Dark Matter Search

# 液体キセノン検出器XMASSを 用いた超新星ニュートリノ観測

東大宇宙線研 平出克樹 2019年1月7-8日 第5回超新星ニュートリノ研究会@国立天文台

#### XMASS実験

 神岡の地下1,000 m (2,700 m.w.e.)で行われている 液体キセノンを用いた多目的宇宙素粒子実験
 暗黒物質の直接探索
 低エネルギー太陽ニュートリノ(pp/<sup>7</sup>Be)の観測
 ニュートリノレスニ重ベータ崩壊の探索

#### ●特徴

□大質量 (832kgの有感領域)

- □ 低エネルギー閾値 (~0.5keVee)
- □ 低バックグラウンド
- □ 原子核反跳だけでなくe/γ 事象にも感度がある



## ー相式液体キセノン検出器: XMASS-I



- 液体キセノン検出器
   B32 kgの液体キセノン(-100 °C)
   G42 2インチ光電子増倍管 (光電面被覆率 >62%)
   日各チャンネルの信号を10-bit 1GS/sの波形デジタイザで記録
- 水チェレンコフ検出器
   直径10m、高さ11m
   72 20インチ光電子増倍管
   宇宙線ミューオンのVETO
   環境中性子・ガンマ線の遮蔽

## XMASS-I検出器によるデータ収集





- 2010年12月に建設完了
- ■コミッショニング、検出器改修作業を経て
   2013年11月よりデータ収集再開
- ●5年以上にわたり、安定的にデータ収集を継続
- 2018年度中に観測終了予定

#### ニュートリノ・原子核コヒーレント弾性散乱 (CEvNS)

 $\nu + A \longrightarrow \nu + A$ 

- ニュートリノが原子核中の全核子と
   コヒーレントに反応して原子核が反跳される
   □ 中性カレント反応

  - □ 断面積~N<sup>2</sup>

$$\frac{d\sigma}{dE_{\rm nr}}(E_{\nu}, E_{\rm nr}) = \frac{G_{\rm F}^2 M}{2\pi} G_{\rm V}^2 \left[ 1 + \left(1 - \frac{E_{\rm nr}}{E_{\nu}}\right)^2 - \frac{ME_{\rm nr}}{E_{\nu}^2} \right]$$
$$G_{\rm V} = \left[ \left(\frac{1}{2} - 2\sin^2\theta_W\right) Z - \frac{1}{2}N \right] F(q^2)$$

- □ 原子核反跳エネルギー~O(10) keV
- 超新星爆発時にニュートリノがコアにトラップされる主な機構
- 暗黒物質の直接探索における究極のバックグラウンド(太陽v, 大気v, DSNB v)
- 2017年にSNSを用いたCOHERENT実験により初めて実験的にCEvNSが観測された。

## XMASSで期待される超新星ニュートリノの信号



● 10 kpcの距離で超新星爆発が起きた場合、 3.5~21イベント程度が期待される。

 ベテルギウス(196 pc)の場合には、 O(10<sup>4</sup>)イベントが期待される。

> K. Abe et al. (XMASS Collaboration), Astropart. Phys. 89 (2017) 51-56

#### XMASS検出器で期待される 超新星ニュートリノ事象の時間分布



近傍超新星爆発(~200pc)の場合には、観測された 事象の時間分布から超新星モデルの区別ができそう。

## 超新星ニュートリノ観測に関連する改善

- GPSによる時刻同期の導入
- KamLAND pre-supernova alarmの監視
- 低閾値トリガーの導入
- ・ラン切替の自動化(デッドタイム削減)

## GPSによる時刻同期の導入

● GPS 1PPSとNTPを用いた時刻同期システムを導入した。 □ Super-KamiokandeよりGPS 1PPS信号をもらう。

□ GPS 1PPS信号をトリガーとして入力する。

□ 各GPS 1PPS信号のLinux時間を記録し、offlineで情報をマージする。



## KamLAND pre-supernova alarmの監視

● KamLANDがpre-supernova alarmを配信

K. Asakura et al. (KamLAND Collaboration), Astrophys. J. 818 (2016) 91

 配信された情報をXMASSのスローモニ ターシステムに入力し、XMASSシフトが 24時間体制で監視





低閾値トリガーの導入

- 各PMTヒット毎に出力される矩形波 をアナログ的に足し上げた波形が 閾値を越えるとトリガーを生成
- 2015年12月から、
   通常のトリガー(4ヒット閾値に対応)
   に加え、
   低閾値トリガー(3ヒット閾値に対応)
   を導入した。
- 2013年当初よりPMTのダークレート が減少したことで低閾値化できた。



