

KamLAND：液体シンチレータ 検出器によるSRN探索

新学術「地下素核研究」超新星ニュートリノ研究会

2016年1月6日

東北大学ニュートリノ科学研究センター

清水 格

天体ニュートリノ観測

超新星背景ニュートリノ
~Gpc

超新星ニュートリノ

~Mpc
 $R_{SN} \sim 1 \text{ yr}$

超新星ニュートリノ

~kpc

太陽ニュートリノ $R_{SN} \sim 0.01 \text{ yr}$

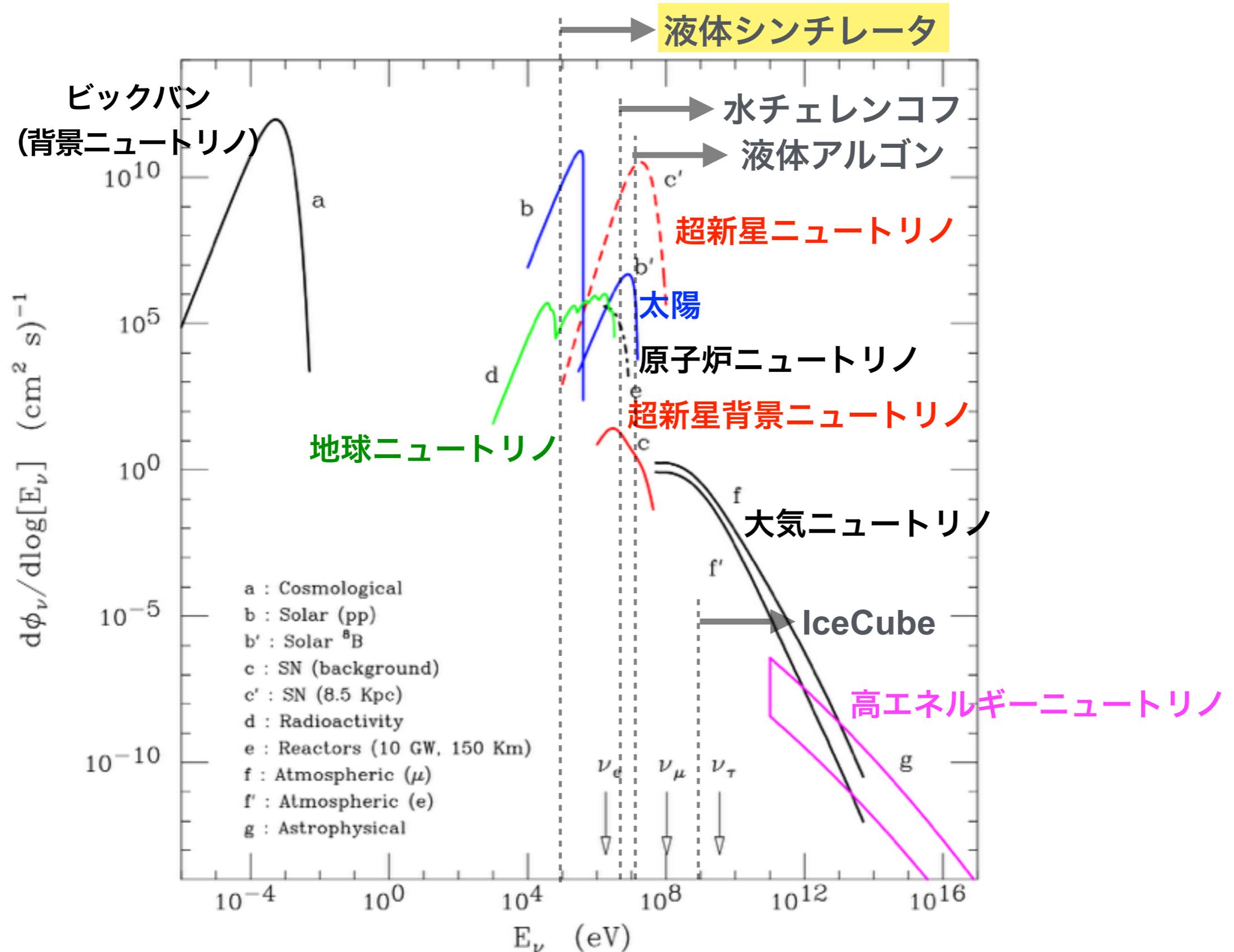
暗黒物質対消滅ニュートリノ

地球ニュートリノ

ニュートリノエネルギー
~ 0.1-100 MeV

↓
液体シンチレータ
検出器の観測範囲

天体ニュートリノのエネルギー



検出技術：液体シンチレータ

- 大発光量 ~ 500 p.e. / MeV

エネルギーしきい値 ~ 0.3 MeV

$\sigma_E \sim 6\% @ 1 \text{ MeV}$

- 遅延同時計測による反ニュートリノ識別



(熱中性子化 ~ 陽子による捕獲)

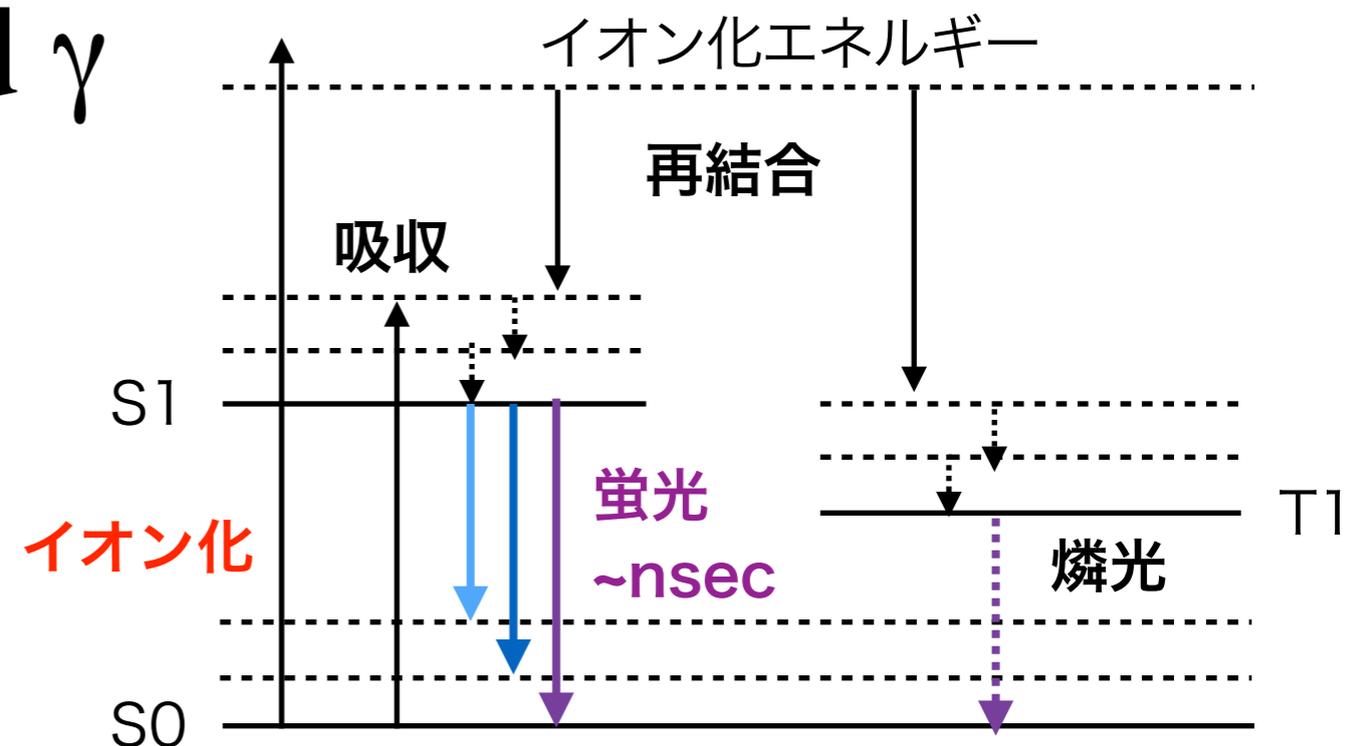
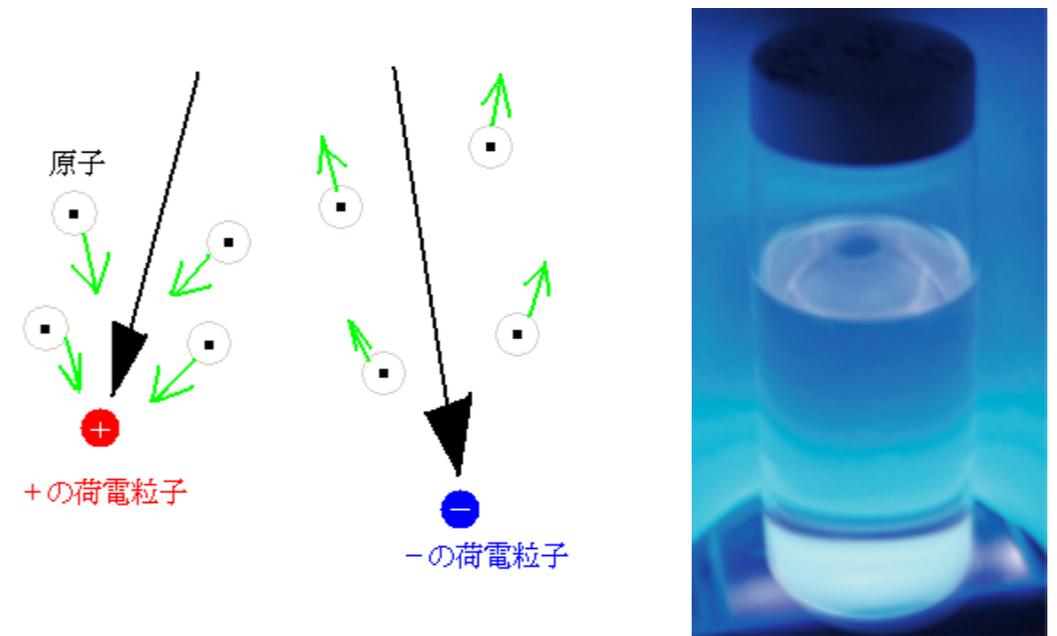
$\tau \sim 200 \mu\text{sec}$

