

スーパーカミオカンデにおける超新星ニュートリノと酸素原子核との反応についての研究

2022年9月7日@日本物理学会（岡山理科大学）

中西史美^A

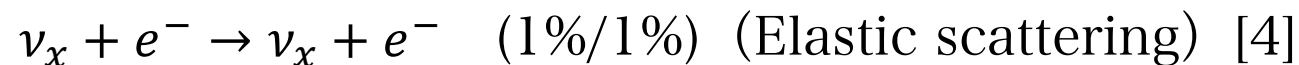
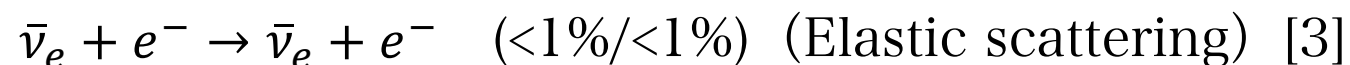
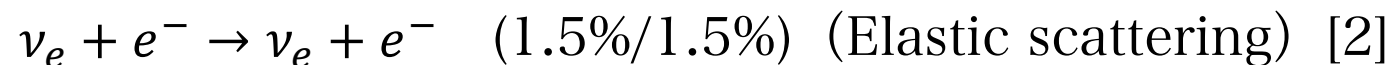
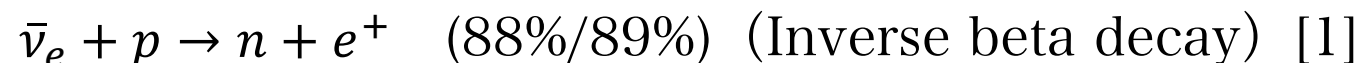
小汐由介^A、関谷洋之^B、柏木ゆり^B、Guillaume Pronost^C、池田一得^B、中畑雅行^B、他Super-Kamiokande Collaboration

岡山大理^A、東大宇宙線研^B、ILANCEラボ(CNRS-東大)^C

- 背景
 - 超新星ニュートリノ観測
 - ニュートリノと酸素原子核との反応
 - 中性カレント反応
- 先行研究
- 本研究
 - シミュレーション方法
 - モデル間でのイベント期待値の比較
 - エネルギースペクトラム
- まとめと今後の展望

- 超新星ニュートリノ
 - 超新星爆発により放出されるニュートリノ
 - 爆発機構などを探る上で、観測が重要

- 水チェレンコフ検出器でのニュートリノ観測



反応の種類	散乱方向
[1]	ほぼ等方
[2]~[4]	強く前方*
[5]~[6]	ほぼ等方
[7]	ほぼ等方

*詳細は前講演:7pA125-5

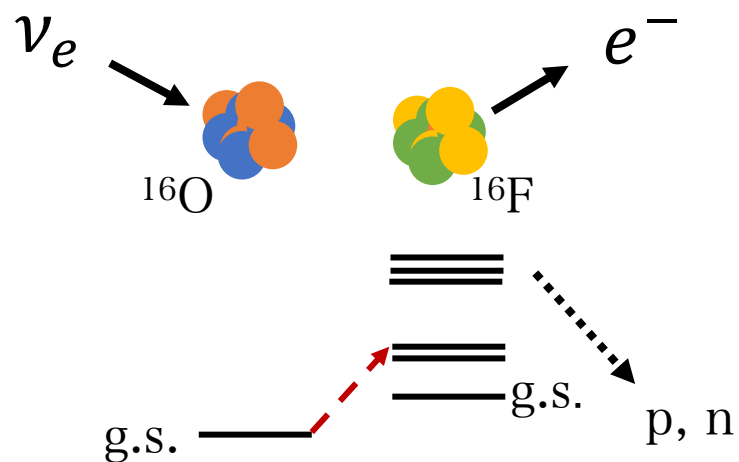
Ikeda *et al*, The Astrophysical Journal, 669:519Y524, 2007

(数字) : スーパーカミオカンデ(SK)で観測される各相互作用のイベント数の割合
(with NH(MSW)/without oscillation)

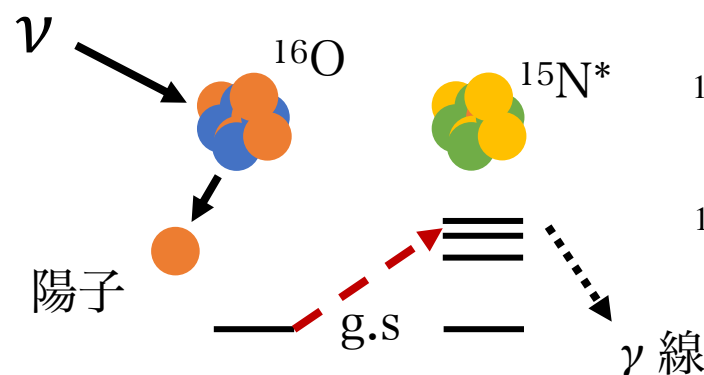
ニュートリノと酸素原子核との反応

- 超新星爆発由来イベントのエネルギー領域では詳しい研究は行われていない
→ イベント数の正確な見積りが必要
- 20 MeV以上の領域で酸素原子核反応の観測が重要

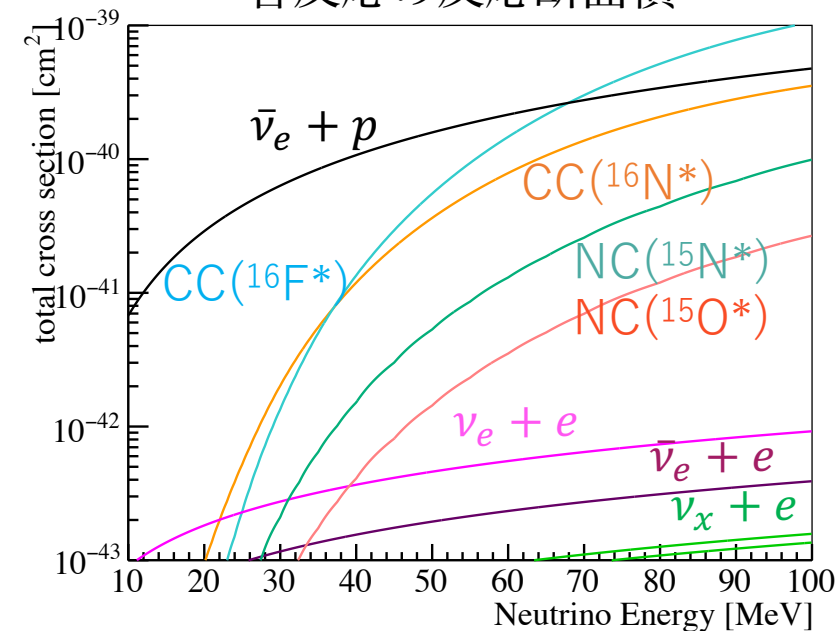
荷電カレント反応(CC)
 $\nu_e/\bar{\nu}_e$ と反応し、 e^-/e^+ を放出



中性カレント反応(NC)
全てのニュートリノと反応



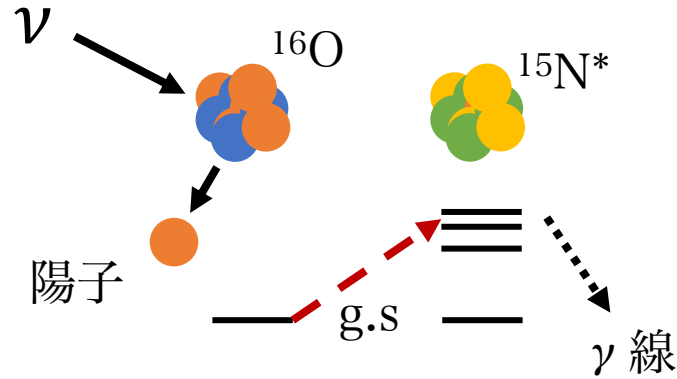
各反応の反応断面積



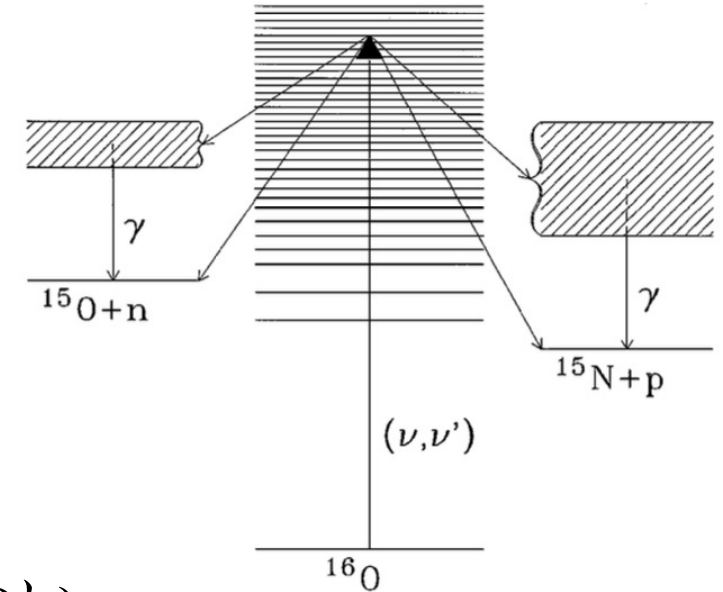
本研究では、中性カレント反応についての現実的なシミュレーションを行った

酸素原子核との中性カレント反応

- ^{16}O の巨大共鳴により、陽子・中性子を放出



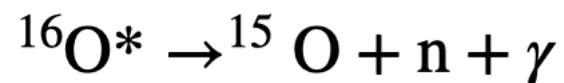
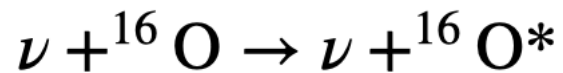
巨大共鳴の模式図



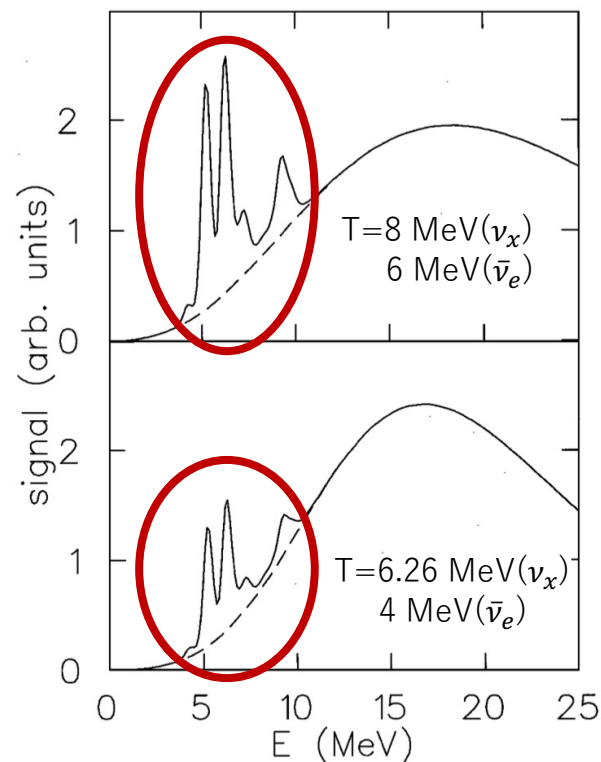
K. Langanke, P. Vogel, and E. Kolbe et al(1996)

