

KamLANDにおける
宇宙起源電子型反ニュートリノ
の研究

東北大学

ニュートリノ科学研究センター

高橋 永

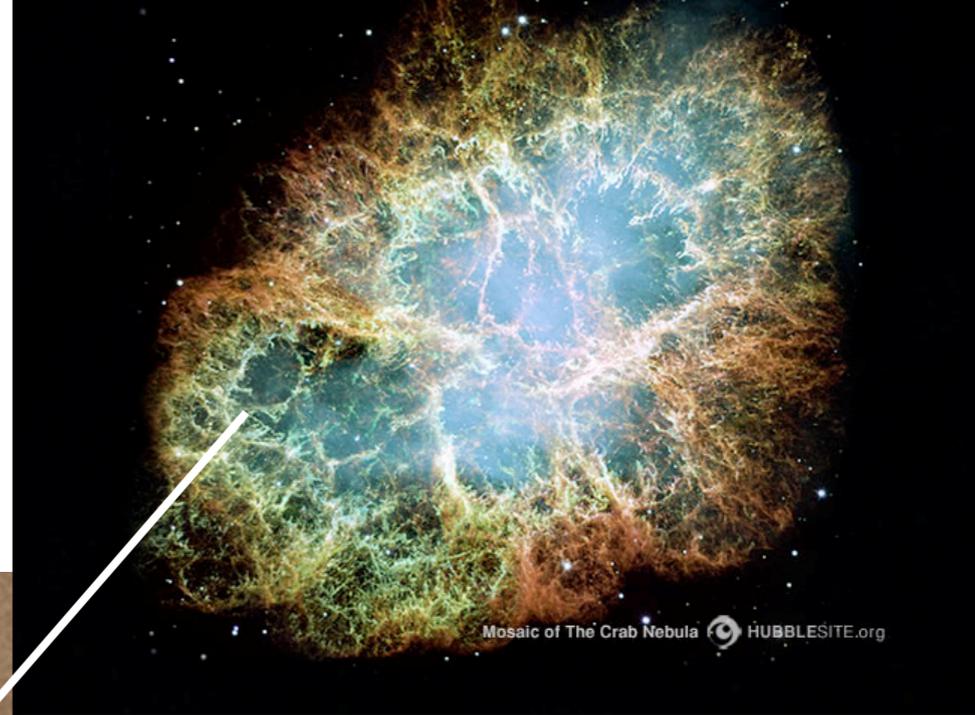
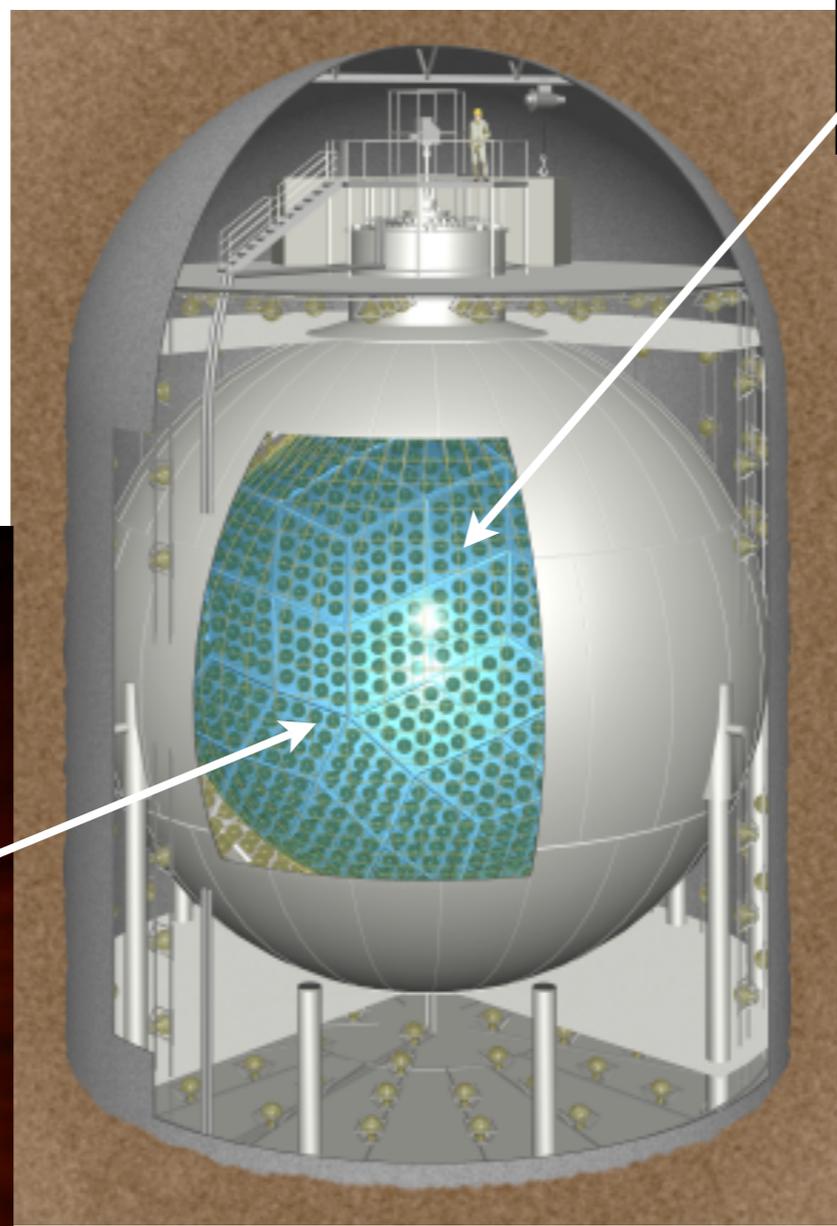
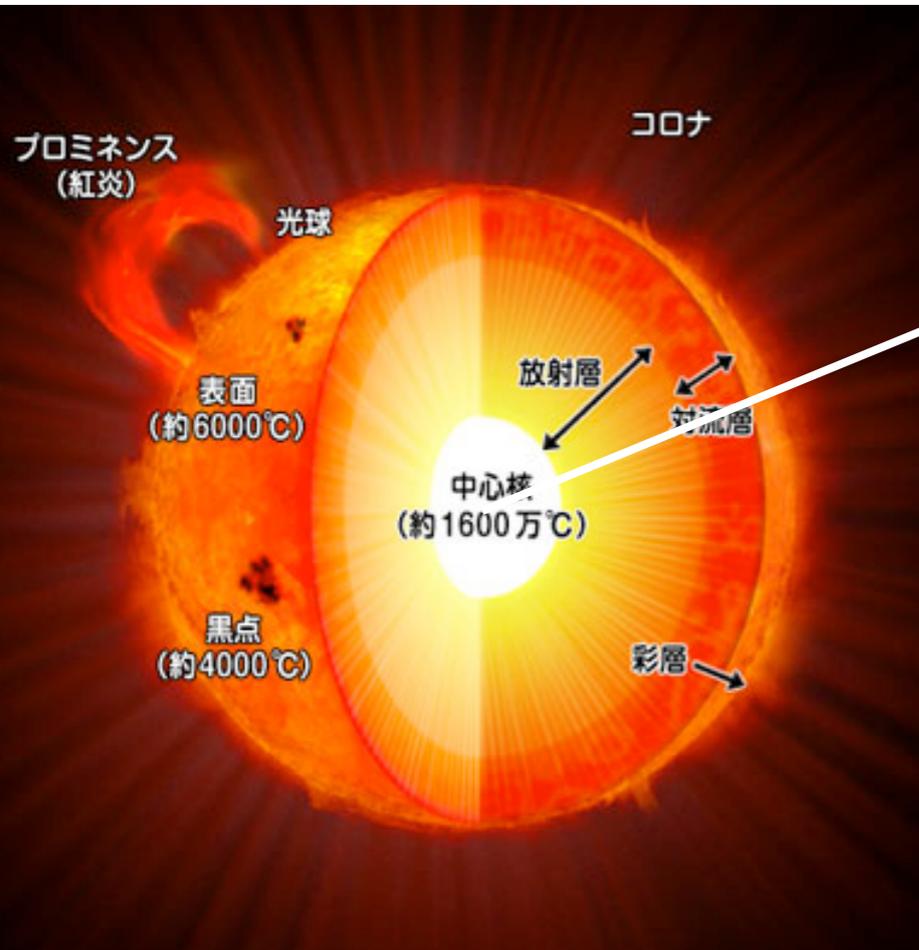
内容

- 宇宙起源電子型反ニュートリノ検出の意義
- 電子型反ニュートリノ検出原理
- 宇宙起源電子型反ニュートリノの選定
- バックグラウンドの見積もり
- 解析
- まとめ

宇宙起源電子型反ニュートリノ

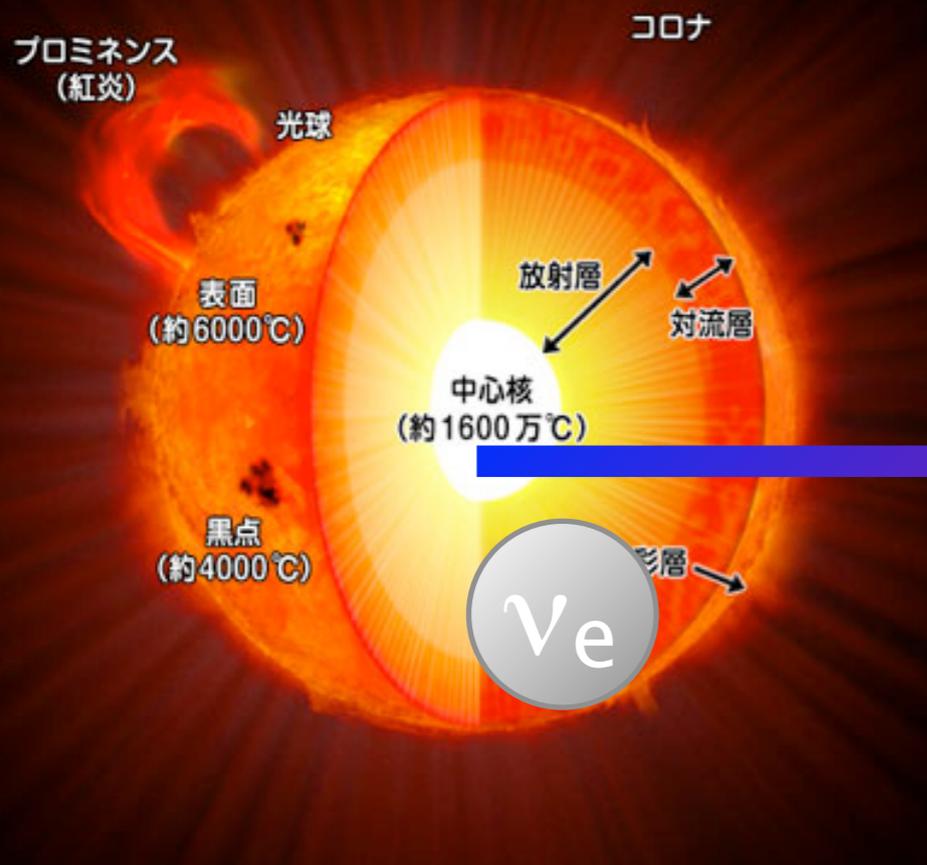
太陽起源電子型 反ニュートリノ

ニュートリノ磁気モーメント
↓
標準理論を超える物理

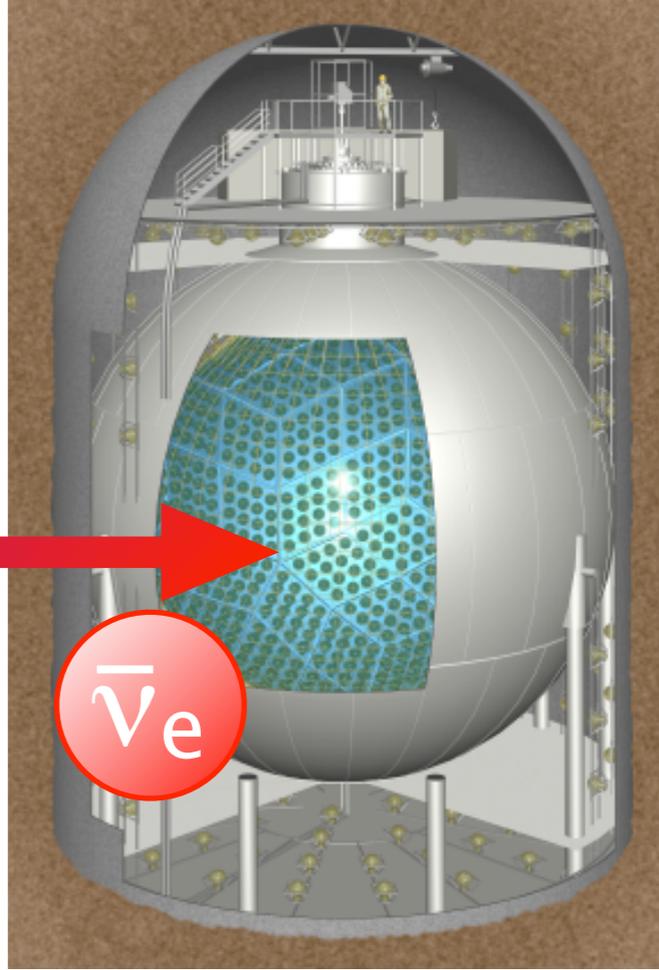


超新星残存電子型 反ニュートリノ

過去の超新星爆発によって
生成されたニュートリノ
↓
超新星爆発、
宇宙進化、銀河形成



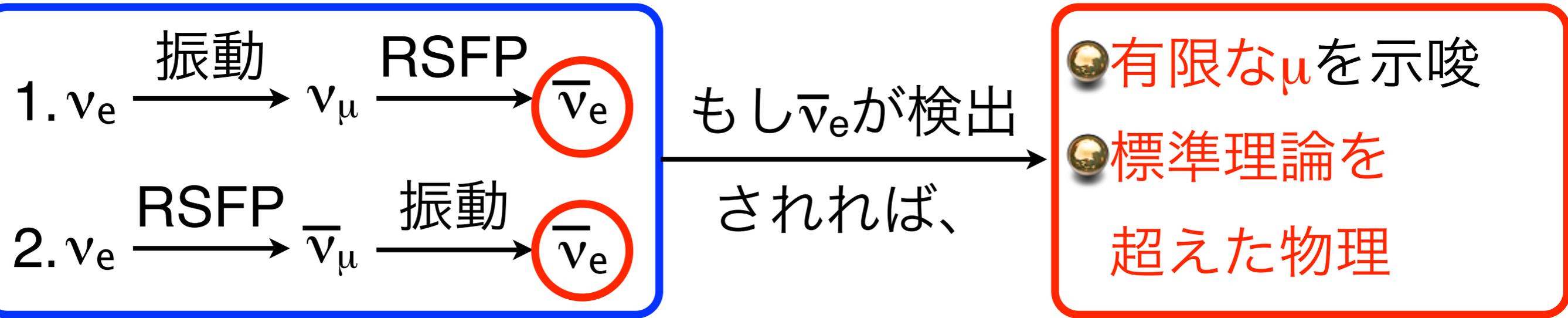
- 📍有限なニュートリノ磁気モーメント(μ)
- 📍十分大きな太陽磁場



RSFP*
+
ニュートリノ振動

※RSFP(Resonant Spin Flavor Precession) :
ニュートリノが有限の磁気モーメントを持つ場合に、
太陽磁場との相互作用で**フレーバー間の遷移**が起こる効果。

