

KamLANDにおける超新星ニュートリノの探索

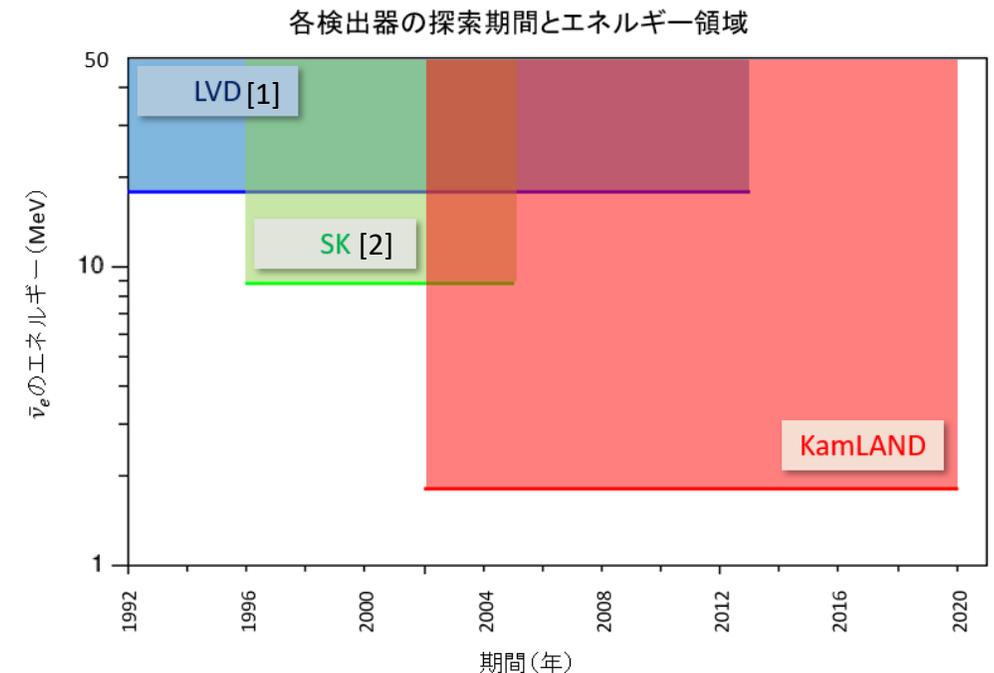
東北大学ニュートリノ科学研究センター 永塚穂里

Introduction

- 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、ニュートリノそのものの質量階層構造の情報が得られる。
- KamLANDのデータセット内に超新星ニュートリノによるイベントがあるか探索を行う。
このデータセットは他の検出器ではまだ探索されていない期間、エネルギー領域を含んでいる。
- また、いくつかの超新星爆発によって放出されるニュートリノのモデルにおける、距離ごとの観測確率の計算も行う。

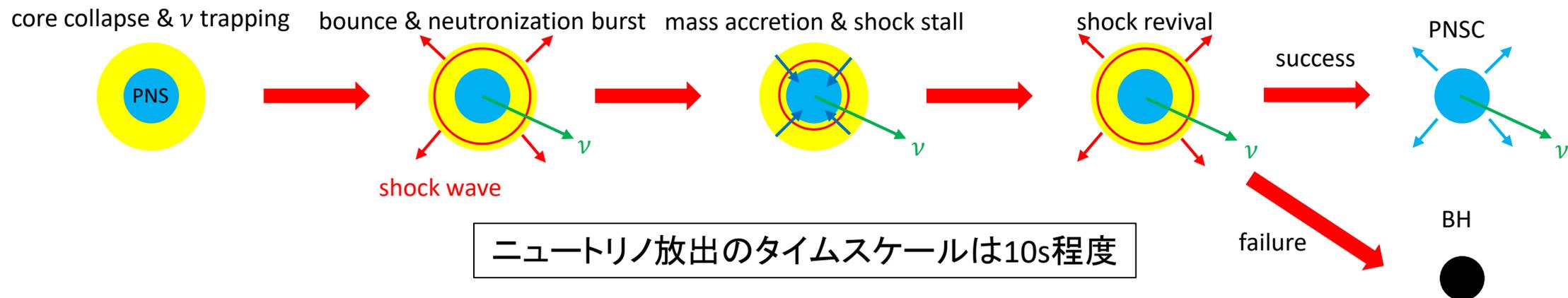
[1]N. Agafonova, et al. 2015, Astrophysical Journal, 802, 47

[2]M. Ikeda, et al. 2007, Astrophysical Journal, 669, 519



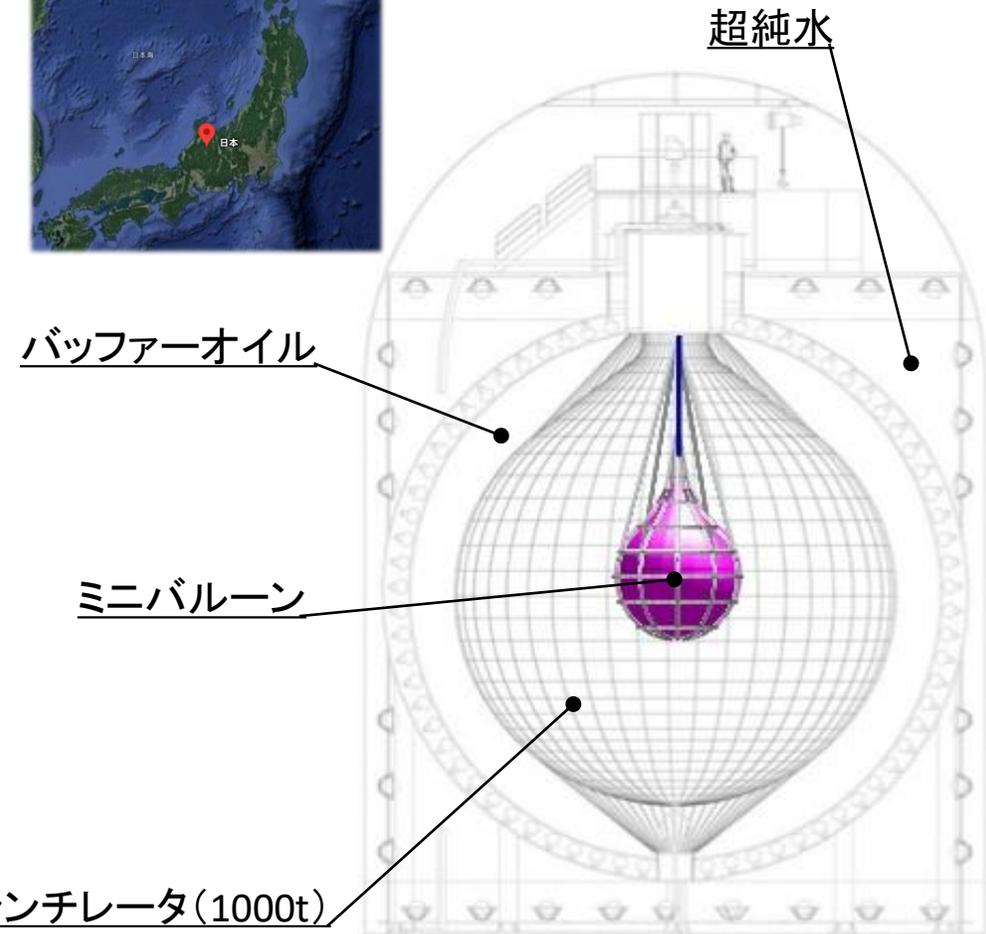
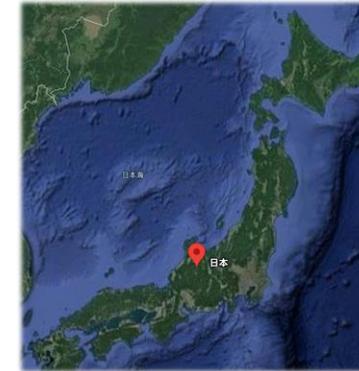
超新星爆発シナリオ

