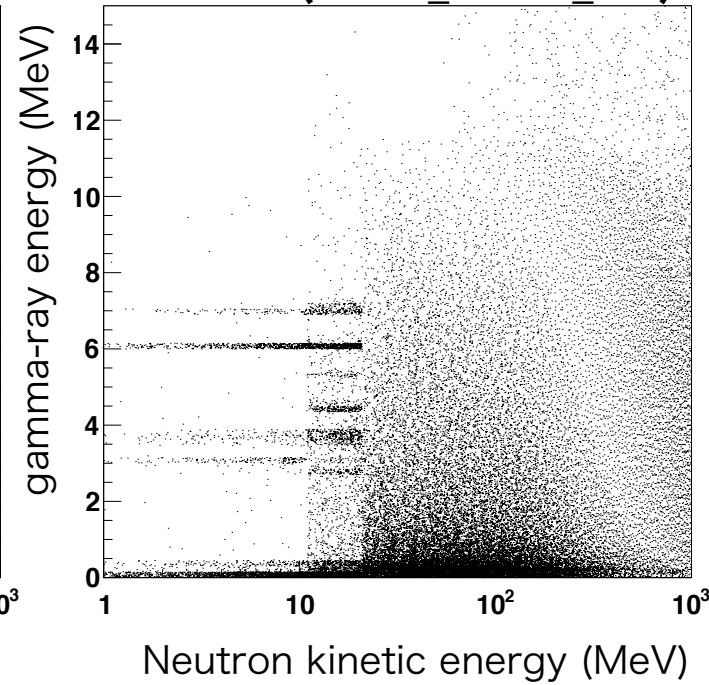
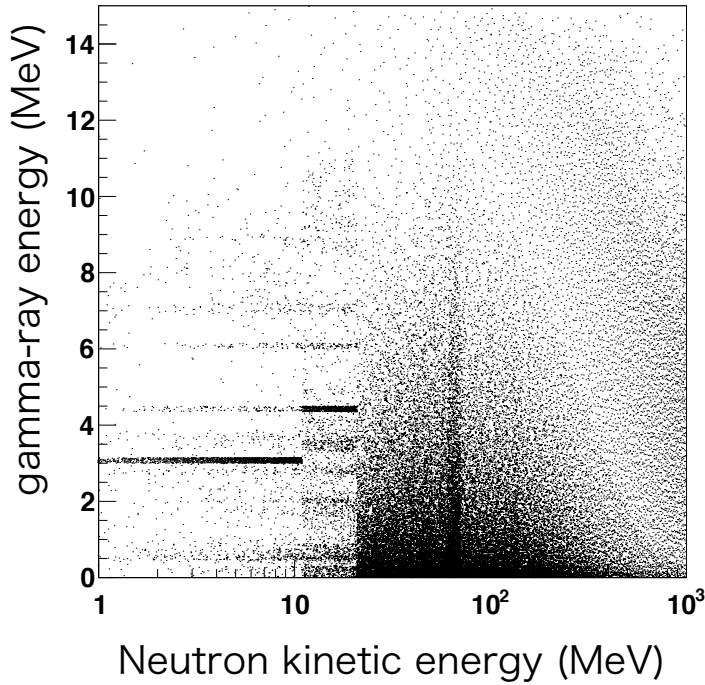