- ✓観測されるイベント数がニュートリノ振動によらない
- ✓ニュートリノスペクトルの影響を受けやすい
 - 中性カレント反応に注目することで、モデル弁別が容易になる

- 水チェレンコフ検出器で期待されるエネルギー分布



${}^{15}\text{O}^*$ 励起状態 [MeV]
5.18
6.18
6.69
7.28



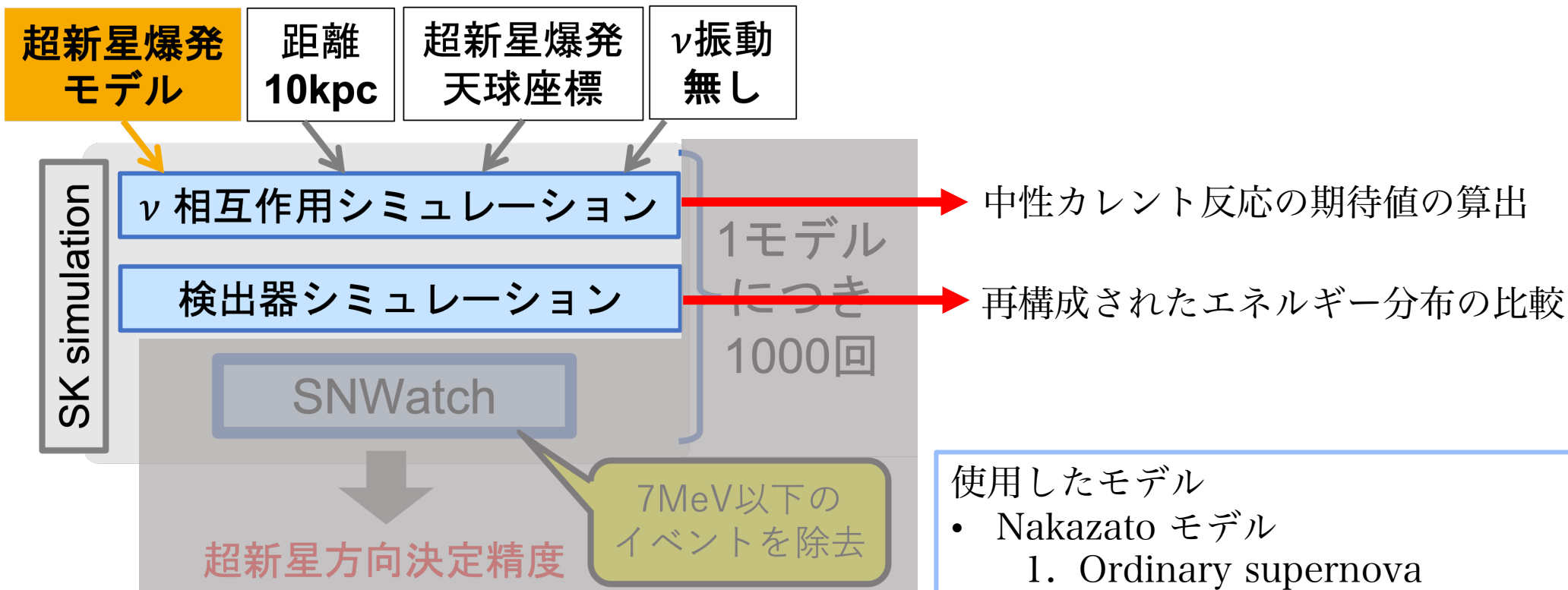
K. Langanke, P. Vogel, and E. Kolbe et al(1996)

本研究の目的

- ✓ スーパーカミオカンデで観測される中性カレント反応数を見積もる
- ✓ モデル間での中性カレント反応数やエネルギー分布を比較する

- 背景
 - 超新星ニュートリノ観測
 - ニュートリノと酸素原子核との反応
 - 中性カレント反応
- 先行研究
- 本研究
 - シミュレーション方法
 - モデル間でのイベント期待値の比較
 - エネルギースペクトラム
- まとめと今後の展望

- 2つの超新星モデルを使用



図は前講演より引用
詳細は前講演(7pA125-5)

使用したモデル

- Nakazato モデル

1. Ordinary supernova

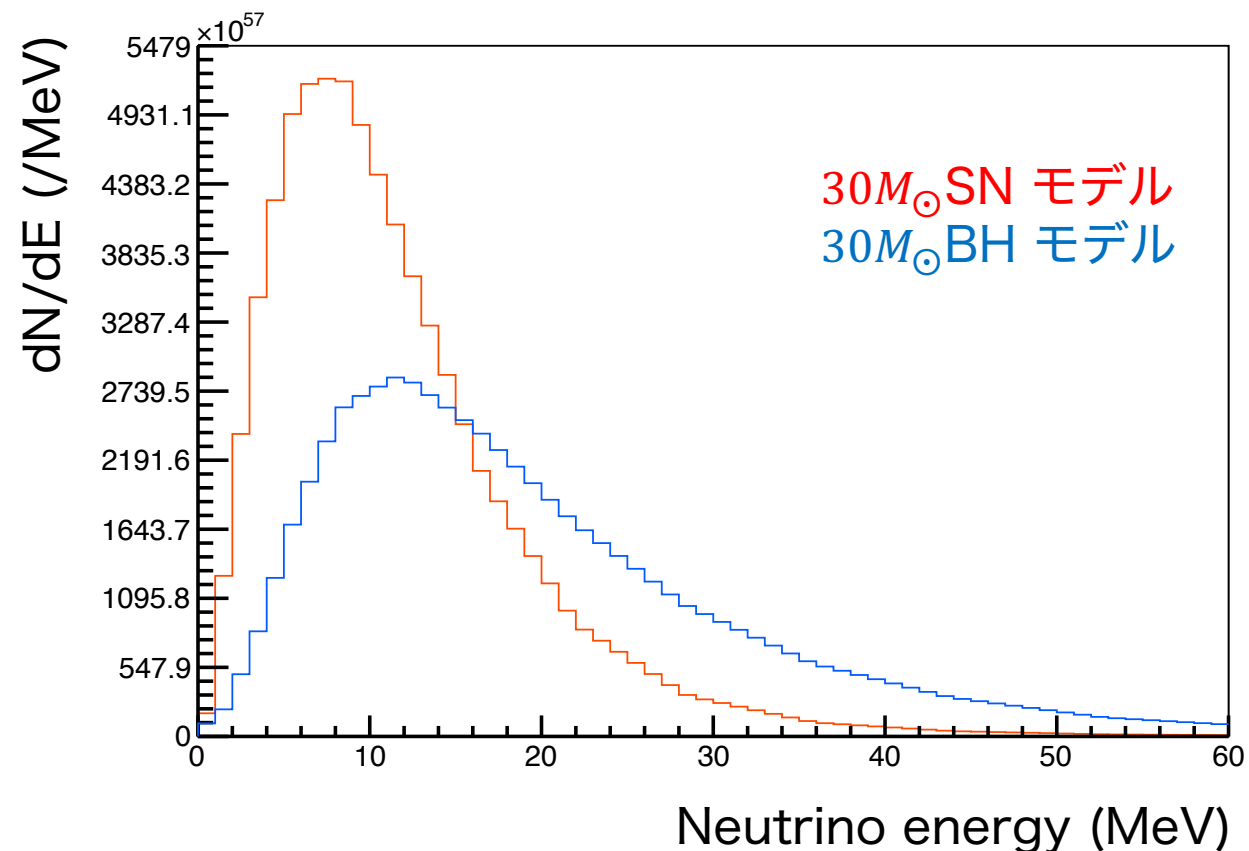
$M/M_{\odot} = 30, Z \sim Z_{\odot}$, 衝撃波復活時間=200 msec.

1. Black hole formation

$M/M_{\odot} = 30, Z = 0.04$

中性カレント反応のイベント期待値

- Ordinary supernova(SN)モデルとBlack hole formation(BH)モデルを比較



←BHモデルとSNモデルのニュートリノスペクトル

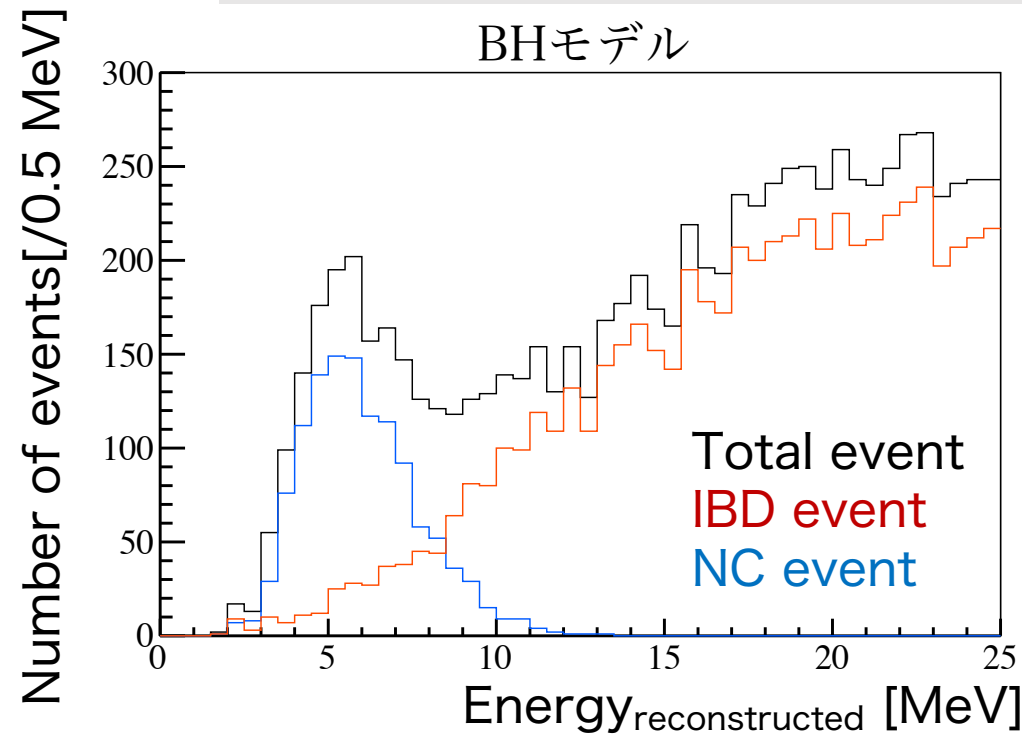
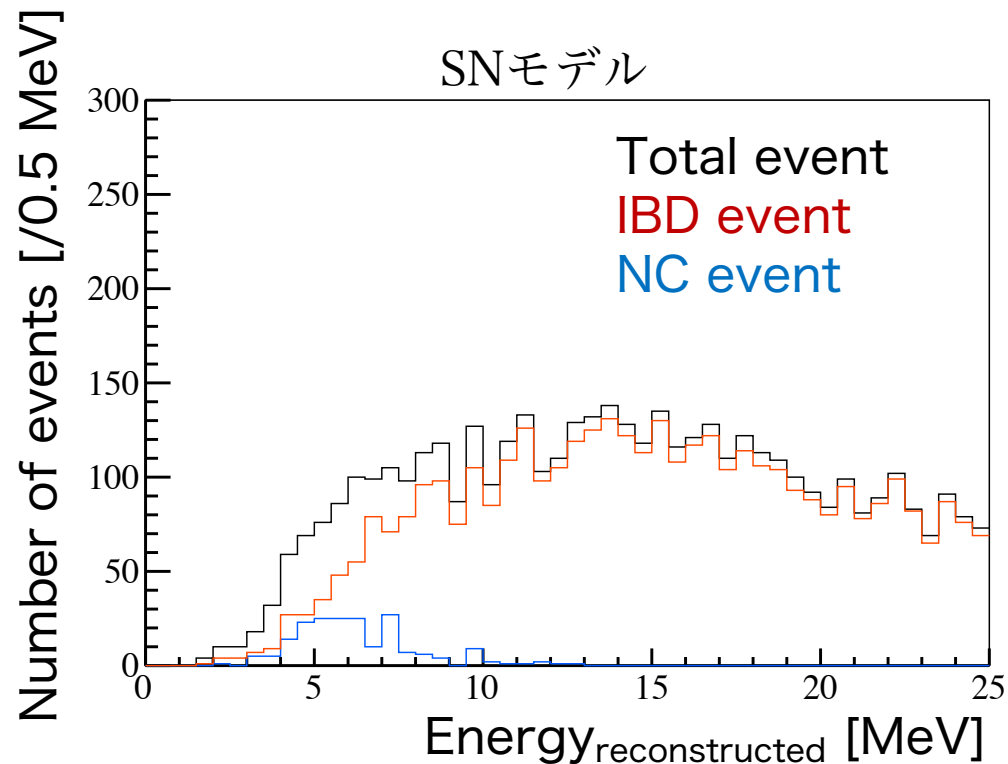
反応	30 M_{\odot} SN model	30 M_{\odot} BH model
IBD($\bar{\nu}_e + p$)	5936	18357
NC($^{15}\text{N}^*$)	177	1124
NC($^{15}\text{O}^*$)	48	304