- 放射性バックグラウンド低減技術

U, Th, Kなどの天然放射性不純物

- 等方的発光 (方向感度が無い)

液体シンチレータの発光



KamLAND

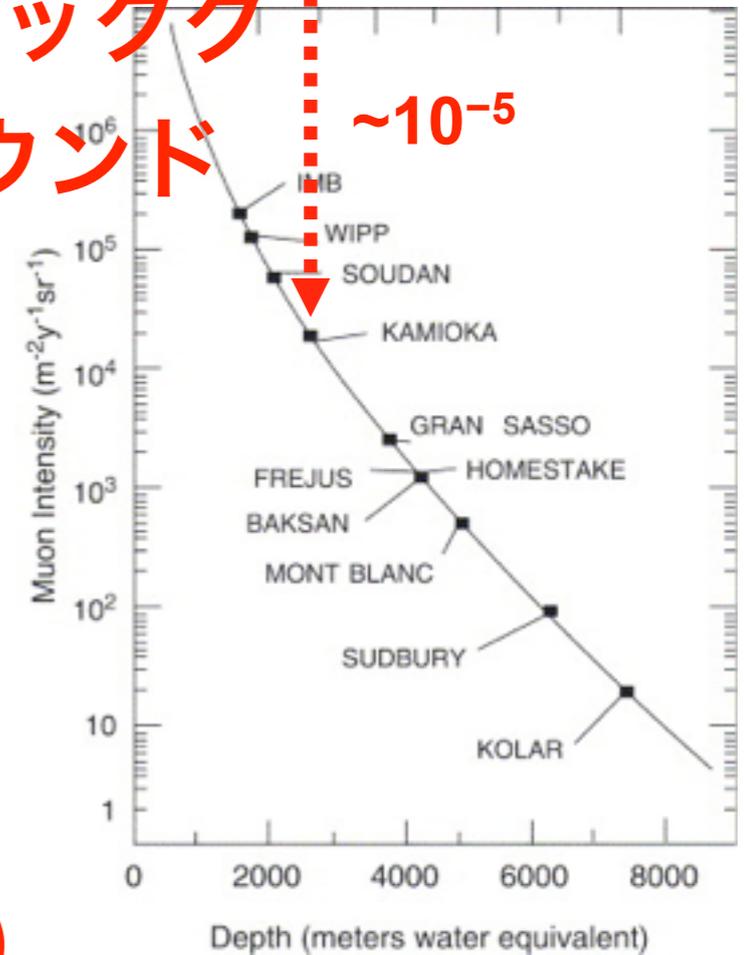
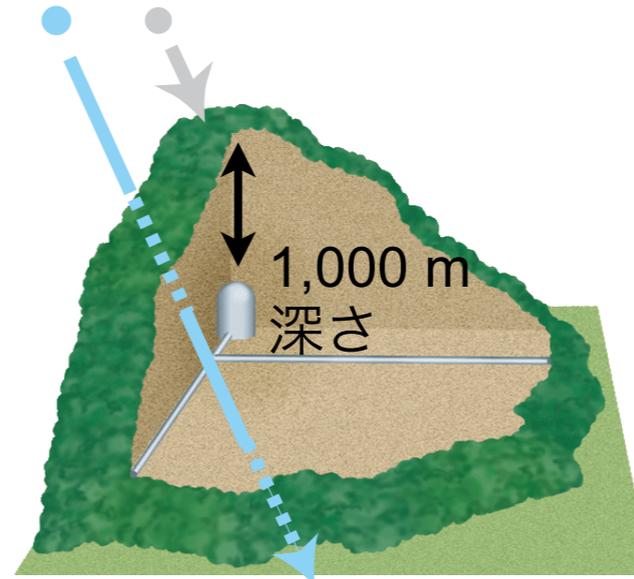
低バックグラウンド

ラウンド

$\sim 10^{-5}$

2002年観測開始

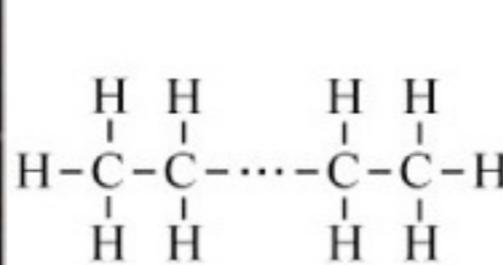
ニュートリノ 宇宙線



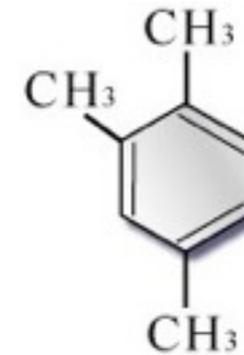
大容量 (世界最大)

1,000 トン液体シンチレータ

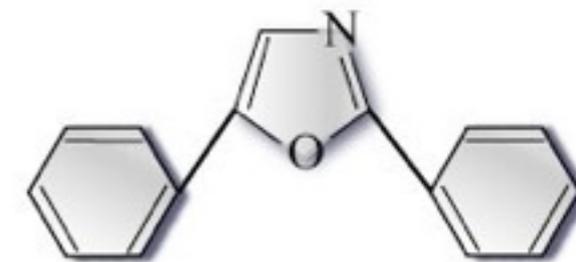
ドデカン (80%) プソイドクメン (20%) PPO (1.36 g/l)



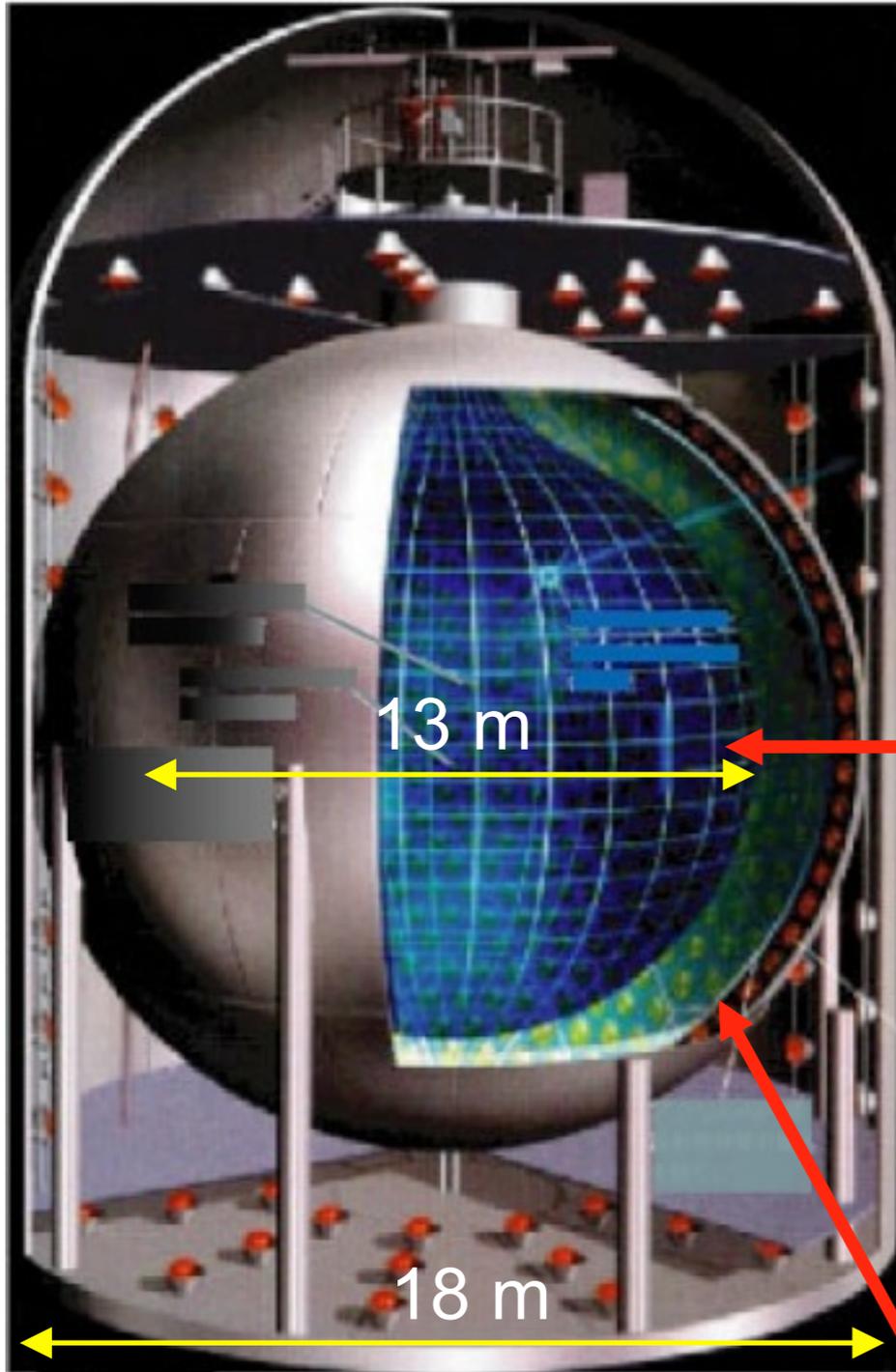
Dodecane (C₁₂H₂₆) : 80%



Pseudocumene : 20%
(1,2,4-Trimethyl Benzene)



PPO : 1.5 g / l
(2,5-Diphenyloxazole)



