

# 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)

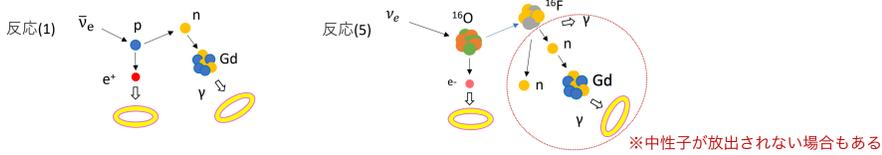
(Ikeda et al, The Astrophysical Journal, 669:519Y524, 2007)

| 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



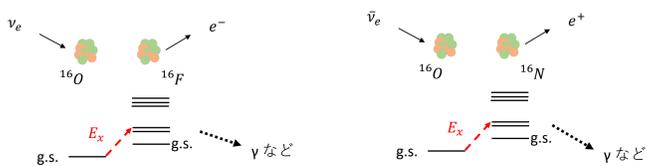
→ 反応(1), (5)~(7)は中性子を捕獲することによって方向依存性を持つ反応(2)~(4)と区別することができる

### 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

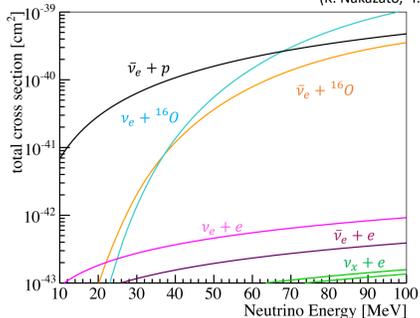


- 1つの反応に対し、43の励起状態を考慮する
- どの励起状態になるかにより、放出されるガンマ線や中性子のエネルギーなどが決まる
- 各反応の断面積

16Fの励起状態

| spin | energy (MeV) | energy (MeV) | energy (MeV) | $J_{\pi}$ | $J_{\pi}$ |
|------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 1    | 0            | 0.00         | 1            | 0.00      | 1         |
| 2    | 0            | 0.00         | 1            | 0.00      | 1         |
| 3    | 1            | 10.61        | 2            | 12.35     | 1         |
| 4    | 0            | 12.67        | 1            | 13.24     | 1         |
|      |              | 13.06        |              | 14.02     |           |
|      |              | 13.31        |              | 14.26     |           |
|      |              | 13.34        |              | 14.28     |           |
|      |              | 13.35        |              | 14.29     |           |
|      |              | 13.36        |              | 14.30     |           |
|      |              | 13.37        |              | 14.31     |           |
|      |              | 13.38        |              | 14.32     |           |
|      |              | 13.39        |              | 14.33     |           |
|      |              | 13.40        |              | 14.34     |           |
|      |              | 13.41        |              | 14.35     |           |
|      |              | 13.42        |              | 14.36     |           |
|      |              | 13.43        |              | 14.37     |           |
|      |              | 13.44        |              | 14.38     |           |
|      |              | 13.45        |              | 14.39     |           |
|      |              | 13.46        |              | 14.40     |           |
|      |              | 13.47        |              | 14.41     |           |
|      |              | 13.48        |              | 14.42     |           |
|      |              | 13.49        |              | 14.43     |           |
|      |              | 13.50        |              | 14.44     |           |
|      |              | 13.51        |              | 14.45     |           |
|      |              | 13.52        |              | 14.46     |           |
|      |              | 13.53        |              | 14.47     |           |
|      |              | 13.54        |              | 14.48     |           |
|      |              | 13.55        |              | 14.49     |           |
|      |              | 13.56        |              | 14.50     |           |
|      |              | 13.57        |              | 14.51     |           |
|      |              | 13.58        |              | 14.52     |           |
|      |              | 13.59        |              | 14.53     |           |
|      |              | 13.60        |              | 14.54     |           |
|      |              | 13.61        |              | 14.55     |           |
|      |              | 13.62        |              | 14.56     |           |
|      |              | 13.63        |              | 14.57     |           |
|      |              | 13.64        |              | 14.58     |           |
|      |              | 13.65        |              | 14.59     |           |
|      |              | 13.66        |              | 14.60     |           |
|      |              | 13.67        |              | 14.61     |           |
|      |              | 13.68        |              | 14.62     |           |
|      |              | 13.69        |              | 14.63     |           |
|      |              | 13.70        |              | 14.64     |           |
|      |              | 13.71        |              | 14.65     |           |
|      |              | 13.72        |              | 14.66     |           |
|      |              | 13.73        |              | 14.67     |           |
|      |              | 13.74        |              | 14.68     |           |
|      |              | 13.75        |              | 14.69     |           |
|      |              | 13.76        |              | 14.70     |           |
|      |              | 13.77        |              | 14.71     |           |
|      |              | 13.78        |              | 14.72     |           |
|      |              | 13.79        |              | 14.73     |           |
|      |              | 13.80        |              | 14.74     |           |
|      |              | 13.81        |              | 14.75     |           |
|      |              | 13.82        |              | 14.76     |           |
|      |              | 13.83        |              | 14.77     |           |
|      |              | 13.84        |              | 14.78     |           |
|      |              | 13.85        |              | 14.79     |           |
|      |              | 13.86        |              | 14.80     |           |
|      |              | 13.87        |              | 14.81     |           |
|      |              | 13.88        |              | 14.82     |           |
|      |              | 13.89        |              | 14.83     |           |
|      |              | 13.90        |              | 14.84     |           |
|      |              | 13.91        |              | 14.85     |           |
|      |              | 13.92        |              | 14.86     |           |
|      |              | 13.93        |              | 14.87     |           |
|      |              | 13.94        |              | 14.88     |           |
|      |              | 13.95        |              | 14.89     |           |
|      |              | 13.96        |              | 14.90     |           |
|      |              | 13.97        |              | 14.91     |           |
|      |              | 13.98        |              | 14.92     |           |
|      |              | 13.99        |              | 14.93     |           |
|      |              | 14.00        |              | 14.94     |           |
|      |              | 14.01        |              | 14.95     |           |
|      |              | 14.02        |              | 14.96     |           |
|      |              | 14.03        |              | 14.97     |           |
|      |              | 14.04        |              | 14.98     |           |
|      |              | 14.05        |              | 14.99     |           |
|      |              | 14.06        |              | 15.00     |           |
|      |              | 14.07        |              | 15.01     |           |
|      |              | 14.08        |              | 15.02     |           |
|      |              | 14.09        |              | 15.03     |           |
