

KamLANDにおける超新星ニュートリノの探索



東北大学RCNS 永塚穂里
(E-mail: minoru@awa.tohoku.ac.jp)

他KamLAND collaboration

Introduction

超新星ニュートリノ探索の動機

ニュートリノは高い透過性から
超新星内部のプローブとして有用



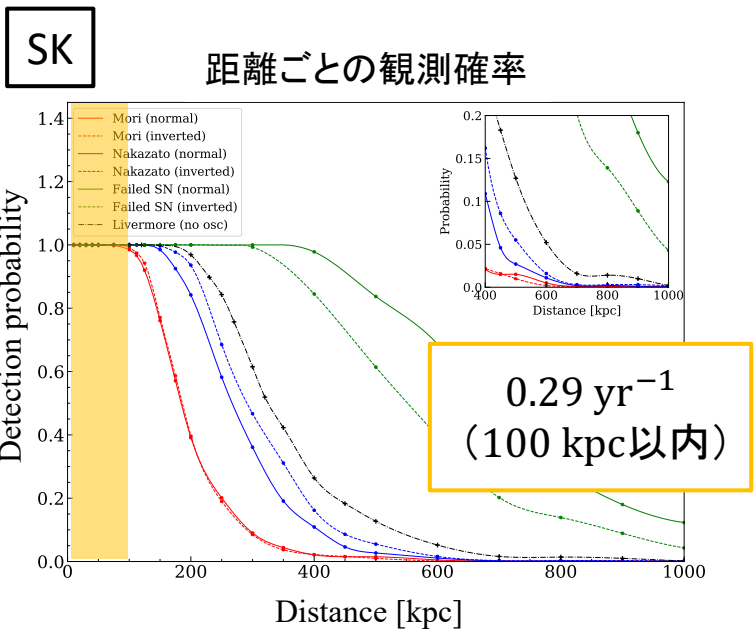
爆発機構の解明

超新星内部の物質効果で
ニュートリノが振動

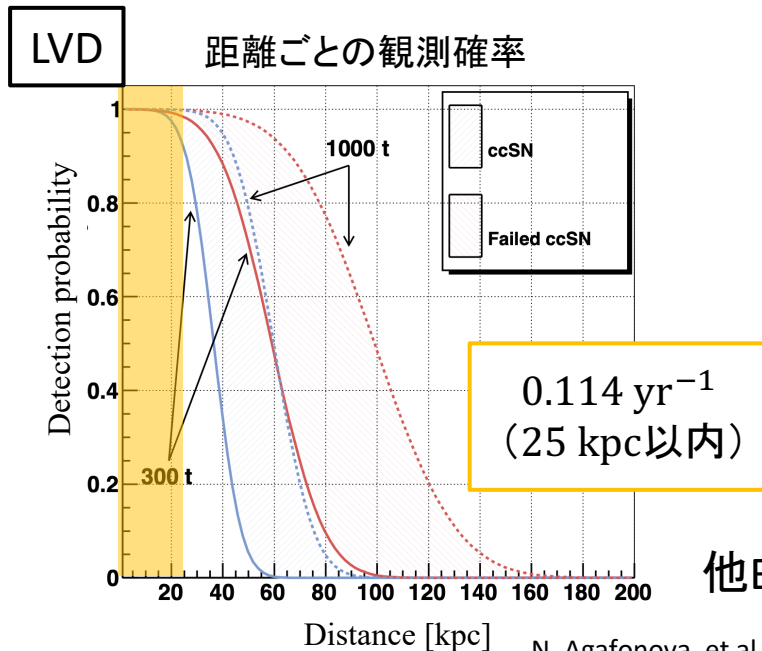


質量階層構造の決定

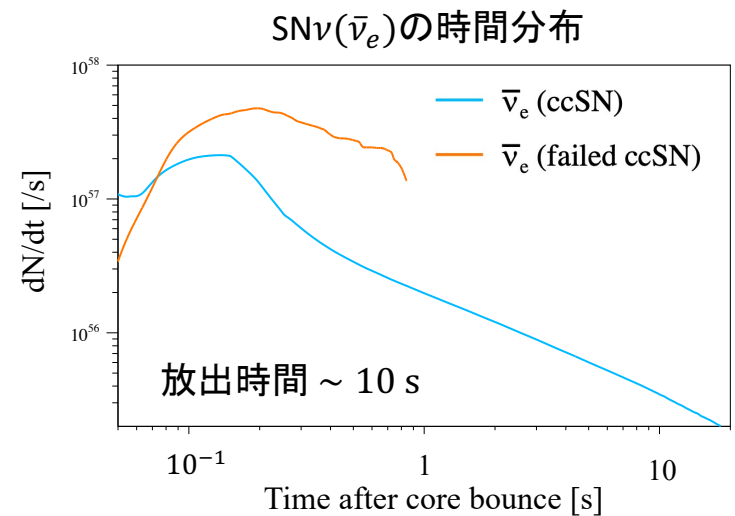
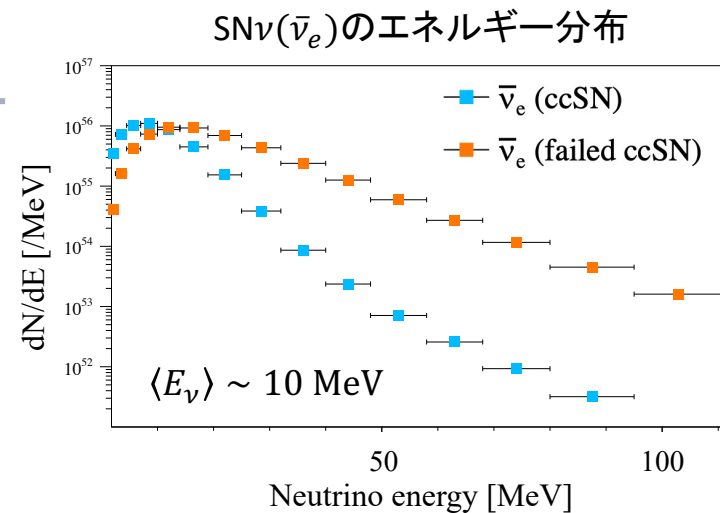
超新星ニュートリノ探索の先行研究 (超新星爆発頻度、観測可能距離)



M. Mori, et al., ApJ (2022)



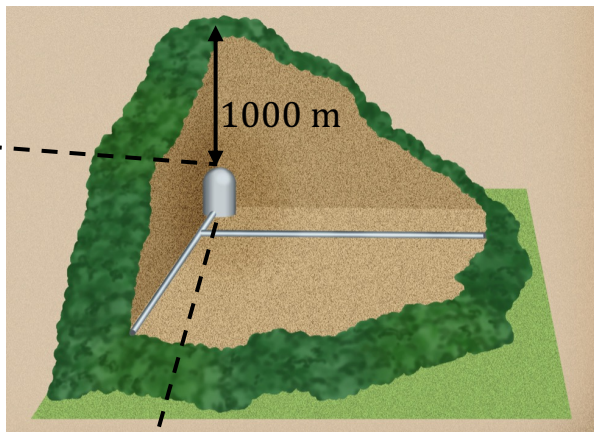
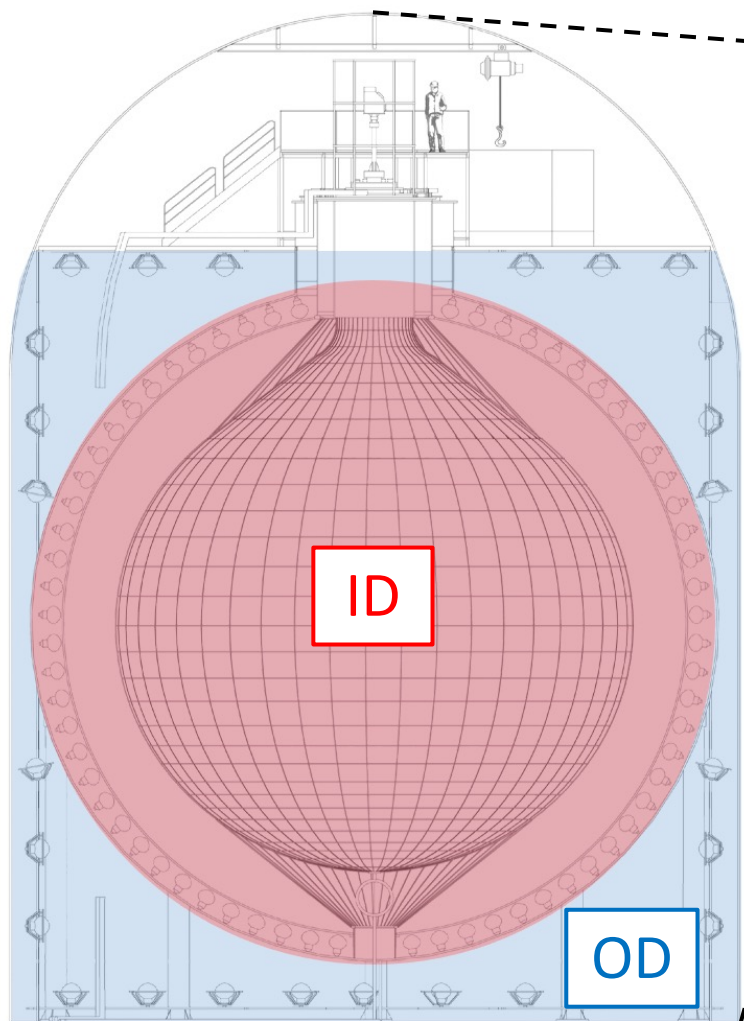
N. Agafonova, et al., ApJ (2015)



K. Nakazato, et al., ApJS (2013)

他Baksan、SNO、MiniBooNE、IMBなど

Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector (KamLAND)



検出器の位置

岐阜県神岡鉱山地下1000 m

! ミューオン由来の背景事象が大幅に低減

検出器の構成

内部検出器 (ID)

液体シンチレータ(1 kt)
17-inch PMT(1325本)
20-inch PMT(554本)