~ 500 p.e./MeV
大発光量

1,325 17 インチ + 554 20 インチ光電子増倍管

Super-Kamiokande

50 kton 超純水
チェレンコフ光を観測
6 p.e. / MeV
エネルギー閾値
~5 MeV

観測対象

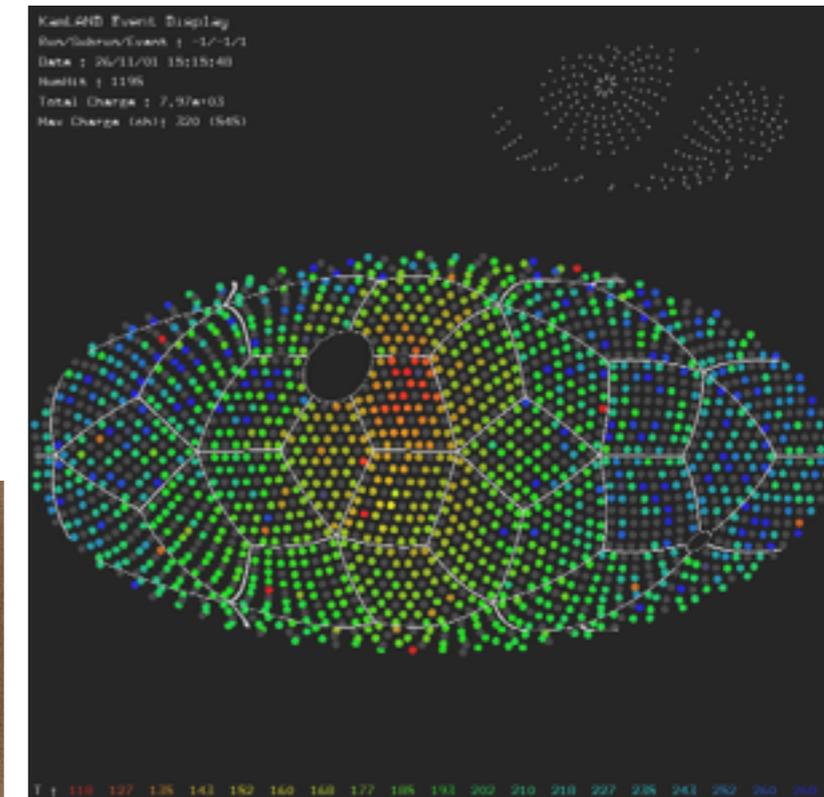
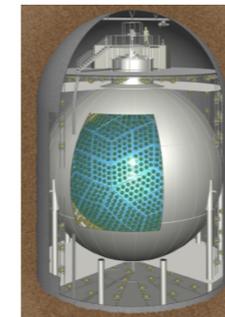
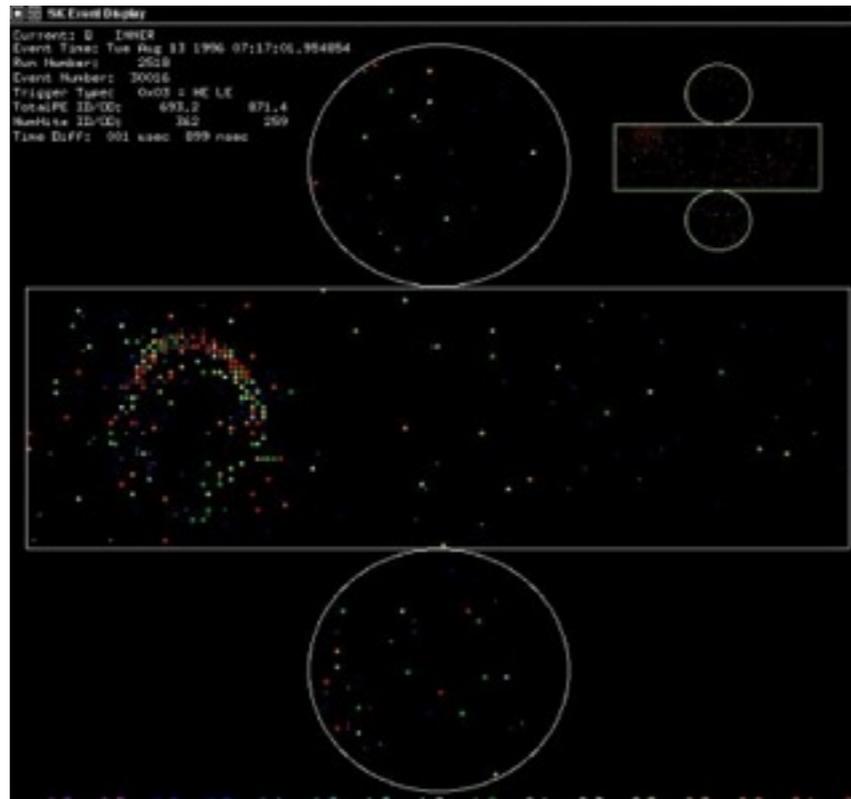
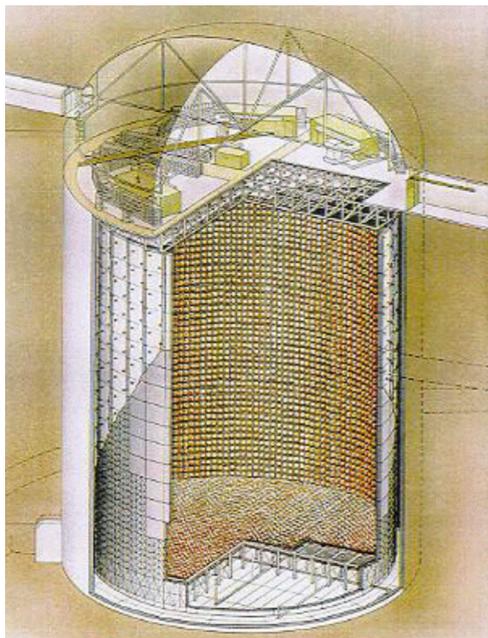
太陽ニュートリノ
大気ニュートリノ
超新星ニュートリノ
陽子崩壊
など

KamLAND

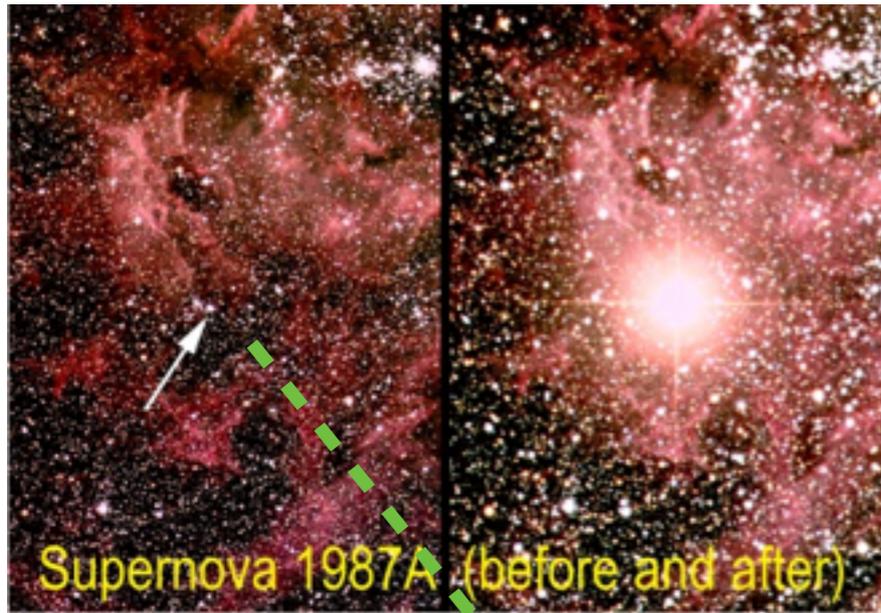
1 kton 超純液体シンチレータ
シンチレーション光を観測
500 p.e. / MeV
エネルギー閾値
~0.3 MeV

観測対象

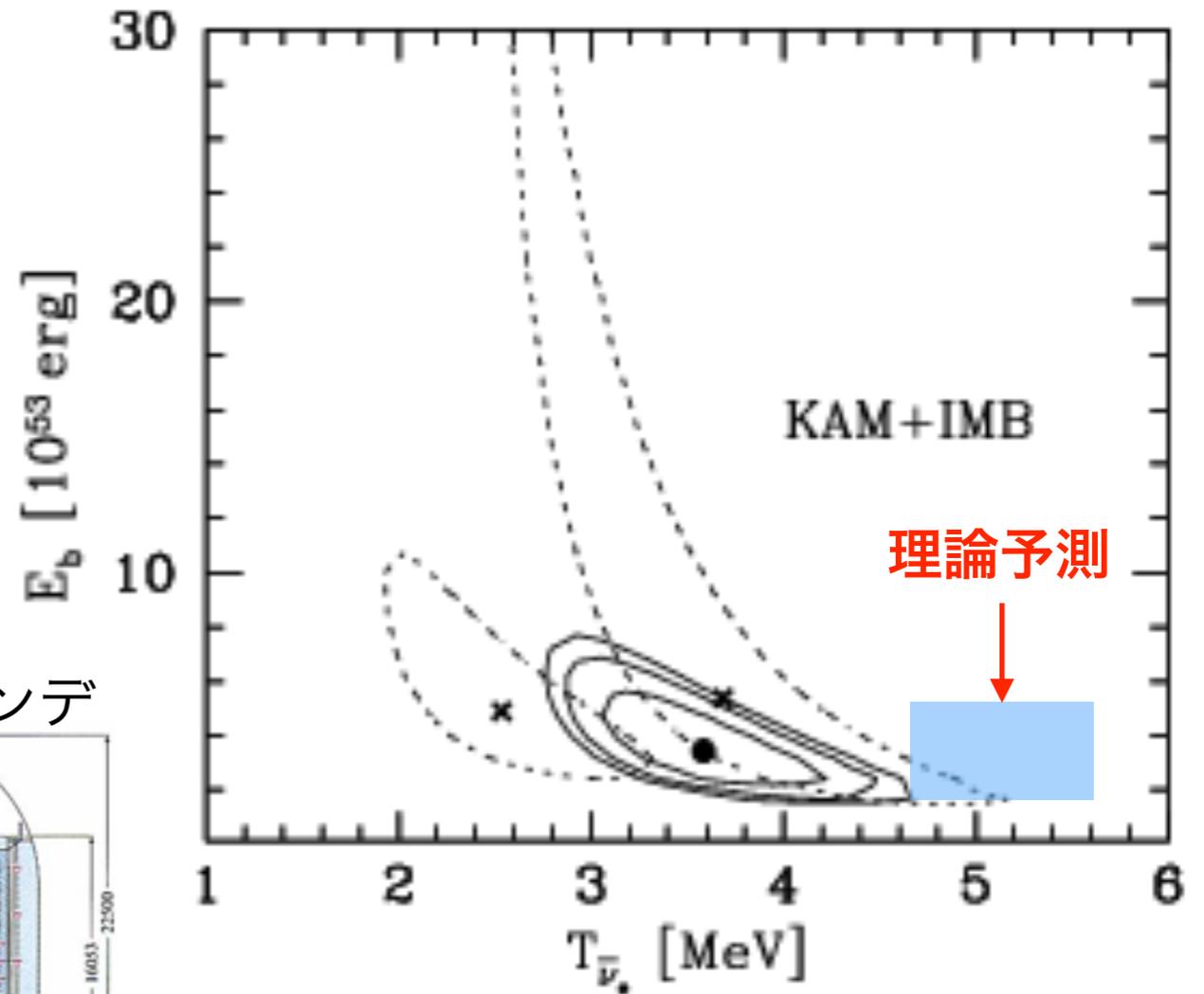
原子炉反ニュートリノ
地球反ニュートリノ
低エネルギー太陽ニュートリノ
核子崩壊
など