- 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。
- 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。→中性子化バースト: ν_e の放出
- その後、
 e^- 、 e^+ の消滅による ν 、 $\bar{\nu}$ のペア形成: $e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$
核子同士の散乱における制動放射: $N + N \rightarrow N + N + \nu + \bar{\nu}$ から全フレーバーのニュートリノが放出
- 質量降着によって衝撃波が失速する。その後、衝撃波が
 - 復活する→原子中性子星の冷却へ
 - 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。
- 球形の内部検出器には1000tの液体シンチレータが入った球形バルーンが吊り下げられており、その周りにはバッファーオイルで満たされている。
- 円筒形の外部検出器には超純水が満たされており、水中のチェレンコフ光を観測する。
- 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のキセノンが入ったミニバルーンが取り付けられている。



イベント選定

- 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う。

逆ベータ崩壊: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

- 右図のような逆ベータ崩壊によるイベントを遅延同時計測によって選定する。

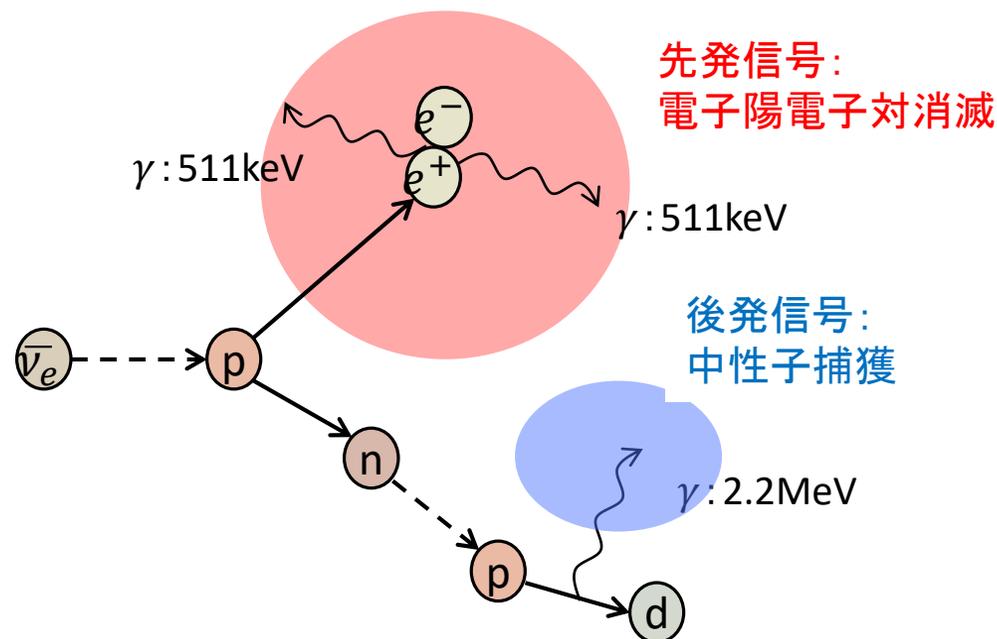
➤ $0.9 \leq E_p \leq 100\text{MeV}$

➤ $1.8 \leq E_d \leq 2.6\text{MeV}, 4.4 \leq E_d \leq 5.5\text{MeV}$

- Run 000220~016309 (2002/3/9~2020/7/17)

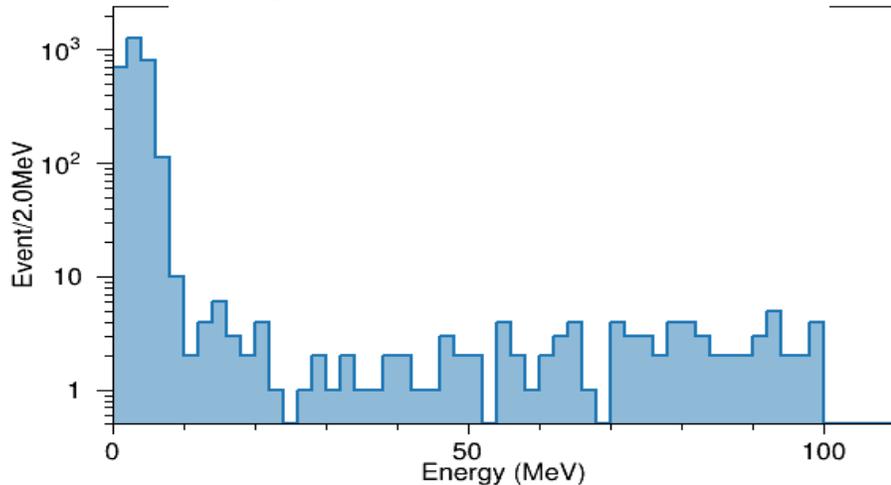
- 2イベント間の時間差が10秒以内のものを超新星ニュートリノと仮定する。

(逆ベータ崩壊の10秒以内に2イベント以上くるようなバックグラウンドは無視できるほど少ない。)

