

液シン型検出器による超新星 ニュートリノ研究の現状と展望

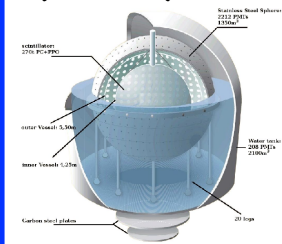
石徹白晃治 (東北大)

超新星ニュートリノ研究会, 2015年3月16-17日, 東京理科大学

世界の液シン検出器

稼働中

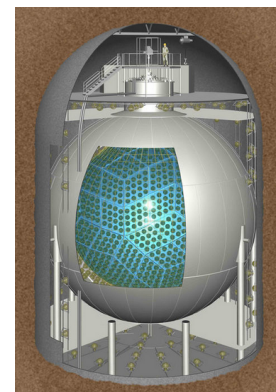
Borexino
(320t)



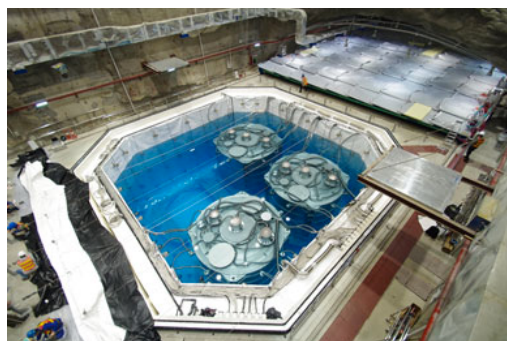
LVD
(1kt)



KamLAND
(1kt)

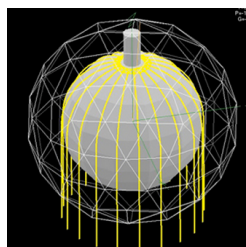


DayaBay
(330t)



世界の液シン検出器

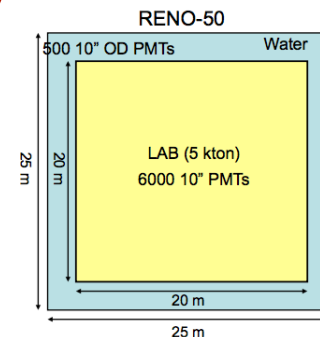
将来



SNO+
780t, 2015?

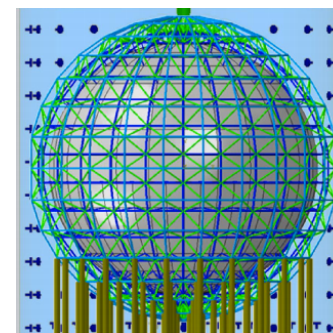
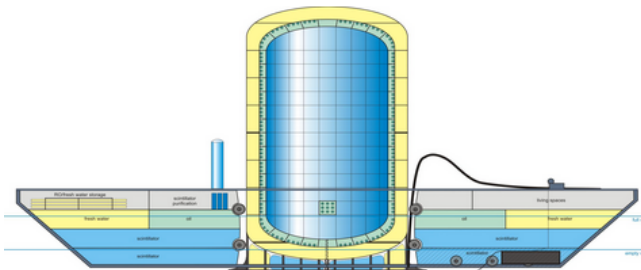


LENA
50kt,
提案中



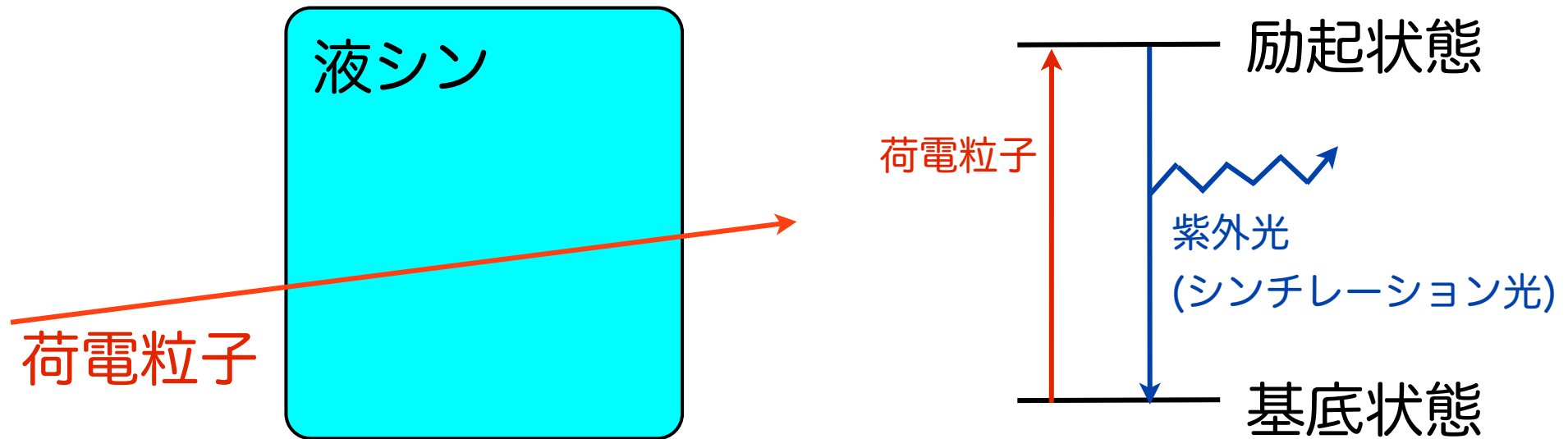
RENO-50,
5kt?, 18kt?
??

HANO HANO, 10kt, 提案中



JUNO
20kt,
2020?

液シン検出器の原理



特徴

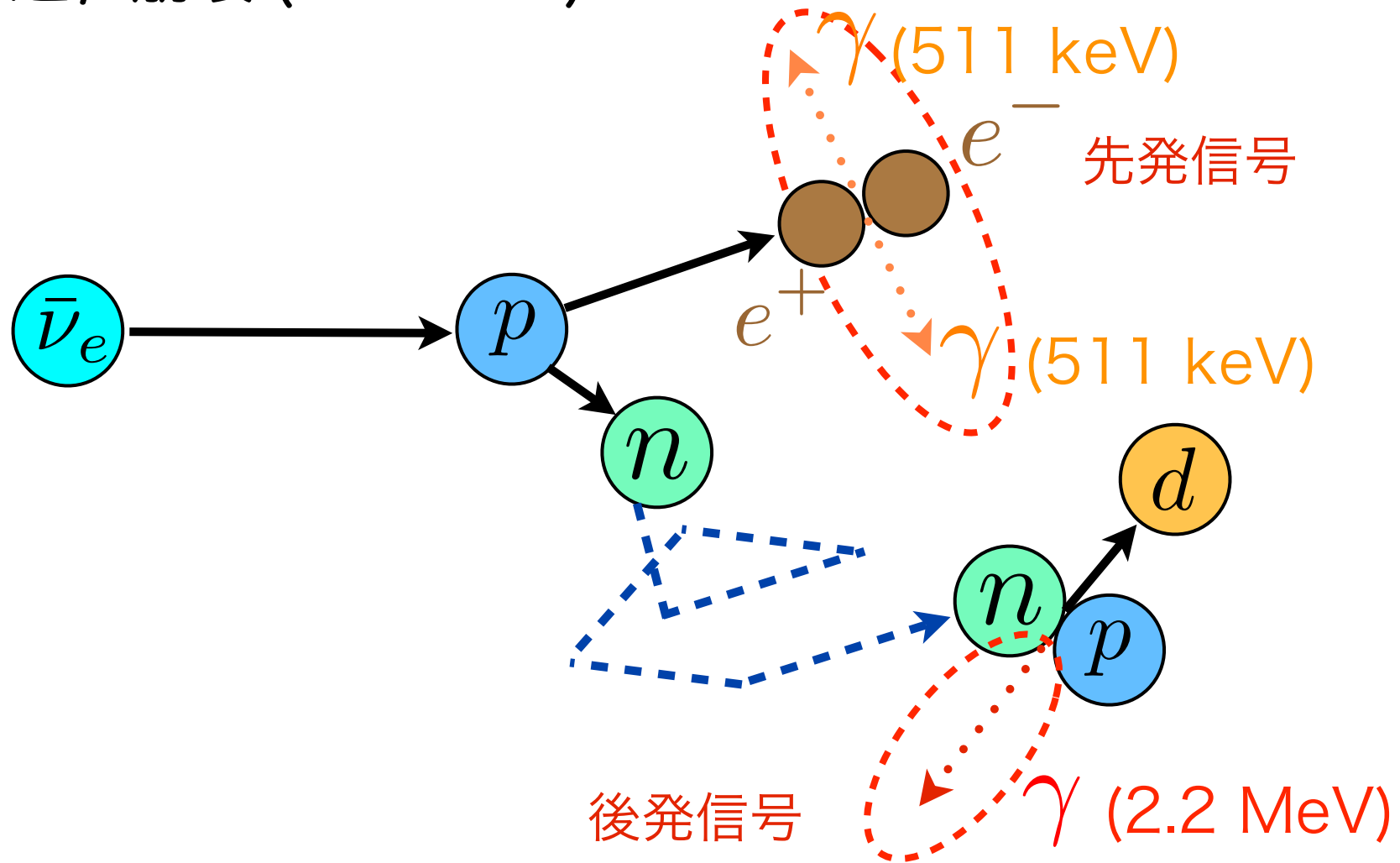
- 明るい (チェレンコフ光の約100倍)
- 陽子(p)の反跳反応が見える
- Cの反応が見える



ニュートリノ検出

主反応

- 逆 β 崩壊 ($>1.8\text{MeV}$)



ニュートリノ検出

主反応

- 逆 β 崩壊 ($>1.8\text{MeV}$)

遅延同時計測

- 時間-空間相関によりバックグラウンド低減

シンチレーション光

- 1.8 MeVまでの感度
 - => 前兆ニュートリノ探索に有利
- 高エネルギー分解能
 - => 地球物質効果測定に有利

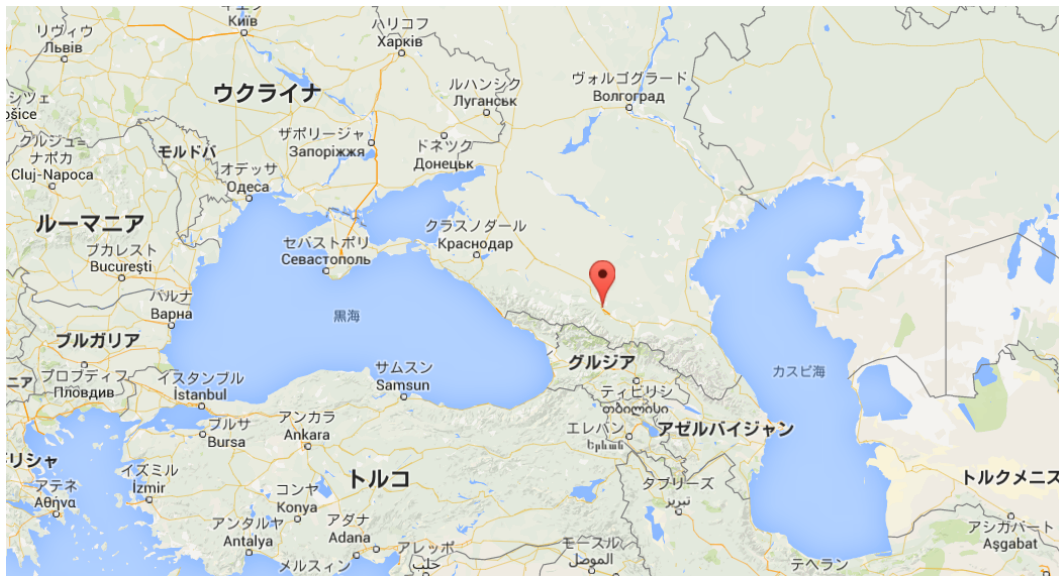
超新星ニュートリノ探索

Baksan Underground Scintillation Telescope

- 1980年から稼働 (現状は不明)
- 液シン量: 330 tons
- 2013年までの結果:

$< 0.082 \text{ event/year}$
(by ICRC2013集録)

天の川銀河をカバーできるかは不明



70x70x30cmのコンテナが3180個



写真は安東さんの旅行記

超新星ニュートリノ探索

LVD (large volume detector)

- 1992年から稼働
- 液シン量: 1ktons
- 2013年までの結果:

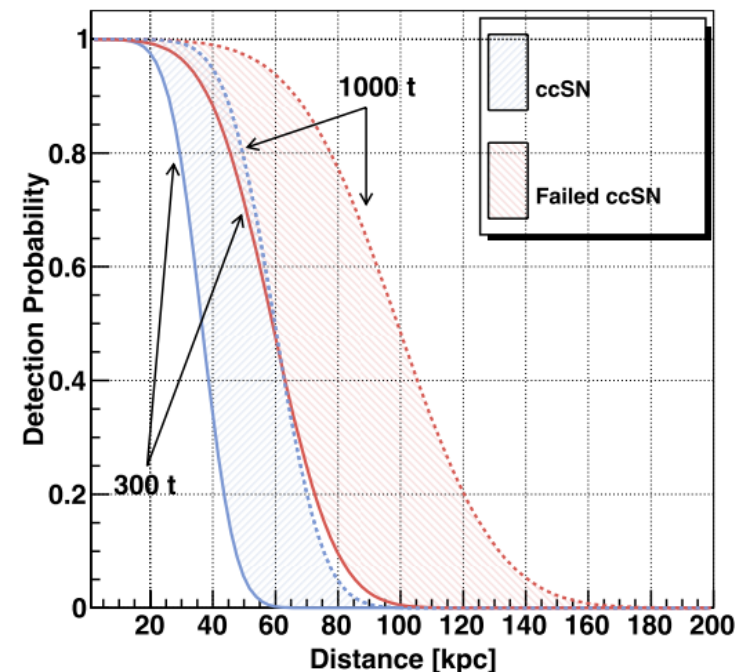
$< 0.114 \text{ event/year@25kpc}$

arXiv:1411.1709



ちなみに,
天の川銀河での上限値は観測時間が決めるので, 新規に解析は微妙...

GWとの相関解析なら意味はあるかも....
(KamLANDは保留中.....)

