

スーパーカミオカンデで観測され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

岡山大学 中西史美

背景

水チェレンコフ検出器での超新星ニュートリノの観測

- 反応の種類
 - $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ (88%/89%) (逆ベータ崩壊反応) (1)
 - $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ (1.5%/1.5%) (電子散乱反応) (2)
 - $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$ (<1%/<1%) (電子散乱反応) (3)
 - $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ (1%/1%) (電子散乱反応) (4)
 - $\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^- + {}^{16}\text{F}$ (2.5%/<1%) (${}^{16}\text{O}$ との荷電カレント反応) (5)
 - $\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^+ + {}^{16}\text{N}$ (1.5%/1%) (${}^{16}\text{O}$ との荷電カレント反応) (6)
 - $\nu_x + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu_x + O^*/N^* + \gamma$ (5%/6%) (${}^{16}\text{O}$ との中性カレント反応) (7)

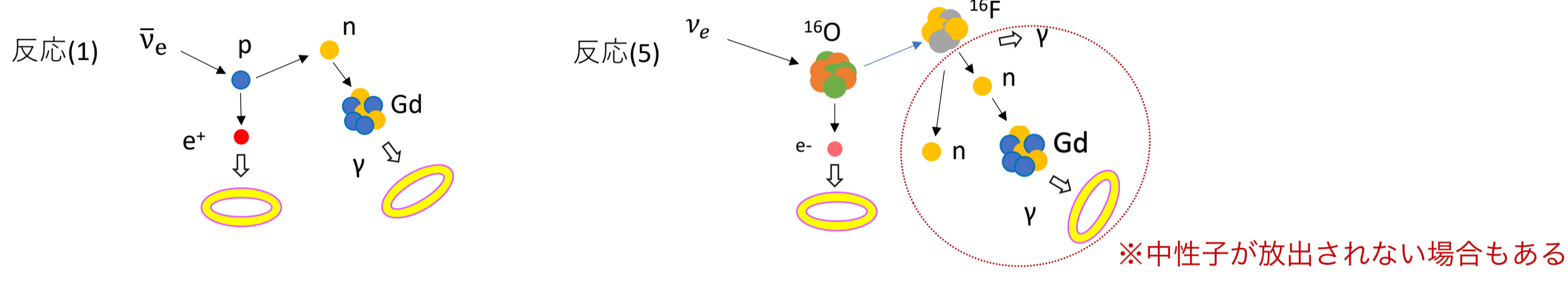
(Ikeda et al, The Astrophysical Journal, 669:519Y524, 2007)

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

()の数字は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)

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



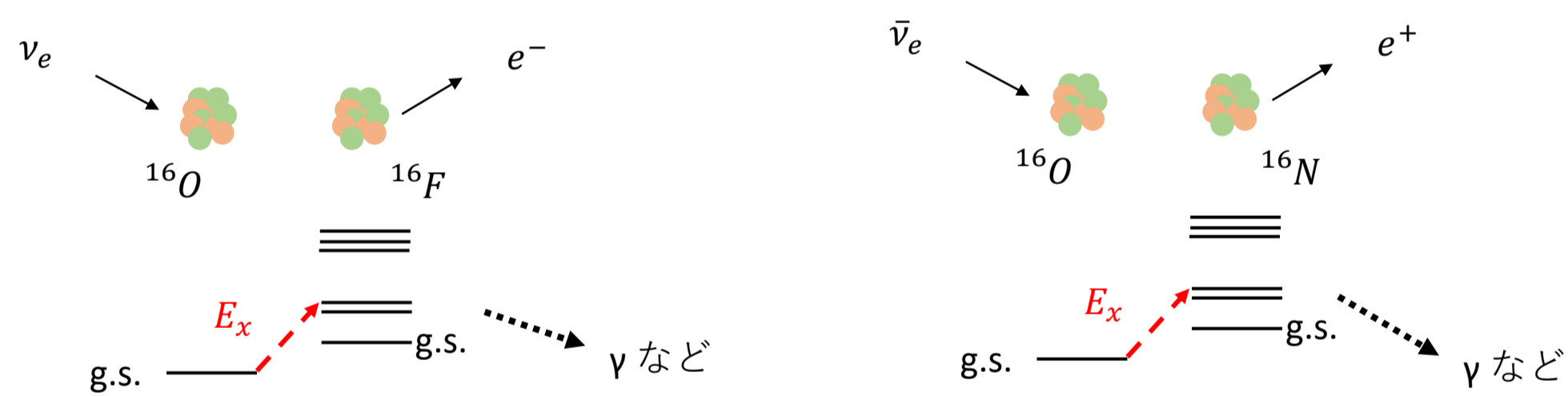
→ 反応(1), (5)~(7)は中性子を捕獲することによって方向依存性を持つ反応(2)~(4)と区別することができる