※SK(32.5 kton)で観測したと仮定
※SKと超新星の距離=10 kpc
※w/o oscillation

中性カレント反応はモデル間によるイベント期待値の差が大きい

- 再構成後のエネルギー分布

※SK(32.5 kton)で観測したと仮定
※SKと超新星の距離=10 kpc
※w/o oscillation



ブラックホール形成モデルでは、中性カレント反応によるガンマ線のピークが顕著に現れる
→中性カレント反応を観測することでモデル弁別が容易になる

- まとめ

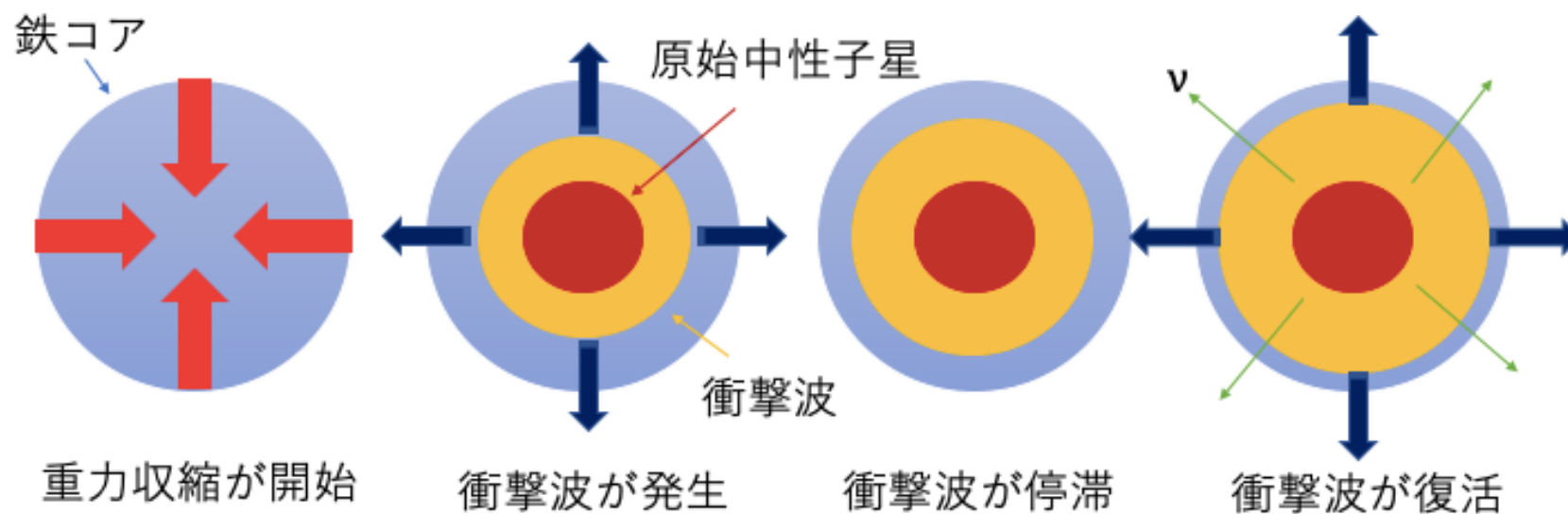
- SKで観測される超新星ニュートリノと酸素原子核との中性カレント反応に注目
- 2つの超新星モデルを用いて、SKで予測されるイベント期待値を比較
 - 20 MeV以上のニュートリノの数がイベント期待値に影響
 - 他反応に比べ、モデル間の差が大きい
- 観測されるイベントの再構成エネルギースペクトルを作成
 - BHモデルでは中性カレント反応によるガンマ線のピークが顕著に現れる

- 今後の展望

- 現実的なSK検出器シミュレーションで、脱励起に付随するガンマ線の影響や遅延中性子信号を用いた酸素原子核反応の識別評価を行う
- 様々な超新星モデルについても評価する
- Gdの中性子捕獲によるガンマ線信号の影響を評価する

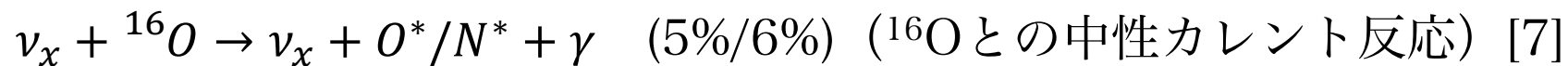
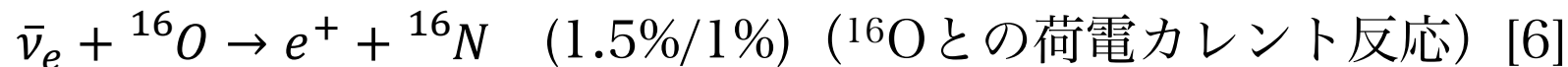
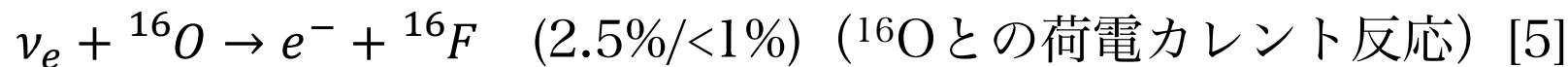
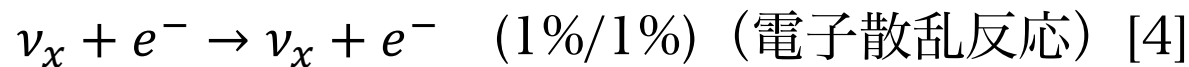
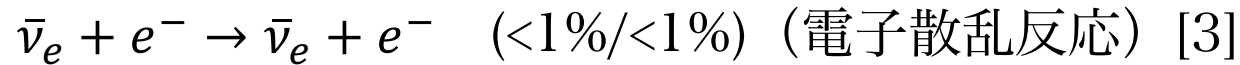
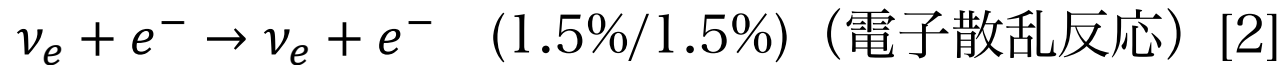
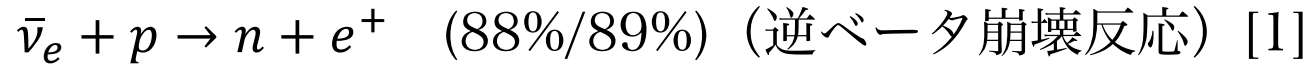
Back up

- 太陽質量の8倍以上の星が一生の最後に起こす爆発現象
- 爆発時、大量のニュートリノを放出する
- 爆発後、中性子星あるいはブラックホールを形成



爆発機構などを探る上で、超新星ニュートリノの観測が重要

• 反応の種類



(数字) : スーパーカミオカンデで観測される
各相互作用のイベント数の割合
(with NH(MSW)/without oscillation)

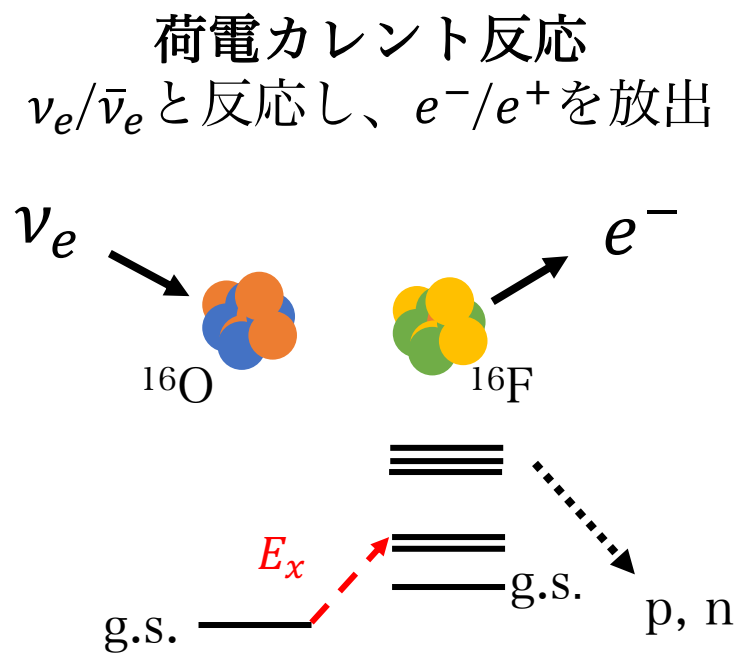
Ikeda *et al*, The Astrophysical Journal, 669:519Y524, 2007