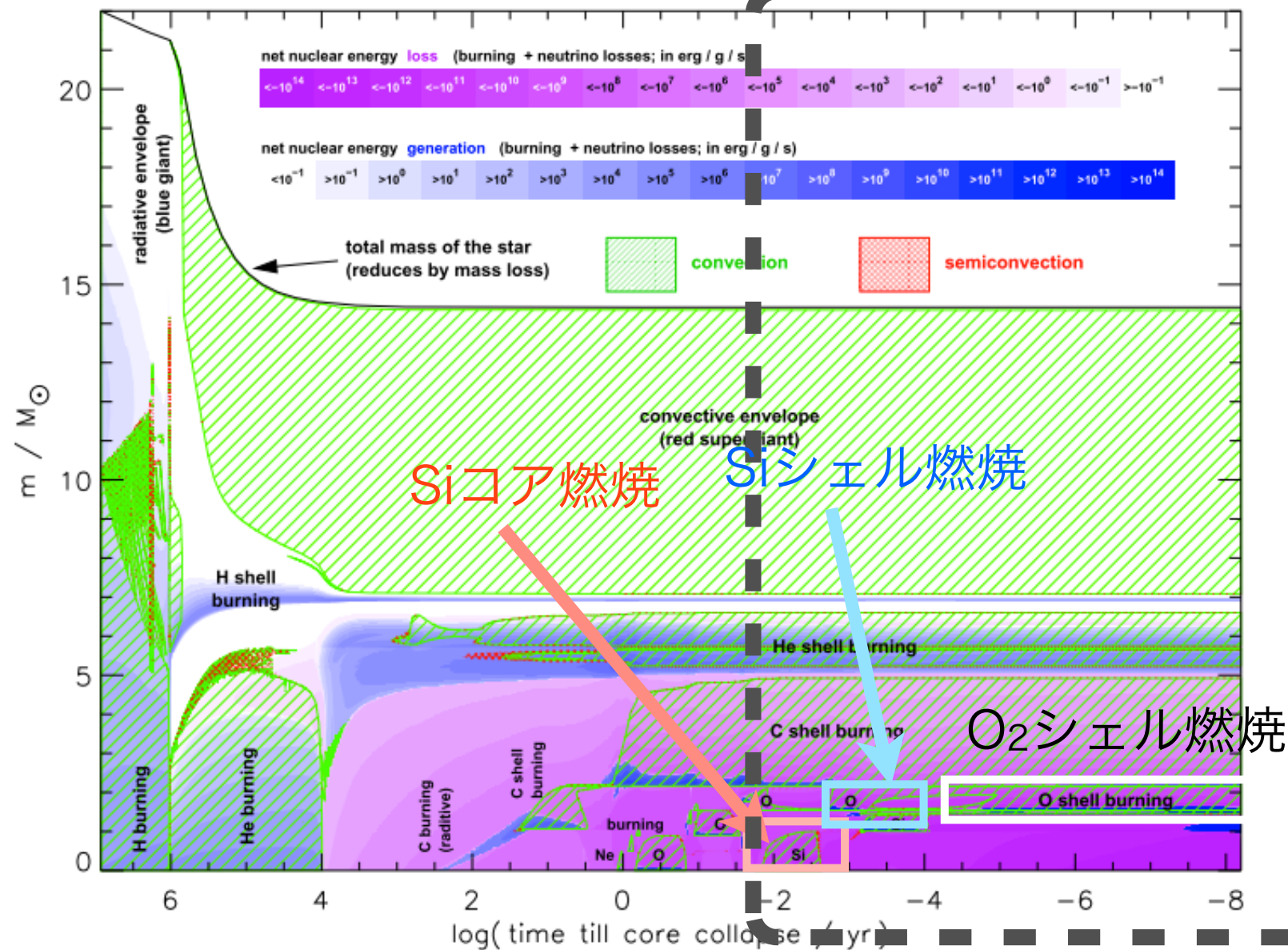


次の超新星ニュートリノへ向けて

- 前兆ニュートリノ (シリコン燃焼フェーズ)
- フレーバー分離 (3種類のニュートリノ)
- 地球物質効果

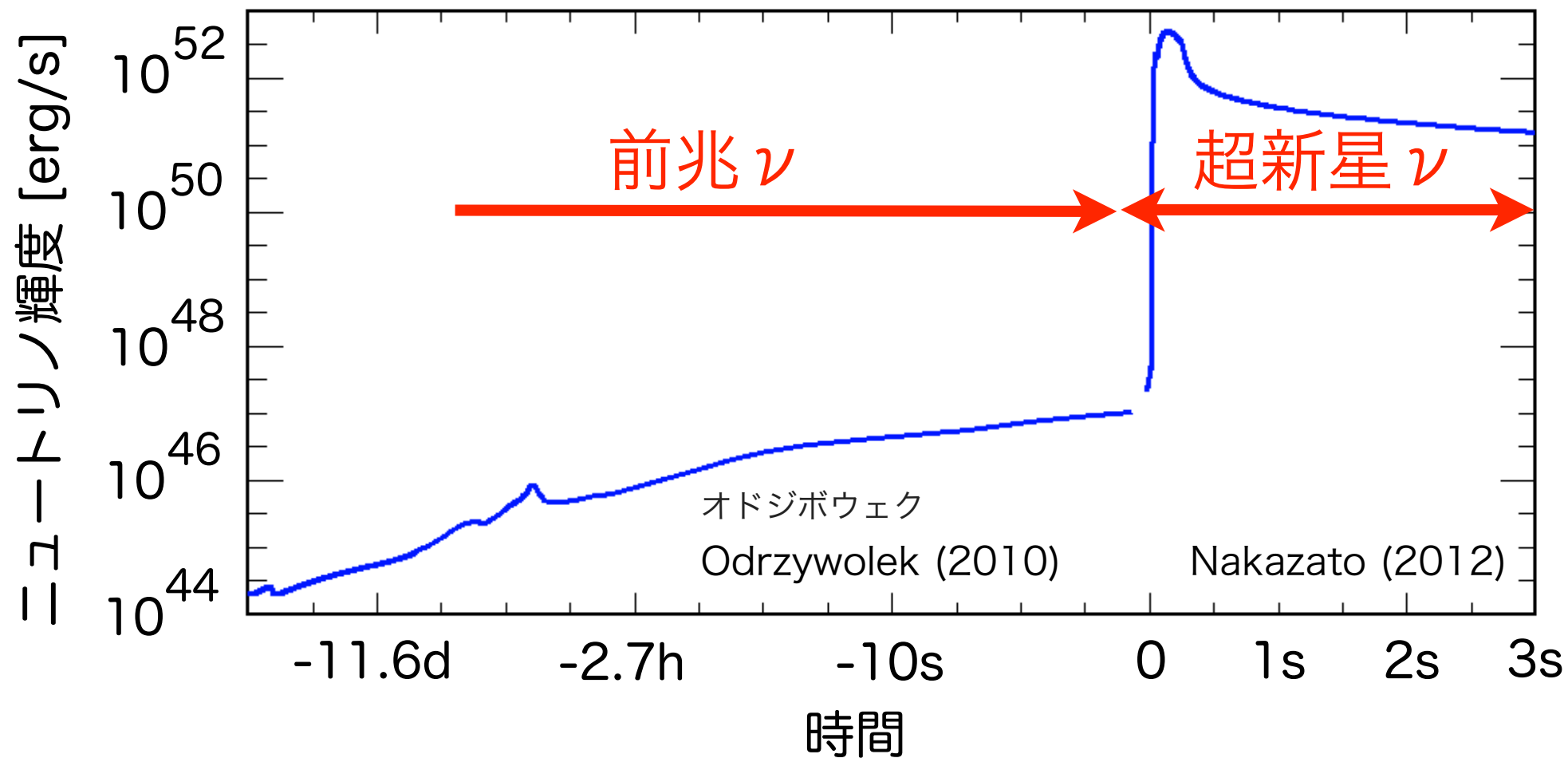
次の超新星ニュートリノへ向けて

前兆ニュートリノ (シリコン燃焼フェーズ)



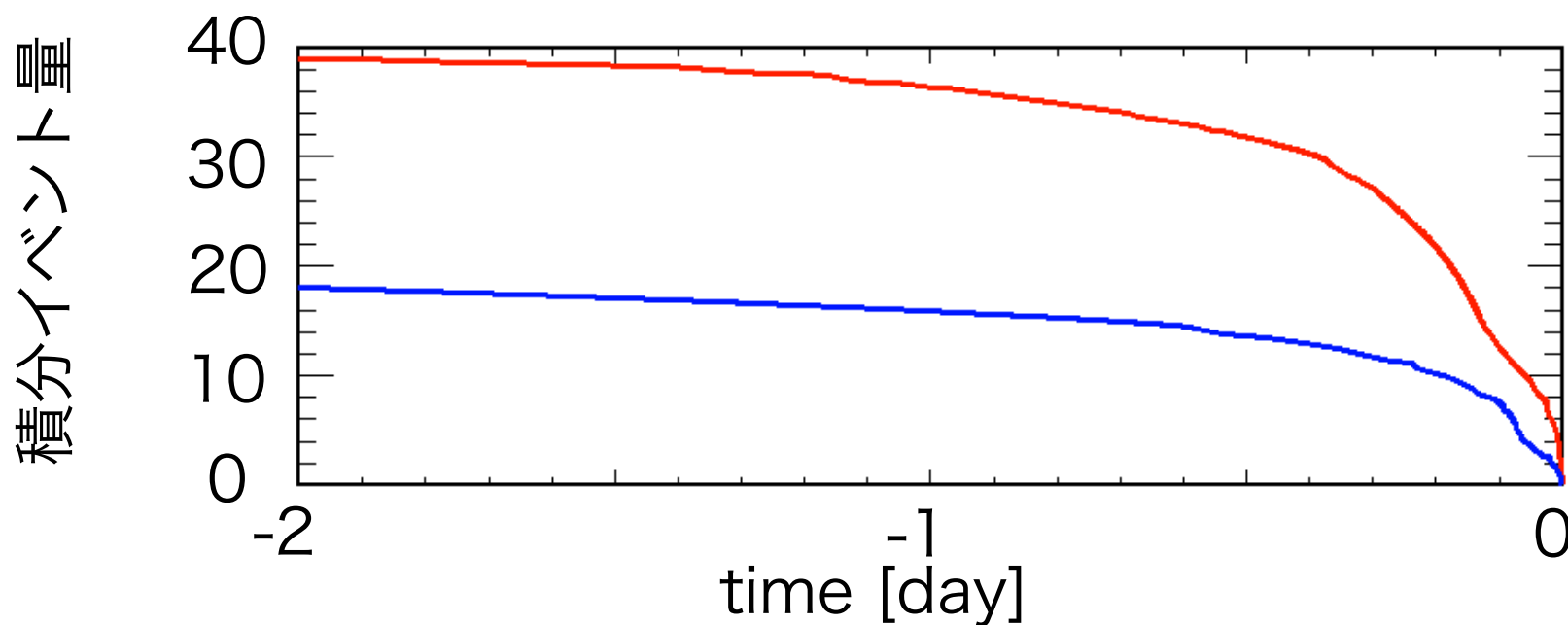
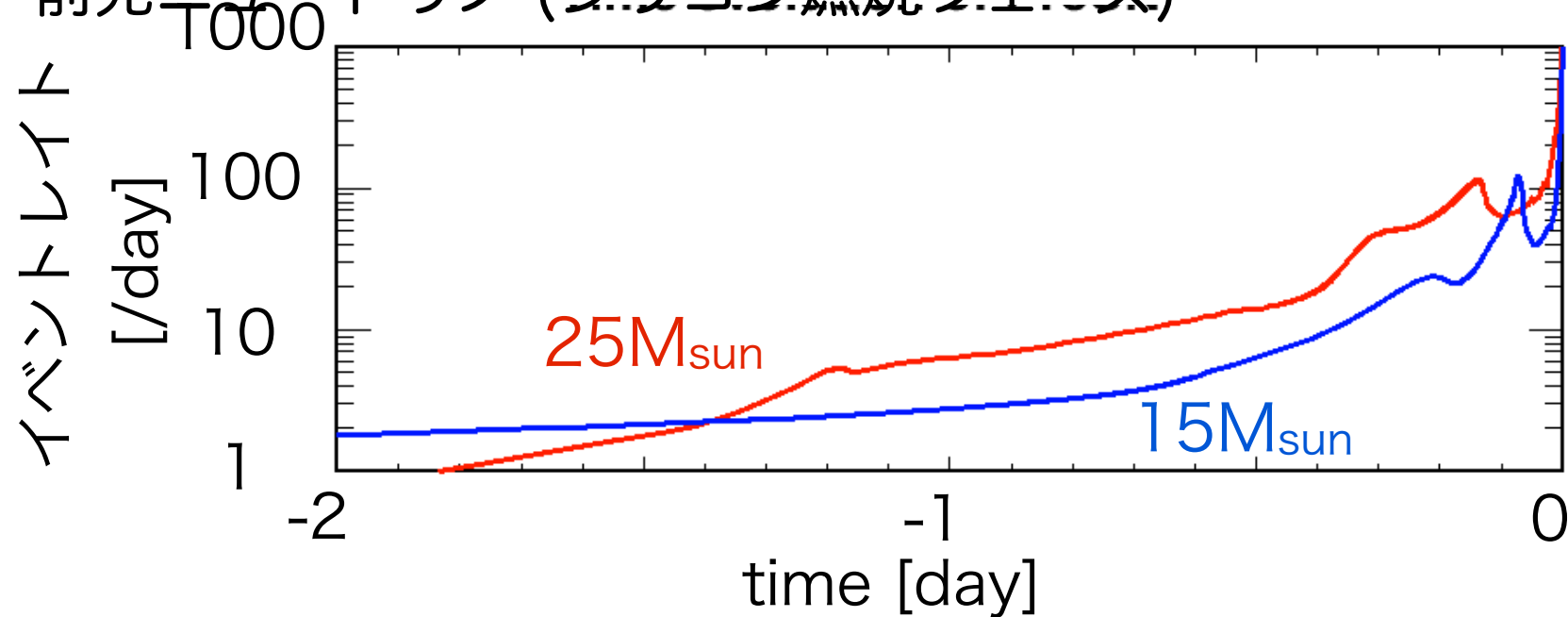
次の超新星ニュートリノへ向けて

前兆ニュートリノ (シリコン燃焼フェーズ)



次の超新星ニュートリノへ向けて

前兆ニュートリノ (シリコン燃焼フェーズ)



