



T2K実験によるニュートリノ 中性カレント反応測定のための 中性子-酸素原子核反応モデルの研究

竹谷浩鷹, 小汐由介, 中島康博^A, Licheng Feng^B, 他T2K Collaboration

岡大理, 東大理^A, 京大理^B

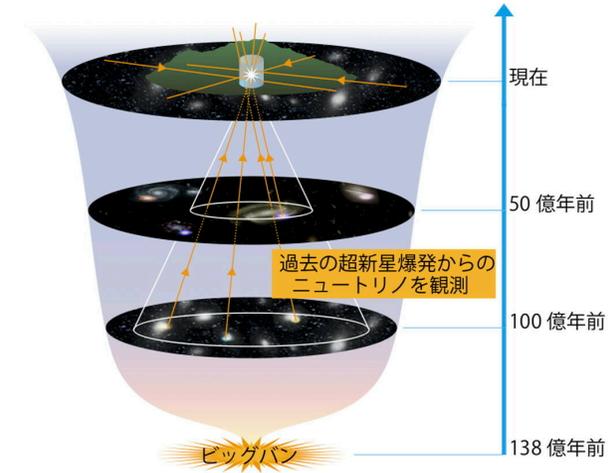
2024年3月19日 日本物理学会 2024年春季大会

講演番号: 19pT2-4

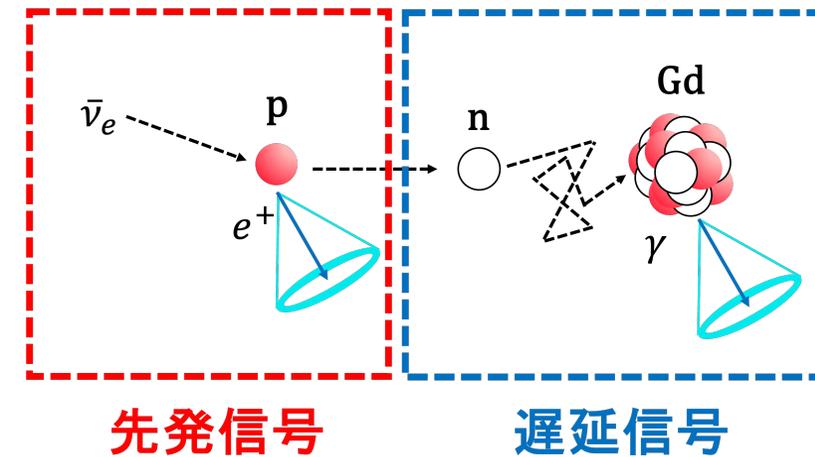
1. 研究背景
 - ✓ 超新星背景ニュートリノ
 - ✓ ニュートリノ中性カレント準弾性散乱(NCQE)反応
2. T2K(Tokai to Kamioka)実験
3. シミュレーション解析
4. 結果
5. まとめと今後の展望

- 超新星背景ニュートリノ (SRN: Supernova Relic Neutrino)
 - ✓ 過去の超新星爆発由来のニュートリノの重ね合わせ
 - ✓ 爆発機構や重元素合成過程の解明に期待
- スーパーカミオカンデ(SK)でSRNの世界初観測を目指す(SK-Gd実験)
 - ✓ 探索信号: 逆ベータ崩壊 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)
 - ✓ 陽電子と中性子の同時遅延計測
 - ✓ 中性子を含む事象は背景事象として残る

→大気ニュートリノによるNCQE反応

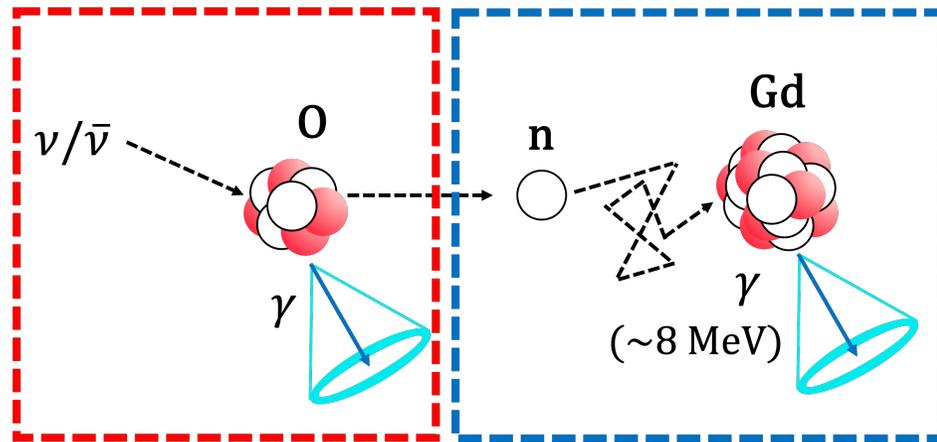


逆ベータ崩壊反応



- 大気ニュートリノが水中の酸素原子核と反応し、中性子が放出される
 - ✓SRNによる逆ベータ崩壊反応の信号と似通っている
 - ✓現在はシミュレーションを用いて事象数を見積もっている
 - ✓SRNの探索領域に背景事象として広く分布している
- NCQE反応の正確な理解が必要

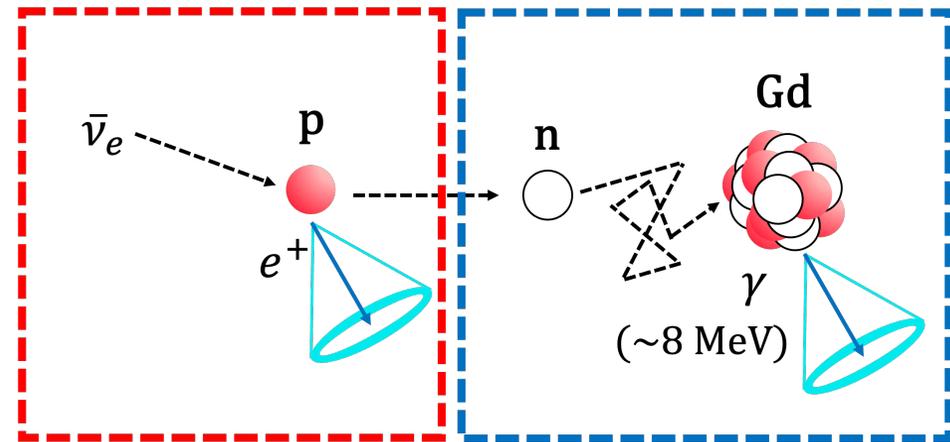
NCQE反応 (背景事象)



先発信号

遅延信号

逆ベータ崩壊反応 (SRN)

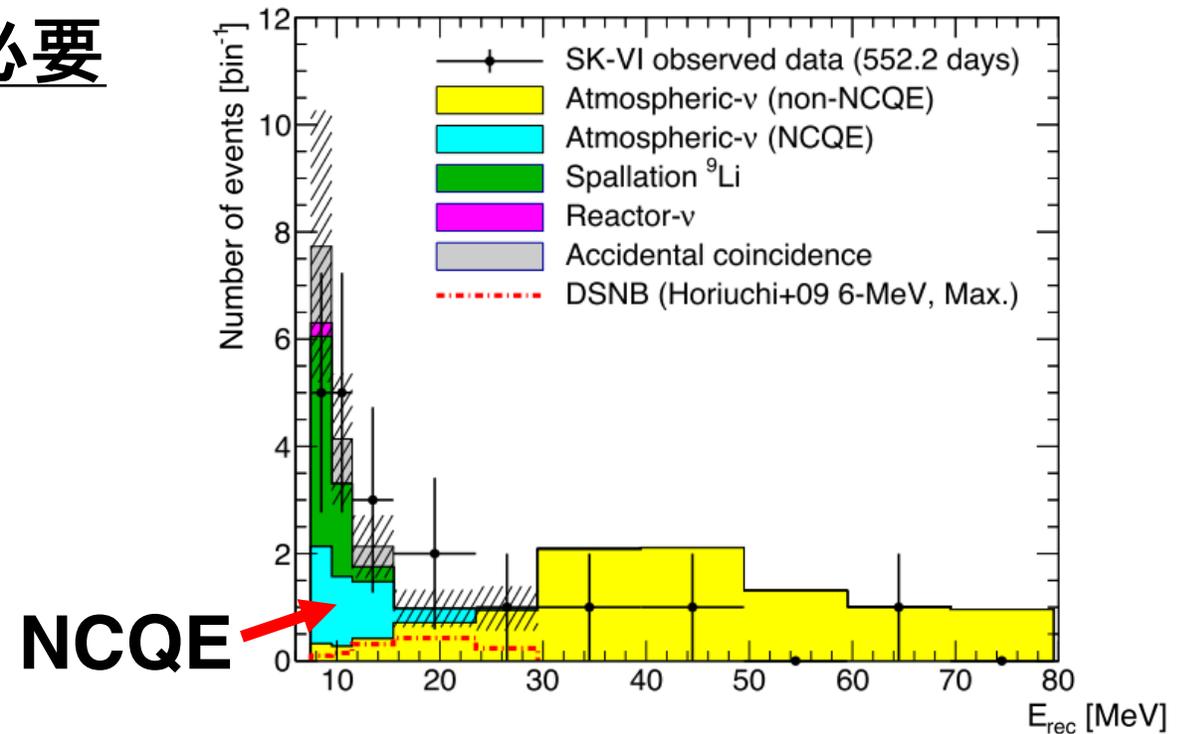
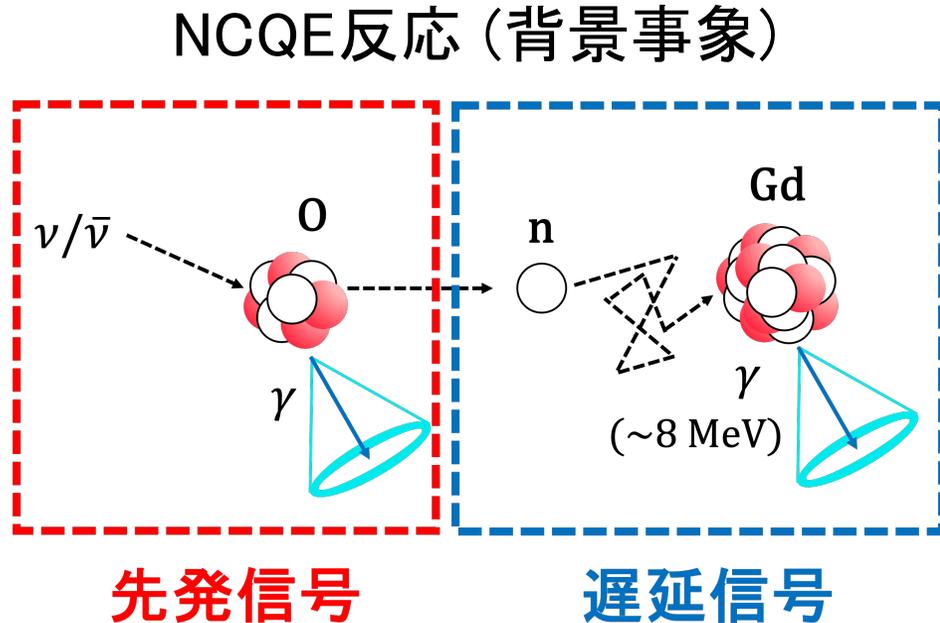


