KamLANDにおける超新星ニュートリノの探索





東北大学ニュートリノ科学研究センター 修士1年 永塚穂里

Contents

- 導入
- 超新星ニュートリノの放出過程
- KamLANDについて
- ・逆ベータ崩壊反応を用いた超新星ニュートリノの探索
- ・中性カレント反応を用いたイベントの探索
- まとめと展望

導入

• 研究動機

- ▶ 超新星ニュートリノを観測することで、超新星爆発の詳細なメカニズムやニュートリノの質量についての情報が得られる。
- ▶ これまでに様々な検出器で超新星ニュートリノの探索が行われてきた。
 SK, LVD, SNO, MiniBooNE, Baksan → いずれの探索もSN1987A以来の超新星ニュートリノ観測には至っていない。

• KamLANDで探索を行う利点

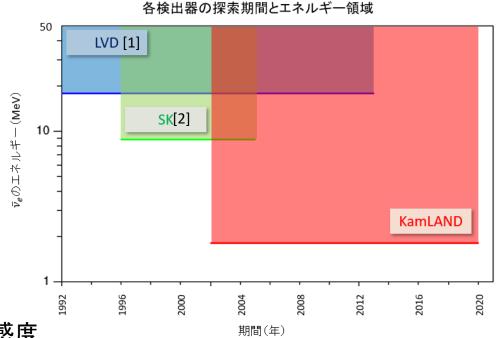
利点1: 極低放射能環境でシンチレーション光を観測することで逆ベータ崩壊の反応閾値($E_{\nu_{\rho}} \geq 1.8 \text{ MeV}$)まで観測可能

利点2: 長期間(2002/3/9~2020/7/17)の安定したデータセット

利点3: 比較的高いエネルギー分解能 (地球の物質効果やニュートリノ集団振動の測定に有利)

• 研究目標

 $\bar{\nu}_e$ に感度のある逆ベータ崩壊反応と、全フレーバーのニュートリノに感度のある中性カレント反応の探索結果のcombineに向けて準備研究を行う。



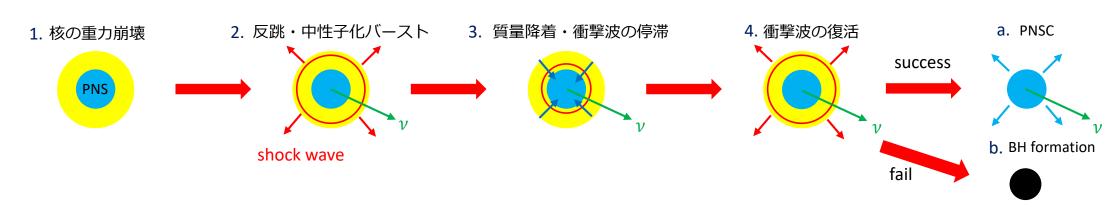
[1]N. Agafonova, et al. 2015, Astrophysical Journal, 802, 47 [2]M. Ikeda, et al. 2007, Astrophysical Journal, 669, 519

超新星ニュートリノの放出過程

- 1. 恒星内で電子捕獲などにより圧力が低下すると、コアが重力崩壊を起こす。
- 2. コアの密度が高くなると核力によって反跳が起こり、衝撃波が伝搬する。 \rightarrow 中性子化バースト: ν_e の放出
- 3. その後、
- 4. 質量降着によって衝撃波が失速する。その後、衝撃波が
 - a. 復活する→原子中性子星の冷却へ

ニュートリノ放出のタイムスケールは10s程度

b. 復活しない→ブラックホールを形成(Failed Supernova):νの放出が止まる



KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector)

・ KamLANDは神岡鉱山内の池ノ山山頂地下1000mに位置する 液体シンチレータ検出器である。



Outer Detector (OD)

- 水中のチェレンコフ光を観測
- ミューオンのvetoに使用

超純水

√γ線や高速中性子を遮蔽

20-inch PMTs



- 液体シンチレータのシンチレーション光を観測
- 物理観測(反電子ニュートリノ観測)に使用

17-inch and 20-inch PMTs

バッファオイル

√γ線を遮蔽

ラージバルーン (r=6.5m)