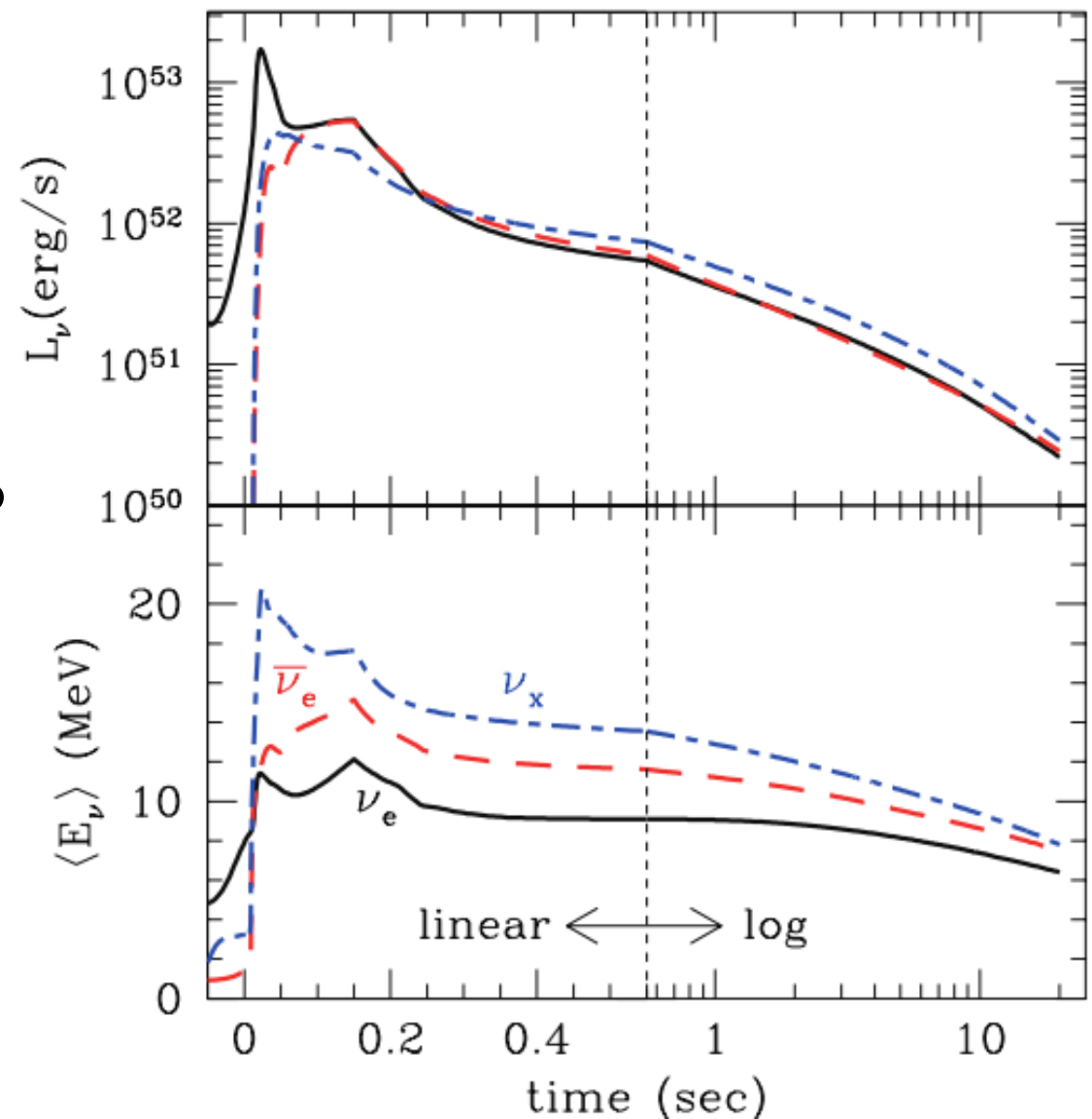
次の超新星ニュートリノへ向けて

3種類のニュートリノ

最終散乱面が異なる.

-> 星の異なる深さでの
熱力学的情報を持つ.

ν_e と $\bar{\nu}_e$ の測定が望まれる



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 205:2 (17pp), 2013 March

ν_x の測定

中性カレント反応

$$\nu + p \rightarrow \nu + p$$

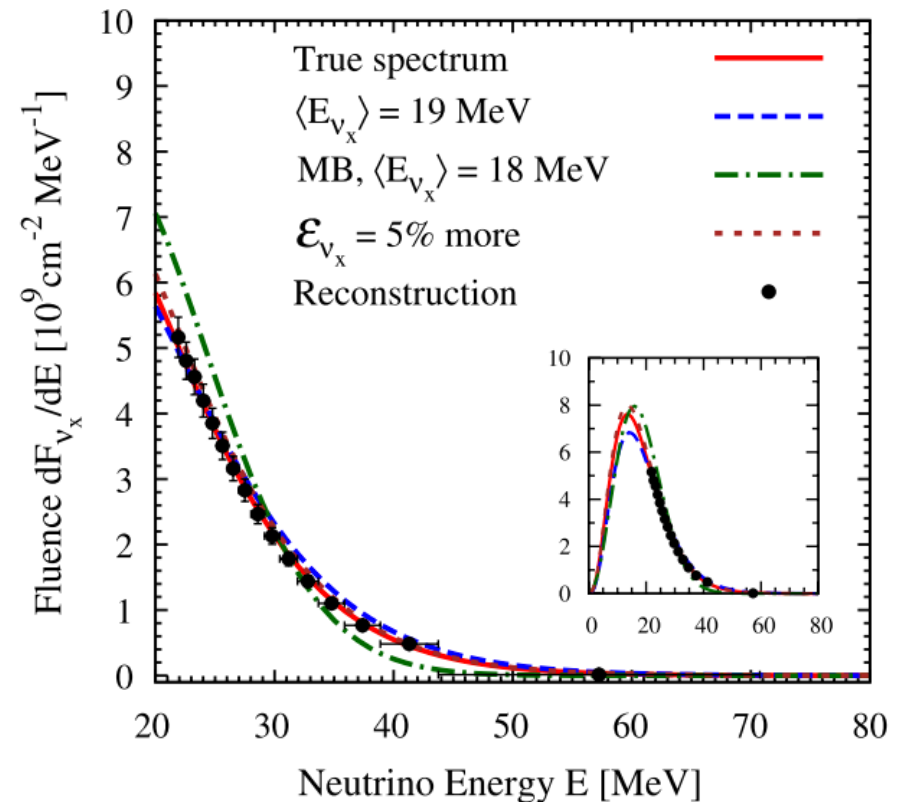
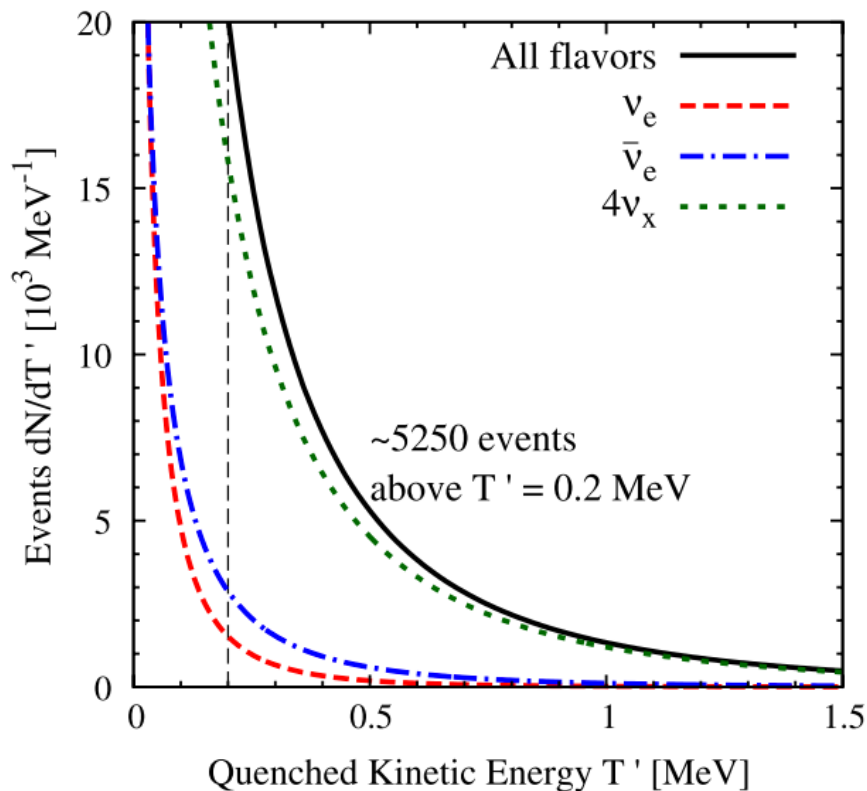
(陽子はチャレンコフ反応を起こさない)

ref:

PHYSICAL REVIEW D **66**, 033001 (2002)

PHYSICAL REVIEW D **83**, 113006 (2011)

LENA(50kt)で10kcpのSNを考えた例



ν_e の測定

arXiv:1412.8425v1

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$

$$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N}_{\text{gs}} + e^-$$

$${}^{12}\text{N}_{\text{gs}} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^+ + \nu_e$$

$$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B}_{\text{gs}} + e^+$$

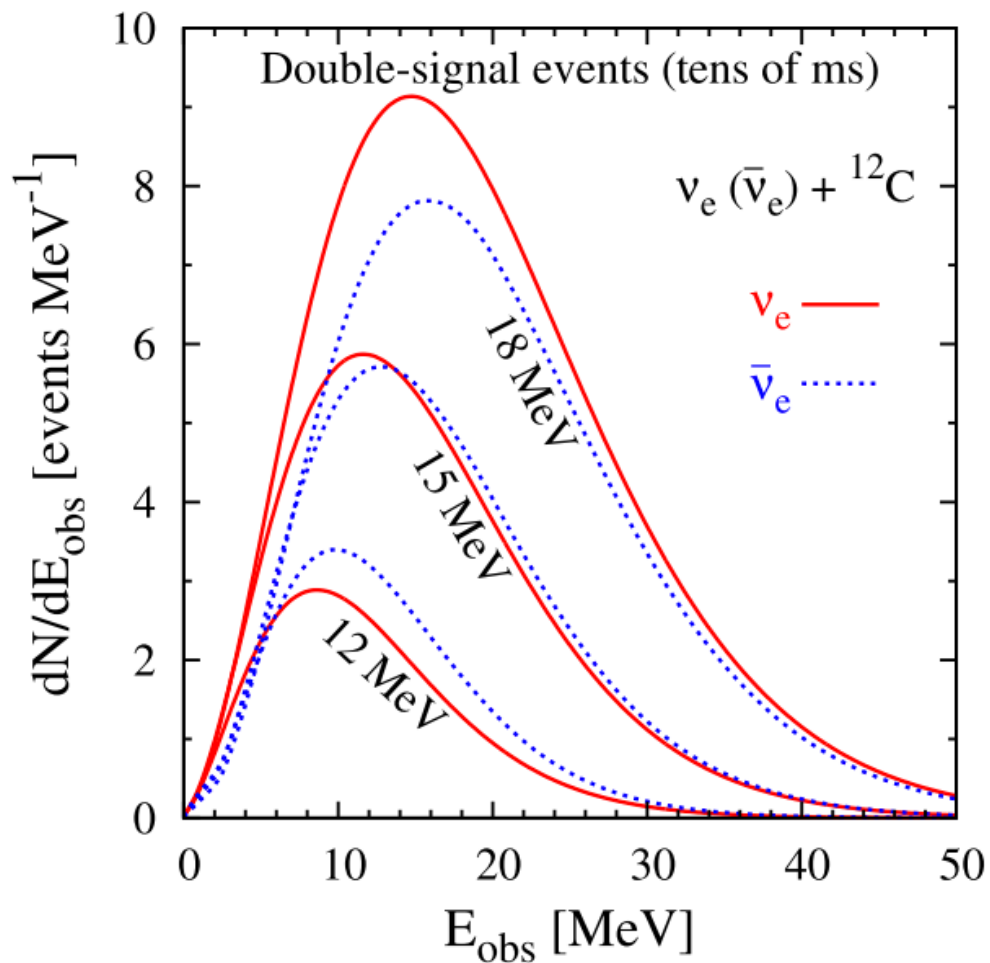
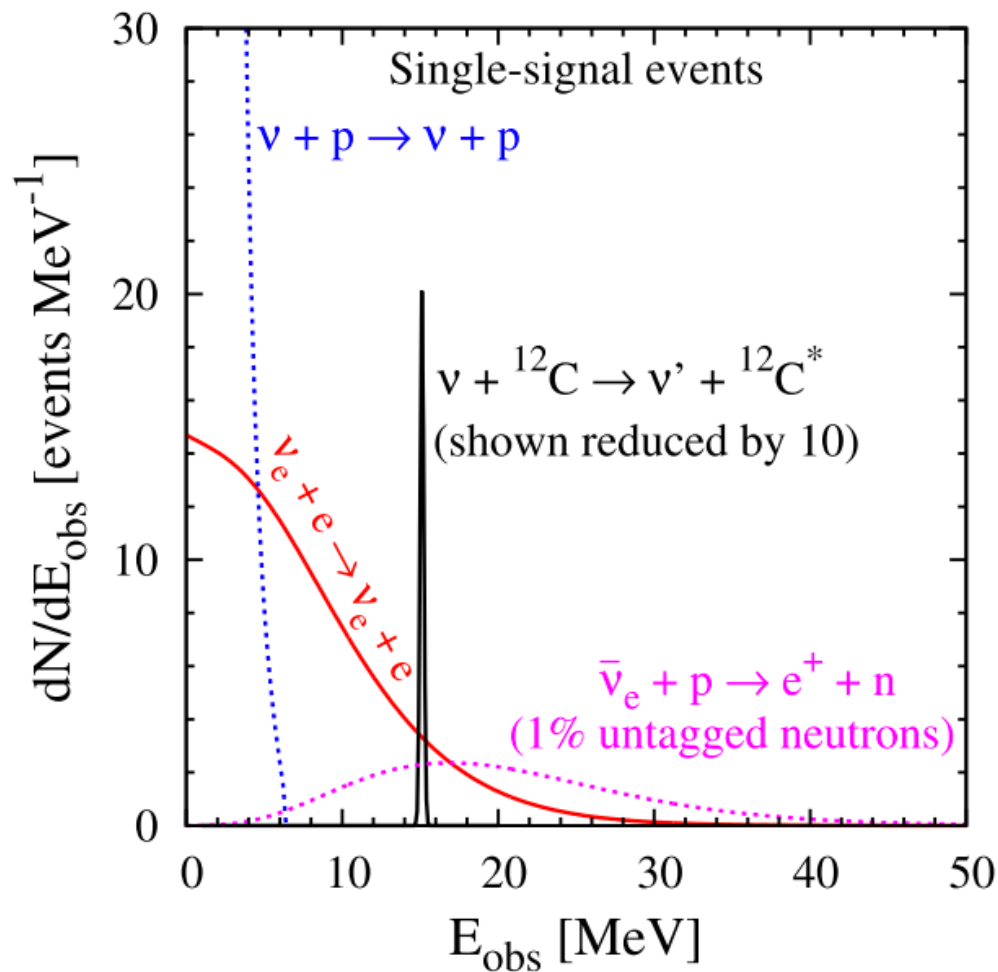
$${}^{12}\text{B}_{\text{gs}} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^- + \bar{\nu}_e$$

