カムランドにおける
超新星背景ニュートリノの探索

小原脩平 他 KamLAND collaboration

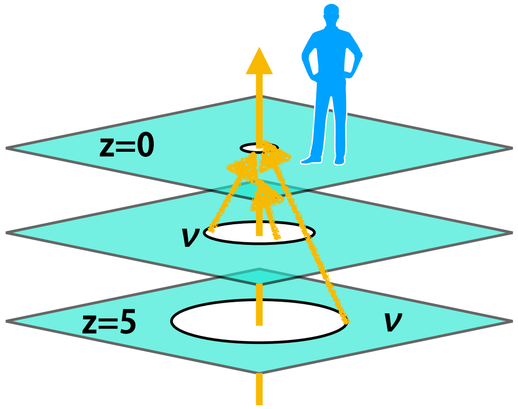
東北大学学際科学フロンティア研究所
東北大学ニュートリノ科学研究センター

* Preprint arXiv:2108.08527
* Accepted for publication in ApJ

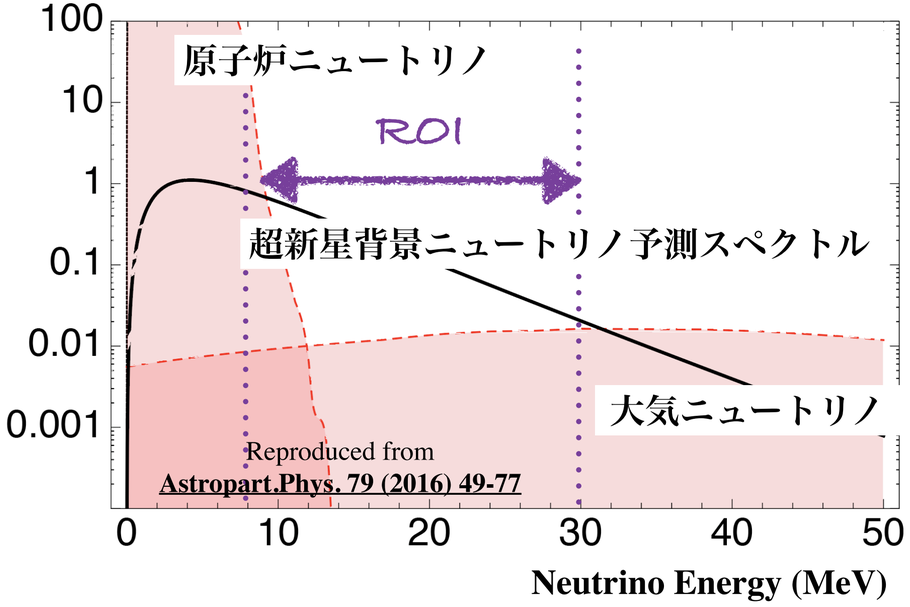
物理目的(1)

超新星背景ニュートリノ

- “超新星爆発”は多くのニュートリノを放出する爆発的な天体現象
- 過去におきた超新星爆発から生じたニュートリノが今も宇宙を漂っている(超新星背景ニュートリノ)
- 平均的な超新星爆発の描像をみることができる



- 反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) 探索を行うにあたって背景事象があるので 10−30MeV辺りが探索領域
  - 低エネルギー側は原子炉ニュートリノ
  - 高エネルギー側は大気ニュートリノ

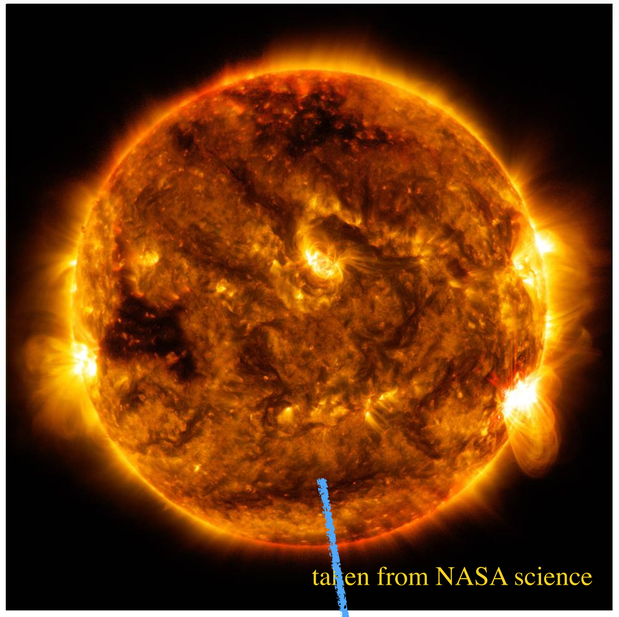


物理目的(2)

太陽反電子ニュートリノ (MSW+RSFP)

- ニュートリノ磁気能率と太陽磁場の影響でフレーバー転換がおこる可能性がある
  - $$P(\nu_e \to \bar{\nu}_e) \simeq 1.8 \times 10^{-10} \sin^2 2\theta_{12} \times \left[\frac{\mu}{10^{-12}\mu_B} \frac{B_T(0.05R_\odot)}{10\,\mathrm{kG}} \right]^2,$$

Akhmedov, E., & Pulido, J. 2003, PhLB, 553, 7



$$\nu_e \xrightarrow{\text{MSW}} \nu_\mu \xrightarrow{\text{RSFP}} \bar{\nu}_e \text{ or } \nu_e \xrightarrow{\text{RSFP}} \bar{\nu}_\mu \xrightarrow{\text{MSW}} \bar{\nu}_e$$

暗黒物質対消滅

- 軽い暗黒物質対消滅から生じるニュートリノペア
  - $$\frac{d\phi}{dE_\nu} = \frac{\langle \sigma_A \mathbf{v} \rangle}{2} J_{\mathrm{ave}} \frac{R_{\mathrm{sc}} \rho_0^2}{m_\chi^2} \frac{1}{3} \delta\left(E_\nu - m_\chi\right),$$

Palomares-Ruiz, S., & Pascoli, S. 2008, PhRvD, 77, 025025

$\chi\chi \to \nu\bar{\nu}$

(不活性ニュートリノからの崩壊)

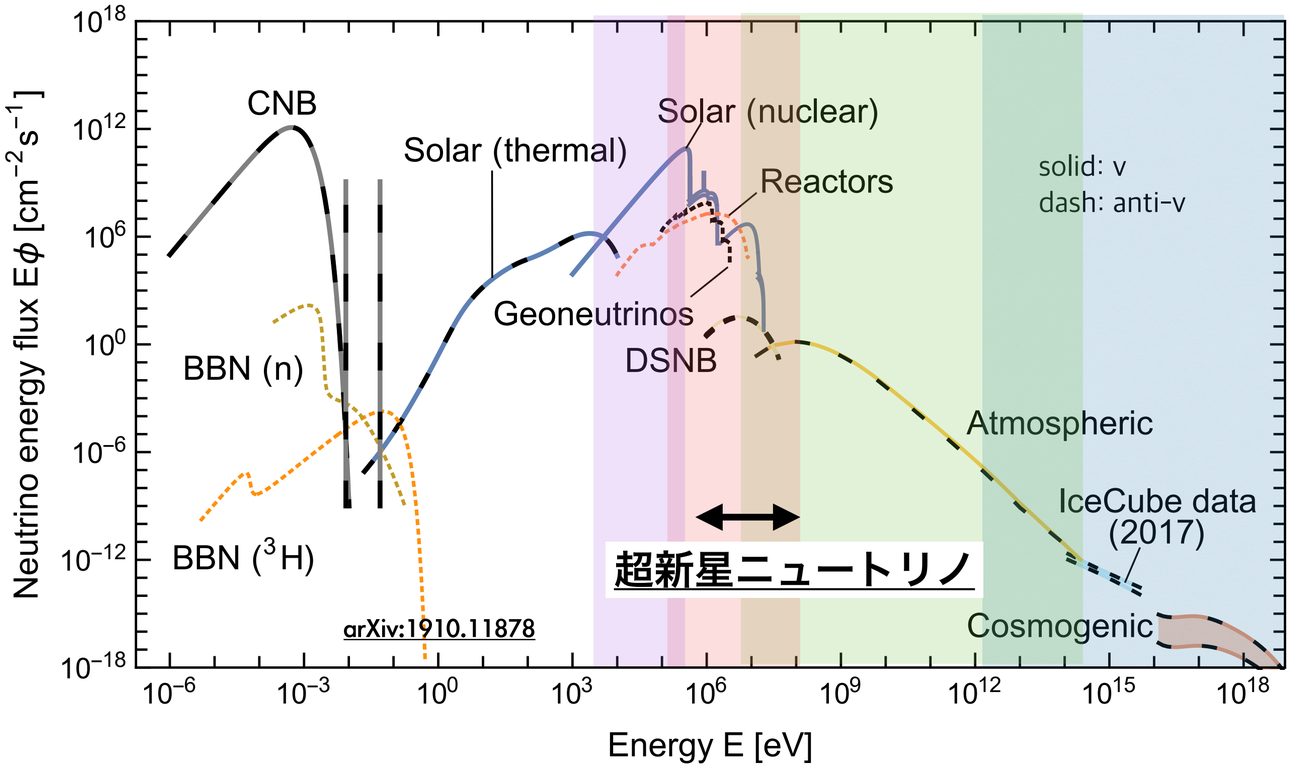
(原始ブラックホールからの輻射)