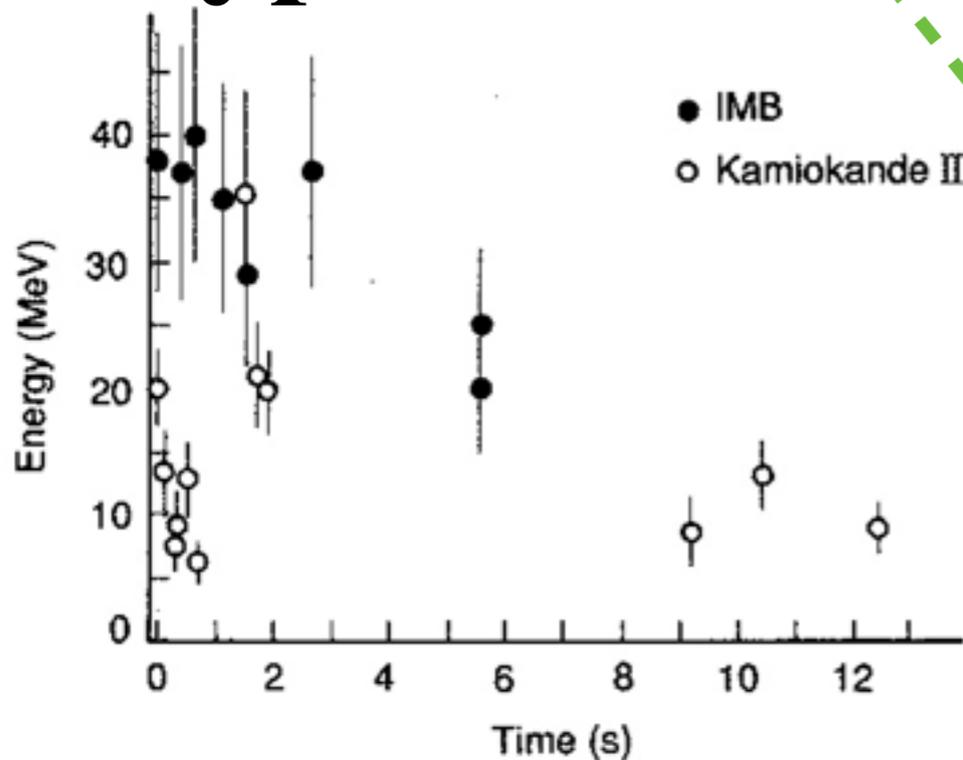
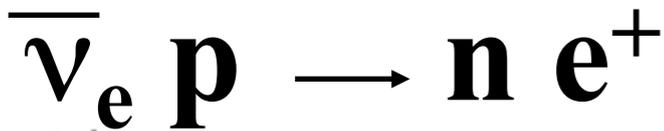
超新星ニュートリノ (1987A)



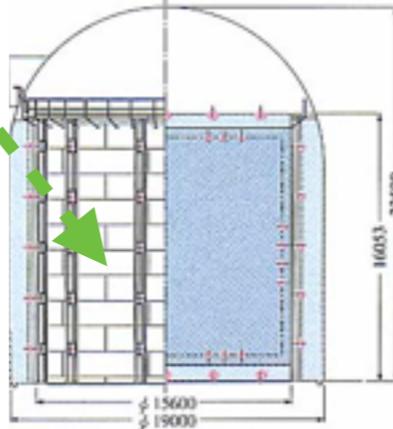
結合エネルギー v.s. ニュートリノ温度



主なニュートリノ反応

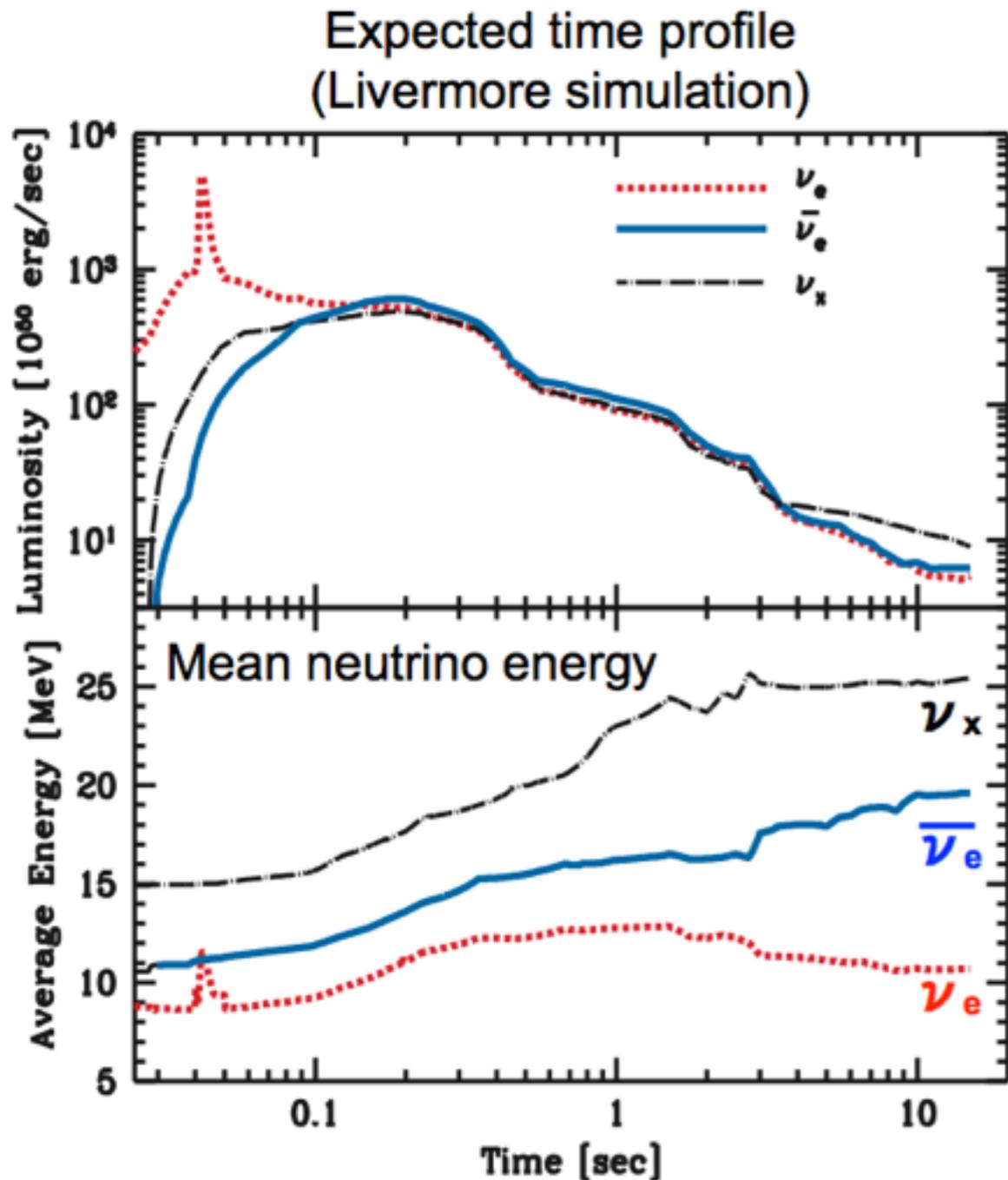


カミオカンデ



わずが10秒程度で爆発のエネルギーの99%をニュートリノが持ち出す理論を観測によって確認

将来の超新星ニュートリノ測定



高統計のニュートリノ測定によって
中性子星 or ブラックホール形成ま
での時間を追って見れる

Normal Hierarchy (NH)

$$\begin{aligned} \frac{dN_{\bar{\nu}_e}}{dE_{\bar{\nu}_e}} &= |U_{e1}|^2 \frac{dN_{\bar{\nu}_1}}{dE_{\bar{\nu}_1}} + |U_{e2}|^2 \frac{dN_{\bar{\nu}_2}}{dE_{\bar{\nu}_2}} + |U_{e3}|^2 \frac{dN_{\bar{\nu}_3}}{dE_{\bar{\nu}_3}} \\ &= |U_{e1}|^2 \frac{dN_{\bar{\nu}_e}^0}{dE_{\bar{\nu}_e}} + (1 - |U_{e1}|^2) \frac{dN_{\nu_x}^0}{dE_{\nu_x}}, \end{aligned}$$

Inverted Hierarchy (NH)

$$\frac{dN_{\bar{\nu}_e}}{dE_{\bar{\nu}_e}} = |U_{e3}|^2 \frac{dN_{\bar{\nu}_e}^0}{dE_{\bar{\nu}_e}} + (1 - |U_{e3}|^2) \frac{dN_{\nu_x}^0}{dE_{\nu_x}} \simeq \frac{dN_{\nu_x}^0}{dE_{\nu_x}}$$