遅延同時計測

ν_e の測定

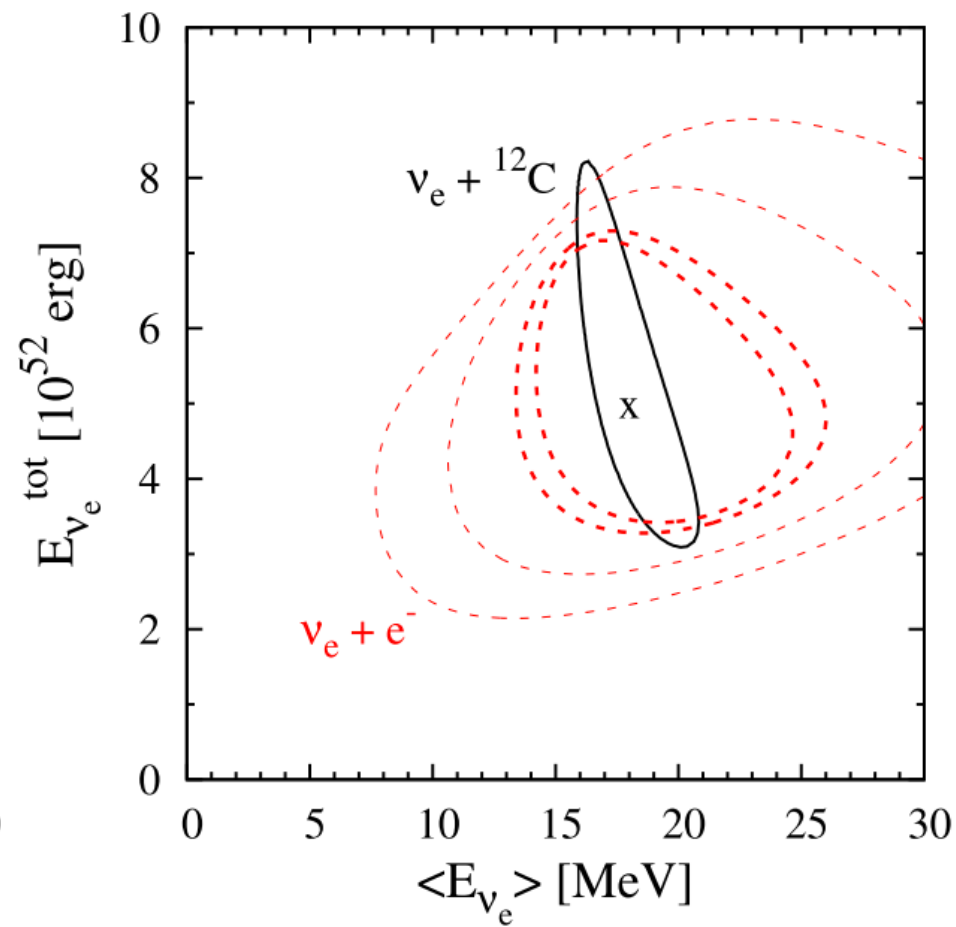
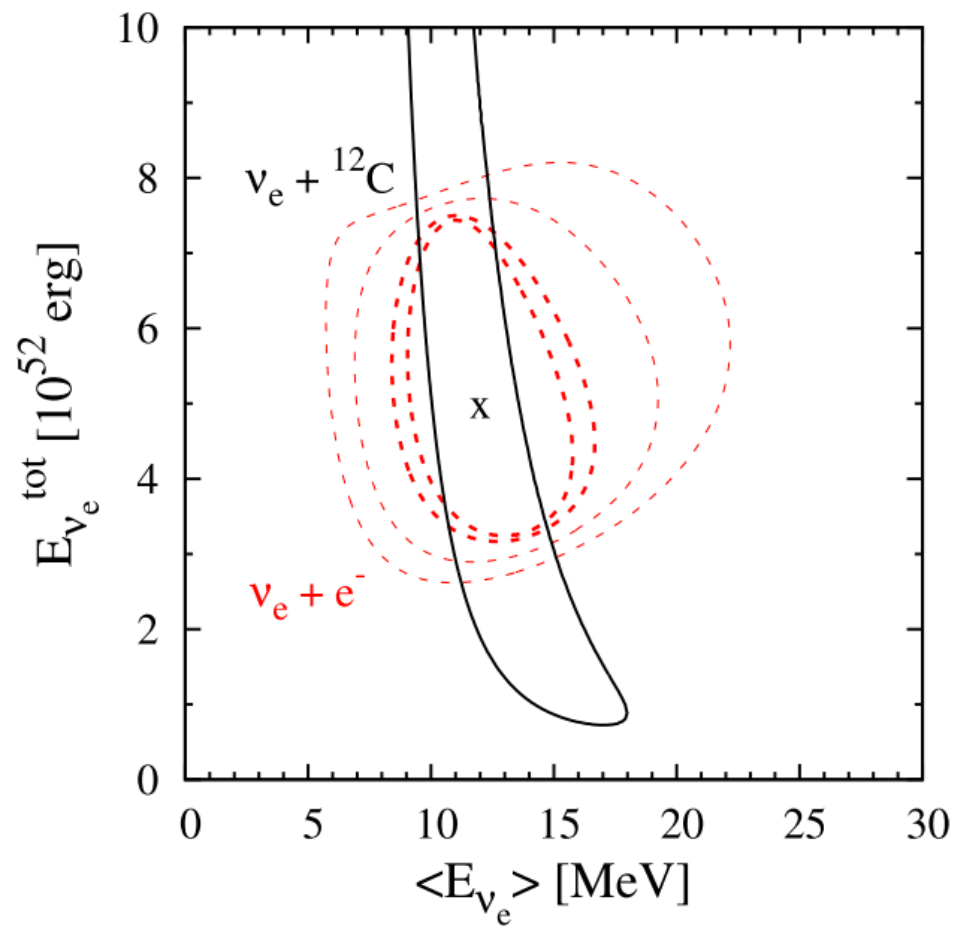
arXiv:1412.8425v1

