

液体キセノンを用いた 超新星ニュートリノの観測

東大宇宙線研 平出克樹

2017年3月4日

第3回超新星ニュートリノ研究会

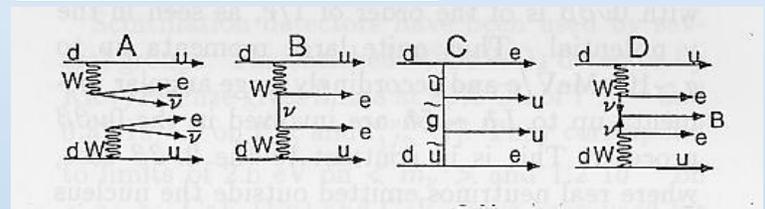
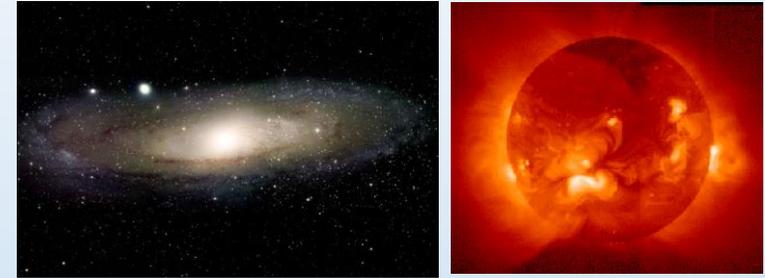
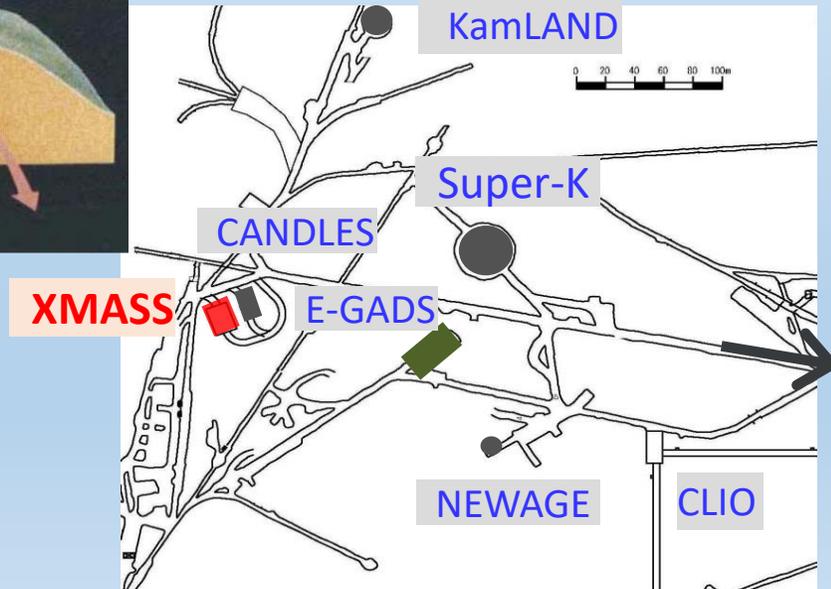
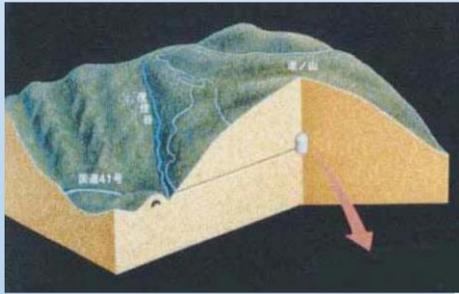
内容

- コヒーレント弾性散乱による超新星ニュートリノ観測
 - K. Abe et al. (XMASS Collaboration), *Astropart. Phys.* 89 (2017) 51-59
- その他の天体起源の低エネルギー事象の探索
 - 太陽アクシオン探索
 - 太陽カルツァ-クラインアクシオン探索
 - 重力波イベントに同期したイベントの探索
- 新しいトリガーシステムの開発

XMASS実験

■ 神岡地下1,000mで行う大型液体キセノン検出器を用いた多目的宇宙素粒子実験

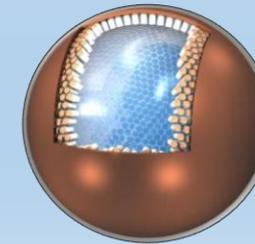
- 暗黒物質の直接探索
- 低エネルギー太陽ニュートリノの観測
- ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索



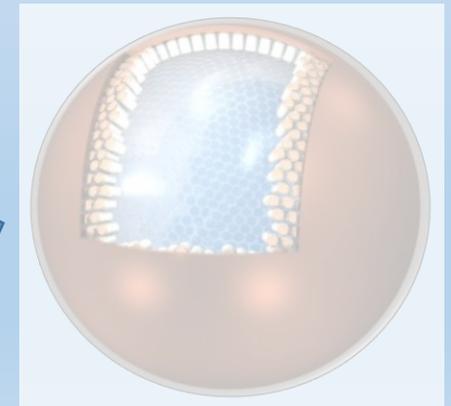
現在稼働中



XMASS-1.5
(total ~6tons)



XMASS-2
(total ~24tons)



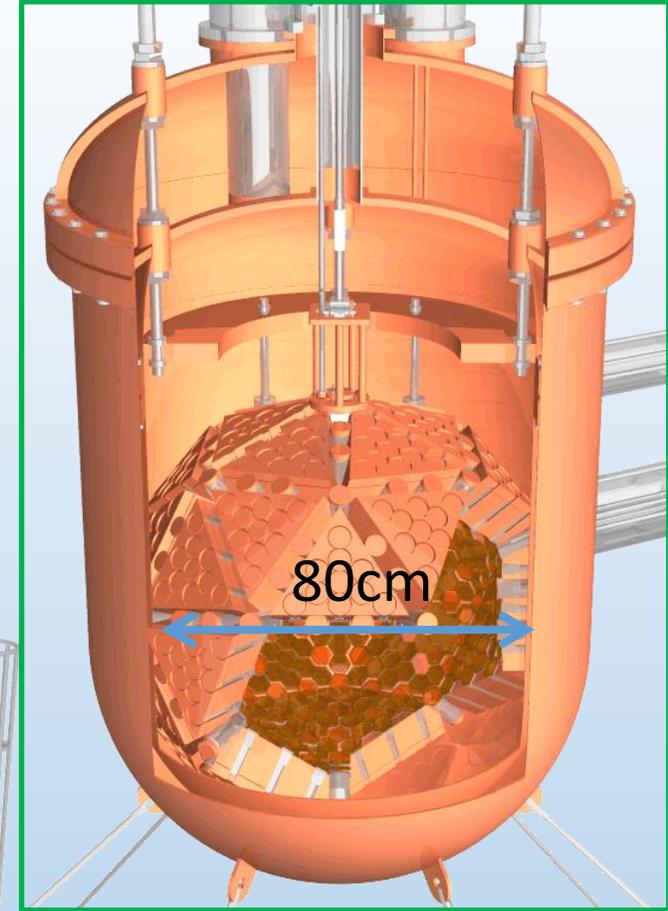
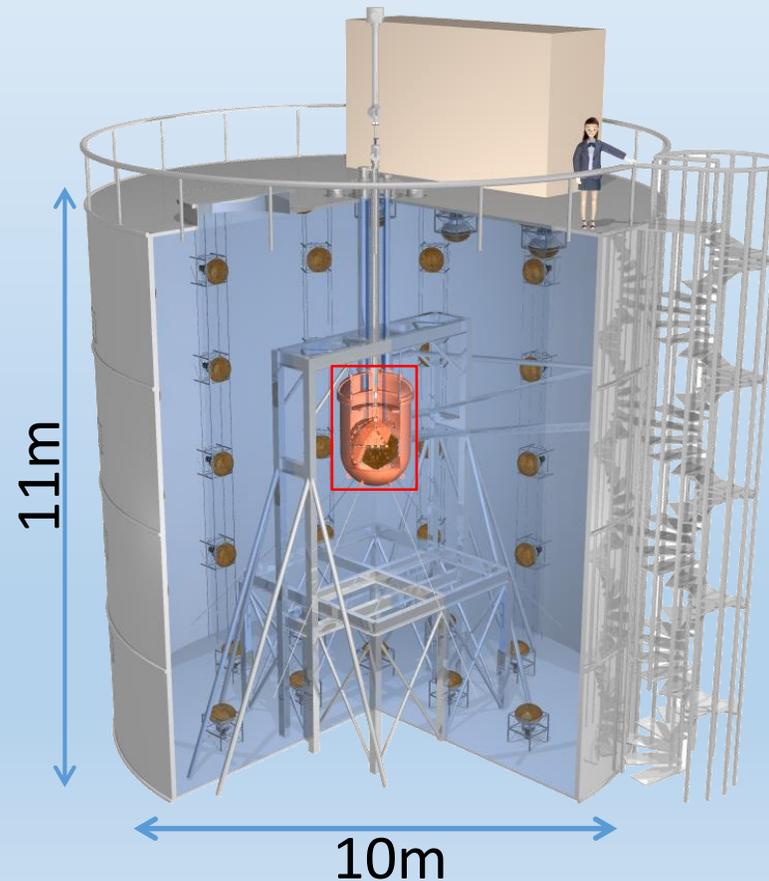
XMASS検出器の概要