色んなニュートリノ検出器など

特徴

- 地下にあって宇宙線由来の背景事象低減
- 主目的の物理で, 異なる最適化されたエネルギー領域と検出方法

(※ 色塗りは僕の独断と偏見です. メインのエネルギー領域に色塗り)



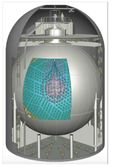
XENON-nT

液体キセノンシンチレータ

数 keV 領域

@スペイン

KamLAND



有機液体シンチレータ(油)

300keV ~ 100MeV

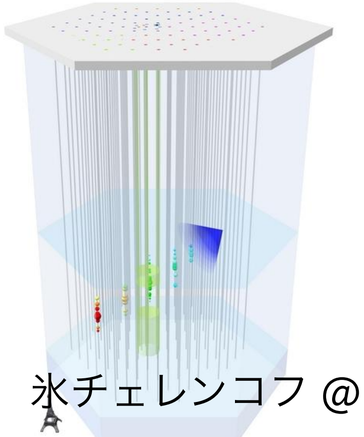
@神岡

Super-Kamiokande

水チェレンコフ @ 神岡

10MeV ~ 100GeV

IceCube

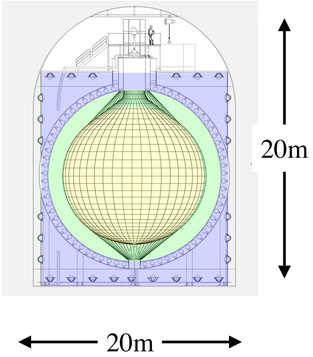


氷チェレンコフ @ 南極

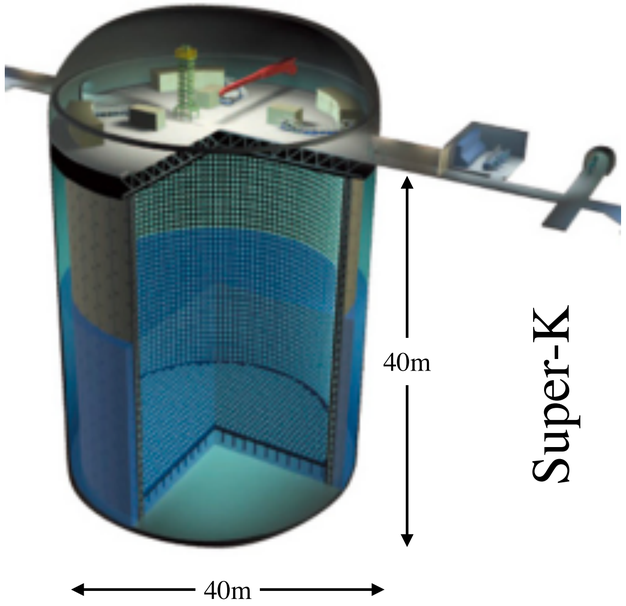
TeV 以上

KamLAND / Super-Kamiokande

	KamLAND	Super-K
場所	岐阜県神岡鉱山地下1000m	
大きさ	ϕ13mの球状 (1kton)	ϕ40m×L40mの円筒状 (50kton)
媒質	有機液体シンチレータ (超純油)	水 (超純水)
検出方法	シンチレーション光 + PMT (2千本)	チェレンコフ光 + PMT (1万本)
ニュートリノ方向感度	等方発光なので, 到来方向は不明	チェレンコフリングの再構成で到来方向同定可能
検出閾値	荷電粒子全てに発光	チェレンコフ閾値