太陽 $\bar{\nu}_e$ 生成の可能性



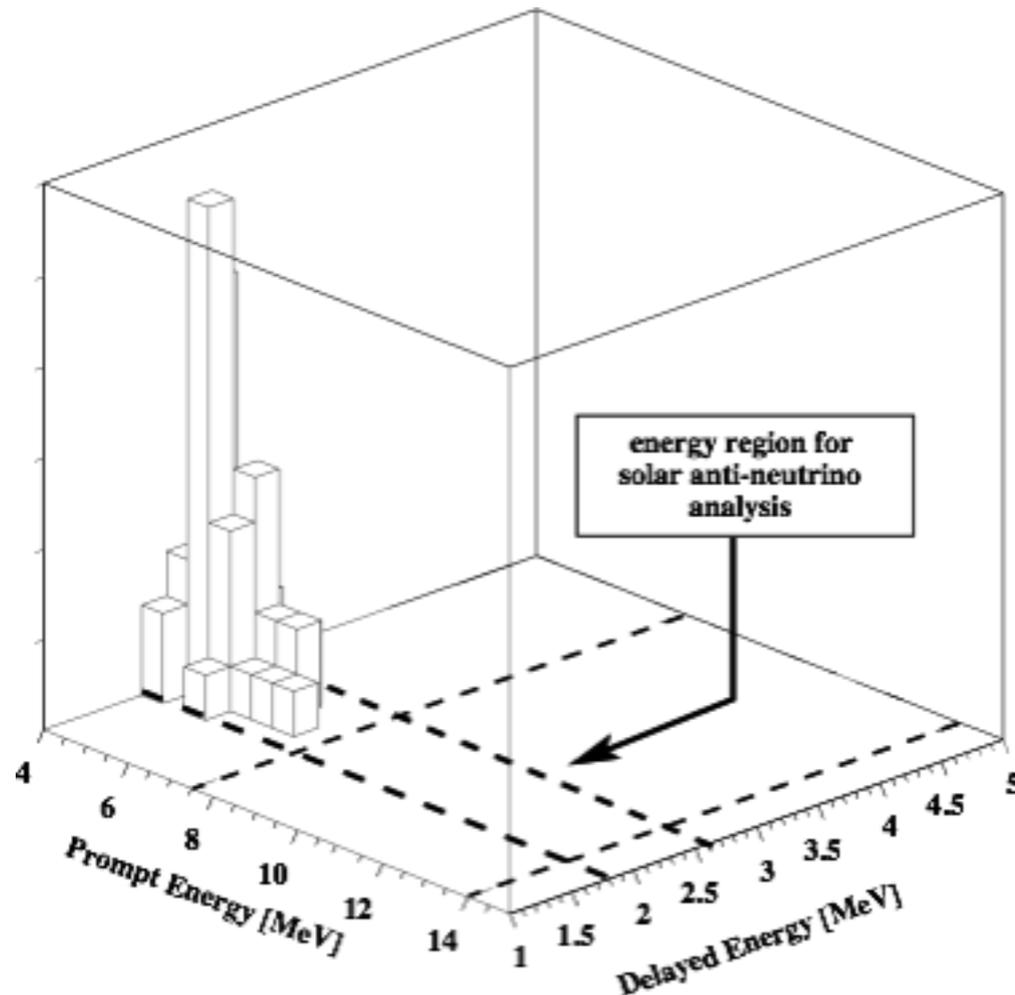
KamLANDの太陽 $\bar{\nu}_e$ フラックスの上限値

KamLAND ('04)

 102.2 kton-day

 $8.3 < E_\nu < 14.8$ MeV

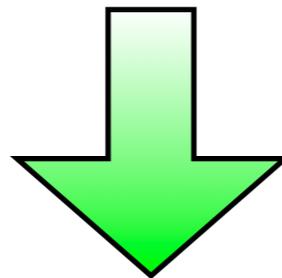
 0 candidates



$$\Phi(\bar{\nu}_e) < 370 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$P(\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e) < 2.8 \times 10^{-4} \quad (90\% \text{ C.L.})$$

2007年5月現在...



1052 kton-day
(約10倍)

超新星残存ニュートリノ

過去に起こった超新星爆発で発生したニュートリノ。
宇宙進化や銀河形成のモデルへの制限が期待される。

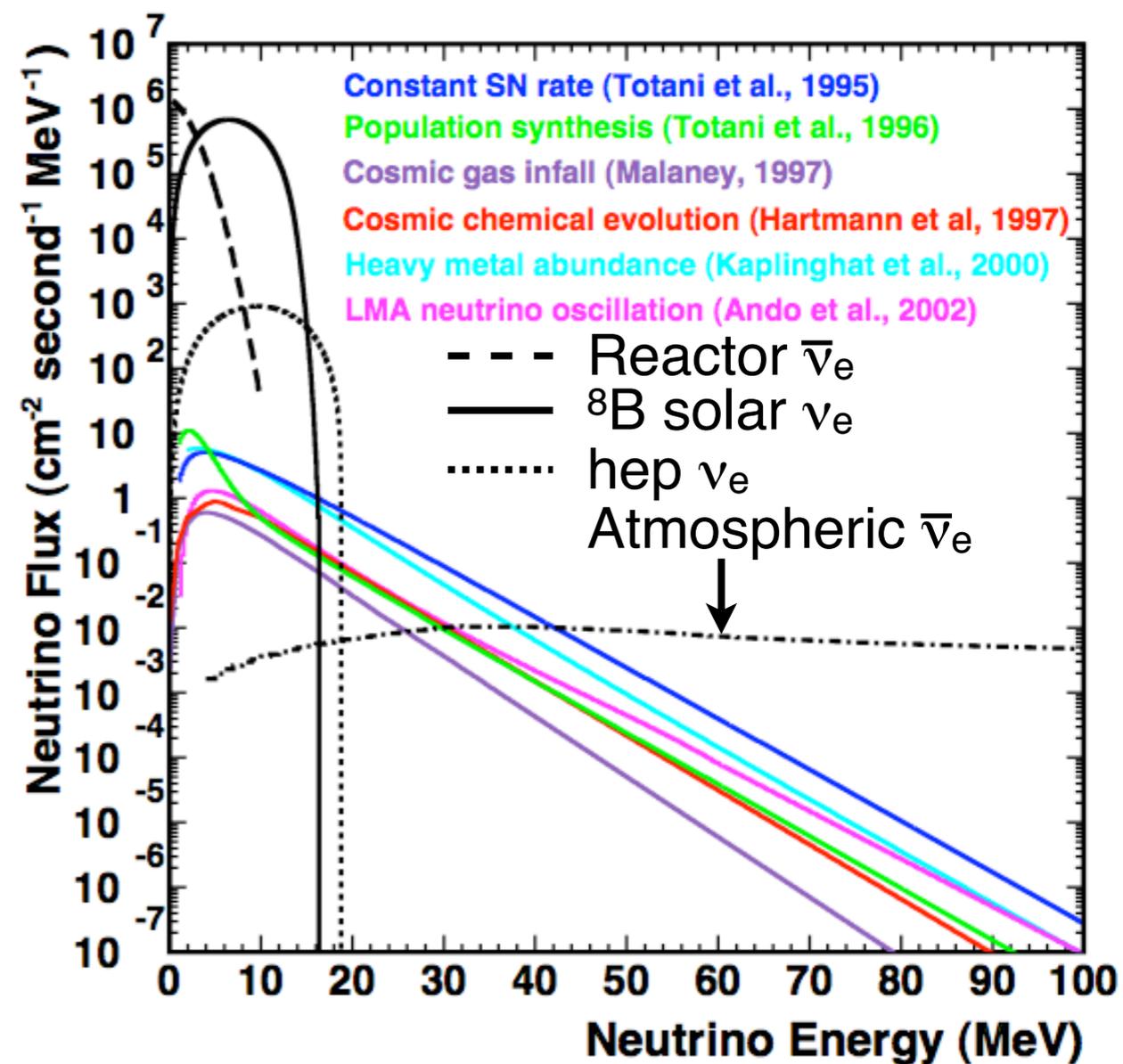
📍現在の $\bar{\nu}_e$ の上限値

$1.2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (90% C.L.) ($E_\nu > 19.3 \text{ MeV}$)

for constant SN rate model
Super-Kamiokande

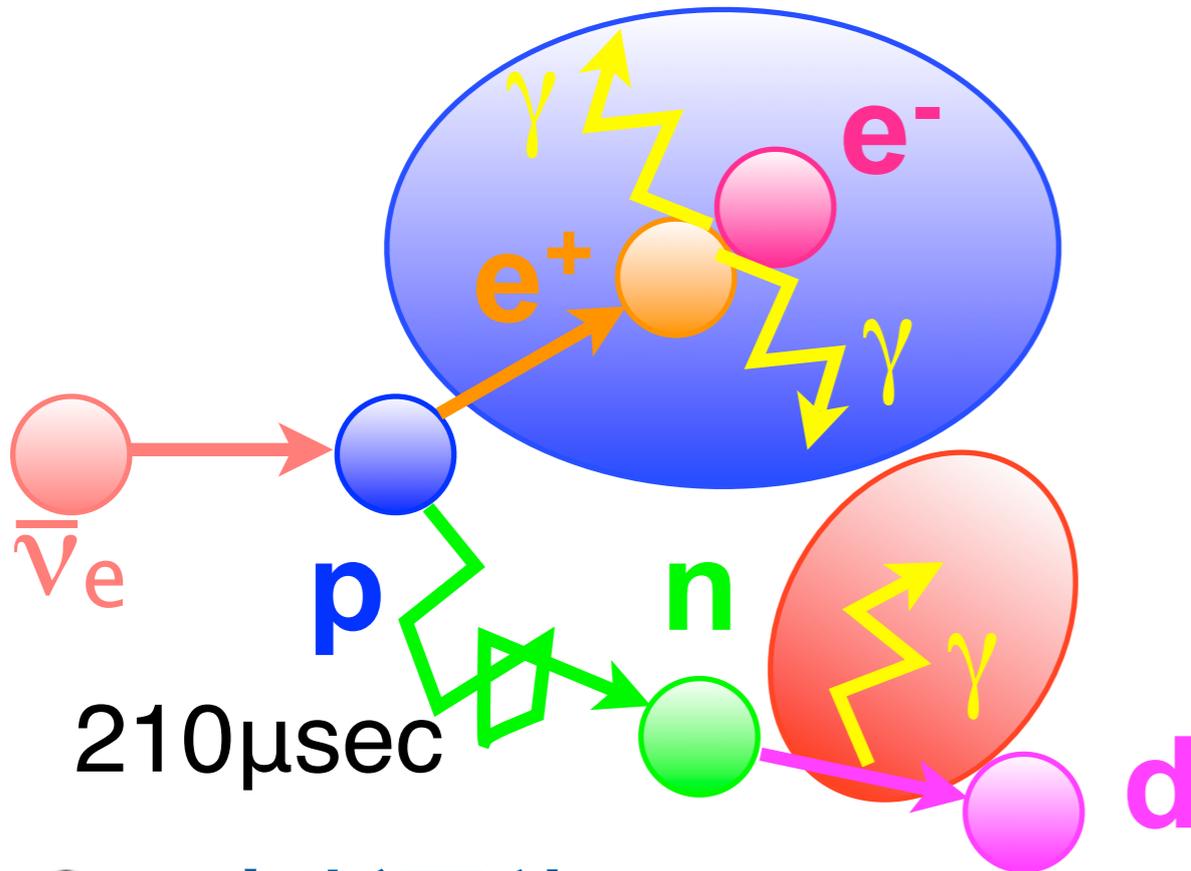
※SKでは、原子核破砕イベントによるバックグラウンドのため閾値が下げられない。

📍低エネルギーの $\bar{\nu}_e$ に感度があるKamLANDでの観測によって、より詳細なモデルの検証が期待される。



$\bar{\nu}_e$ 検出原理

逆 β 崩壊反応： $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ 遅延同時計測



先発信号： $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$
 $E_{\text{prompt}} = E_{\nu} - T_n - 0.784 \text{ MeV}$