■ 液体キセノン検出器

- 832kgの液体キセノン
- 642本の光電子増倍管
- 高い光電子収量 (14 p.e./keV_{ee} for ⁵⁷Co)
- 低エネルギー閾値 (~0.5 keV_{ee}, ~3 keV_{nr})

■ 水チェレンコフ検出器(外水槽)

- 環境γ線・中性子の遮蔽
- 宇宙線ミュオン veto
- 72本の光電子増倍管



コヒーレント弾性散乱による 超新星ニュートリノの観測

XMASSにおける超新星ニュートリノの観測

■Coherent elastic neutrino-nucleus scattering

$$\nu_x + (A, Z) \rightarrow \nu_x + (A, Z)$$

- XMASSにおける超新星ニュートリノ事象の主なプロセス。
- 全てのフレーバーに感度がある。
- O(10keV)以下の原子核反跳を観測する。

■Charged current neutrino-nucleus reactions

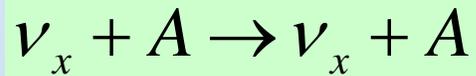
$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z + 1)$$

$$\bar{\nu}_e + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z - 1)$$

- 近傍超新星の場合には観測できる可能性がある。
- O(MeV)の電子事象なので、コヒーレント散乱とは区別できる。

ニュートリノ-原子核コヒーレント弾性散乱

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。



$$\left(\frac{d\sigma}{dT_A}\right)_w(T_A, E_\nu) = \frac{G_F^2 M}{8\pi} \left[1 + \left(1 - \frac{T_A}{E_\nu}\right)^2 - \frac{MT_A}{E_\nu^2} \right] Q_W^2 F^2(q^2)$$

$$Q_W = N - (1 - 4 \sin^2 \Theta_W) Z,$$

この反応が関与する場面

- 超新星爆発時のニュートリノに対するOpacity
- 暗黒物質の直接探索における究極的なバックグラウンド(solar, atmospheric and DSNB ν)