反応の種類	散乱方向
[1]	ほぼ等方
[2]~[4]	強く前方
[5]~[6]	ほぼ等方
[7]	ほぼ等方

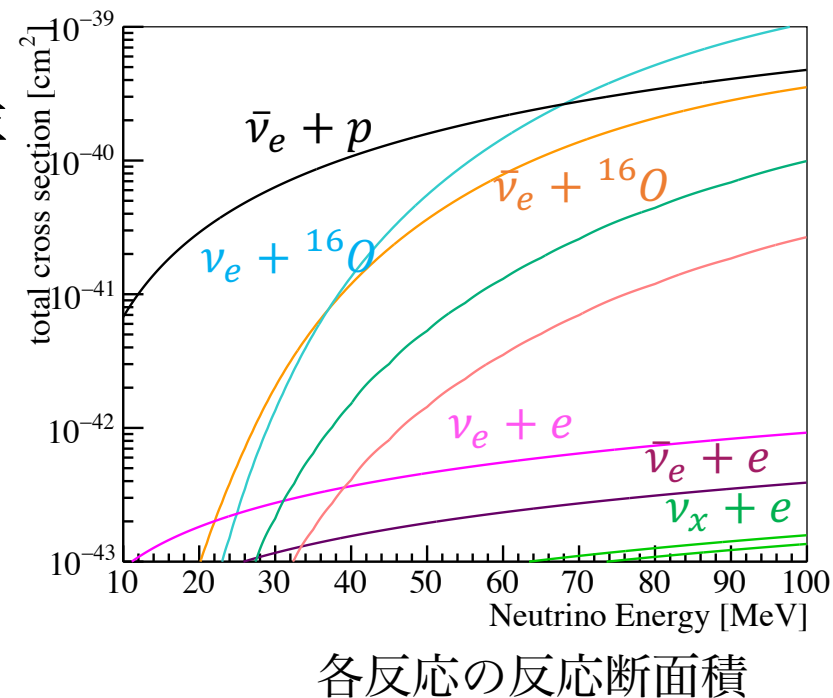
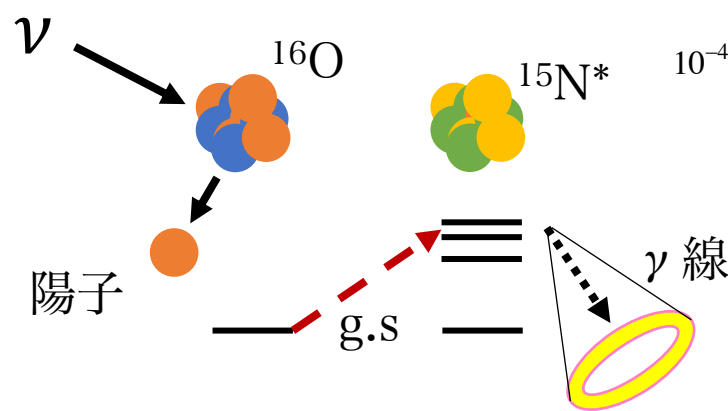
(5),(6)などは超新星の方向決定時のbackgroundとなる
→イベント数の正確な見積りが重要となる

ニュートリノと酸素原子核との反応

- 超新星爆発由来イベントのエネルギー領域では詳しい研究は行われていない
→ イベント数の正確な見積りが必要
- 20 MeV以上で断面積が大きい
→ 20 MeV以上の領域で酸素原子核反応の観測が重要

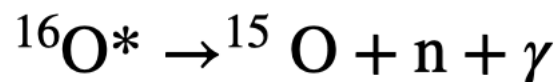
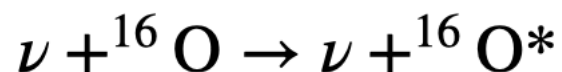


中性カレント反応
全てのニュートリノと反応

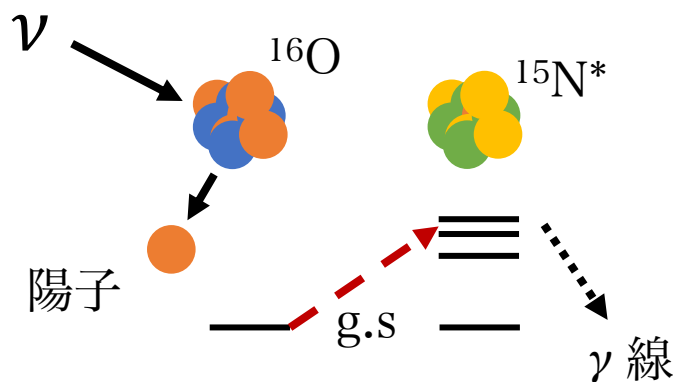


酸素原子核との中性カレント反応

- ^{16}O の巨大共鳴により、陽子・中性子を放出
- ^{15}N や ^{15}O が脱励起の際にガンマ線を放出
- 観測されるイベント数がニュートリノ振動によらない
- ν_x は平均エネルギーが高い→他のニュートリノより多く反応する

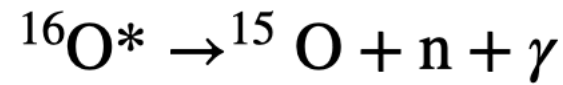
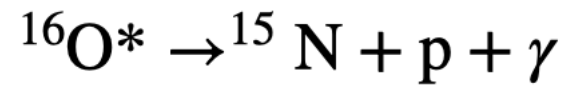
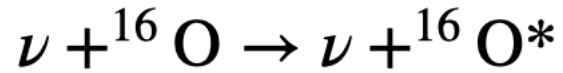


E_x	
5.27, 5.30	$^{15}\text{N}^*$
6.33	
7.16, 7.30	
7.56	
8.32	
8.57	
9.05, 9.16, 9.22	
9.76, 9.83, 9.93	$^{15}\text{O}^*$
5.18, 5.24	
6.18	
6.69, 6.86	
7.28	

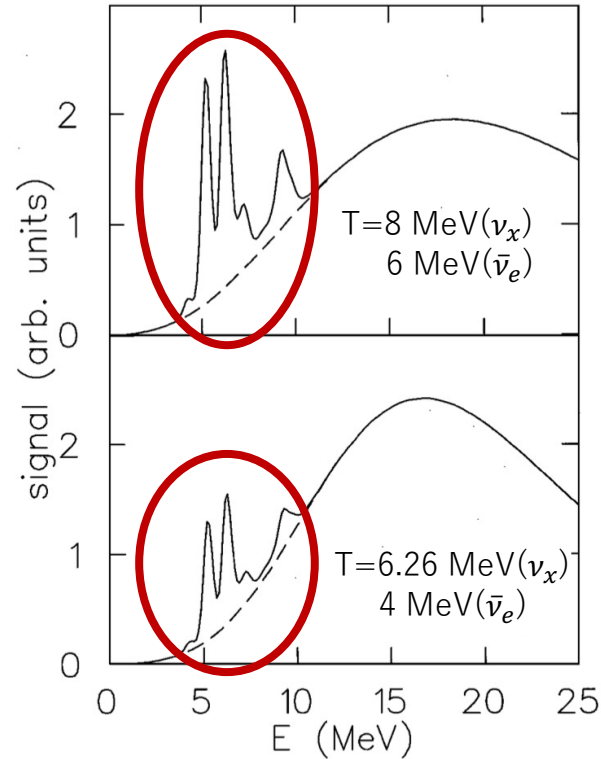


- ✓ スーパーカミオカンデで観測される
中性カレント反応を見積もる
- ✓ 期待値やエネルギー分布を他の反応と比較する

- 水チェレンコフ検出器で期待されるエネルギー分布



${}^{15}\text{O}^*$ 励起状態 [MeV]
5.18
6.18
6.69
7.28



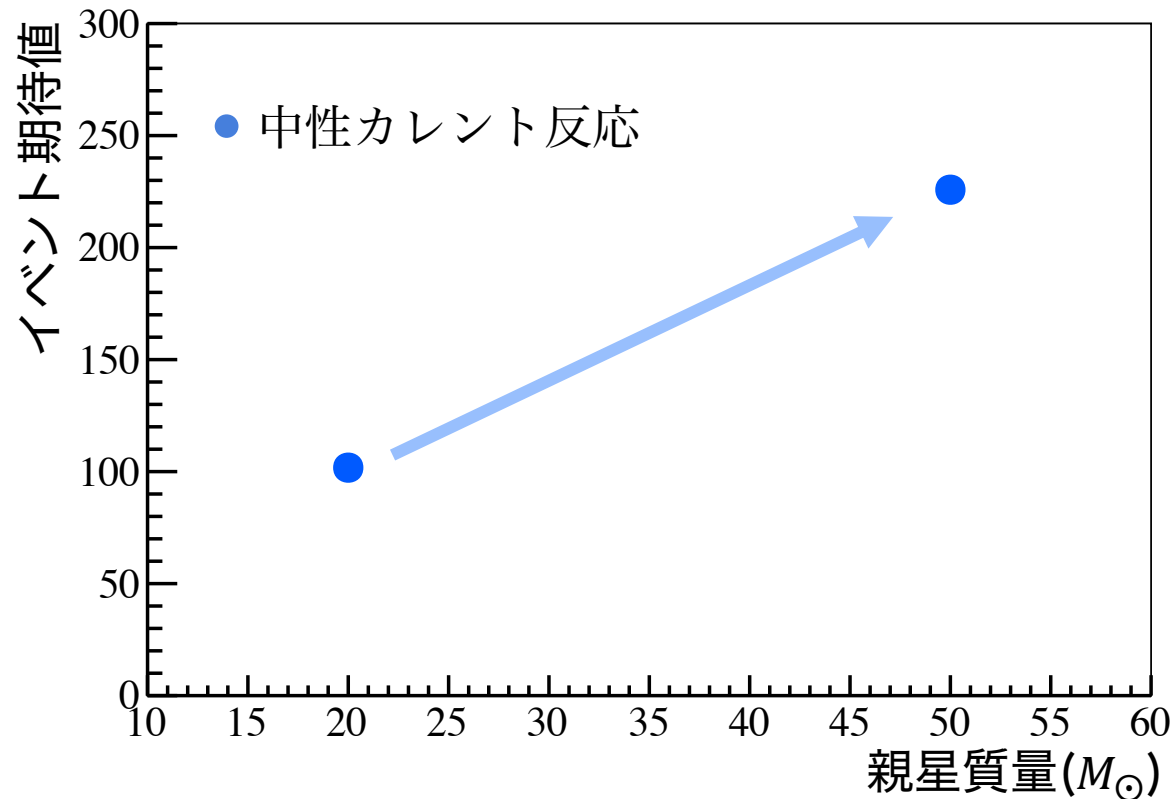
${}^{15}\text{N}^*$ 励起状態 [MeV]
5.27
6.33
7.16
7.56
8.32
8.57
9.05
9.76