先発信号

遅延信号

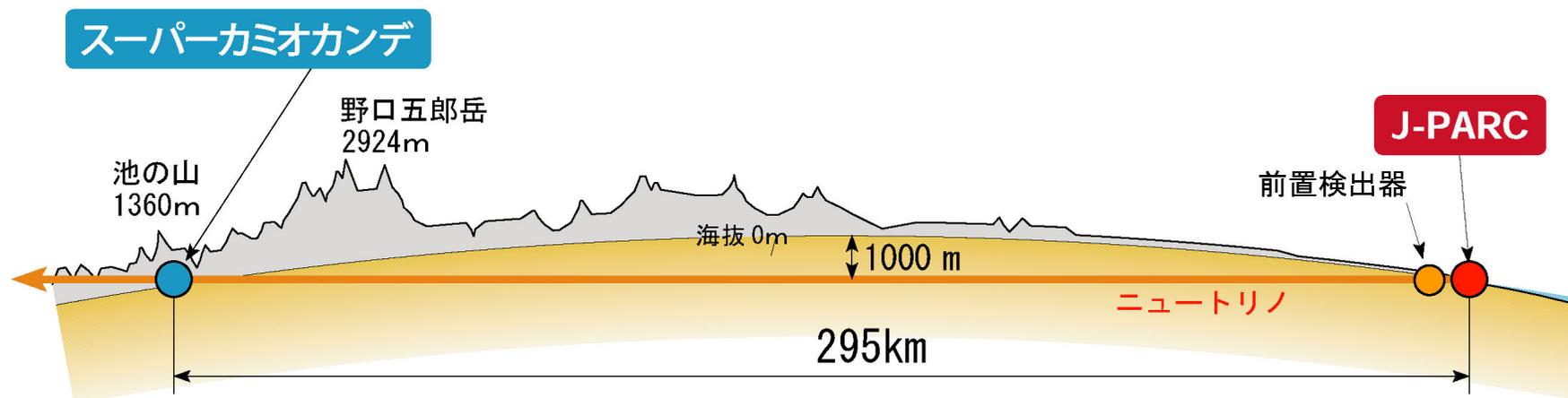
- 大気ニュートリノが水中の酸素原子核と反応し、中性子が放出される
 - ✓ SRNによる逆ベータ崩壊反応の信号と似通っている
 - ✓ 現在はシミュレーションを用いて事象数を見積もっている
 - ✓ SRNの探索領域に背景事象として広く分布している

→NCQE反応の正確な理解が必要

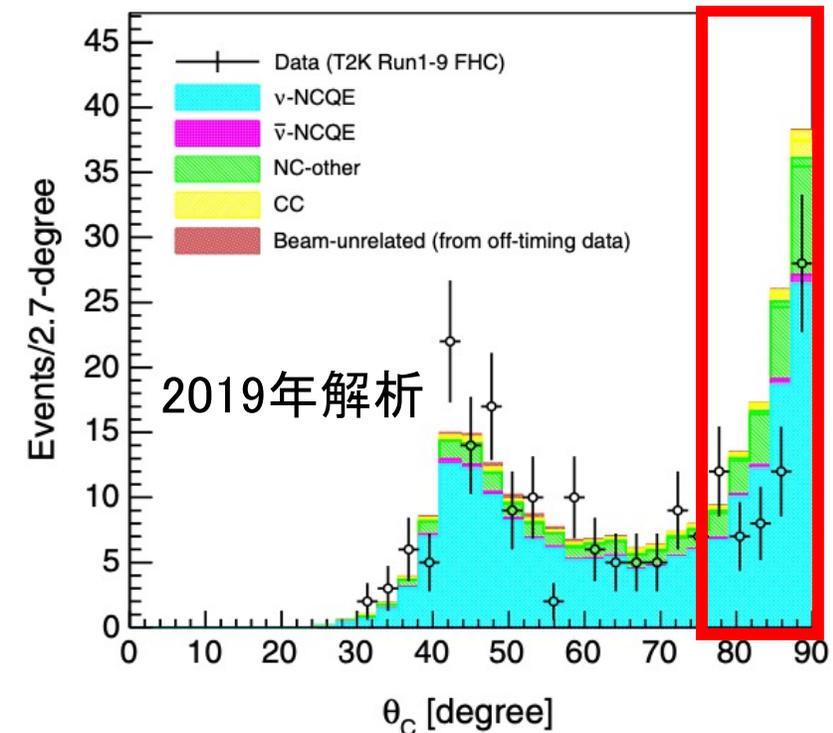
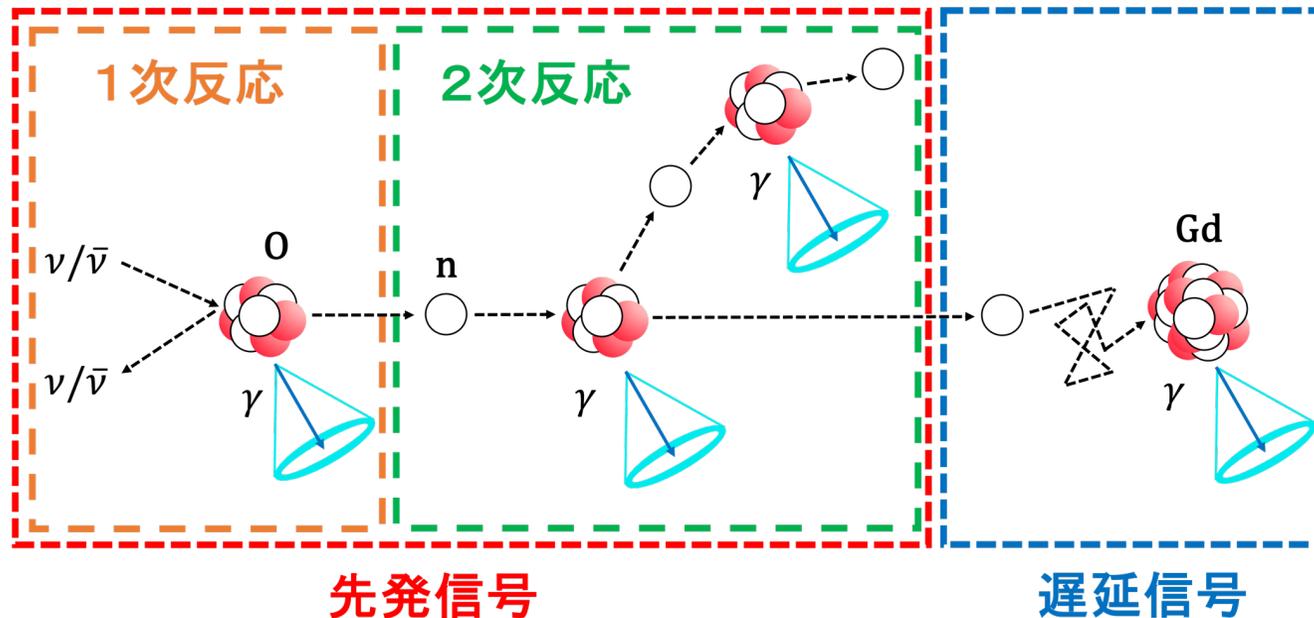
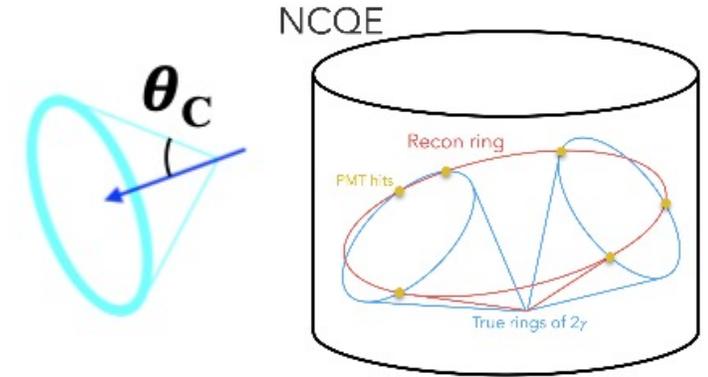