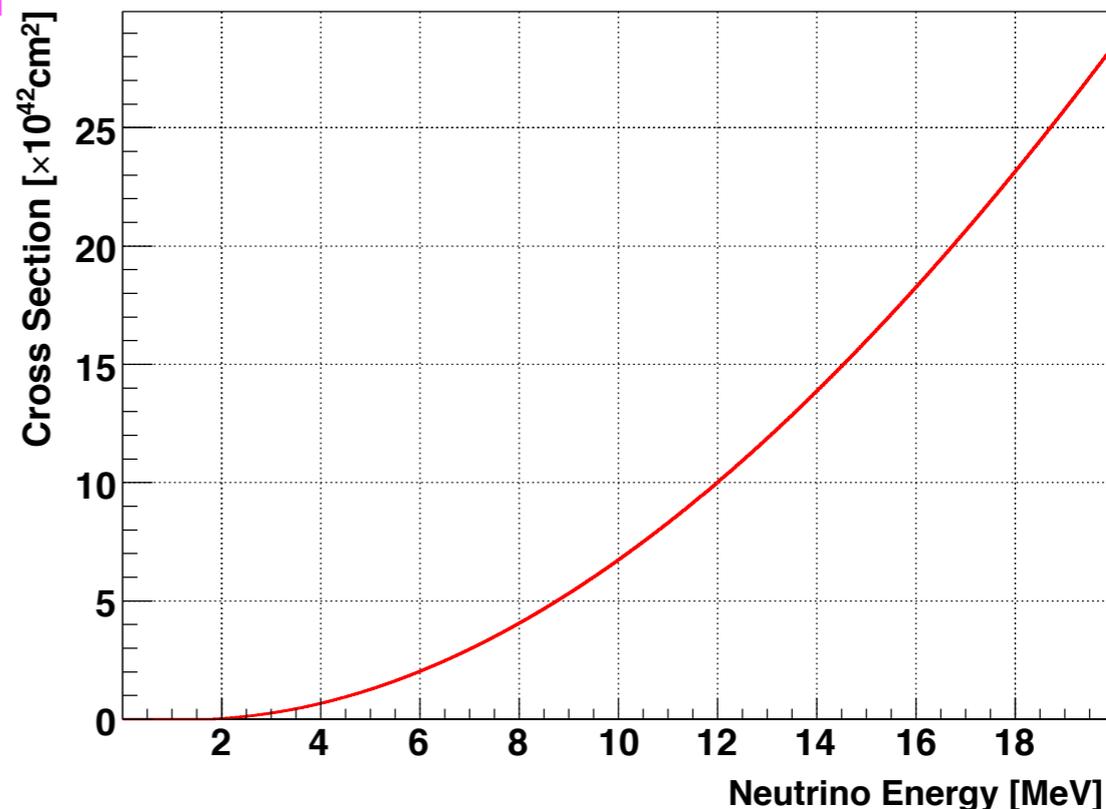
後発信号： $n + p \rightarrow d + \gamma$
 $E_{\text{delayed}} = 2.2 \text{ MeV}$

反応断面積

$$\sigma_{\text{tot}}^{(0)} = \frac{2\pi^2/m_e^5}{fR\tau_n} E_e^{(0)} p_e^{(0)}$$

$$\tau_n = 885.7 \pm 0.8 \text{ sec}$$

誤差：0.2%



宇宙起源 $\bar{\nu}_e$ イベント選定

$$7.5 < E_{\text{prompt}} < 30.0 \text{ MeV}$$

$$1.8 < E_{\text{delayed}} < 2.6 \text{ MeV}$$

$$0.5 < \Delta T < 1000.0 \text{ } \mu\text{sec}$$

$$\Delta R < 160 \text{ cm}$$

ミュー粒子崩壊電子カット

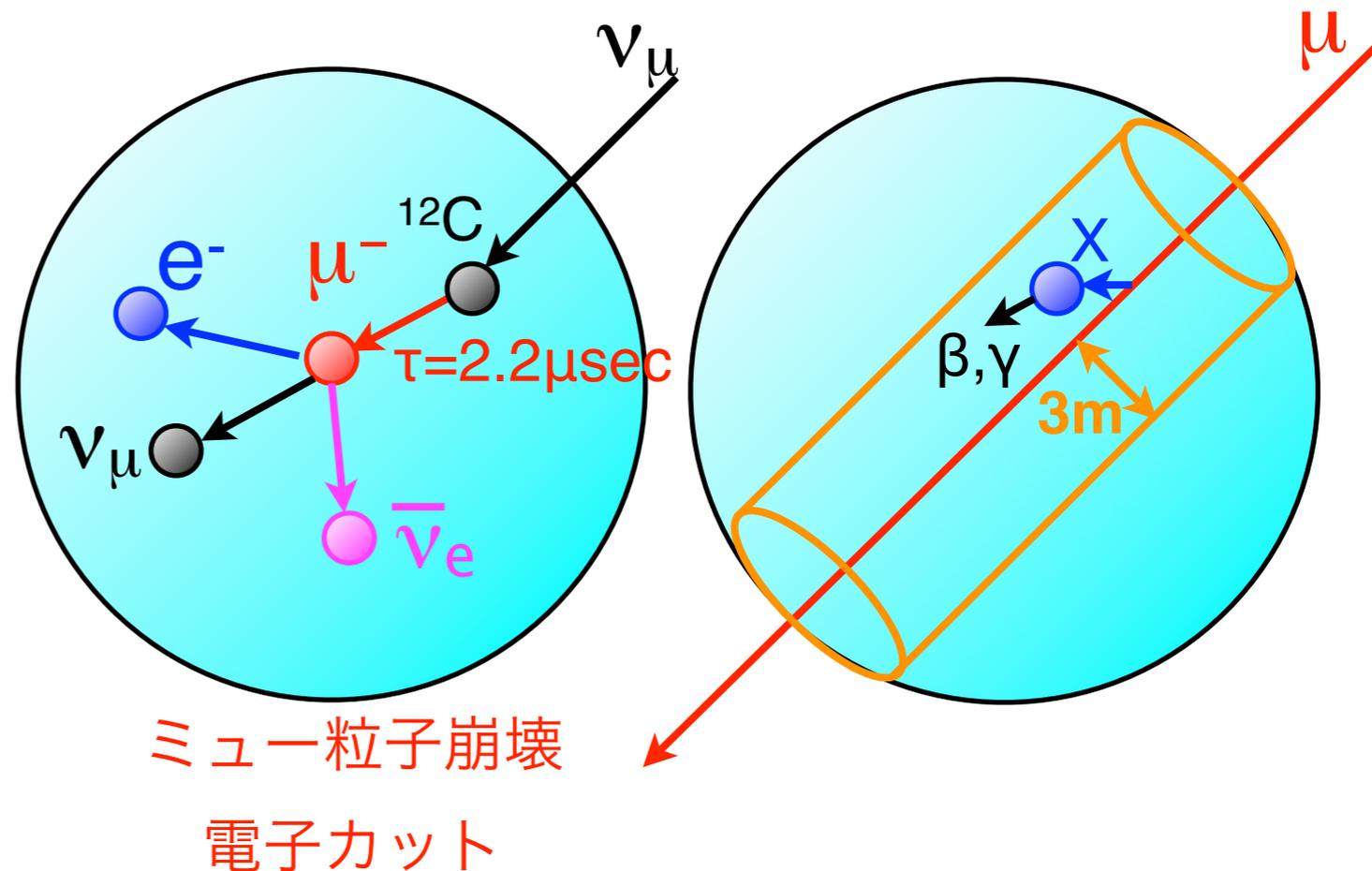
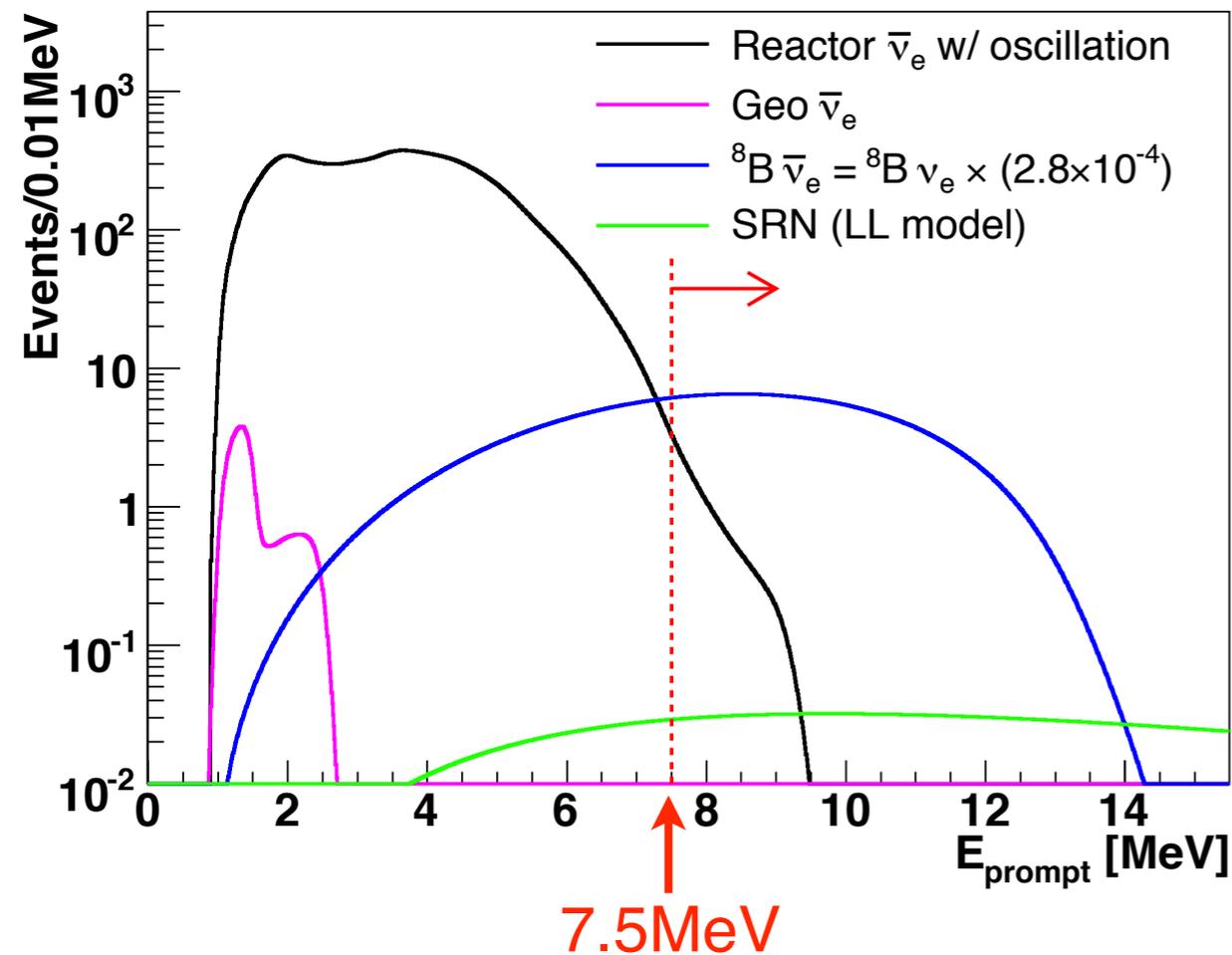
$$R_{\text{prompt}}, R_{\text{delayed}} < 600 \text{ cm}$$

高エネルギー μ ($\Delta Q > 10^6 \text{ p.e.}$)

→ 全体積 2 sec veto

低エネルギー μ ($\Delta Q < 10^6 \text{ p.e.}$)

→ 半径3m円筒形 2sec veto



バックグラウンド

1. 大気ニュートリノ
2. 高速中性子
3. 宇宙線起源 ${}^9\text{Li}$
4. 原子炉反ニュートリノ
5. 偶発イベント

1. 大気ニュートリノ

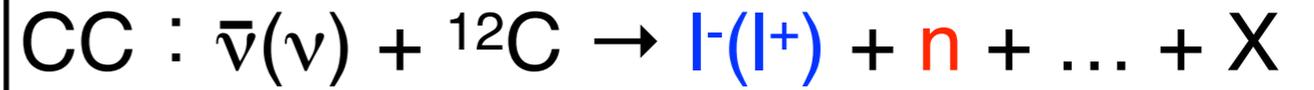
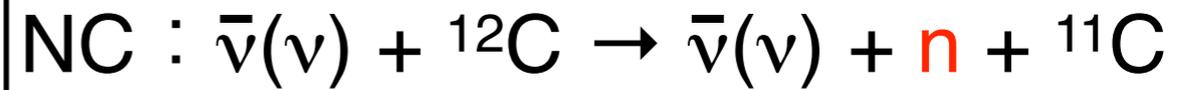
大気ニュートリノシミュレーション

NUANCE (100年相当)