K. Langanke, P. Vogel, and E. Kolbe et al(1996)

本研究の目的

- ✓ スーパーカミオカンデで観測される中性カレント反応数を見積もる
- ✓ モデル間での中性カレント反応数やエネルギー分布を比較する

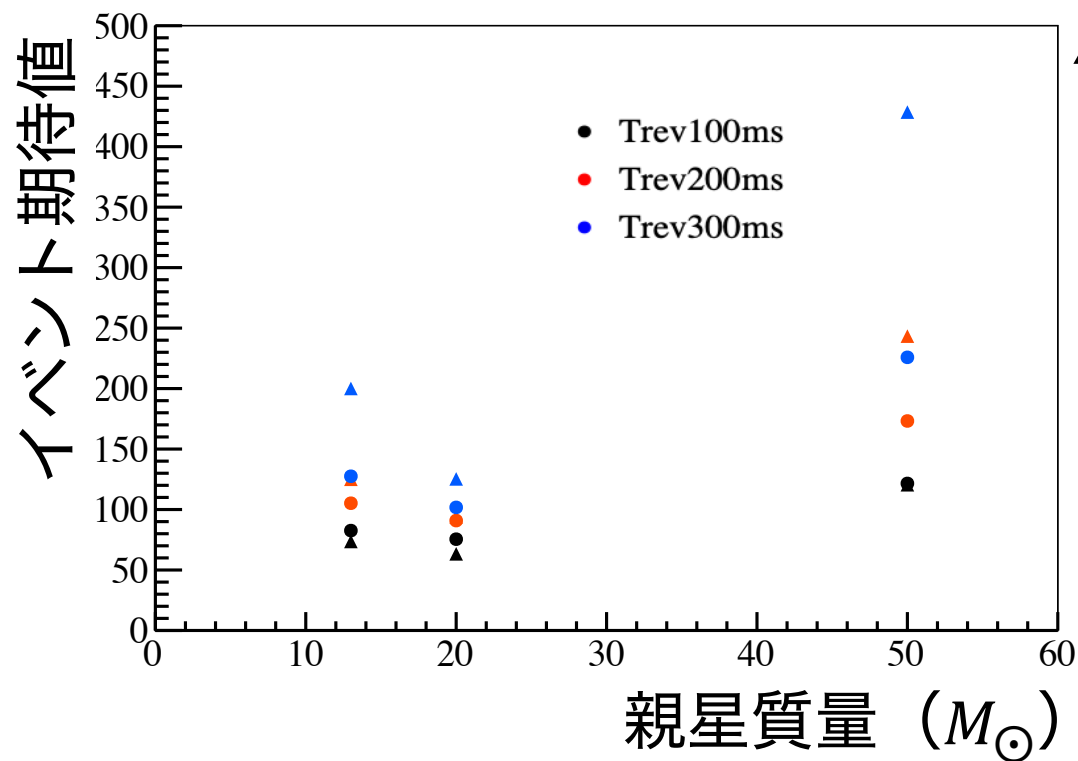
- 超新星モデルによる期待値の比較



	$20M_{\odot}$	$50M_{\odot}$
IBD($\bar{\nu}_e + p$)	3888	6376
NC($^{15}\text{N}^*$)	80	178
NC($^{15}\text{O}^*$)	22	48

- ※SK(32.5 kton)で観測したと仮定
- ※SKと超新星の距離=10 kpc
- ※w/o oscillation
- ※ T_{rev} : 衝撃波復活時間=300 msec.
- ※超新星モデル: Nakazato model

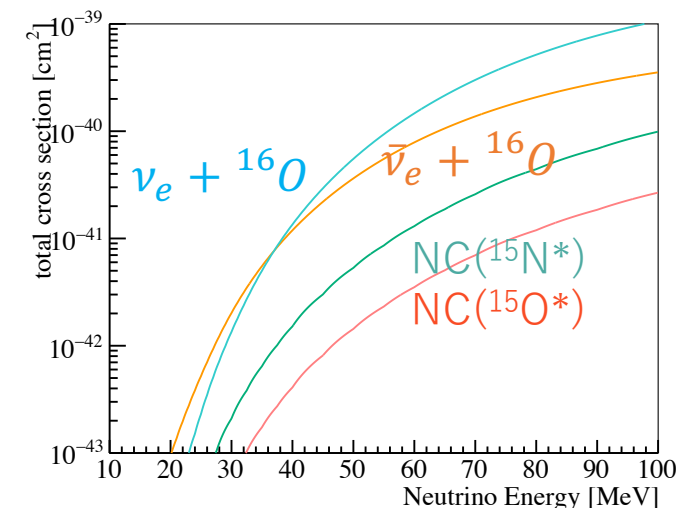
- 超新星モデルによる期待値の比較



- ▲ 荷電カレント反応(CC)
- 中性カレント反応(NC)

20 M_{\odot} モデル	$T_{\text{rev}}=100$ ms	$T_{\text{rev}}=300$ ms
$\bar{\nu}_e + p$	2993	3821
$\nu_e, \bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O}$ (CC)	63.36	125.3
$\nu + {}^{16}\text{O}$ (NC)	75.48	101.8

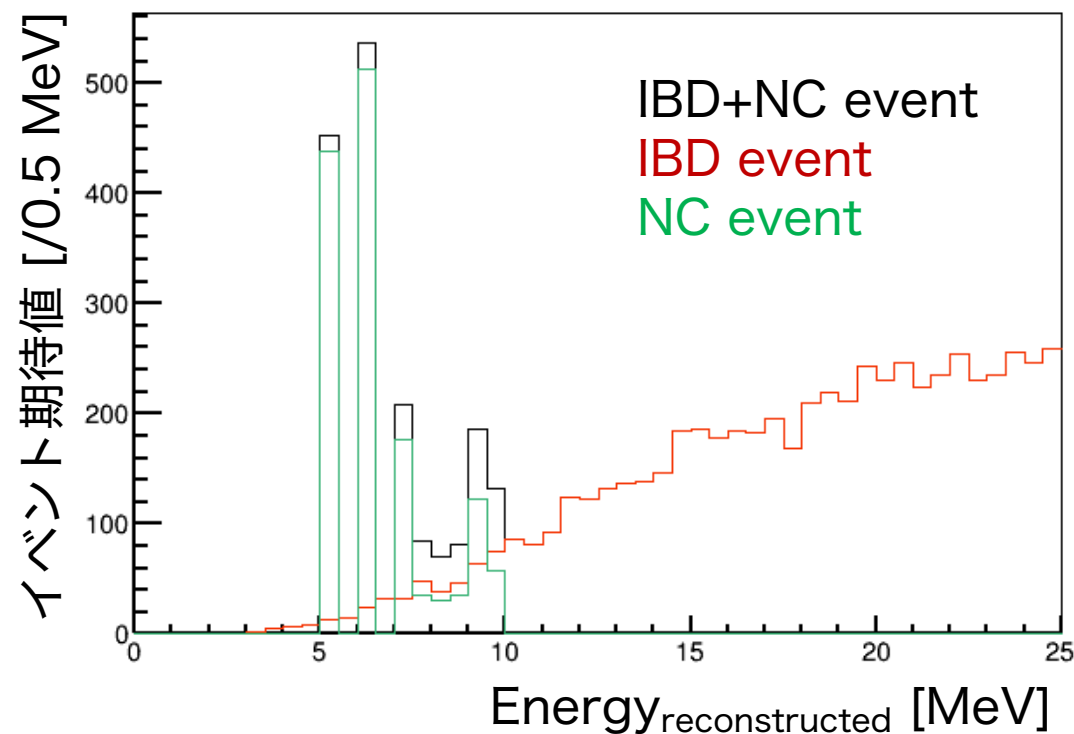
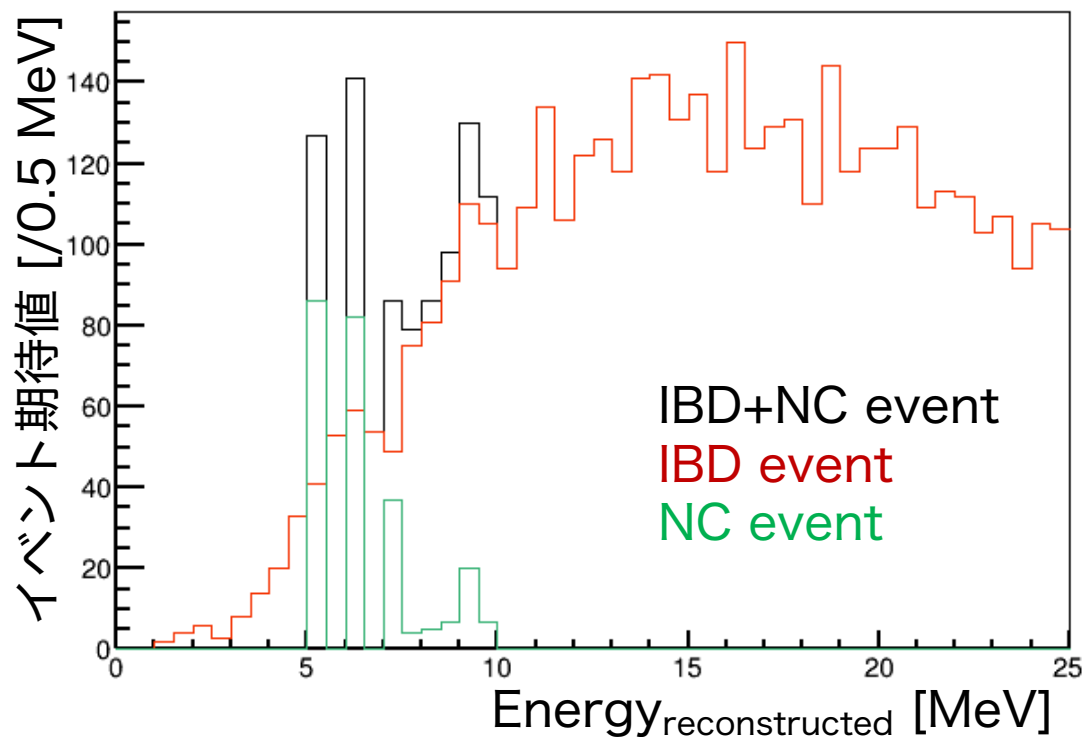
- ※SK(32.5 kton)で観測したと仮定
- ※SKと超新星の距離=10 kpc
- ※w/o oscillation
- ※ T_{rev} : 衝撃波復活時間
- ※超新星モデル: Nakazato model