シンチレーション光を検出して
物理観測に使用

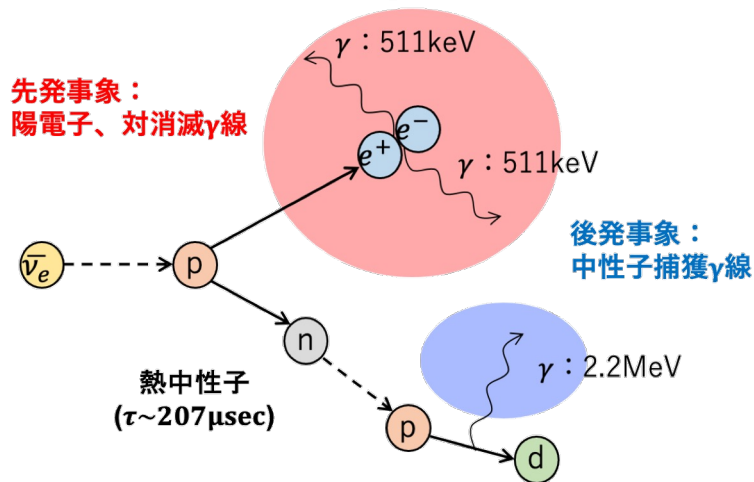
外部検出器 (OD)

純水
20-inch PMT(225(140)本)

チェレンコフ光を検出して
ミューオンのvetoに使用

ニュートリノ検出反応

逆ベータ崩壊反応(解析終了)



- $\bar{\nu}_e$ のみに感度がある

→ $E_\nu > 1.8 \text{ MeV}$ の反電子型の $\text{SN}\nu$ の探索が可能

- 遅延同時計測が使用可能

- 観測エネルギー範囲は次のように設定

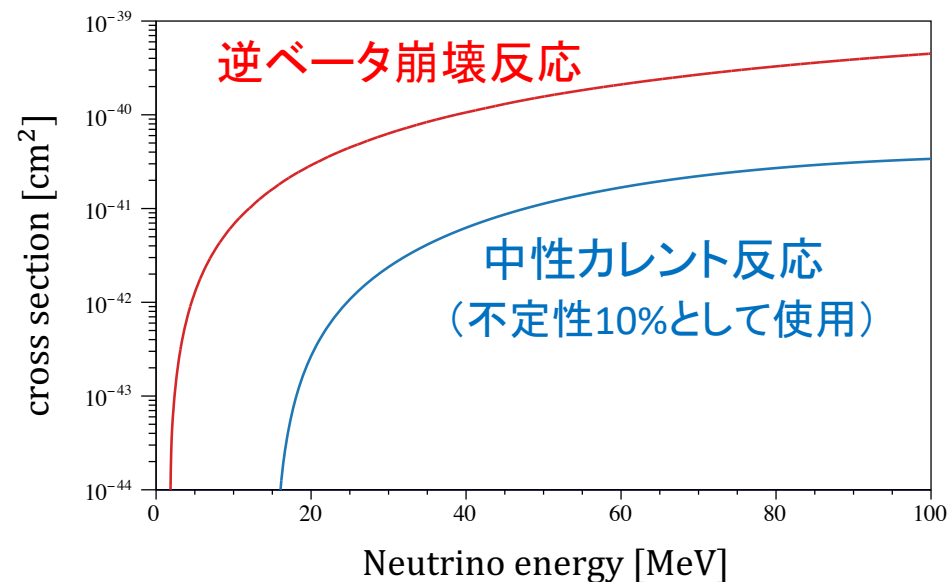
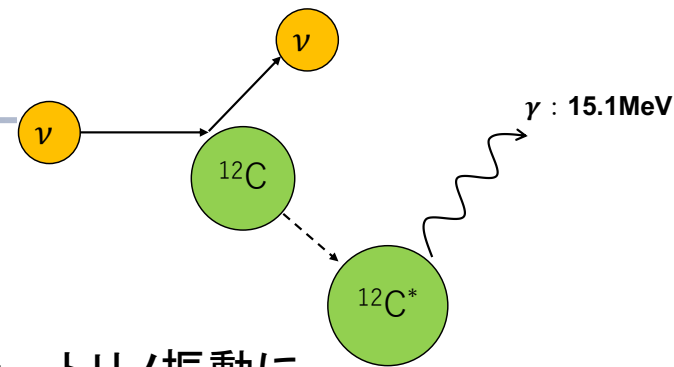
$$0.9 \leq E [\text{MeV}] \leq 100 (\text{先発}), 1.8 \leq E [\text{MeV}] \leq 2.6 (\text{後発})$$

ν - ^{12}C 中性カレント反応

- 全フレーバーに感度がある

→ $E_\nu > 15 \text{ MeV}$ のフレーバー、ニュートリノ振動に依存しない $\text{SN}\nu$ の探索が可能

- KamLANDで解析に用いられた前例はなく、観測エネルギー範囲が不明



KamLAND検出器で二つの反応を用いて超新星ニュートリノ探索を行う。観測可能距離の拡張を期待。

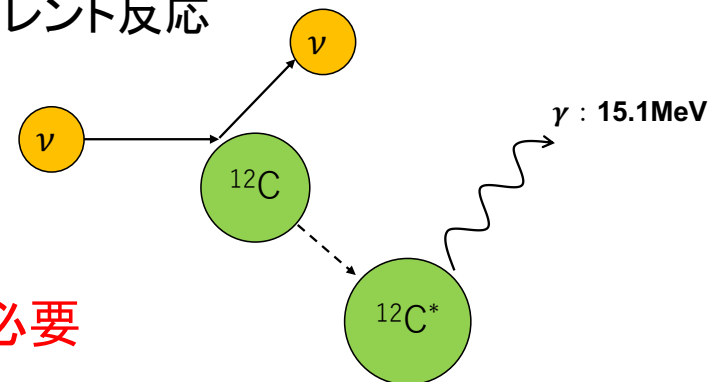
中性カレント反応の解析方針

- KamLANDの先行研究がない
- 15 MeV周辺のキャリブレーション線源は存在しない



信号の観測エネルギー範囲とエネルギースケールの不定性の評価が必要

ν - ^{12}C 中性カレント反応



解析手順

中性カレント反応の信号のシミュレーション

観測エネルギー領域の中心を決定

シミュレーションと観測データの
エネルギースケールの比較

エネルギースケールの不定性①

エネルギー選定条件の決定

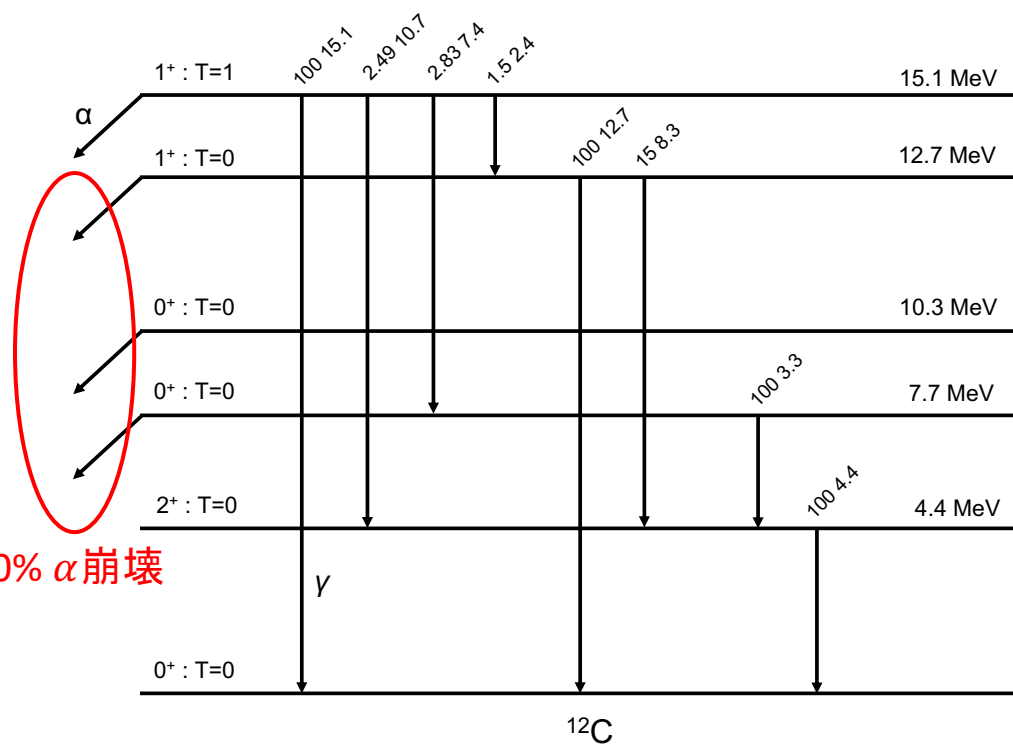
消光効果による観測エネルギーへの影響の評価

エネルギースケールの不定性②

中性カレント反応の信号シミュレーション

崩壊モデルの作成

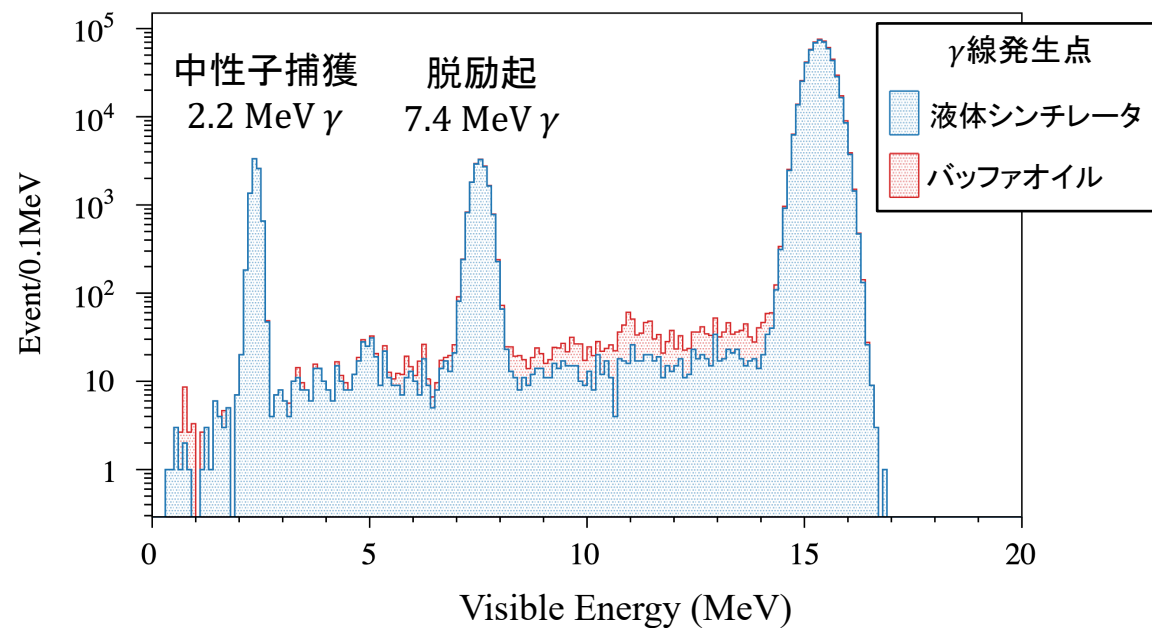
- 複数の放射線によるスペクトルの歪みを考慮するのが目的
- α 崩壊、核異性体転移を導入