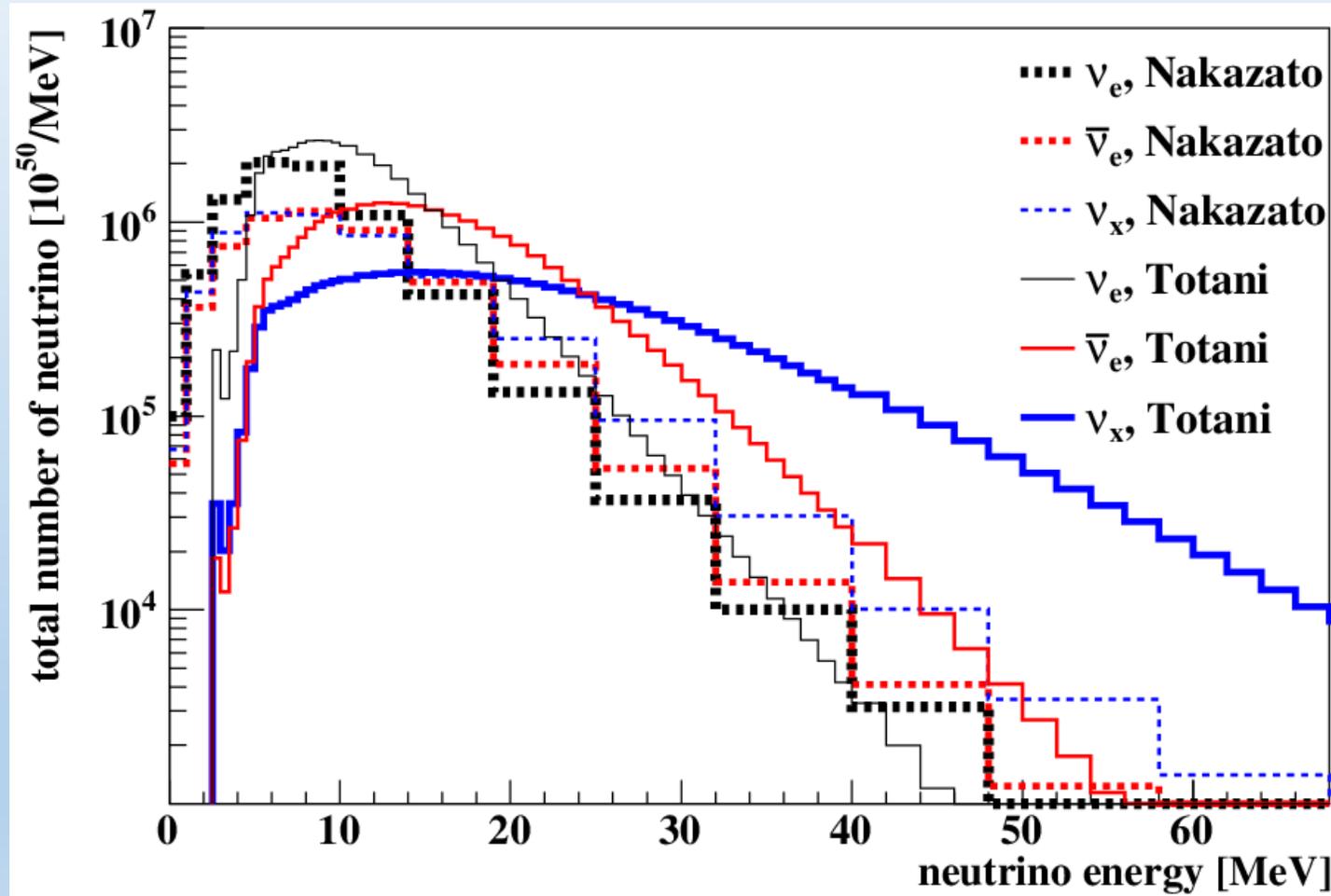
まだ一度も実験的に観測されていない

- 観測できるのは、原子核反跳のみ
- 反跳エネルギーは、数十keV以下

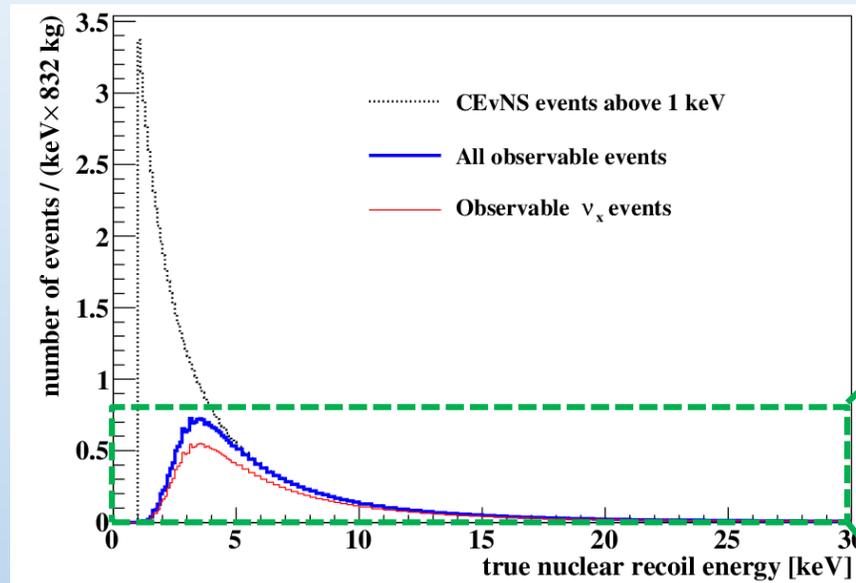


近年、暗黒物質の直接探索実験で低エネルギー閾値の大型検出器が実現した。

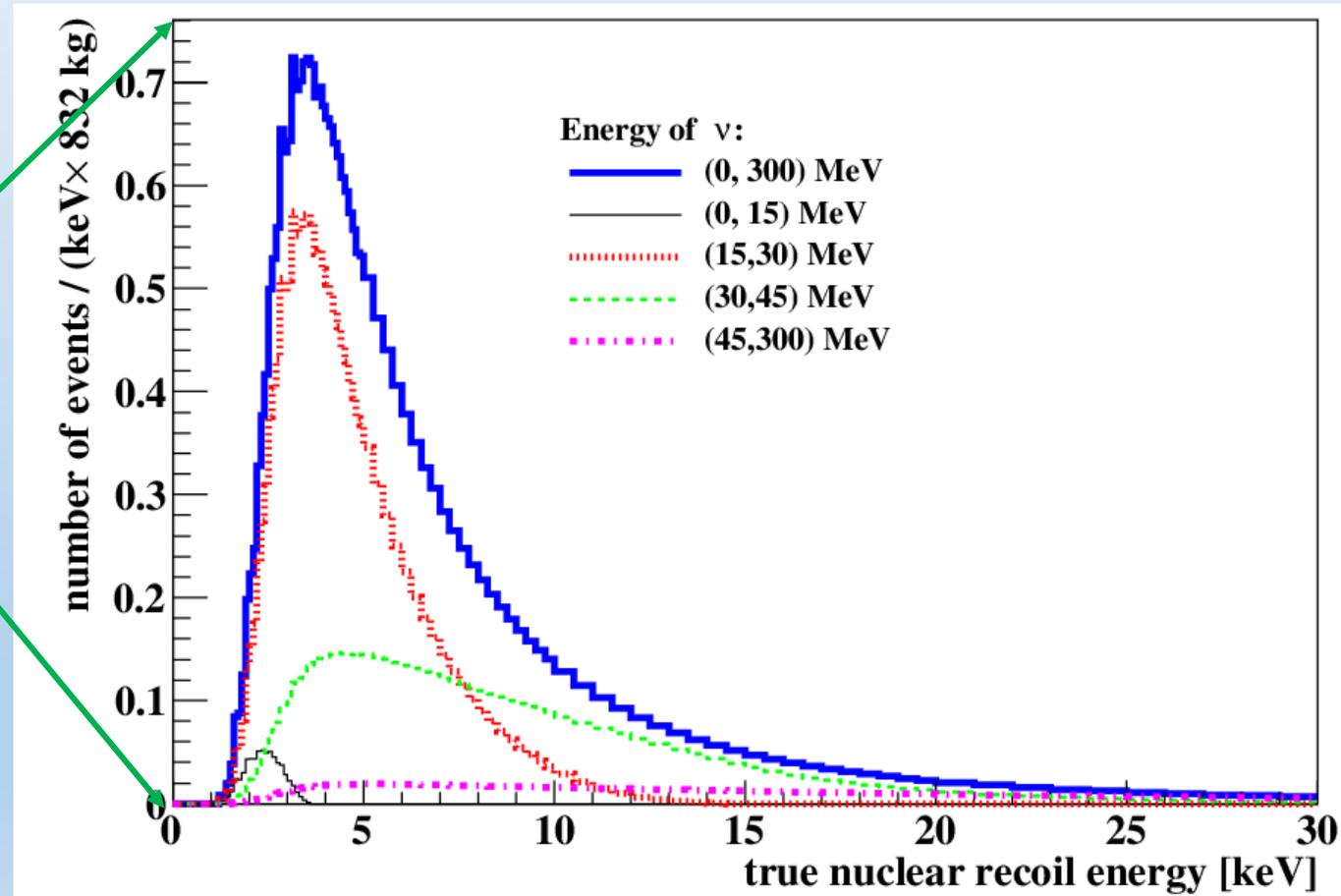
超新星ニュートリノエネルギースペクトル



原子核反跳エネルギースペクトル

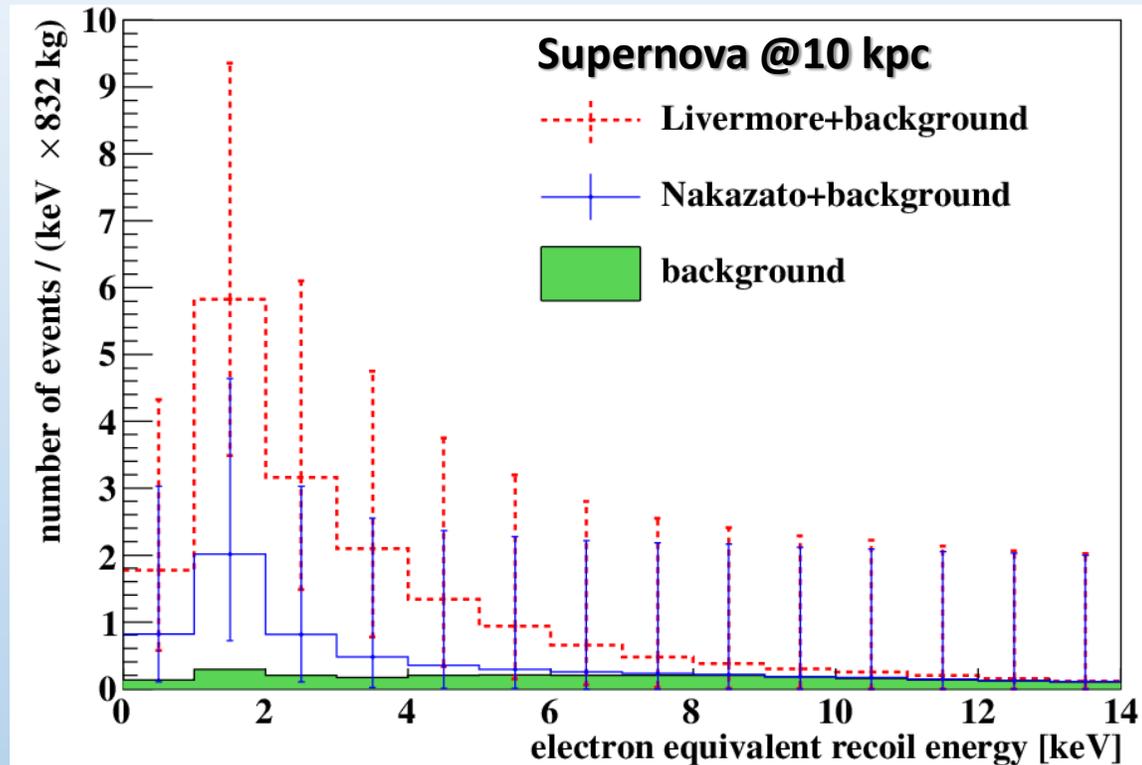


ニュートリノエネルギー別にみた原子核反跳エネルギー



- XMASSでは、主に ν_x が観測できる。
- ニュートリノエネルギーにすると約15 MeV以上に感度がある。

XMASSで期待される超新星ニュートリノの信号



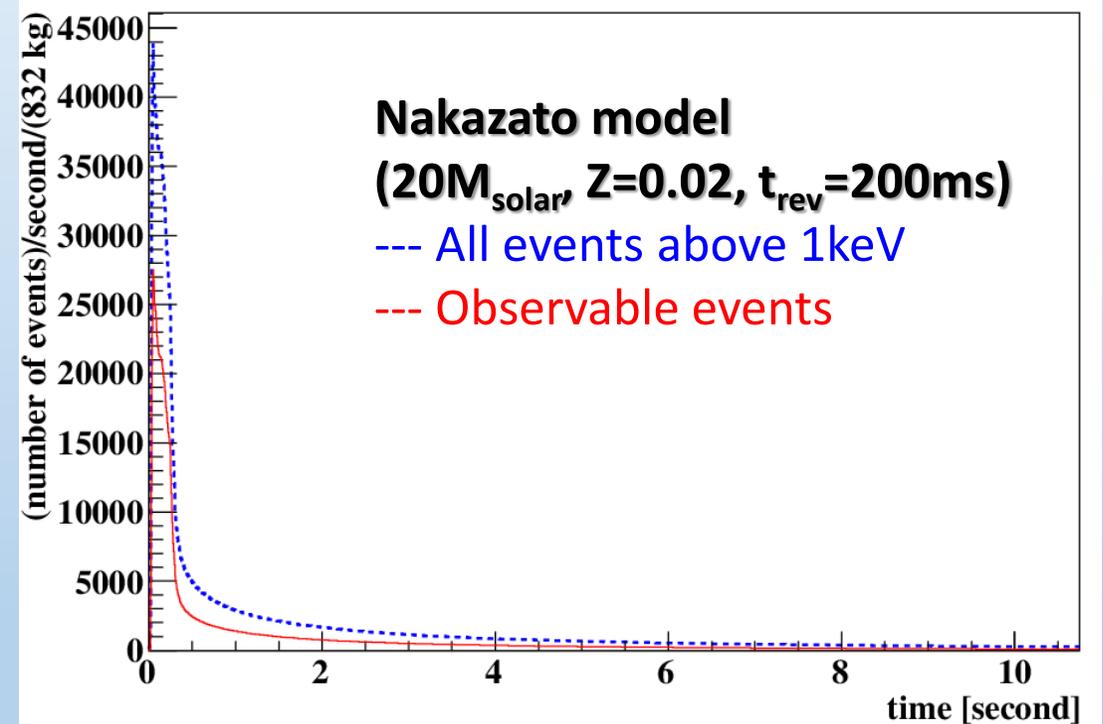
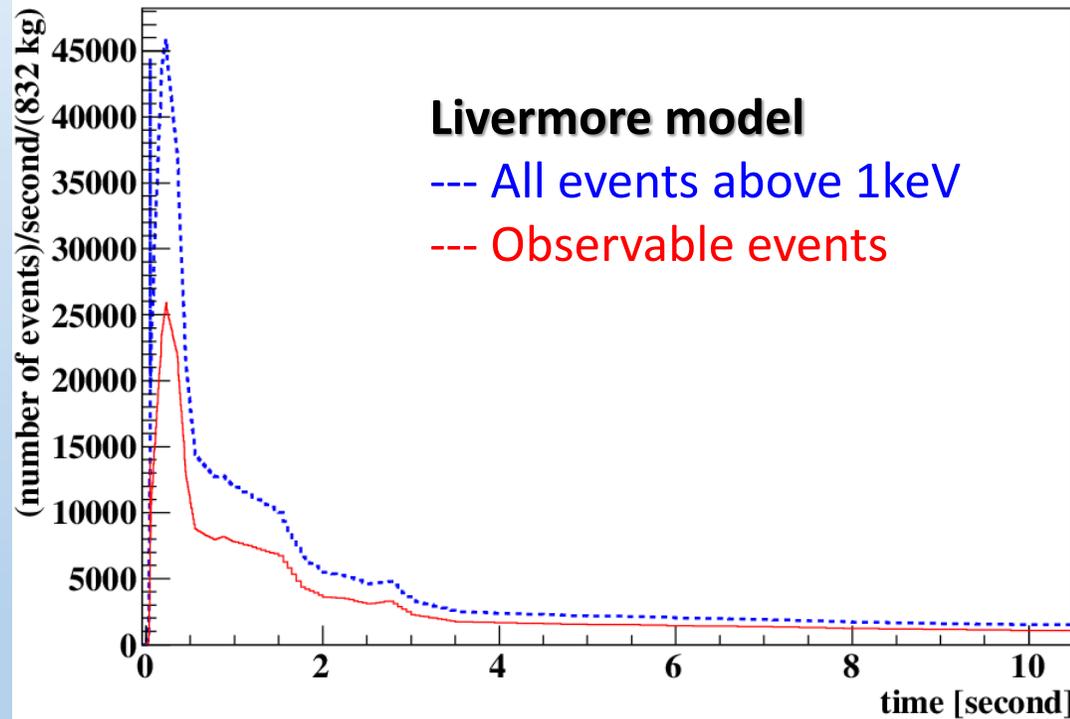
10 kpcの距離で超新星爆発が起きた場合、3.5~21イベント程度が期待される。

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

ニュートリノコヒーレント弾性散乱の世界初の観測になるかも！！

| Supernova model | d=10 kpc | d=196 pc |
|------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------|
| Livermore | 15 | 3.9×10^4 |
| Nakazato ($20M_{\text{solar}}$, $Z=0.02$, $t_{\text{rev}}=100\text{ms}$) | 3.5 | 0.9×10^4 |
| Nakazato ($30M_{\text{solar}}$, $Z=0.02$, $t_{\text{rev}}=300\text{ms}$) | 8.7 | 2.3×10^4 |
| Nakazato (black hole) | 21 | 5.5×10^4 |