M. Harada et al, *Astrophys. J. Lett.* 951, L27 (2023).

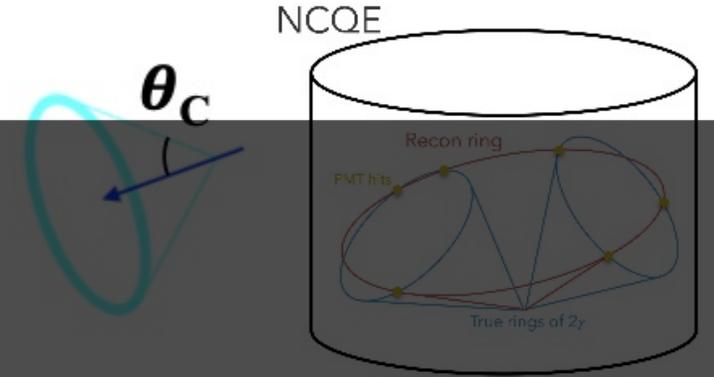
- 東海神岡間長基線ニュートリノ実験
 - ✓茨城県東海村のJ-PARCでニュートリノビームを生成
 - ✓約295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノを検出
 - ✓ニュートリノ(FHC)、反ニュートリノ(RHC)を選択して集めることが可能
- ニュートリノビームのエネルギーピークは600MeV付近
→大気ニュートリノのエネルギーピークと同程度



- 2010年～2018年のT2K実験データを用いた測定
 - ✓チェレンコフ角度(θ_c)がデータとMCで違う
 - ✓SKはニュートリノ-酸素原子核反応(1次反応)と中性子-酸素原子核反応(2次反応)を区別できない(θ_c は大角度に再構成される)
- 差異の原因は2次反応由来の不定性

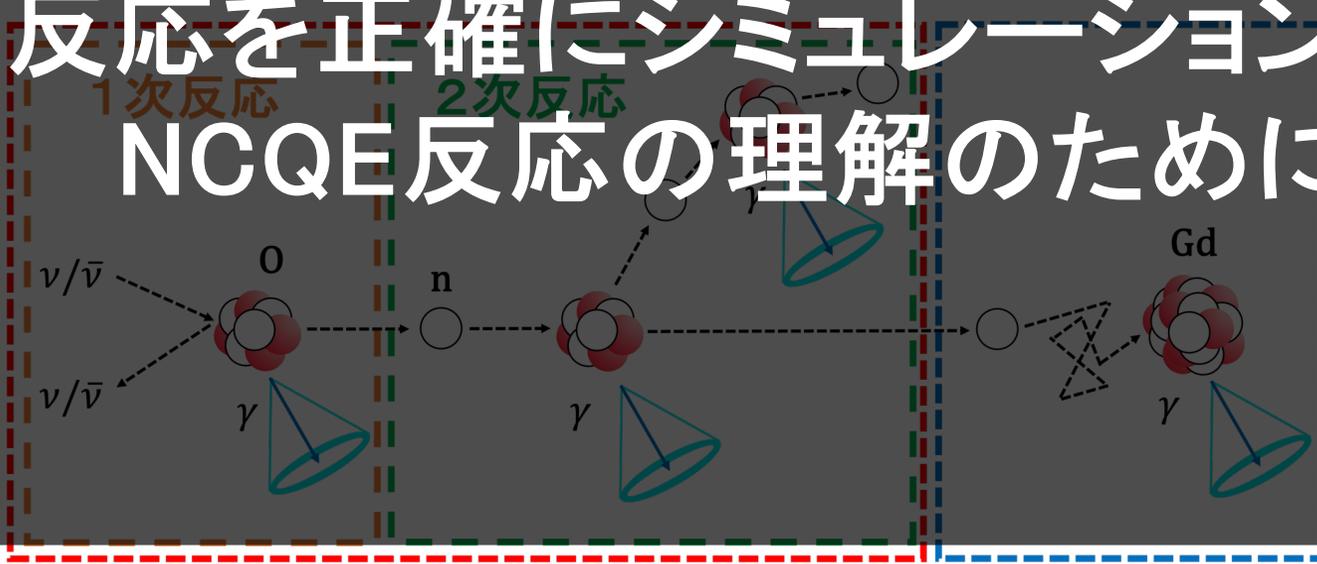


- 2010年～2018年のT2K実験データを用いた測定
 - ✓チェレンコフ角度(θ_c)がデータとMCで違う
 - ✓SKはニュートリノ-酸素原子核反応(1次反応)と中性子-酸素原子核反応(2次反応)を区別できない(θ_c は大角度に再構成される)



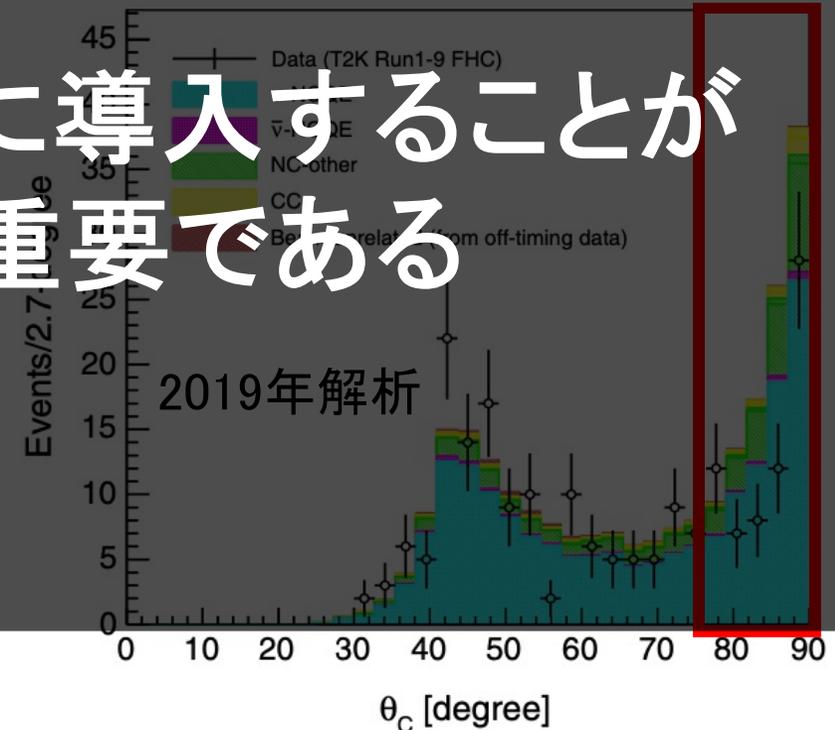
→差異の原因は2次反応由来の不定性

2次反応を正確にシミュレーションに導入することがNCQE反応の理解のために重要である



先発信号

遅延信号

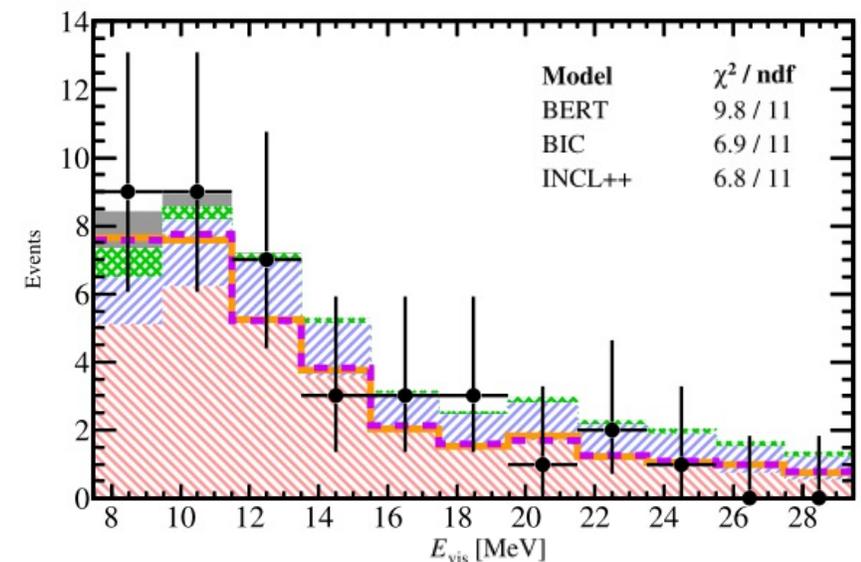
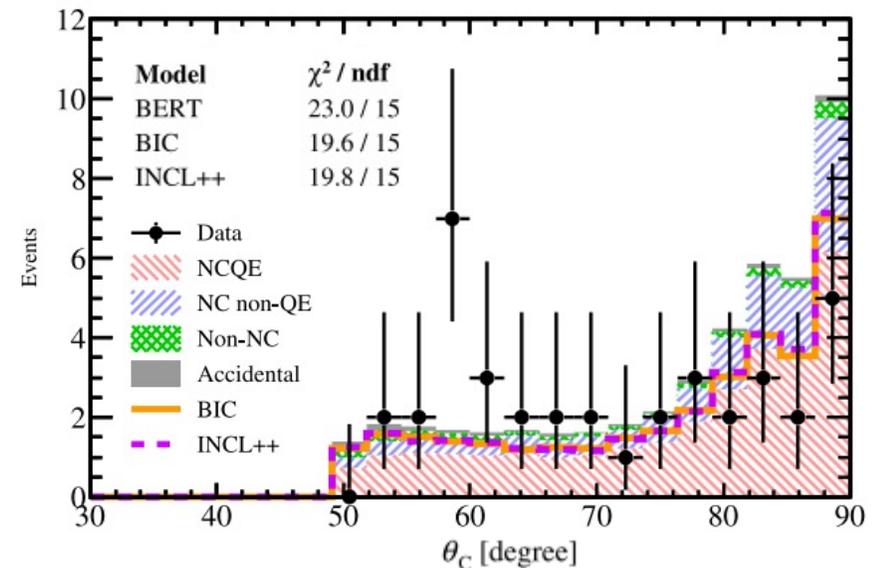