研究目的

- 反応(5), (6)は方向決定時のbackgroundとなる
 - 反応(5), (6)を観測することでモデルの弁別が可能になる
- イベント数の正確な見積りが重要となる

酸素原子核との荷電カレント反応

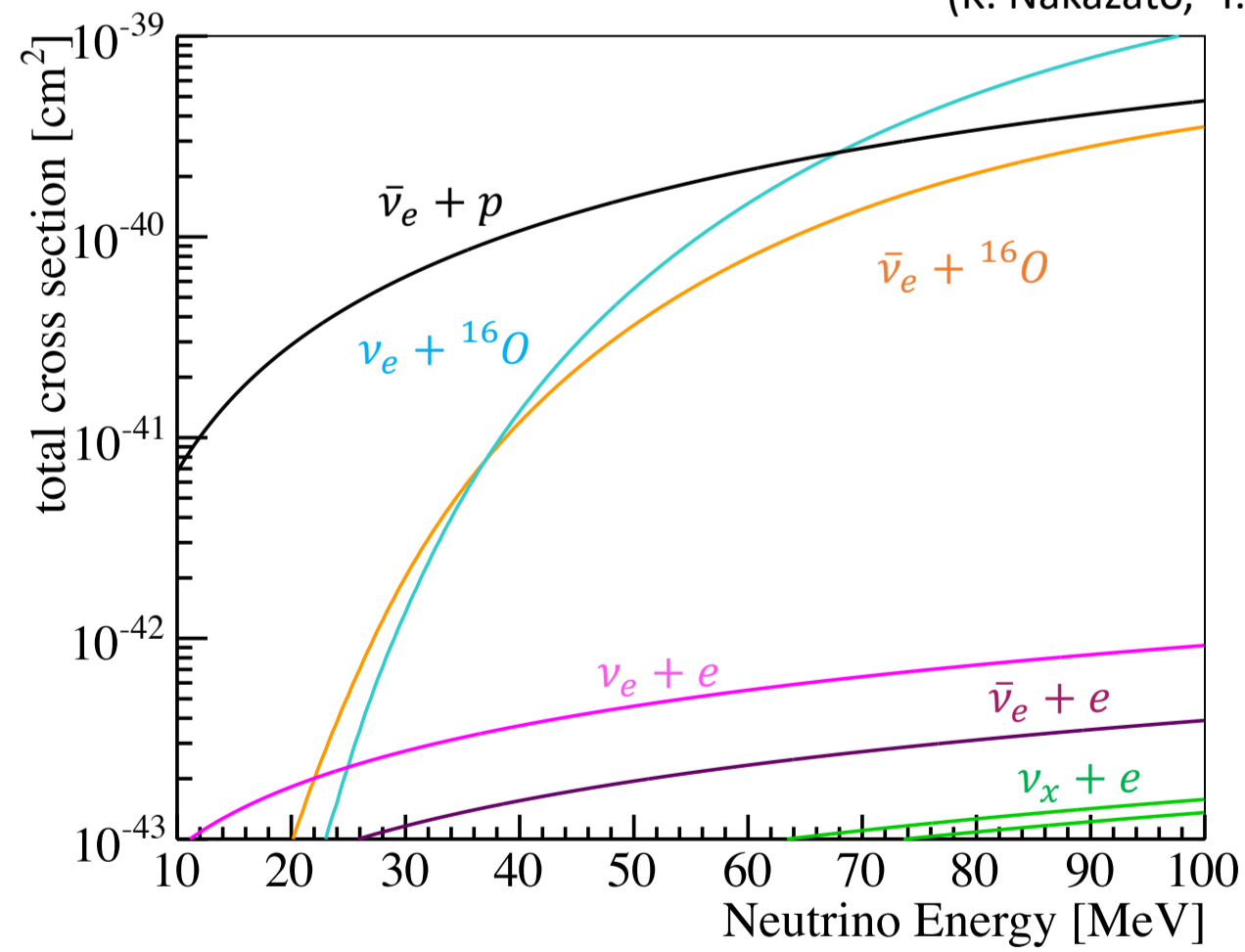
- 電子ニュートリノ/反電子ニュートリノと酸素原子核との反応
- ${}^{16}\text{O}$ が電子/陽電子を放出して ${}^{16}\text{F}$ や ${}^{16}\text{N}$ に変化する
- 生成された ${}^{16}\text{F}$, ${}^{16}\text{N}$ がガンマ線や中性子を放出して基底状態に落ちる