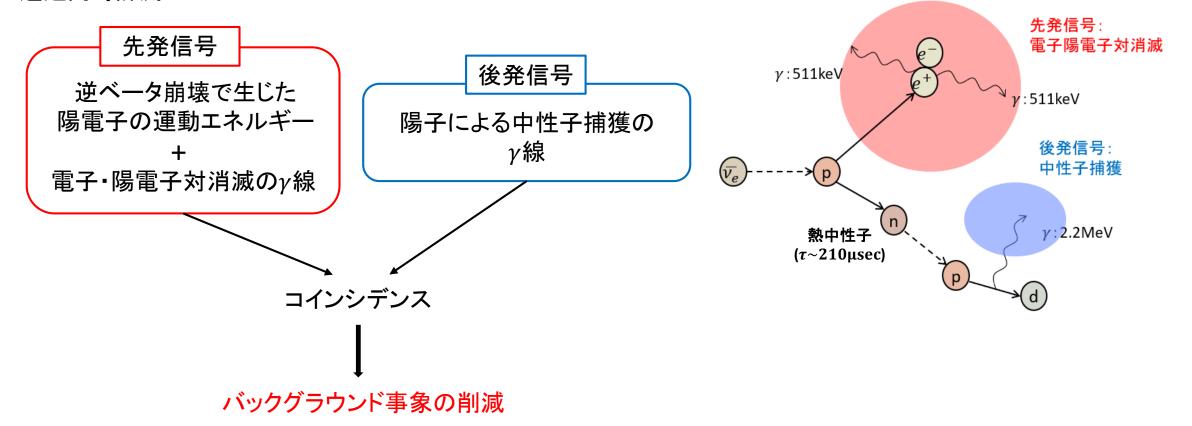
- ✓ 1ktの液体シンチレータ(KamLS)を封入
- ✓ KamLSでは反電子ニュートリノが逆ベータ崩壊を起こす

ミニバルーン (r=1.92m)

✓ニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊の探索のため、 745kgのXeを溶かした液体シンチレータを封入

逆ベータ崩壊の遅延同時計測

- 本研究ではKamLANDの液体シンチレータ内での逆ベータ崩壊を用いて探索を行った。
 - ightharpoonup 逆べ一夕崩壊: $\bar{v}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- 遅延同時計測



イベント選定条件

逆ベータ崩壊の選定条件

- データ期間: 2002/3/9~2020/7/17、 livetime: 5082.83days
- ・次のような条件で逆ベータ崩壊イベントを遅延同時計測によって選定した。
 - \triangleright 0.9 ≤ E_p ≤ 100MeV

- $r_p \le 600 \text{cm}, \ r_d \le 600 \text{cm}$ $0.5 \le dT \le 1000 \mu \text{sec}$
- > 1.8 ≤ E_d ≤ 2.6MeV, 4.4 ≤ E_d ≤ 5.5MeV >> dR ≤ 160cm
- Zen400, Zen800期間はミニバル―ン領域を除外した。
- 宇宙線ミューオンによるイベントを除外した。
- ・1つの先発事象に対して1つの後発事象が対応するようなイベントを探索した。

超新星ニュートリノの選定条件

・2つの逆ベータ崩壊事象間の時間差が10秒以内のものを超新星ニュートリノと仮定した。

バックグラウンドの見積もり

- 本研究のバックグラウンドとなるのは、 「超新星ニュートリノ以外によって引き起こされた 遅延同時計測イベントの、2個以上のクラスターが、 10秒以内に観測されたもの(accidental cluster)」
- ・遅延同時計測(Delayed Coincidence)の 期待される総イベント数は、

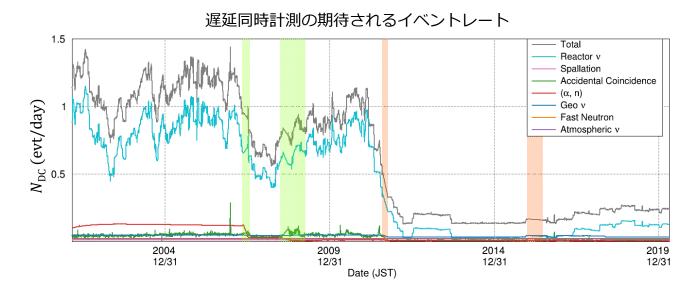
3119.08 DC/ 5082.83 days

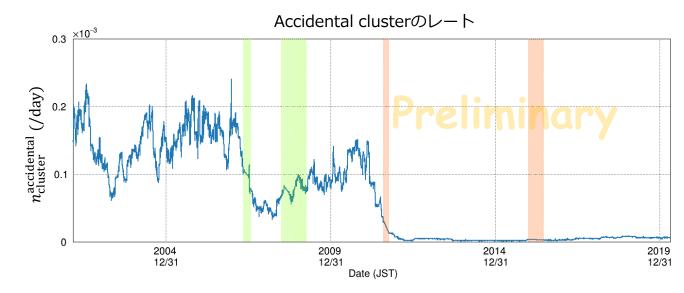
- Accidental clusterの数・頻度をrunごとに見積 もった。
 - ➤総accidental cluster数:

$$n_{\text{cluster}}^{\text{accidental}} = 0.3313$$

▶平均accidental cluster頻度:

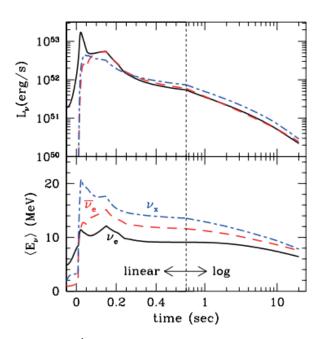
$$6.518 \times 10^{-5} \, \text{day}^{-1} = 0.02381 \, \text{yr}^{-1}$$

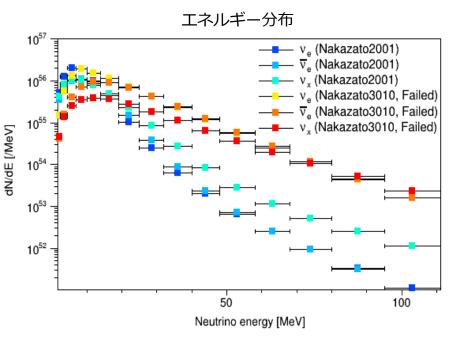


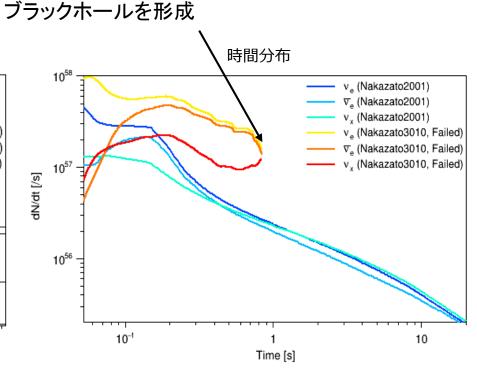


観測可能距離:使用モデル

・中里モデル 🖪







モデル:

 $M_{init} = 13 M_{solar}, Z = 0.02, t_{revive} = 100 \text{ms}$

M_{init} (initial mass): 重力崩壊時の恒星の質量

Z (metallicity): 天体に含まれるH、He以外の元素の割合

 t_{revive} (shock revival time): 失速した衝撃波が復活するまでの時間

モデル:

 $M_{init} = 20 M_{solar}, Z = 0.02, t_{revive} = 100 \text{ms}$ $M_{init} = 30 M_{solar}, Z = 0.004$

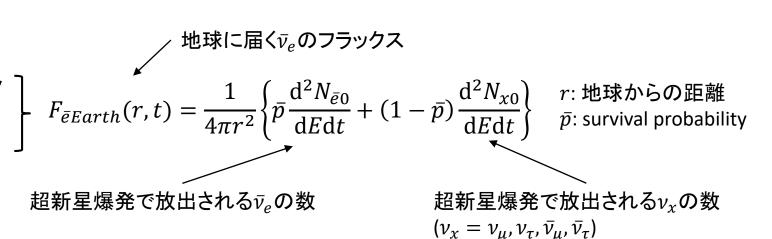
[3] K. Nakazato, et al. 2013, Astrophys. J. Supp. 205, 2

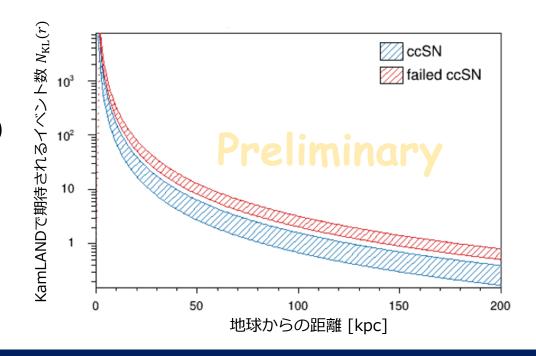
観測可能距離: 観測イベント数

- ・以下を考慮
 - ▶ 超新星内での物質効果によるニュートリノ 振動
 - ▶ 地球への伝播によるフラックスの減衰
 - > 逆ベータ崩壊の反応断面積
 - ➤ KamLANDでの検出効率
 - Livetime ratio
 - > ターゲット陽子数

$$N_{KL}(r) = \eta_{\mathrm{livetime}} \mathcal{N}_{\mathrm{target}} \int \mathrm{d}t \mathrm{d}E \, F_{\bar{e}Earth}(r,t) \sigma_{IBD}(E) \epsilon_{eff}(E)$$
 Kamlandで期待される $\bar{\nu}_e$ のイベント数