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



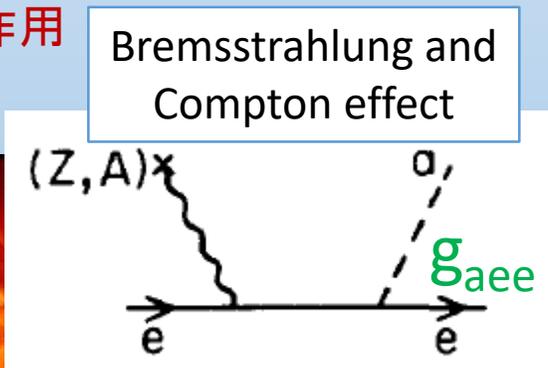
近傍超新星爆発($\sim 200\text{pc}$)の場合には、観測された事象の時間分布から超新星モデルの区別ができそう。

その他の天体起源の 低エネルギー事象の探索

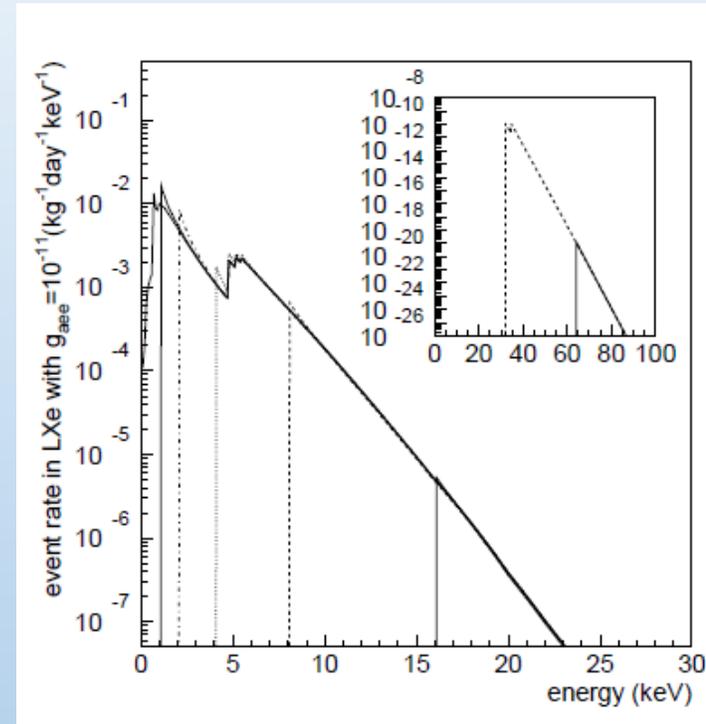
太陽アクシオンの探索

- アクシオンは、強い相互作用のCP問題を解決するために提唱された。
- 様々な実験で、アクシオンと光子、電子、核子とのcouplingの探索が行われている。
- 太陽の中で、アクシオンがPrimakoff効果($\gamma+Z \rightarrow a+Z$)やコンプトン散乱($e+\gamma \rightarrow e+a$)、bremsstrahlung ($e+Z \rightarrow e+a+Z$)などで作られるのではないかと考えられている。
- 太陽で作られたアクシオンが地球に飛んできて、XMASS検出器中で、axio-electric effect ($a+Z \rightarrow e+Z$)によって電子に転換されると観測できる。

電子との相互作用
で見える場合



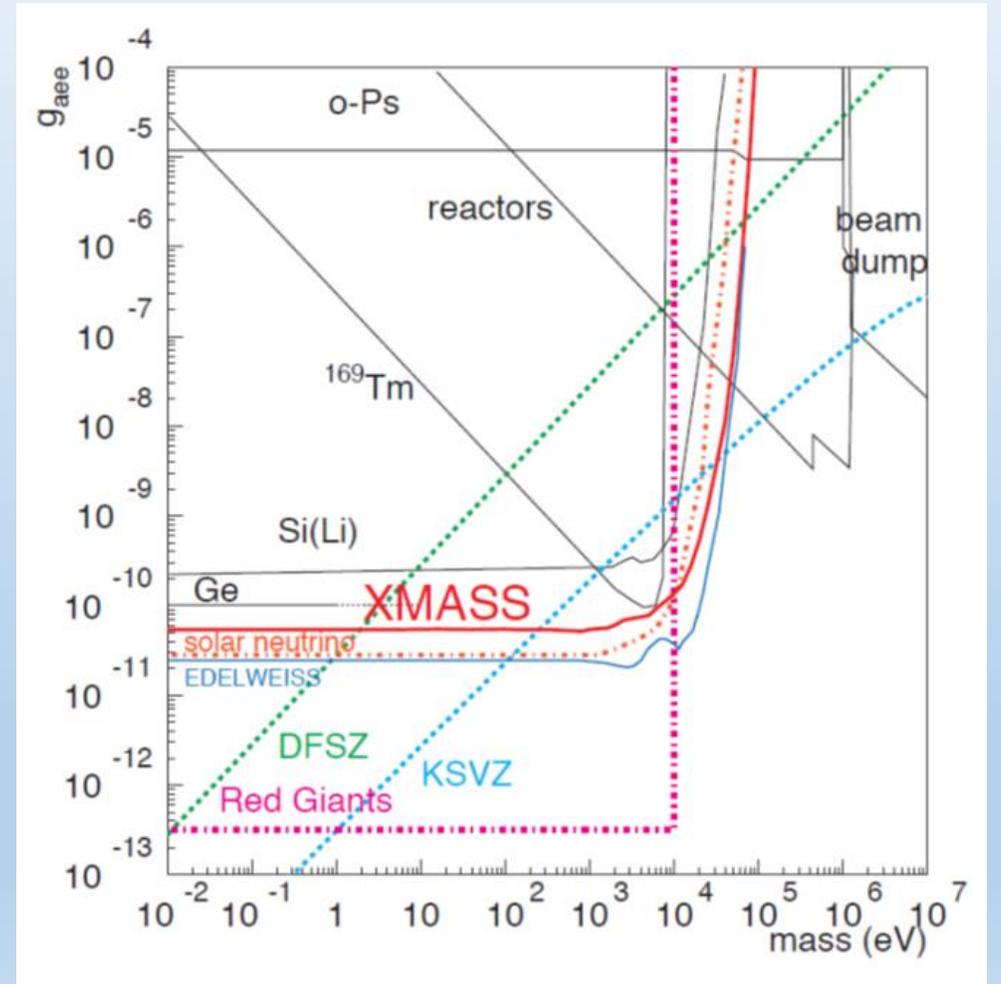
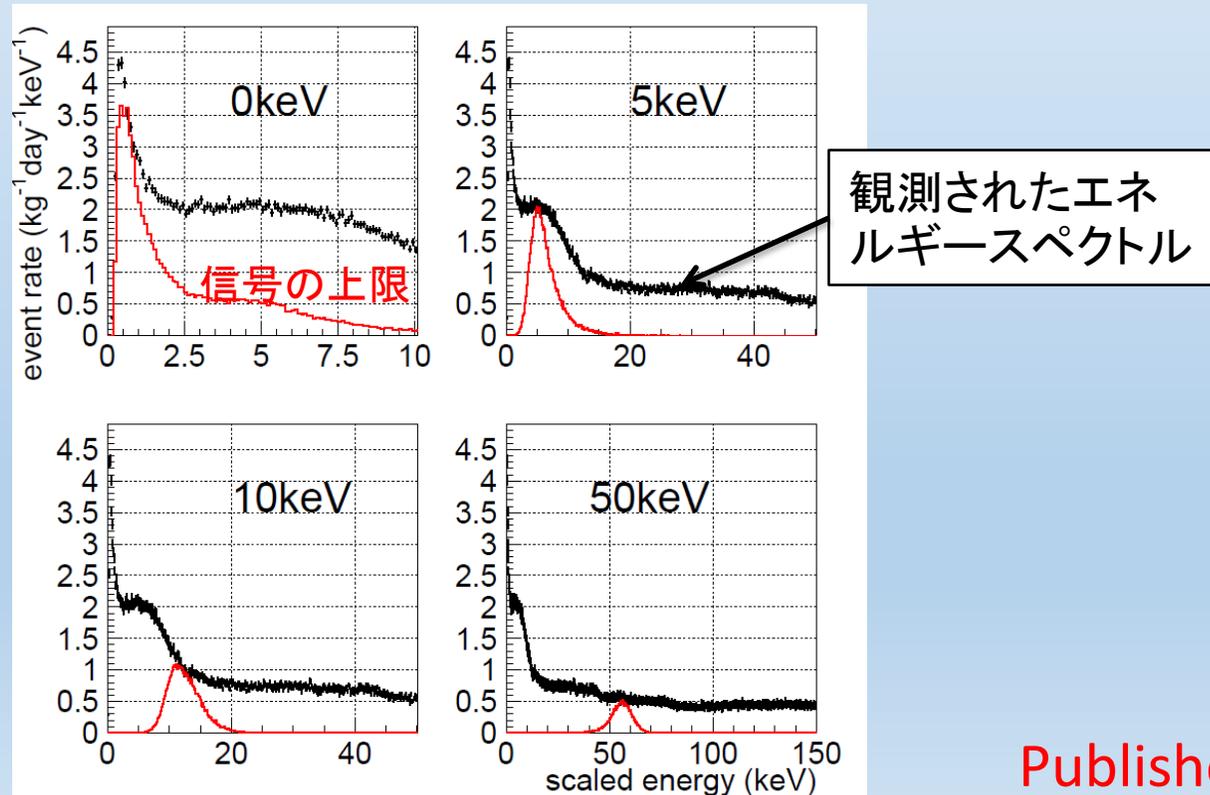
Axio-electric effect