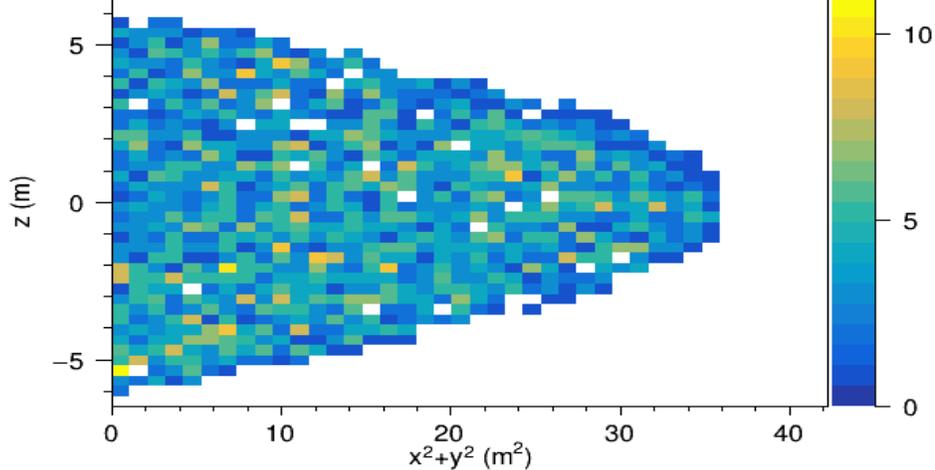


逆ベータ崩壊候補事象

先発信号のエネルギースペクトル



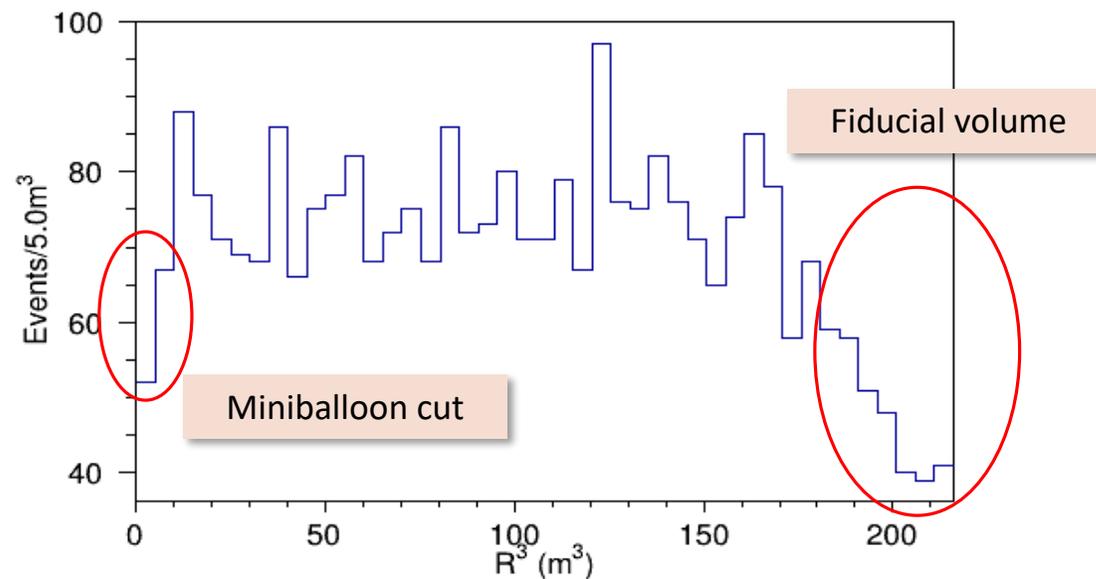
先発信号のvertex分布



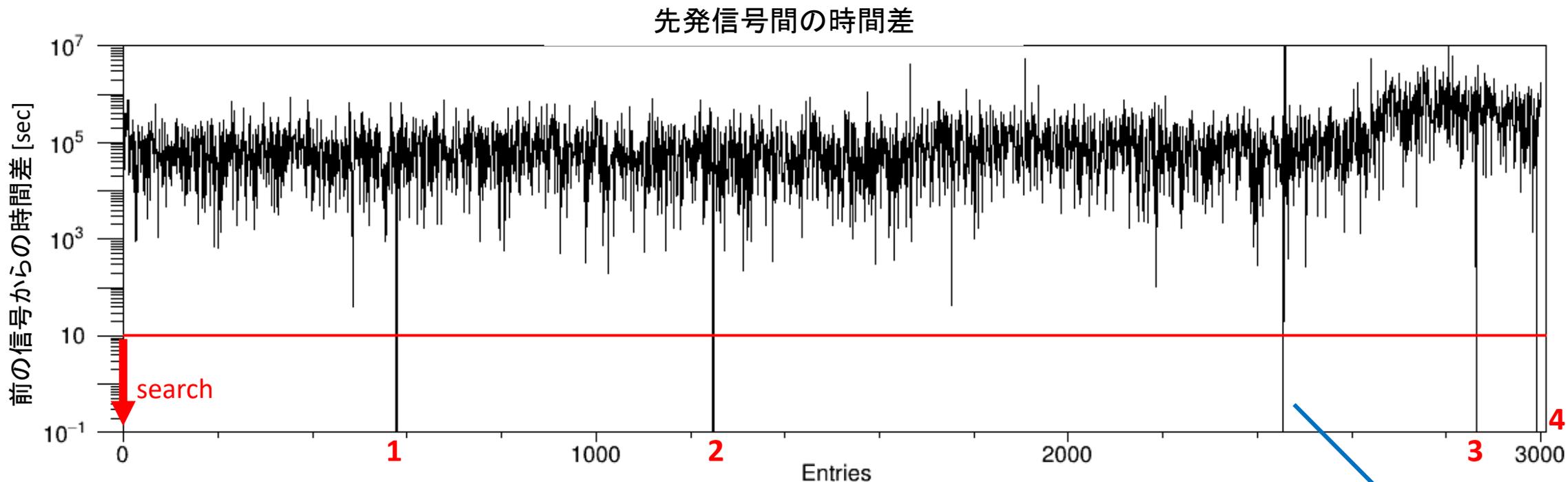
Livetime: 5001.21日、イベント数: 3001個

- vertex分布はほぼ一様であるといえる

先発信号のR³分布



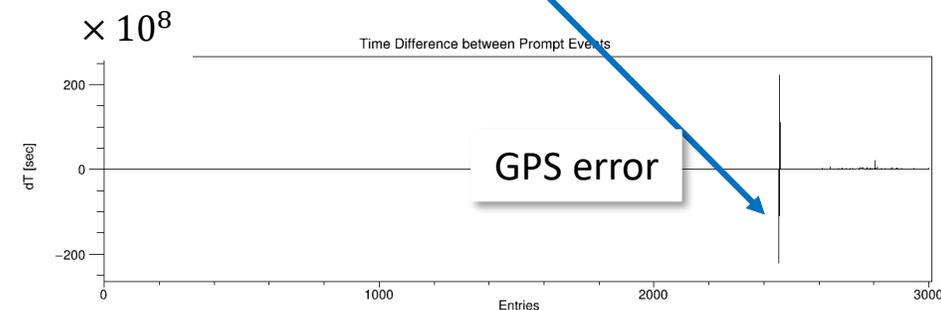
超新星ニュートリノ探索



- 2つの先発事象間の時間差が10秒以内のものを探した。



- 4つの超新星ニュートリノ候補が見つかった。



超新星ニュートリノ候補と爆発頻度

Label 1 run 3188

	DC1	DC2	DC3
Prompt event number	7848420	7848421	7848422
Delayed event number	7848423	7848423	7848423

Label 2 run 14670

	DC1	DC2
Prompt event number	3102977	3102982
Delayed event number	3103058	3103058

Label 3 run 5380

	DC1	DC2
Prompt event number	41470	41471
Delayed event number	41472	41472

Label 4 run 16026

	DC1	DC2
Prompt event number	14871479	14871519
Delayed event number	14871556	14871556

- 4つとも異なる先発事象に対して1つの後発事象が対応している→逆ベータ崩壊事象ではない
- 条件を満たす逆ベータ崩壊が0個、バックグラウンドが0個として超新星爆発の頻度の90%信頼度の上限値は、

$$\text{Rate} \leq 2.44[\text{evt/livetime}] = 0.178[\text{evt/yr}] \quad (\text{preliminary})$$

(Feldman-Cousinsの方法を用いた)

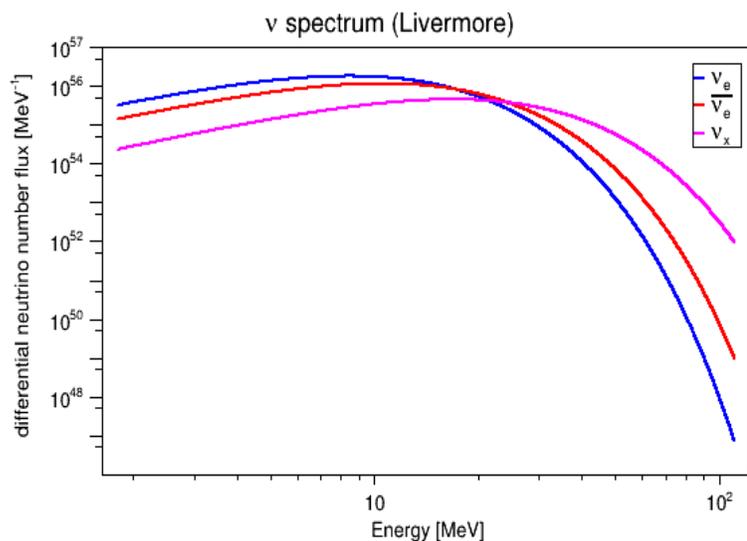
KamLANDにおける距離ごとの観測確率：使用モデル

- Livermoreモデル [3]

“pinched” Fermi-Dirac spectrum

$$\langle E_{\nu_e} \rangle = 12\text{MeV}, \quad \langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 15\text{MeV}$$

$$\langle E_x \rangle = 24\text{MeV}$$



[3] K. Kotake, et al. 2006, Rep. Prog. Phys, 69, 971

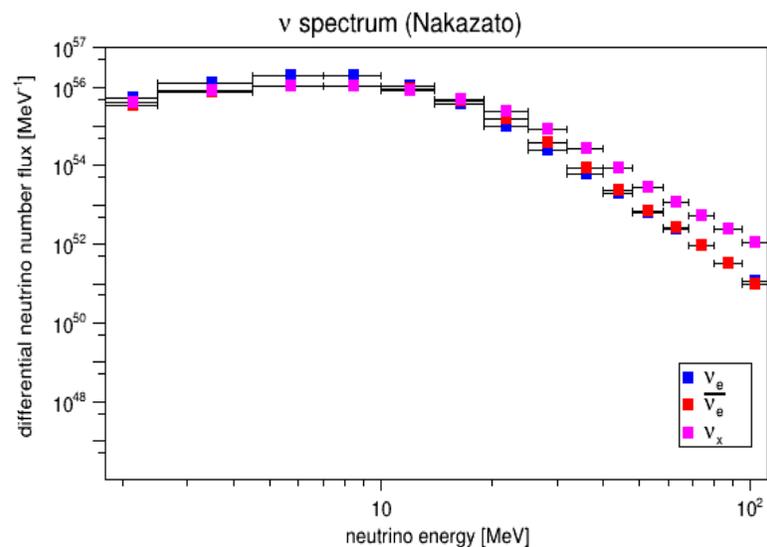
- 中里モデル [4], [5]

下図は

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

$$\langle E_{\nu_e} \rangle \cong 9.32\text{MeV}, \quad \langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle \cong 11.1\text{MeV}$$

$$\langle E_x \rangle \cong 11.9\text{MeV}$$



[4] [Supernova Neutrino Database \(tus.ac.jp\)](http://SupernovaNeutrinoDatabase.tus.ac.jp)