- 現行の検出器シミュレーションで使用できる2次反応モデルは3つ

		2019年解析	本研究
検出器シミュレーション		GEANT3ベース	Geant4ベース
使用できる 2次反応 モデル	Bertini Cascade (BERT)	○	○ (デフォルト)
	Binary Cascade (BIC)	×	○
	Liège Intranuclear Cascade (INCL++)	×	○

大気 ν を用いたNCQE反応測定(SK-Gd実験) 10

- BERT,BIC,INCL++でのMCとデータとの比較
→BIC,INCL++がBERTよりデータをよく再現
- この研究に関する課題
 - ✓小統計である
 - ✓ θ_c が 50° 以下、再構成エネルギーが8MeV以下の事象を対象にしていない
 - T2Kでのさらなる検証が必要



- ニュートリノ反応シミュレーションは2019年解析と共通の結果を使用
- 2次反応モデルを変えてシミュレーションした結果を2019年解析の結果と比較

【再構成】

- ✓ 発生点 : PMTのhit timing
- ✓ 方向 : PMTのhit pattern
- ✓ エネルギー : PMTのhit数

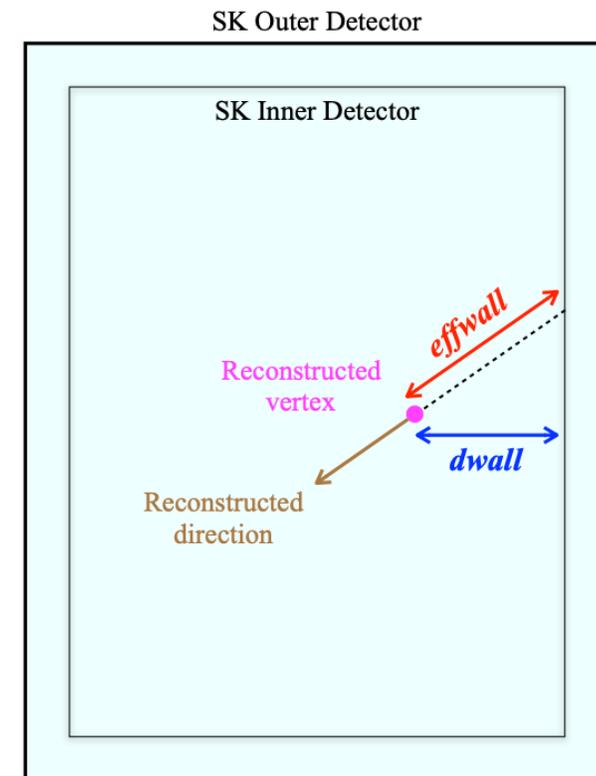
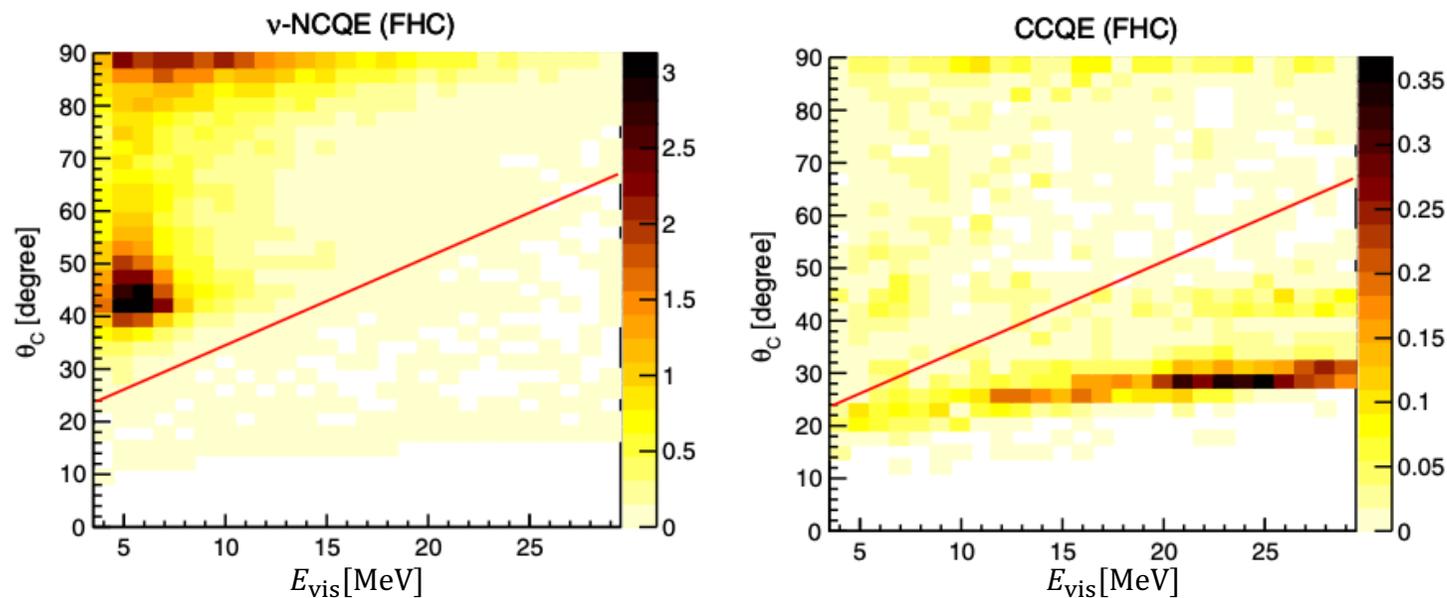
ニュートリノ反応シミュレーション
(1次反応)

検出器シミュレーション
(2次反応)

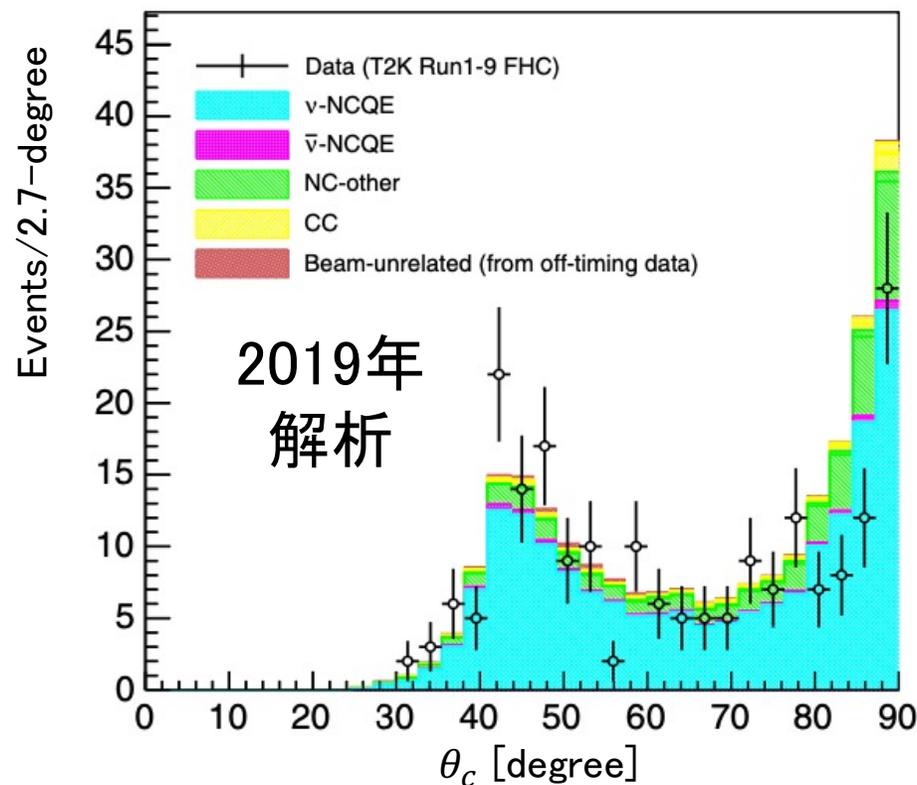
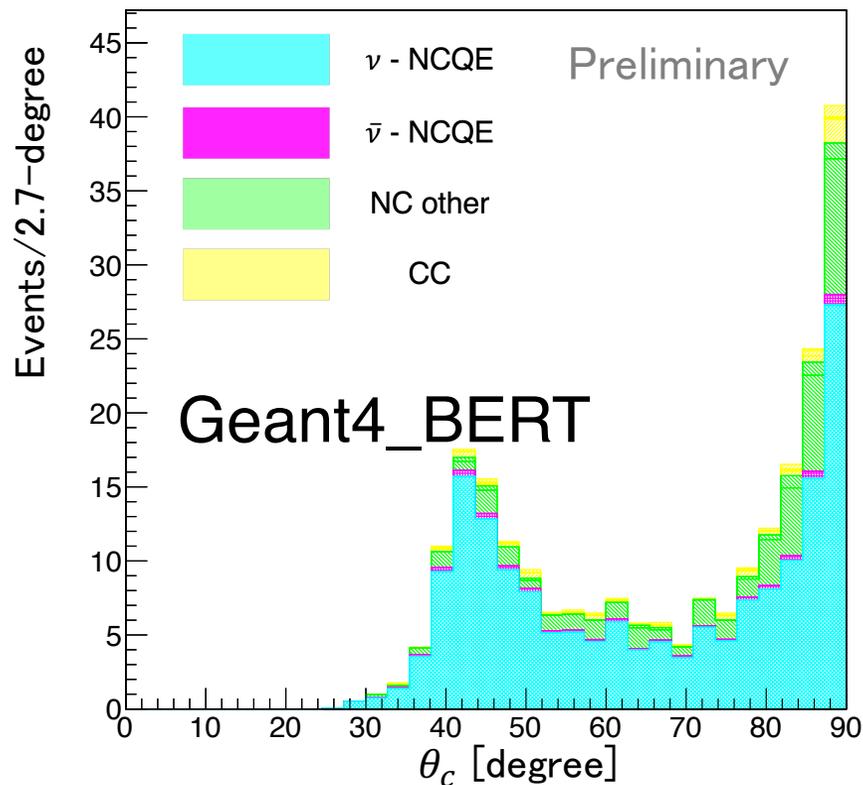
- Geant4ベース
- 使用したモデル: BERT, INCL++