JUNO(20kt)で10kcpのSNを考えた例



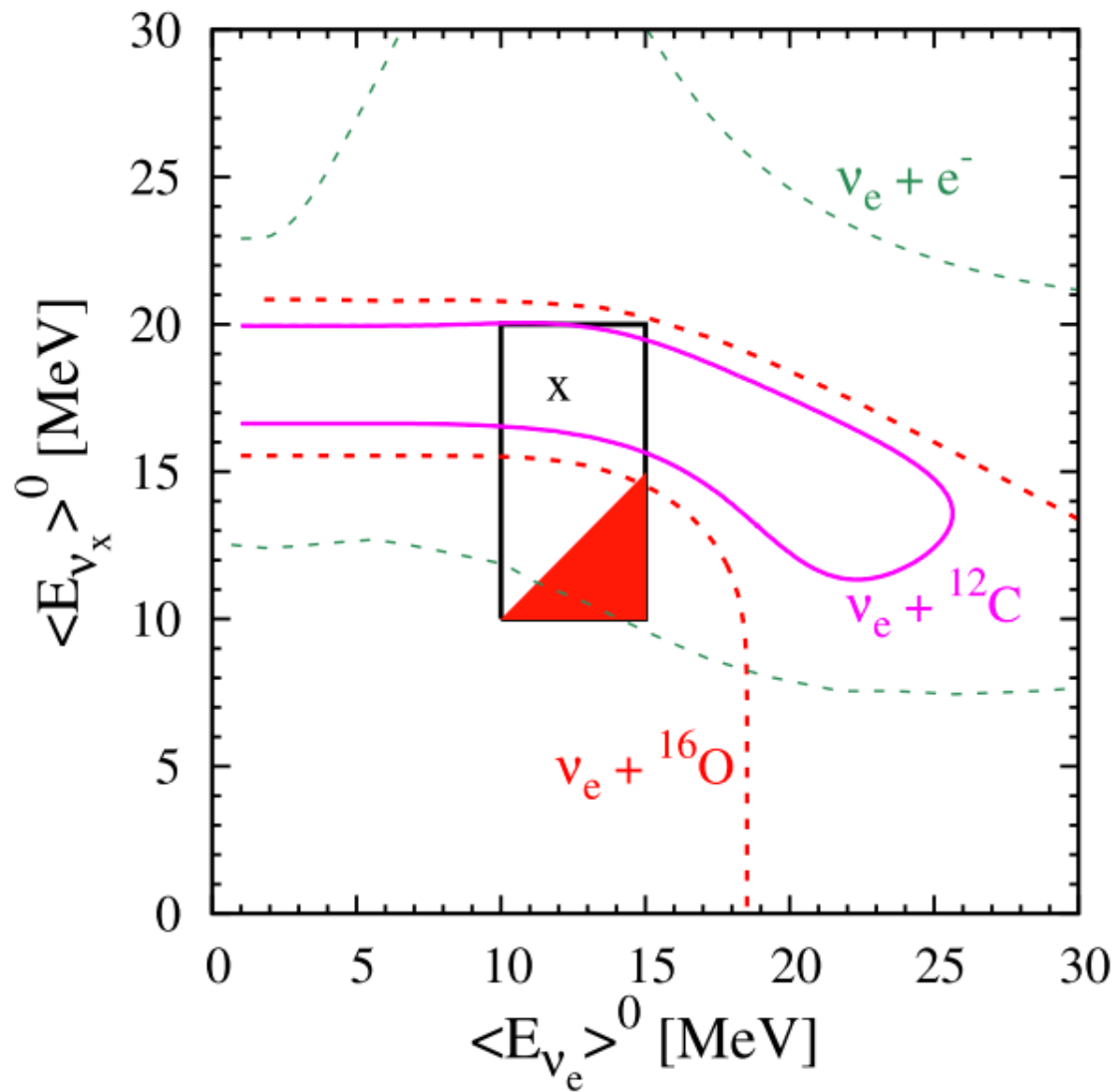
ν_e の測定

arXiv:1412.8425v1



ν_e の測定

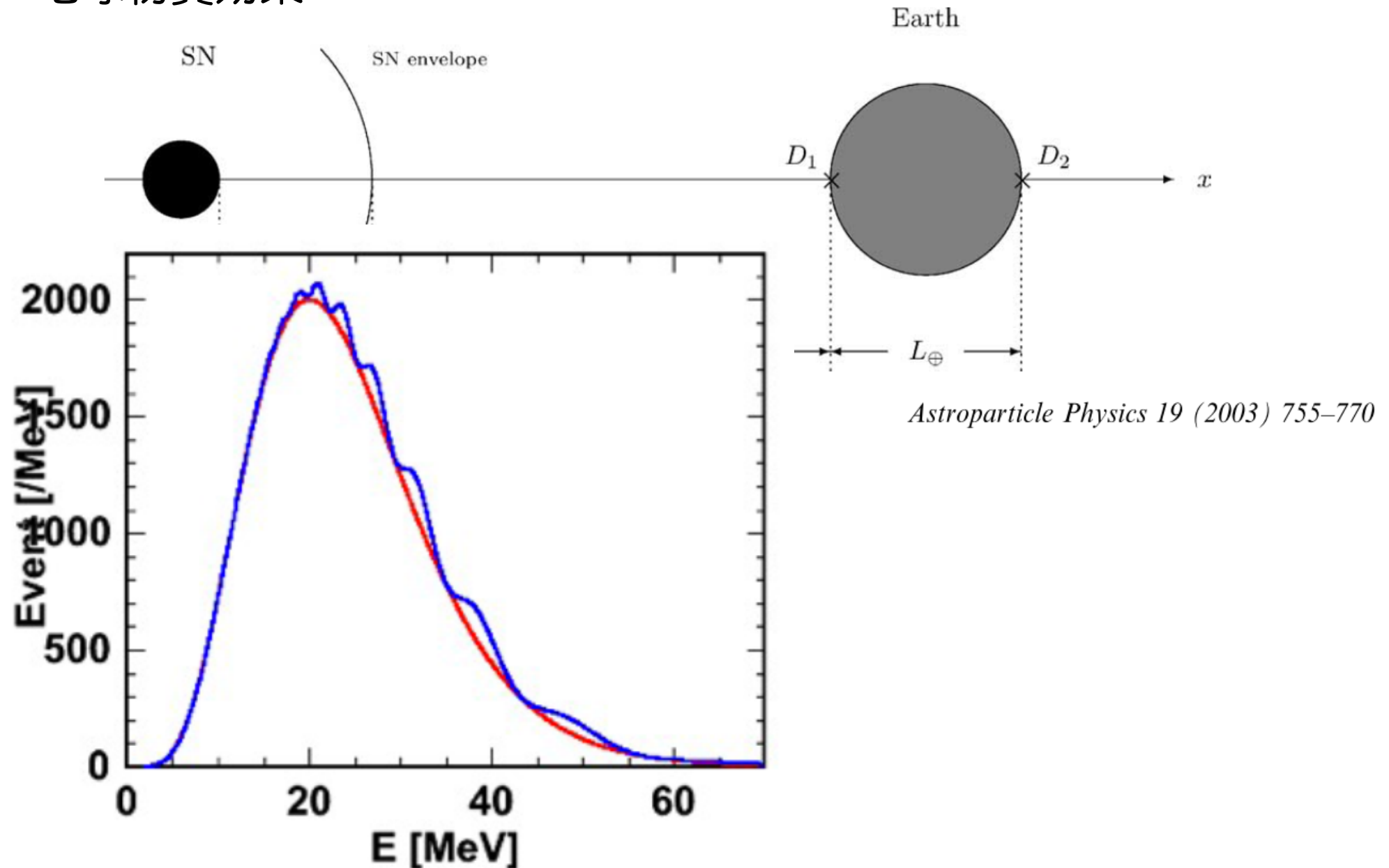
arXiv:1412.8425v1



(統計が十分であれば), 単一検出器で3種類を分離可能

次の超新星ニュートリノへ向けて

地球物質効果

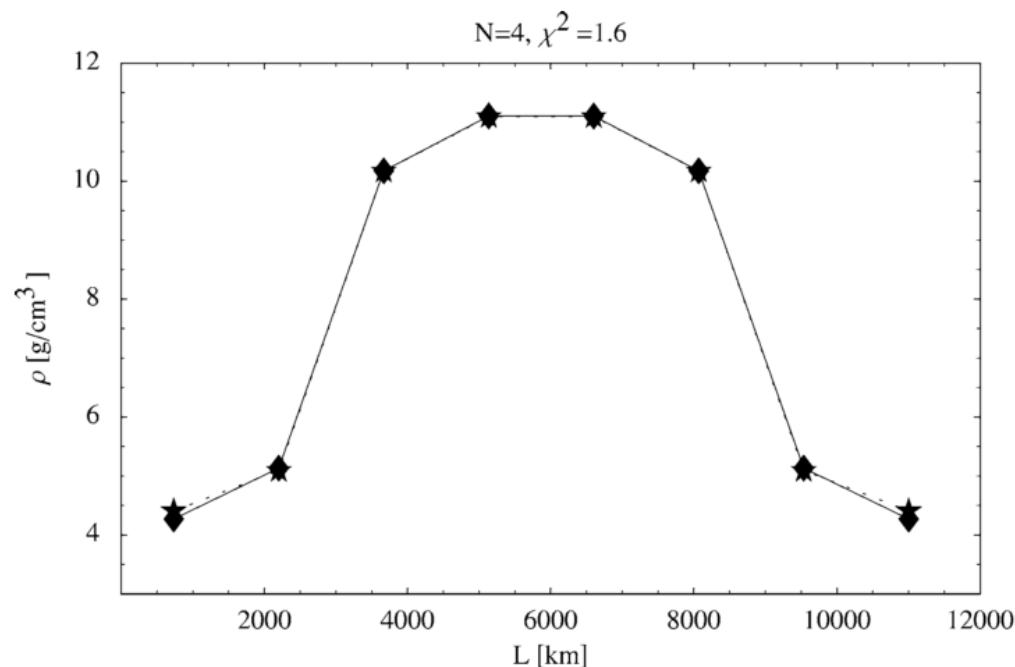


次の超新星ニュートリノへ向けて

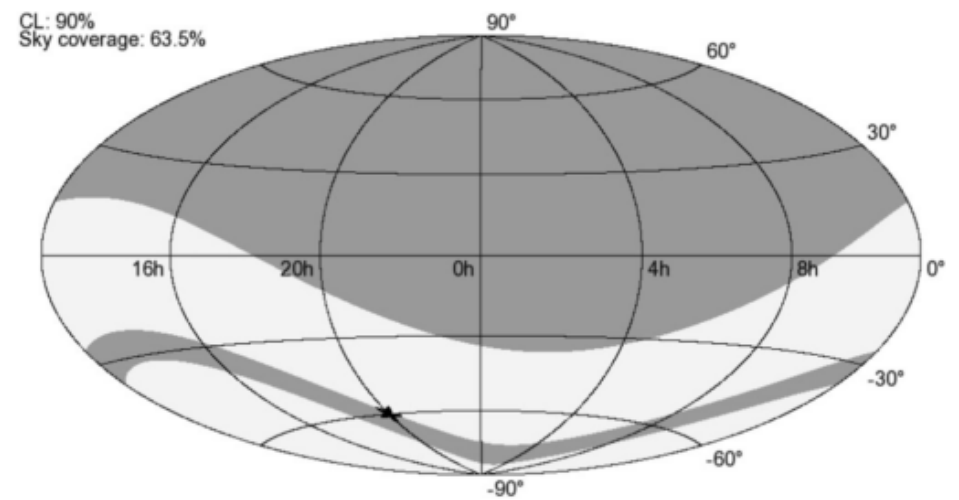
地球物質効果

$\bar{\nu}_e$: 標準質量階層構造の場合のみ

- 質量階層構造決定
- 方向検出
- 地球トモグラフィ



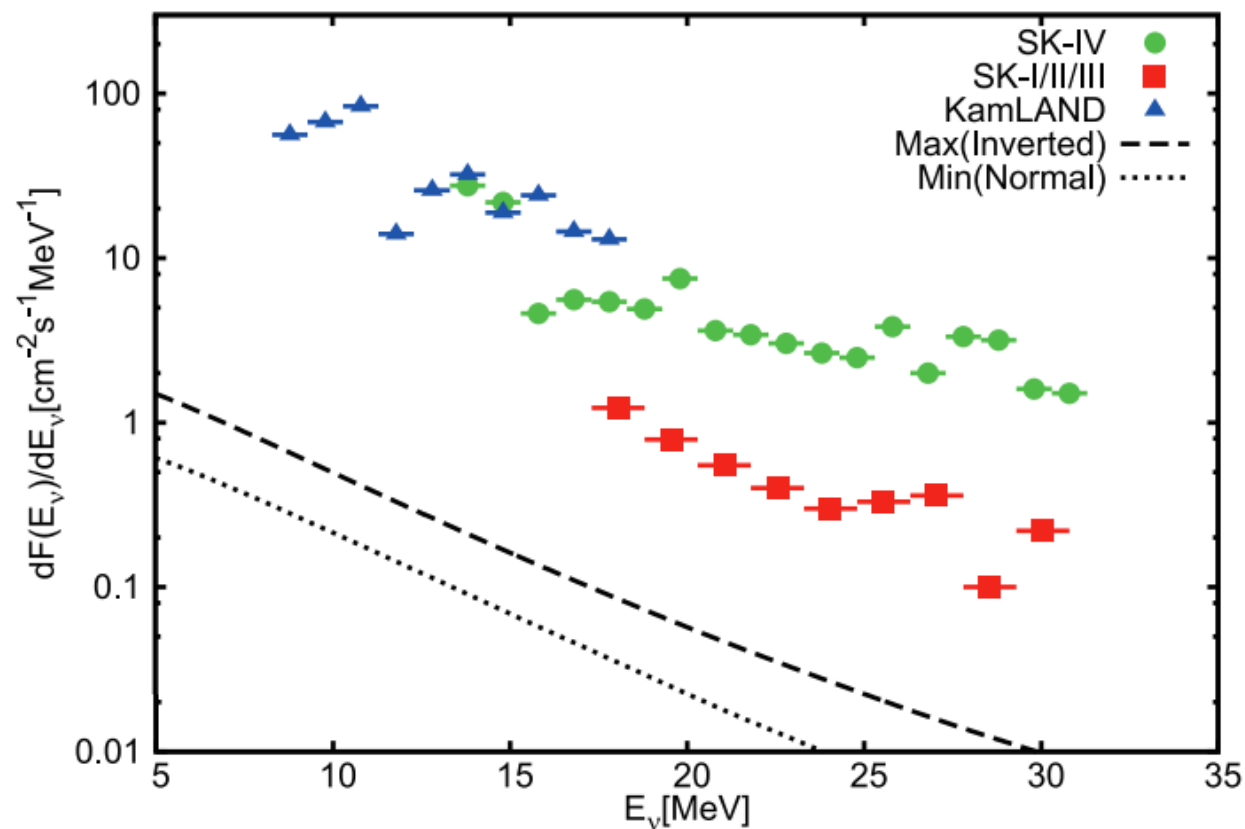
Physics Letters B 512 (2001) 357–364



PHYSICAL REVIEW D **81**, 043007 (2010)

(超新星)背景ニュートリノ探索

低エネルギー (< 13MeV)では液シン検出器が良い制限



arXiv:1503.01236v1

KamLAND検出器

Kamioka Liquid scintillator

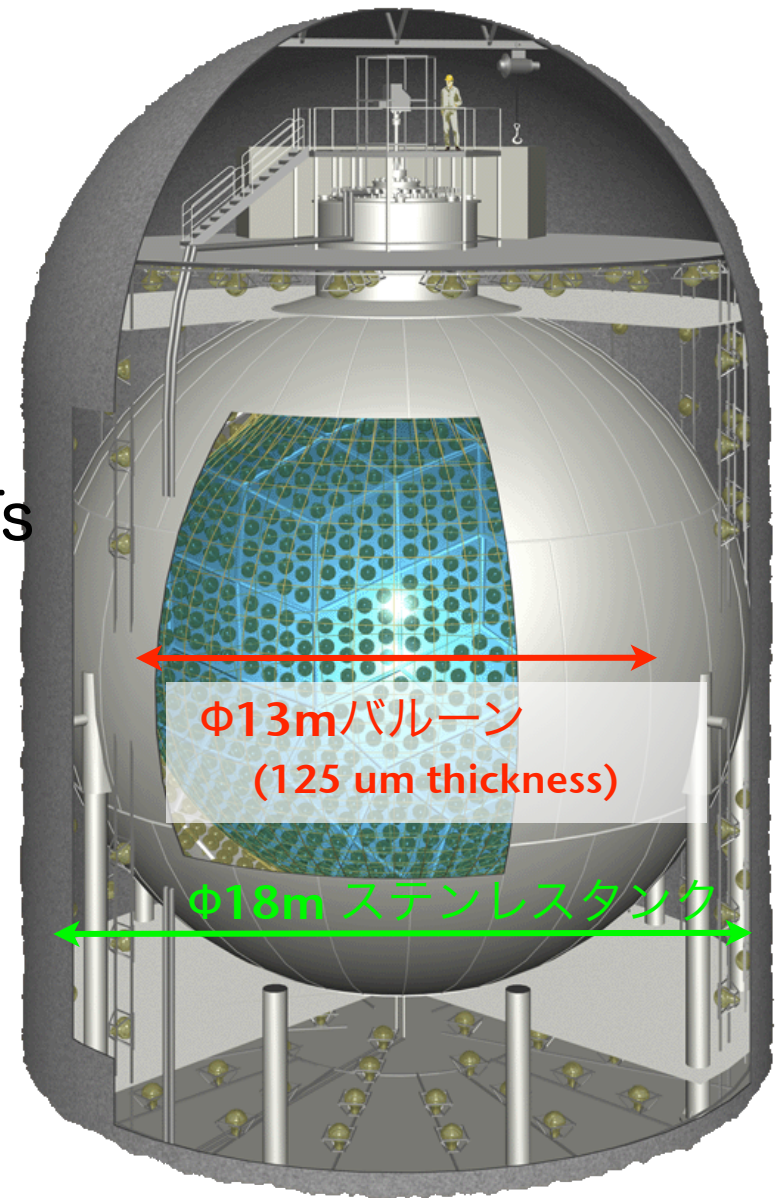
Anti-Neutrino Detector(2002開始)

- 地下1,000 m (神岡鉱山)

- 液シン: 1,000 t

Dodecane (80%), Pseudocumene (20%), PPO (1.36g/l)

- 1,325 17inch + 554 20inch PMTs



外部検出器

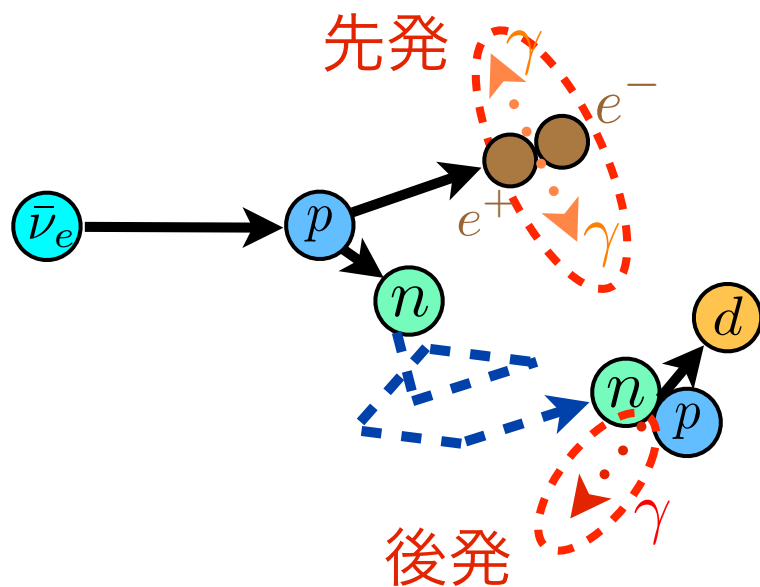
- 3.2kton水チェレンコフ検出器

- ~100 20inch PMTs



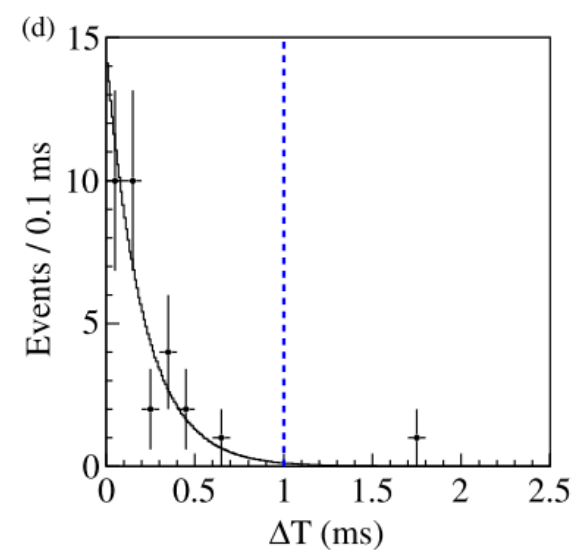
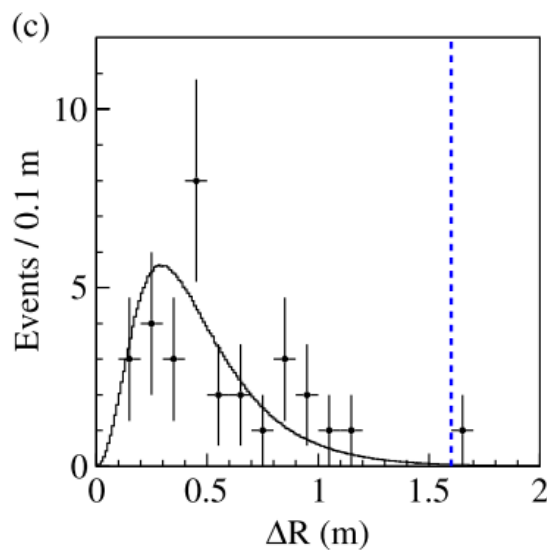
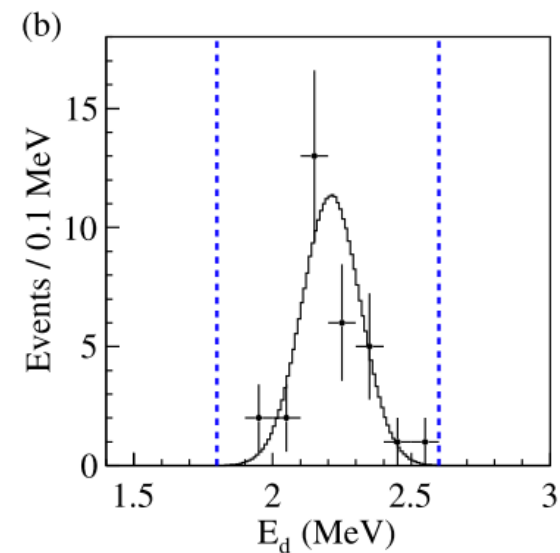
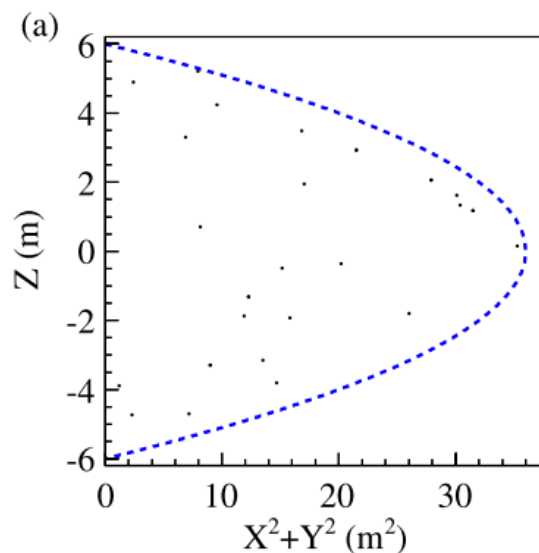
データ解析

2002年3月-2010年7月
(2,343 live-days)