期待される太陽アクシオンのエネルギースペクトル
($m_a=0, 1, 2, 4, 8, 16 \text{ keV}/c^2$)

太陽アクシオンの探索

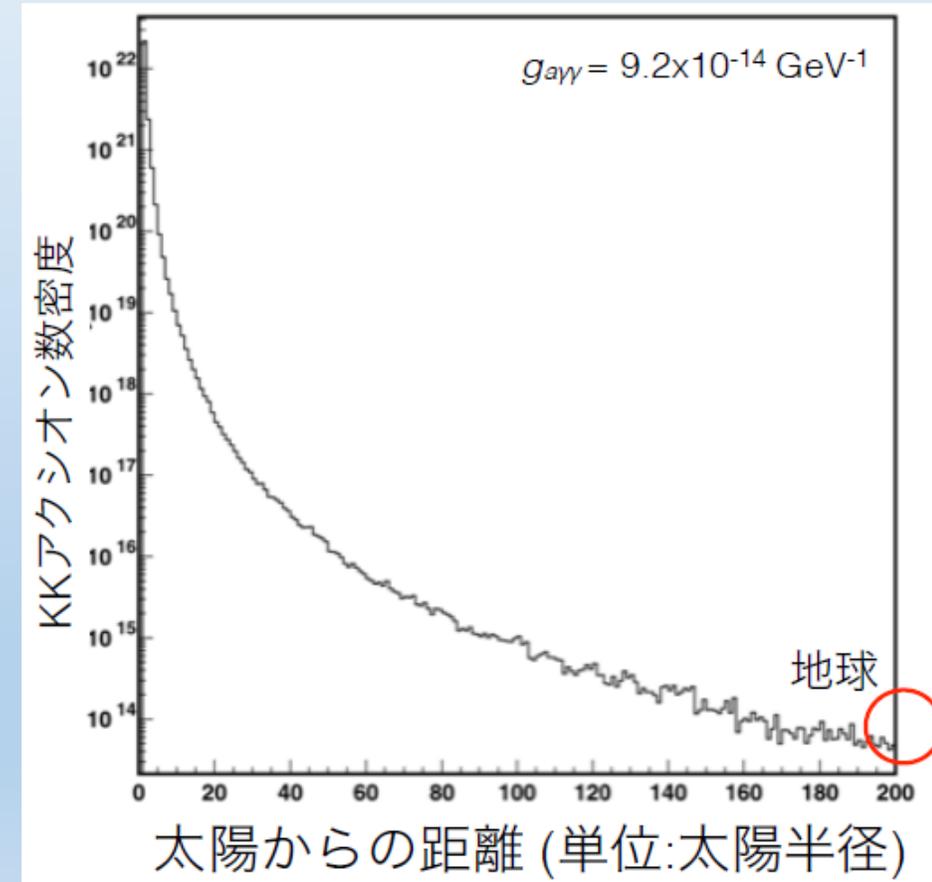
- 2012年に取得した6.7日分のデータ
- 観測されたエネルギースペクトルを超えない信号量の上限值(90%信頼度)を求め、結合定数 g_{aee} に制限をつけた。



Published in Phys. Lett. B 724 46 (2013)

太陽カルツァ-クライン(KK)アクシオンの探索

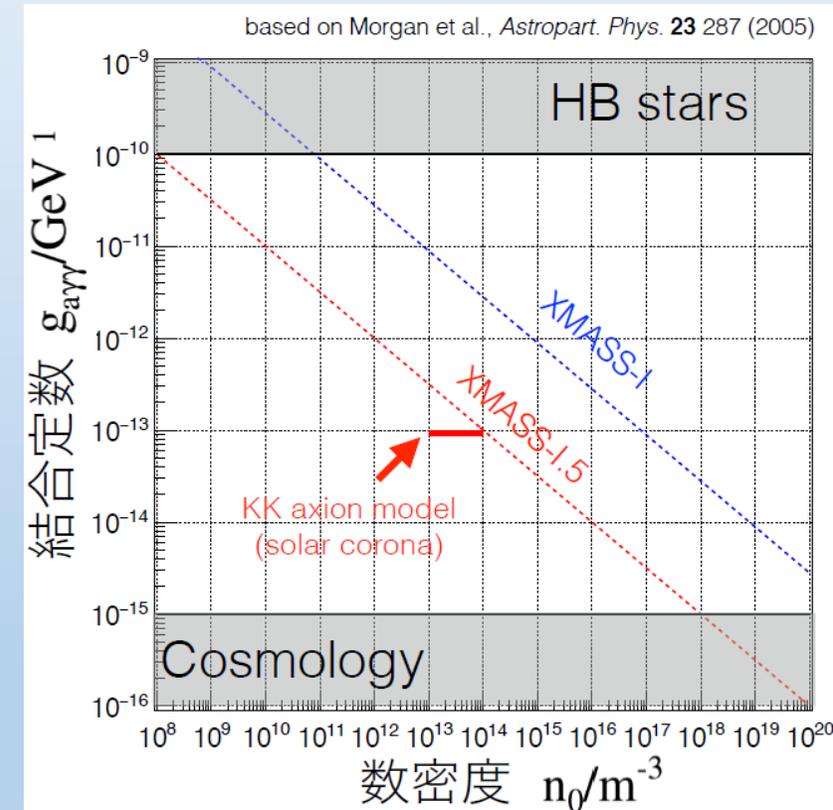
- Large extra dimensionのシナリオでは、アクシオン場も余剰次元を伝搬する。
- 余剰次元方向の振動は、4次元時空では質量として見えるため、このようなアクシオンは無限に続く質量の階層を持つ。
- KKアクシオンは、“太陽表面が6000Kしかないのに外側のコロナが100万Kもある”という問題を説明可能
 - 太陽付近のKKアクシオンが崩壊してX線源となる
- 様々な質量のKKアクシオンが太陽の中で主に光子コアレスセンス($\gamma\gamma \rightarrow a$)で作られて放出される。
- その一部が重力でトラップされて太陽系空間に蓄積される。
- 検出器内でKKアクシオンが2光子に崩壊する事象を探索する。