[5] K. Nakazato, et al. Astrophys. J. Supp. 205 (2013) 2, arXiv:1210.6841 [astro-ph.HE]

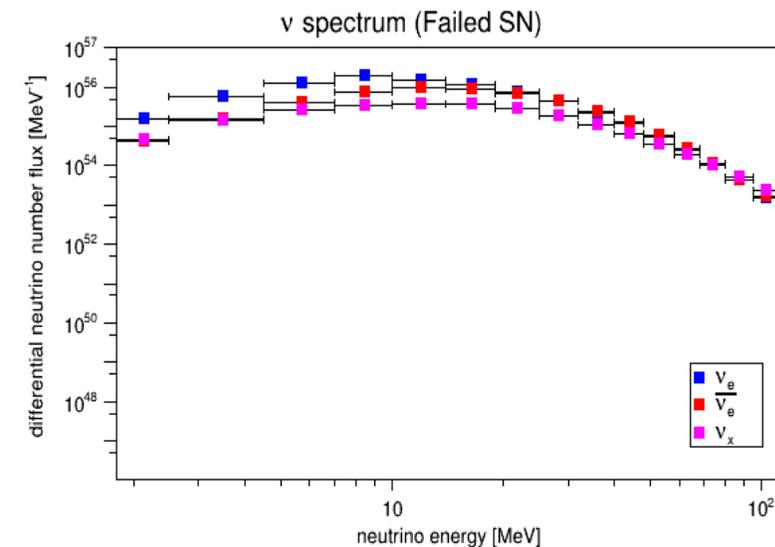
- Failed Supernova [4], [5]

EOS: Shen

$$M_{init} = 30M_{solar}, Z = 0.004$$

$$\langle E_{\nu_e} \rangle \cong 17.5\text{MeV}, \quad \langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle \cong 21.7\text{MeV}$$

$$\langle E_x \rangle \cong 23.4\text{MeV}$$



KamLANDにおける距離ごとの観測確率: 計算に用いた値

- KamLANDに到達する $\bar{\nu}_e$ のフラックスは前のページの超新星爆発で放出されるニュートリノのフラックスを F_i^0 として(超新星内の物質効果によるニュートリノ振動には断熱近似を適用)、

$$F_{\bar{\nu}_e} = \frac{1}{4\pi r^2} \{ \bar{p} F_{\bar{\nu}_e}^0 + (1 - \bar{p}) F_x^0 \}$$

Survival probability [6]C.Kato, et al. 2017, Apj

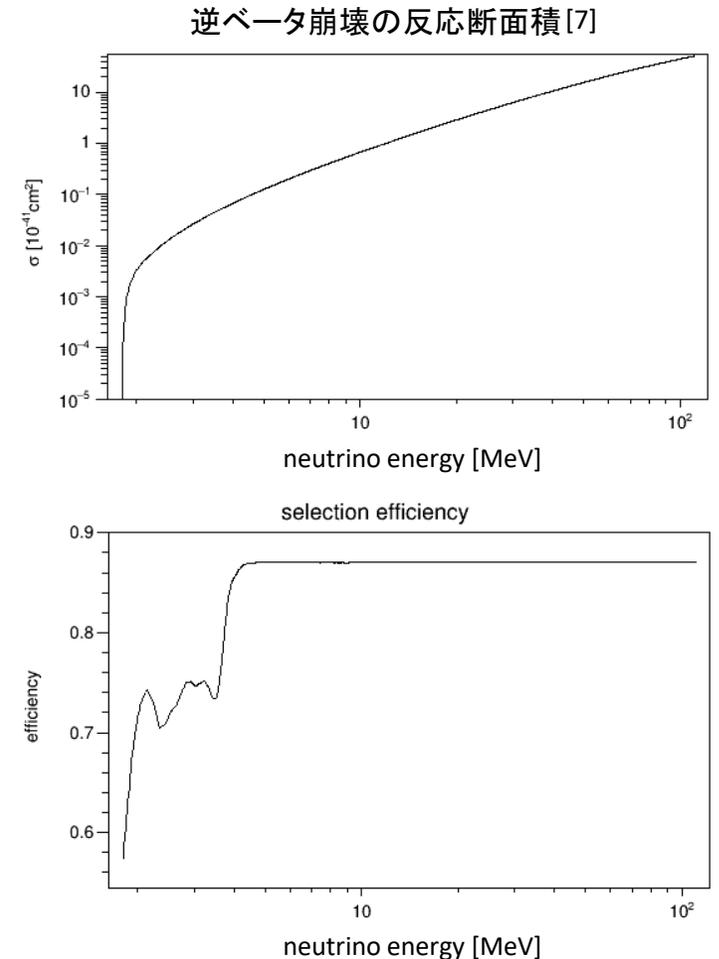
$$\bar{p} = \begin{cases} 0.676 & \text{(normal mass hierarchy)} \\ 0.0234 & \text{(inverted mass hierarchy)} \end{cases}$$

- 観測イベント数はKamLANDにおける各物理量:

- 逆ベータ崩壊の反応断面積 [7]A. Strumia, F. Vissani, 2003, Physics Letters, 564, 42
- Selection efficiency
- Livetime ratio: $\cong 87\%$
- ターゲット陽子数: $N_t = (5.98 \pm 0.13) \times 10^{31}$

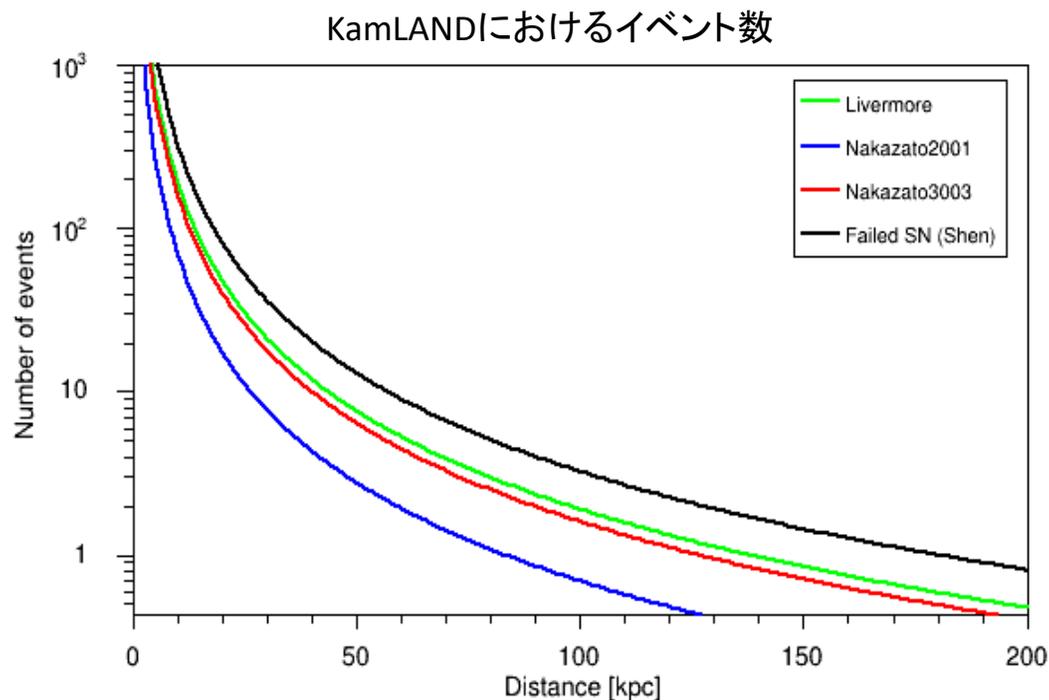
[8]A. Gando, et al. 2016, Astrophysical Journal, 829, L34