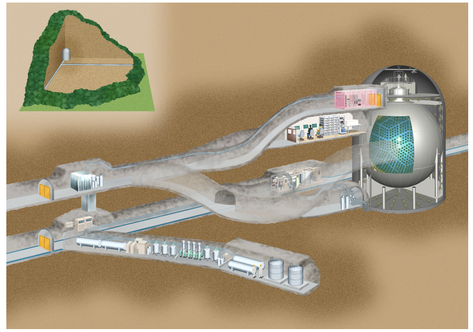
KamLAND

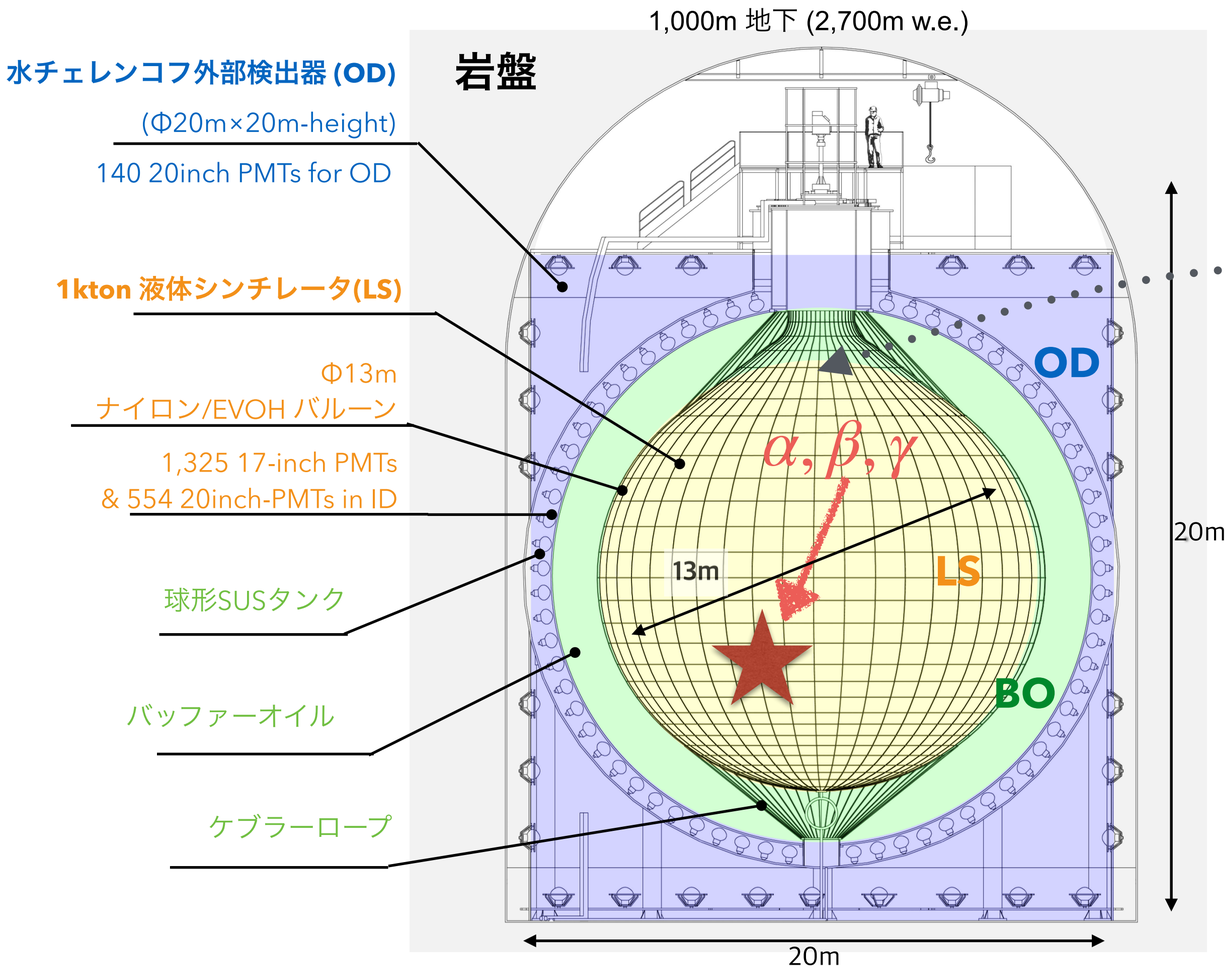


Super-K

KamLAND Detector

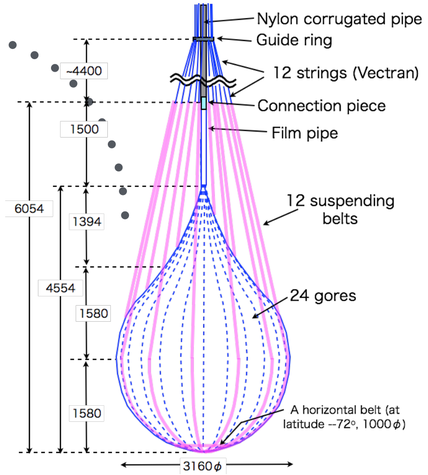
Kamioka **L**iquid-scintillator **A**nti-**N**eutrino **D**etector





LS=Liquid-Scintillator, BO=Buffer-Oil, OD=OuterDetector, ID=InnerDetector(LS+BO)

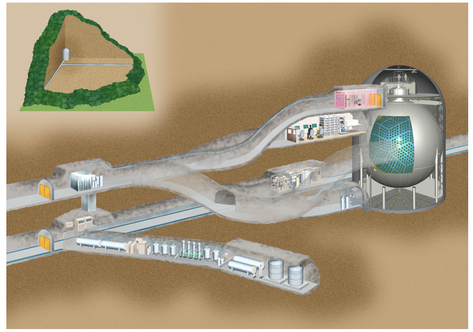
- 1 kt **液体シンチレータ** 検出器
- 神岡鉱山 池ノ山山頂より **1 km 地下**
- シンチレーション光を約2000本の光電子増倍管(PMT)で観測
- ヒット時間と電荷量から事象再構成

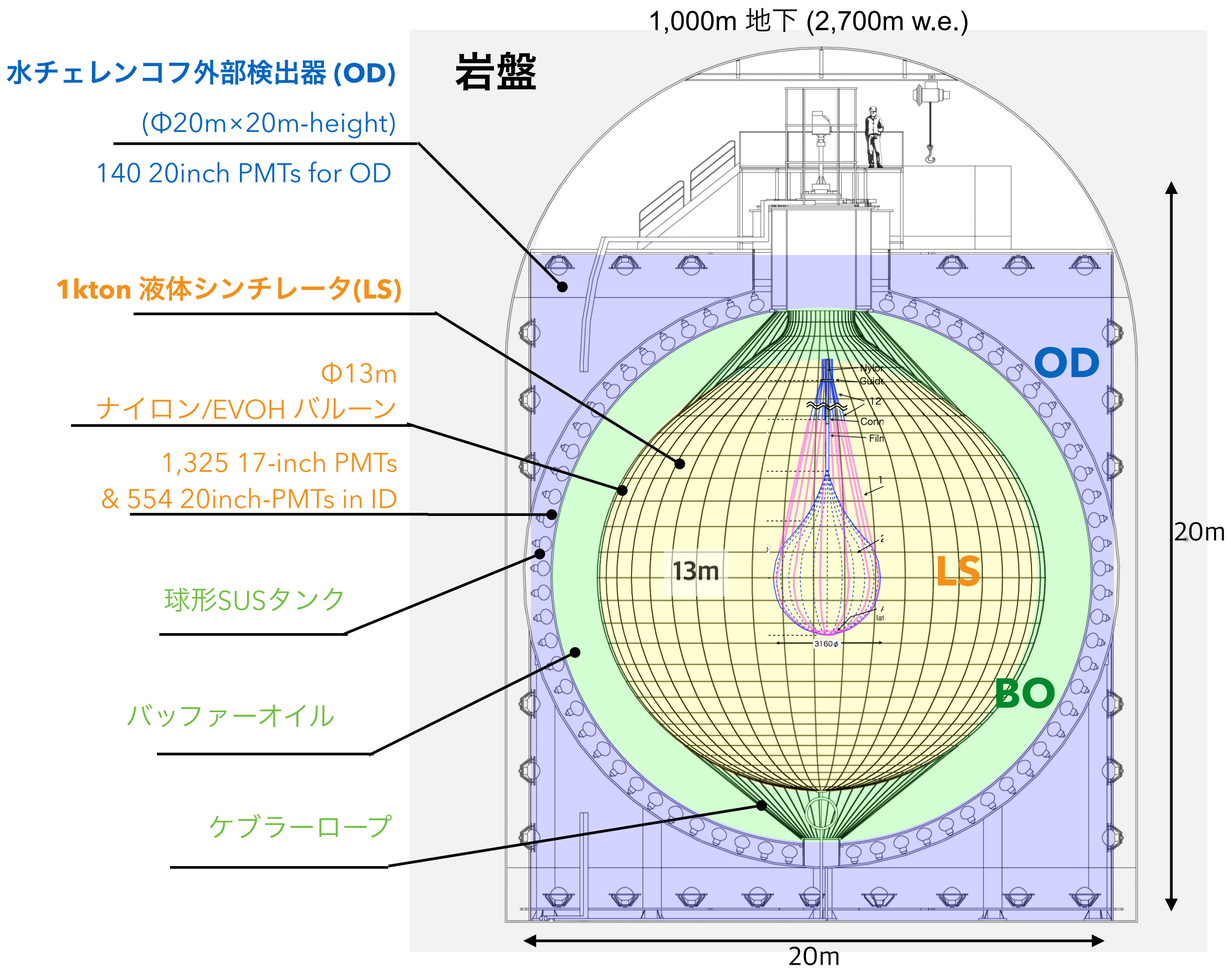


- KamLAND-Zen の期間だけ検出器中心部にインナーバルーンを導入
- 背景事象混入低減のため, この領域は解析から排除

KamLAND Detector

Kamioka **L**iquid-scintillator **A**nti-**N**eutrino **D**etector





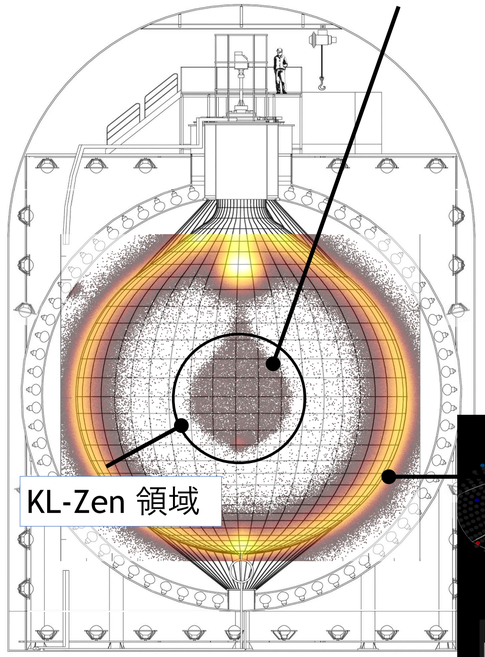
LS=Liquid-Scintillator, BO=Buffer-Oil, OD=OuterDetector, ID=InnerDetector(LS+BO)

- 1 kt **液体シンチレータ** 検出器
- 神岡鉱山 池ノ山山頂より **1 km 地下**
- シンチレーション光を約2000本の光電子増倍管(PMT)で観測
- ヒット時間と電荷量から事象再構成