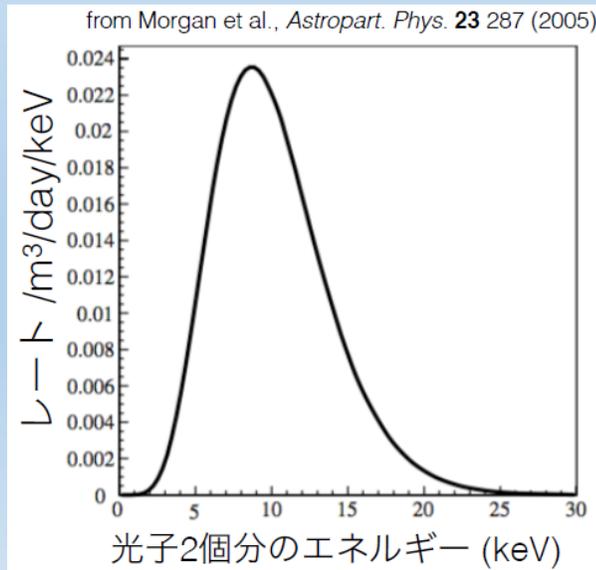
太陽カルツァ-クライン(KK)アクシオンの探索

- XMASSでは、季節変動を用いた太陽KKアクシオンの探索を行っている。
 - 近日点(1月4日)に事象頻度は最大となる (振幅~7%)
- 現在、XMASS-Iのデータ解析が進行中。
- XMASS-1.5 (3tons x 5yrs)では太陽コロナ問題を説明可能なパラメータ領域まで探索できる

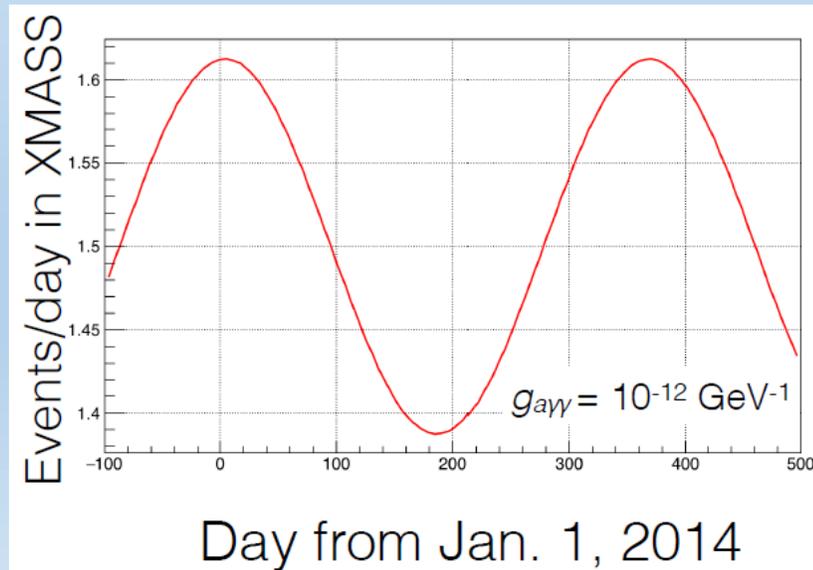
XMASSで期待される感度



地球近傍でのKKアクシオンの崩壊スペクトル



期待される信号イベントレートの季節変動



重力波イベントに同期したイベントの探索

Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)

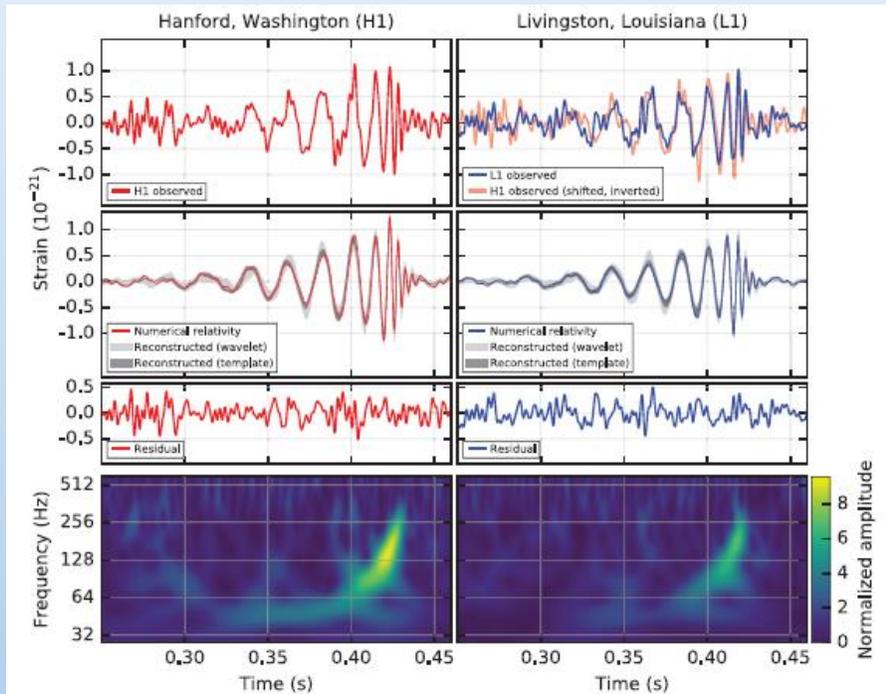
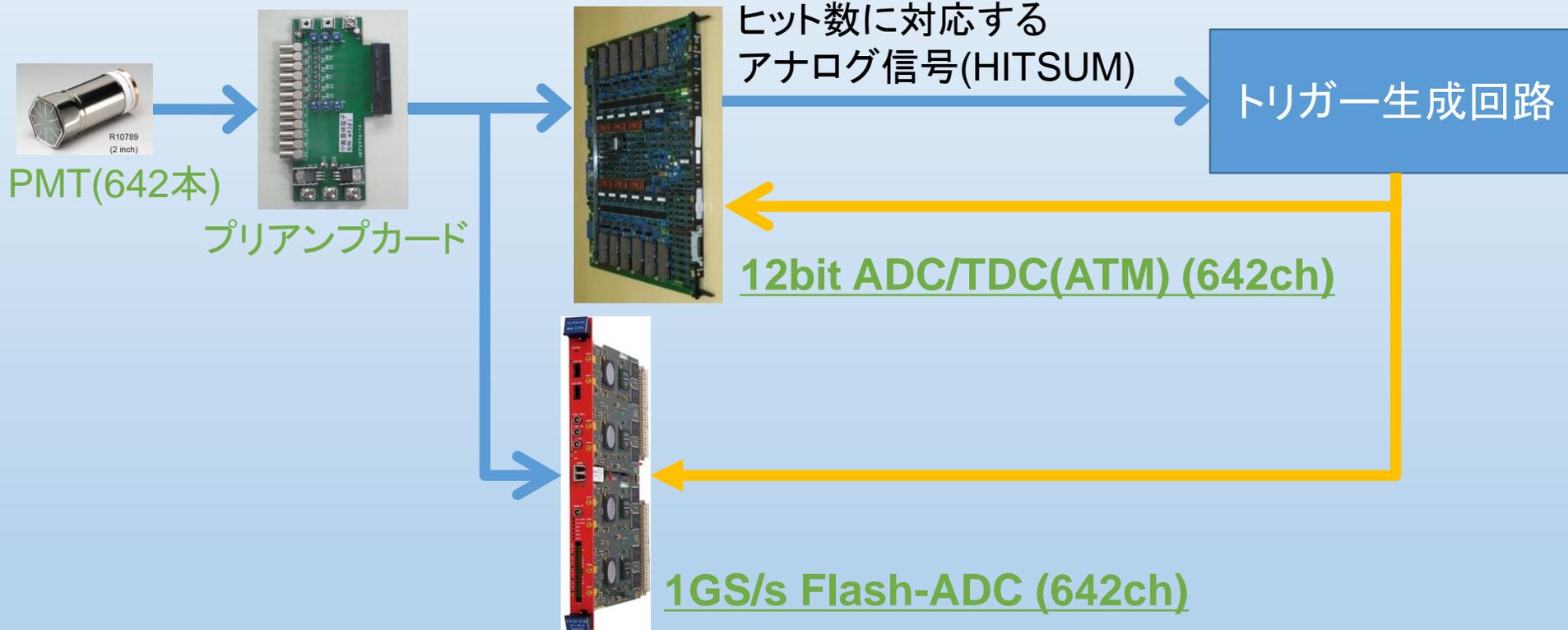