Secondary gamma production
のシミュレーションは正しいか？

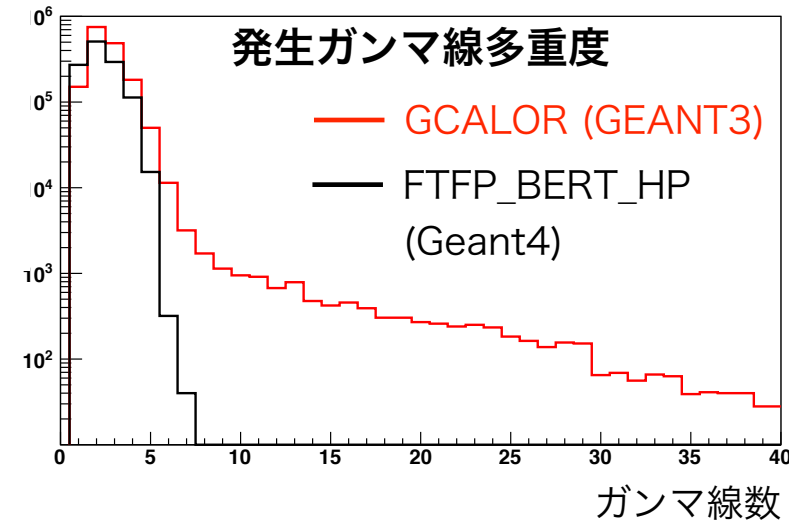
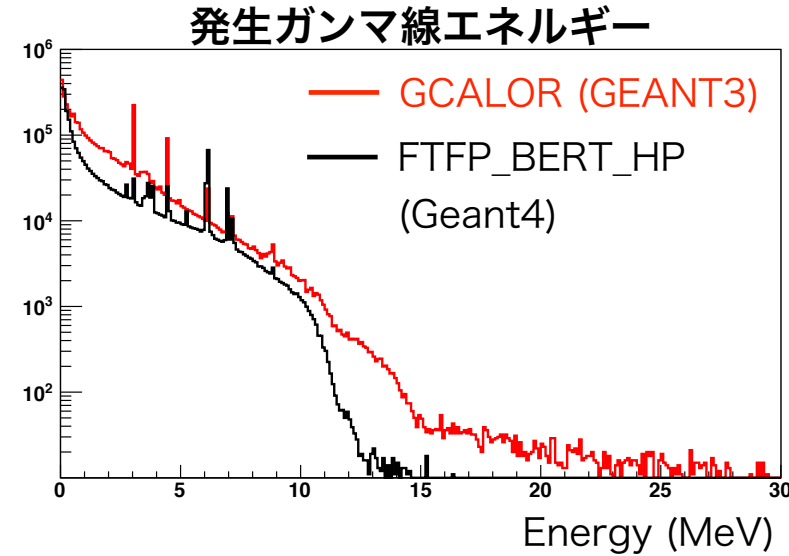
水中での中性子反応 GCALOR (GEANT3)



Geant4 (FTFP_BERT_HP)