- KamLAND-Zen の期間だけ検出器中心部にインナーバルーンを導入
- 背景事象混入低減のため, この領域は解析から排除

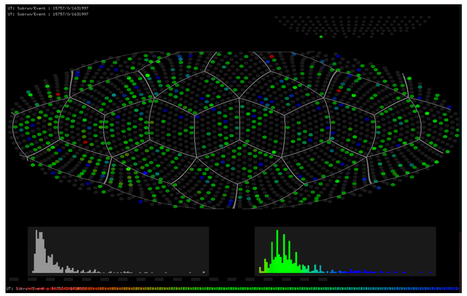
シンチレーション光と事象再構成

- エネルギーと事象位置は ヒット時間と電荷量から再構成
- 様々な放射線源で検出器応答を較正済み
- 原子核破砕生成物や大気ニュートリノでも確認

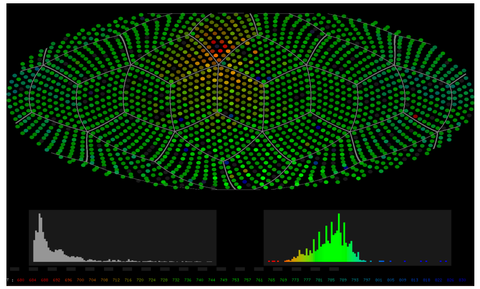


1–3 MeVの事象位置

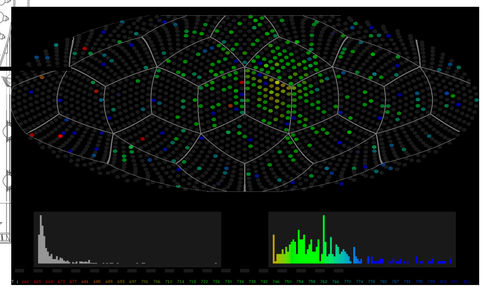
2.5MeVくらいの物理候補事象

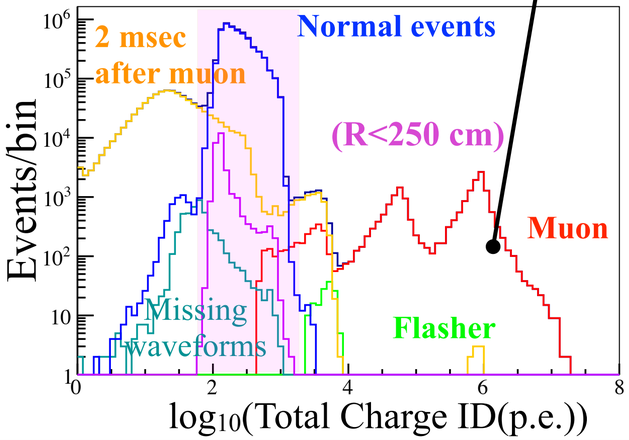


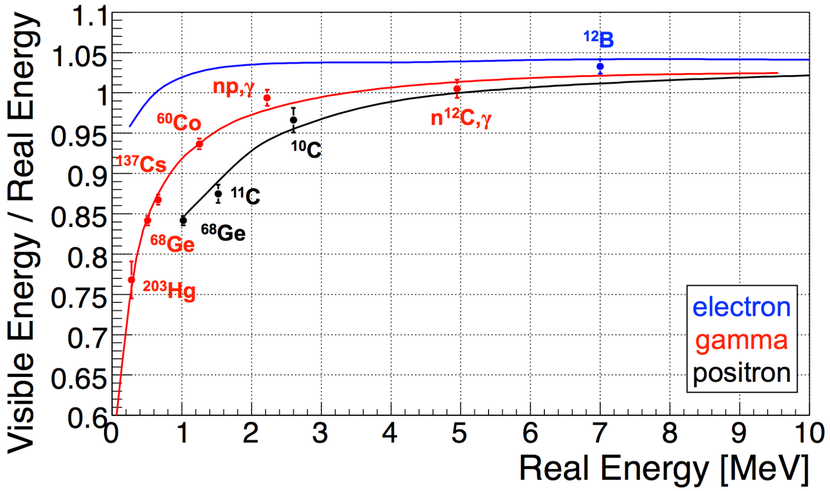
宇宙線ミューオン

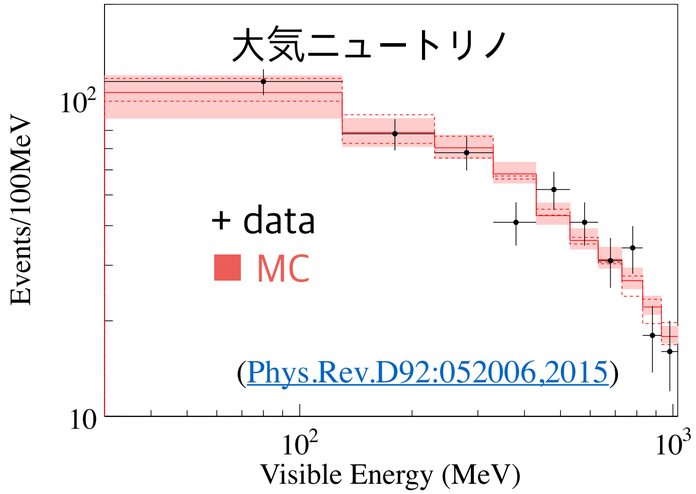


外側での事象









事象選定

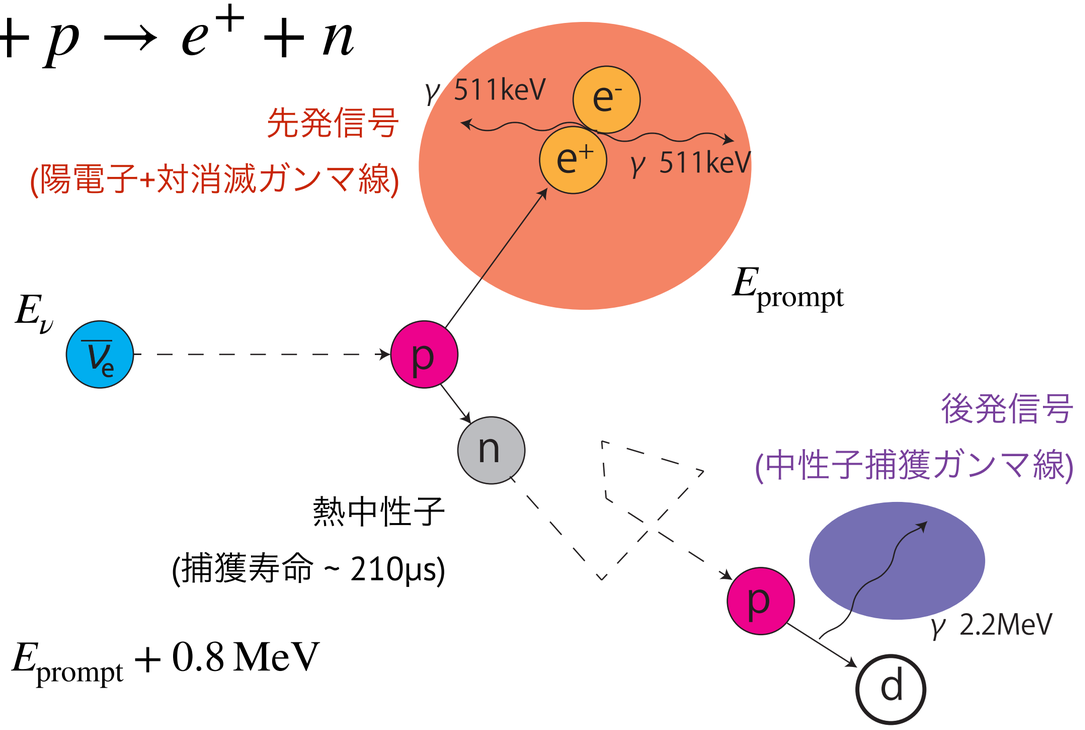
- 逆ベータ崩壊反応(IBD)を用いて**反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)** を探索
  - 再構成エネルギーE_{prompt} = 7.5 – 30 MeVの範囲を選択
  - (ニュートリノエネルギーEv = 8.3–30.8 MeV)
  - KamLAND中心から半径5.5mの有効体積

- 遅延同時計測を用いる
  - 陽電子による先発信号(Prompt)
    + 中性子捕獲ガンマ線による後発信号(Delayed)