ニュートリノ振動・質量階層

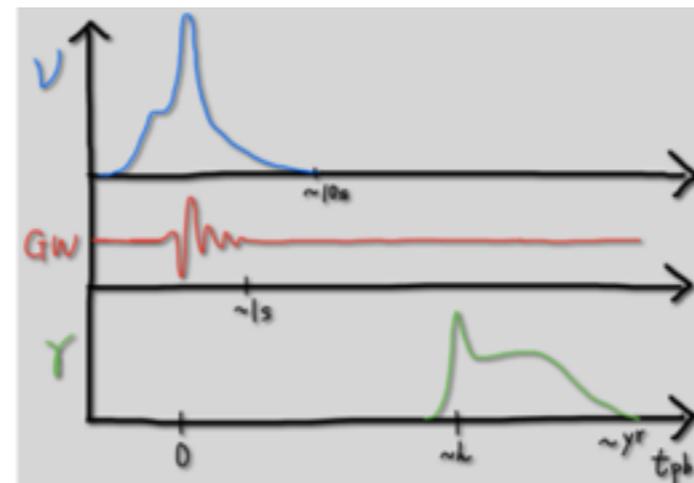


Fig. by Y. Suwa

重力波・電磁波観測との統合解析

液体シンチレータによる測定



KamLANDでの期待イベント数 @ 10 kpc SN

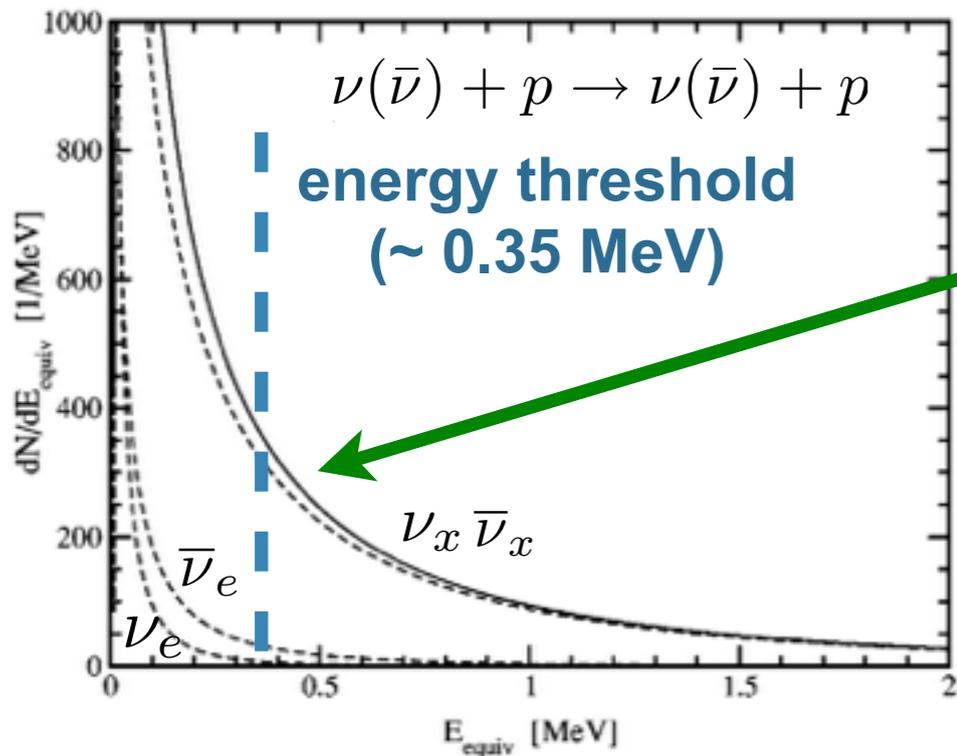
neutrino detection	#event
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	~ 300
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	~ 30
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	~ 10
$\nu(\bar{\nu}) + e^- \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + e^-$	~ 20
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C}^*$	~ 60
$\nu(\bar{\nu}) + p \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + p$	~ 150

CC {

ES

NC {

proton-recoil (NC)



ν_e
 $\bar{\nu}_e$
 $\nu_x \bar{\nu}_x$

${}^{12}\text{C}$ (CC)
 proton, ${}^{12}\text{C}$ (CC)
 proton-recoil (NC)

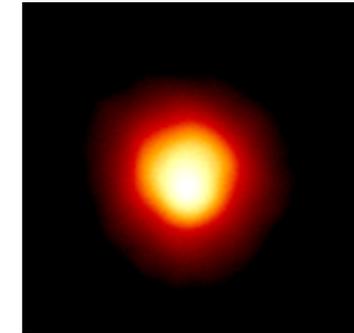
フレーバーごとの
 スペクトルを観測

フレーバーごとにニュートリノ
 温度・時間発展を測定できる

前兆ニュートリノ

超近傍超新星の候補 ベテルギウス 200 ± 50 pc

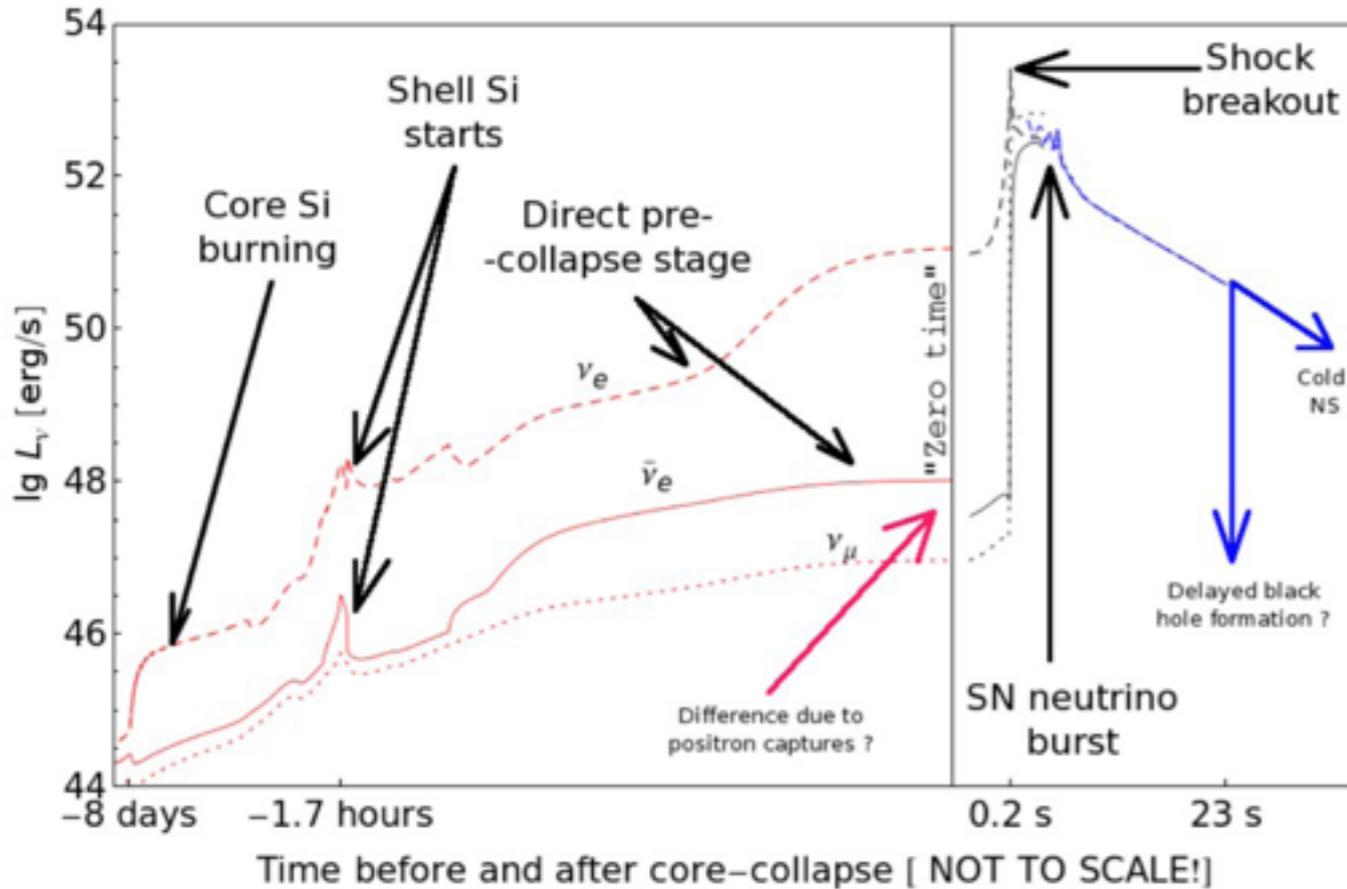
Atmosphere of Betelgeus
Hubble Space Telescope



KamLANDで前兆ニュートリノが検出可能

前兆ニュートリノ (シリコン燃焼)

バースト



他のニュートリノ・重力波実験と同時観測



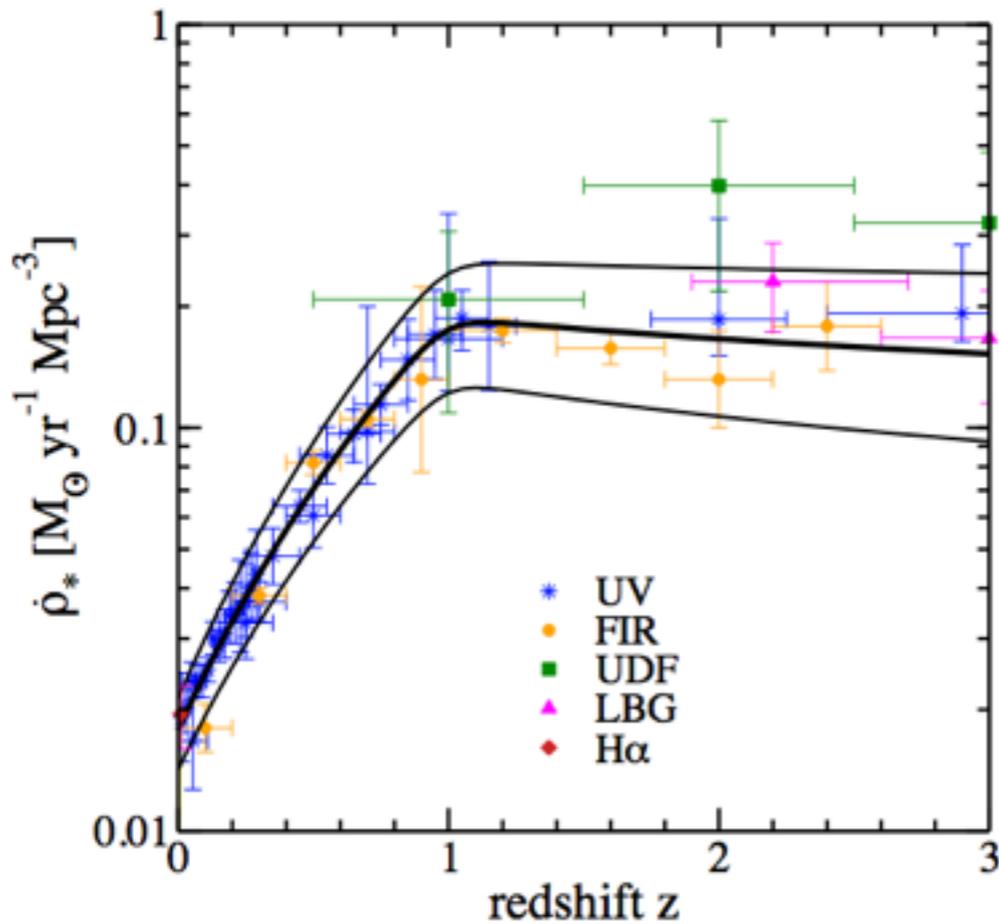
原子炉・地球ニュートリノよりも多い

爆発の数日～数時間前に速報アラームを世界に発信 “爆発の予報” → 同時観測準備

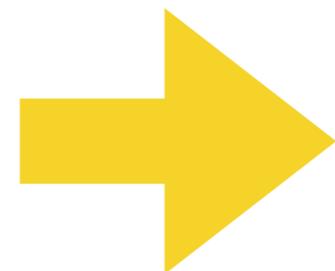
ニュートリノ・重力波・電磁波の同時観測が実現する

超新星背景ニュートリノ (SRN)