- 1つの反応に対し、43の励起状態を考慮する
- どの励起状態になるかにより、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
- 各反応の断面積

${}^{16}\text{F}$ の励起状態

spin	energy (MeV)	energy (MeV)	energy (MeV)	Γ (eV)	Γ (eV)
1	0	0.00	1	0.00	2.70
2	0	0.00	1	0.00	4.02
			2	0.00	5.78
			3	0.00	7.03
			4	0.00	8.28
			5	0.00	9.53
			6	0.00	10.78
			7	0.00	12.03
			8	0.00	13.28
			9	0.00	14.53
			10	0.00	15.78
			11	0.00	17.03
			12	0.00	18.28
			13	0.00	19.53
			14	0.00	20.78
			15	0.00	22.03
			16	0.00	23.28
			17	0.00	24.53
			18	0.00	25.78
			19	0.00	27.03
			20	0.00	28.28
			21	0.00	29.53
			22	0.00	30.78
			23	0.00	32.03
			24	0.00	33.28
			25	0.00	34.53
			26	0.00	35.78
			27	0.00	37.03
			28	0.00	38.28
			29	0.00	39.53
			30	0.00	40.78
			31	0.00	42.03
			32	0.00	43.28
			33	0.00	44.53
			34	0.00	45.78
			35	0.00	47.03
			36	0.00	48.28
			37	0.00	49.53
			38	0.00	50.78
			39	0.00	52.03
			40	0.00	53.28
			41	0.00	54.53
			42	0.00	55.78
			43	0.00	57.03



(K. Nakazato, T. Suzuki, M. Sakuda, Prog. Theor. Exp. Phys. 2018)