シミュレーションによる観測エネルギー範囲の決定

- 2.2 MeV以上ではキャリブレーションの効果で放射線のエネルギー < 観測エネルギー
- 15.1 MeVのピークをガウス関数でフィット
→ 観測エネルギー範囲の中心値を決定

シミュレーションで再構成した15.1 MeVの γ 線による事象



エネルギースケールの不定性の見積り(1)

シミュレーションと観測データ間のエネルギースケールの違い

- キャリブレーションには ^{12}B 、 ^{12}N の崩壊事象を利用
 - 宇宙線ミュオンによる ^{12}C の原子核破砕で生成
 - 観測データから選定 or シミュレーションで作成

	β^- decay
^{12}B	$Q = 13.4 \text{ MeV}$
	$\tau = 29.1 \text{ ms}$

	β^+ decay
^{12}N	$Q = 17.3 \text{ MeV}$
	$\tau = 15.9 \text{ ms}$

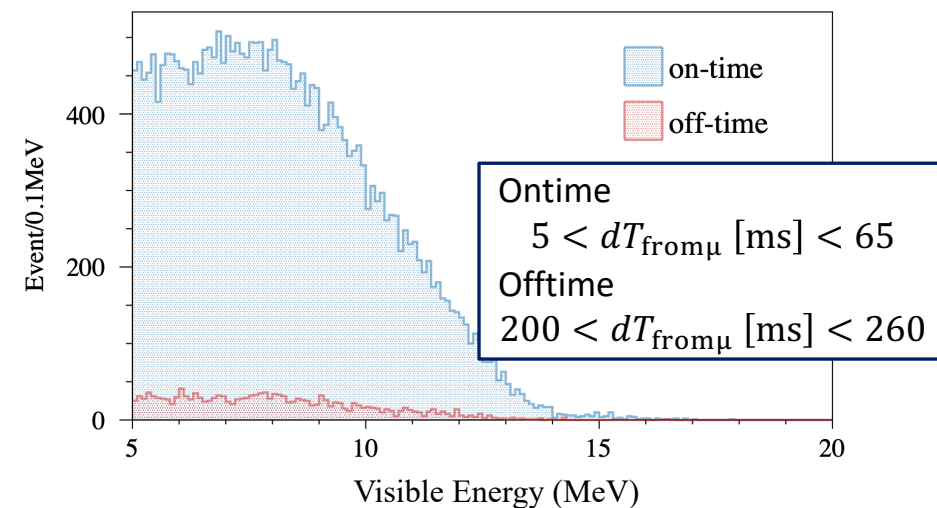
- Ontime事象を下記関数でフィッティングしてスケールの違い α を決定

$$f_{\text{fit}}(E) = f_{\text{offtime}}(E) + C_{12\text{B}}f_{12\text{B}}(E/\alpha) + C_{12\text{N}}f_{12\text{N}}(E/\alpha)$$

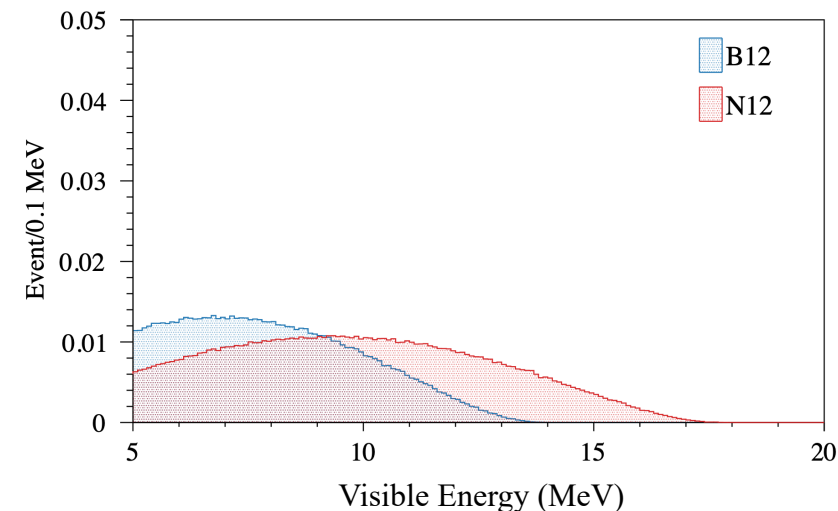
結果

3.9% (2002~2007年) / 9.6% (2009~2011年) / 8.8% (2016~2018年)

ミュオン後の原子核破砕事象の観測データ



崩壊事象のシミュレーション



エネルギースケールの見積り(2)

消光効果による観測エネルギーへの影響

LS中でのエネルギー損失 dE/dx は発光量 dL/dx になる過程で一部失われる

- Birksの式で記述される

$$\frac{dL}{dx} = \frac{L_0 \left(\frac{dE}{dx}\right)}{1 + k_B \left(\frac{dE}{dx}\right)}$$

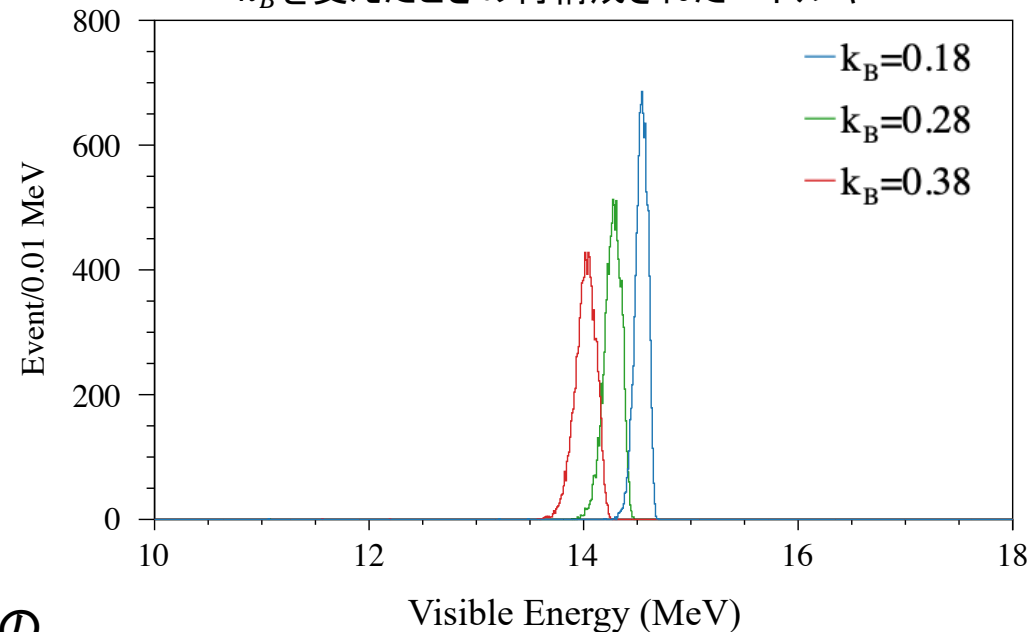
LSに固有の値で不定性を持つ

$k_B \sim 0.3 \pm 0.1 \text{ mm/MeV}$ (KamLANDの先行研究)

- k_B を不定性の範囲で変化させ、再構成されるエネルギーへの影響を評価

15.1 MeV γ / 13.4 MeV β^- / 17.3 MeV β^+

k_B を変えたときの再構成されたエネルギー



結果 1.9%(全期間)

エネルギースケールの不定性の見積り(3)

エネルギースケールの不定性のまとめ

2つの不定性を統合

4.3% (2002~2007年) / 9.8% (2009~2011年) / 9.0% (2016~2018年)

エネルギー選定条件

- 不定性を考慮した上で十分な信号効率を得られる条件に設定

→ $\pm 3\sigma$ に加え $\text{mean} \times (\text{不定性})$ だけエネルギー範囲を拡大

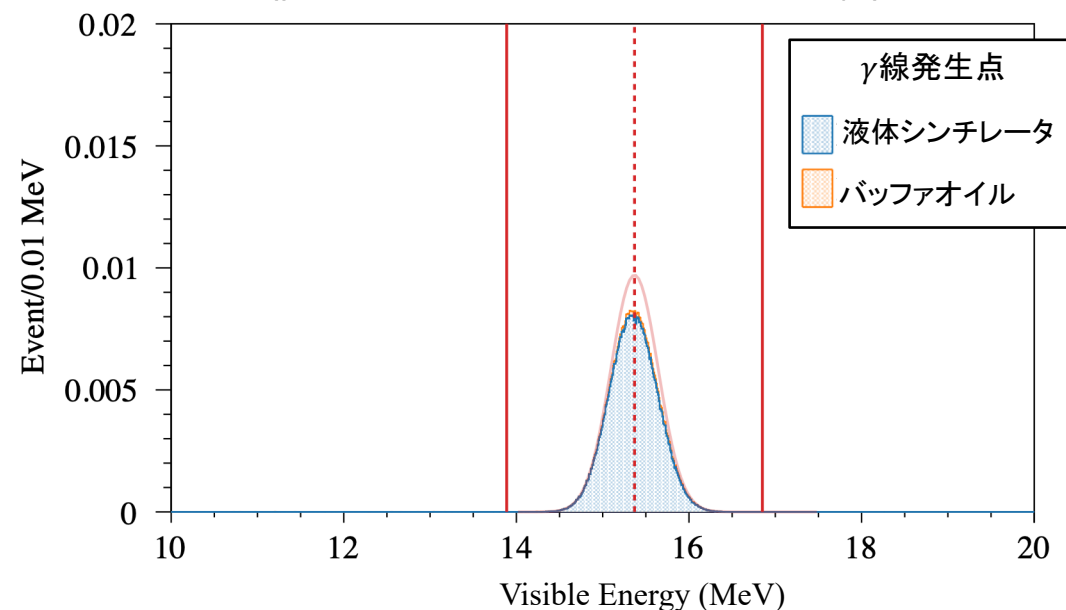
2002~2007年: $13.89 \leq E \text{ [MeV]} \leq 16.85$