• KamLANDで実際に観測されるイベント数は N_{KL} を期待値とするポアソン分布に従う。





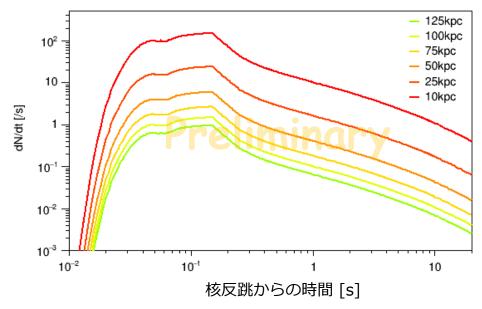
観測可能距離:結果

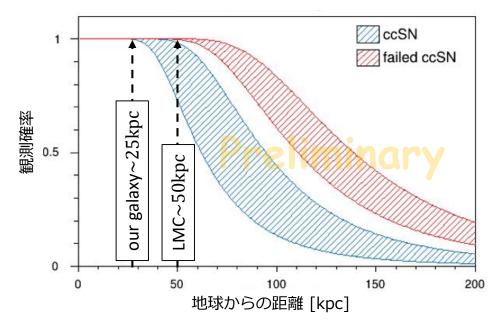
- 各モデルごとに、イベント数の時間変化を観測されるイベントの確率分布関数(PDF)と考えた。
- ・前のスライドのポアソン乱数で生成した観測イベント数をPDFに従って発生させ、試行回数に対する10秒以内に2イベント以上(1cluster) 観測された回数の割合を観測確率とした。
- ・観測確率が95%以上になる範囲を観測可能距離とした。 モデルの不定性を考慮すると、

観測可能距離 ≤ 36 – 56kpc for Supernova ≤ 65 – 82kpc for Failed Supernova (preliminary)

25kpc以内(天の川銀河)については観測確率は99%以上

KamLANDでイベント数の時間変化(中里モデル2001)





探索結果

- KamLANDで観測された遅延同時計測イベントの時間差は右図のようになった。
 - ▶ 観測されたcluster数を0と仮定

$$n_{\rm cluster} = 0$$

➤ バックグラウンドの見積もりから期待されるcluster数

$$n_{\text{cluster}}^{\text{accidental}} = 0.3313$$

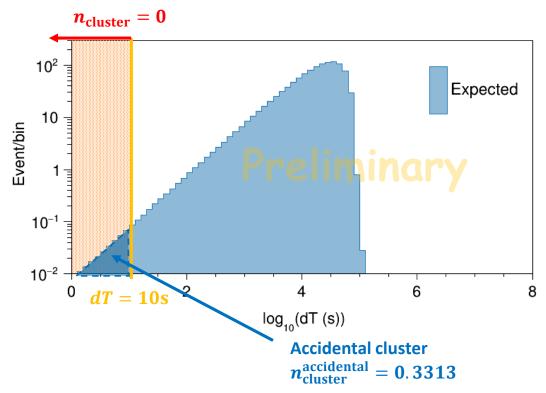
• KamLANDで超新星ニュートリノが観測される数の90%信頼度の上限値は、

$$n_{
m cluster} < 2.105$$
 (Feldman-Cousins)

・したがって、超新星爆発の頻度の90%信頼度の上限値は、

※観測イベント数: 2988DC / 5082.83days

超新星ニュートリノ候補



$$R_{\rm ccSN} < 0.1513 \, \rm yr^{-1}$$

星形成率(Star Formation Rate: SFR)

• 超新星爆発の頻度 $R_{\text{ccSN}}(z)$ はSFR $\psi_{\text{SFR}}(z)$ と関係づけられる[4]。

$$R_{\text{ccSN}}(z) = \psi_{\text{SFR}}(z) \times \frac{\int_{m_{\text{l}}^{cc}}^{m_{\text{u}}^{cc}} \phi_{\text{IMF}}(m) dm}{\int_{m_{\text{l}}}^{m_{\text{u}}} m \phi_{\text{IMF}}(m) dm} \equiv \psi_{\text{SFR}}(z) \times k_{\text{ccSN}}$$

 ϕ_{IMF} : Initial Mass Function

 $\phi_{\text{IMF}}(m)$ dmが質量m-m+dmの星の数を表すように定義

k_{ccSN}: 超新星爆発の頻度と星形成率の間のscaling factor

(number fraction of stars per unit mass)

・期待される k_{ccSN} の範囲は、

$$k_{\text{ccSN}} = (0.0068 - 0.0088) M_{\odot}^{-1}$$
 [5]

・ (天の川銀河の)天体観測から許される $\psi_{SFR}(z)$ の範囲は、

$$\psi_{\rm SFR}(z) = (1-4)M_{\odot} {\rm yr}^{-1}$$
 [6][7][8][9][10]