天体観測から見積もられる
星形成率 → SNレート

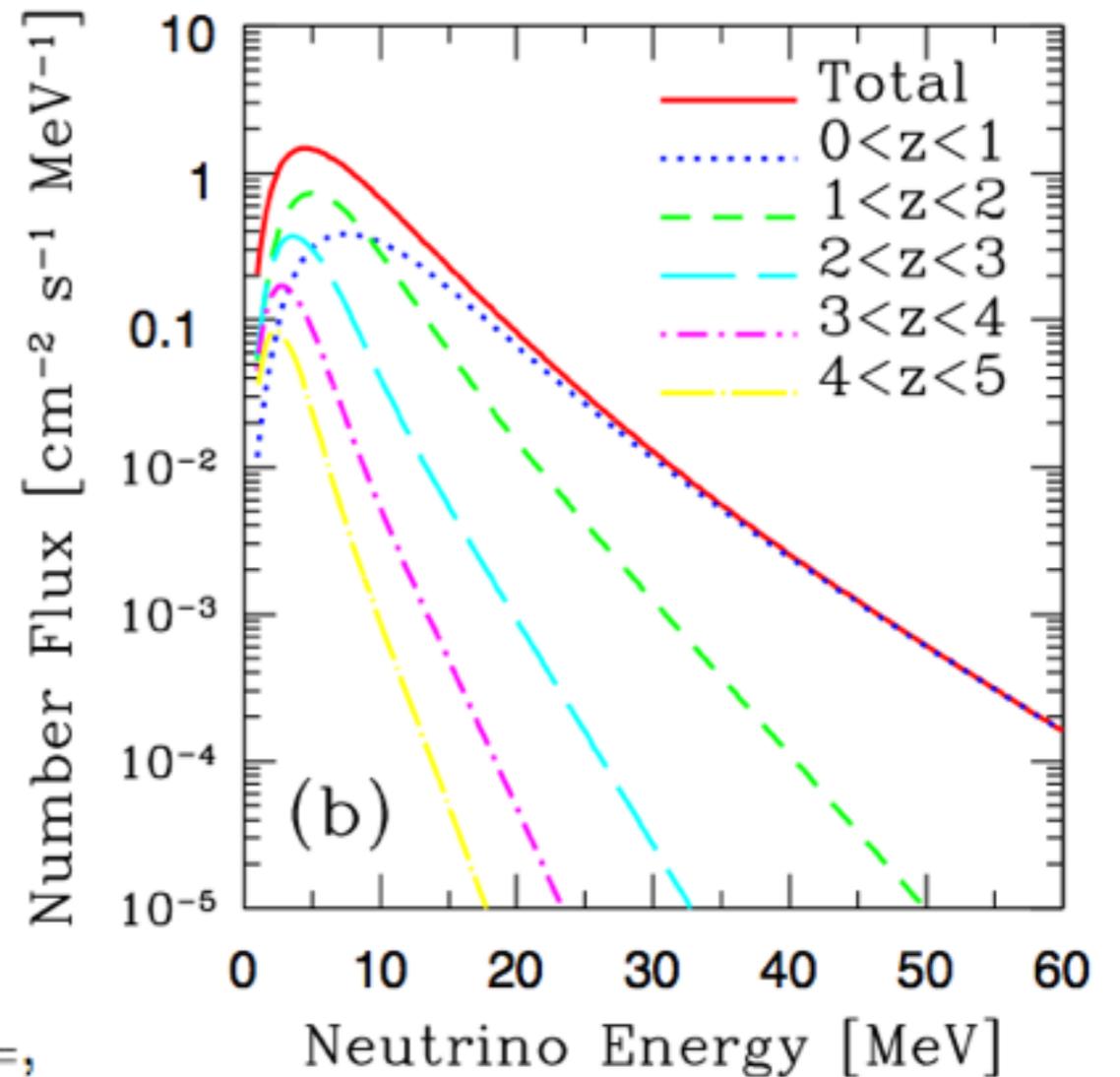


超新星爆発
モデル



過去の全ての
SNで生じた
ニュートリノ
の総和

SRNエネルギースペクトル
(赤方偏移の効果)



S. Ando and K. Sato, New J. Phys. 6, 170 (2004)

$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = \frac{c}{H_0} \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} \frac{dz}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}},$$

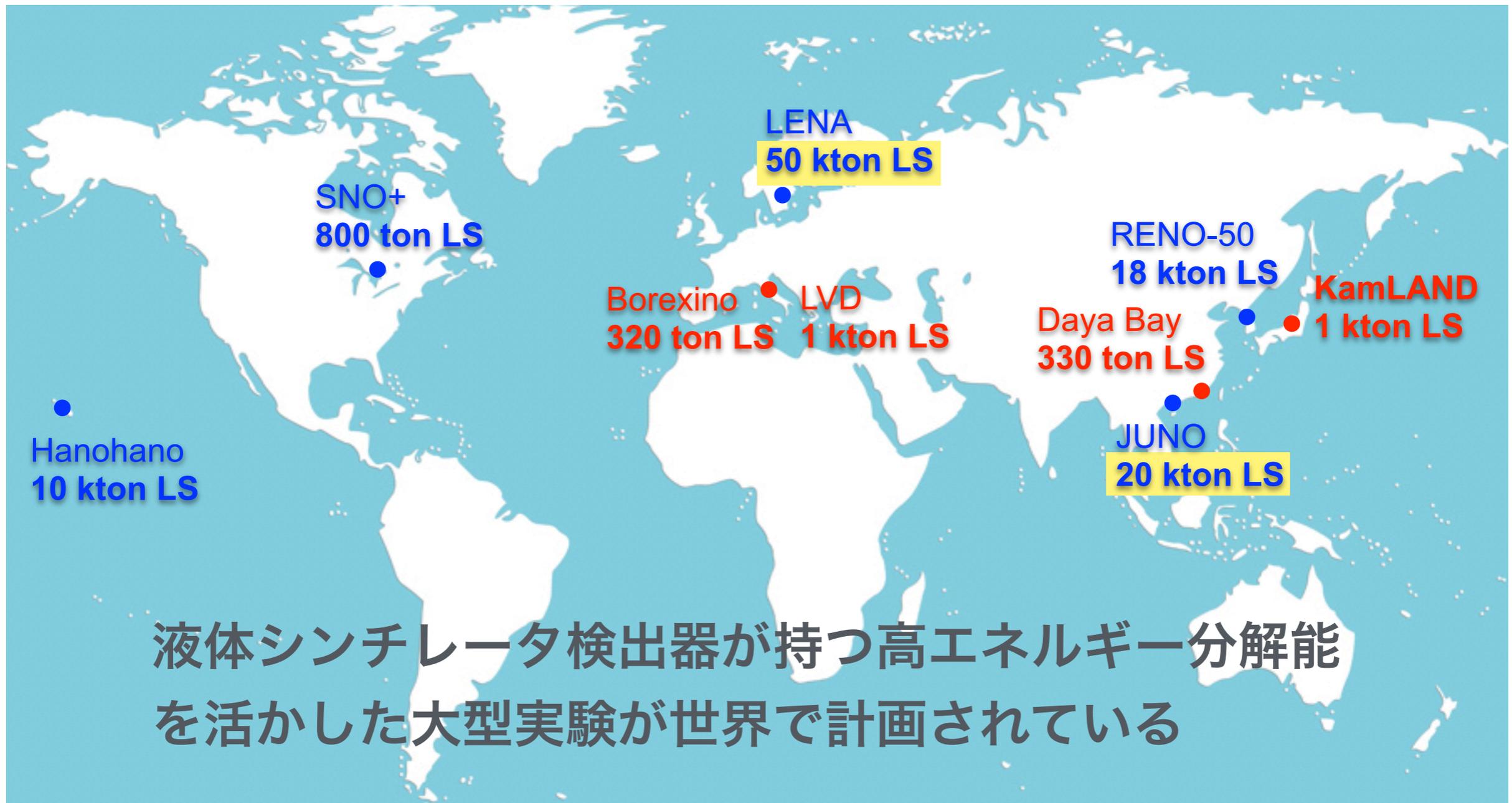
めったに機会が無いSNバーストと違い
検出器に感度があれば確実に測定可能

平均的な超新星ニュートリノ量・
エネルギースペクトルを検証できる

暗い超新星・ブラックホール形成などの影響？

世界の液体シンチレータ検出器

- 稼働中 KamLAND, Borexino, LVD, Daya Bay
- 将来計画 LENA, JUNO, SNO+, Hanohano, RENO-50



液体シンチレータ検出器が持つ高エネルギー分解能を活かした大型実験が世界で計画されている

LENA実験

Cavern
height: 115 m, diameter: 50 m
shielding from cosmic rays: ~4,000 m.w.e.