小林雅俊, 日本物理学会第71回年次大会 <sup>11</sup>

## 季節変動を用いた低質量WIMPsの探索

- ●低閾値トリガーの導入と、
   LUXによるLeffの新しい測定により、
   4 GeVまでの低質量WIMPsについて
   原子核反跳による探索が実現した。
- ●エネルギー閾値2.3 keV<sub>nr</sub> (~2.3 PE)
- また、原子核が反跳された際の Bremsstrahlung photonを探索する ことで、sub-GeV暗黒物質の探索も 行った。



 M. Kobayashi et al. (XMASS Collaboration) arXiv:1808.06177 [astro-ph.CO]

# ラン切替の自動化(デッドタイム削減)

#### ● シフト負担の軽減化

 □ ラン切替の自動化 (24時間毎の定期切替、異常時の自動回復)
 □ Calibrationデータ収集頻度の低減 (週1回、数時間→月1回、数時間)

- 2018年度は、超新星ニュートリノ観測を 主なターゲットとして、データ収集を継続
- 2013年11月~2018年8月時点
   平均DAQ稼働率 >94% (calibrationを含む)
   物理解析データ取得率 >85% (quality check後)



#### 連星中性子星合体からの重力波イベントGW170817

#### ApJ Lett. 848, L12 (2017)



- 2015年以来、LIGO/Virgoによって複数の重力波イベントが報告されている。
- 2017年8月17日には、連星中性子星合体からの重力 波イベントGW170817が初めて観測され、マルチメッセ ンジャーでの観測にも成功している。
- 連星中性子星合体からのニュートリノ放出を計算した 論文もある。



Y. Sekiguchi et al. PRL 107, 051102 (2011) -- anti-ve -- ve -- ve -- vx M<sub>NS</sub>= 1.35(L), 1.5(M), and 1.6(H) x Msolar 14

データセットおよび事象選択



• データセット

GW170817 (Aug. 17 2017 12:41:04UTC)
 の前後 [-400,+10000] sec

- XMASS検出器の全体積(832kg液体キセノン) を用い、単純な事象選択カットのみをかける
   □液体キセノン検出器のみのトリガー
   □PMTアフターパルスの除去
   □ チェレンコフ事象の除去
- 4つのエネルギー領域に分けて イベントバーストを探索する
   C<sup>~</sup>30 keV
   0.22 event/s

□ 30-300 keV
 □ 300-3000 keV
 □ 300-3000 keV
 □ >~3000 keV
 0.02 event/s

#### GW170817から+/-400 sec以内のイベントレートの変動



#### GW170817から+/-400 sec以内のイベントレートの変動



#### コヒーレント弾性散乱を用いたニュートリノ観測

Fermi-Dirac型のニュートリノエネルギー分布を仮定

$$f(E_{\nu}) = \frac{C}{(k_{\rm B}T)^3} \frac{E_{\nu}^2}{e^{E_{\nu}/k_{\rm B}T} + 1}, \qquad C = \left(\int_0^\infty \frac{x^2}{e^x + 1}\right)$$



XMASSで期待されるNPE分布とefficiency curve (<Ev>=20MeVの場合)



## Neutrino fluenceに対する制限 (1)



- 平均ニュートリノエネルギーが 20MeVのFermi-Dirac分布を仮定。
- コインシデンス時間幅に観測された イベント数からneutrino fluenceに 対する90%信頼度の制限をつけた。
- [-400,+400] sec, [-400,+10000] sec
   内での探索では、コインシデンス
   領域をスキャンしていき、
   最大と最小の上限値をバンドとして
   表している。
- On-time windowでの90% CL上限 値は、(1.3-2.1)x10<sup>11</sup> cm<sup>-2</sup>

## Neutrino fluenceに対する制限 (2)



- 単色エネルギーのニュートリノ フラックスの場合を仮定して、 同様にneutrino fluenceに対する 上限値を求めた。
- XMASSの制限は、全フレーバーの ニュートリノの和。Super-Kの探索と 相補的。



 ● XMASS-I検出器では、大質量(832kg)かつ低エネルギー閾値(~0.5keVee)の特徴 を活かして、コヒーレント弾性散乱を用いた銀河系内の超新星ニュートリノの観 測が可能。

**K**. Abe et al. (XMASS Collaboration), Astropart. Phys. 89 (2017) 51-56

- 2013年11月より5年以上にわたり、安定したデータ収集を継続してきた。
- その他の天体起源の低エネルギー事象の探索も行ってきた。

   本陽Kaluza-Kleinアクシオンの探索: N. Oka et al. (XMASS Collaboration), PTEP 2017, 103C01

   重力波イベントに同期したバーストの探索: 論文執筆中