## スーパーカミオカンデにおけるMeV領域 宇宙ニュートリノの探索

#### 日本物理学会 2003年秋季大会 宇宙線シンポジウム 主題:ニュートリノ天文学

#### 9月11日 宮城教育大学 福田 善之

#### スーパーカミオカンデにおけるMeV領域 宇宙ニュートリノの探索

MeV領域のニュートリノ



#### □ 大マゼラン星雲での超新星爆発(SN1987A)





#### カミオカンデが観測したニュートリノ事象



2003年9月11日



#### **KAMIOKANDE 2-P**

| NUM   |        | 9            |  |  |
|-------|--------|--------------|--|--|
| RUN   | 1892   |              |  |  |
| EVENT | 139372 |              |  |  |
| TIME  | 2/23/  | 87<br>37 JST |  |  |
| TOTAL | ENERGY | 19.8 MeV     |  |  |
| TOTAL | P.E.   | 51(0)        |  |  |
| MAX   | P.E.   | 4(0)         |  |  |
| THRES | P.E.   | 0.2 (1.0)    |  |  |
|       |        |              |  |  |



NUM 9 RUN 1892 EVENT 139372 TIME 2/23/87 16:35:37 JST

 TOTAL ENERGY
 19.8 MeV

 TOTAL P.E.
 51(0)

 MAX
 P.E.
 4(0)

 THRES P.E.
 0.2(1.0)



カミオカンデ検出器 高さ16m、直径15.6mの水タンク。 純水2140トン

2003年9月11日

#### □ ニュートリノバーストの時間変化



#### ニュートリノバーストの時間変化(LLLグループ)



#### □ スーパーカミオカンデ実験(SK-I)



- Photo coverage 40% Fid. Vol. for solar v 22.5kton
- Sensitive to all types of neutrino
- Real-time energy, vertex and direction measurement
- $\blacktriangleright$  Resolution (10MeV e<sup>-</sup>) Pos : 87cm E : 14% Dir : 26 degree
- Dead-time 0% even if less 30,000 events (distance > 1.1kpc)
- **GPS** timing  $< 1\mu$ s

#### スーパーカミオカンデ(SK-II)再スタート



10-12月に超純水を給水し、 2002年12月10日より満水後 の本格観測に入った。



#### 2002年10月始め取り付け完了

#### 満水後の宇宙線 µ 粒子サンプル

2003年9月11日









2003年9月11日



#### □ SKで期待される時間分布と角度分布



2003年9月11日

#### □ スーパーカミオカンデ(SK-)における探索



2003年9月11日



2003年9月11日

□ Time-cluster search

- ▶ 時間的に集中している事象 を探す
  - 5秒間に3事象 又は
     2秒間に4事象 又は
     10秒間に8事象
- ほとんどは宇宙線µの酸素 原子核破砕によるバックグ ラウンド、もしくは光電子増 倍管の光球

   1日あたり平均15回
- それらは空間的にも集中している場合が多い





2003年9月11日



2003年9月11日

#### □ 超新星爆発の検出効率



超新星爆発の検出効率は モデル計算にはそれほど 依存しない。但し、質量に より事象数が変化するため 効率は変動する。

100kpc**以内はほぼ**100% の検出効率

# SK-Iにおける探索結果 1996年5月31日~2001年7月15日 観測時間1704日において、超新星爆発からの ニュートリノバーストは観測されなかった

#### 100kpc以内に銀河系に対する超新星爆発の 発生頻度の 上限値は0.49SNe/年

我々の銀河内(8.5kpc)の超新星爆発の発生頻度は カミオカンデ (Dec.85~Apr.90)の3.18年と (Dec.90~Aug.92)の1.08年の計4.26年の 観測結果を加算すると上限値は0.26SNe/年

 リアルタイムによる超新星ニュートリノ探索
 オンラインにより自動的にデータを解析し、 (スパレーション除去は完全には行えない) 超新星ニュートリノを常時モニターしている

#### <u>現在(SK)の状況</u>

●解析時間 < 10 min</li>
●SK-Iと同様の解析プログラム
●エネルギー閾値が異なっている
6.5 MeV in SK-I → 8.5 MeV in SK-II

#### □ エネルギー閾値による検出効率の変化





#### SNRvに対するバックグラウンド



2003年9月11日

#### □ 解析手法

- ▶ 超新星ニュートリノ解析用データに対し、18MeV以上のデータを用いる(SNRv有感領域)
- ▶ この領域に残っているバックグラウンドを除去
  - 宇宙線µによるスパレーションの残り
  - 太陽ニュートリノのしみ込み
  - 大気ニュートリノv<sub>u</sub>により生成されたµ
  - ★ 大気ニュートリノv<sub>e</sub>による電子
  - ★ 大気ニュートリノv<sub>µ</sub>により生成された(チェレンコフ光を出さ ない)低運動量µの崩壊による電子
- 除去できるノイズをカットし、残った事象のエネルギー 分布をシミュレーションと比較し、SNRvを求める