を上フラックスにかけてエネルギーで積分することで算出



KamLANDにおける観測可能イベント数

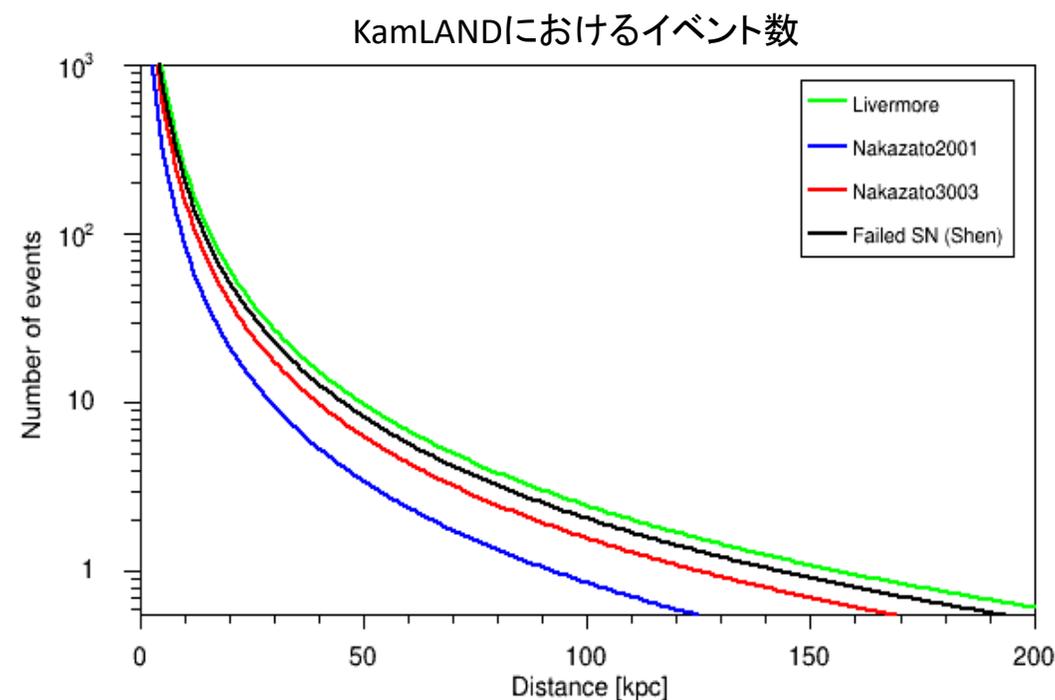
- Normal mass hierarchy



- 中里モデルについてはイベント数が最も多いものと少ないものを図示している。

- 2001: $M_{init} = 20M_{solar}$, $Z = 0.02$, $t_{revive} = 100\text{ms}$
- 3003: $M_{init} = 30M_{solar}$, $Z = 0.004$, $t_{revive} = 300\text{ms}$

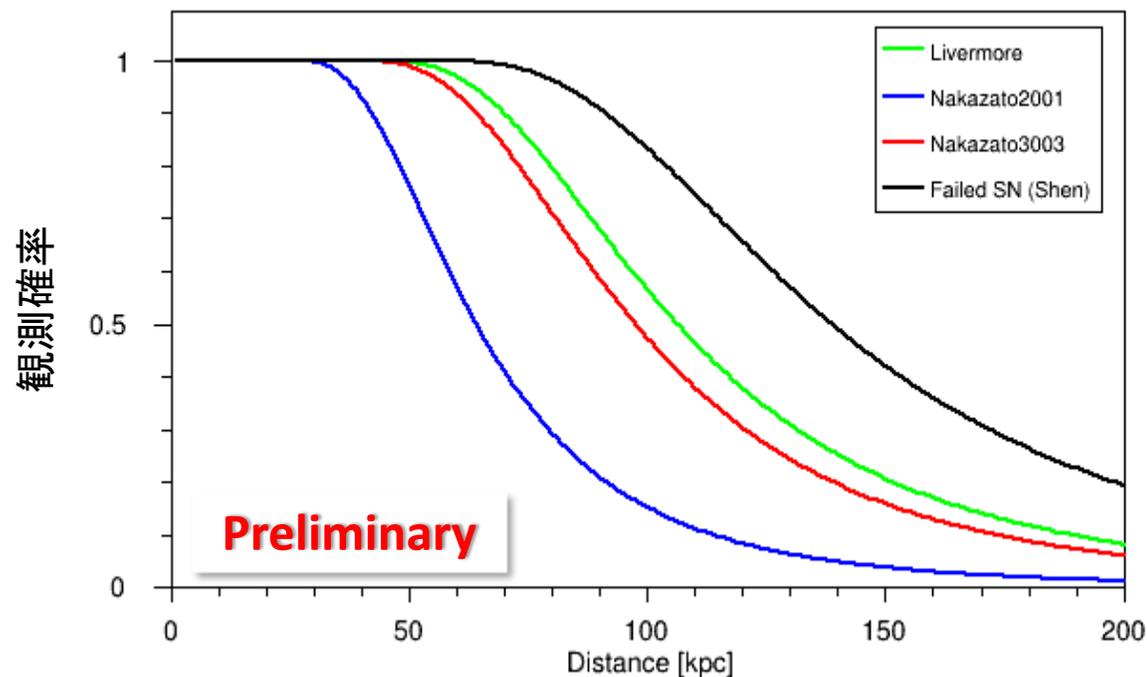
- Inverted mass hierarchy



- 距離ごとに観測イベント数を期待値とするポアソン分布を考え、2イベント以上観測される割合を観測確率とした。

KamLANDにおける距離ごとの観測確率：結果

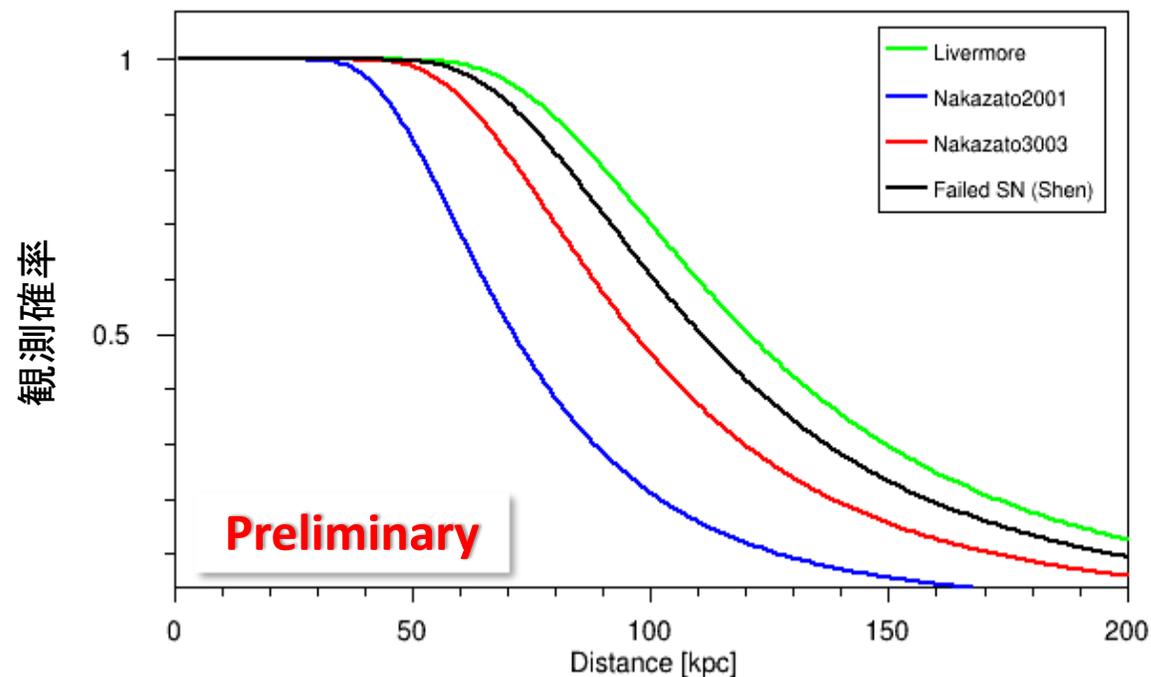
- Normal mass hierarchy



観測確率95%以上での観測可能距離 (preliminary)

Normal: $\leq 38\text{kpc}$

- Inverted mass hierarchy



Inverted: $\leq 42\text{kpc}$

summary

- KamLANDのデータセットを用いて超新星ニュートリノの探索を行った。
- 超新星ニュートリノとしては10秒以内に2個以上の逆ベータ崩壊事象を仮定した。
- 今回の探索では超新星ニュートリノ候補事象は見つからなかった。