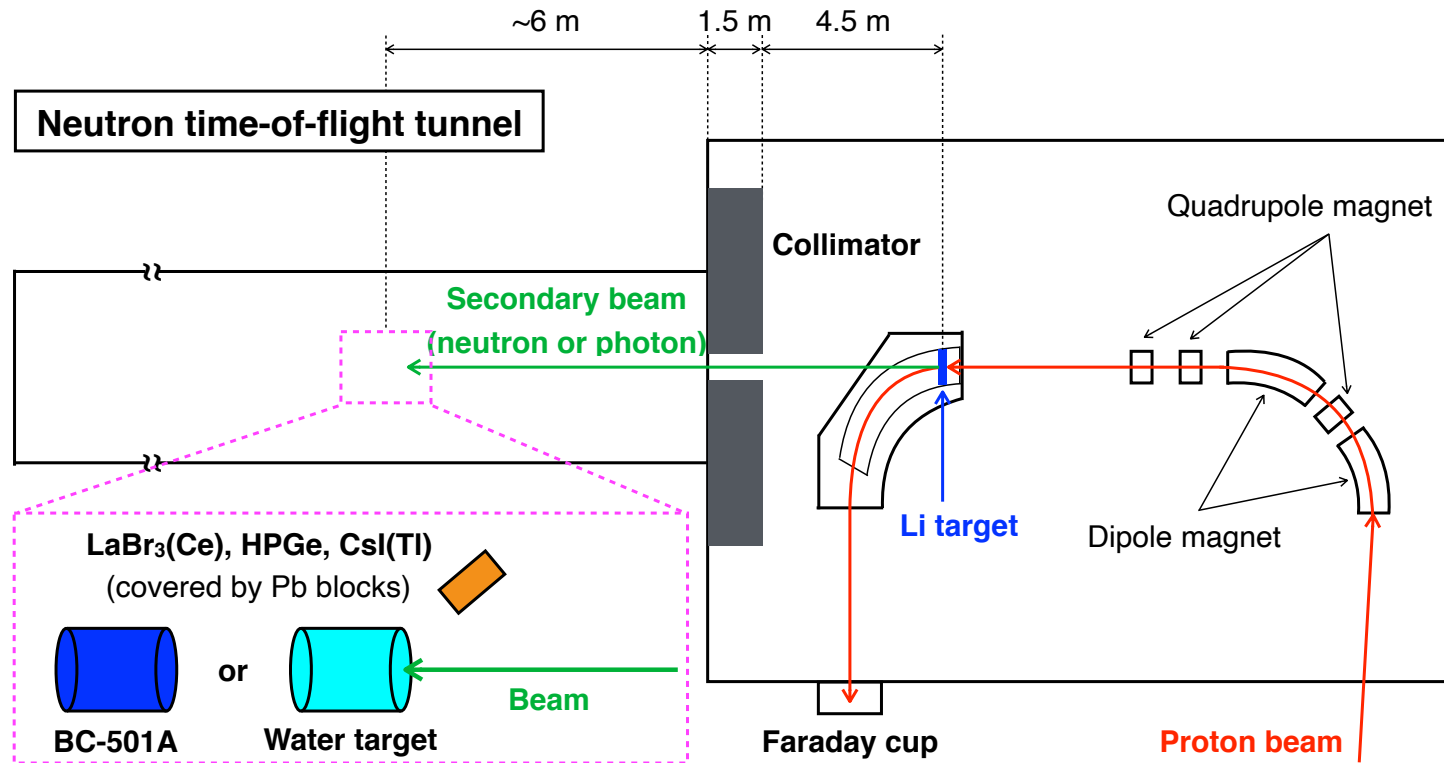
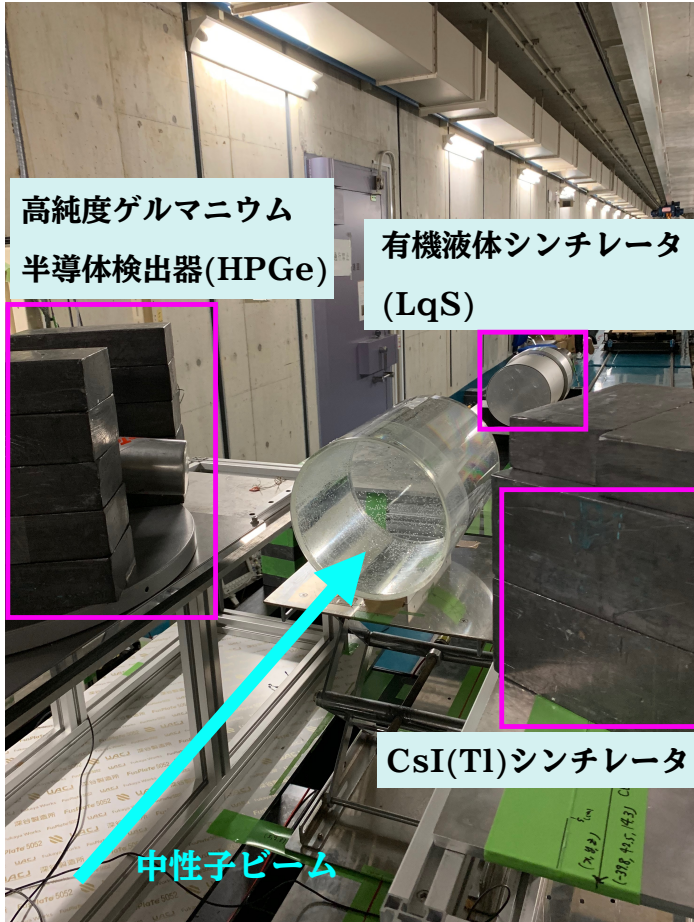
特に中性子と水中の酸素原子核との
反応の実験データがほしい



中性子ビーム実験

RCNP N0 course (E487/E525)