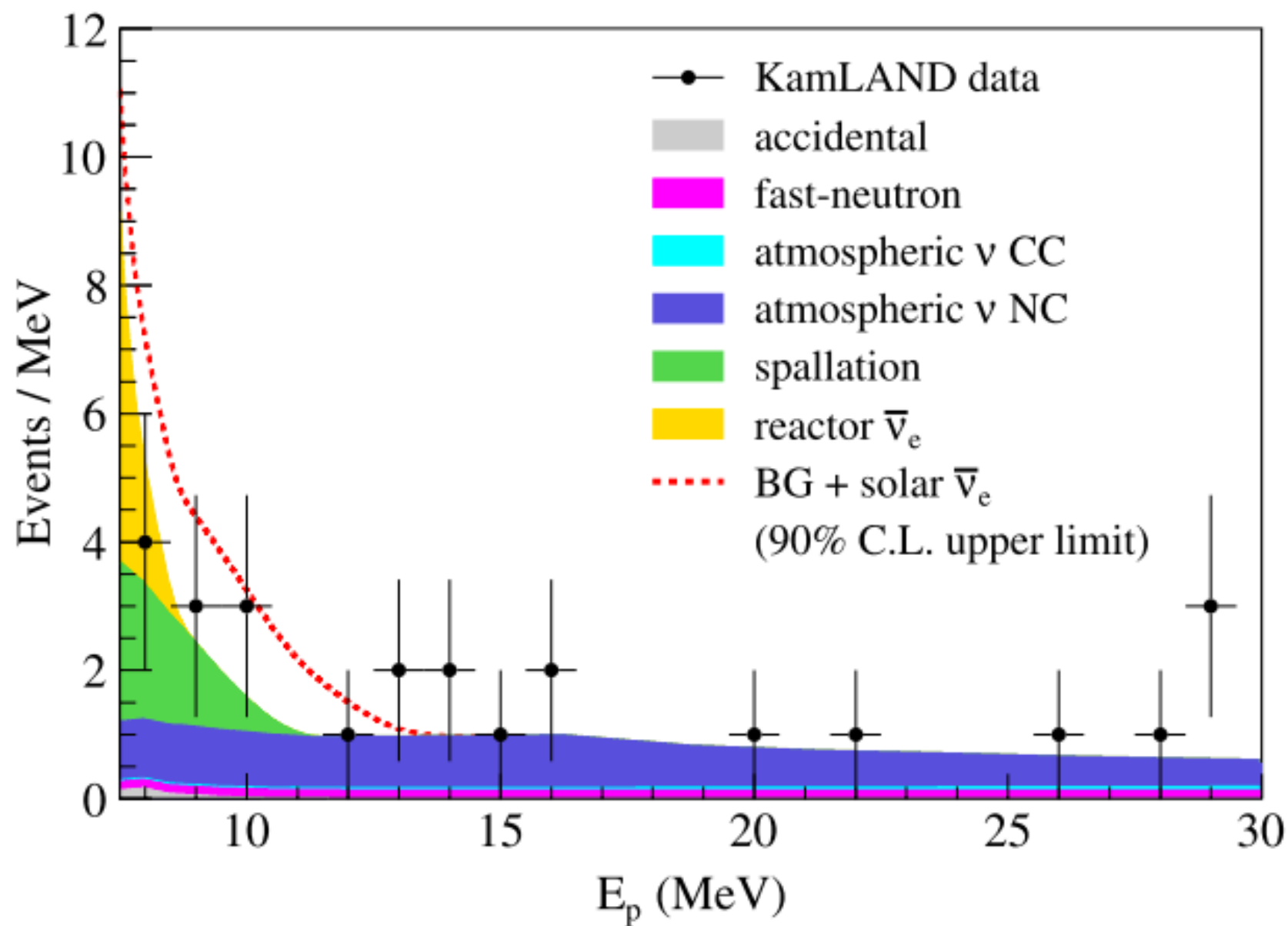


要請: $E_p > 7.5 \text{ MeV}$

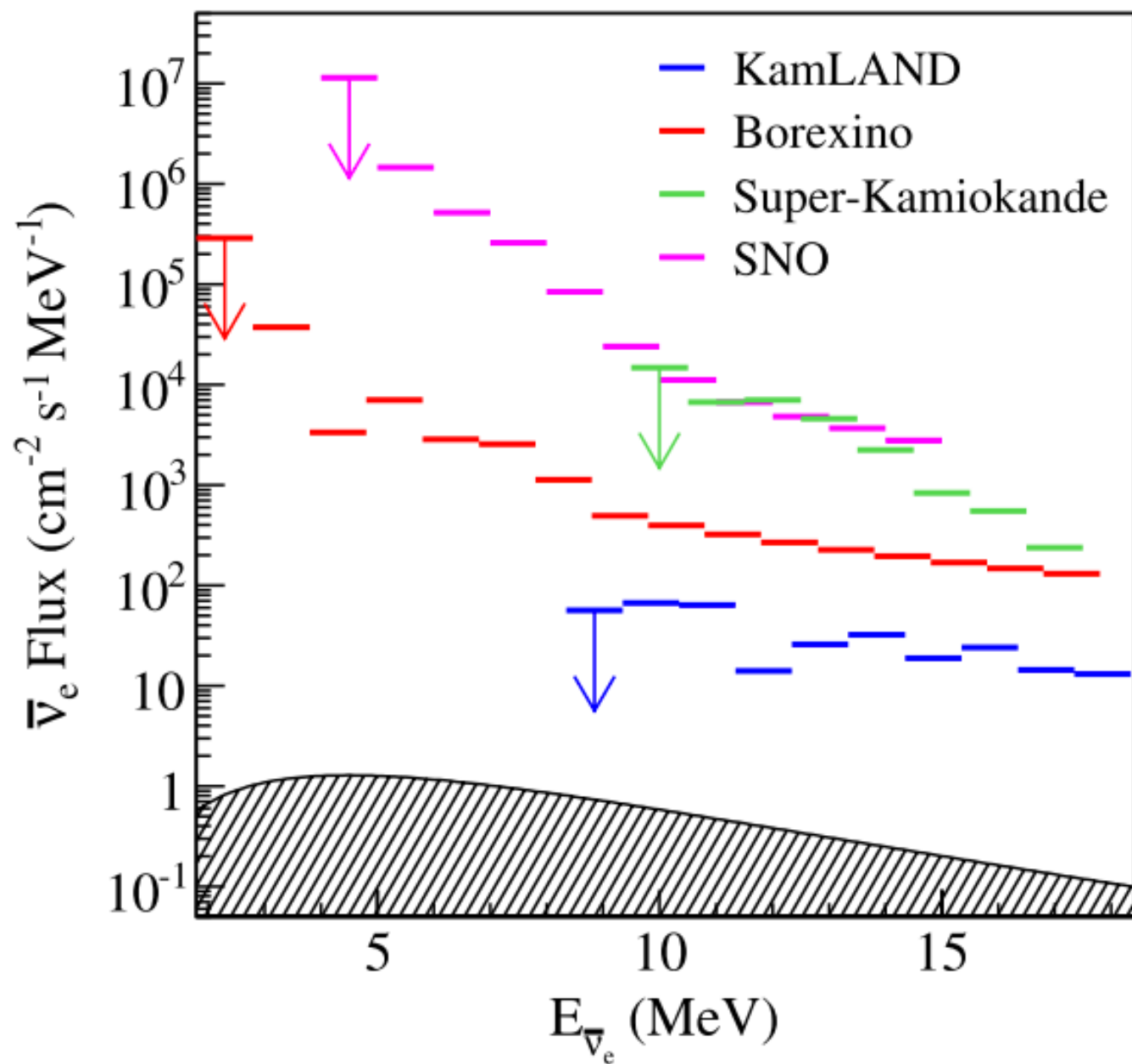
=> 25個のイベント



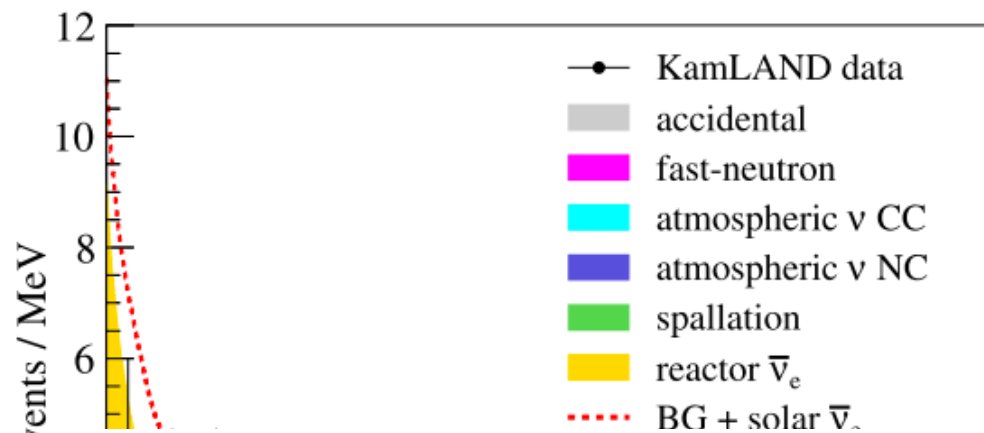
スペクトル



上限値



もっと重要なこと



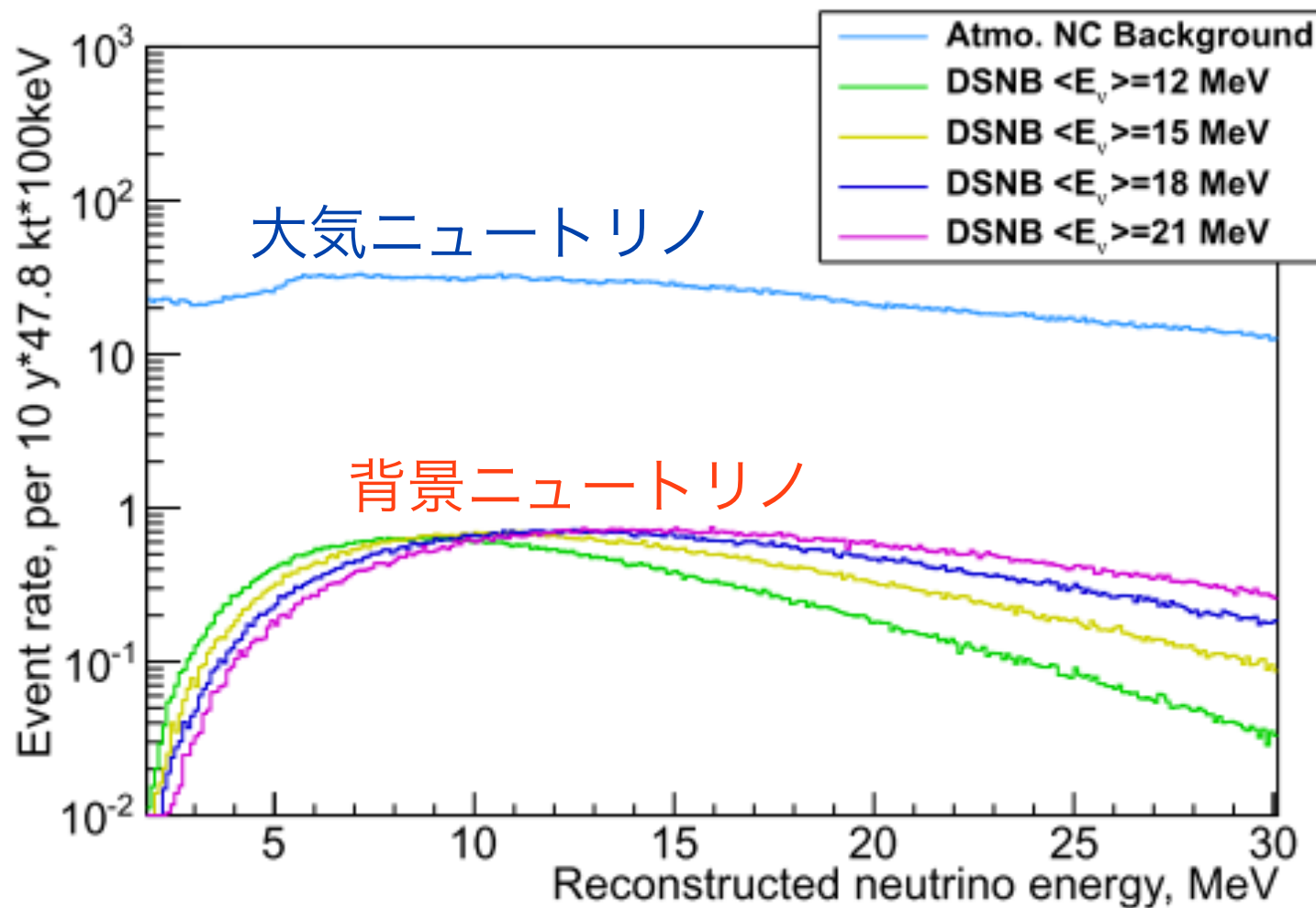
Background	Number of Events
Random coincidences	0.22 ± 0.01
Reactor $\bar{\nu}_e$	2.2 ± 0.7
^9Li	4.0 ± 0.3
Fast neutron	3.2 ± 3.2
Atmospheric ν (CC)	0.9 ± 0.2
Atmospheric ν (NC)	16.4 ± 4.7
Total	26.9 ± 5.7

大気ニュートリノがバックグラウンド

Reaction channel	Branching ratio
(1) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + n + {}^{11}\text{C}$	38.8 %
(2) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + p + n + {}^{10}\text{B}$	20.4 %
(3) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + 2p + n + {}^9\text{Be}$	15.9 %
(4) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + p + d + n + {}^8\text{Be}$	7.1 %
(5) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + \alpha + p + n + {}^6\text{Li}$	6.6 %
(6) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + 2p + d + n + {}^7\text{Li}$	1.3 %
(7) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + 3p + 2n + {}^7\text{Li}$	1.2 %
(8) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + d + n + {}^9\text{B}$	1.2 %
(9) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + 2p + t + n + {}^6\text{Li}$	1.1 %
(10) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + \alpha + n + {}^7\text{Be}$	1.1 %
(11) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + 3p + n + {}^8\text{Li}$	1.1 %
other reaction channels	4.2 %