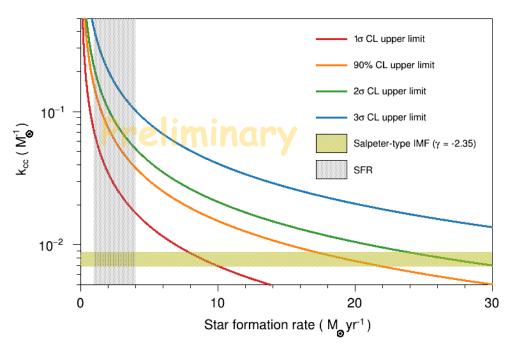
・ 今回の探索結果からSFRの上限値をつけることができる。90% (68.3%) 信頼度の上限値は

$$\psi_{\rm SFR}(z) < 17.2 - 22.2 \ (7.9 - 10.2) M_{\odot} {\rm yr}^{-1}$$

m: 星の質量

 $m_{
m l}$ $-m_{
m u}$: IMFの質量の範囲

 $m_{
m l}^{cc} - m_{
m u}^{cc}$: ccSNの質量の範囲



- [4] Botticella, M. T. et al, 2012
- [5] Salpeter, 1955
- [6] McKee & Williams, 1997
- [7] Murray & Rahman, 2009
- [8] Robitaille & Whitney, 2010
- [9] Chomiuk & Povich, 2011
- [10] Davies et al, 2011

中性カレント反応

• ニュートリノが12Cに衝突することで12Cの励起状態となり、基底 状態に戻るときに15.1MeVのガンマ線が放出される。

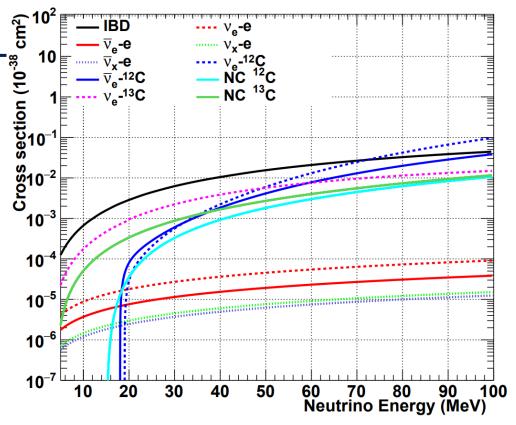
$$\nu + {}^{12}C = \nu + 12C^*$$

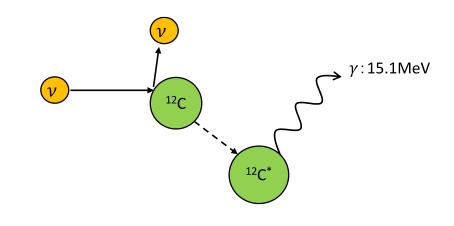
→ 全フレーバーのニュートリノに感度がある反応

単一エネルギーのガンマ線であるため、エネルギースペクトルに ピークの構造が見えることが期待される。

→ イベントを探しやすい

- ・反応断面積が逆ベータ崩壊反応に比べて1桁ほど小さい。感度のあるフレーバーの数を考慮すれば逆ベータ崩壊反応と同程度か?
- KamLANDではこの反応を詳細に見た先行研究がないため、シミュレーションによるエネルギースケールの評価が必要となる。
- 15.1MeVより大きいエネルギーの全てのニュートリノに感度があるため、 将来的には超新星以外のニュートリノ源についても議論することが可能。





イベント選定条件

- ・データ期間: 2002/3/9-2018/4/16
- 体積によるカット条件: $r \leq 450 \, \text{cm}$ 、Zen400期間はミニバルーン領域を除外
- 宇宙線ミューオンによるイベント、及びミューオンによる原子核破砕で生じるイベントを除外
- ・遅延同時計測による判別が可能な逆ベータ崩壊イベント、214BiPo/212BiPoイベントを除外

Q値が高く中性カレント反応のエネルギー範囲に被り、寿命が長く除去しにくい8Liや8Bが今回の探索の主なバックグラウンドとなりうる。

TABLE V. Summary of the neutron and isotope production yields from muon-initiated spallation in KamLAND. The results of the FLUKA calculation include corrections for the muon spectrum and the μ^+/μ^- composition of the cosmic-ray muon flux.