ニュートリノスペクトラム

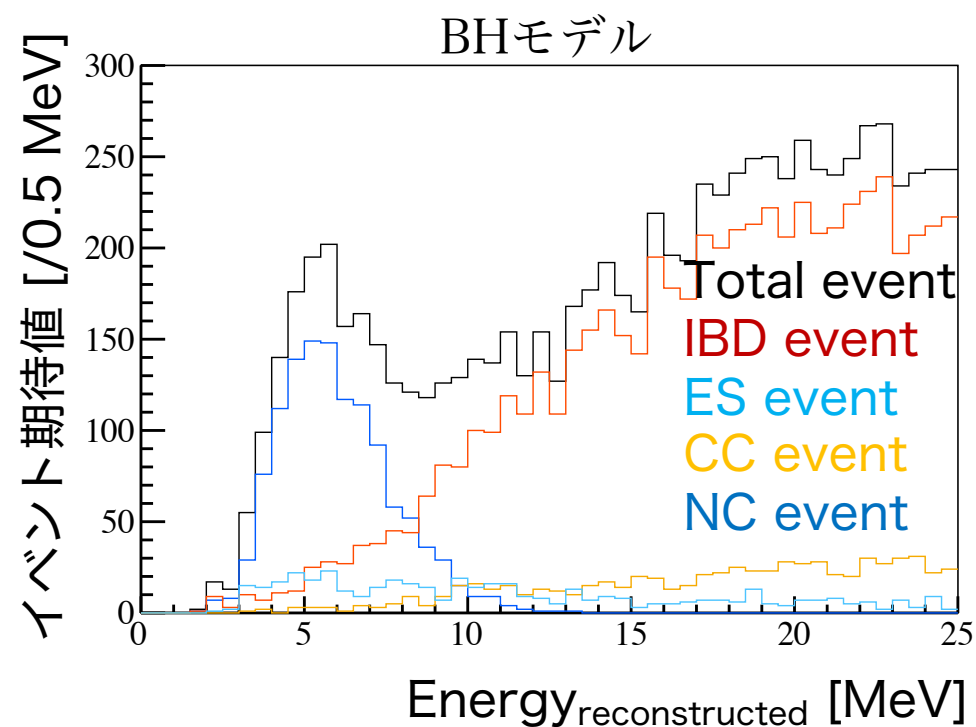
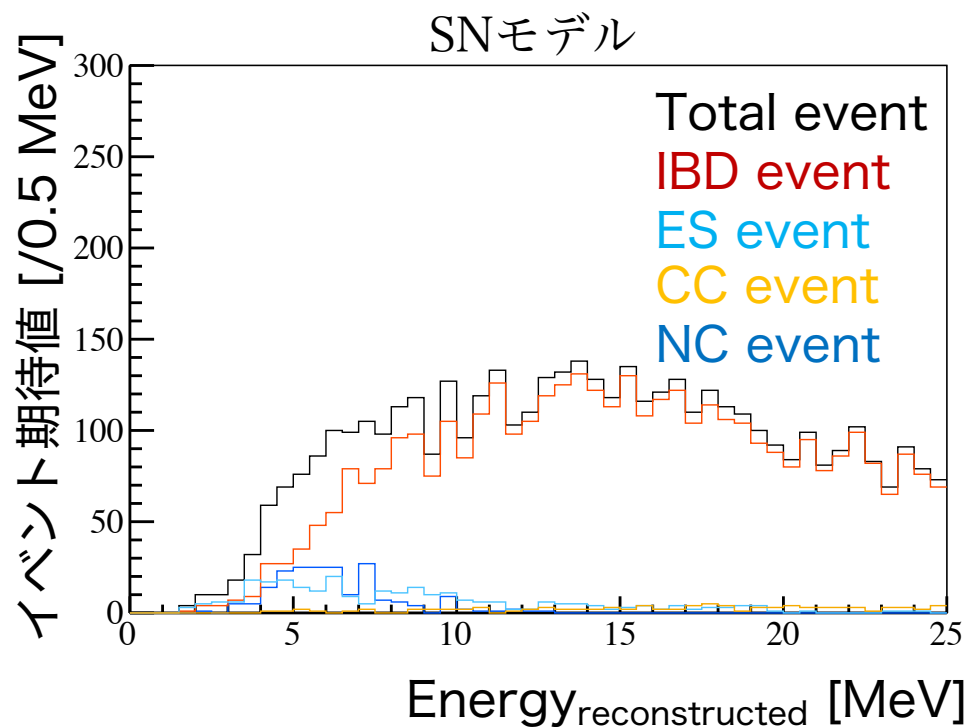
- 再構成前のエネルギー分布

※SK(32.5 kton)で観測したと仮定
※SKと超新星の距離=10 kpc
※w/o oscillation



- 再構成後のエネルギー分布

※SK(32.5 kton)で観測したと仮定
※SKと超新星の距離=10 kpc
※w/o oscillation



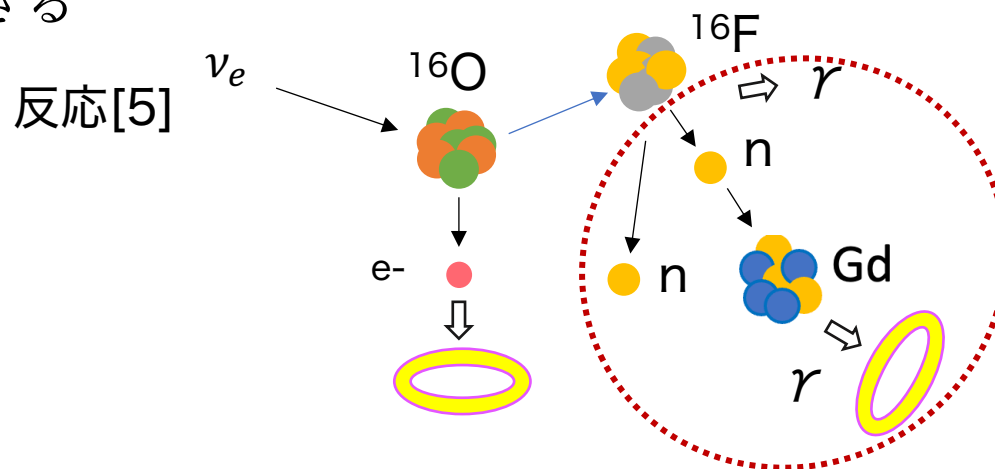
- 酸素原子核との荷電カレント反応[5][6]
 - 超新星爆発が起こった際、スーパーカミオカンデ(SK)での観測が期待される
 - 超新星爆発由来イベントのエネルギー領域では詳しい研究は行われていない
→ イベント数の正確な見積りが必要

• SK-Gd実験

超純水に硫酸ガドリニウムを導入→同時遅延計測が可能

- 逆ベータ崩壊反応、[5][6]において、中性子を捕獲することができれば、電子散乱反応と区別することができる

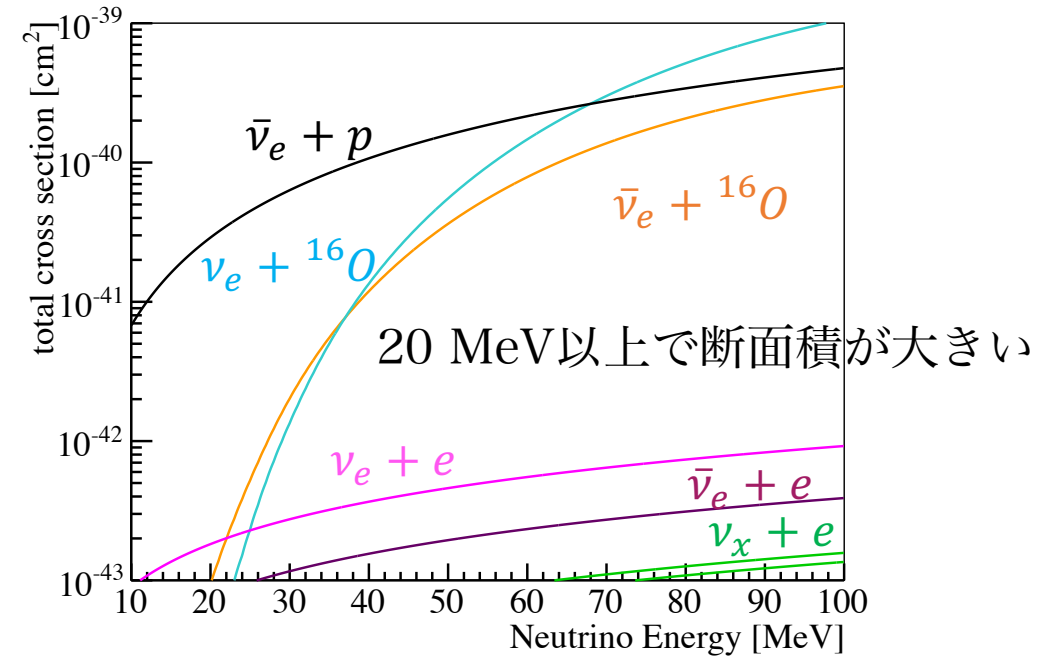
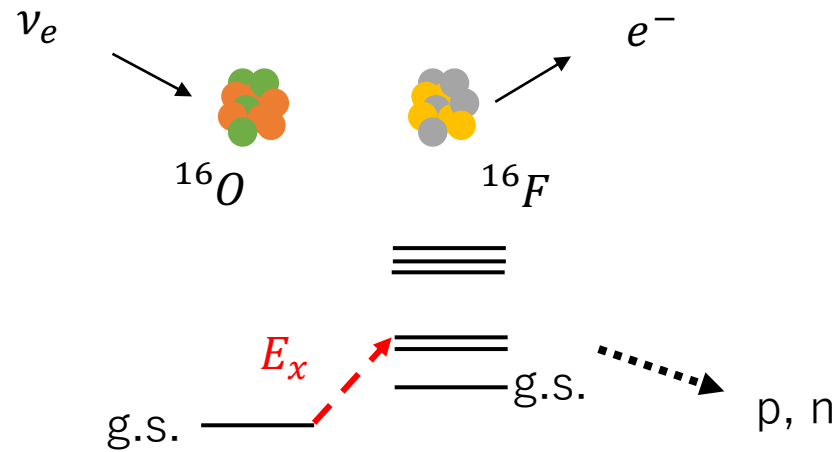
- 75%の割合で中性子捕獲が可能
(2022年6月)



※中性子が放出されない場合もある

酸素原子核との荷電カレント反応

- 電子ニュートリノ/反電子ニュートリノと酸素原子核との反応
- ^{16}O が電子/陽電子を放出して ^{16}F や ^{16}N に変化する
- 生成された ^{16}F , ^{16}N が陽子や中性子を放出して基底状態に落ちる



各反応の断面積

- E_x により、放出されるガンマ線や中性子のエネルギーなどが決まる
- 1つの反応に対し、43の励起状態を考慮する

- 42の励起状態を4グループに分割
- スーパーカミオカンデ(SK)で予測される期待値が見積もられた
 - Nakazato model
 - 親星質量 $20M_{\odot}$
 - スーパーカミオカンデで観測
 - 超新星と検出器との距離=10 kpc

Reaction	Ordinary supernova		
	No osc.	Normal	Inverted
$^{16}\text{O}(\nu_e, e^-)\text{X}$	41	178	134
$^{16}\text{O}(\bar{\nu}_e, e^+)\text{X}$	36	58	103
Electron scattering	140	157	156
Inverse β -decay	3199	3534	4242
Total	3416	3927	4635

- 本研究では、複数のNakazato modelを使用し、脱励起に付随する中性子を考慮したイベント予測を行った

- 超新星モデル

- Nakazato models₍₁₎

- コア反跳から計算されたモデル(20 s 程度)