水標的での中性子反応により放出する
ガンマ線エネルギーを測定



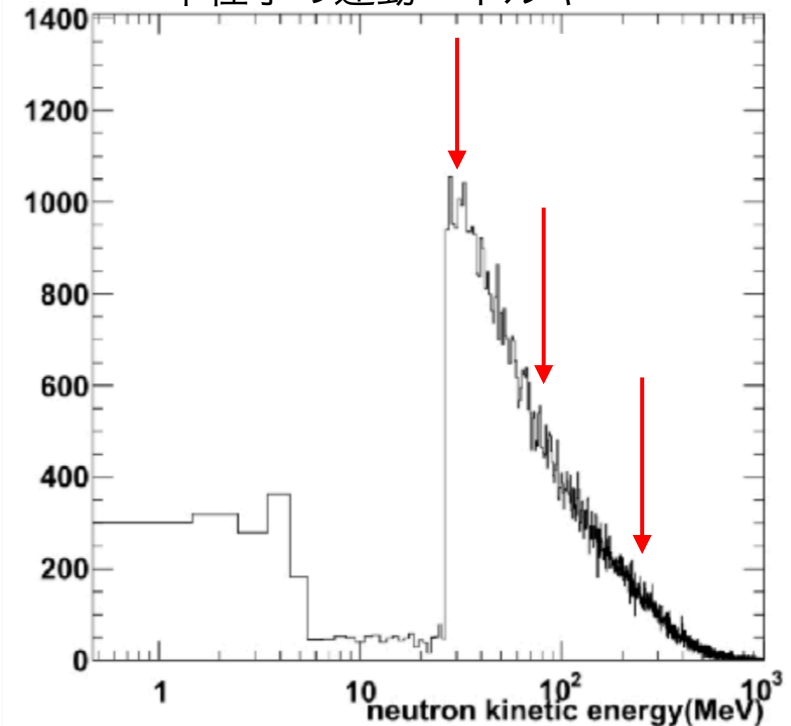
中性子ビーム実験

RCNP N0 course (E487/E525)

水標的での中性子反応により放出するガンマ線エネルギーを測定

- ・ 準単色中性子
- ・ 様々なエネルギーの測定が可能で、かつT2KでSK検出器内で発生する中性子エネルギーに近い
- ・ ToFを用いて、中性子のエネルギー測定および背景事象との弁別が可能
- ・ 長いトンネルで、検出器の設定がやりやすい
- ・ 30, 80, 250MeVで実験を行った (右図赤矢印)