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors’ most sensitive frequency band, and band-reject filters to remove the strong instrumental spectral lines seen in the Fig. 3 spectra. Top row, left: H1 strain. Top row, right: L1 strain. GW150914 arrived first at L1 and $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are also shown, shifted in time by this amount and inverted (to account for the detectors’ relative orientations). Second row: Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on [15]. Shaded areas show 90% credible regions for two independent waveform reconstructions. One (dark gray) models the signal using binary black hole template waveforms [39]. The other (light gray) does not use an astrophysical model, but instead calculates the strain signal as a linear combination of sine-Gaussian wavelets [40,41]. These reconstructions have a 94% overlap, as shown in [39]. Third row: Residuals after subtracting the filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. Bottom row: A time-frequency representation [42] of the strain data, showing the signal frequency increasing over time.

- Advanced LIGOで重力波イベントが観測された。
 - GW150914
 - GW151226
 - LVT151012
- 様々な検出器でfollow-up探索が行われている。
 - ANTARES, IceCube, Super-Kamiokande, KamLAND etc.
- XMASSでもこれらの時期に物理データを取っていた。
 - 0.5 keVeeの低エネルギー閾値
 - 単にイベント探索だけでなく、Axion-like particlesなどに制限がつけられたら面白い (ほかにも何かアイデアがあれば)

新しいトリガーシステムの開発

XMASSデータ収集システムの概要



- ATMからのHITSUM信号を用いてトリガーを生成する。(>=3ヒット)
- トリガーレートは、15Hz程度。

新型トリガーシステムの開発

現行のシステムの問題点

- ATMのペDESTAL測定のため30分に一度、数秒間のdead timeが発生
- ATMのデータ転送が追いつかない場合、トリガーがvetoされてしまう
- あるPMTがnoisyになったときに、トリガー生成ロジックからそのPMTだけを除くことができないのでPMT自体をoffにせざるを得ない。
(→ dead channelが増える)



Flash-ADCによる新たなトリガーシステムを開発・導入して、ATMを切り離したい
(現在、ATMはトリガー生成とODの記録にしか使っていない)

新型トリガーシステムの開発

Flash-ADC
(CAEN V1751)

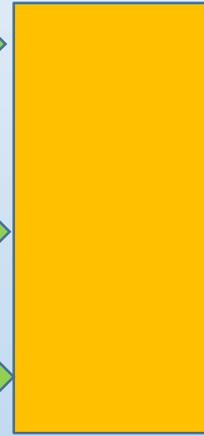
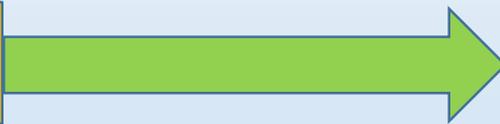


各チャンネルのヒット
情報をLVDSで出力

クレート毎に
足し上げる



⋮

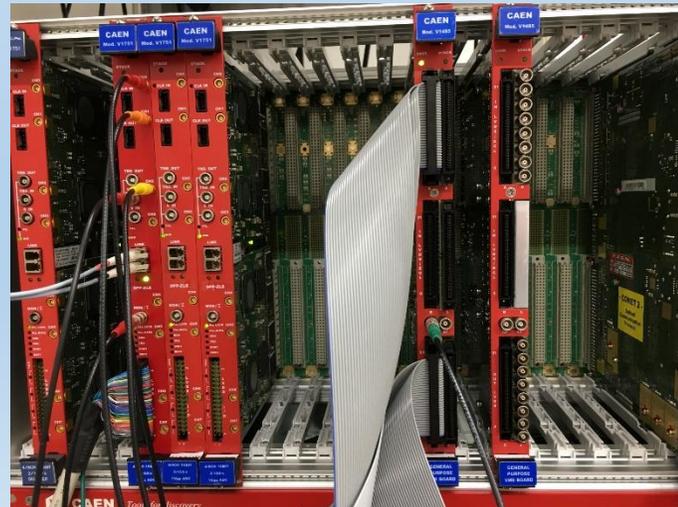
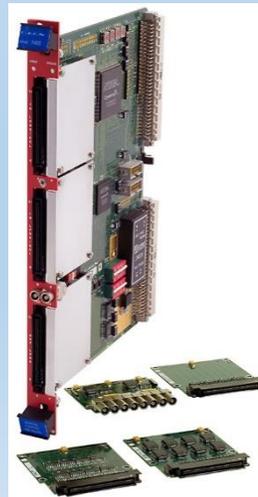


トリガー生成
モジュール

FPGAを用いて
ヒット数を計算して
トリガーを作る

CAEN V1495

- General purpose logic board
- Cyclone EP1C20 (Altera)
- 64 (up to 162) inputs
- 32 (up to 130) outputs



ファームウェア
の開発中

まとめ

- XMASS実験は、832kgの液体キセノンを用いたXMASS-I検出器でデータ収集を継続している。
- 低エネルギー閾値かつ大質量のXMASS検出器を用いれば、超新星ニュートリノによるコヒーレント弾性散乱を世界で初めて観測できる可能性がある。
- また、その他の天体起源の低エネルギー事象の探索も行われている。
- より安定的にデータを取るために、新型トリガーシステムを開発中。