140MeVのµを除去

の大気vuにより生成

Sub-eventカット

 $\succ$ 



# 過去の超新星爆発由来ニュートリノの探索

# □ チェレンコフリングの角度によるカット ▶ 更に残っているµをチェレンコフリングの角度で判別



■事象の方向とチェレンコフ光間の角度による除去



#### □ 太陽方向カット

- 解析のエネルギー閾 値18 MeV はHep
   vのカットオフより低 いため、しみこむ可 能性がある。
- エネルギー分解能に より<sup>8</sup>B vもしみこむ 可能性もある
- 従って太陽方向より 30度以内で 34 MeV以下の事象に 対しカット





2003年9月11日



#### □ SNRvに対するバックグラウンド事象率

μ崩壊電子(Michel electron)

Best fit : 174±16 events
 MCからの期待数 : 145±43 events

#### ▶ 大気ニュートリノ(v<sub>e</sub>)

- Best fit : 88 ± 12 events
- MCからの期待数 : 75 ± 23 events

期待されるバックグラウンドはデータを見事に再現 Best fitは6モデルすべてでαが0になる

#### SNRvのフラックス計算

#### 90%C.L.の全エネルギー領域におけるフラックス:

$$F = \frac{\alpha_{90}}{Np \times \tau \times \int f(E_{\nu}) \sigma(E_{\nu}) \epsilon(E_{\nu}) dE_{\nu}}$$

#### ここで

- N<sub>p</sub>:SK中の自由陽子の数 1.5×10<sup>33</sup>
- $\tau$  : SK-I $\sigma$ livetime 1496 days = 1.29 × 10<sup>8</sup> $\psi$
- f(Ev) :SRNのスペクトラム
- σ(Ev):反応断面積 9.52×10-<sup>44</sup>E<sub>e</sub>p<sub>e</sub> cm<sup>2</sup>
- Ev:19.3-83.3MeVまで積分

#### □ SNRv探索結果

|     | Theoretical<br>Model         | SK SRN<br>Rate Limit         | SK SRN<br>Flux Limit                | Predicted<br>SRN Flux                        |
|-----|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|
|     | Population<br>Synthesis      | < 3.2<br>Evts / 22.5 kton yr | < 130<br>$\overline{ve} / cm^2 sec$ | $\frac{44}{\overline{ve}} / cm^2 sec$        |
|     | Cosmic<br>Gas Infall         | < 2.8<br>Evts / 22.5 kton yr | < 32<br>$\overline{ve} / cm^2 sec$  | $\frac{5.4}{\overline{ve} / cm^2 sec}$       |
|     | Cosmic Chemical<br>Evolution | < 3.3<br>Evts / 22.5 kton yr | < 25<br>Ve / cm <sup>2</sup> sec    | $\frac{8.3}{v_e} / cm^2 sec$                 |
| out | Heavy Metal<br>Abundance     | < 3.0<br>Evts / 22.5 kton yr | < 29<br>Ve / cm <sup>2</sup> sec    | < 54<br>Ve / cm <sup>2</sup> sec             |
|     | Constant<br>SN Rate          | < 3.4<br>Evts / 22.5 kton yr | < 20<br>Ve / cm <sup>2</sup> sec    | $\frac{52}{\overline{v_e} \ / \ cm^2 \ sec}$ |
|     | LMA Neutrino<br>Oscillation  | < 3.5<br>Evts / 22.5 kton yr | < 31<br>ve / cm <sup>2</sup> sec    | $\frac{11}{v_e / cm^2 sec}$                  |

Rule

#### □ 理論予言値との比較



#### 過去の超新星爆発由来ニュートリノの探索 19.3MeV以上での上限値 SK SRN Flux Limits vs. Theoretical Predictions (E > 19.3 MeV)SRN / sa-cm / sec 3.5 3 2.5 2 1.5 1 1/3~1/4! 0.5 0 Cosmic Population Cosmic Heavy LMA MSW Constant Chemical Synthesis Gas Infall Metal SN Rate Oscillation (Totani et al., 1996) (Andoet al., 2002) (Totani et al., 1996) (Malaney, 1997) Evolution Abundance (Hartmann et al., 1997) (Kaplinghat et al., 2000) ■ Predicted SRN Flux ■ SK SRN Limit (E > 19.3 MeV)(90% C.L.)