2009~2011年: $13.16 \leq E \text{ [MeV]} \leq 17.95$

2016~2018年: $13.53 \leq E \text{ [MeV]} \leq 18.32$

- この条件における**信号効率は99%以上**

信号のシミュレーションとエネルギー範囲



超新星ニュートリノの選定条件

選定条件

逆ベータ崩壊反応、中性カレント反応の候補事象間の**時間差が10秒以内**であるクラスター

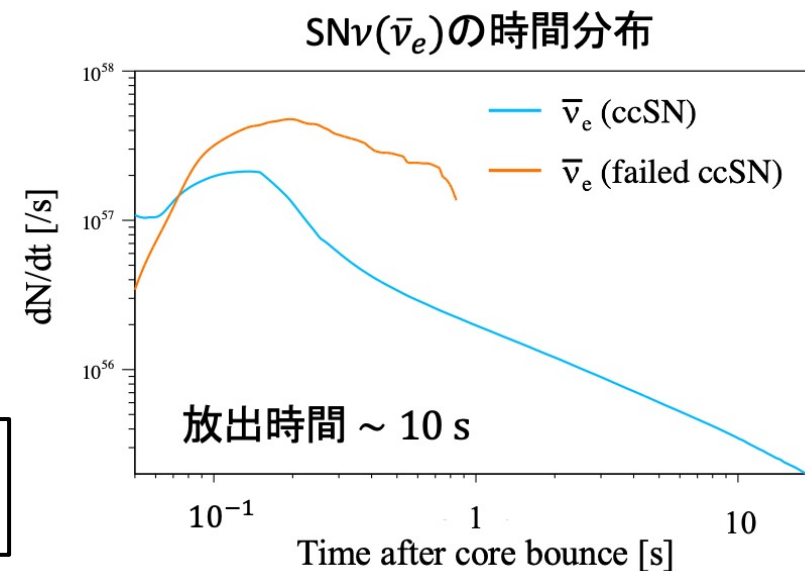
- SN ν 放出の持続時間は約10秒
- SN ν 以外による事象頻度は十分小さい

逆ベータ崩壊反応: ~ 1 event/day (~ 2011)、 ~ 0.1 event/day ($2011\sim$)

中性カレント反応: ~ 0.01 event/day

背景事象

超新星ニュートリノ以外による逆ベータ崩壊反応、中性カレント反応の候補事象間の時間差が偶然10秒以内であるクラスター



中性カレント反応単独
逆ベータ崩壊反応単独 (review)
二つの反応を用いた場合

三通りの解析で探索を行う

中性カレント反応を用いた探索

観測された候補事象数を0と仮定して超新星爆発頻度に制限を与える。

- 確立した選定条件のもと期待事象間の時間差分布を作成

背景事象数 1.66×10^{-5} (2002 ~ 2007年)
 0.59×10^{-5} (2009 ~ 2011年)
 0.10×10^{-5} (2016 ~ 2018年)

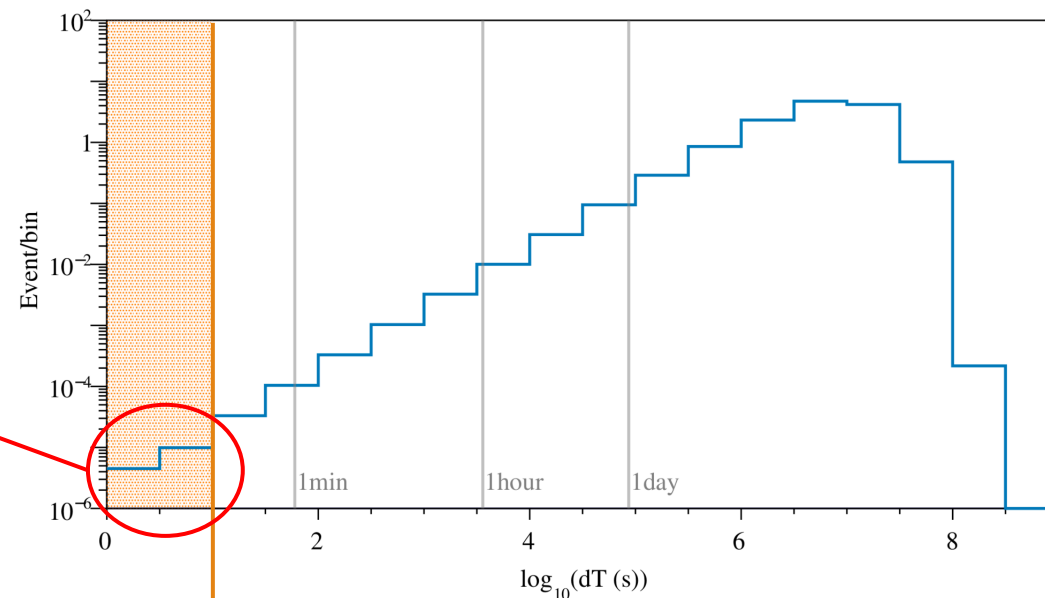
- 観測クラスター数、頻度の上限値を見積もった

→ 次ページ以降で爆発頻度に変換

観測クラスター数 < 2.4 (90%信頼度)

観測クラスター頻度 $< 0.42 \text{ yr}^{-1}$ (90%信頼度)

中性カレント反応期待事象間の時間差分布 (2002~2007年)



時間差10秒以内

以降はクラスターの起源をSN ν と仮定して議論する。

中性カレント反応での観測可能距離(1)

観測クラスター頻度を超新星爆発頻度に変換するため、 $SN\nu$ の観測可能距離を見積もる。

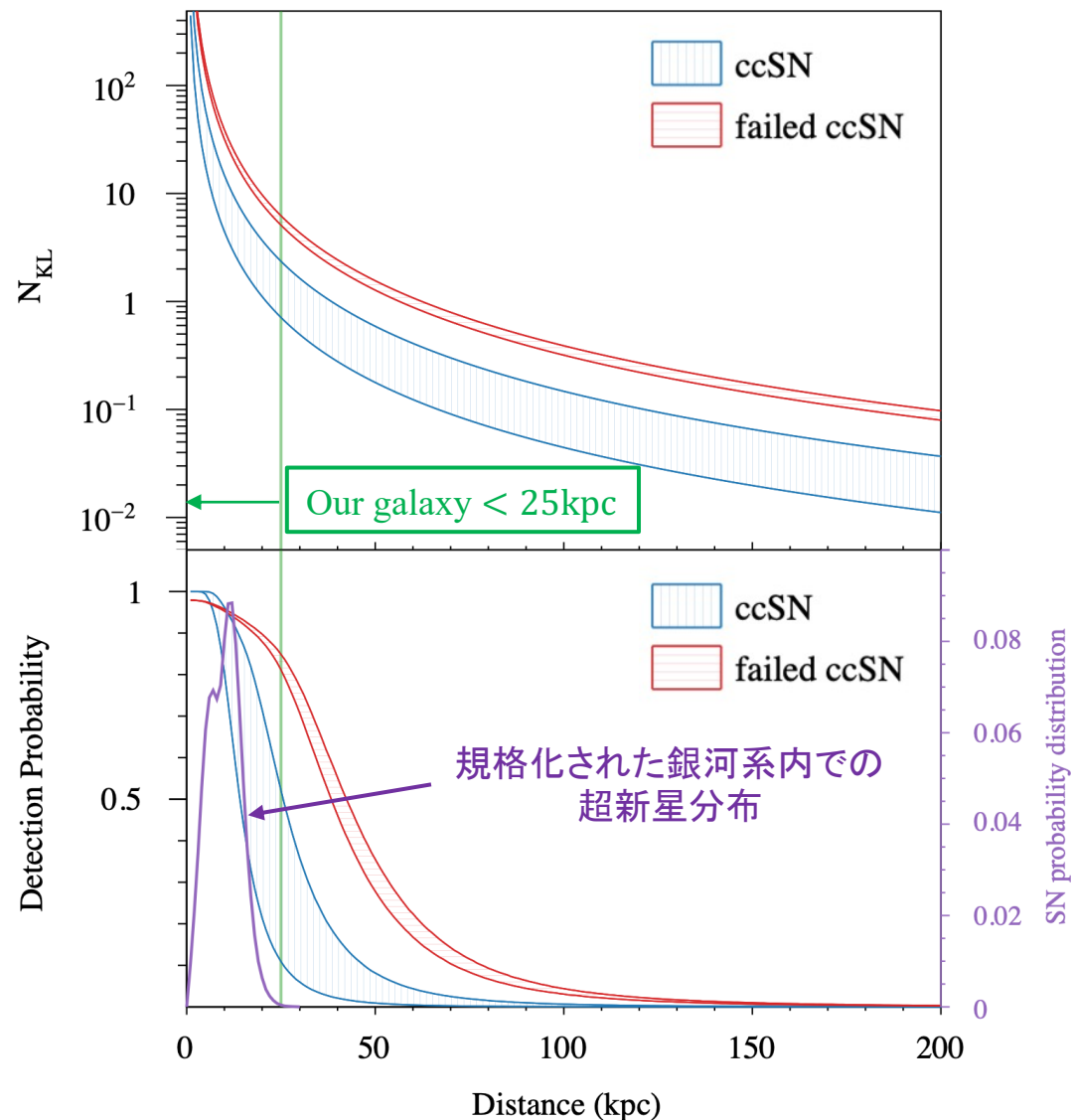
- モデルから期待事象数を計算
- 観測 $SN\nu$ 事象の時間分布を考慮したMCで観測確率を算出
- 観測可能距離(観測確率95%以上の範囲)を得た

$\leq 7-10$ kpc (ccSN)
 $\leq 10-11$ kpc (failed ccSN)

モデル・中性カレント反応の
断面積の不定性を含む

銀河系内をカバーできていない

中性カレント反応による期待事象数、観測確率と超新星の分布



中性カレント反応での観測可能距離(2)

超新星の分布を考慮することで
銀河全域での観測確率を見積もった。

(detection probability \times SN PDF)

$\leq 74.7\text{--}94.1\%$ (ccSN)

$\leq 94.8\text{--}95.4\%$ (failed ccSN)