事象再構成

- エネルギー領域 : $3.49 \leq E_{\text{vis}} [\text{MeV}] \leq 29.49$
- ビームと無関係な事象を棄却
 - ✓有効体積 : SKタンクの壁面からの距離(d_{wall})が2m以上離れている
 - ✓低エネルギー領域 (3.49 - 5.99 MeV) ではさらに厳しい選別(effwall など)
- チェレンコフ角度による選別



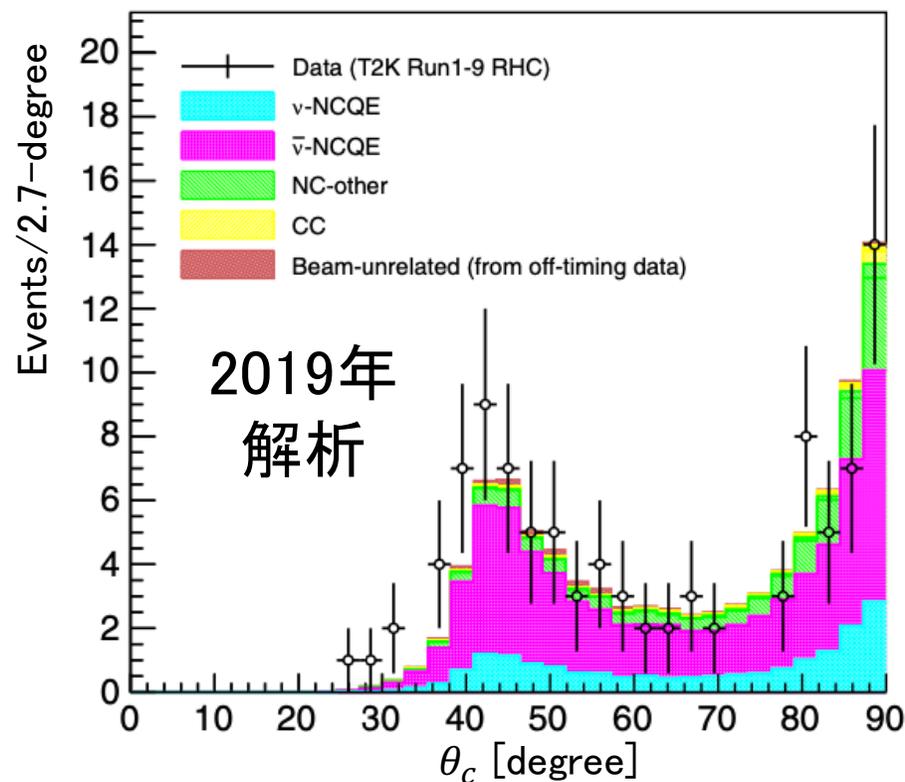
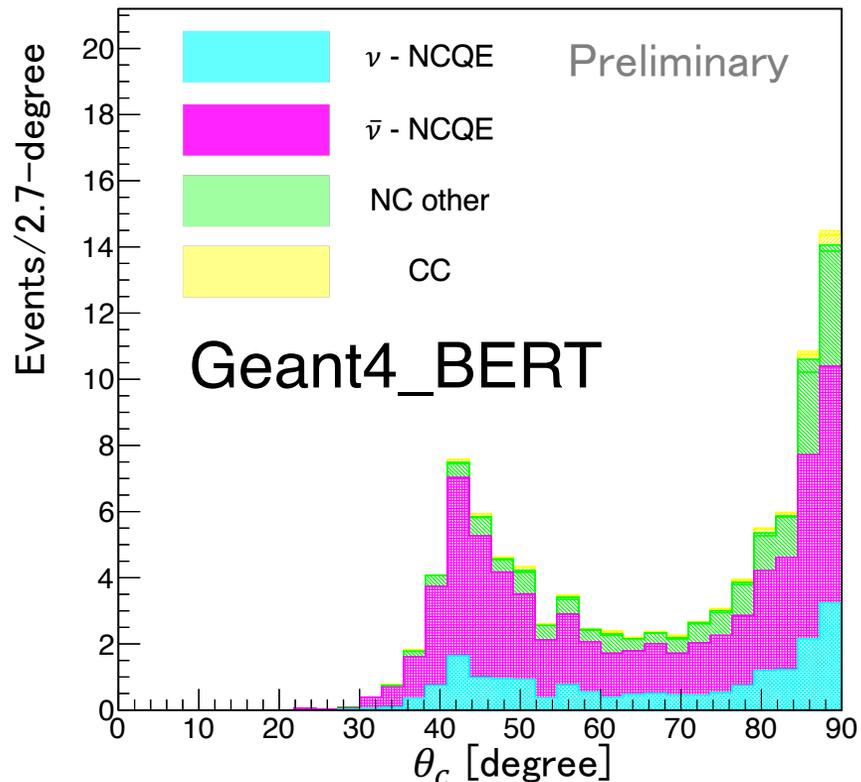
- 最大16%以内で2019年解析の結果の再現性を確認



K. Abe et al,
Phys. Rev. D 100,
112009 (2019).

事象数	all	ν - NCQE	$\bar{\nu}$ - NCQE	NC -other	CC
Geant4_BERT	232.7	172.7	4.9	44.8	10.3
2019年解析	234.8	178.6	4.8	42.5	8.9

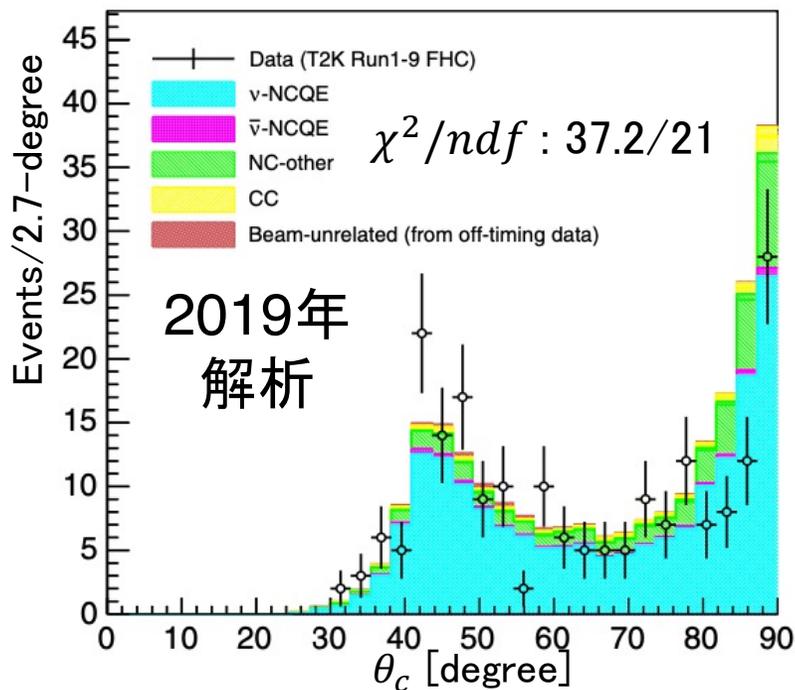
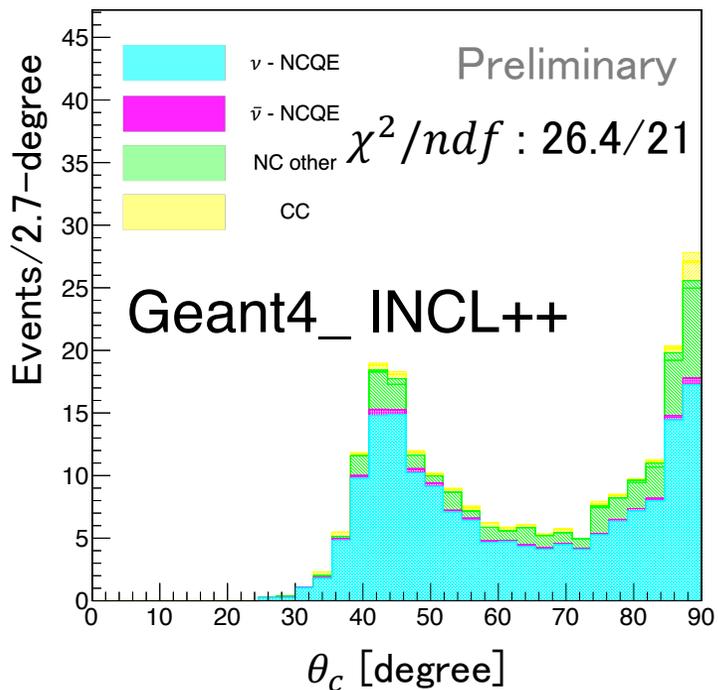
- 最大13%以内で2019年解析の結果の再現性を確認