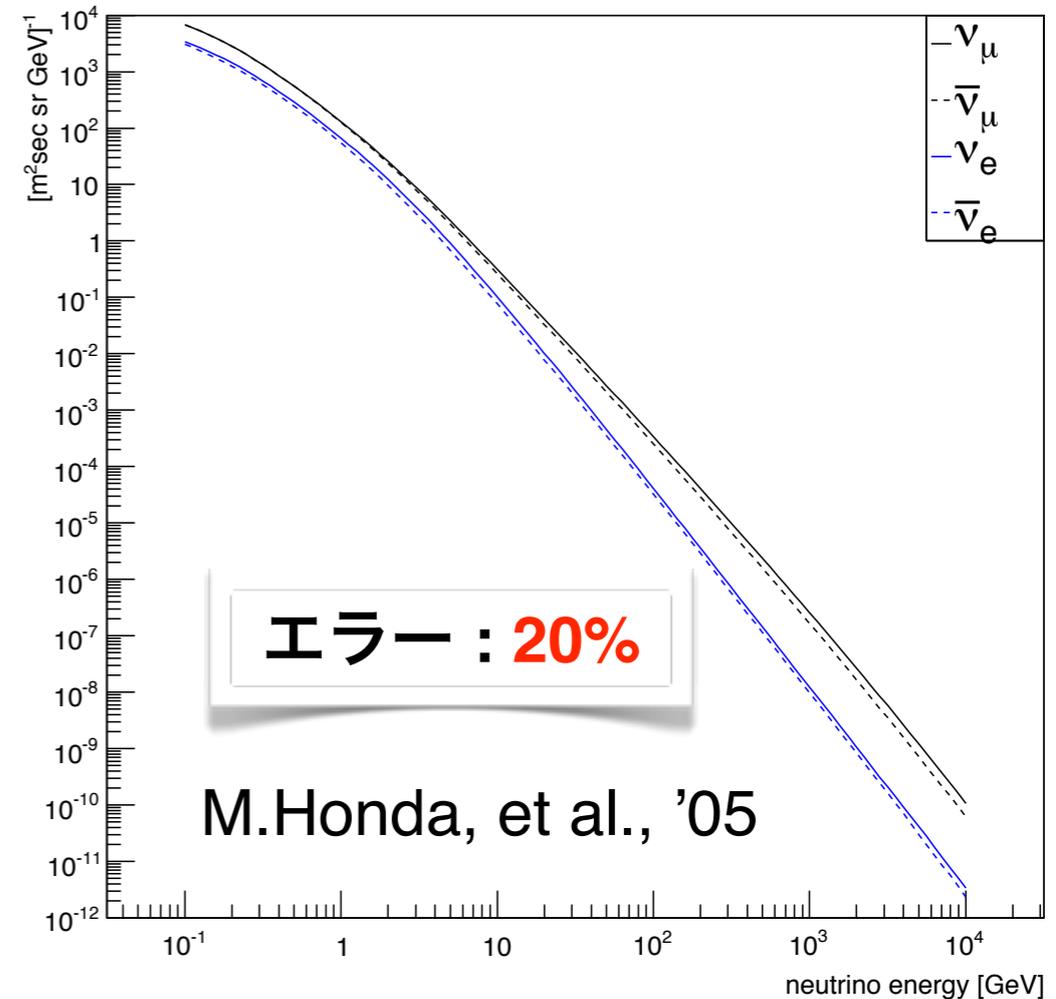


2次粒子検出シミュレーション

Geant4



神岡地区での大気ニュートリノフラックス



ニュートリノ振動なし

↓ full mixingを過程

50%エラー(CCのみ)

☑ NUANCE

- Fermi gas model
- $\nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$
- 準弾性散乱、単数/複数 π 生成

弾性散乱、深非弾性散乱

• CH_2 (密度 0.78g/cm^3)の

半径9m球体

中性カレント反応

$Q^2 < 0.45 \text{ (GeV/c)}^2$ のイベント数

20.6%

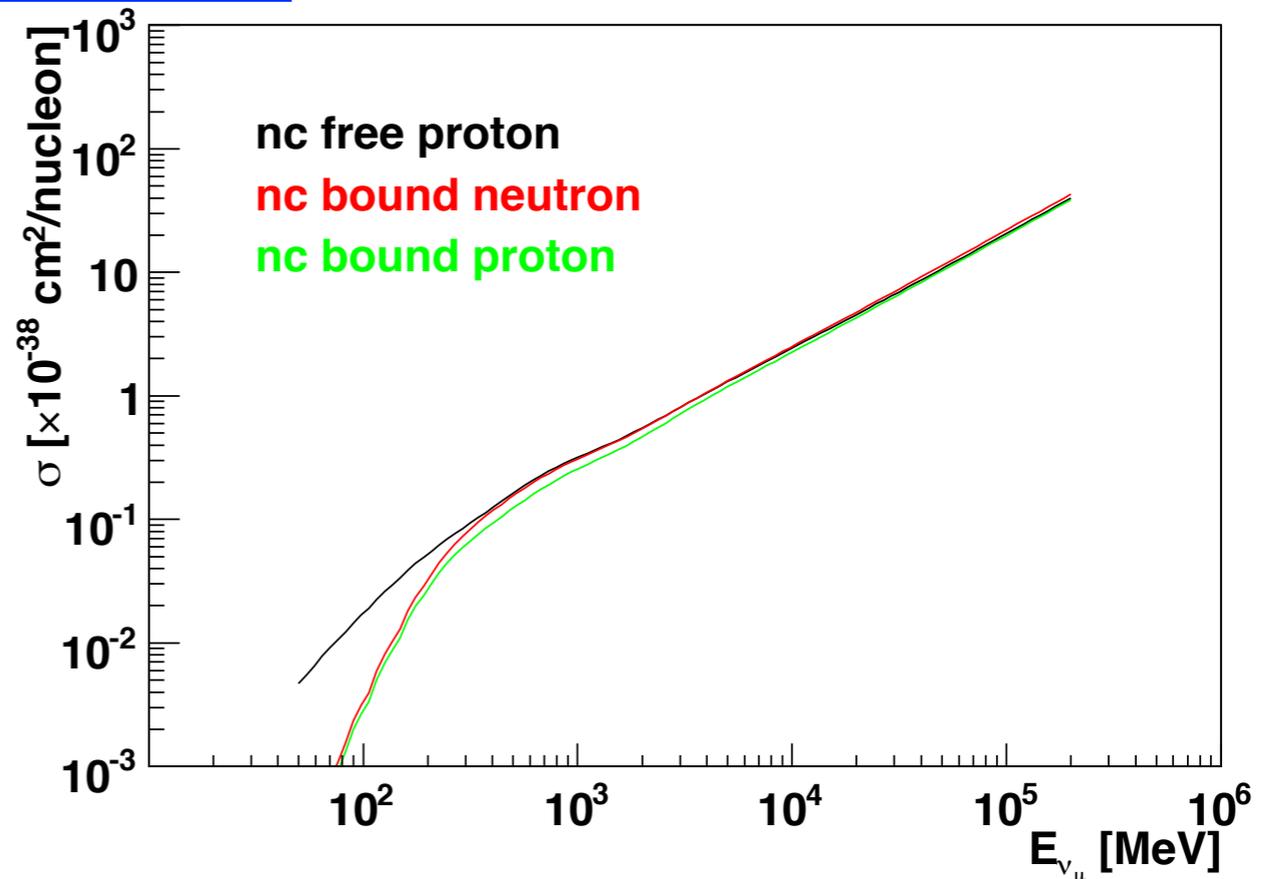
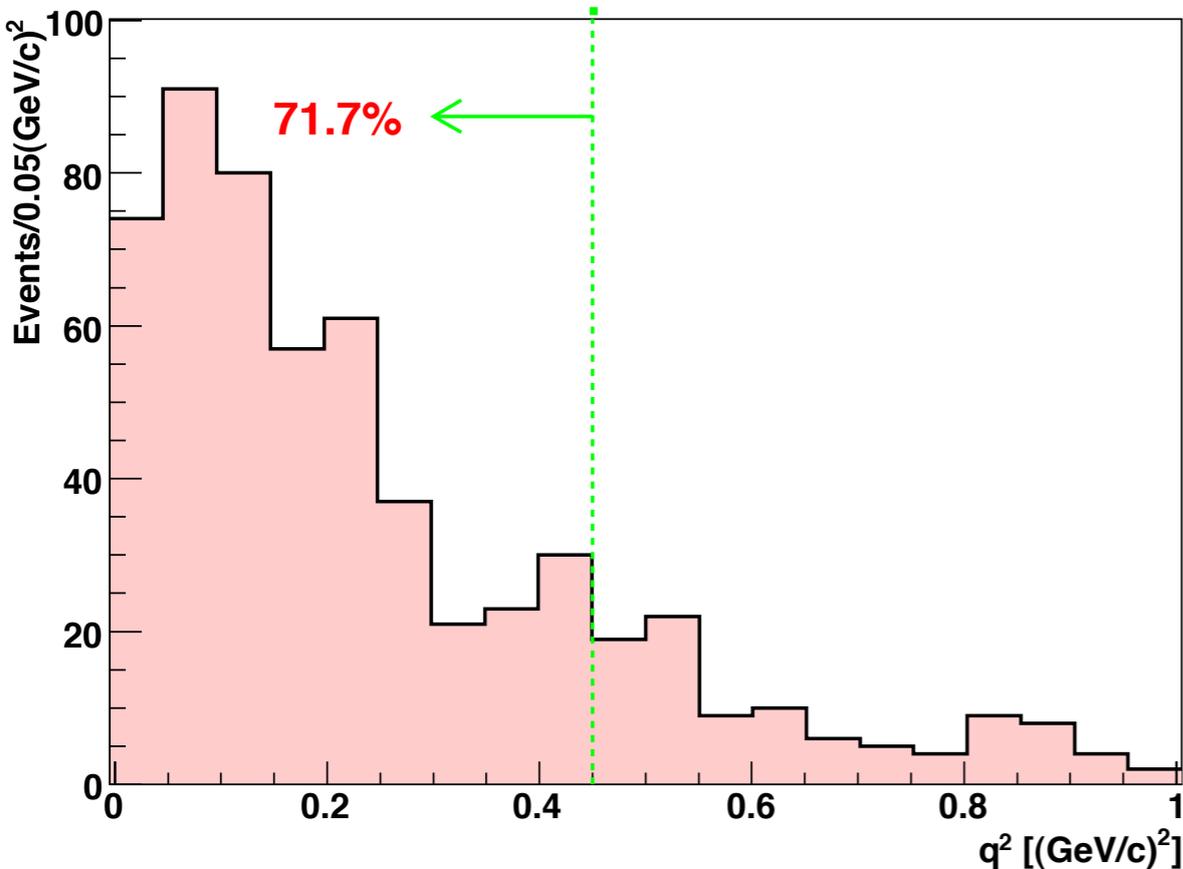
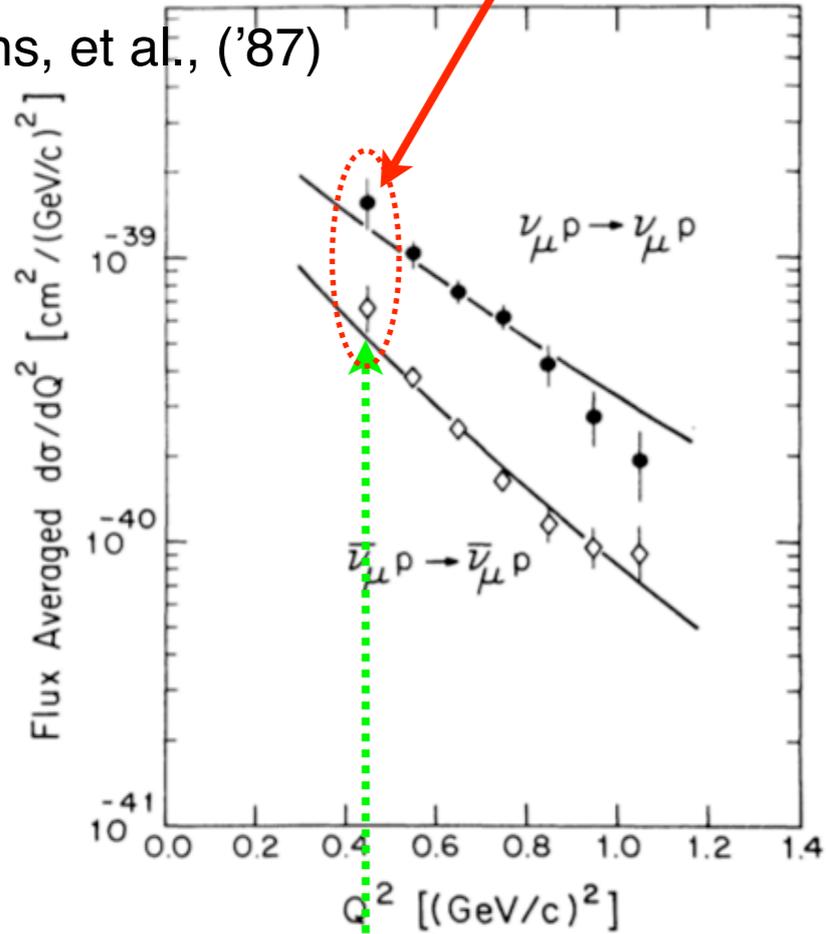
71.7%