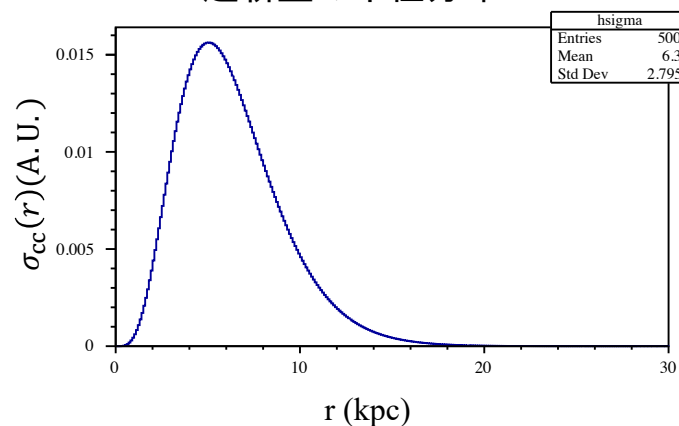
観測クラスター頻度 $< 0.42 \text{ yr}^{-1}$ (90%信頼度)

銀河系内超新星爆発頻度の上限值

$\leq 0.45\text{--}0.56 \text{ yr}^{-1}$ (ccSN)

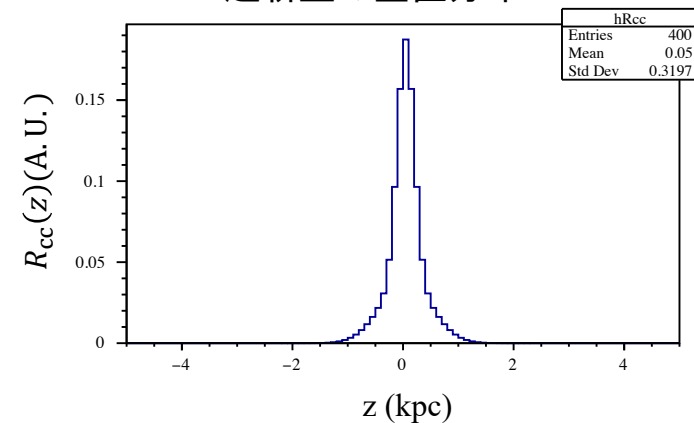
$\leq 0.44 \text{ yr}^{-1}$ (failed ccSN)

超新星の半径分布

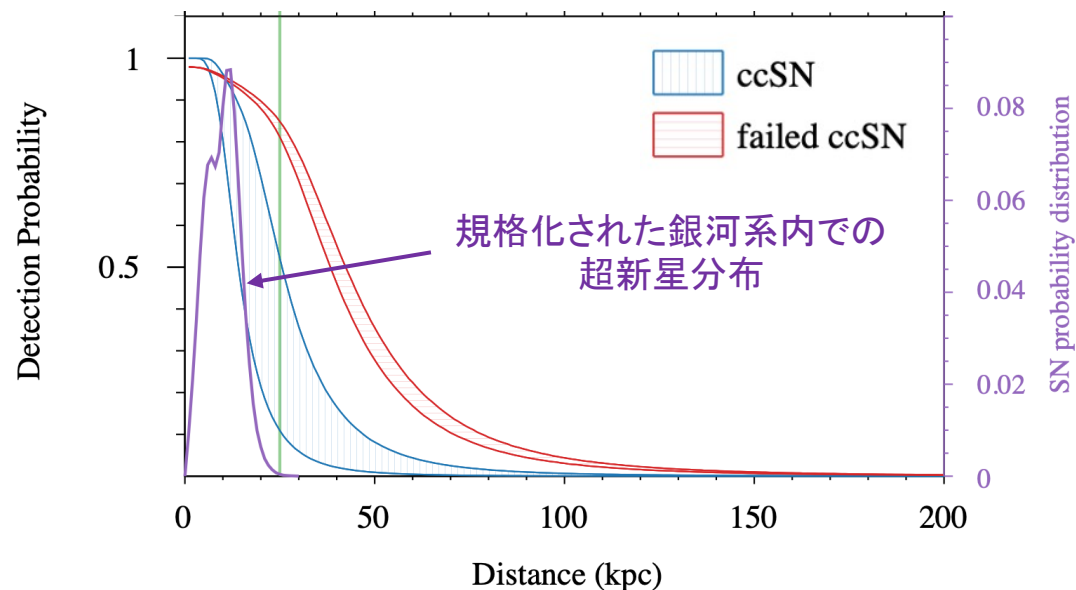


(銀河中心からの距離)

超新星の垂直分布



(銀河面からの高さ)



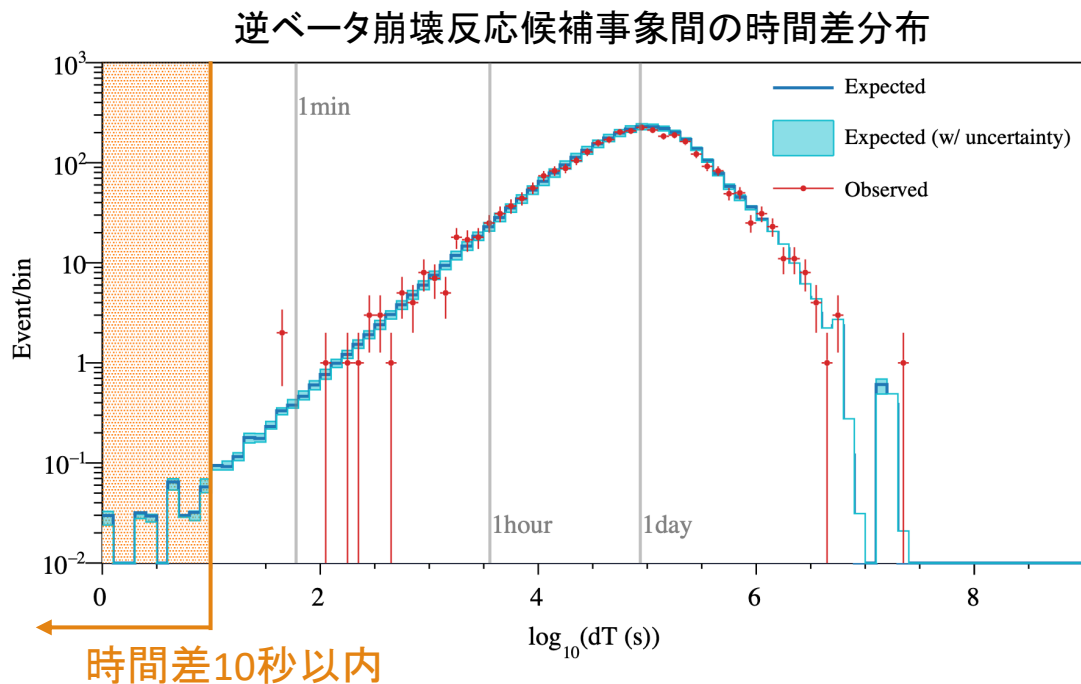
Review: 逆ベータ崩壊反応を用いた探索結果

超新星ニュートリノの候補事象は観測されなかった。

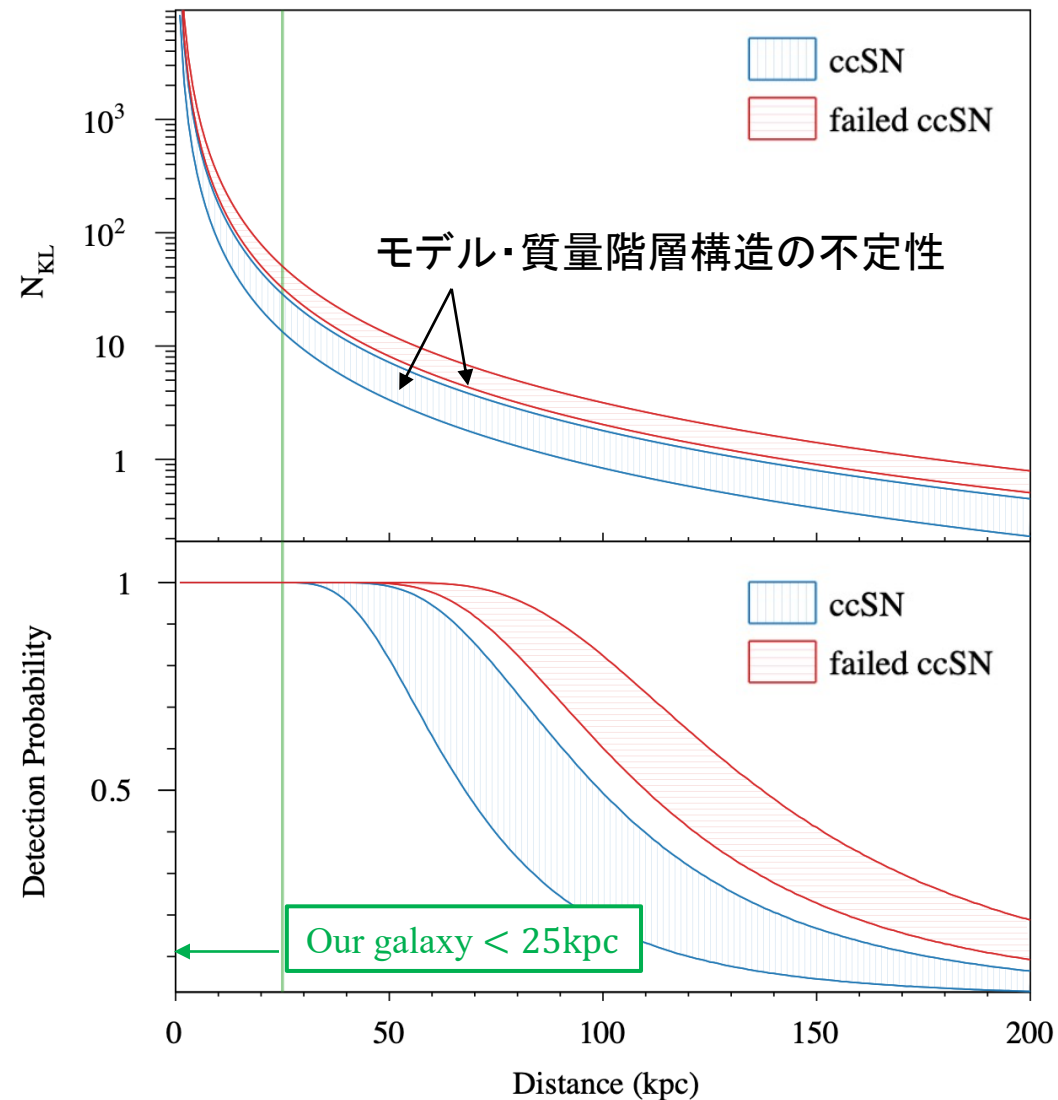
S. Abe, et al., ApJ (2022)