- 探索結果から超新星爆発の頻度の上限值

$$\text{Rate} \leq 0.178 \text{ [evt/yr]} \text{ (preliminary)}$$

を得た。

- また、超新星爆発の観測可能距離としては95%以上の観測確率で $\leq 38\text{kpc}$

(normal)、 $\leq 42\text{kpc}$ (inverted)という結果を得た。(preliminary)

Our galaxy: $\sim 20\text{kpc}$
(大マゼラン星雲: $\sim 50\text{kpc}$)

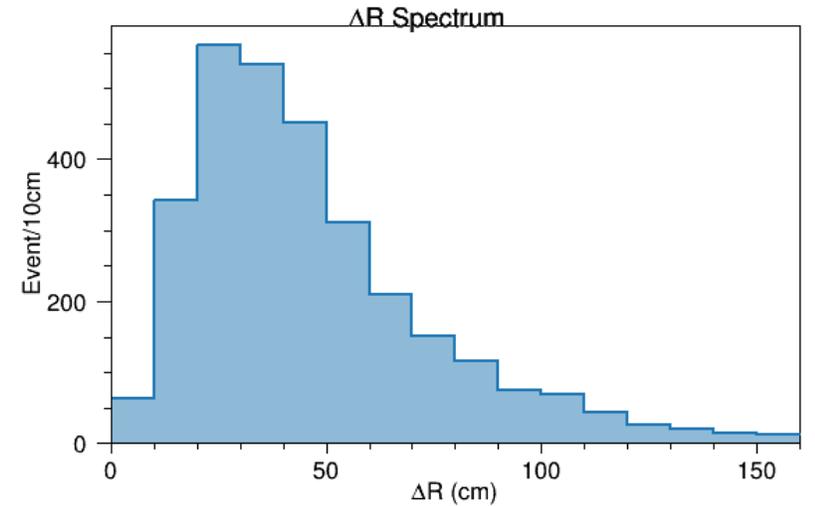
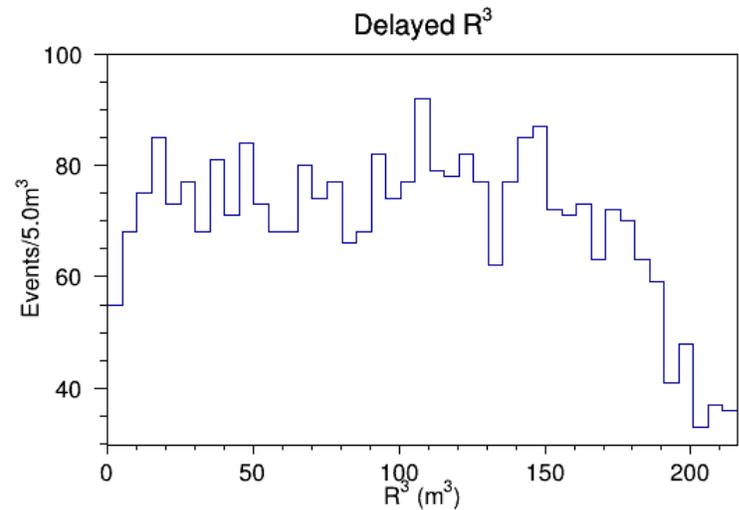
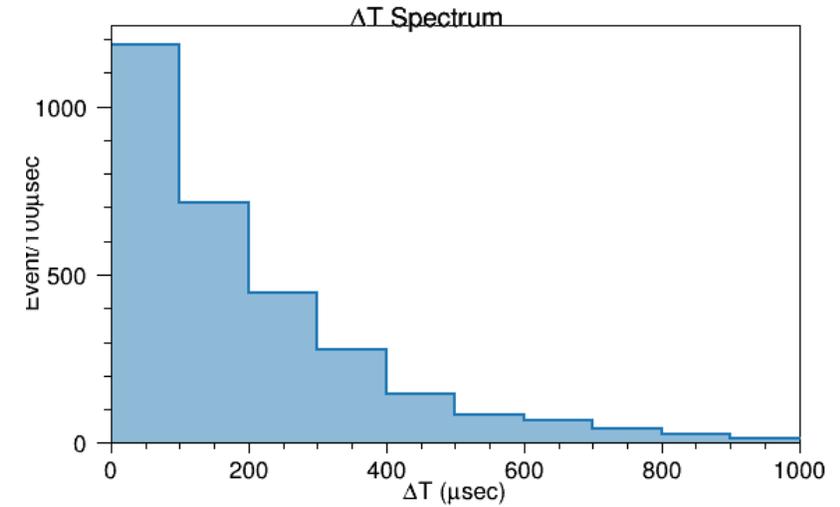
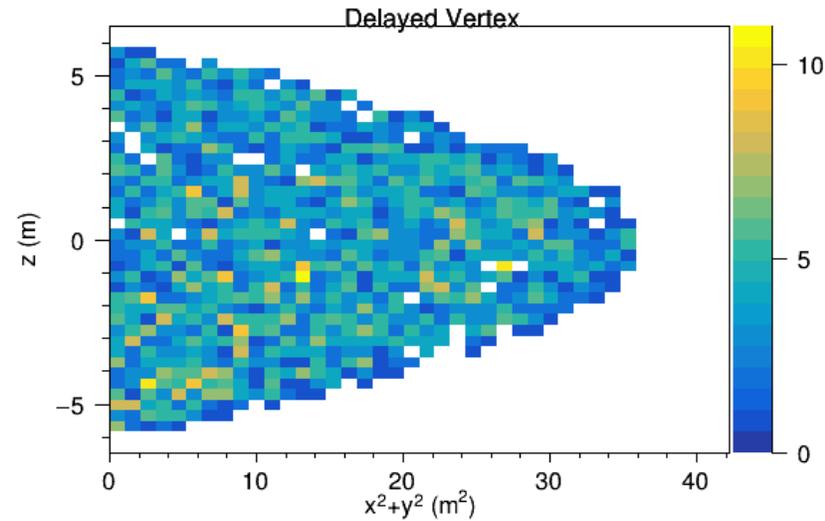
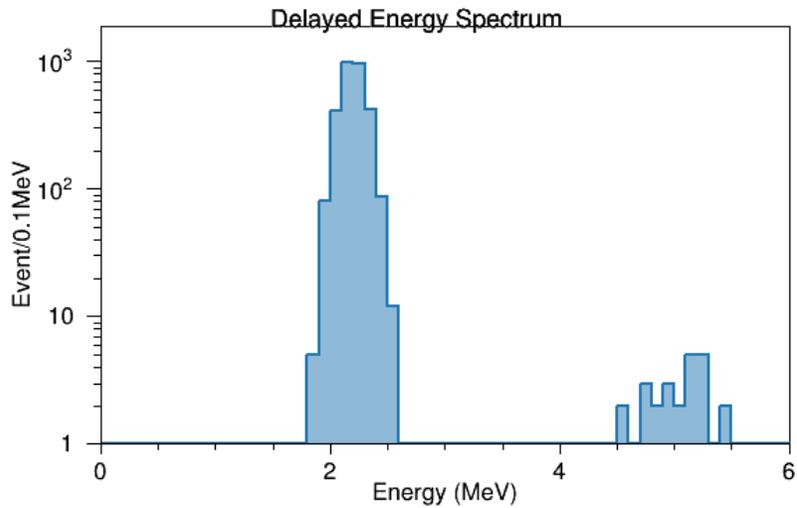
backup

イベント選定の詳細

- $r_p \leq 600\text{cm}$, $r_d \leq 600\text{cm}$
- $dR \leq 160\text{cm}$
- $0.5 \leq dT \leq 1000\mu\text{sec}$
- $0.9 \leq E_p \leq 100\text{MeV}$
- $1.8 \leq E_d \leq 2.6\text{MeV}$, $4.4 \leq E_d \leq 5.5\text{MeV}$
- Run 000220~016309 (2002/3/9~2020/7/17)
- Muon and spallation vetos
- Likelihood cut for $E_p \leq 8.5\text{MeV}$
- Neutron multiplicity ≤ 1
- Miniballoon cut