断面積の不定性は外挿

$$\sigma = \sqrt{0.200^2(\text{flux}) + 0.206^2(\text{断面積})}$$

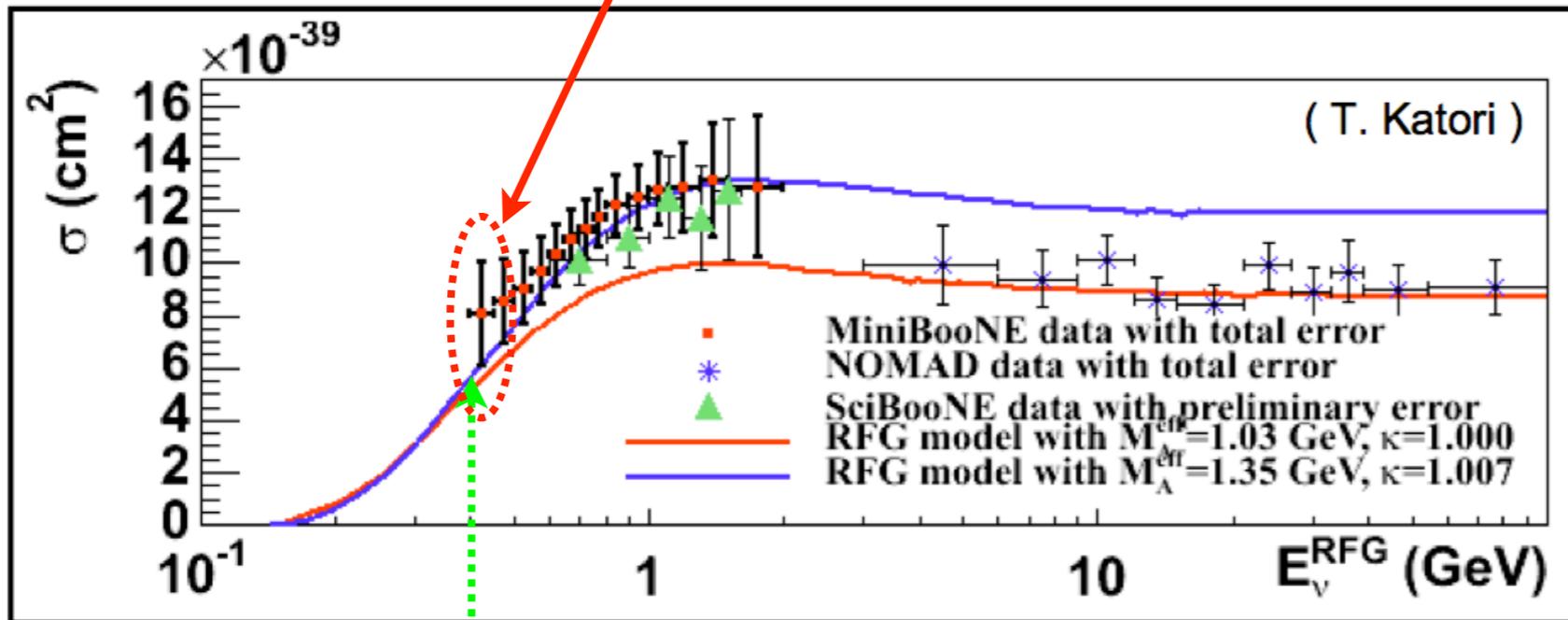
= 28.7%

L.A.Ahrens, et al., ('87)



荷電カレント反応

25%



$E < 0.4 \text{ GeV}$ **18.3%**

→ 断面積の不定性は外挿

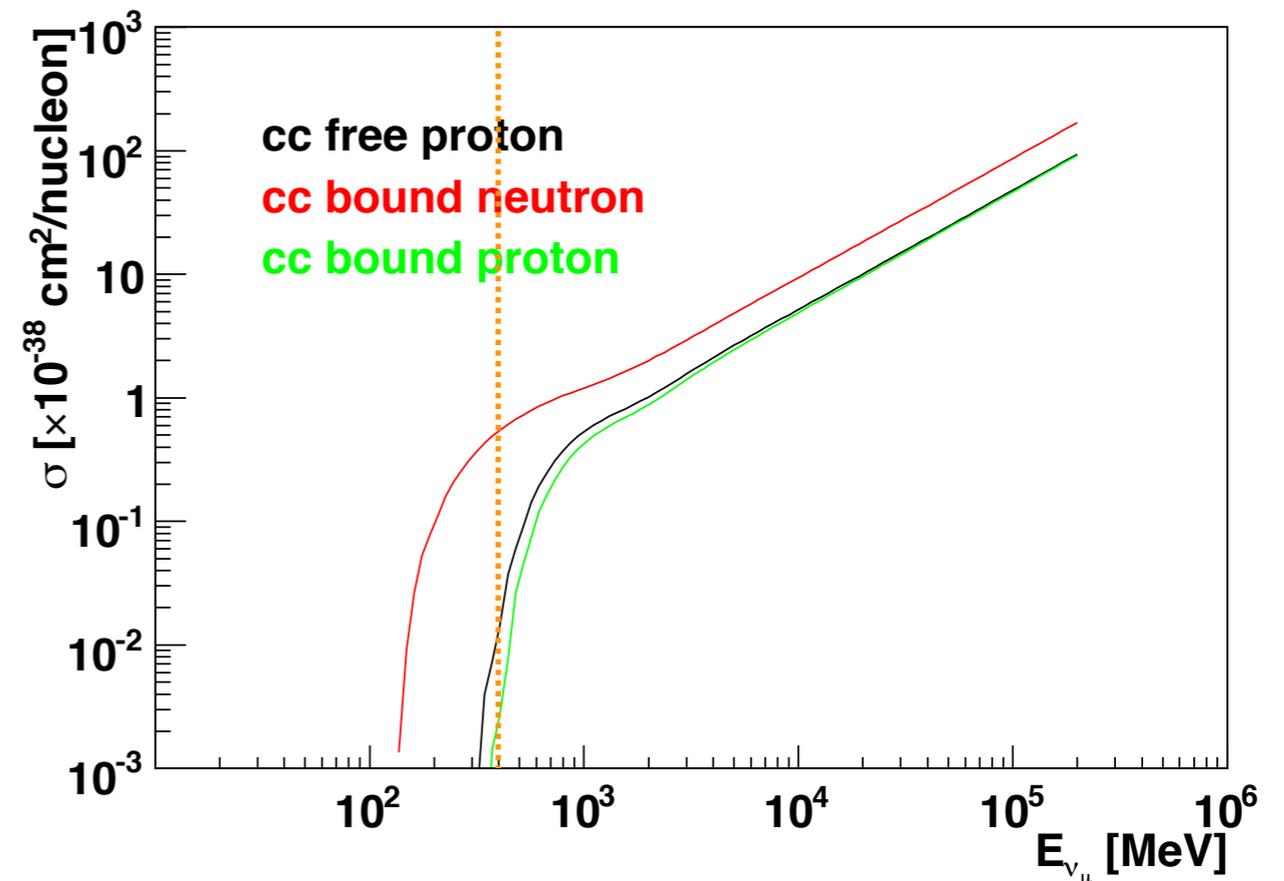
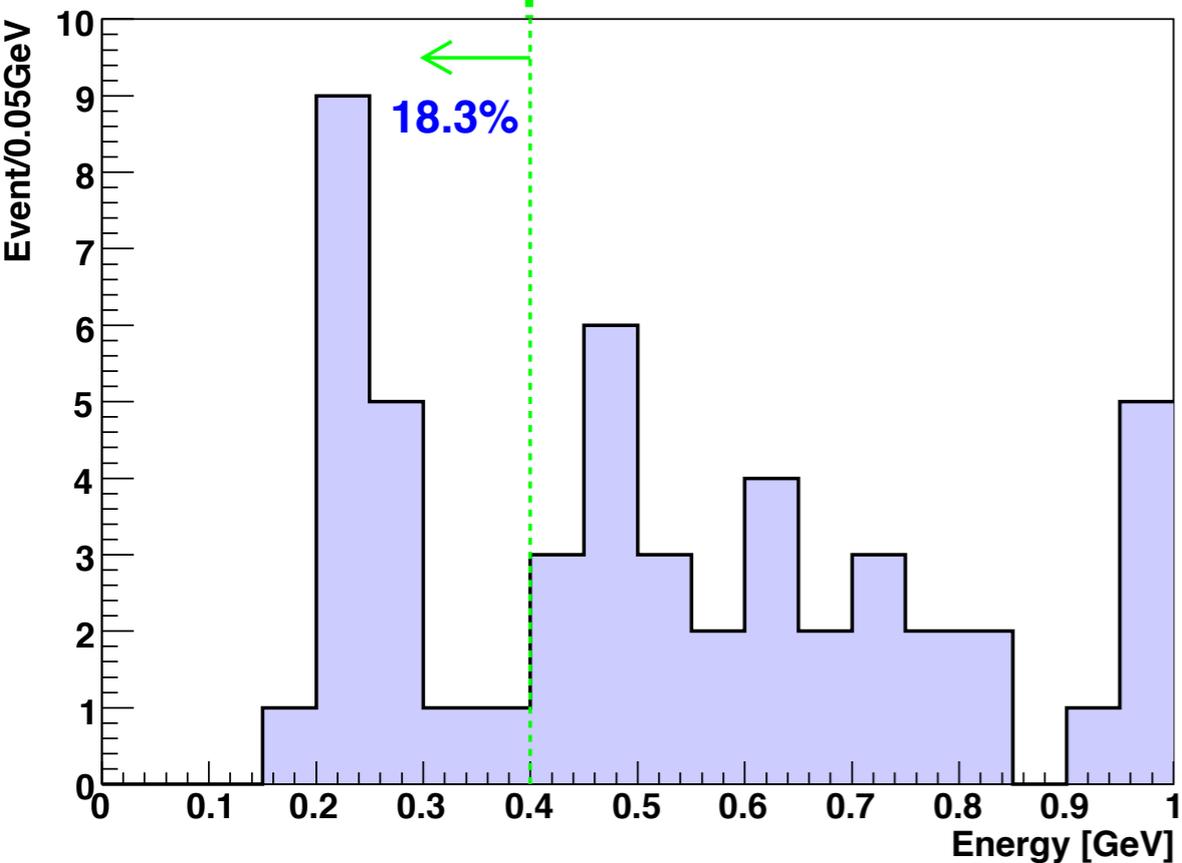
エラー