LENAでの背景ニュートリノ探索

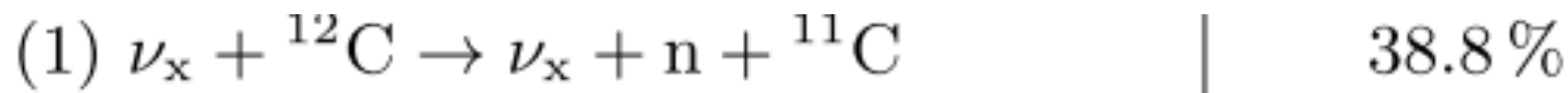
arXiv:1409.2240v1



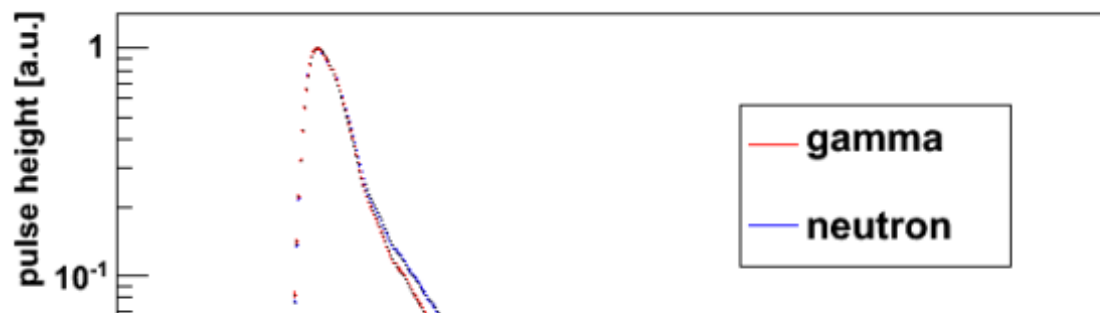
(超新星)背景ニュートリノは大気ニュートリノに埋もれる

LENAでの背景ニュートリノ探索

連続事象であることを利用してのタグ

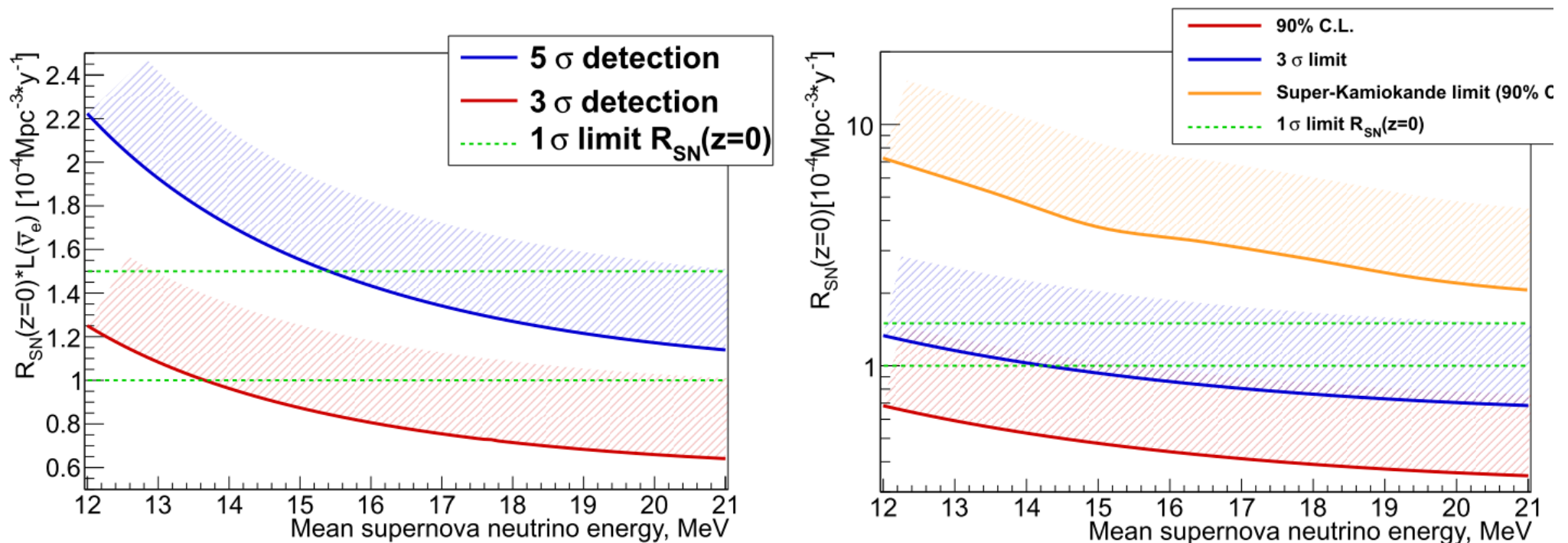


波形で γ , n を識別



IBD acceptance	Atmospheric NC rate [10 y]	Fast neutron rate [10 y]	DSNB Signal $\langle E_\nu \rangle = 12 \text{ MeV}$
90.0 %	$378 \pm 2(\text{stat.})$	$8.6 \pm 0.5(\text{stat.})$	40.2
80.0 %	$155 \pm 1(\text{stat.})$	$4.5 \pm 0.4(\text{stat.})$	35.8
50.0 %	$34.4 \pm 0.5(\text{stat.})$	$2.1 \pm 0.3(\text{stat.})$	22.4
40.0 %	$21.8 \pm 0.4(\text{stat.})$	$1.8 \pm 0.2(\text{stat.})$	17.9

LENAでの背景ニュートリノ探索

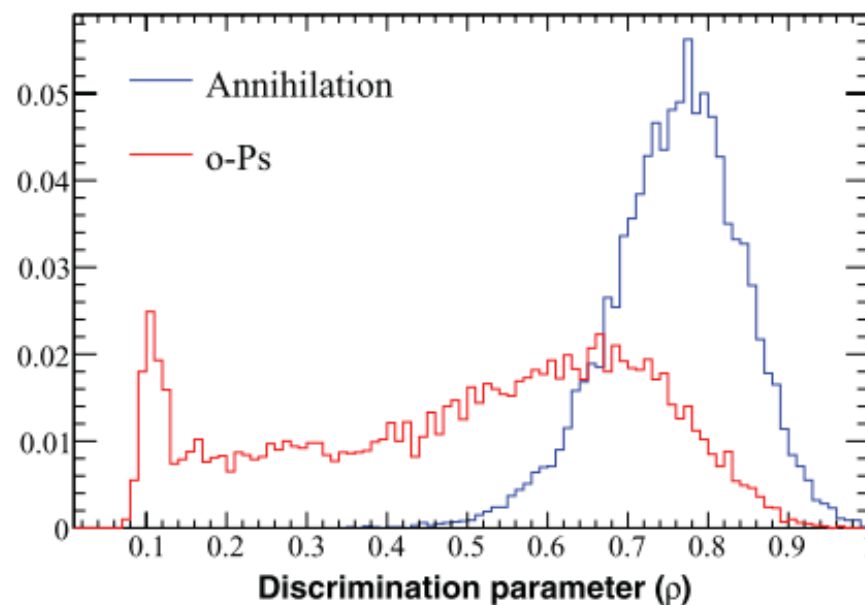
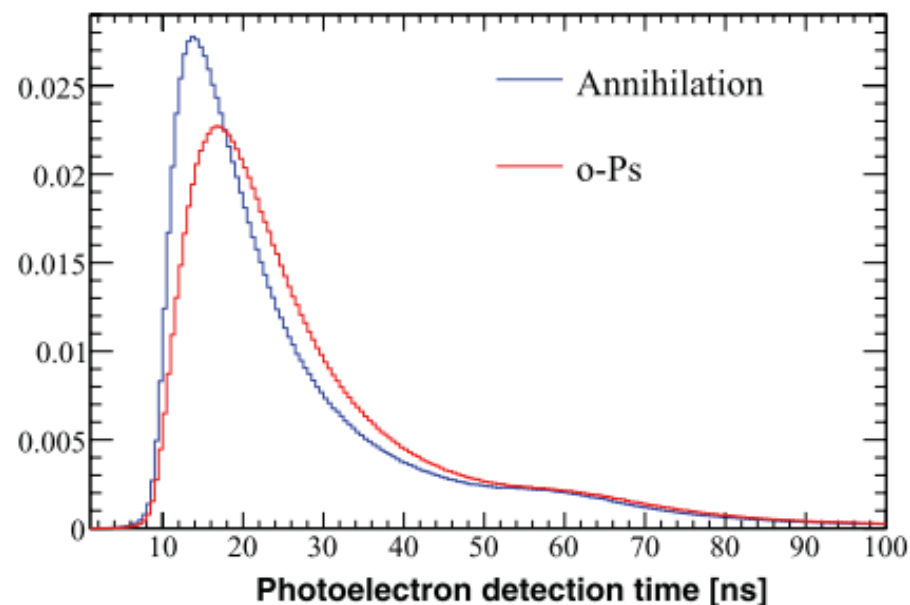
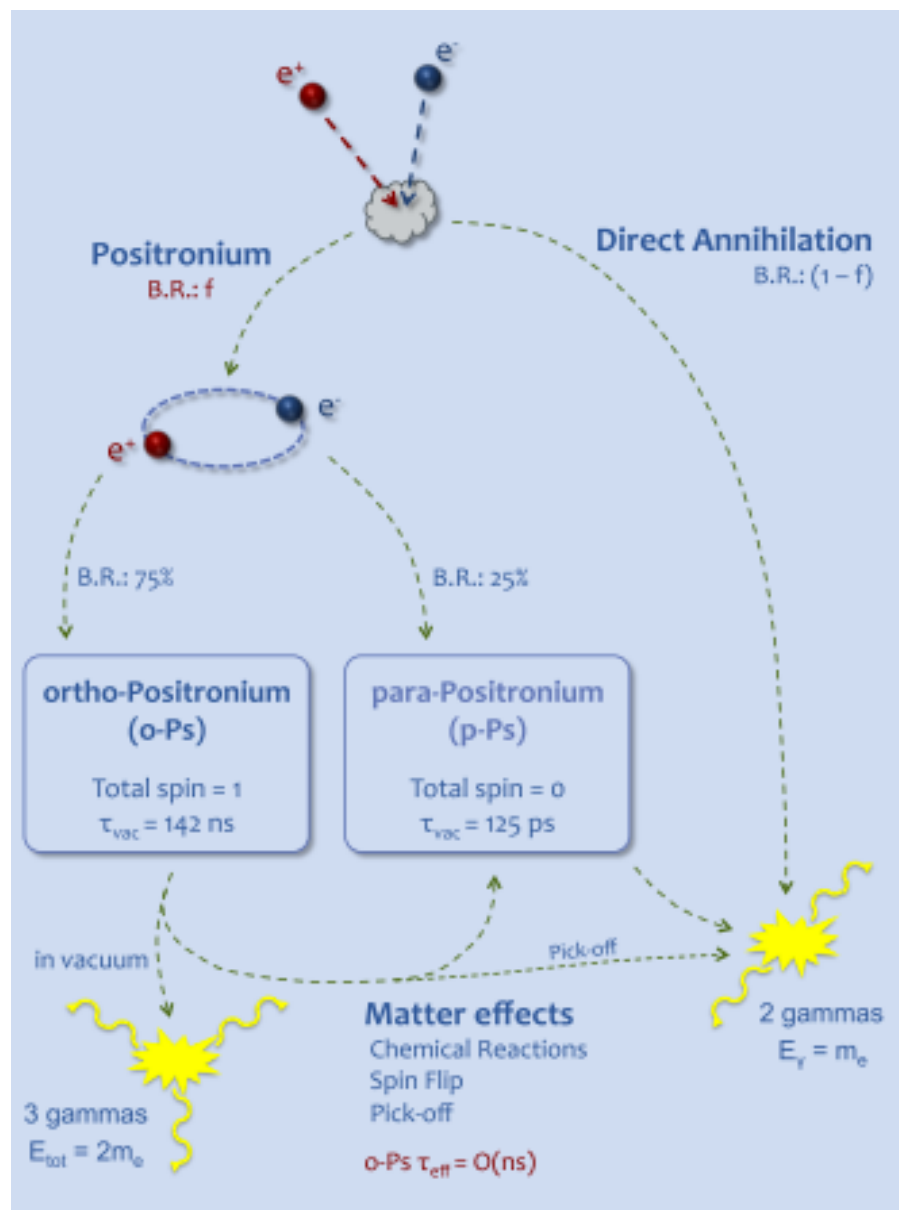


10年間の観測

- $E > 14 \text{ MeV}$ であれば3 σ 以上で検出可能
- 発見できなくても標準的なモデルを全て棄却できる

革新的技術開発

- e^+ (先発信号)のタグ

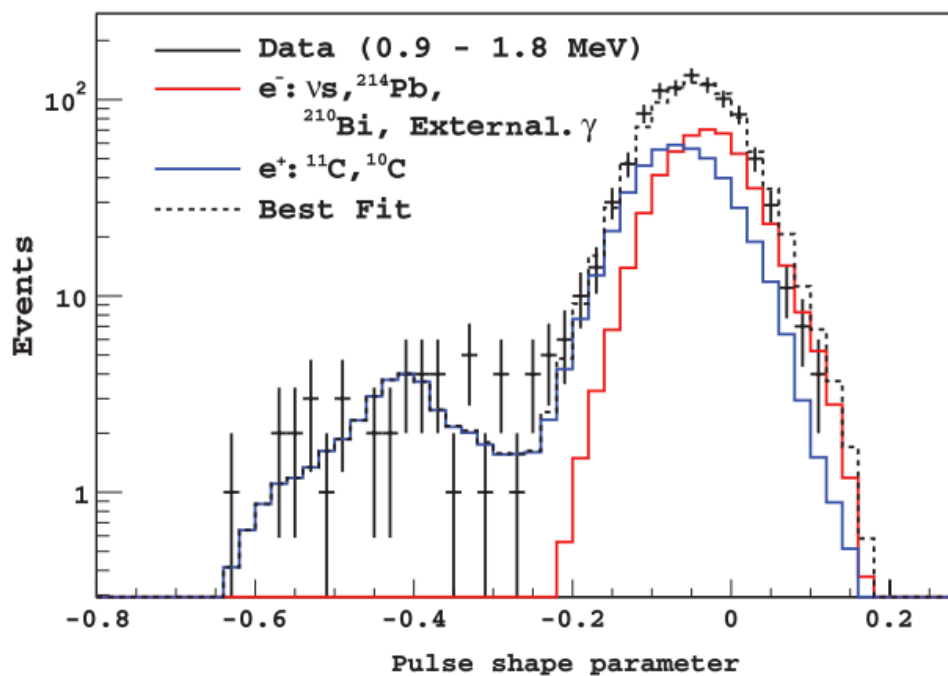


A. Minotti¹, S. Perasso²

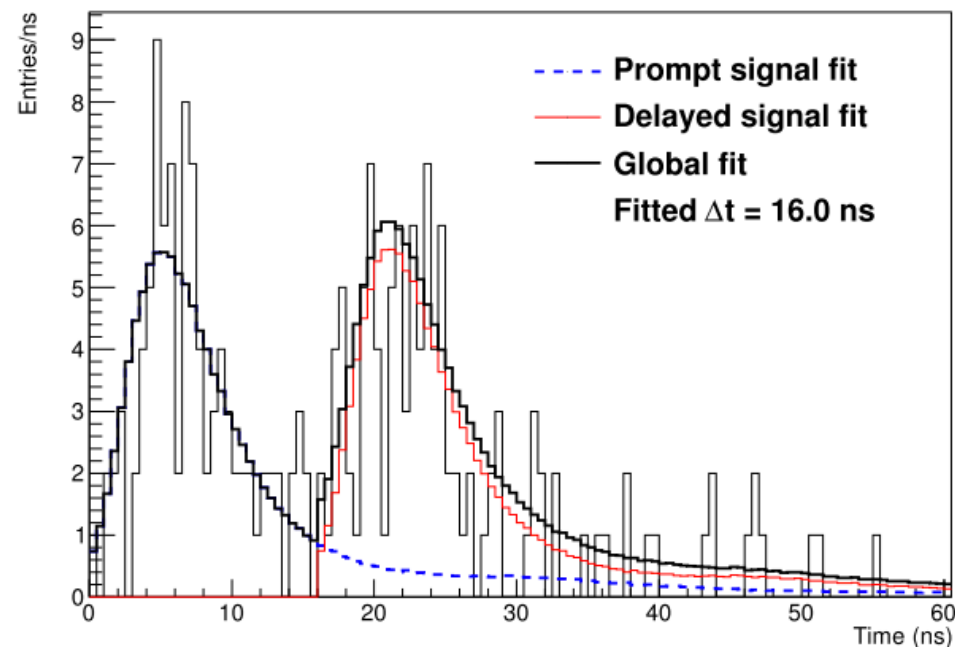
on behalf of the Double Chooz Collaboration