K. Abe et al,
Phys. Rev. D 100,
112009 (2019).

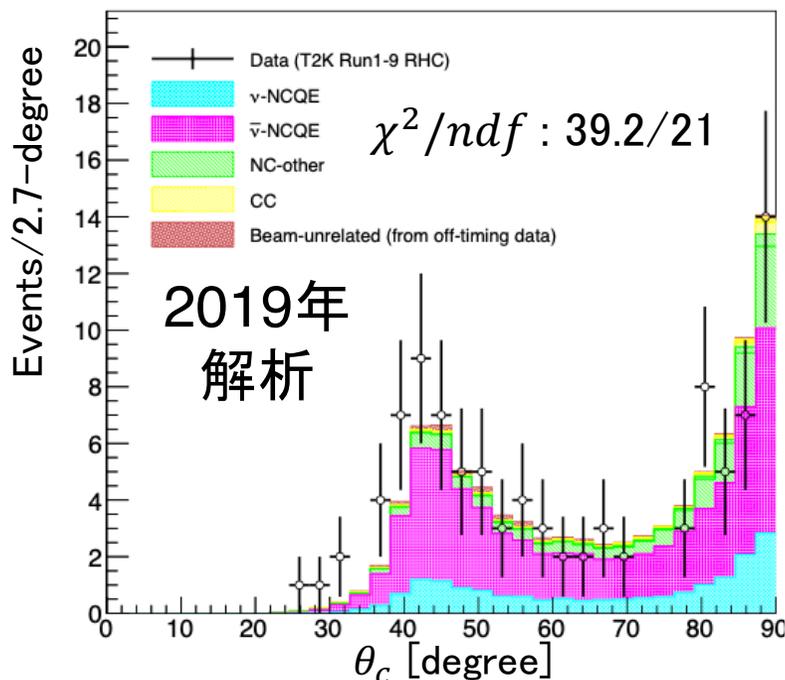
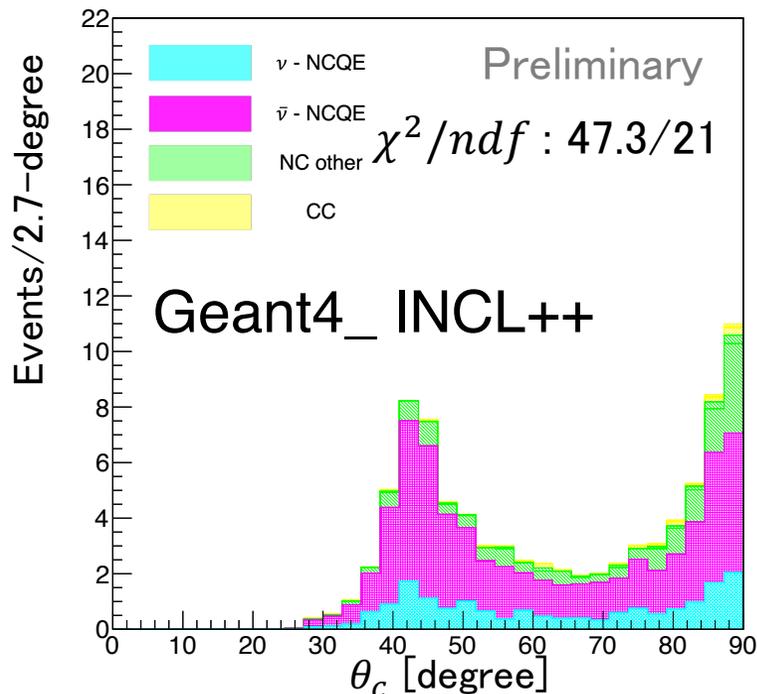
事象数	all	ν - NCQE	$\bar{\nu}$ - NCQE	NC -other	CC
Geant4_BERT	93.9	18.8	56.2	16.9	2.0
2019年解析	92.2	17.9	56.5	15.5	2.3

- INCL++モデルに変更することでデータとMCの差が小さくなった



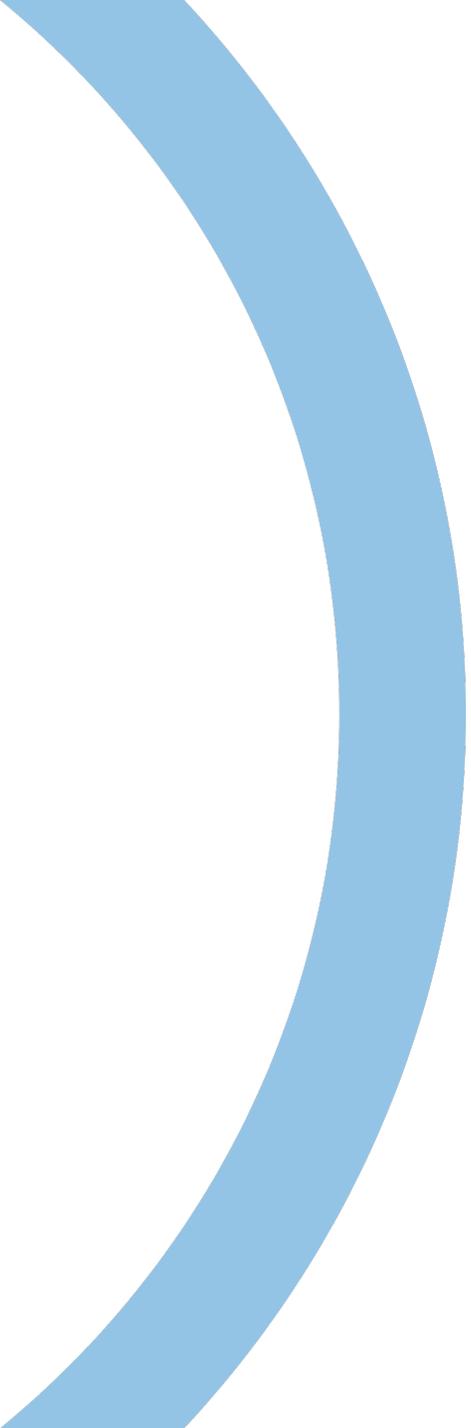
事象数	all	ν - NCQE	$\bar{\nu}$ - NCQE	NC -other	CC
Geant4_INCL++	217.4 (+7%)	165.3	4.6	38.8	8.7
2019年解析	234.8 (+15%)	178.6	4.8	42.5	8.9
実験データ	204	—	—	—	—

- データとMCの差は小さくならなかった（データの統計量がまだ少ない）



事象数	all	ν - NCQE	$\bar{\nu}$ - NCQE	NC -other	CC
Geant4_INCL++	87.8 (-10%)	17.2	52.8	15.8	2.0
2019年解析	92.9 (-5%)	17.9	56.5	15.5	2.3
実験データ	97	—	—	—	—

- 大気ニュートリノによるNCQE反応は、SK-Gd実験におけるSRN探索の主要な背景事象の1つである
- 2010年～2018年のT2K実験データを用いたNCQE反応測定が行われた
 - ✓データとMCで差異がある
 - ✓2次反応を正確にシミュレーションに導入できていないことが原因
- 現行のGeant4ベースの検出器シミュレーションでは3つの2次反応モデル(BERT,BIC,INCL++)が使用できる
- 本研究では2次反応モデルを変えてシミュレーションを行い、2019年解析のGEANT3ベースのMCとの比較を行った
- Geant4_INCL++は2019年解析結果に比べデータをよく再現していた(FHC)
- 今後は2次反応モデルを変えることでSRN探索にどの程度影響するかを見積もる



Backup

Secondary interaction models

- **Intranuclear cascade process**

A model describing a chain of reactions triggered by a reaction between an incident particle and a nucleon in a nucleus

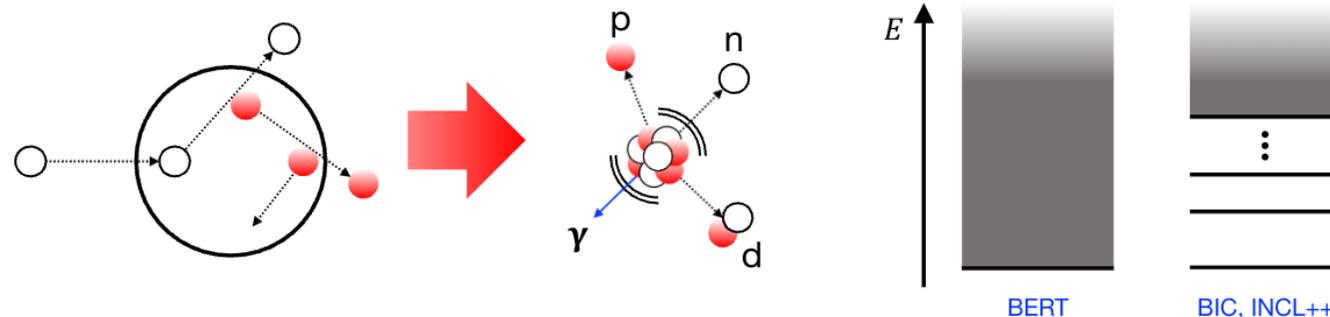
- **Evaporation process**

A model describing a phenomenon emitting nucleons and gamma rays isotropically when an excited residual nucleus deexcites

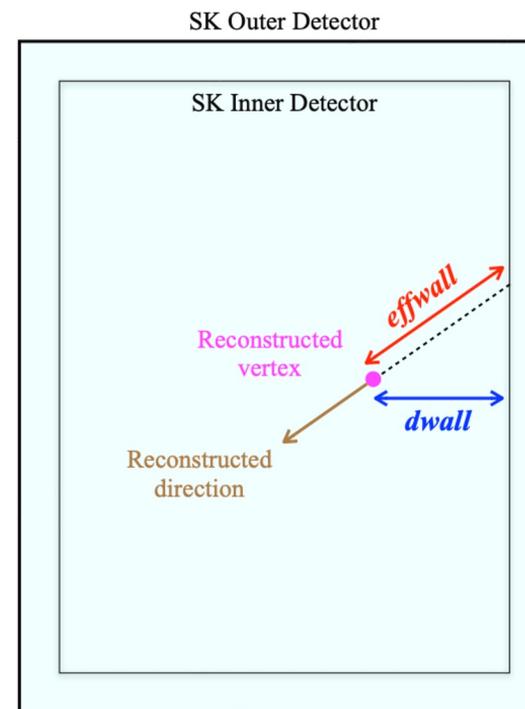
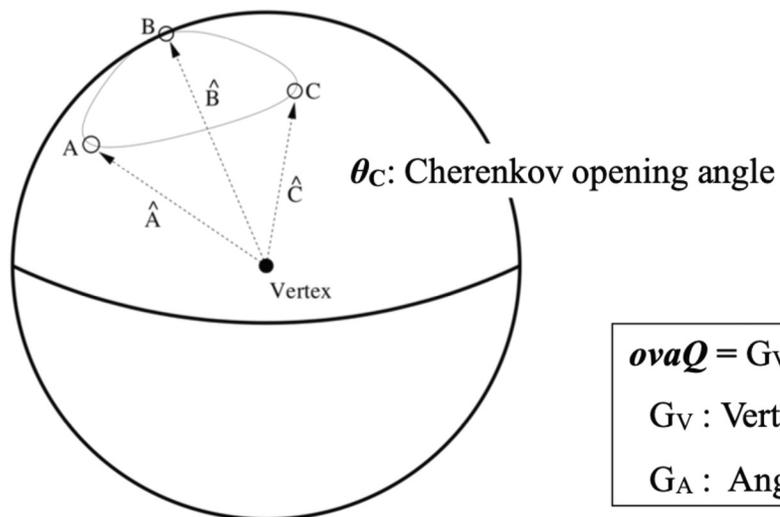
→ **Evaporation process is handled so differently**