逆ベータ崩壊候補事象

Livetime: 5001.21日、イベント数: 3001個



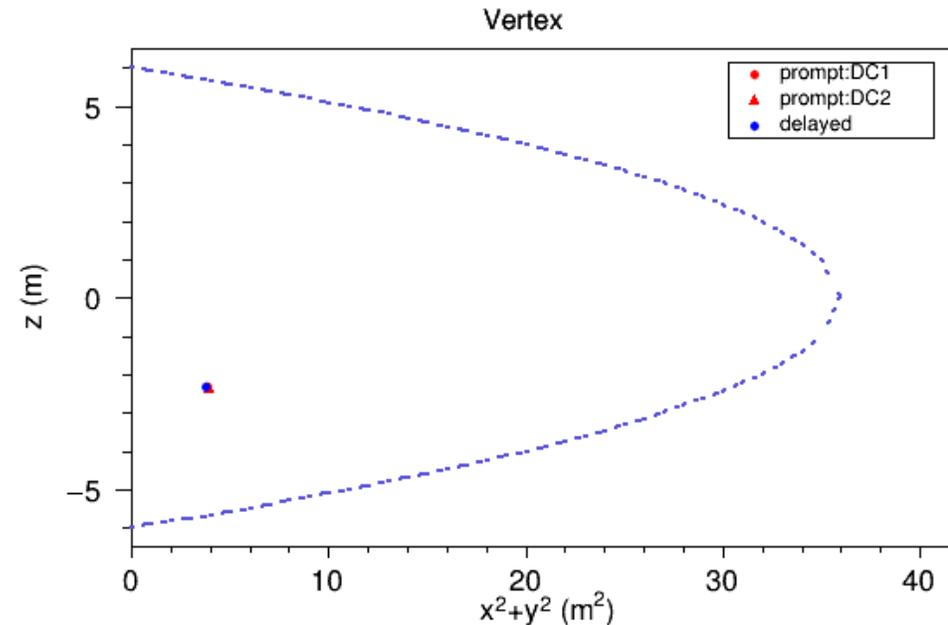
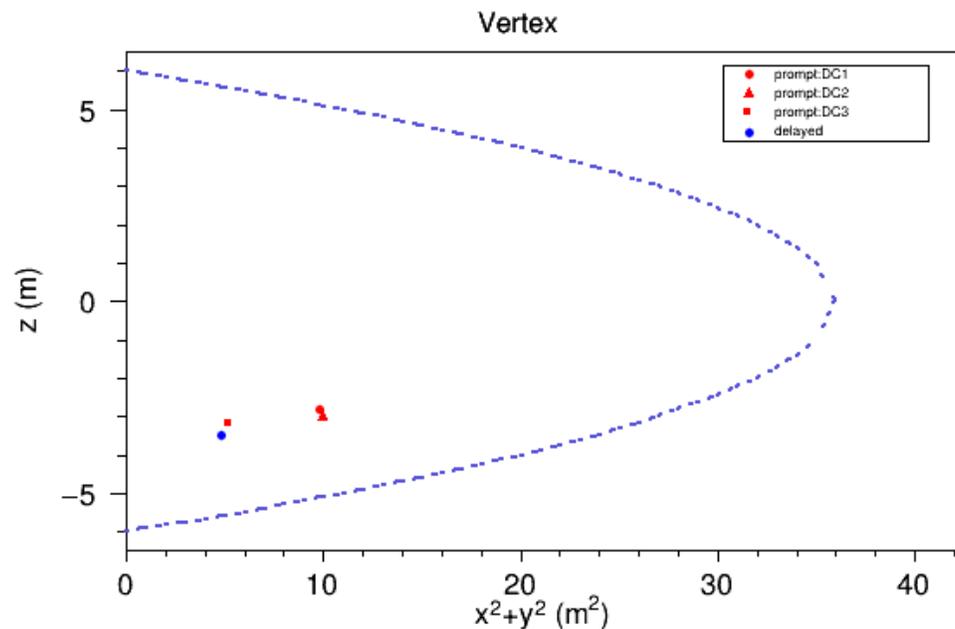
超新星ニュートリノ候補

• Label 1 run 3188

	DC1	DC2	DC3
Prompt event number	7848420	7848421	7848422
Delayed event number	7848423	7848423	7848423
E_p (MeV)	31	1.9	1.0
dT (μ sec)	63.25	59.2	33.3

• Label 2 run 5380

	DC1	DC2
Prompt event number	41470	41471
Delayed event number	41472	41472
E_p (MeV)	15	13
dT (μ sec)	164.2	163.1

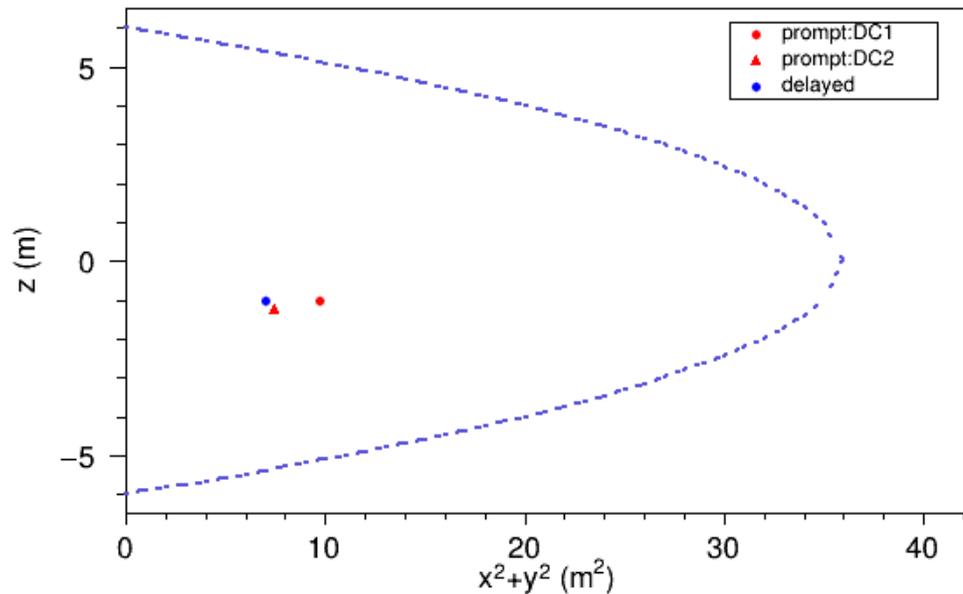


超新星ニュートリノ候補

• Label 3 run 14670

	DC1	DC2
Prompt event number	3102977	3102982
Delayed event number	3103058	3103058
E_p (MeV)	60	1.0
dT(μ sec)	79.58	75.95