- 状態方程式

- Shen EOS

- 親星の質量

- $13M_{\odot}, 20M_{\odot}, 50M_{\odot}$

- 衝撃波復活時間

- $T_{\text{rev}}=100 \text{ ms}, 200 \text{ ms}, 300 \text{ ms}$

- 観測条件

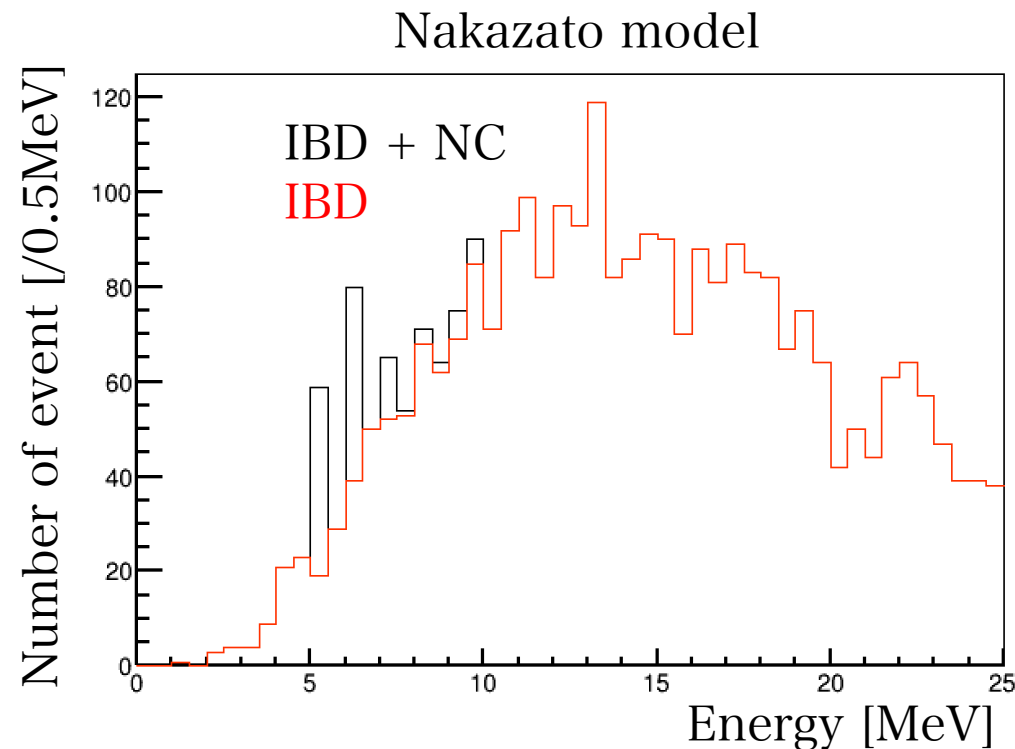
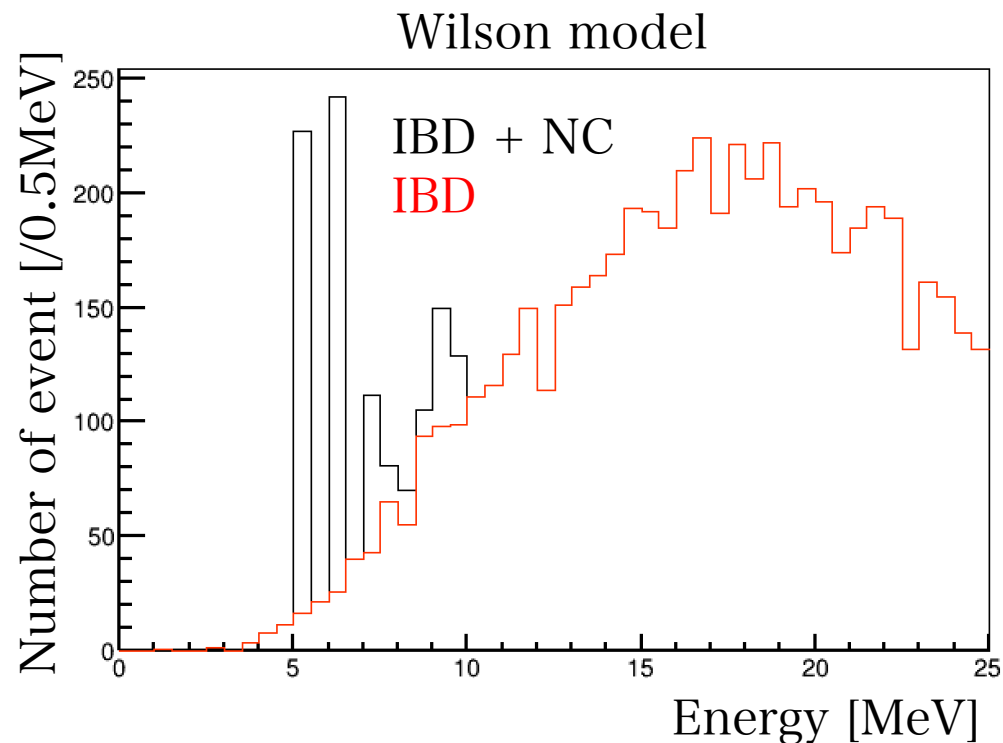
- スーパーカミオカンデで観測

- 超新星爆発が起こった場所とスーパーカミオカンデとの距離

- 10 kpc

(1)K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki, T. Totani, H. Umeda, and S. Yamada, *Astrophys. J.* 804(2015)75