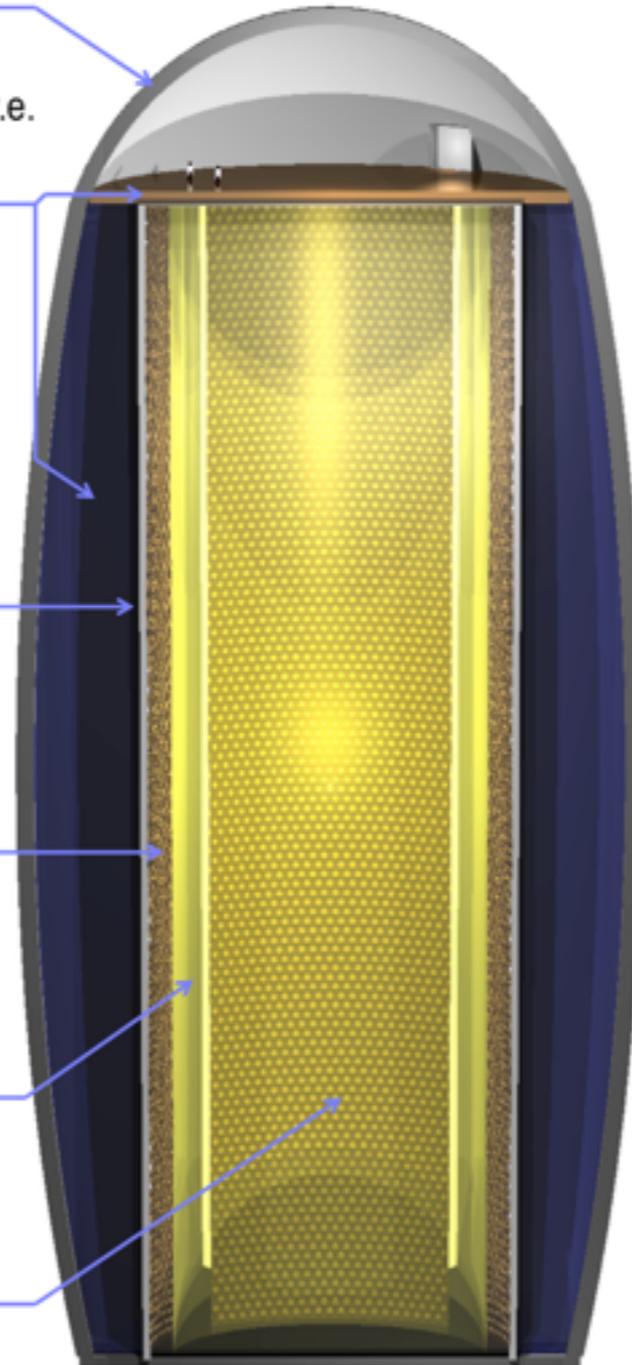
Muon Veto
plastic scintillator panels (on top)
Water Cherenkov Detector
3,000 phototubes
100 kt of water
reduction of fast
neutron background

Steel Cylinder
height: 100 m, diameter: 30 m
70 kt of organic liquid
30,000 – 50,000 phototubes

Buffer
thickness: 2 m
non-scintillating organic liquid
shielding from external radioactivity

Nylon Vessel
separating buffer liquid
and liquid scintillator

Target Volume
height: 100 m, diameter: 26 m
50 kt of liquid scintillator



LENA (Low Energy Neutrino Astrophysics)

- 50 kton液体シンチレータ

LAB (リニアアルキルベンゼン) + 発光剤

- ニュートリノ天体物理

超新星ニュートリノ

超新星背景ニュートリノ (SRN)

太陽ニュートリノ

地球ニュートリノ

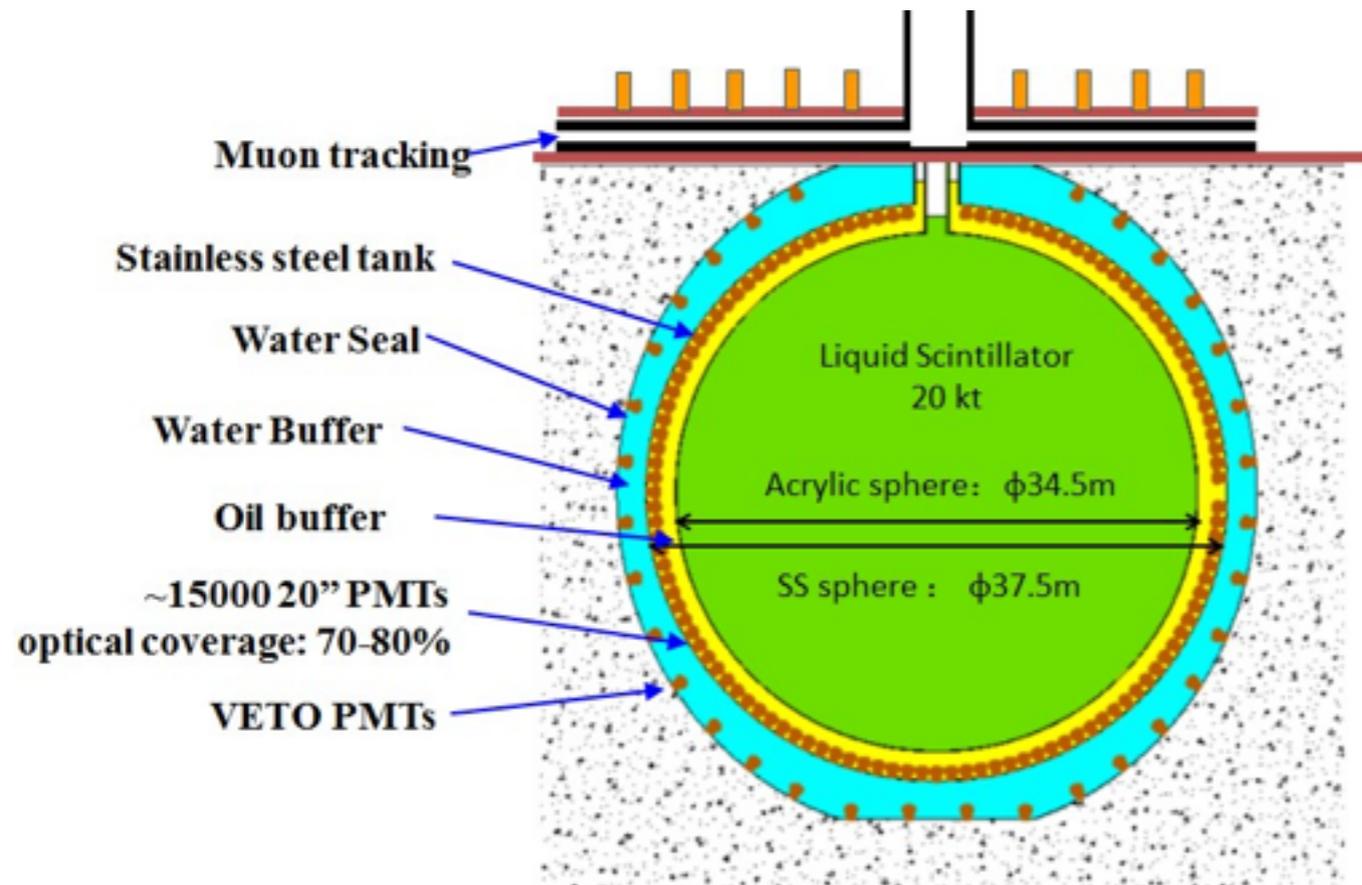
- 素粒子物理

ニュートリノ振動

陽子崩壊

JUNO実験

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory)



- 20 kton液体シンチレータ

LAB (リニアアルキルベンゼン) + 発光剤

- ニュートリノ天体物理

超新星ニュートリノ

超新星背景ニュートリノ (SRN)

太陽ニュートリノ

地球ニュートリノ

- 素粒子物理

ニュートリノ質量階層

振動パラメータ精密測定

陽子崩壊

	KamLAND	JUNO
LS mass	~1 kt	20 kt
Energy Resolution	6%/√E	3%/√E
Light yield	250 p.e./MeV	1200 p.e./MeV

エネルギー分解能の改善が必要

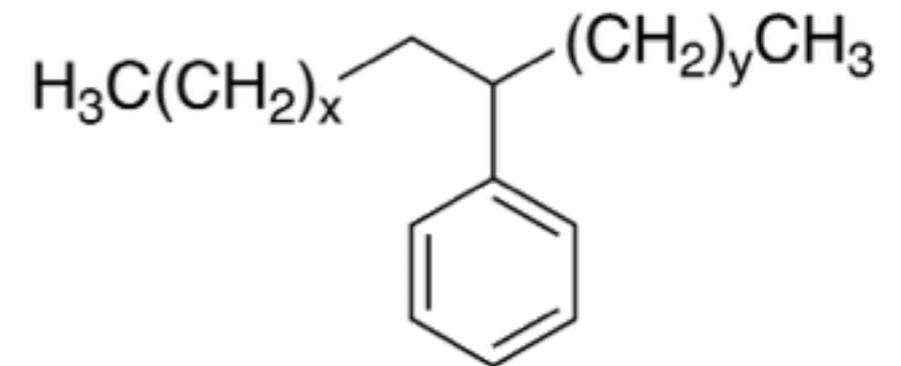
液体シンチレータの候補

LS materials data

	PC	PXE	LAB	KamLAND
Chemical Formula	C ₉ H ₁₂	C ₁₆ H ₁₈	C ₁₈ H ₃₀	PC + C ₁₂
Flash Point [°C]	48	167	140	64
Density [g/cm ³]	0.88	0.99	0.86	0.78
Relative Light Intensity [%]	1	1	1	- 0.7
Attenuation Length [m] (Purity Dependent)	8	12	- 20	- 20
Cost [\$/L]	- 4	~ 4	- 2	- 4

Cosmic Background Discrimination for the Rare Neutrino Event Search in BOREXINO and LENA,
Dissertation von, Michael Wurm

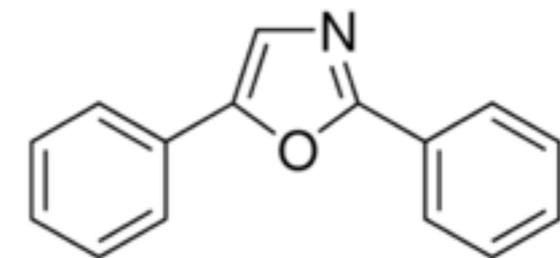
LAB (リニアアルキルベンゼン)



$$n = x + y = 10-13$$

+

PPO (発光溶質)