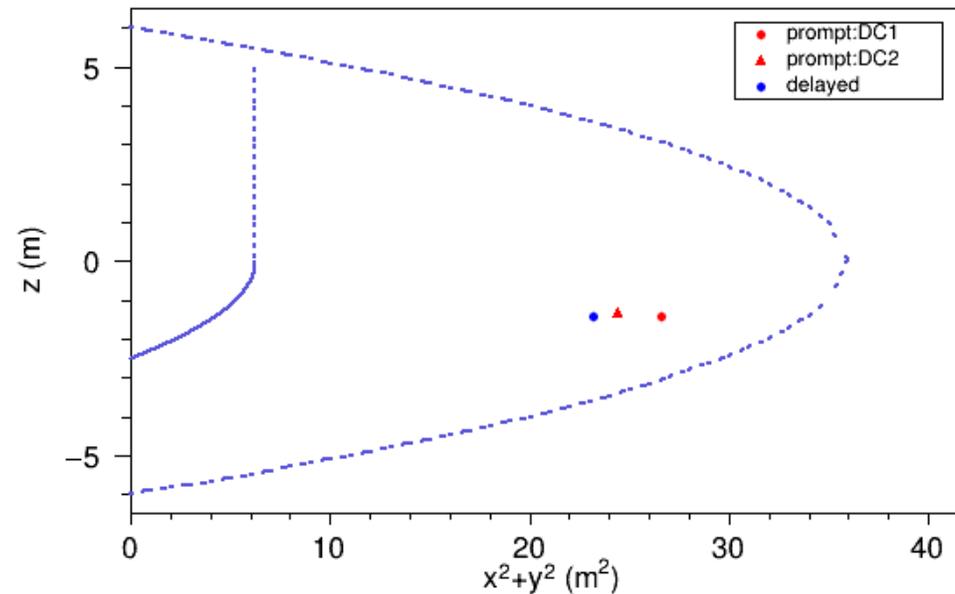
Vertex



• Label 4 run 16026

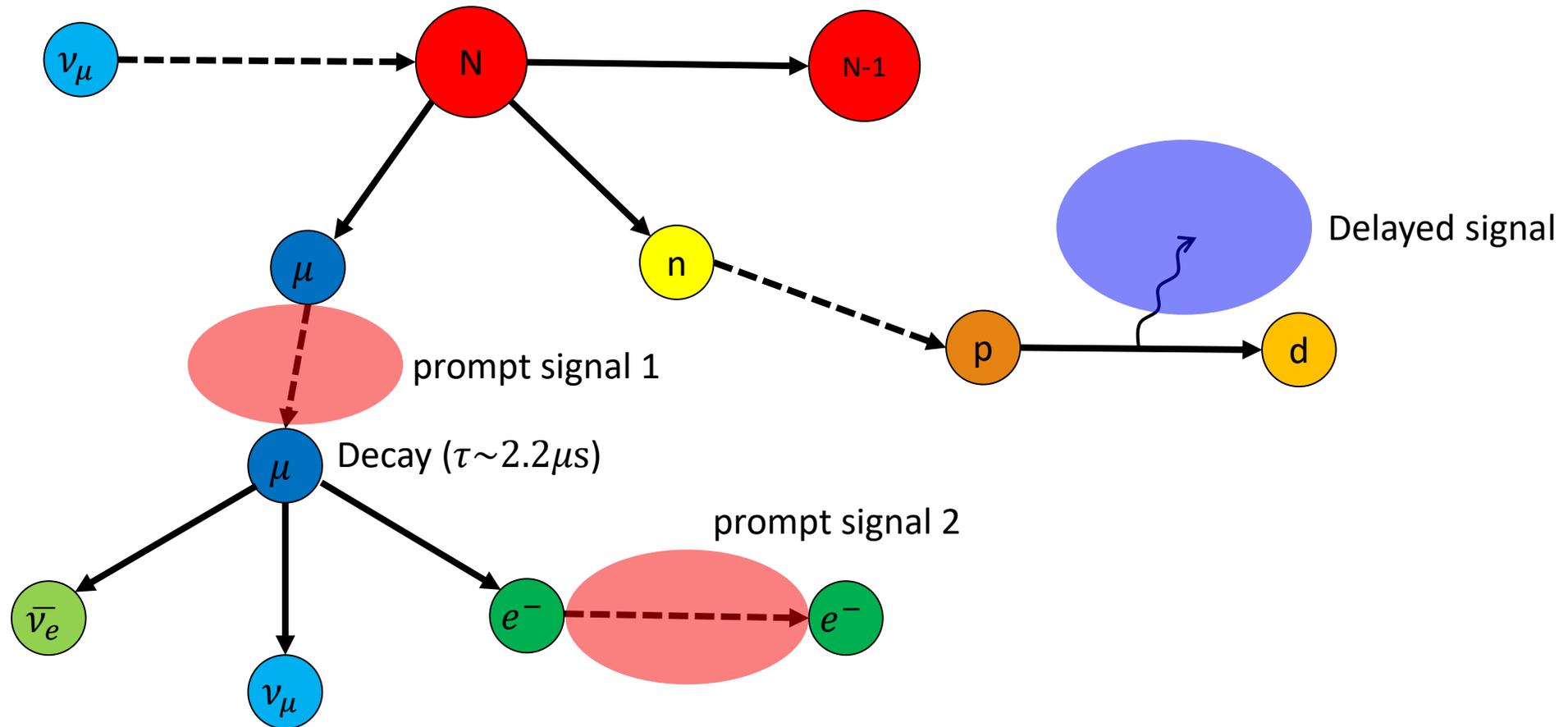
	DC1	DC2
Prompt event number	14871479	14871519
Delayed event number	14871556	14871556
E_p (MeV)	48	1.0
dT(μ sec)	71.13	58.18

Vertex



Label 2: 大気ニュートリノ?

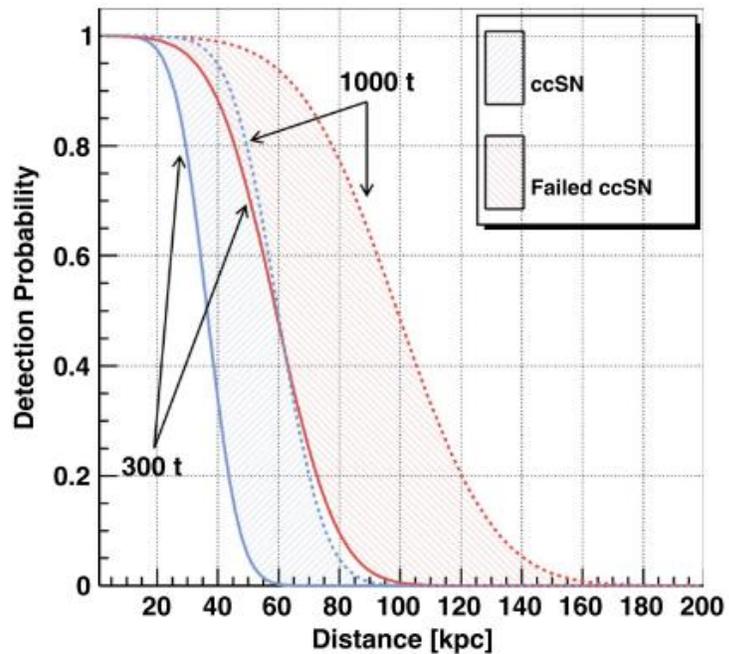
- 下図のような過程でlabel 2のようなイベントが起こったと考えられる。



参考：他の検出器との比較

- LVD [1]

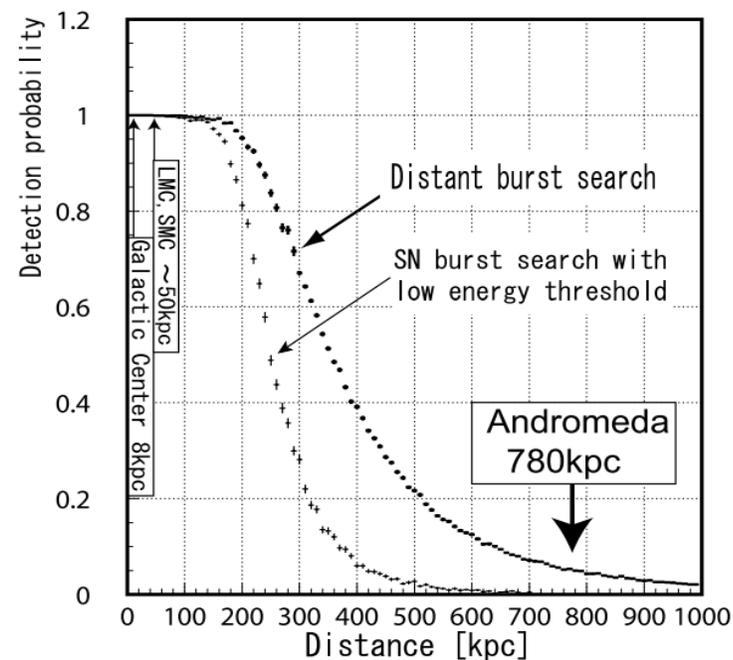
ccSN: $\langle E_{\nu_e} \rangle = 10.7\text{MeV}$, $\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 12.0\text{MeV}$, $\langle E_x \rangle = 14.2\text{MeV}$
 Failed ccSN: $\langle E_{all} \rangle = 18.6\text{MeV}$



Rate: 0.114 [/yr]
 Period: 1992 June ~ 2013 December
 Detectable range: $\leq 25\text{kpc}$ (more than 95%)

- SK [2]

$\langle E_{\nu_e} \rangle = 11\text{MeV}$, $\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 16\text{MeV}$, $\langle E_x \rangle = 25\text{MeV}$



Rate: 0.32 [/yr]
 Period: 1996 May ~ 2005 October
 Detectable range: $\sim 100\text{kpc}$ (full detection probability)