爆発頻度 $< 0.15 \text{ yr}^{-1}$ (90%信頼度)

観測可能距離 (観測確率95%以上) $\leq 40\text{--}58 \text{ kpc}$ (ccSN)
 $\leq 62\text{--}77 \text{ kpc}$ (failed ccSN)



逆ベータ崩壊反応による期待事象数と観測確率



二つの反応を統合した探索と観測可能距離

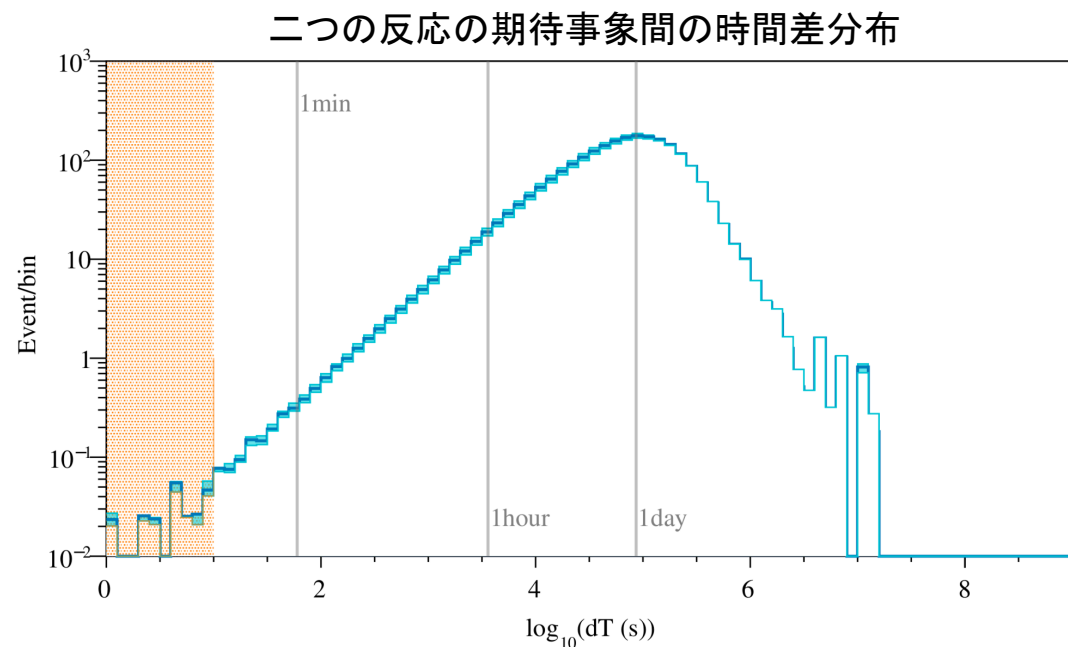
観測可能距離が逆ベータ崩壊単独に比べて改善した。

観測確率 $\geq 95\%$ の範囲: **2 kpc** \uparrow

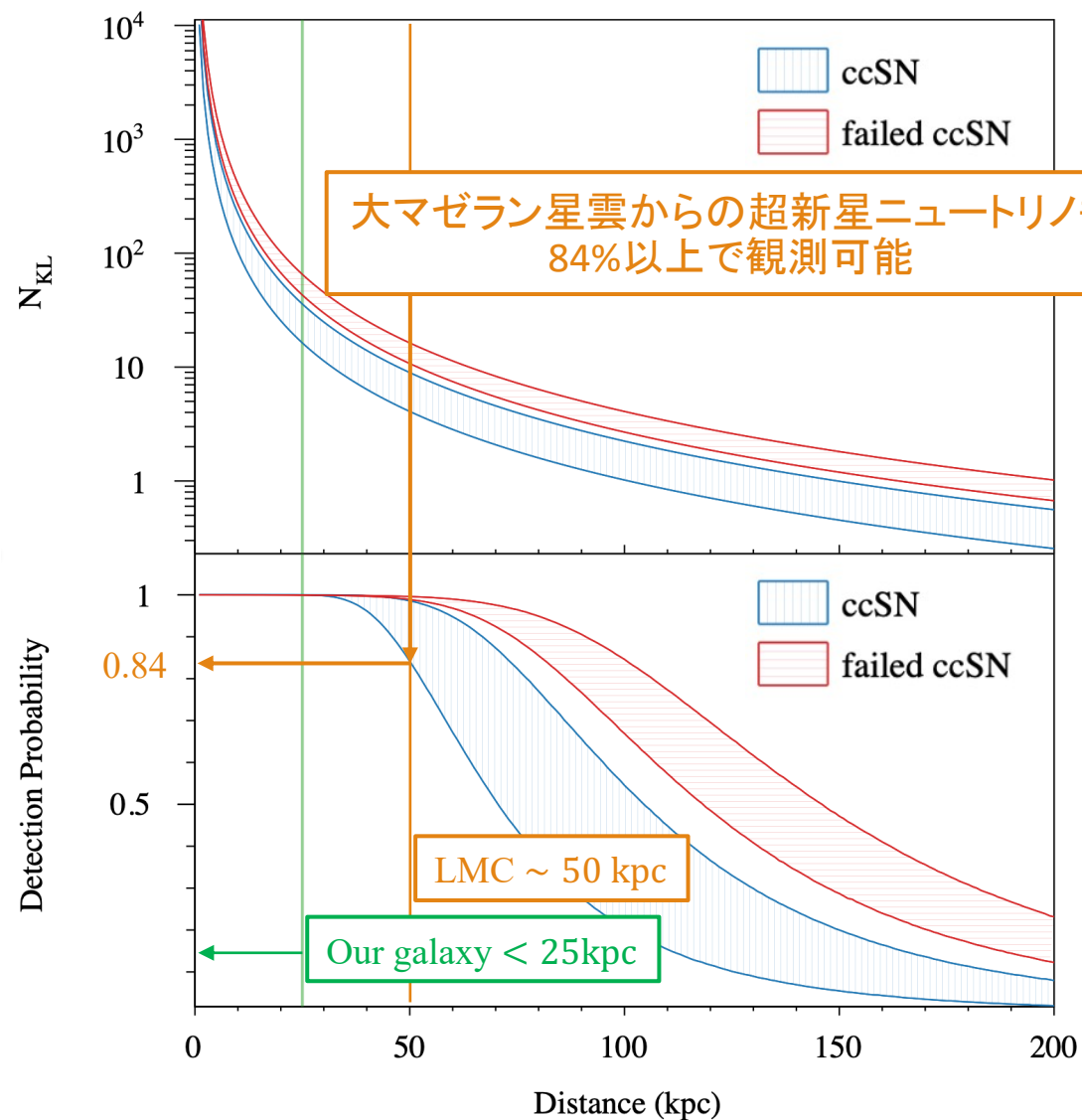
観測確率 $\geq 50\%$ の範囲: **6 kpc** \uparrow

観測された候補事象を0と仮定して爆発頻度を見積もった。

銀河系内超新星爆発頻度 $< 0.38 \text{ yr}^{-1}$ (90% U.L.)



二つの反応による期待事象数と観測確率



突発天体事象に対する解析手法の適用

確立した中性カレント反応の解析手法をIceCube-170922Aとの相関事象探索に適用した場合を仮定

ブレーザーTXS 0506+056から放出された高エネルギー(~ 290 TeV)ニュートリノ事象

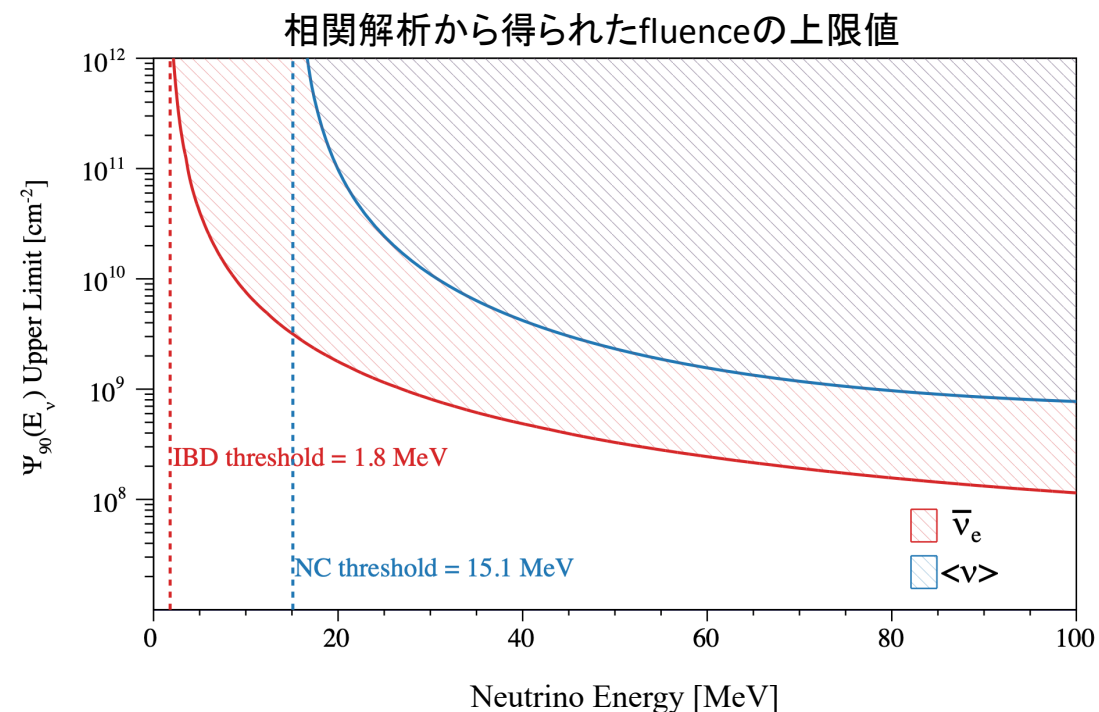
- 低エネルギー(≥ 1.8 MeV)ニュートリノの到達時間の遅れを考慮

最大127秒の遅れ

→ 十分に無視できる時間幅として ± 10000 秒と設定

- 相関事象数=0を仮定
- ブレーザーからのニュートリノのfluenceに上限値を与えた

KamLANDで中性カレント反応も用いた相関解析が可能となった。



- ▶ KamLANDで逆ベータ崩壊反応、中性カレント反応を用いた $\text{SN}\nu$ の探索を行った。
- ▶ 中性カレント反応の選定条件決定のために、エネルギースケールの不定性を見積もった。
- ▶ 銀河系内超新星爆発頻度の上限値を見積もった。
- ▶ 各反応を用いた場合の観測可能距離を見積り、単独の反応に比べて改善することを確認した。
- ▶ $\text{SN}\nu$ だけでなく、突発天体相関解析も中性カレント反応を用いて可能となった。