BERT → Continuous transitions till the end

BIC, INCL++ → Continuous to discrete transitions (more realistic)



- SK low energy fitter is used to reconstruct events.
 - Vertex: PMT hit timing information is used.
 - Direction: Cherenkov ring pattern of hit PMTs is used.
 - Energy: Number of hit PMTs is used.
- Fitter performance is checked by various calibrations.
- Important variables = $\{ E_{\text{rec}}, d_{\text{wall}}, \text{effwall}, \text{ova}Q, \theta_C \}$.



$$\text{ova}Q = G_V^2 - G_A^2$$

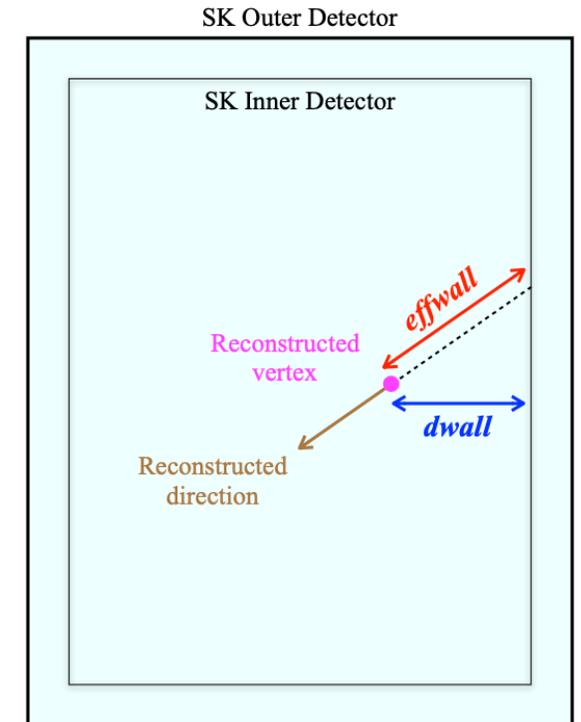
G_V : Vertex goodness (quality of reconstructed vertex)

G_A : Angular badness (quality of reconstructed direction)

- 有効体積による選別で全エネルギー領域でカットをかける
- それでも低エネルギー領域 (3.49 - 5.99 MeV) でビームと無関係な事象が残ってしまう
- さらに厳しい制限として以下の式を満たす事象を選択

$$\begin{cases} d_{wall} > p_{d_{wall}}[0] + p_{d_{wall}}[1] \times E_{rec} \\ e_{ffwall} > p_{e_{ffwall}}[0] + p_{e_{ffwall}}[1] \times E_{rec} \\ o_{vaq} > p_{o_{vaq}}[0] + p_{o_{vaq}}[1] \times E_{rec} \end{cases}$$

- 係数はT2K Run毎に最適化されている



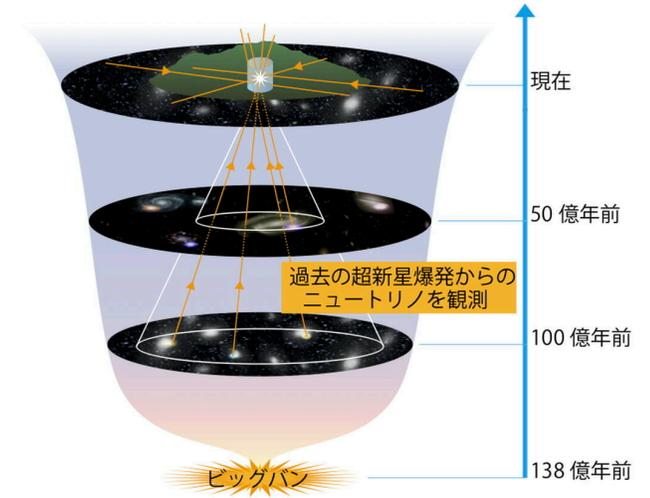
$$ovaQ = G_V^2 - G_A^2$$

G_V : Vertex goodness (quality of reconstructed vertex)

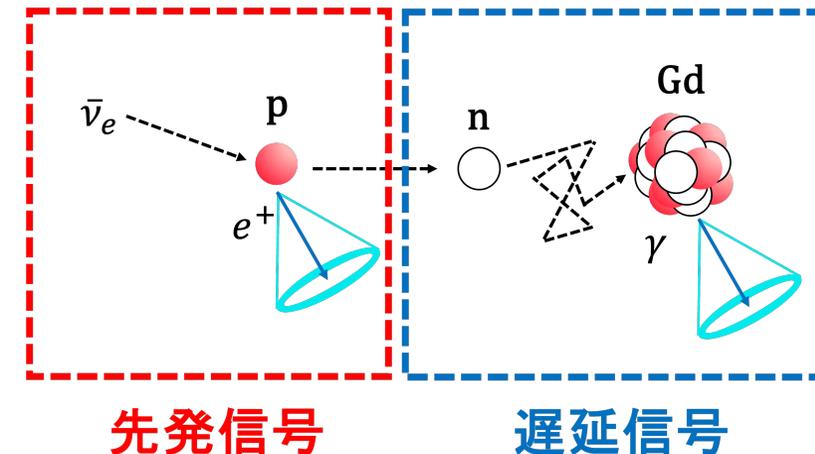
G_A : Angular badness (quality of reconstructed direction)

- 超新星背景ニュートリノ(SRN)
 - ✓過去の超新星爆発由来のニュートリノの重ね合わせ
 - ✓爆発機構や重元素合成過程の解明に期待
- スーパーカミオカンデ(SK)でSRNの世界初観測を目指す(SK-Gd実験)
 - ✓探索信号: 逆ベータ崩壊 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)
 - ✓陽電子と中性子の同時遅延計測
 - ✓中性子を含む事象を棄却することは困難

→大気ニュートリノによるNCQE反応

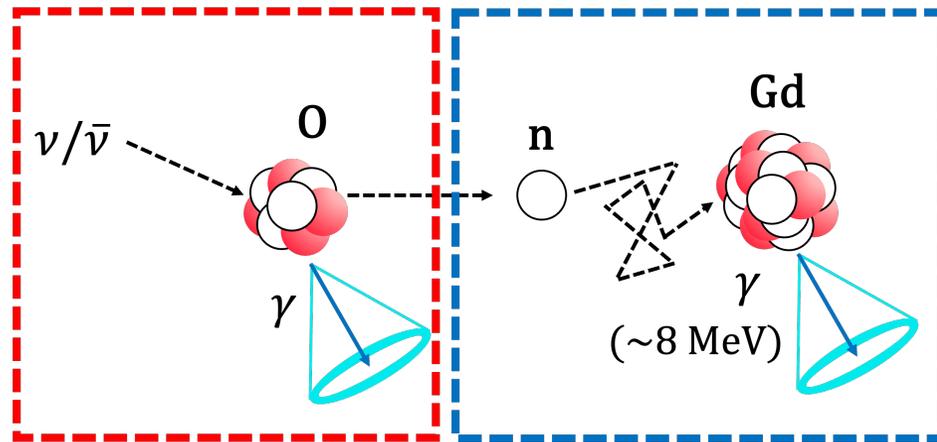


逆ベータ崩壊反応 (SRN)



- ニュートリノが大気中の酸素原子核と反応し、中性子が放出される
 - ✓ SRNによる逆ベータ崩壊(IBD)の信号と酷似
 - ✓ 再構成エネルギーがIBDの信号領域と重なっている
 - ✓ 現在はシミュレーションを用いて事象数を見積もっている
- NCQE反応の正確な理解が必要

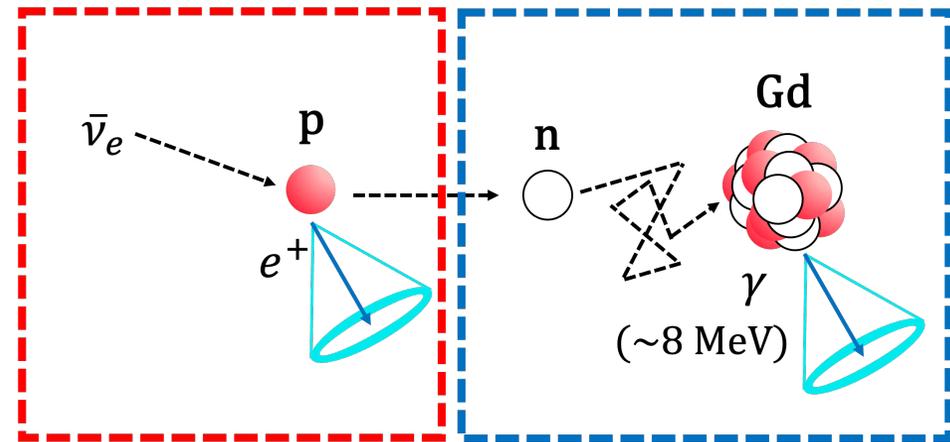
NCQE反応 (大気 ν)