- 中性カレント反応(NC)による特徴的なピークを確認できる



※SK(32.5 kton)で観測したと仮定

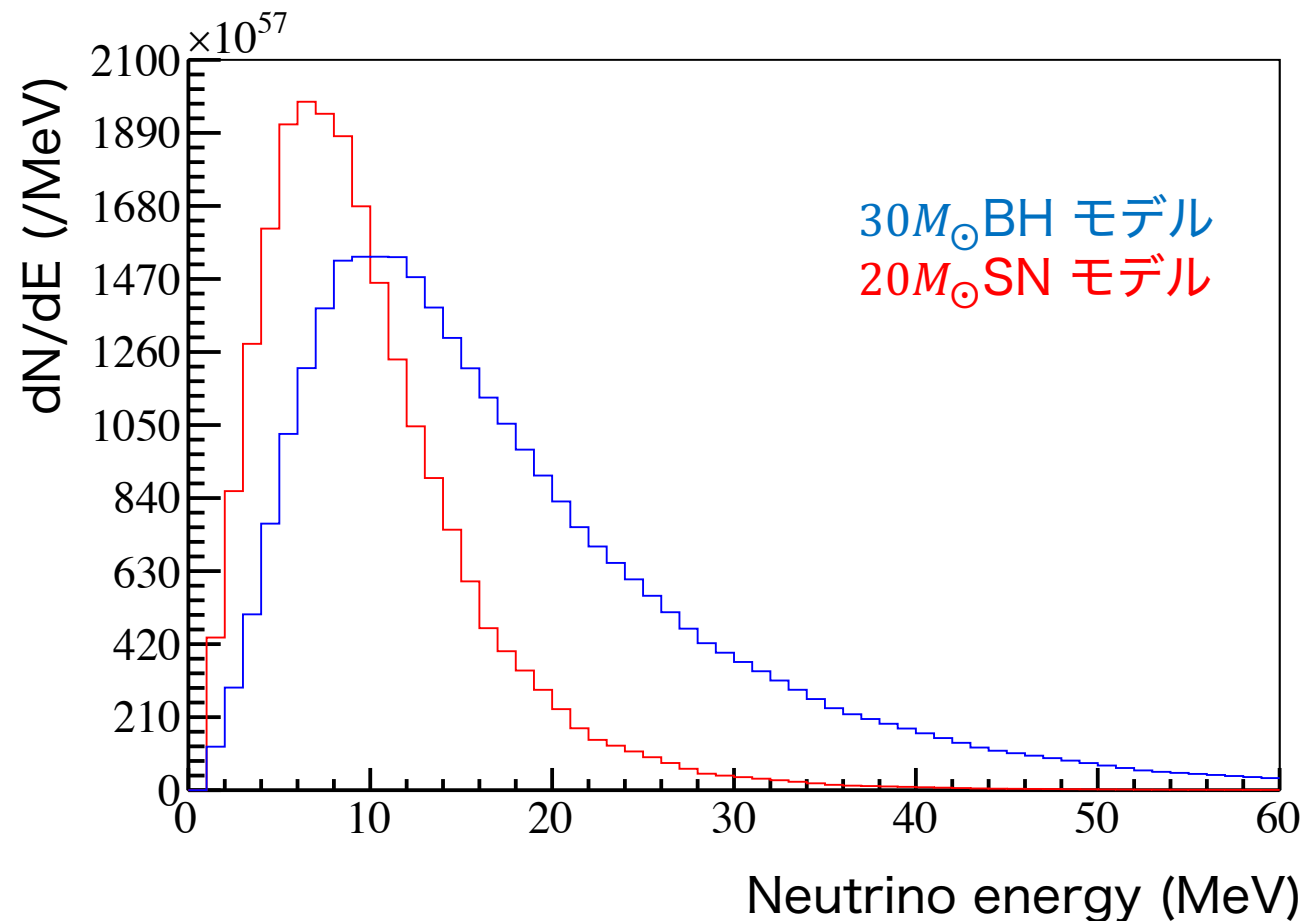
※SKと超新星の距離 = 10 kpc

※w/o oscillation

	total event
wilson model	9300
Nakazato model	4067

※図は差し替え予定

ブラックホール形成モデルの比較



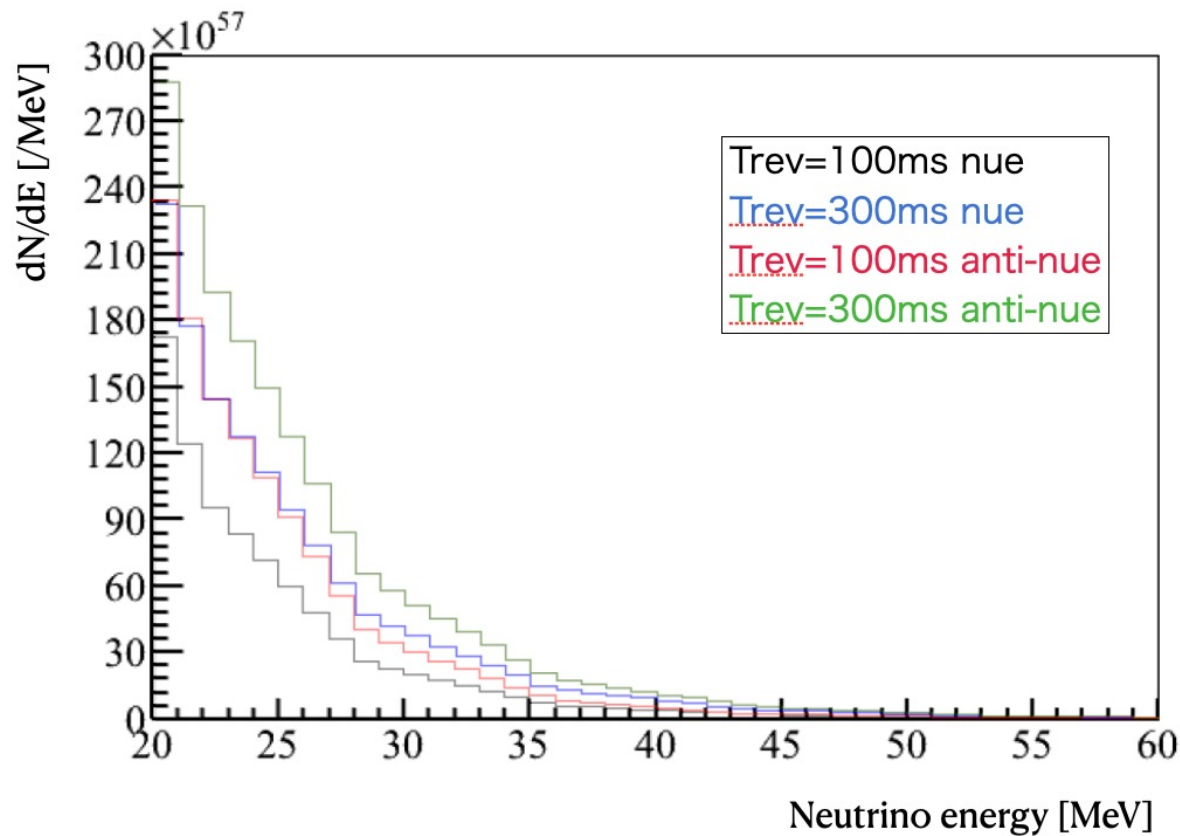
BHモデルとSNモデルのニュートリノスペクトル

$T_{\text{rev}}=300$ ms

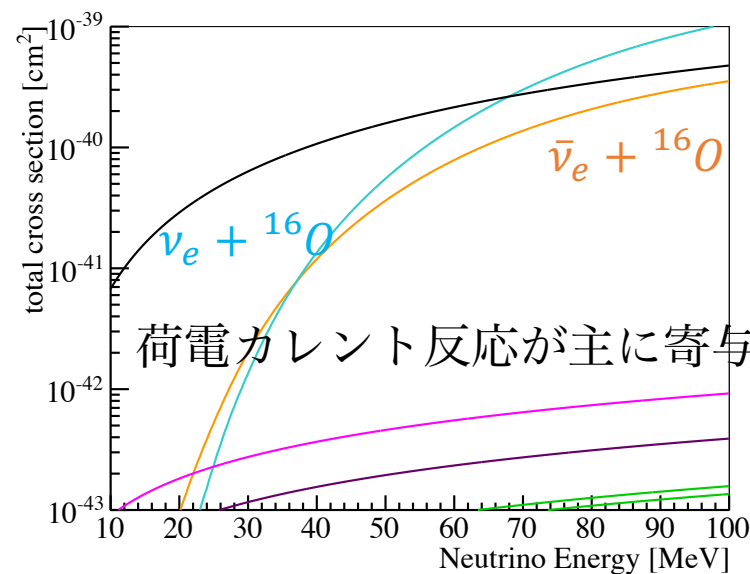
反応	30 M_{\odot} BH model	20 M_{\odot} SN model
$\bar{\nu}_e + p$	18332	2993
$\nu_e + {}^{16}\text{O}$	2217	27.28
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O}$	1282	24.14

荷電カレント反応はイベント期待値が2桁増加

- 衝撃波復活時間の違いによるニュートリノスペクトルの比較($20M_{\odot}$)

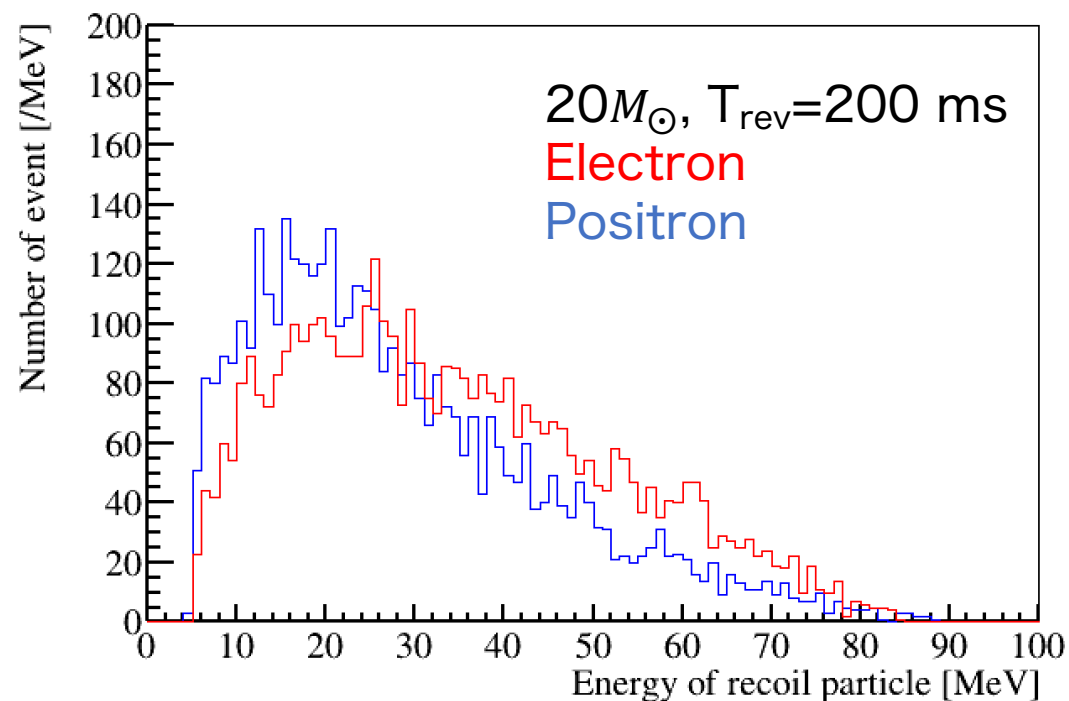
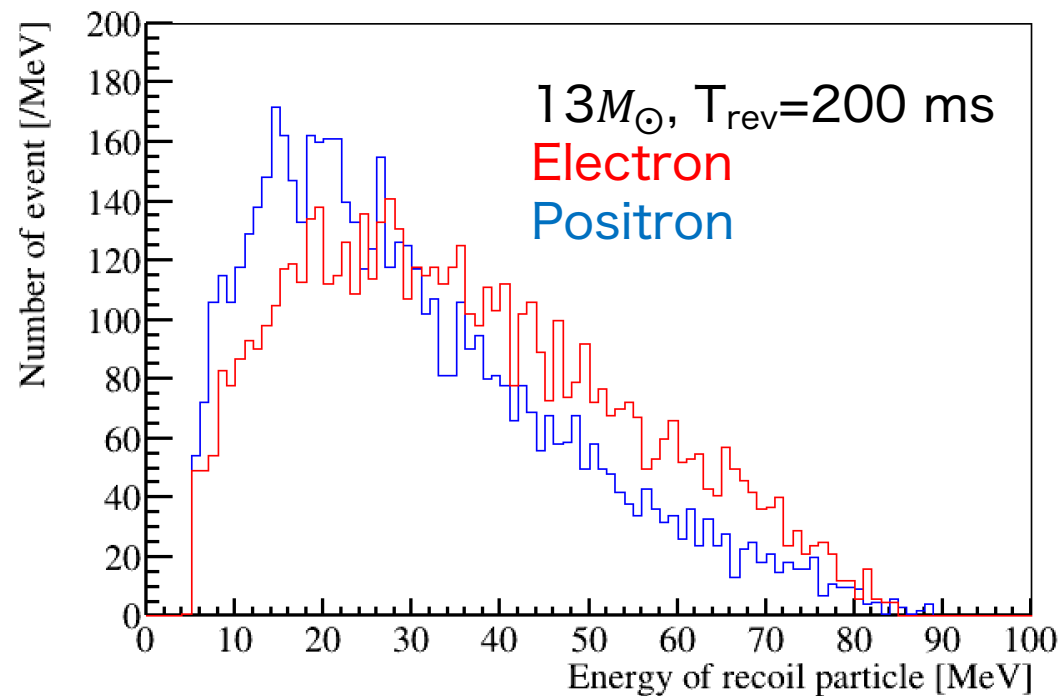


$20M_{\odot}$ モデルのニュートリノスペクトル



荷電カレント反応が主に寄与するのは20 MeV以上

➡ 20 MeV以上のニュートリノスペクトルがイベント数に大きく影響



- 電子、陽電子のエネルギー分布の違い
- 質量による大きな違いはない

超新星との距離：1 kpc

- 荷電カレント反応を起こすニュートリノエネルギーのほとんどは20 MeV以上
 →20 MeV以下でも反応を起こす他の反応に比べ、ニュートリノスペクトルの影響を受けやすい



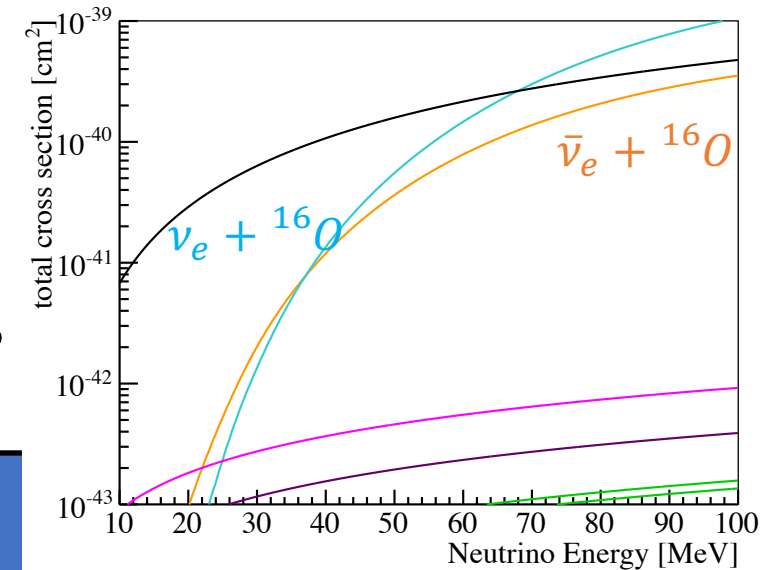
荷電カレント反応に注目することで、モデル弁別が容易になる

SK-Gd実験

超純水に硫酸ガドリニウムを導入→遅延同時計測が可能

逆ベータ崩壊反応、荷電カレント反応において、中性子を捕獲することができれば、電子散乱反応と区別することができる

13M _⊙ モデル (w/o oscillation)	イベント期待値 (中性子放出なし)	イベント期待値 (中性子を1放出)	イベント期待値 (中性子を2放出)
$\nu_e + {}^{16}\text{O}$ (合計34event)	32	0	2
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O}$ (合計27event)	13	13	1



各反応の断面積

荷電カレント反応のうち、中性子を放出するイベント数(距離：10 kpc)

中性子放出イベント

荷電カレント反応のうち、中性子を放出するイベント数の割合(親星質量=13 M_{\odot})

$\nu_e + {}^{16}O$	放出しない	1つ放出	2つ放出
中性子放出する イベント数の割合 (%)	92±2.2	3.3±0.30	5.1±0.38
SKで期待される イベント数の割合 (%)	93±2.3	3.4±0.30	2.9±0.22

$\bar{\nu}_e + {}^{16}O$	放出しない	1つ放出	2つ放出
中性子放出する イベント数の割合 (%)	44±1.3	53±1.5	3.7±0.32
SKで期待される イベント数の割合 (%)	57±1.7	40±1.2	2.1±0.18

中性子捕獲効率75%

中性子捕獲効率75%

- 電子ニュートリノと酸素原子核との荷電カレント反応では、ガンマ線のみを放出する分岐は存在しない
→励起された ^{16}F はすぐに陽子を放出して ^{15}O になる
- 反電子ニュートリノと酸素原子核との荷電カレント反応では、ガンマ線のみを放出する分岐も存在する
→励起された $^{16}\text{N}^*$ がガンマ線を放出して ^{16}N になる