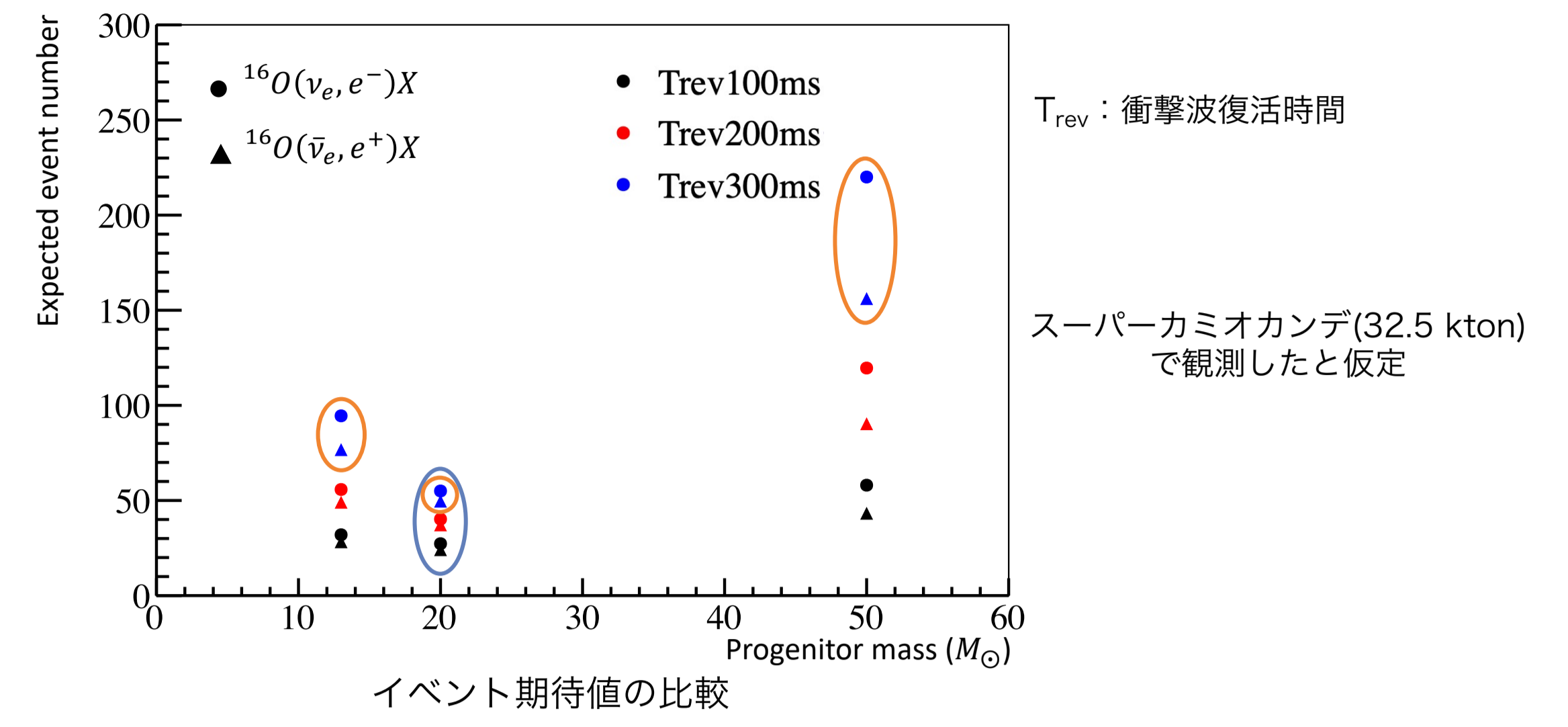
比較に使用したモデル

Nakazato models

- コア反跳から計算されたモデル(20s 程度)
 - 使用した状態方程式
 - Shen EOS
 - 親星の質量
 - $13M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, $50M_{\odot}$
 - $30M_{\odot}$ (コアが反跳せず、ブラックホールになるモデル)
 - 衝撃波復活時間
 - 100ms, 200ms, 300ms

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

結果：イベント期待値のモデル間での比較



$20M_{\odot}$ 各反応のイベント期待値(衝撃波復活時間の違い)

反応	100 ms	300 ms
$\nu_e + {}^{16}\text{O}$	27.27	54.99
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O}$	24.14	49.63

→約2倍の変化

$T_{\text{rev}}=300\text{ms}$ 各反応のイベント期待値(親星質量の違い)