Backup

超新星ニュートリノ探索の先行研究のまとめ

KamLAND

液体シンチレータ

チェレンコフ

探索期間: 2002年3月–2020年4月

観測エネルギー範囲: $0.9 \leq E \text{ [MeV]} \leq 100$

Livetime: 5011.51 day

爆発頻度の上限値: 0.15 yr^{-1}

有効体積: 1 kt

観測可能距離: $\leq 41\text{--}59 \text{ kpc (ccSN)}/\leq 64\text{--}79 \text{ kpc (failed ccSN)}$

	SK	LVD	Baksan	SNO	MiniBooNE	IMB
探索期間	1996年4月 –2018年5月	1992年6月 –2021年	1980年6月 –2018年12月	1999年11月 –2003年8月	2004年12月 –2008年7月	1986年5月 –1991年3月
Livetime	2589.2 day (SK-I, II) 3318.41 day (SK-IV)	~ 29 yr	33.02 yr	241.4 day (Phase I) 388.4 day (Phase II)	1221.44 day	863 day
有効体積	22.5 kt	300 t/1000 t	240 t	1 kt	800 t	8 kt
観測エネルギー範囲	$\geq 6.5\text{--}7.0 \text{ MeV}$ $\gtrsim 5.5 \text{ MeV}$	$\geq 4\text{--}7 \text{ MeV}$	$\geq 8 \text{ MeV}$	$\geq 4.5 \text{ MeV}$	11–45 MeV	20–60 MeV
爆発頻度の上限値	0.32 /yr 0.29 /yr	0.08 /yr	0.070 /yr	–	0.69 /yr	0.71 /yr
観測可能距離 (観測確率)	$\leq 100 \text{ kpc (}\sim 100\%)$	$\leq 25 \text{ kpc (}\geq 95\%)$	$\leq 25 \text{ kpc}$	$\leq 10 \text{ kpc (}\sim 100\%)$ $\leq 30 \text{ kpc (}\sim 100\%)$	$\leq 13.4 \text{ kpc (}\geq 95\%)$	銀河系内

超新星ニュートリノモデル

- 中里モデルを使用した。 Nakazato, K., et al, 2013
 - Early phase : neutrino-radiation hydrodynamic simulation
 - Late phase : quasi-static evolutionary calculations of proto-neutron star cooling

球対称を仮定

- 重力崩壊型超新星爆発 (core collapse SN, ccSN) から放出されるニュートリノのエネルギー・時間分布 (右図)

- 全てのパラメータの組み合わせについて計算を行なった。

- 親星の質量

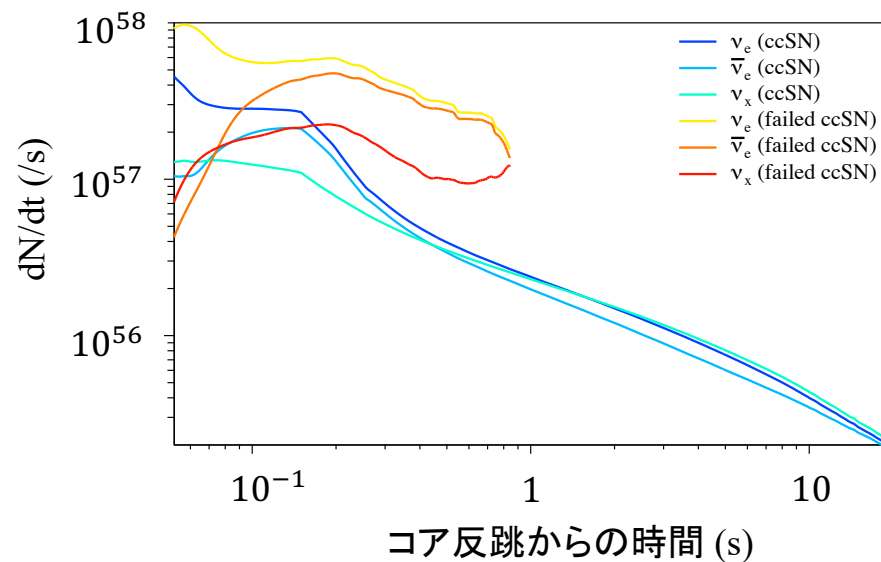
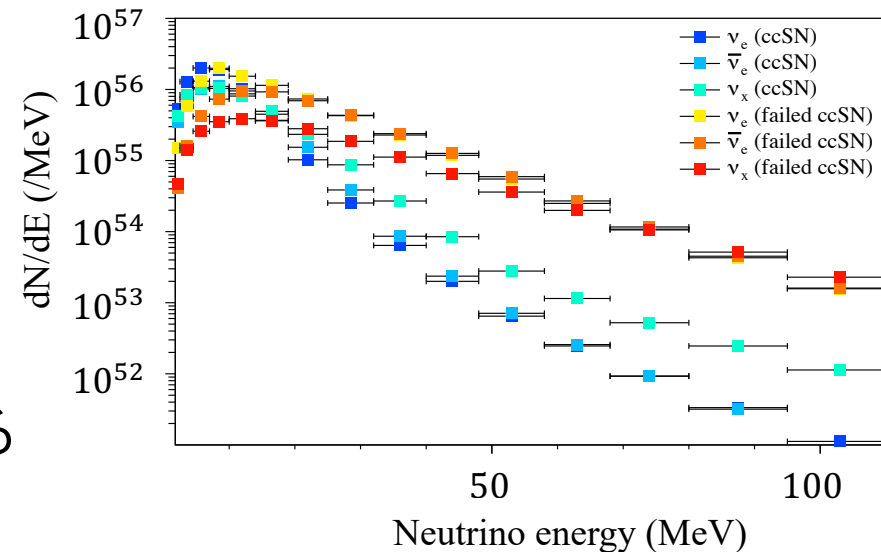
$$M_{\text{init}} = 13 M_{\odot}, 20 M_{\odot}, 30 M_{\odot}, 50 M_{\odot}$$

- 金属量 (メタリシティ)

$$Z = 0.02 \text{ (solar)}, 0.004 \text{ (Small Magelanic Cloud)}$$

- 停滞した衝撃波の復活までの時間

$$t_{\text{revive}} = 100 \text{ ms}, 200 \text{ ms}, 300 \text{ ms}$$



期待イベント数の詳細な計算

- 地球に届く $\bar{\nu}_e$ のフラックス $F_{\bar{\nu}_e \text{Earth}}(r, t)$

$$F_{\bar{\nu}_e \text{Earth}}(r, t) = \frac{1}{4\pi r^2} \left\{ \bar{p} \frac{d^2 N_{\bar{\nu}_e 0}}{dE dt} + (1 - \bar{p}) \frac{d^2 N_{x0}}{dE dt} \right\}$$

- r : 地球からの距離
- $\frac{d^2 N_{i0}}{dE dt}$: 超新星爆発で放出される ν_i の数
← モデルから得られる
- \bar{p} : $\bar{\nu}_e$ の生存確率
← 超新星内での物質効果を考慮

$$\bar{p} = \cos^2 \theta_{12} \cos^2 \theta_{13} \text{ (NH)}, \sin^2 \theta_{13} \text{ (IH)}$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.320$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.0216 \quad \text{de Salas, P., et al, 2018}$$

地球での物質効果は無視

- KamLANDで観測されるイベント数 N_{KL}

$$N_{KL}(r) = \mathcal{N}_{\text{target}} \times \int dt dE F_{\bar{\nu}_e \text{Earth}}(r, t) \sigma_{\text{IBD}}(E) \epsilon_{\text{eff}}(E)$$

- $\mathcal{N}_{\text{target}}$: 標的陽子数 ($r = 600 \text{ cm}$)
 $= (5.98 \pm 0.13) \times 10^{31}$
- $\sigma_{\text{IBD}}(E)$: 逆ベータ崩壊の断面積
- $\epsilon_{\text{eff}}(E)$: KamLANDでの検出効率

積分範囲は

$$1.8 \text{ MeV} \leq E \leq 111 \text{ MeV}$$

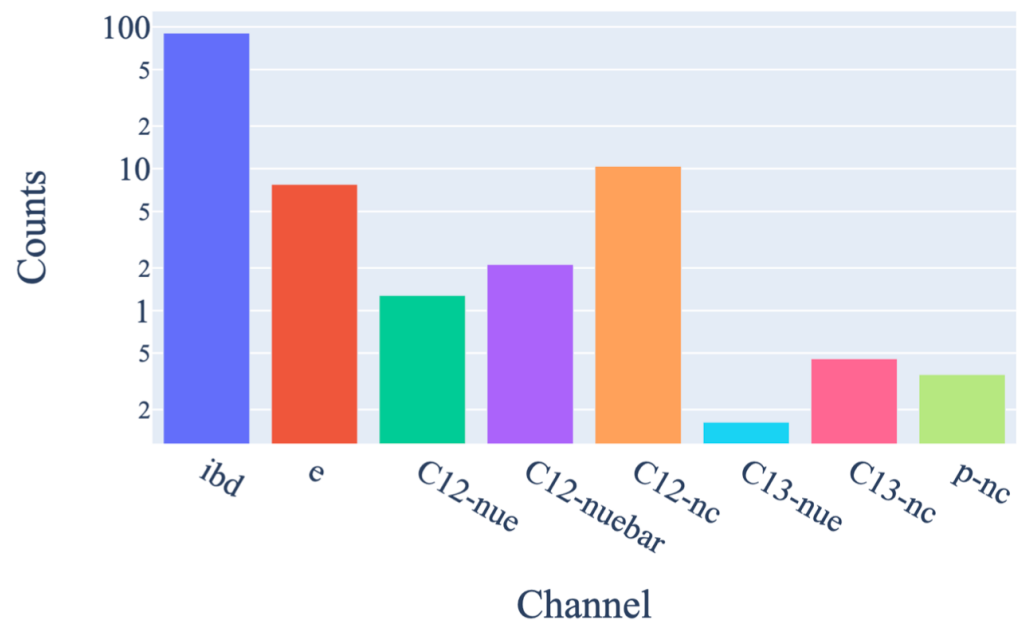
$$0 \text{ s} \leq t \leq 20 \text{ s}$$