先発信号

遅延信号

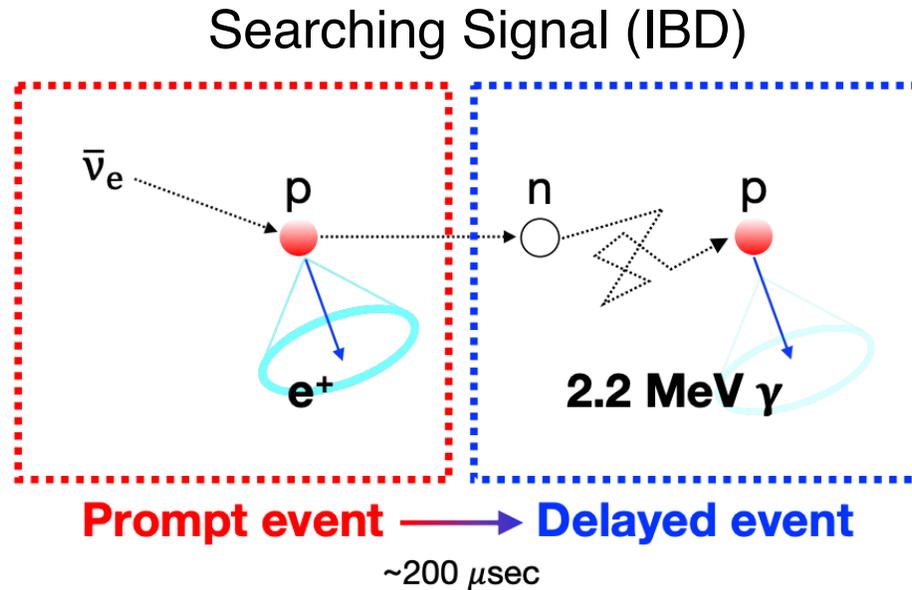
逆ベータ崩壊反応 (SRN)



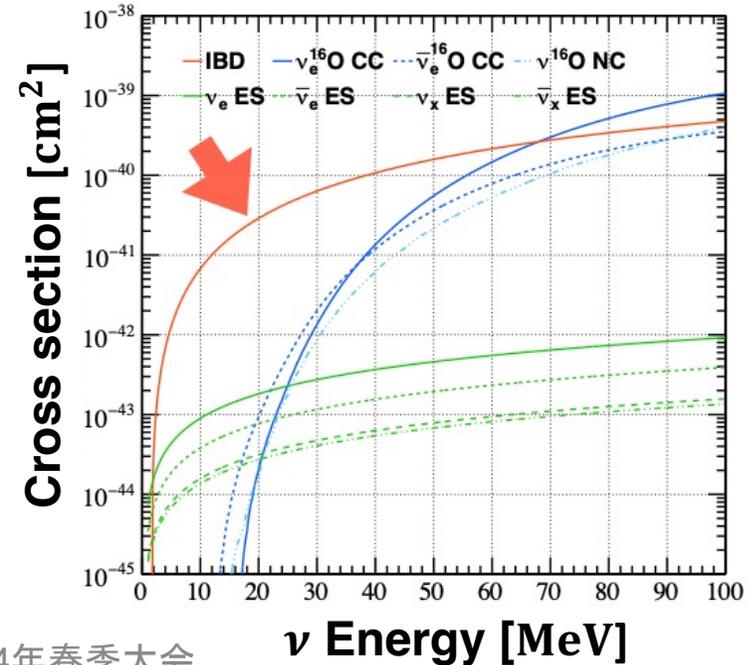
先発信号

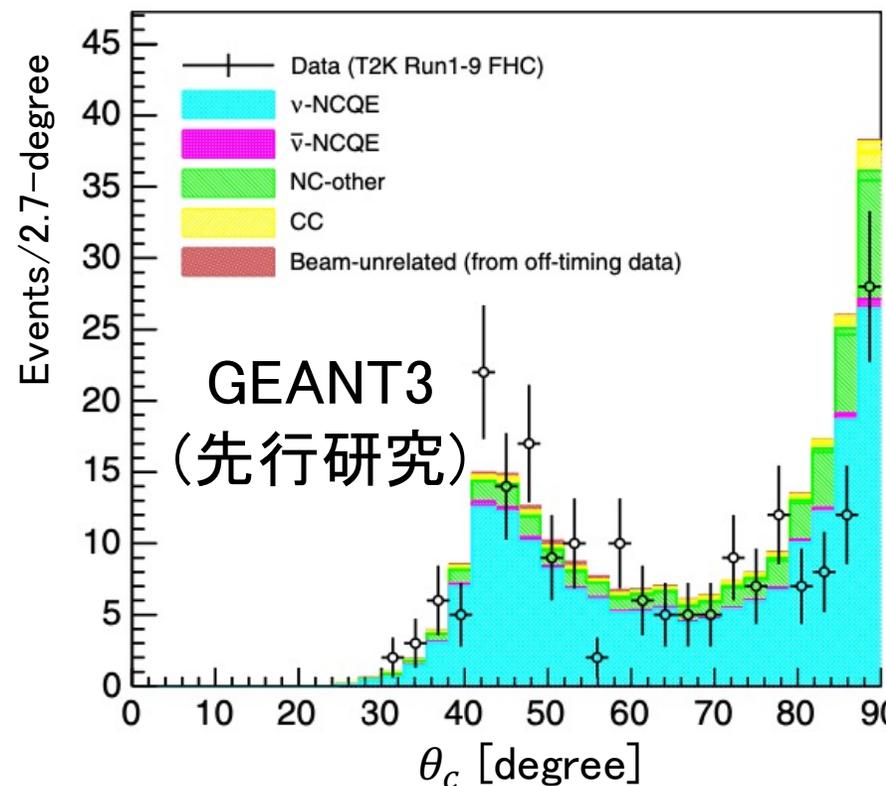
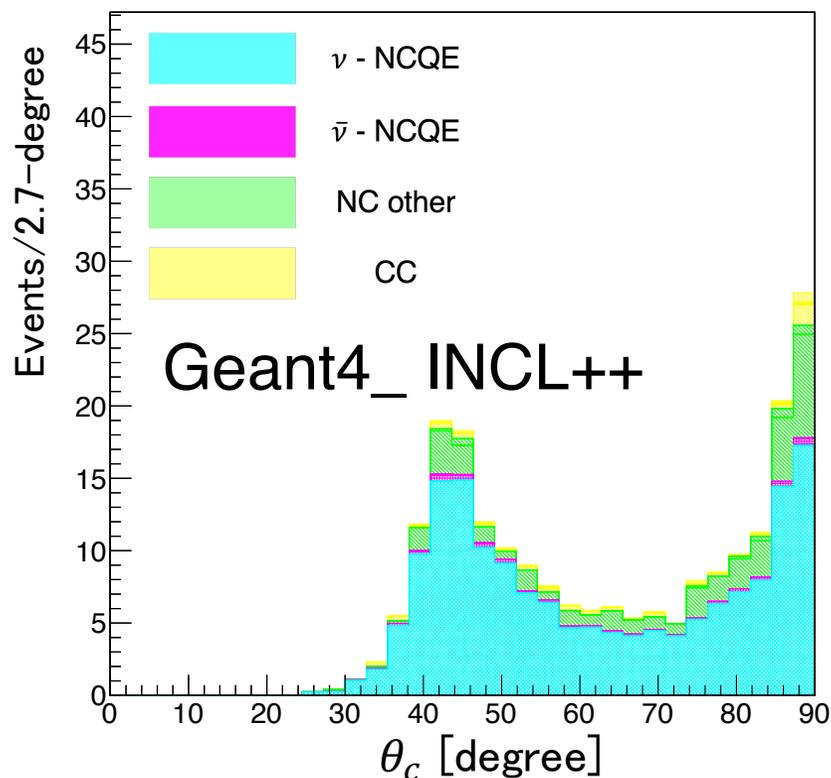
遅延信号

- 反電子ニュートリノによる逆ベータ崩壊反応を対象
 - ✓ 探索信号: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
 - ✓ SRN探索領域において反応断面積が他の反応に比べ最大
 - ✓ 陽電子と中性子の同時遅延計測
 - ✓ 中性子を含まない事象を大幅に棄却できる



Cross section in each reaction





K. Abe et al, Phys. Rev. D 100, 112009 (2019).

事象数	all	ν - NCQE	$\bar{\nu}$ - NCQE	NC -other	CC
Geant4_INCL++	217.4 (+7%)	165.3	4.6	38.8	8.7
GEANT3 (先行研究)	234.8 (+15%)	178.6	4.8	42.5	8.9
実験データ	204	—	—	—	—

大角度部分($\theta_c : 78^\circ - 90^\circ$)での比較

26

- E_{vis} が3.49 から7.49 MeVと、7.49 から29.49 MeVの2区間で分けて比較
- INCL++はBERTに比べてデータにより近づいた

E_{vis} [MeV] : 3.49 - 7.49 & θ_c : $78^\circ - 90^\circ$

FHC	全事象数	データとの差
GEANT3 (先行研究)	30.3	+71%
Geant4_BERT	20	+11%
Geant4_INCL++	18.3	+2%
実験データ	18	-

E_{vis} [MeV] : 7.49 - 29.49 & θ_c : $78^\circ - 90^\circ$

FHC	全事象数	データとの差
GEANT3 (先行研究)	73.8	+85%
Geant4_BERT	77.7	+94%
Geant4_INCL++	53.5	+34%
実験データ	40	-