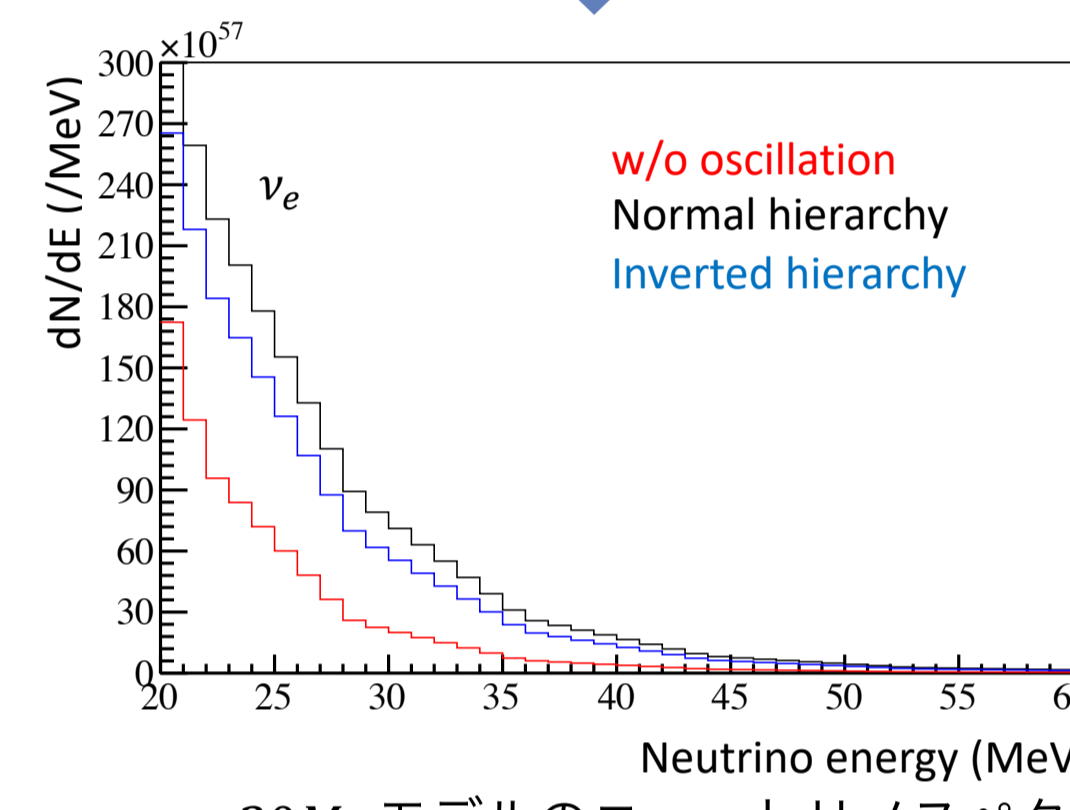
反応	$13(1.64)M_{\odot}$	$20(1.57)M_{\odot}$	$50(1.87)M_{\odot}$
$\bar{\nu}_e + p$	4446	3821	6295
$\nu_e + {}^{16}\text{O}$	94.49	54.99	220.0
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O}$	76.75	49.64	156.1