- 背景事象
  - 原子炉ニュートリノ
  - 偶発遅延同時計測事象
  - 原子核破砕生成物 (^{9}Li)
  - 高速中性子
  - 大気ニュートリノ

逆ベータ崩壊反応

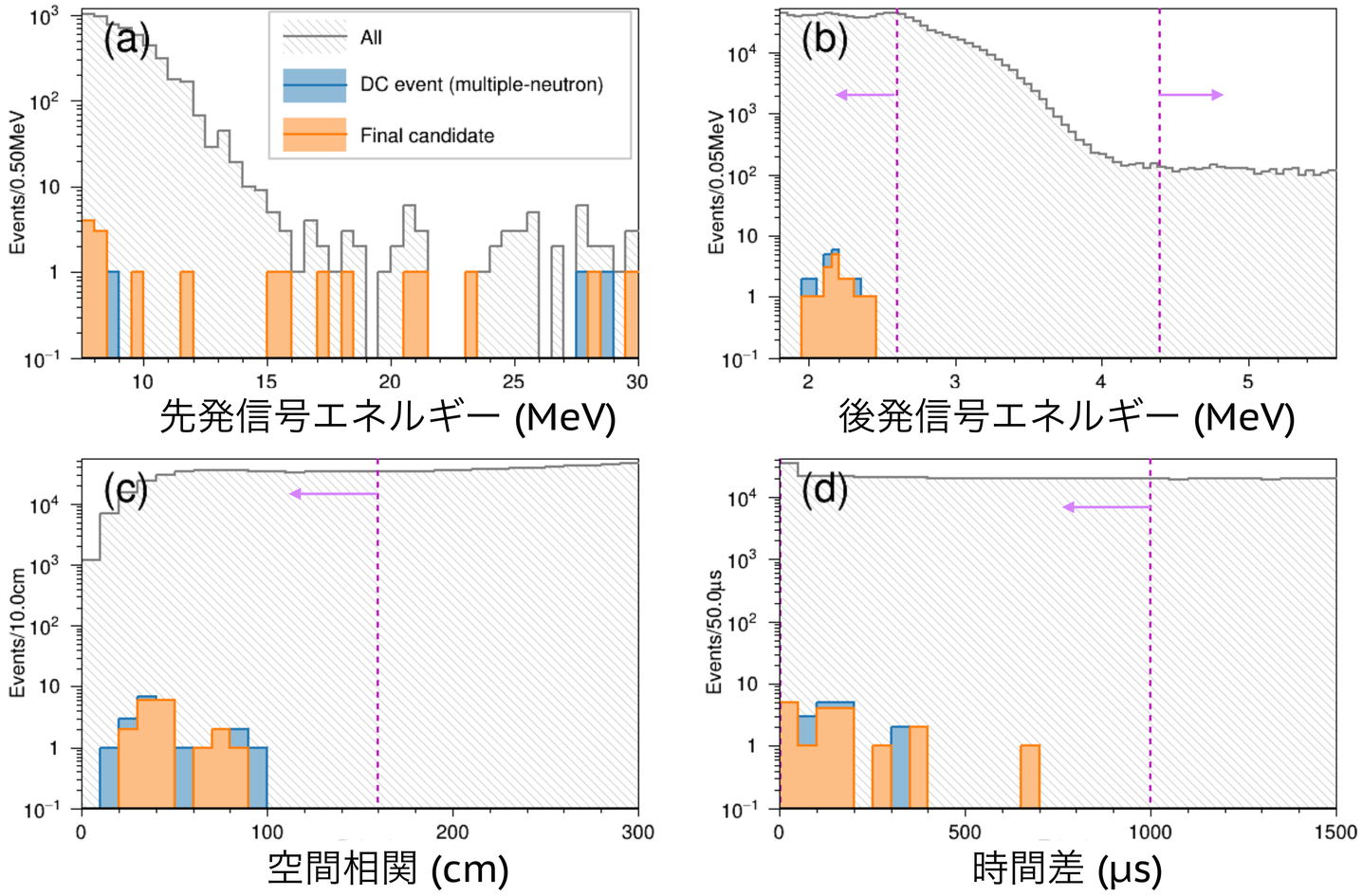
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$



$$E_\nu \simeq E_{prompt} + 0.8\,\mathrm{MeV}$$

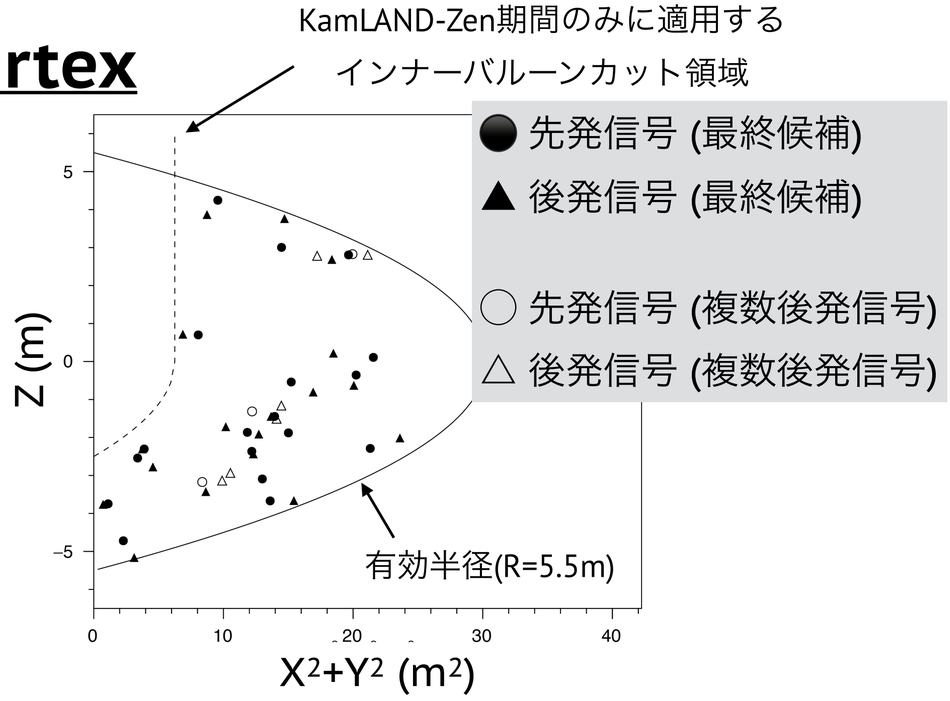
4528.5日分データからのニュートリノ事象候補

Energy Spectra



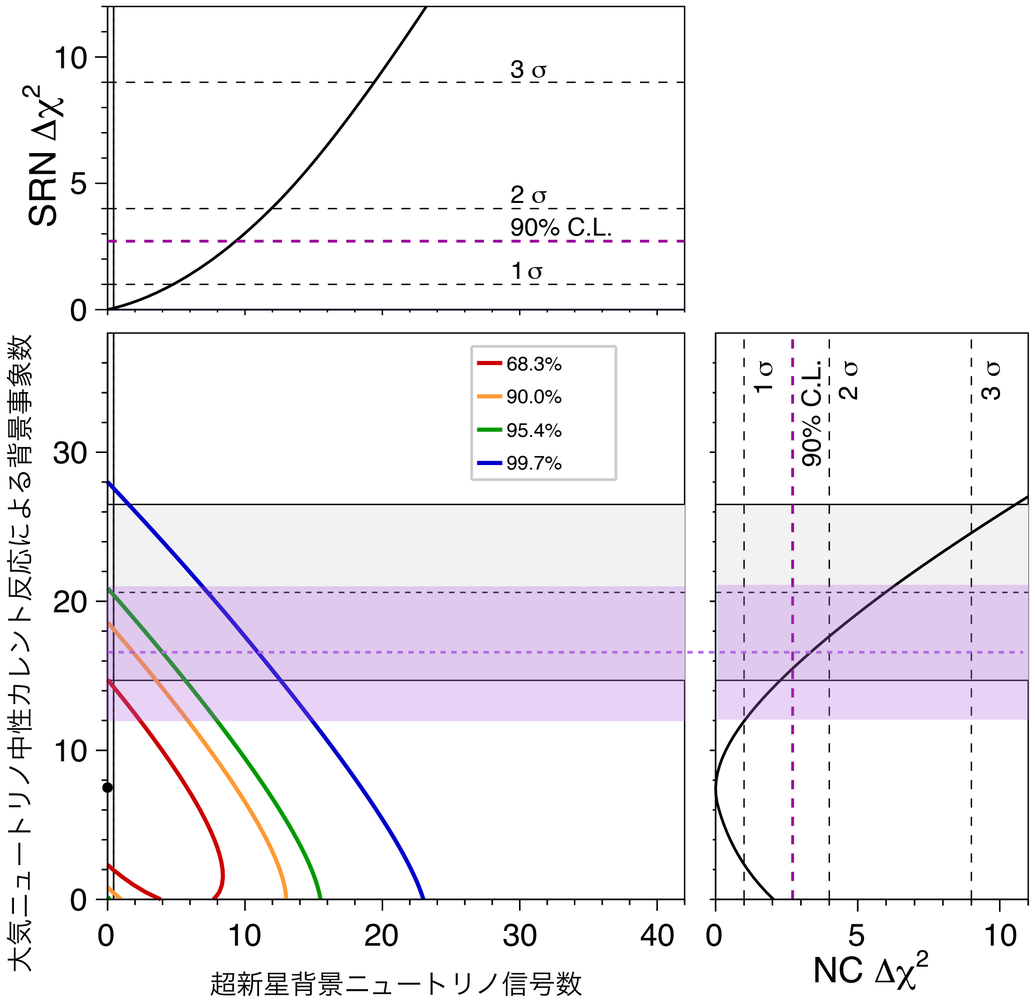
- 合計**21個**の遅延同時計測事象を観測
  - このうち**3個**が複数の後発事象
  - 最終的に**18個**を逆ベータ崩壊反応事象として解析