	Lifetime in	Radiation energy (MeV)	Yield (× $10^{-7}\mu^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^2$)			Fraction from showering μ (%)	
	KamLAND LS		Ref. [10]	FLUKA calc.	This measurement	This measurement	
n	207.5 μs	2.225 (capt. γ)	_	2097 ± 13	2787 ± 311	64 ± 5	
^{12}B	29.1 ms	$13.4 (\beta^-)$	_	27.8 ± 1.9	42.9 ± 3.3	68 ± 2	
12N	15.9 ms	$17.3 (\beta^+)$	_	0.77 ± 0.08	1.8 ± 0.4	77 ± 14	
⁸ Li	1.21 s	$16.0 (\beta^- \alpha)$	1.9 ± 0.8	21.1 ± 1.4	12.2 ± 2.6	65 ± 17	
^{8}B	1.11 s	$18.0 (\beta^+ \alpha)$	3.3 ± 1.0	5.77 ± 0.42	8.4 ± 2.4	78 ± 23	
⁹ C	182.5 ms	$16.5 (\beta^{+})$	2.3 ± 0.9	1.35 ± 0.12	3.0 ± 1.2	91 ± 32	
⁸ He	171.7 ms	$10.7 (\beta^- \gamma n)$	$\{1.0 \pm 0.3$	0.32 ± 0.05	0.7 ± 0.4	76 ± 45	
⁹ Li	257.2 ms	$13.6 (\beta^- \gamma n)$	1.0 ± 0.3	3.16 ± 0.25	2.2 ± 0.2	77 ± 6	
¹¹ C	29.4 min	$1.98 (\beta^+)$	421 ± 68	416 ± 27	866 ± 153	62 ± 10	
10 C	27.8 s	$3.65 (\beta^{+} \gamma)$	54 ± 12	19.1 ± 1.3	16.5 ± 1.9	76 ± 6	
¹¹ Be	19.9 s	$11.5 (\beta^{-})$	<1.1	0.84 ± 0.09	1.1 ± 0.2	74 ± 12	
⁶ He	1.16 s	$3.51(\beta^{-})$	7.5 ± 1.5	12.08 ± 0.83	_	_	
⁷ Be	76.9 day	$0.478 (EC \gamma)$	107 ± 21	105.3 ± 6.9	_	_	

[11] S.Abe, et al, 2010

シミュレーションによる評価

各期間ごとにKamLANDのジオメトリを再現したGeant4シミュレーションに よってエネルギースケールを評価した。

期間

□ LS純化前 2002/3/9—2007/5/12

□ LS純化後 2009/4/7—2011/8/13

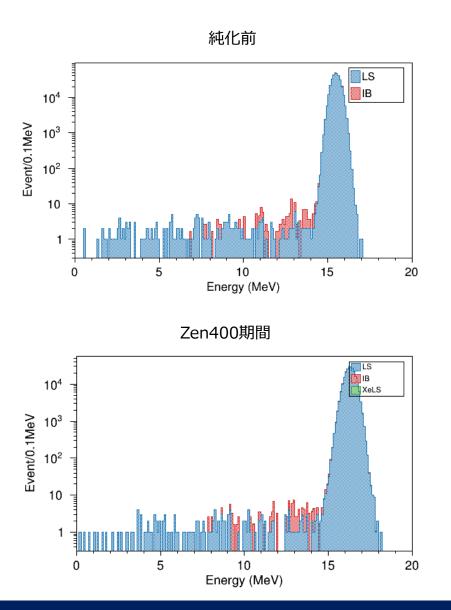
□ Zen400期間 2011/10/12—2015/10/27

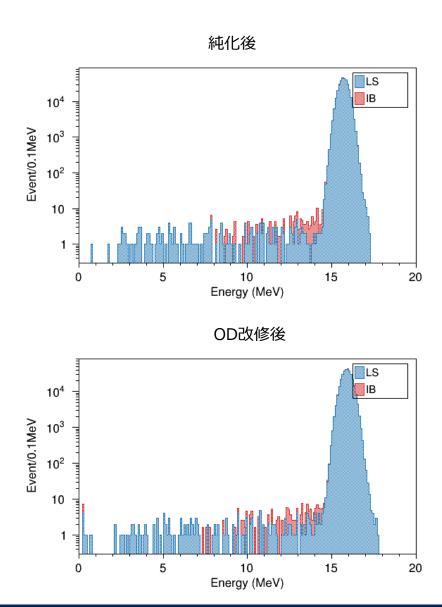
□ OD改修後 2016/6/22—2018/4/16

バッファオイル LS XeLS(Zen400期間のみ) 000000000

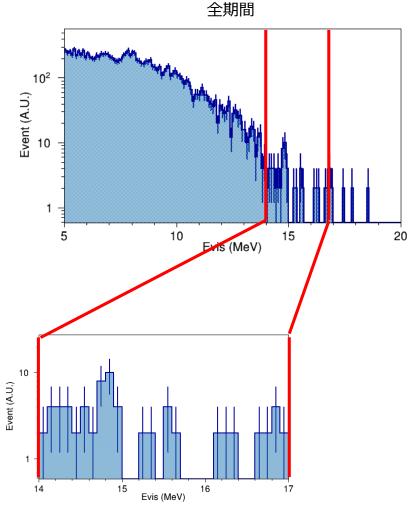
15MeVのγ線をKamLANDの液体シンチレーター、バッファオイル層で 一様等方に発生させた。