Livetimeの効果はMCで発生させたミューオン事象後のdeadtimeとして考慮

反応ごとの期待事象数 / モデルごとの観測確率

ニュートリノ反応ごとの期待事象数

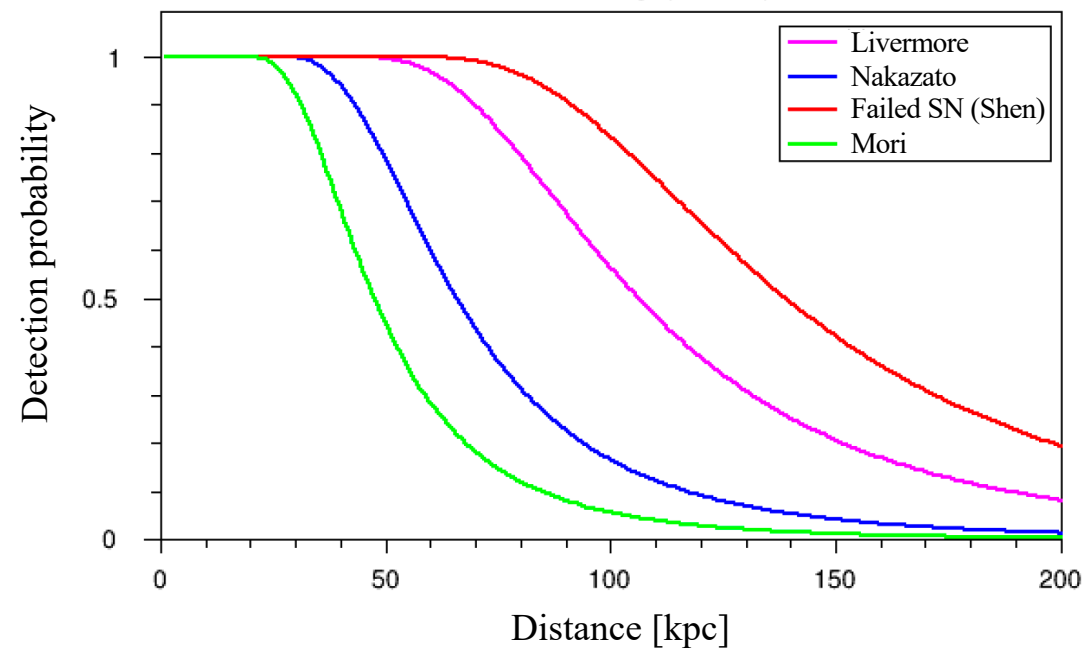
Nakazato 20 solar mass at 10 kpc



モデルによる観測確率の違い

IBDのみ、時間分布は考慮せず

LivermoreはNakazatoの不定性の範囲内



- 過去に観測されたサンプルから超新星の型、ハッブルによる銀河の分類ごとに爆発頻度を推定
- 距離・銀河の傾き・銀河内の親星の数を考慮
- LMC、SMCからのII型超新星爆発の寄与は $\sim 0.5 / 100 \text{ yr}$

TABLE 2

ABSOLUTE FREQUENCIES (in SNU) OF SUPERNOVAE OF DIFFERENT TYPES IN DIFFERENT TYPES OF GALAXIES

Supernova Type	GALAXY TYPE				
	E-S0	S0/a-Sa	Sab-Sb	Sbc-Sd	Sdm-Im
All types	0.25	0.17	0.53	1.29	1.40
Ia	0.25	0.12	0.12	0.12	0.12
Ib	0.01	0.07	0.19	0.23
II	0.04	0.34	0.98	1.05

TABLE 4

SN FREQUENCIES IN LOCAL GROUP GALAXIES

PARAMETER	GALAXY AND TYPE			
	LMC Sm	SMC Im	M31 Sb	M33 Sc
$n(\text{Ia})^a$	0.04	0.01	0.38	0.06
$n(\text{II} + \text{Ib})^a$	0.45	0.11	0.83	0.62
τ (yr)	204	833	83	147

銀河系内の超新星分布

- 中性カレント反応を用いた探索における観測確率の計算に使用した。

半径分布

$$\sigma_{cc}(r) \propto r^\xi \exp\left(-\frac{r}{u}\right)$$

$$\begin{cases} \xi = 4 \\ u = 1.25 \text{ kpc} \end{cases} \quad \boxed{\text{中性子星の分布に対応}}$$

r : 銀河中心からの半径

$$\longrightarrow d(r, z, \theta) = [r^2 + z^2 + d_\odot^2 - 2rd_\odot \cos\theta]^{1/2} \quad \boxed{\text{太陽からの距離}d\text{に変換}}$$

垂直分布

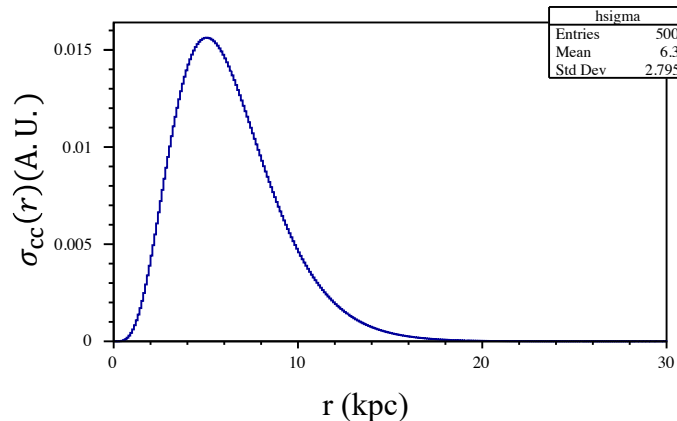
$$R_{cc}(z) \propto 0.79 \exp\left[-\left(\frac{z}{212 \text{ pc}}\right)^2\right] + 0.21 \exp\left[-\left(\frac{z}{636 \text{ pc}}\right)^2\right]$$

z : 銀河面からの高さ

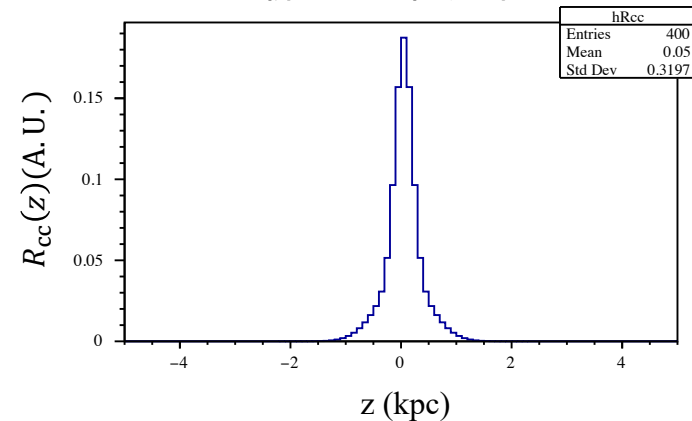
三次元分布

$$n_{cc}(r, z) \propto \sigma_{cc}(r)R_{cc}(z)$$

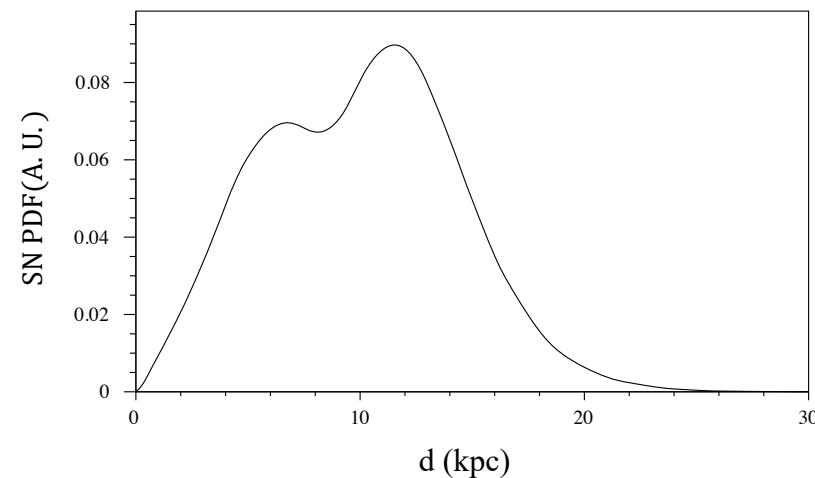
超新星の半径分布



超新星の垂直分布



超新星の三次元分布



突発天体相関解析

- IceCubeの高エネルギー ν 事象に対しKamLANDの ν 事象は t_f だけ遅れて観測される。

$$t_f = \frac{1}{2H_0} \frac{m_\nu^2}{E_\nu^2} \int_0^z \frac{dz'}{(1+z')^2 \sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_M(1+z')^3}} \simeq 127 \text{ s}$$

t_f が十分無視できる時間幅に設定

H_0 : ハッブル定数

m_ν : ニュートリノの質量

E_ν : KamLANDで観測されるニュートリノの最低エネルギー

Ω_Λ : 暗黒物質の密度パラメータ

Ω_M : 物質の密度パラメータ

z : 赤方偏移

- 反応 i ($i = \text{IBD, NC}$)を用いた観測でのfluenceの上限值は以下のように与えられる。

$$\Psi_{90}^i(E_\nu) = \frac{N_{90}^i}{N_{\text{target}}^i \eta_{\text{lifetime}}^i \int_{E_l}^{E_h} \sigma^i(E'_\nu) \delta(E_\nu - E'_\nu) \epsilon^i(E'_\nu) dE'_\nu}$$

N_{90}^i : 観測事象数の90%信頼度の上限值

ニュートリノエネルギー範囲:

N_{target}^2 : 標的数

$$E_l = 1.8 \leq E_\nu [\text{MeV}] \leq E_h = 100$$

η_{lifetime}^i : livetime ratio

σ^i : 反応断面積、 ϵ^i : 検出効率

相関解析から得られたfluenceの上限值