flux : 20%

断面積 : 25%

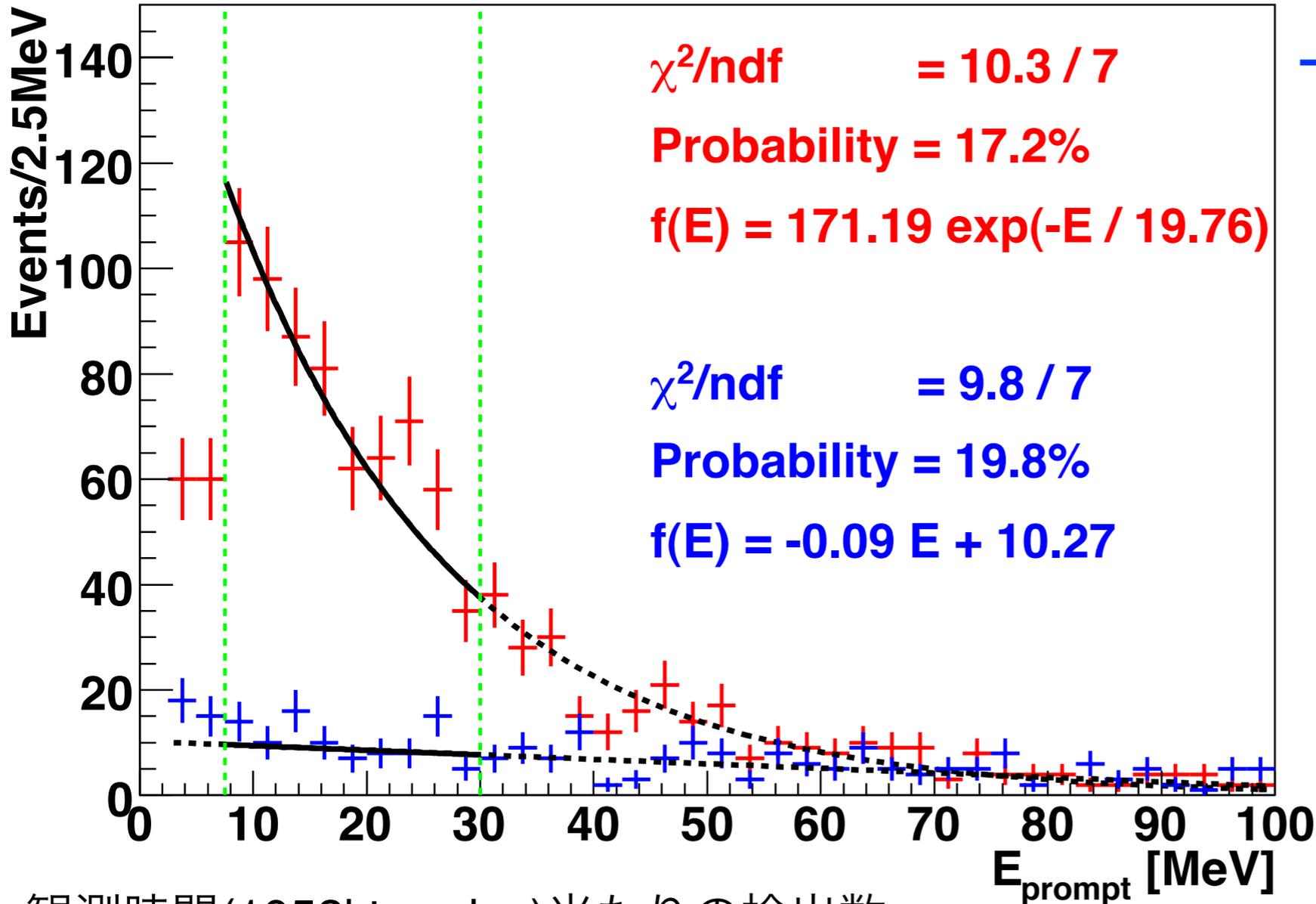
ニュートリノ振動 : 50%

合計 **59.4%**



検出シミュレーション結果

+ 中性カレント
+ 荷電カレント



KamLAND
 $\sigma = \sqrt{27/27} = 19.2\%$

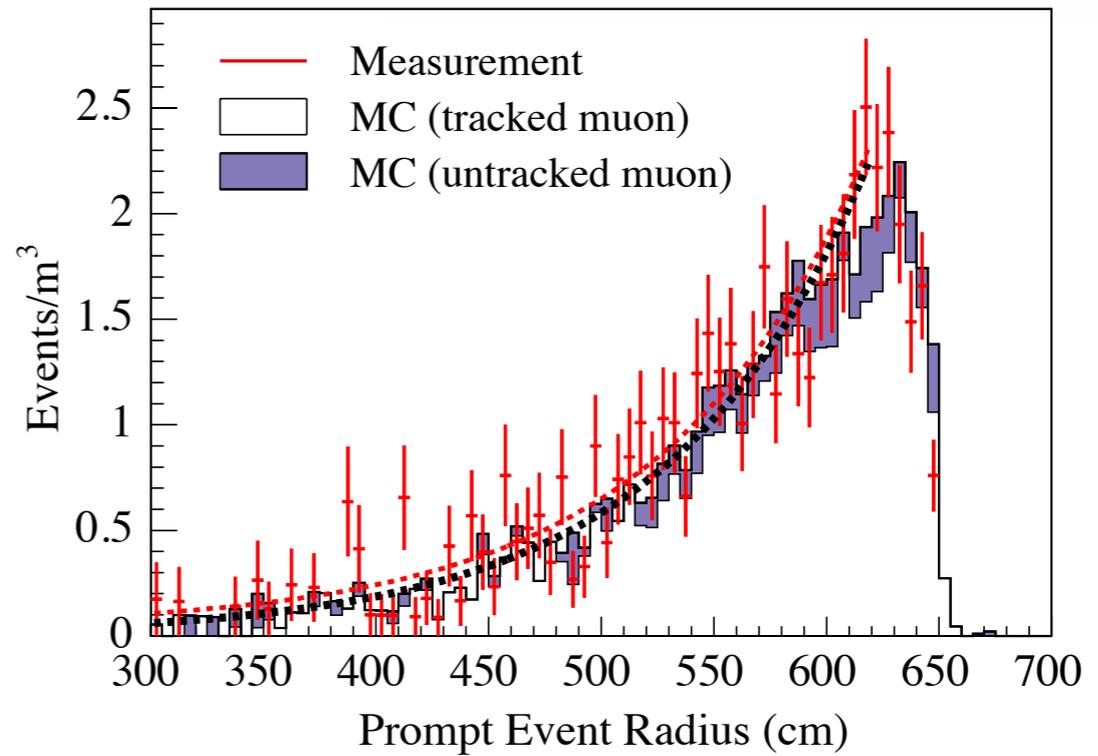
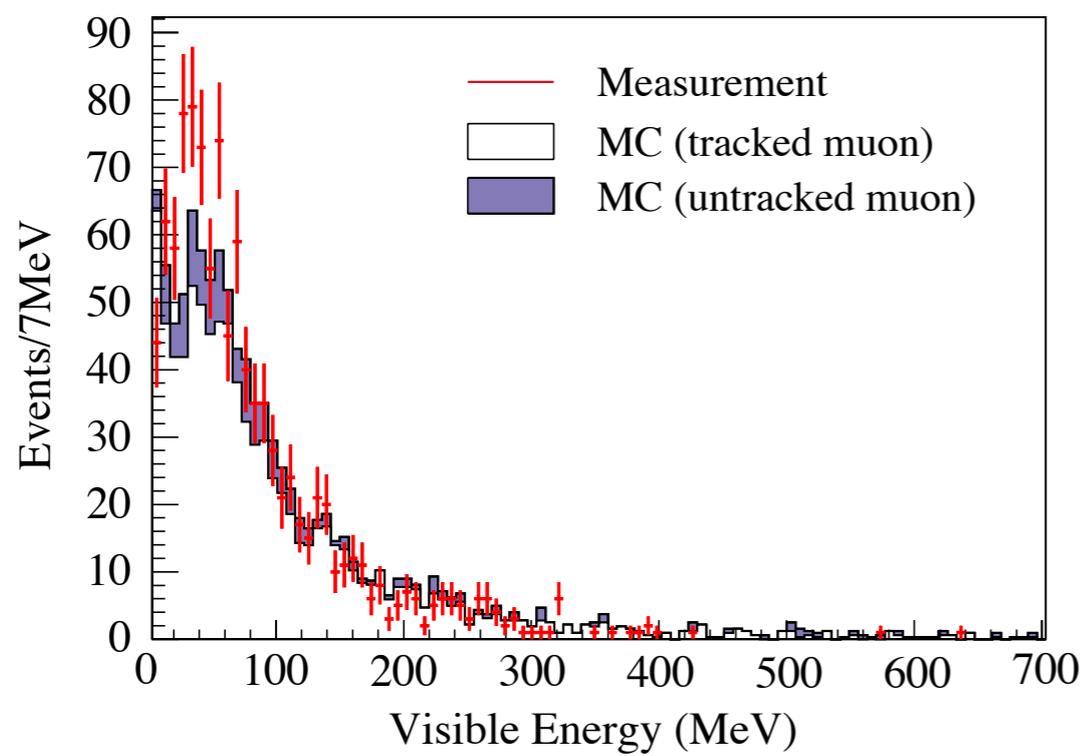
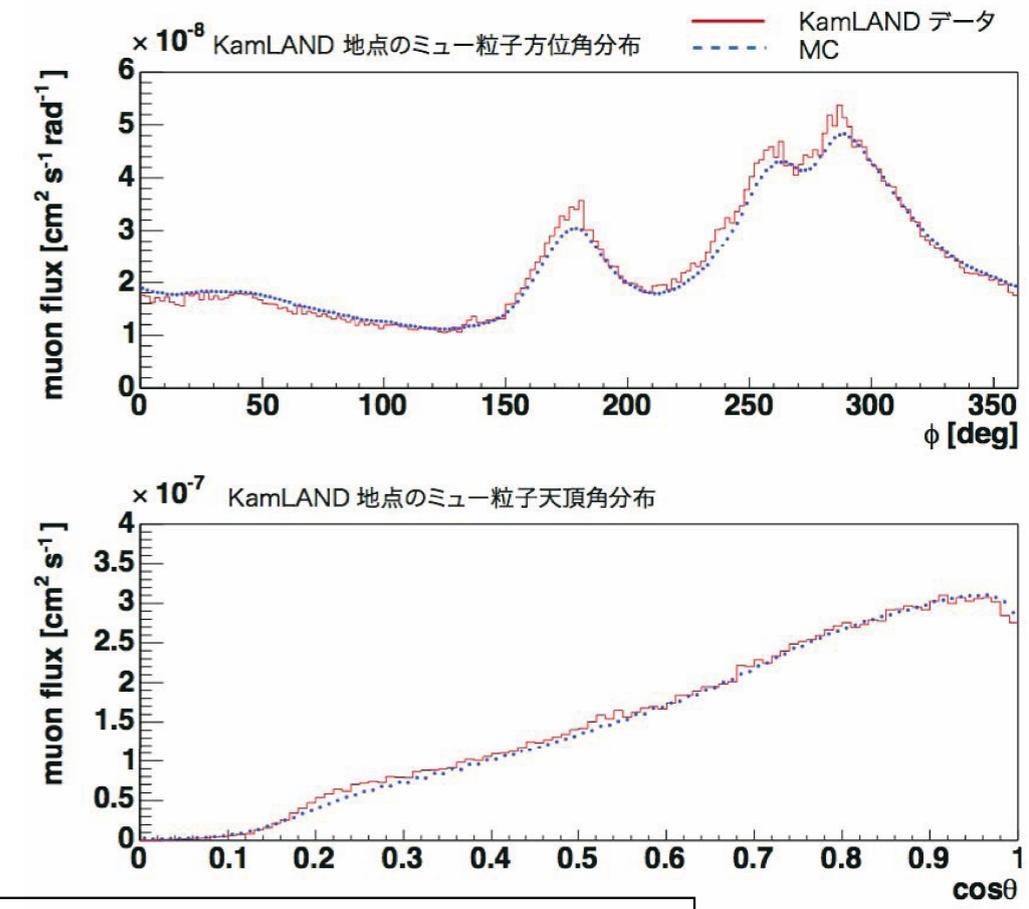
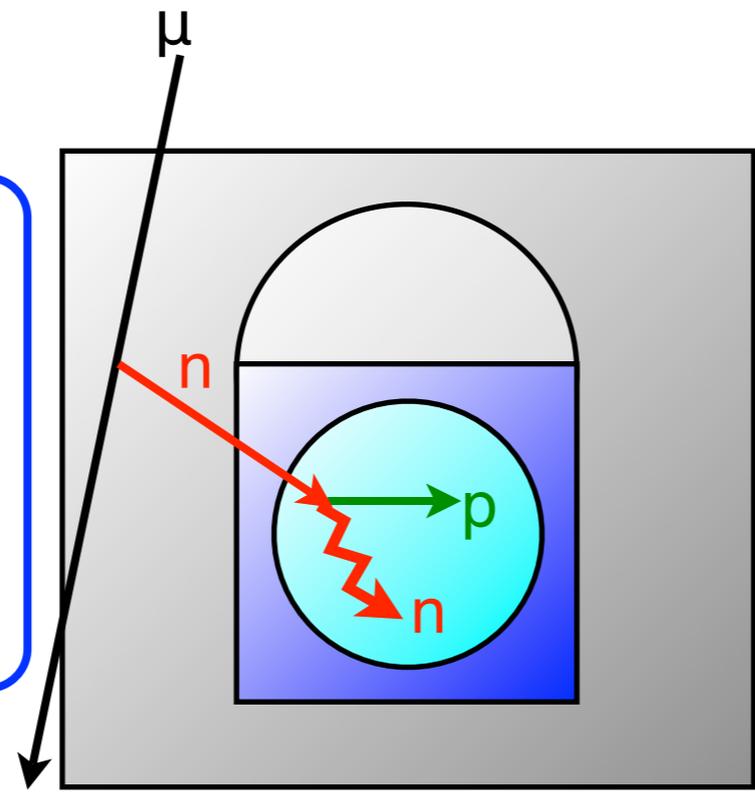
NUANCE
 $\sigma = 28.7\%$

観測時間(1052kton-day)当たりの検出数

反応	$7.5 < E_{prompt} < 15.0$ MeV	$7.5 < E_{prompt} < 30.0$ MeV	スペクトルの近似
中性カレント	11.9 ± 3.4	27.0 ± 7.7	指数関数
荷電カレント	1.6 ± 1.0	3.8 ± 2.3	1次関数

2.高速中性子

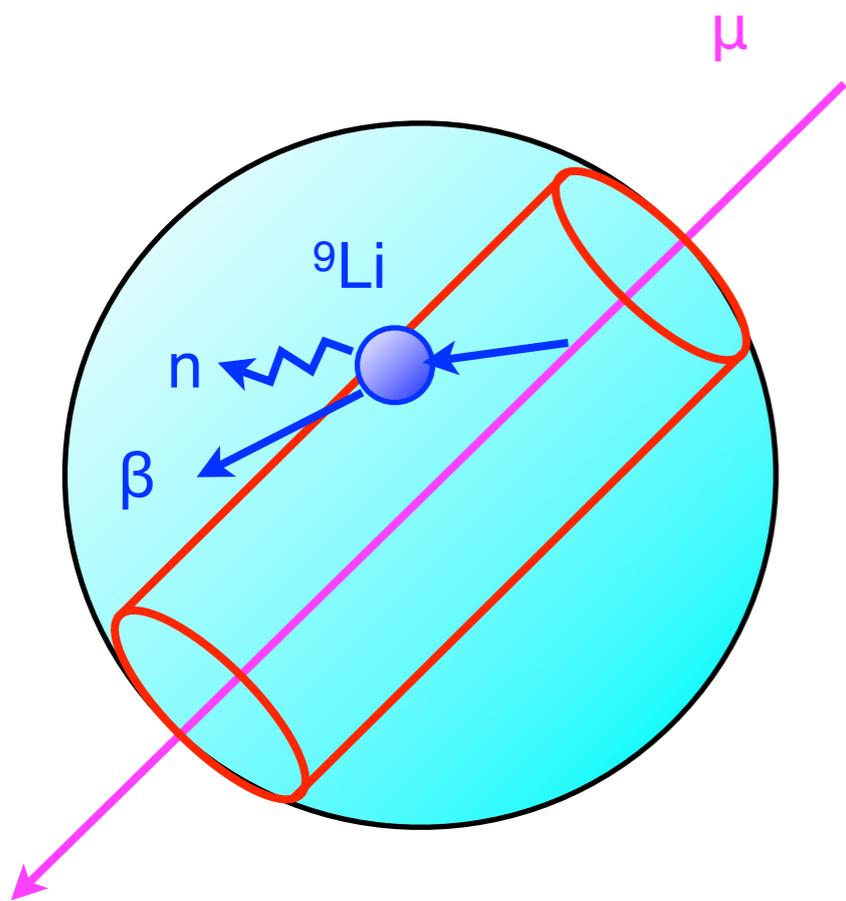
宇宙線 μ 生成シミュレーション
MUSIC/MUSUN (3倍相当)
 ↓
 2次粒子検出シミュレーション
Geant4