革新的技術開発

- e^+ (先発信号)のタグ



PRL 108, 051302 (2012)

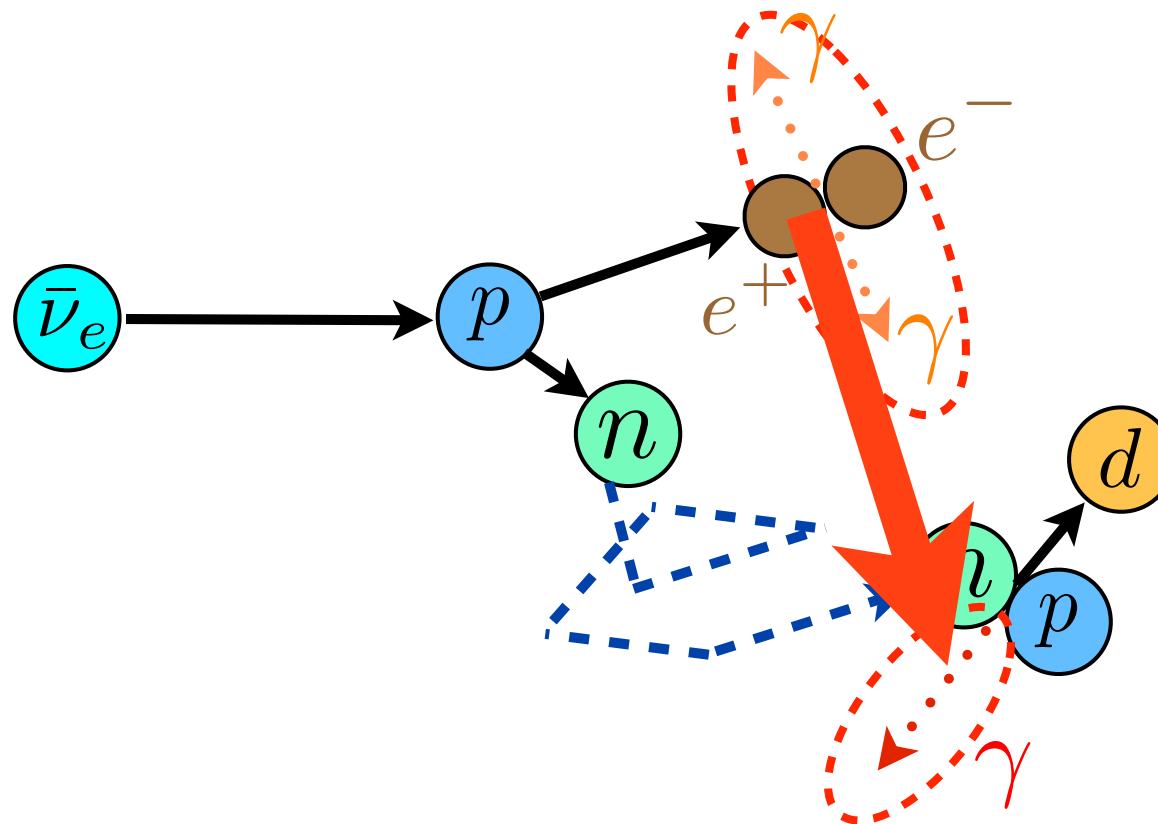


JHEP10(2014)032

大気ニュートリノなどをタグできる可能性

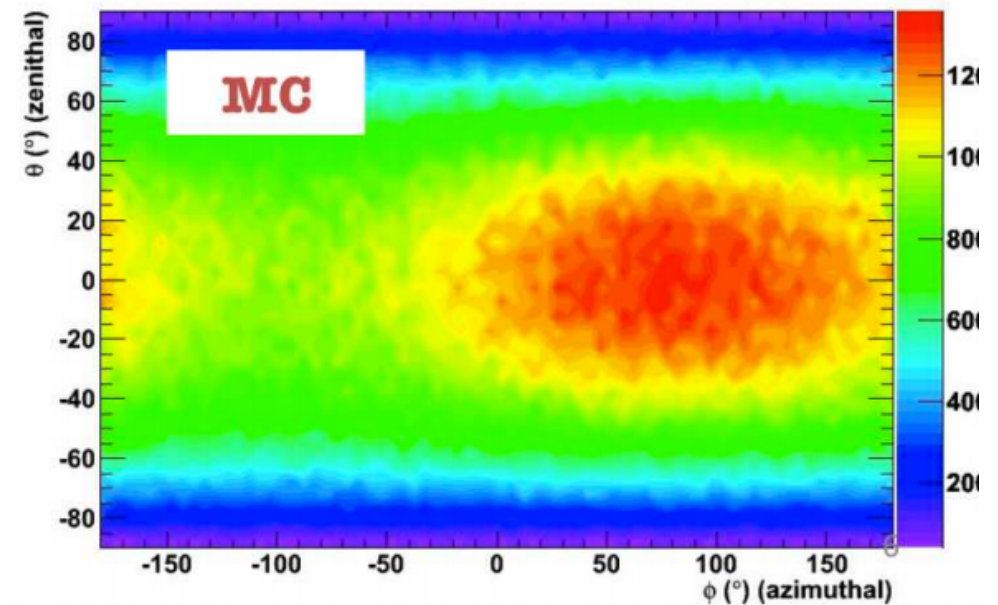
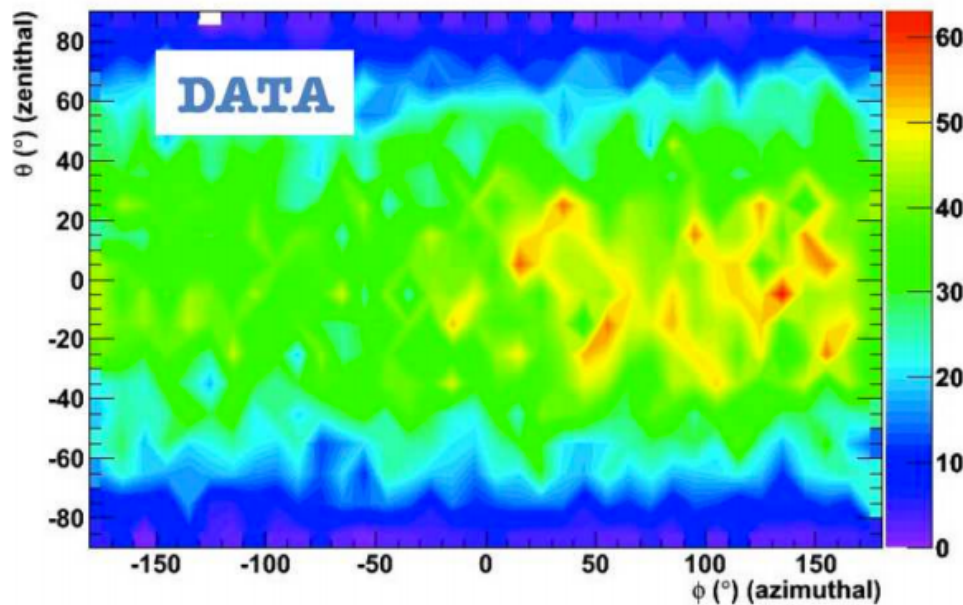
革新的技術開発

- 逆ベータ崩壊による方向検出
超新星前兆ニュートリノや地球ニュートリノ
- 先発, 後発の相対位置から方向を得る
LiやGdを入れて中性子捕獲を早める



革新的技術開発

- 逆ベータ崩壊による方向検出



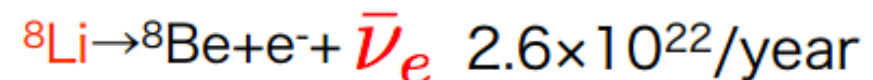
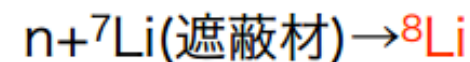
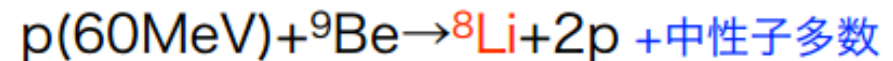
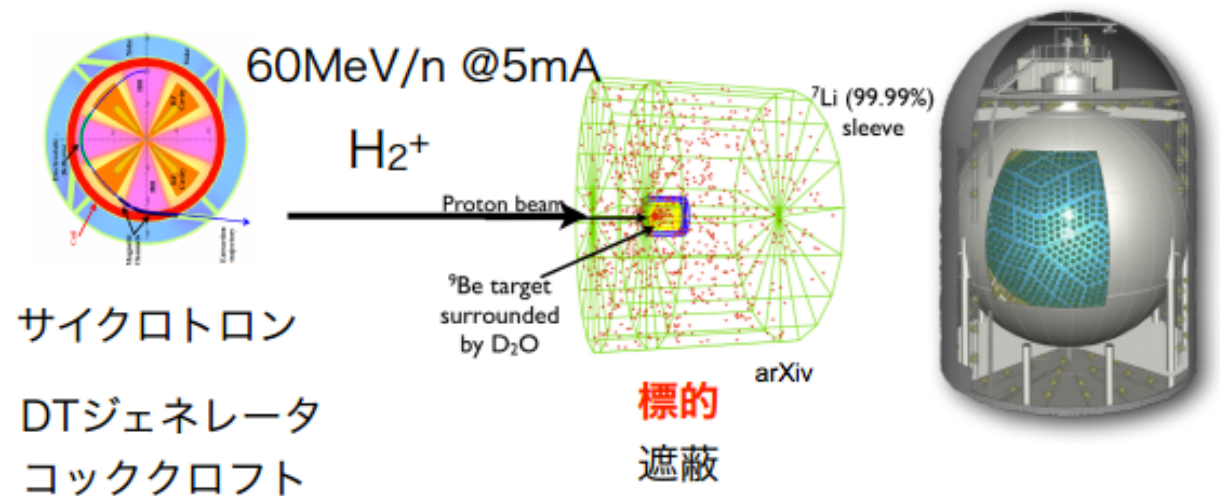
AAP2014, Vincent Fischer

革新的技術開発

- 逆ベータ崩壊による方向検出

KamLANDの取り組み

- LiLS
- 高感度位置決定システム
- IsoDARでの実証



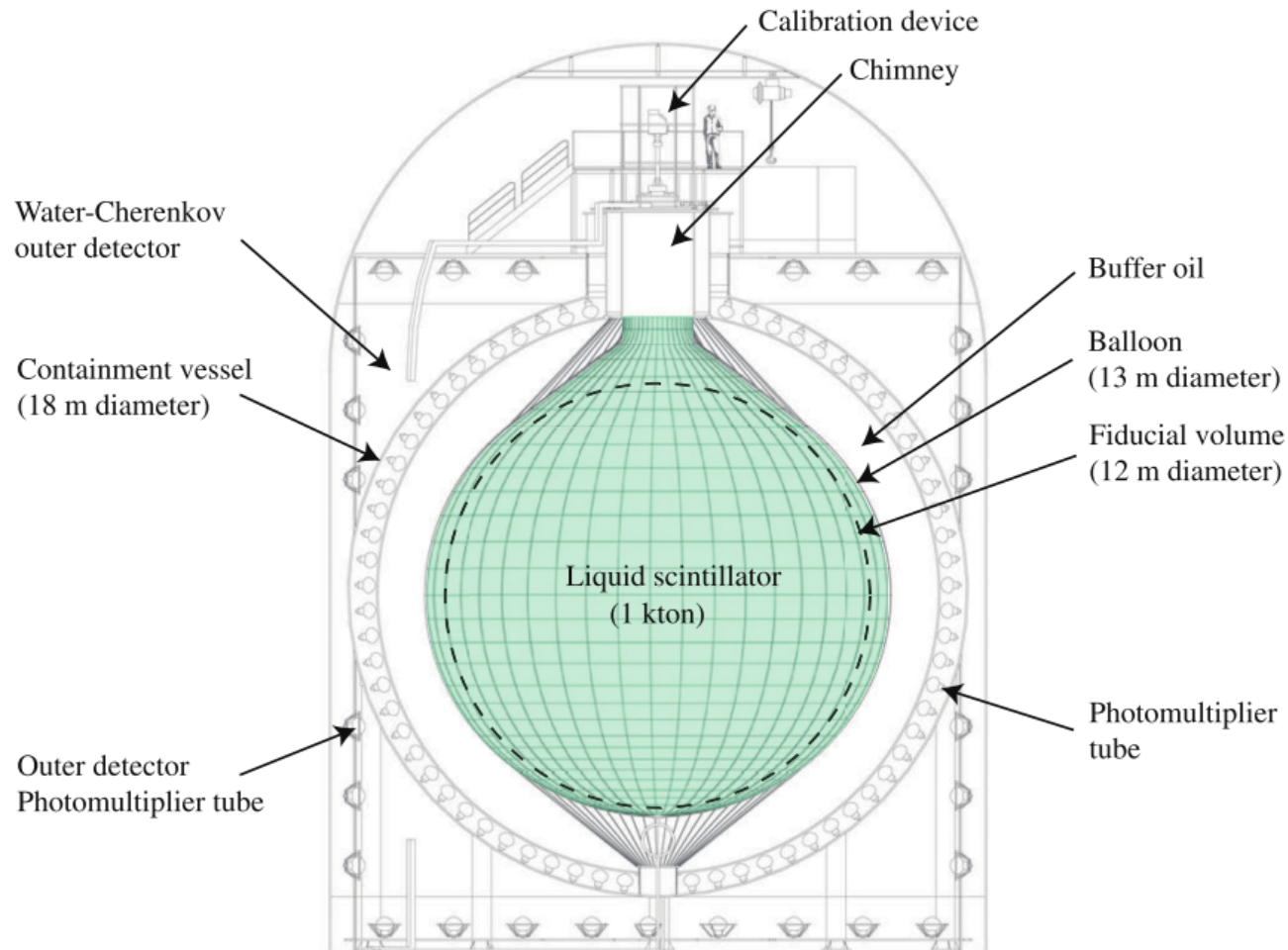
革新的技術開発

- オンボード信号処理

現状: 250nsのPMTのヒット数

将来: 高度な処理でオンボードで発生位置を計算

-> バッファオイルを無くして, 2.2kton液シンへ



まとめ

- 世界で複数の液シン検出器が稼働
- 今後は10ktを超える検出器が稼働(予定)

超新星ニュートリノ

- バクサンの結果: 0.082 event/yearの制限
- 前兆ニュートリノの観測
- 次の超新星爆発(10kpc)で3種類を分離
- 地球物質効果の測定

超新星背景ニュートリノ

- 14MeV以下はKamLANDが最も強い制限
- 大気ニュートリノが最大のバックランド
- LENAでは10年で 3σ で検出可能 ($E > 14\text{MeV}$)

技術開発

- 方向検出, 陽電子タギング, KamLANDの大型化