シミュレーションによる評価



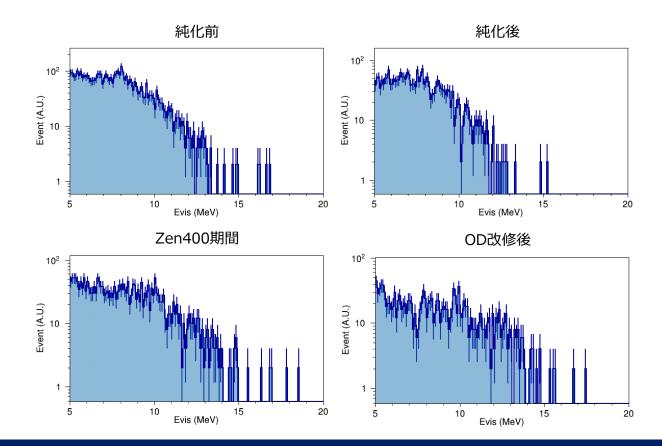


KamLANDでのsingleイベント



- Zen400期間に15MeV付近に数イベント確認された。
- 15MeV付近のvertex分布に半径依存は無い。

中性カレント反応にも半径依存は無いため、このイベントである可能性がある。



まとめと展望

逆ベータ崩壊反応を用いた超新星ニュートリノの探索

- KamLANDでの遅延同時計測イベントレートからlivetime中でのaccidental burstの個数を計算した。
- 中里モデルを用いて観測確率・可能距離の計算を行った。

≤ 36–56kpc for Supernova ≤ 65–82kpc for Failed Supernova

• KamLANDのデータセット中に超新星ニュートリノイベントは発見されなかったと仮定して、超新星 爆発の頻度に90%信頼度の上限値をつけた。

$$R_{\rm ccSN} < 0.1513 \ {\rm yr}^{-1}$$

・上の結果から星形成率に90% (68.3%)の上限値をつけた。

$$\psi_{\rm SFR}(z) < 17.2 - 22.2 (7.9 - 10.2) M_{\odot} {\rm yr}^{-1}$$

中性カレント反応を用いた超新星ニュートリノの探索

- バックグラウンドモデルを作成し、KamLANDの実イベントをフィッティングする。
 - → 中性カレント反応が何イベントあったのか見積もる。

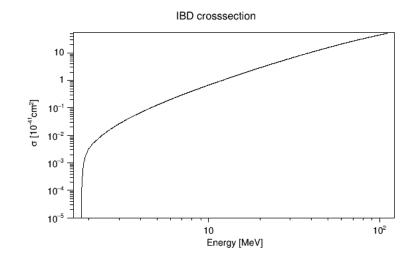
考慮すべきバックグラウンド

- ✓ 原子核破砕によって生成した原子核の崩壊によるイベント
- ✓ 太陽ニュートリノ
- ✓ 大気ニュートリノ
- ✓ 検出器の構造物からくる外部ガンマ線 …etc
- イベント選定条件を最適化する。
- ・逆べ一タ崩壊と同様に、モデルを用いた超新星ニュートリノイベント数の見積もる。
- 最終的には、超新星ニュートリノの観測可能距離・超新星爆発頻度の上限値をアップデートする。

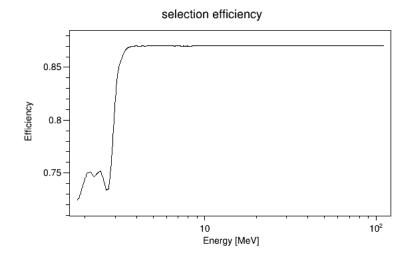
Backup

N_{KL} の計算に用いた値

• IBD cross section σ_{IBD}



• Selection efficiency ϵ_{eff}



- Livetime ratio $\eta_{\mathrm{livetime}} \sim 87\%$
- Number of target proton $\mathcal{N}_{target} = (5.98 \pm 0.13) \times 10^{31}$