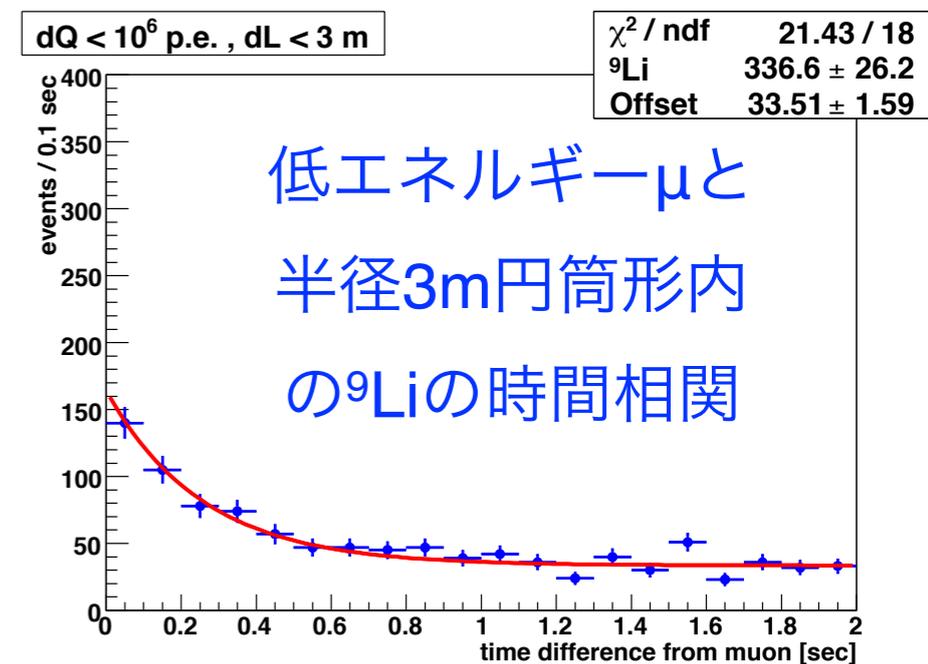
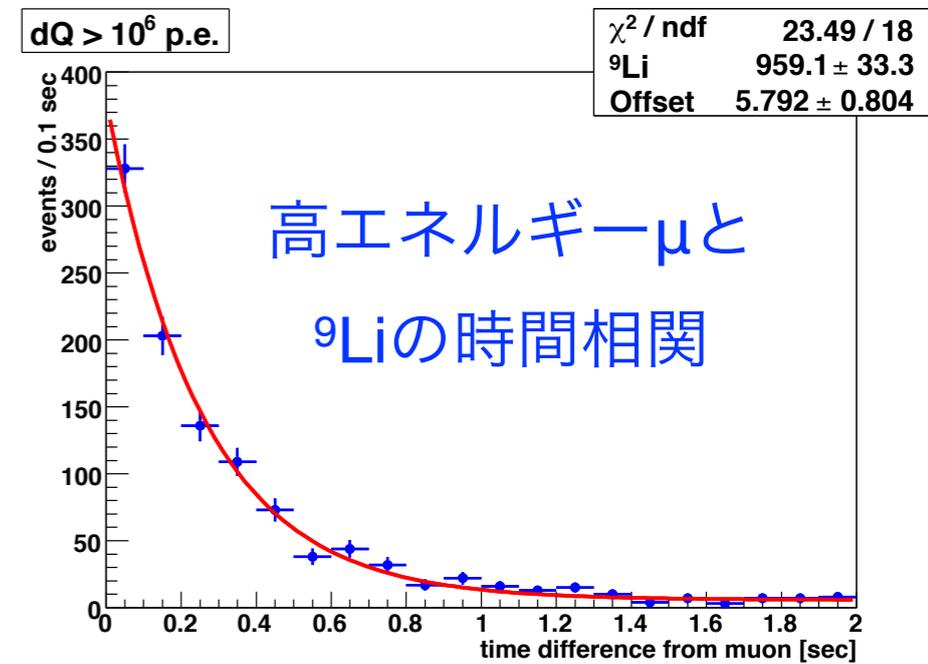
観測時間(1052kton-day)当たりの検出数

$7.5 < E_{\text{prompt}} < 15.0 \text{ MeV}$	$7.5 < E_{\text{prompt}} < 30.0 \text{ MeV}$	スペクトルの近似
1.0 ± 1.0	2.0 ± 2.0	フラット

3. 宇宙線起源⁹Li



$\tau = 257.2 \text{ msec},$
 $Q \text{ 値} = 13.6 \text{ MeV},$
 $\beta^- + n$



☑ 高エネルギーμ : 959.1 ± 33.3 イベント

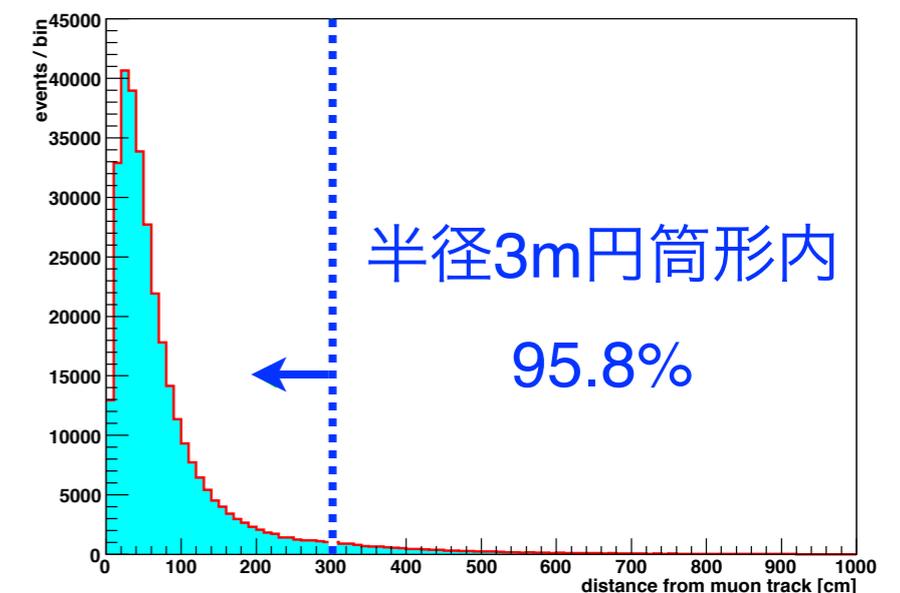
全体積 2 sec veto → 0.4 ± 0.01 イベント

☑ 低エネルギーμ : 336.6 ± 26.2 イベント

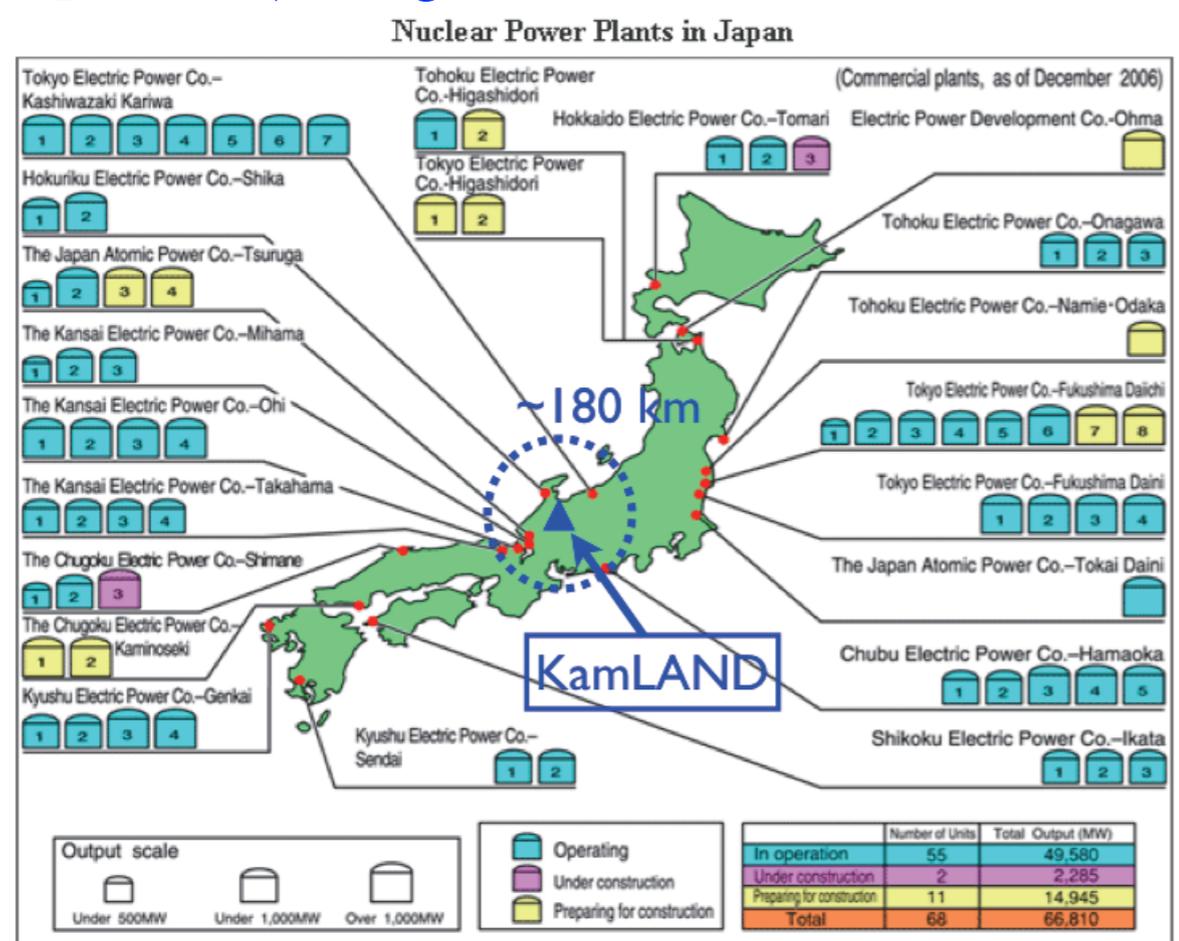
半径3m円筒形2 sec veto → 14.9 ± 1.2 イベント

7.5 MeV以上のスペクトルの割合は 19.7%

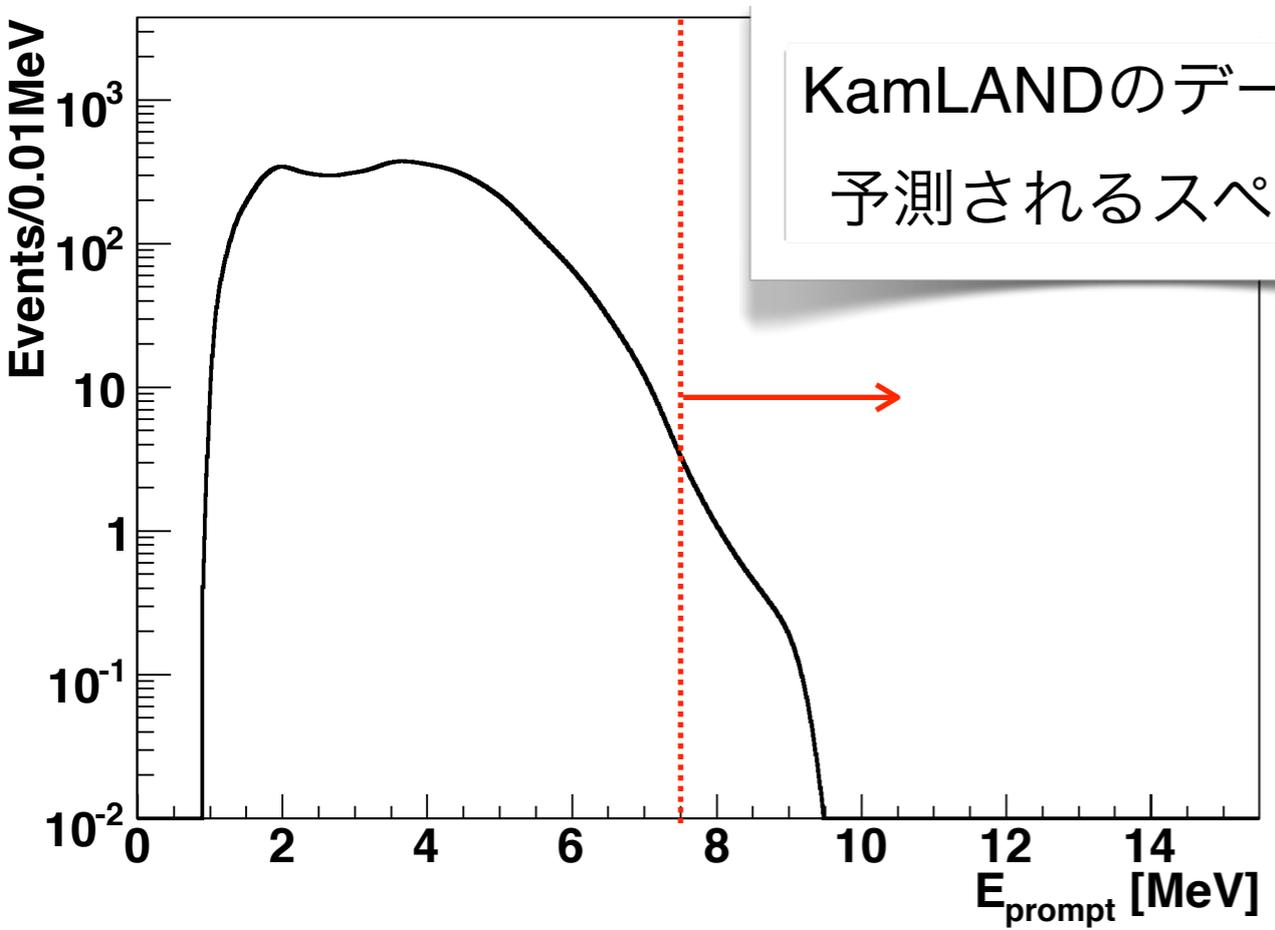
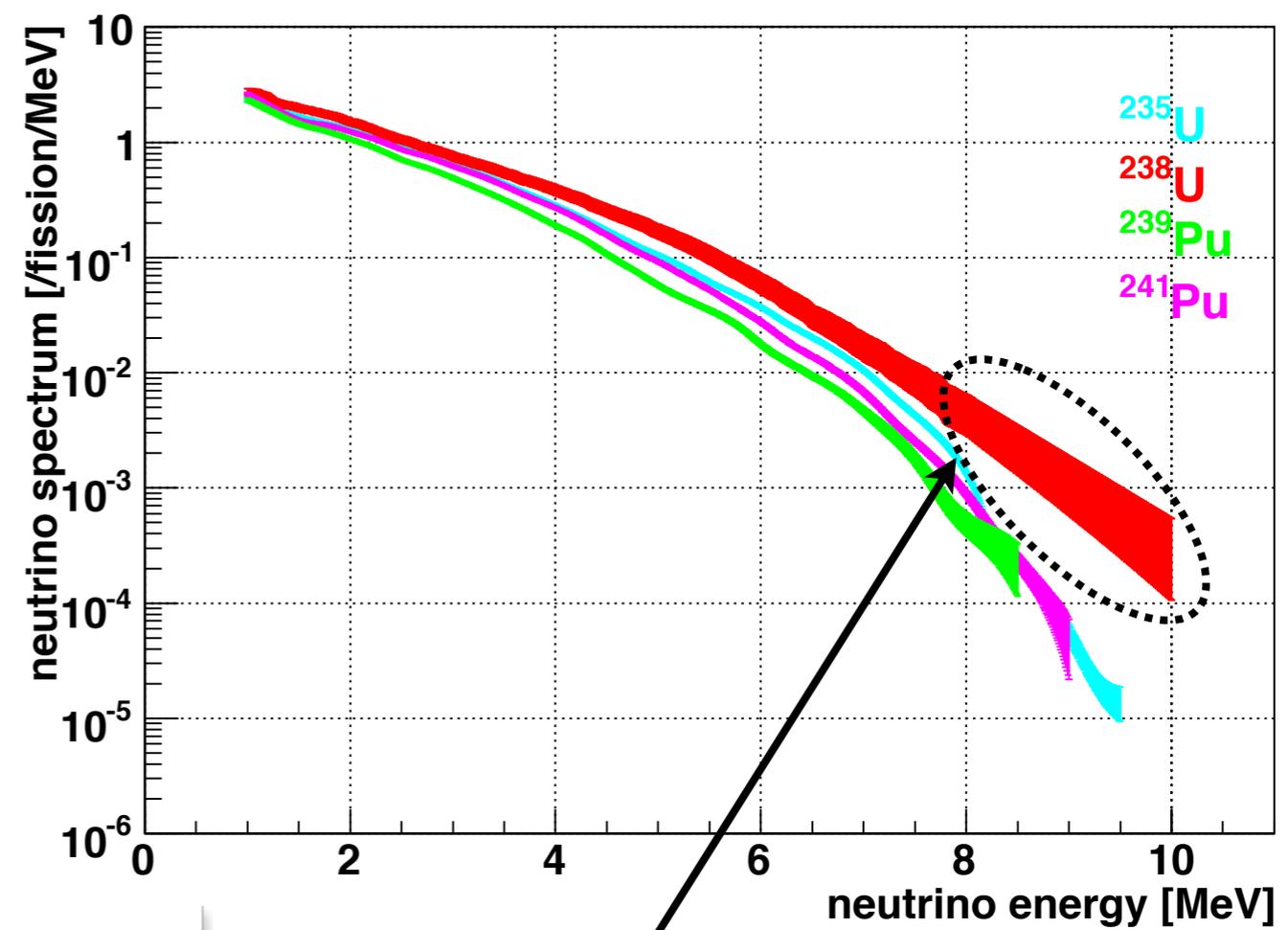
☑ バックグラウンド : 3.0 ± 0.3 イベント