|      |              | 14.10        |              | 15.04     |           |
|      |              | 14.11        |              | 15.05     |           |
|      |              | 14.12        |              | 15.06     |           |
|      |              | 14.13        |              | 15.07     |           |
|      |              | 14.14        |              | 15.08     |           |
|      |              | 14.15        |              | 15.09     |           |
|      |              | 14.16        |              | 15.10     |           |
|      |              | 14.17        |              | 15.11     |           |
|      |              | 14.18        |              | 15.12     |           |
|      |              | 14.19        |              | 15.13     |           |
|      |              | 14.20        |              | 15.14     |           |
|      |              | 14.21        |              | 15.15     |           |
|      |              | 14.22        |              | 15.16     |           |
|      |              | 14.23        |              | 15.17     |           |
|      |              | 14.24        |              | 15.18     |           |
|      |              | 14.25        |              | 15.19     |           |
|      |              | 14.26        |              | 15.20     |           |
|      |              | 14.27        |              | 15.21     |           |
|      |              | 14.28        |              | 15.22     |           |
|      |              | 14.29        |              | 15.23     |           |
|      |              | 14.30        |              | 15.24     |           |
|      |              | 14.31        |              | 15.25     |           |
|      |              | 14.32        |              | 15.26     |           |
|      |              | 14.33        |              | 15.27     |           |
|      |              | 14.34        |              | 15.28     |           |
|      |              | 14.35        |              | 15.29     |           |
|      |              | 14.36        |              | 15.30     |           |
|      |              | 14.37        |              | 15.31     |           |
|      |              | 14.38        |              | 15.32     |           |
|      |              | 14.39        |              | 15.33     |           |
|      |              | 14.40        |              | 15.34     |           |
|      |              | 14.41        |              | 15.35     |           |
|      |              | 14.42        |              | 15.36     |           |
|      |              | 14.43        |              | 15.37     |           |
|      |              | 14.44        |              | 15.38     |           |
|      |              | 14.45        |              | 15.39     |           |
|      |              | 14.46        |              | 15.40     |           |
|      |              | 14.47        |              | 15.41     |           |
|      |              | 14.48        |              | 15.42     |           |
|      |              | 14.49        |              | 15.43     |           |
|      |              | 14.50        |              | 15.44     |           |
|      |              | 14.51        |              | 15.45     |           |
|      |              | 14.52        |              | 15.46     |           |
|      |              | 14.53        |              | 15.47     |           |
|      |              | 14.54        |              | 15.48     |           |
|      |              | 14.55        |              | 15.49     |           |
|      |              | 14.56        |              | 15.50     |           |
|      |              | 14.57        |              | 15.51     |           |
|      |              | 14.58        |              | 15.52     |           |
|      |              | 14.59        |              | 15.53     |           |
|      |              | 14.60        |              | 15.54     |           |
|      |              | 14.61        |              | 15.55     |           |
|      |              | 14.62        |              | 15.56     |           |
|      |              | 14.63        |              | 15.57     |           |
|      |              | 14.64        |              | 15.58     |           |
|      |              | 14.65        |              | 15.59     |           |
|      |              | 14.66        |              | 15.60     |           |
|      |              | 14.67        |              | 15.61     |           |
|      |              | 14.68        |              | 15.62     |           |
|      |              | 14.69        |              | 15.63     |           |
|      |              | 14.70        |              | 15.64     |           |
|      |              | 14.71        |              | 15.65     |           |
|      |              | 14.72        |              | 15.66     |           |
|      |              | 14.73        |              | 15.67     |           |
|      |              | 14.74        |              | 15.68     |           |
|      |              | 14.75        |              | 15.69     |           |
|      |              | 14.76        |              | 15.70     |           |
|      |              | 14.77        |              | 15.71     |           |
|      |              | 14.78        |              | 15.72     |           |
|      |              | 14.79        |              | 15.73     |           |
|      |              | 14.80        |              | 15.74     |           |
|      |              | 14.81        |              | 15.75     |           |
|      |              | 14.82        |              | 15.76     |           |
|      |              | 14.83        |              | 15.77     |           |
|      |              | 14.84        |              | 15.78     |           |
|      |              | 14.85        |              | 15.79     |           |
|      |              | 14.86        |              | 15.80     |           |
|      |              | 14.87        |              | 15.81     |           |
|      |              | 14.88        |              | 15.82     |           |
|      |              | 14.89        |              | 15.83     |           |
|      |              | 14.90        |              | 15.84     |           |
|      |              | 14.91        |              | 15.85     |           |
|      |              | 14.92        |              | 15.86     |           |
|      |              | 14.93        |              | 15.87     |           |
|      |              | 14.94        |              | 15.88     |           |
|      |              | 14.95        |              | 15.89     |           |
|      |              | 14.96        |              | 15.90     |           |
|      |              | 14.97        |              | 15.91     |           |
|      |              | 14.98        |              | 15.92     |           |
|      |              | 14.99        |              | 15.93     |           |
|      |              | 15.00        |              | 15.94     |           |