Vertex



※例えば高速中性子や大気ニュートリノなどが複数の後発信号をつくりうる

フィット結果(1/3)



理論的計算に基づく予測値

シミュレーション(NEUT)による予測

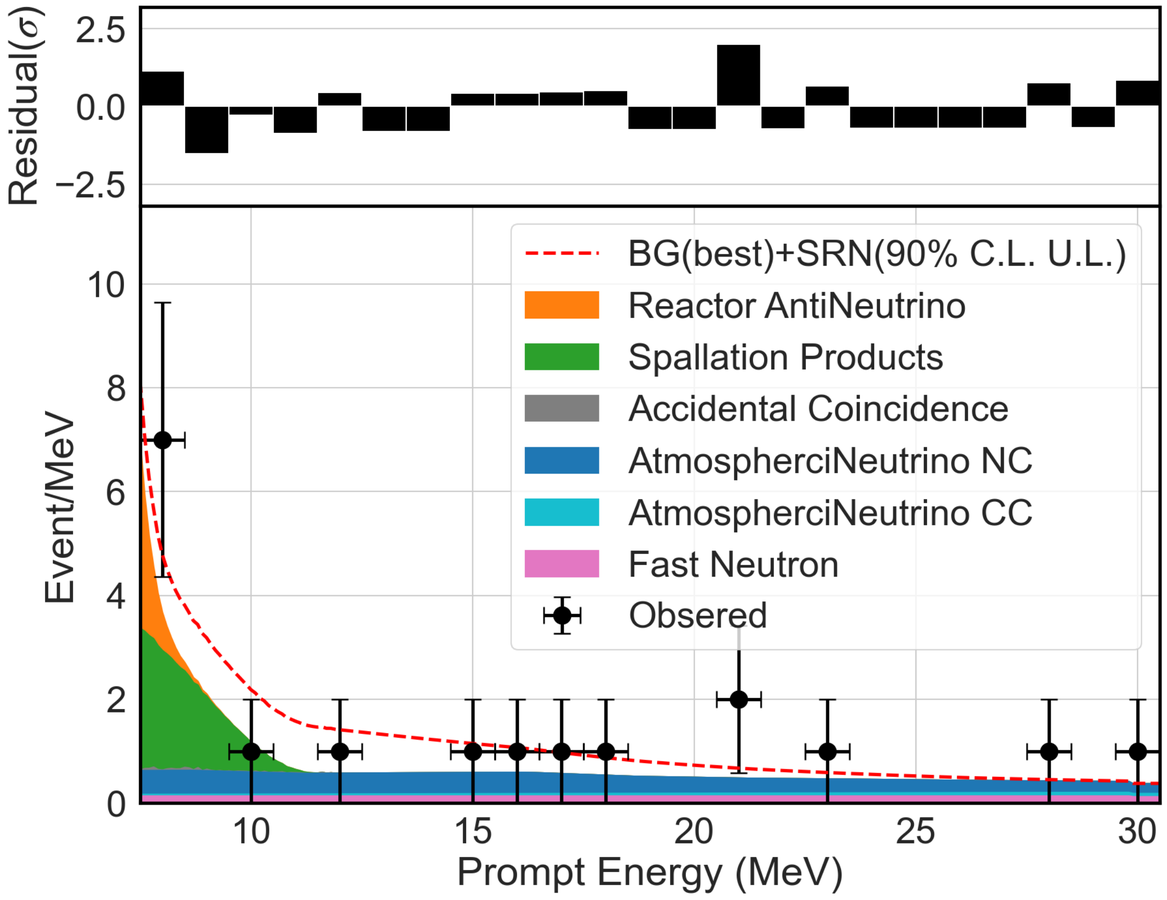
期待事象数 vs. ベストフィット

	期待事象数	フィット結果
原子炉ニュートリノ	1.4 ± 0.6	1.3
偶発事象	(7.3 ± 1.0) × 10^{-2}	7.3 × 10^{-2}
高速中性子	6.8 ± 6.8	3.3
原子核破砕生成物	1.4 ± 3.6	4.5
大気ニュートリノ荷電カレント反応	1.1 ± 0.3	1.1
大気ニュートリノ中性カレント反応	20.6 ± 5.9 (数値計算) $16.5^{+5.1}_{-4.5}$ (NEUT)	7.5
超新星背景ニュートリノ(中里モデル)	0.44	0 (best fit) 9.3 (90% C.L. U.L.)
合計	31.4 ± 9.7	17.8 (best) 27.0 (90% C.L. U.L.)
観測数	18	