()の数字は形成される中性子星の質量

→形成される中性子星の質量が大きいほどイベント期待値も大きくなる

ニュートリノ振動によるイベント数の比較

ニュートリノ振動により、 $\nu_e, \bar{\nu}_e$ より高エネルギーの ν_x が $\nu_e, \bar{\nu}_e$ に変化する



$20M_{\odot}$ モデルのニュートリノスペクトル

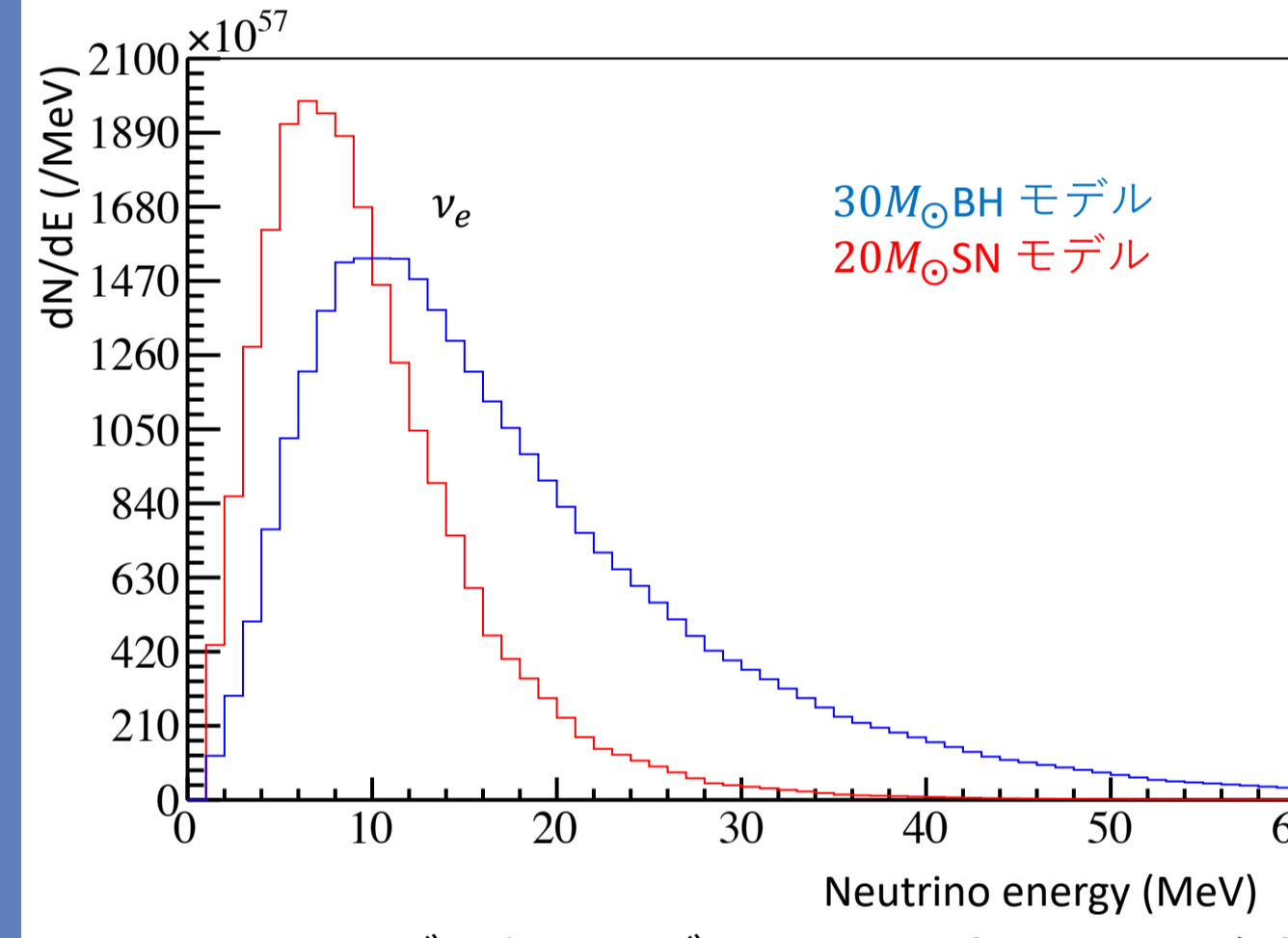
各反応のイベント期待値(ニュートリノ振動の違い)

反応	w/o oscillation	normal hierarchy	Inverted hierarchy
$\bar{\nu}_e + p$	2993	3367	4217
$\nu_e + {}^{16}\text{O}$	27.28	131.6	99.72
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O}$	24.14	42.70	84.82

4.8倍

3.5倍

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

反応	$30M_{\odot}$ BH model	$20M_{\odot}$ 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数が2桁増加

イベント期待値とニュートリノスペクトルの関係

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、event spectrum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

→特に平均エネルギーが高いモデルでは、荷電カレント反応の観測が重要となる

まとめ

- スーパーカミオカンデで観測される超新星ニュートリノと酸素原子核との荷電カレント反応に注目
- 複数のモデルを用いて、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主に影響
 - 衝撃波復活時間の違いやニュートリノ振動により、イベント数が変化

[今後に向けて]

- 現実的なスーパーカミオカンデ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の評価を行う
- ニュートリノと酸素原子核との中性カレント反応についてもシミュレーションを行う