4. 原子炉 $\bar{\nu}_e$



崩壊核による原子炉 $\bar{\nu}_e$ スペクトル

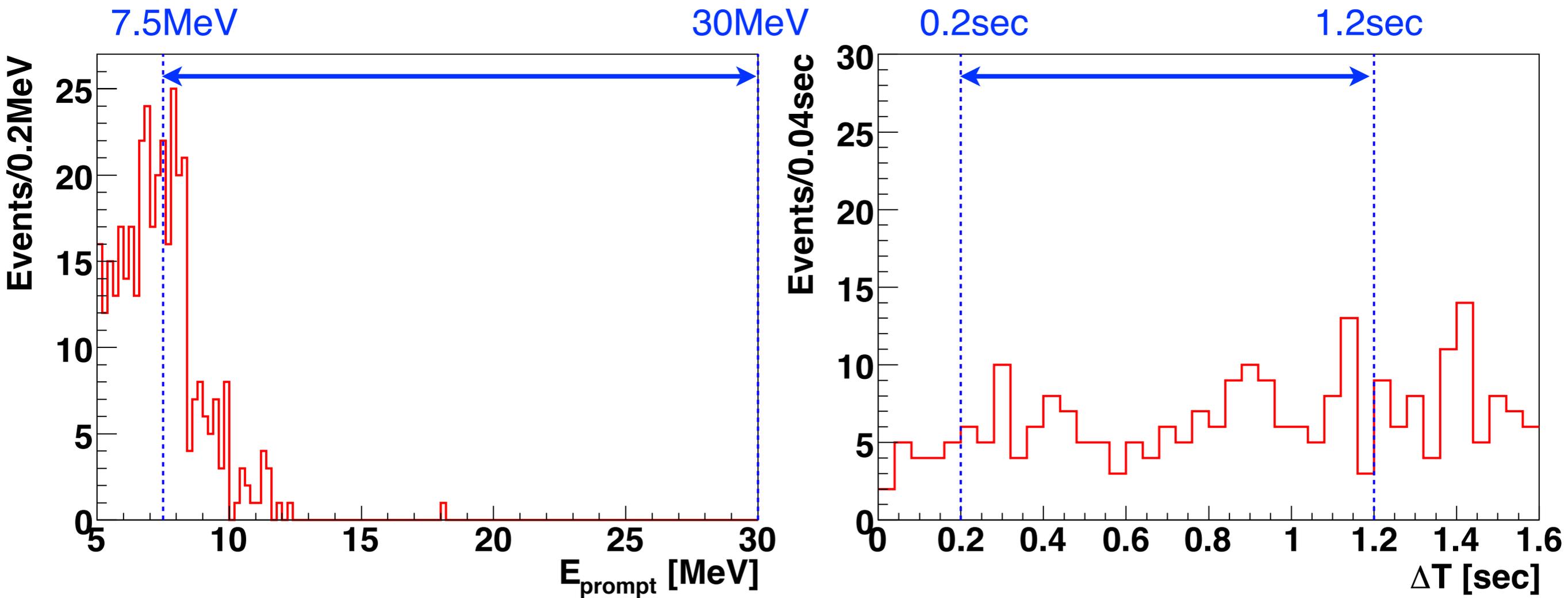


KamLANDのデータから
予測されるスペクトル

8MeV以上は外挿。
Double Choozによる計算
(hep-ex/0405032)
とよく一致。

1.5 ± 0.5 イベント

5. 偶発イベント



時間相関 : $0.2 < \Delta T < 1.2 \text{ sec}$

↓ 1/1000

0.20 ± 0.01 イベント

バックグラウンドのまとめ

バックグラウンド	$7.5 \leq E_{\text{prompt}} \leq 15.0 \text{ MeV}$	$7.5 \leq E_{\text{prompt}} \leq 30.0 \text{ MeV}$
大気ニュートリノ 中性カレント	11.9 ± 3.4	27.0 ± 7.7
大気ニュートリノ 荷電カレント	1.6 ± 1.0	3.8 ± 2.3
高速中性子	1.0 ± 1.0	2.0 ± 2.0
宇宙線起源 ${}^9\text{Li}$	3.0 ± 0.3	3.0 ± 0.3
原子炉反ニュートリノ	1.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5
偶発イベント	0.20 ± 0.01	0.20 ± 0.01
合計	19.2 ± 3.7	37.5 ± 8.3

観測数20イベントを仮定して解析

解析

$7.5 < E_{\text{prompt}} < 15.0 \text{ MeV}$
バックグラウンド 19.3 ± 3.7

観測数 20 イベント (仮定)

有効断面積 $\bar{\sigma}$

→ スペクトルで平均をとったもの。

☑ 標準太陽模型 BPS08(GS)

☑ ${}^8\text{B}\bar{\nu}_e$ エネルギー スペクトル

W.T.Winter, et al.('06)

☑ 超新星爆発 $\bar{\nu}_e$ エネルギー スペクトル

Lawrence Livermore group
(T.Totani, et al., '98)

$$\bar{\sigma} = \frac{\int_{8.3}^{15.8} \frac{d\sigma}{dE_\nu} S dE_\nu}{\int_{8.3}^{15.8} S dE_\nu} = \begin{cases} 8.89 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 & (\text{超新星残存}\bar{\nu}_e) \\ 6.88 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 & (\text{太陽}{}^8\text{B}\bar{\nu}_e) \end{cases}$$

☑ Confidence interval

📍 確率密度関数

$$P(N) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\nu - N^{\text{exp}})^2}{2\sigma^2}} \frac{\nu^N}{N!} e^{-\nu} d\nu$$

$$\sigma = \sqrt{(N_{\text{unknown}} \cdot \sigma_{\text{sys}})^2 + (N_{\text{BG}} \cdot \sigma_{\text{BG}})^2}$$

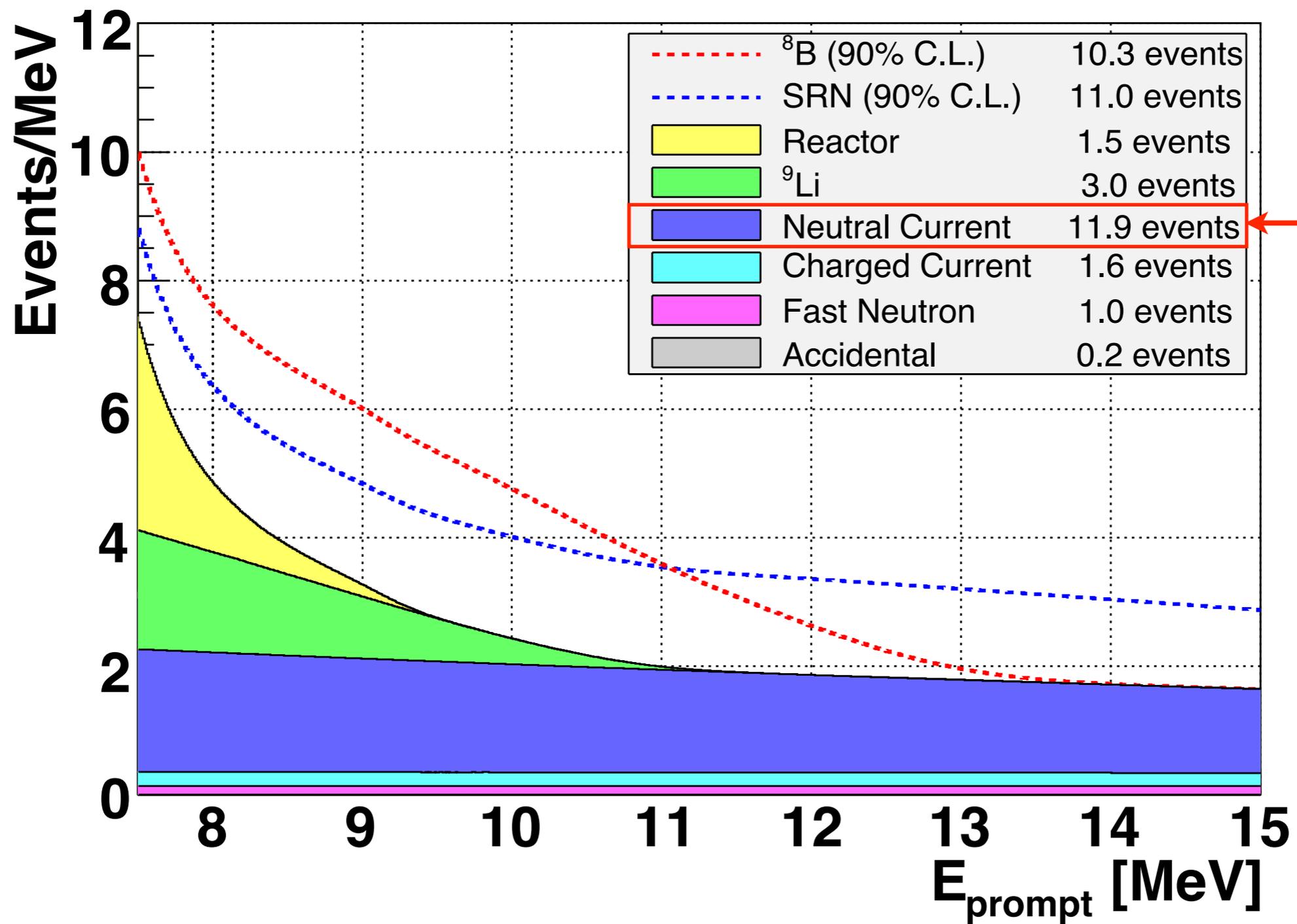
N_{unknown} : 太陽 ${}^8\text{B}\bar{\nu}_e$ or 超新星残存 $\bar{\nu}_e$ イベント数(変数)

N_{BG} : バックグラウンド数(19.3 イベント)

$N^{\text{exp}} = N_{\text{unknown}} + N_{\text{BG}}$

$\sigma_{\text{sys}} = 2.2\%$

$\sigma_{\text{BG}} = 19.2\%$



NUANCE
による結果
KamLANDの
データで確認

上限値 (90%C.L.)	太陽 $^8\text{B}\bar{\nu}_e$	KamLAND'04	超新星残存 $\bar{\nu}_e$
Flux [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	206	370	160
$\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ 変換率	1.2×10^{-4}	2.8×10^{-4}	—

まとめ

- 2002年3月から2007年5月までの**1052kton-day**の KamLANDのデータで宇宙起源 $\bar{\nu}_e$ の研究を行っている。
- バックグラウンド
19.3 \pm 3.7 イベント (7.5 < Eprompt < 15.0 MeV)
37.6 \pm 8.3 イベント (7.5 < Eprompt < 30.0 MeV)
- 太陽 ν_e の $\bar{\nu}_e$ への変換率：**1.2 \times 10⁻⁴ (90% C.L.)**
超新星残存ニュートリノフラックス：**160 cm⁻²s⁻¹ (90% C.L.)**
程度の感度が期待される。
- 今後の課題
実際に選定されたイベント数を用いて結果を公表する
統計量の増加
大気ニュートリノNCによるバックグラウンドの高精度の見積もり
ニュートリノ振動を考慮した大気ニュートリノシミュレーション