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



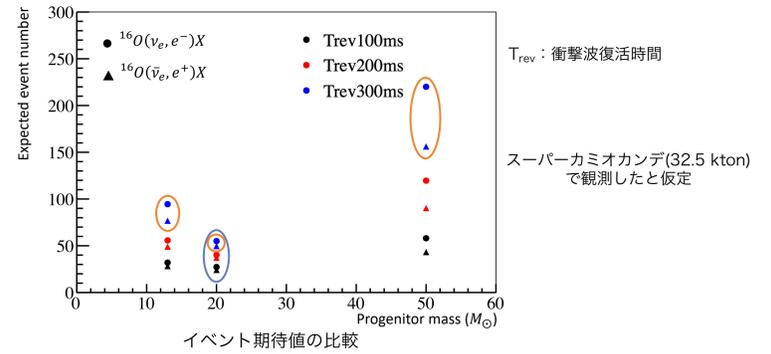
## 比較に使用したモデル

### 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\_sun 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\_rev=300 ms 各反応のイベント期待値(親星質量の違い)

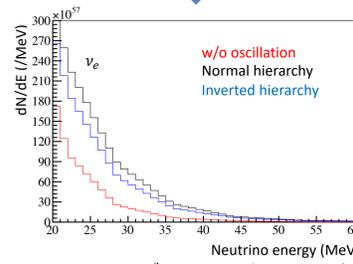
| 反応                              | 13(1.64)M_sun | 20(1.57)M_sun | 50(1.87)M_sun |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $\bar{\nu}_e + p$               | 4446          | 3821          | 6295          |
| $\nu_e + {}^{16}\text{O}$       | 94.49         | 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 $\nu_x$ が $\nu_e, \bar{\nu}_e$ に変化する



20M\_sun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