2003年9月11日

#### SNRv探索の結果

- SK-Iの1496日分のデータについて、過去の超新星 爆発由来の反電子ニュートリノの探索を行った
- 18MeV以上の事象について、残留µ事象やスパレー ション等の除去を行い、エネルギー分布の形状を用い 探索した
- この領域の理論の予言値は0.2-3.1v<sub>c</sub>cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>
- 最適値は0と一致し、90%C.L.の上限値として 1.2v<sub>e</sub>cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>を得た
- Const.SN rateモデルを否定。他のモデルもリミット を1/3~1/4下げると到達可能(再解析も検討)
- 将来計画 ve + p→ e<sup>+</sup> + n → 積極的に検出する

#### □ 中性子の検出

- > n+p  $D+\gamma(2.2 MeV)$
- 検出効率が非常に小さい (数%以下)
- 新しいトリガーロジックの
   導入等が必要
- ➤ Gdによるn捕獲γ(8MeV)
- GdCl<sub>3</sub>は水に溶ける
- 90%の検出効率を得るに
   100トン必要(要study) rom Hargrove et al., NIM A357, 157-169 (1995)]



#### □ 何故GRBか?

➢ GRBは最もエネルギーを放出する天文現象の一つ

- GRBからニュートリノはでるのか?
   (Hypernova? NSの合体?)
   放出エネルギーの大部分をニュートリノが持ち出している
  - ニュートリノは親星の情報を持っている可能性がある

#### スーパーカミオカンデでGRBニュートリノを探索

#### ▶ 但しモデルは確立していない:

Model-independent search

(independent of energy spectrum)

#### □ 探索のための解析手法

# BATSE GRBsのカタログとSKのニュートリノ事象との相関をみる

#### SK data samples:

- Low-energy (LE) sample (6.5~80 MeV)
- High-energy (HE) sample (0.2~200 GeV)
- Upward-going muon (Upmu) sample (2~10<sup>5</sup> GeV)
- GRB times from BATSE:
  - 1454 GRBs (April 1996 May 2000)
  - Triggered and non-triggered

#### □ GRBとニュートリノ事象との相関

- ▶ 仮定:
  - ニュートリノの(質量による)飛行時間の遅れはない
  - (LEとHEの)バックグラウンドの事象率が一定
- Time correlation search (LE, HE samples):
  - GRB trigger時間を中心に±10s, ±100s, ±1000sの windowを採用し、相関をみる
  - time-correlated事象にたいして方向の相関をみる
- Time+direction correlation search (upmu sample):

± 1000s time window と15<sup>o</sup> direction cone

Non-coincident search (ALL samples):

GRB trigger時間に対し、1hr から ±1day まで拡大する



2003年9月11日

#### □ 相関結果(upµ)



One single  $up\mu$  was found in GRB window. Consistent with the expectation from the BG. Within  $\pm 24hr$ , no cluster of muons were found.

 フラックスの定義
 N<sub>90</sub>: 90%C.L. limit on total number of v interaction Nt: number of interaction target
 フラックスの定義: (Ev): total cross section as a function of energy
 ミ(Ev): detector efficiency as a function of energy
 λ(Ev): normalized neutrino energy spectrum



> Model-independent fluence Green's function -  $\Phi(E_{\nu})$ .

Calculate fluence from Green's function:

$$F = \left[ \int \frac{\lambda(E_{\nu})}{\Phi(E_{\nu})} dE_{\nu} \right]^{-1}$$



2003年9月11日

#### Fluence Limitの例



> GRBの大雑把な計算との比較:

• 仮定: z = 1,  $E_{tot} = 10^{53}$  erg, isotropic emission

| $E_{\nu}$ range              | $F_{\nu_e}[cm^{-2}]$ | $F_{\overline{\nu}_{e}}[cm^{-2}]$ | $F_{ u_{\mu}}$ [cm <sup>-2</sup> ] | $F_{\overline{\nu}_{\mu}}$ [cm <sup>-2</sup> ] | Prediction           |
|------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|----------------------|
| 780 MeV                      | $4.44 \times 10^{7}$ | $9.52 	imes 10^{5}$               | 2.65×10 <sup>8</sup>               | $2.65 \times 10^{8}$                           | 1.4                  |
| 0.2200 GeV                   | $1.66 \times 10^{2}$ | $2.97 \times 10^{2}$              | $1.39 \times 10^{2}$               | $3.00 \times 10^{2}$                           | $1.7 \times 10^{-2}$ |
| 210 <sup>5</sup> <b>G</b> eV |                      |                                   | $3.83 \times 10^{-2}$              | $4.96 \times 10^{-2}$                          | $1.1 	imes 10^{-3}$  |

Fluence limitの上限値は予言値に対して~10<sup>6</sup>(LE)、 10<sup>4</sup> (HE)、30 (upmu)程度高い

## 結果とまとめ

- □ SK-IにおけるMeV領域ニュートリノの探索を行った
- 観測期間 1996年5月31日~2001年7月15日
- 超新星爆発ニュートリノバーストは観測されず、100kpc以内の銀河系に対し0.49SNe/年、カミオカンデの結果と合わせると我々の銀河系では0.26SNe/年の上限値を得た
- 過去の超新星ニュートリノの探索では、19.3MeV以上の ニュートリノに対し1.2vecm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>の上限値を得たことで Const.SN modelを否定し、他のモデルの予言値もこの値の ~1/3であるから、再解析を含めて近将来的に到達の可能性
- □ GRBに相関したニュートリノ現象は、MeV領域に限らずGeVよ リエネルギーの高い領域でも観測されなかった
- □ SK-IIIは昨年12月より開始しており、超新星爆発モニター及び 過去の超新星ニュートリノの探索を引き続き行っている