T2Kで NCQE 反応後に発生する
中性子の運動エネルギー



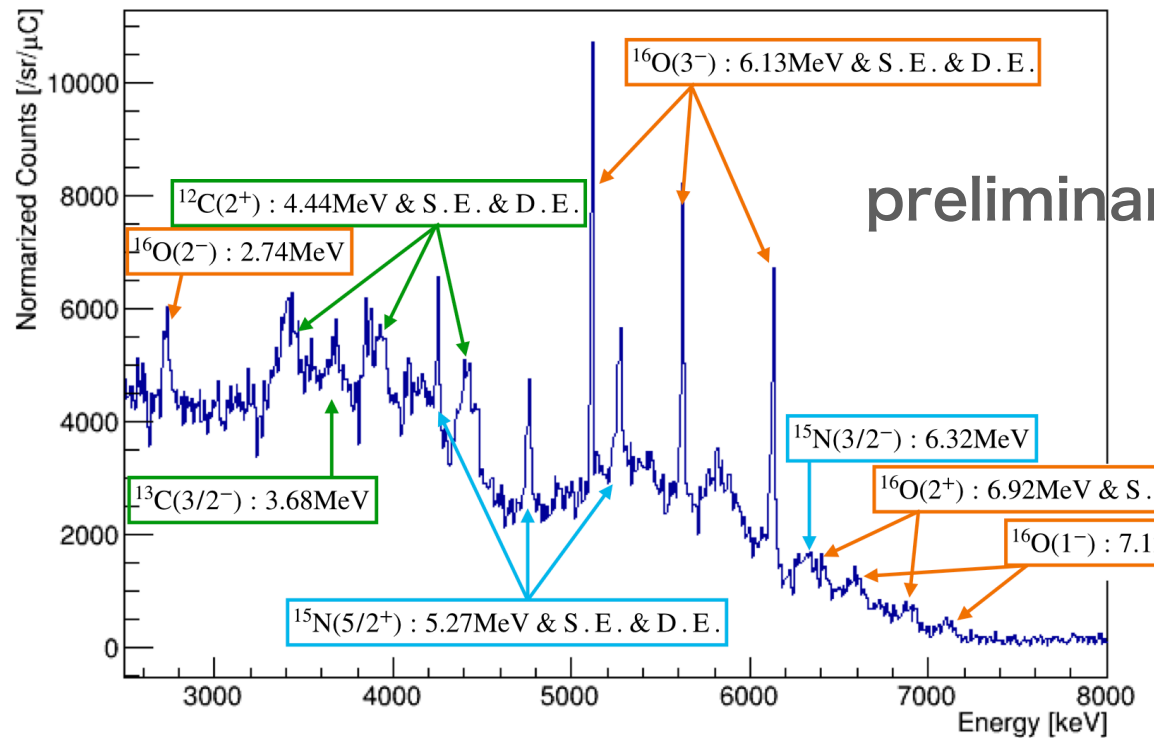
中性子ビーム実験

RCNP N0 course (E487/E525)

水標的での中性子反応により放出するガンマ線エネルギーを測定

(30MeV中性子) ガンマ線スペクトル

生成断面積



E_γ [MeV]	生成断面積 [mb]
7.12	$9.31 \pm 0.95(\text{fitting}) \pm 1.21(\text{flux}) \pm 0.25(\text{target})$
6.92	$9.53 \pm 1.08(\text{fitting}) \pm 1.24(\text{flux}) \pm 0.26(\text{target})$
6.32	$18.9 \pm 1.12(\text{fitting}) \pm 2.45(\text{flux}) \pm 0.51(\text{target})$
6.13	$33.6 \pm 1.03(\text{fitting}) \pm 4.35(\text{flux}) \pm 0.90(\text{target})$
5.27	$12.8 \pm 0.88(\text{fitting}) \pm 1.66(\text{flux}) \pm 0.34(\text{target})$
5.10	<0.39
4.91	$4.11 \pm 1.32(\text{fitting}) \pm 0.53(\text{flux}) \pm 0.11(\text{target})$
4.44	$52.2 \pm 1.61(\text{fitting}) \pm 6.76(\text{flux}) \pm 1.40(\text{target})$
3.68	$6.30 \pm 1.24(\text{fitting}) \pm 0.82(\text{flux}) \pm 0.17(\text{target})$
2.74	$4.48 \pm 1.20(\text{fitting}) \pm 0.58(\text{flux}) \pm 0.12(\text{target})$

中性子ビーム実験

RCNP N0 course (E487/E525)

- データ解析の状況
 - 80MeVデータ：PRCへ投稿中 (arXiv : 1902.08964)
 - 30MeVデータ：データ解析は終了。論文執筆中
 - 250MeVデータ：データ解析中 (17pV11-11 田野智大)
- 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検出器シミュレーションに導入する。

Secondary (のみならず Primaryも?) gamma production 系統誤差の削減は期待できる

Summary

まとめ

今後の方針

- SK-Gdでの超新星背景ニュートリノの発見に向けて、大気ニュートリノ背景事象の精密な予測が重要である。特に酸素原子核との反応により発生するガンマ線や中性子、さらには中性子の水中での反応の理解が欠かせない。
- 既存の原子核実験データを再調査しつつ、必要な実験を遂行して、精緻な原子核反応モデルを構築し、シミュレーションに導入する。
- Gd導入後のT2K実験で検証、特に中性子生成数の評価を行う。
- SKデータ解析でも大気ニュートリノ背景事象の削減を進める。

世界で初めての超新星背景ニュートリノの発見を目指す！