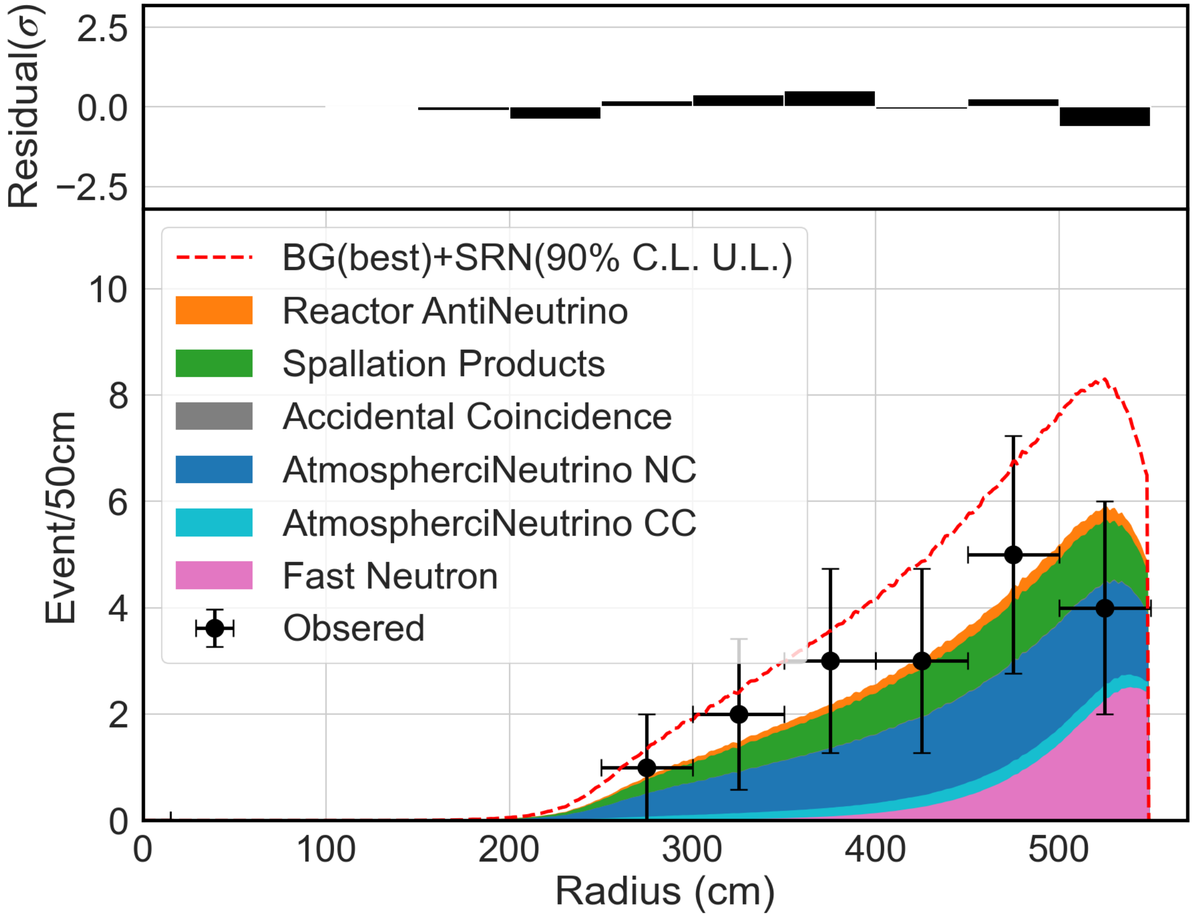
有意な信号超過は見つからなかった

フィット結果 (2/3)

Energy Spectrum



Radius Distribution



フィット結果(3/3)

どのモデルにおいても
超新星背景ニュートリノはゼロ

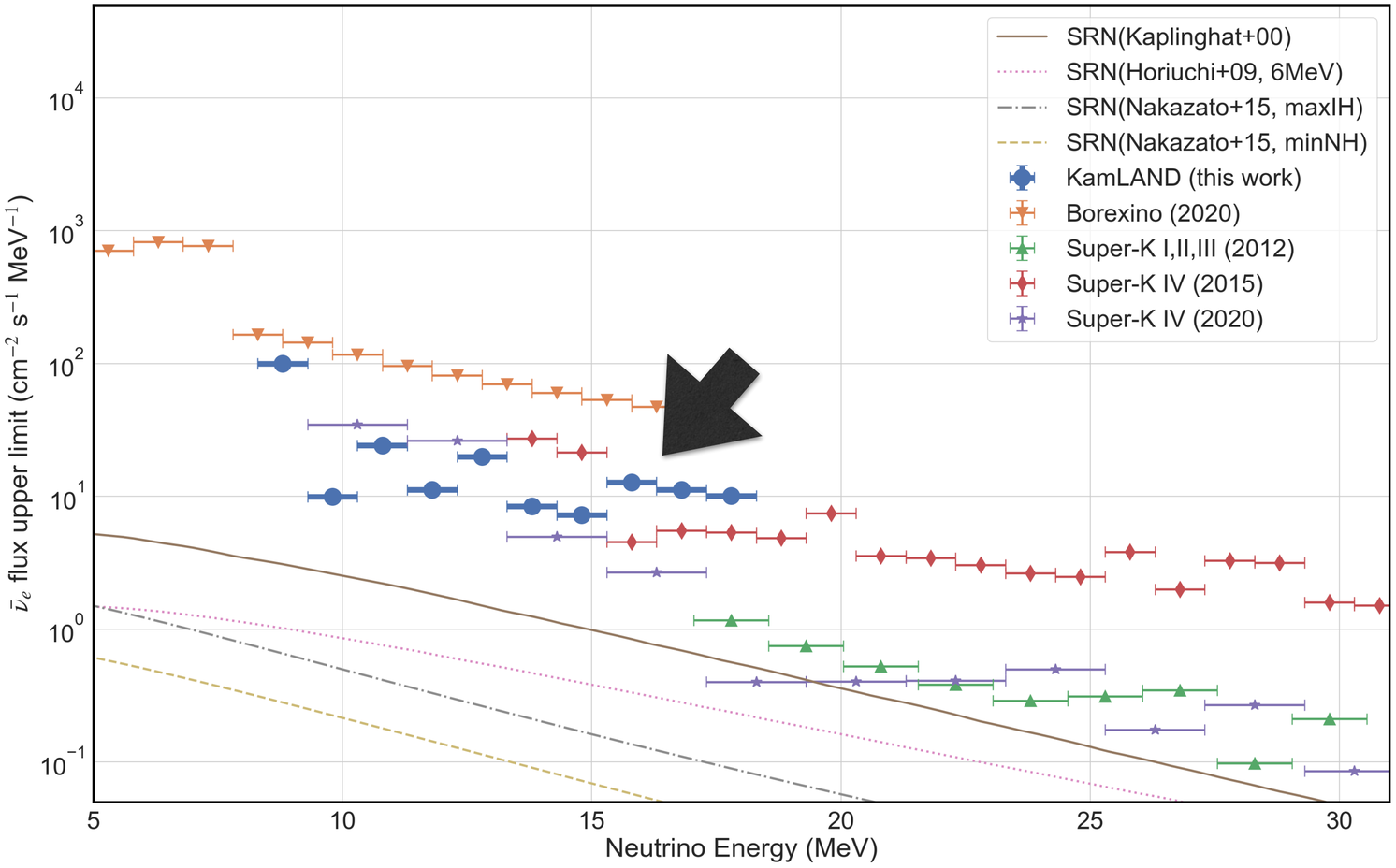
いくつかの超新星背景ニュートリノ予測モデルを使ってフィット

超新星背景ニュートリノの理論的予測	90%信頼度での上限値（ベストフィット）		予測値
	事象数	フラックス ($cm^{-2}s^{-1}$)	フラックス ($cm^{-2}s^{-1}$)
Kaplinghat+00	9.4 (0)	74.5	19.9
Horiuchi+09 (6MeV effective temperature)	10.2 (0)	61.6	5.8
Nakazato+15 (max, inverted-mass ordering)	9.3 (0)	108	5.1
Nakazato+15 (min, normal-mass ordering)	8.9 (0)	105	2.2

モデルによらないフラックス上限値

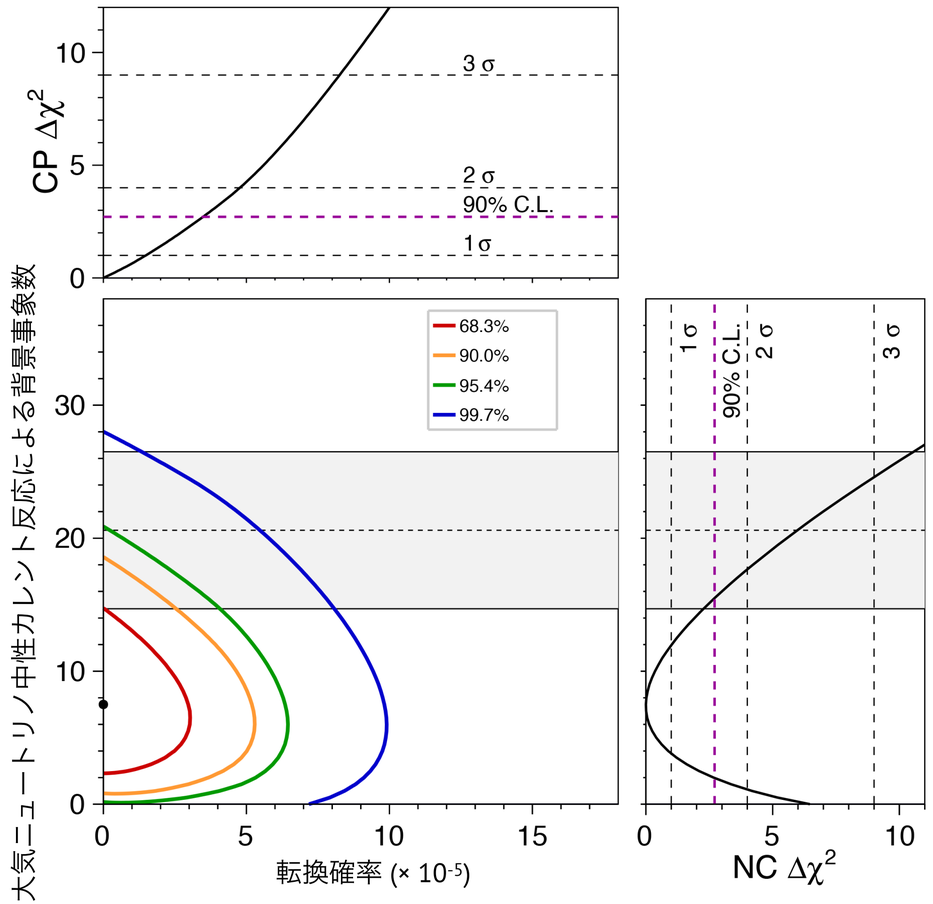
- 最新の Super-K IV (2021) の結果が一部の理論予測に触り始めている
- **今回のKamLANDの結果**は13MeV以下で最も厳しい上限値を与えている