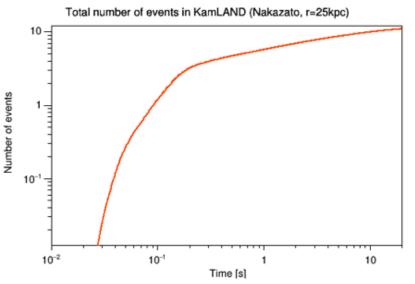
Survival probability

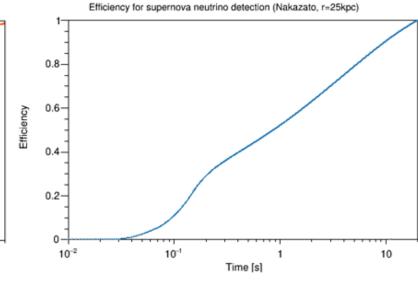
$$\bar{p} = \begin{cases} 0.676 & \text{(normal mass hierarchy)} \\ 0.0234 & \text{(inverted mass hierarchy)} \end{cases}$$

[12] Particle Data Group 2014

超新星ニュートリノのイベント数と検出効率の変化 efficiency(t) = N(t)/N(20s)

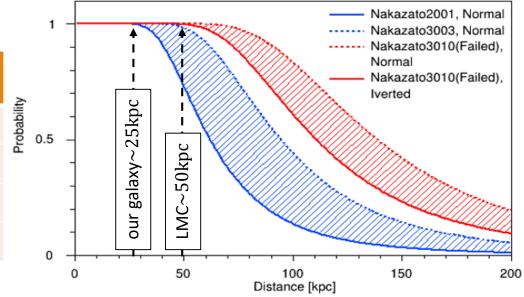
Time[s]	N(t)	Efficiency(t)	
0.1	1.19	0.108	
0.5	4.68	0.425	
1	5.73	0.521	
5	8.68	0.789	
10	9.96	0.905	
15	10.6	0.964	
19	10.9	0.994	





観測可能距離

Detection probability	Nakazato2001, Normal	Nakazato3003, Normal	Nakazato3010, Normal	Nakazato3010, Inverted	
99%	31kpc	47kpc	69kpc	55kpc	
95%	36kpc	56kpc	82kpc	65kpc	
68%	52kpc	82kpc	117kpc	93kpc	
50%	61kpc	94kpc	138kpc	110kpc	



dT最小のイベント

• Unixtime:

 $1064417175 \& 1064417216 (dT_{prompt} = 41s)$

Date: 2003-9-25 00:26:15 (JST)

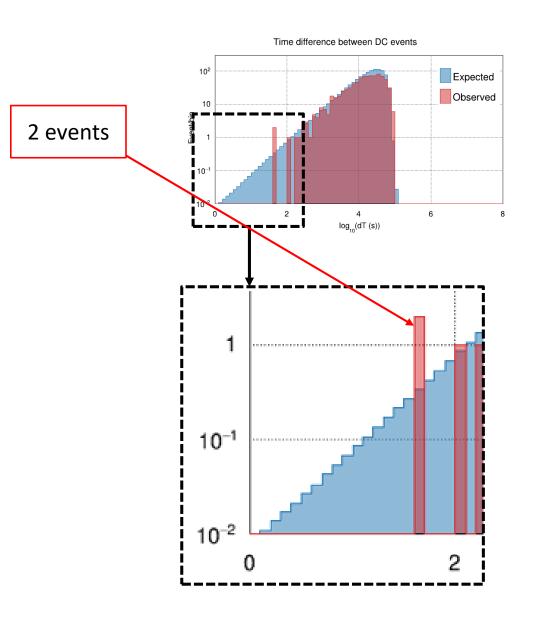
• Unixtime:

1196301395 & 1196301437 ($dT_{prompt} = 42s$)

Date: 2007-11-29 10:56:35 (JST)

異なるtime windowでのaccidental burst数

Time window[s]	Number of accidental bursts		
1.26	0.0422		
5.01	0.166		
10	0.331		
15.8	0.526		
20.0	0.660		
100	3.31		



他の検出器の探索結果

detector	KamLAND	Super-K _[2]	LVD [1]	SNO _[13]	MiniBooNE [14]	Baksan [15]
Searching period	May 2002 –Jul. 2020	May 1996 –Jul. 2001 & Dec. 2002 –Oct. 2005	June 1992 –Dec. 2013	(I)Nov. 1999 -May 2001 & (II)Jul. 2001 -Aug. 2003	Dec. 2004 –Jul. 2008	June 1980 –Dec. 2018
$E_{ u}$ threshold	1.8 MeV	8 MeV	12 MeV	6 MeV	11 MeV	9–14 MeV
SN upper limit	0.15 /yr	0.32 /yr	0.114 /yr		0.69 /yr	0.070 /yr
Detectable range	36–56 kpc 65–82 kpc (Failed SN)	100 kpc	25 kpc	(I)60 kpc (II)70 kpc	13.5 kpc	25 kpc

^[13] Aharmim et al, 2011

^[14] Aguilar-Arevalo et al, 2010

^[15] Novoseltsev et al, 2020