- この結果は他の宇宙由来のニュートリノ事象探索への制限として捉えることができる (例, 原始ブラックホールからの輻射, 不活性ニュートリノからの崩壊, 暗黒物質対消滅など)



8–13 MeVで最も厳しい上限値

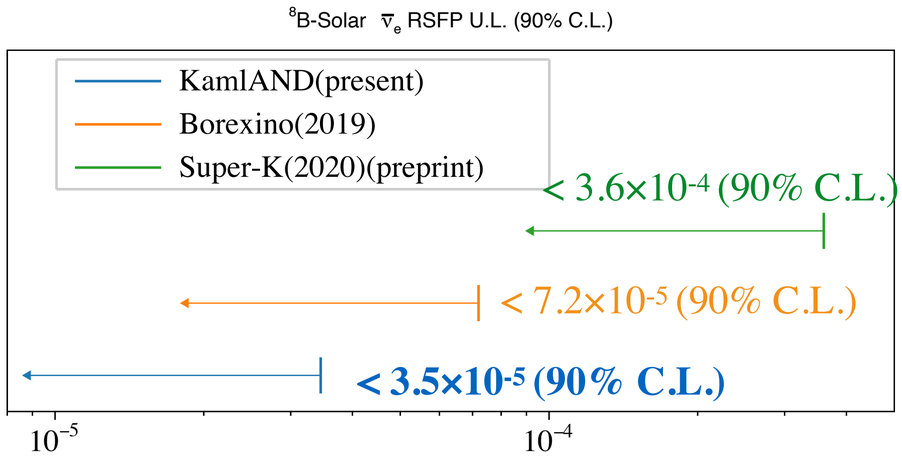
太陽^{8}Bニュートリノ転換確率への制限



- MSW+RSFPによって太陽ニュートリノが転換(^{8}B $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$)する確率に制限を与えた
- **今回得られた結果(P<3.5×10^{-5})** は最も厳しい上限値
- 太陽磁場を仮定して, **ニュートリノ磁気能率**へも制限が加わる

$$\mu < 4.9 \times 10^{-10} \mu_B \left(\frac{10\,\mathrm{kG}}{B_T(0.05 R_\odot)} \right),$$

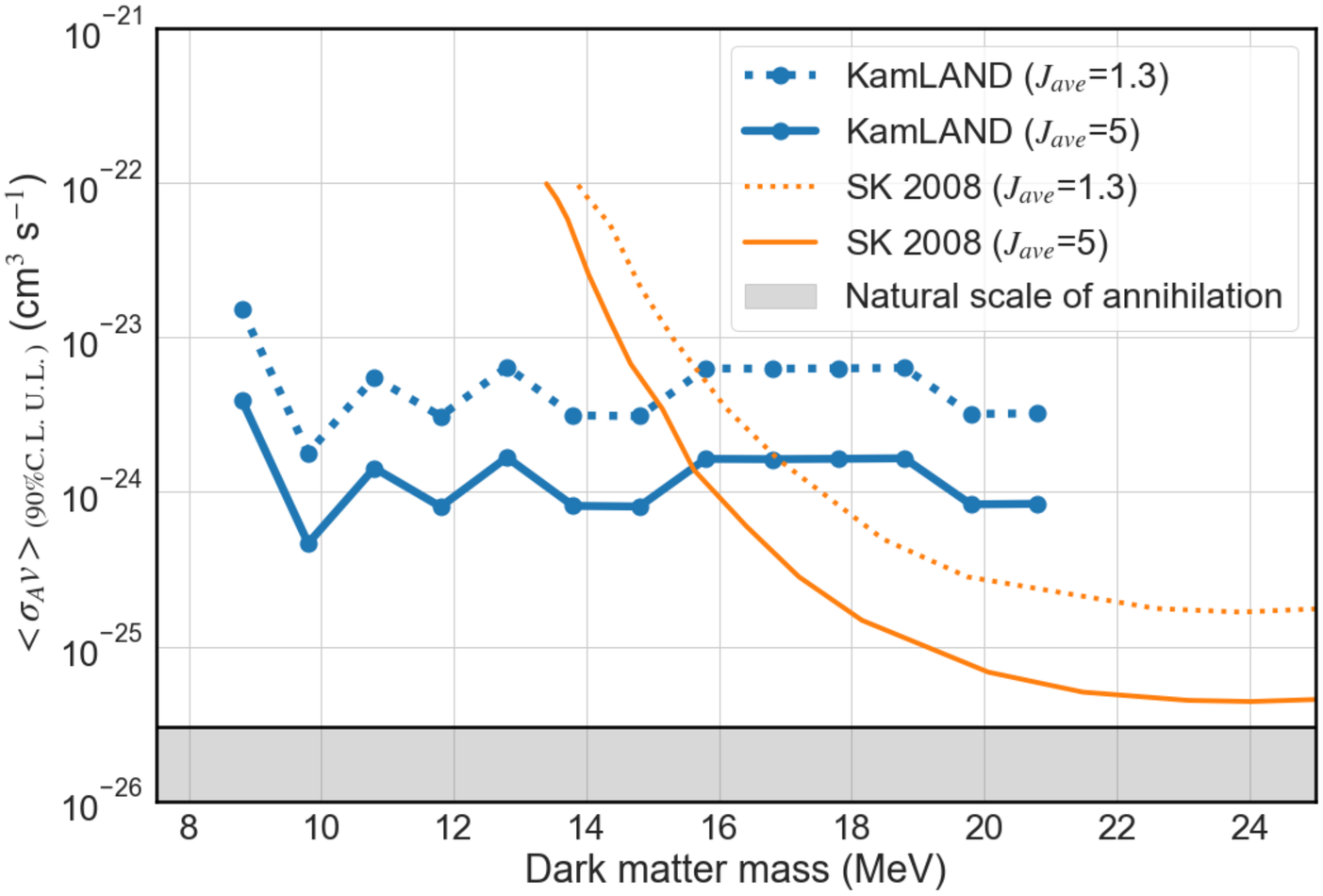
しかしこれは Borexino による太陽ニュートリノ測定から得られる上限値よりもまだ弱い ($0.28 \times 10^{-10} \mu_B$)



太陽ニュートリノ転換確率上限値

軽い暗黒物質対消滅への制限

- 軽い暗黒物質同士が対消滅してニュートリノペアになるモードについて制限が加わる($\chi + \chi \rightarrow \nu + \bar{\nu}$)
- $$\frac{d\phi}{dE_\nu} = \frac{\langle \sigma_A \mathbf{v} \rangle}{2} J_{\mathrm{ave}} \frac{R_{\mathrm{sc}} \rho_0^2}{m_\chi^2} \frac{1}{3} \delta\left(E_\nu - m_\chi\right)$$
- 15MeV以下で制限を与えた



まとめ

- 大型液体シンチレータ検出器カムランドで得られた4528日分のデータから, 8–30MeV領域の宇宙由来の反電子ニュートリノ事象探索を行った
- 背景事象と比較して有意な信号超過は見受けられなかったため90%信頼度で下記の上限値を与えた
  - モデルによらない反電子ニュートリノのフラックス上限値; 8–13 MeV領域で最も厳しい上限値
  - いくつかの超新星背景ニュートリノモデルを仮定した場合の各モデルへのフラックス上限値; $60 - 100\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$
  - 太陽反電子ニュートリノへの転換確率への最も厳しい上限値; $P<3.5\times10^{-5}$
  - (暗黒物質対消滅からのニュートリノ対生成の反応断面積)
- これらの結果についてまとめたものは論文に投稿済み (Accepted for publication in ApJ @2021年10月)
  - プレプリントがarXivにあがっています arXiv:2018.08527