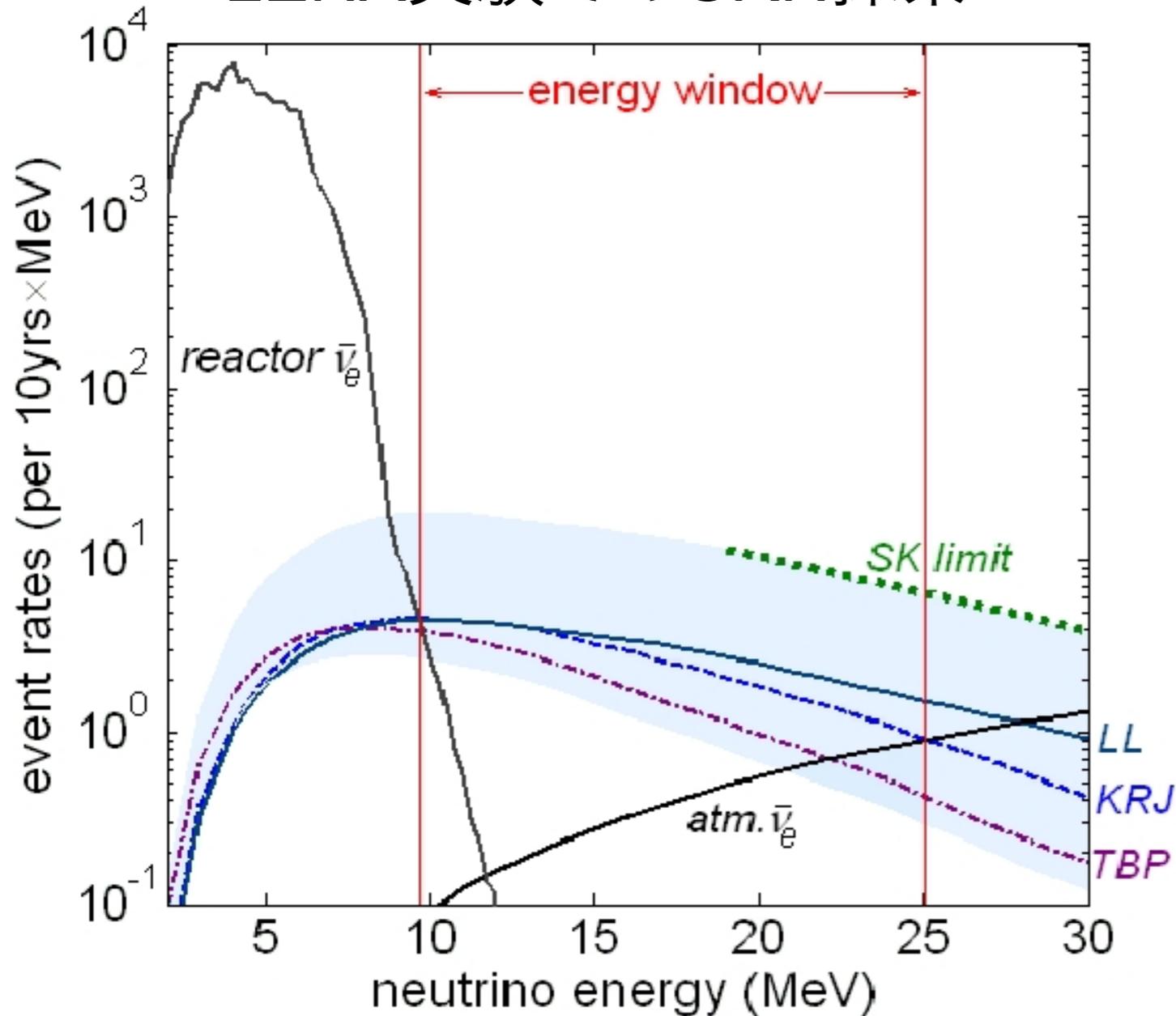


要求される性能

- 高発光量 → 高エネルギー分解能
- 高透過率 → 大容量・高エネルギー分解能
- 低コスト → 大容量
- 高引火点 (> 50°C) → 安全性
- 検出器の化学耐性 → 汎用性

SRN検出の見込み

LENA実験でのSRN探索



M. Wurm et al. arXiv:0701305

- 原子炉 $\bar{\nu}_e$ $E_\nu < 9.5 \text{ MeV}$
- 大気 $\bar{\nu}_e$ $E_\nu > 25 \text{ MeV}$
- SR $\bar{\nu}_e$ $9.5 < E_\nu < 25 \text{ MeV}$

KamLAND (1 kton)

1-2 event / 10 yr

LENA (50 kton)

50-100 event / 10 yr

LENA実験では10年の観測
で有意な信号数が得られる

他にバックグラウンドが無ければ...

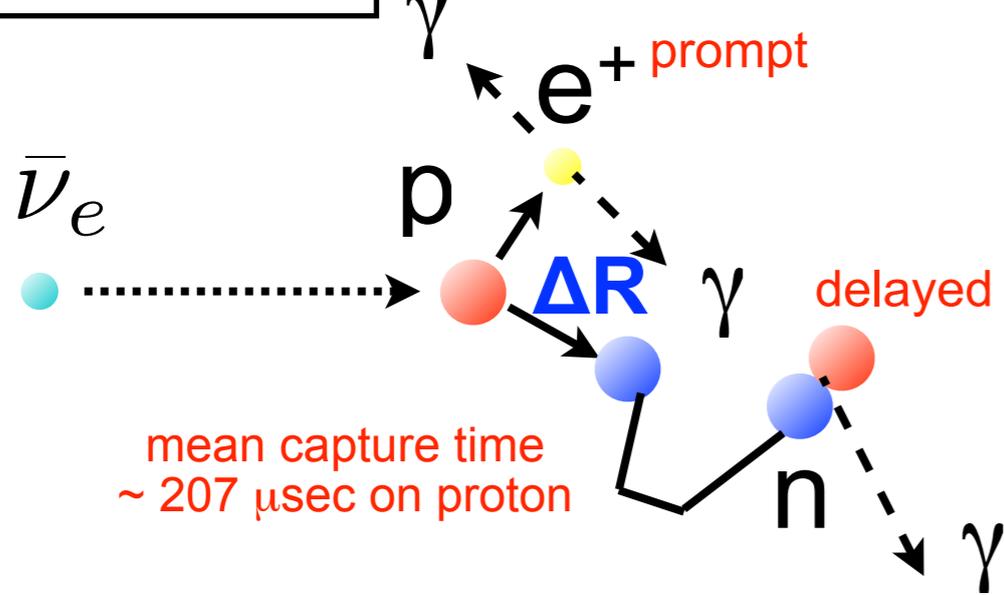


KamLANDで検証

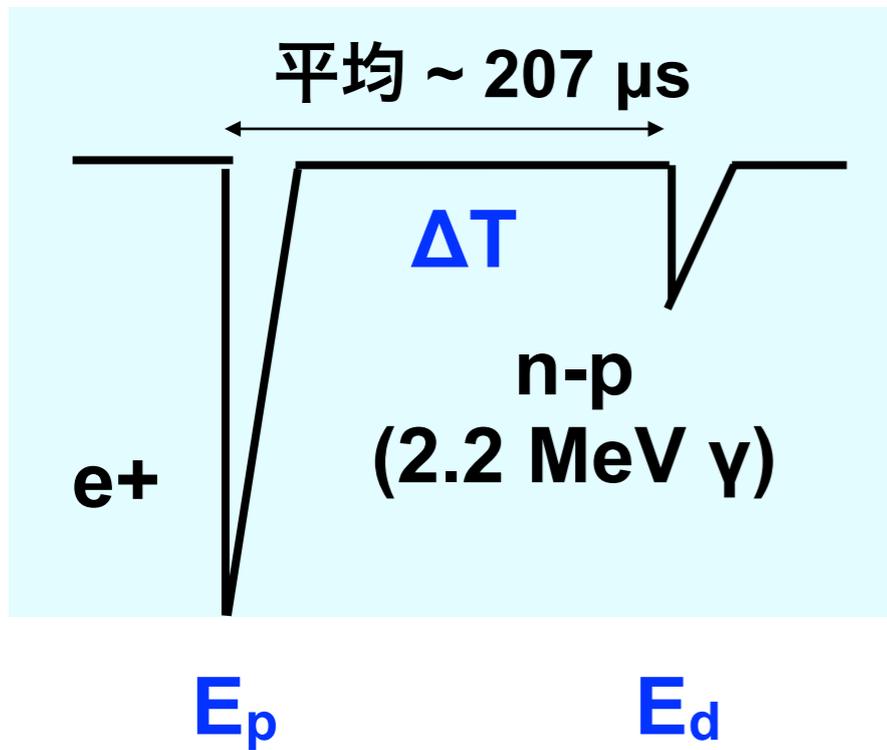
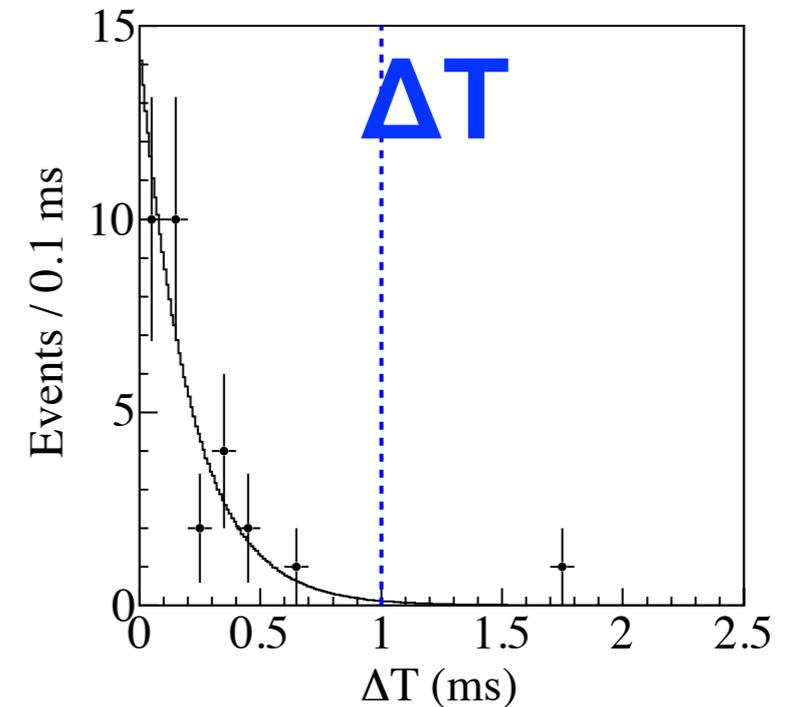
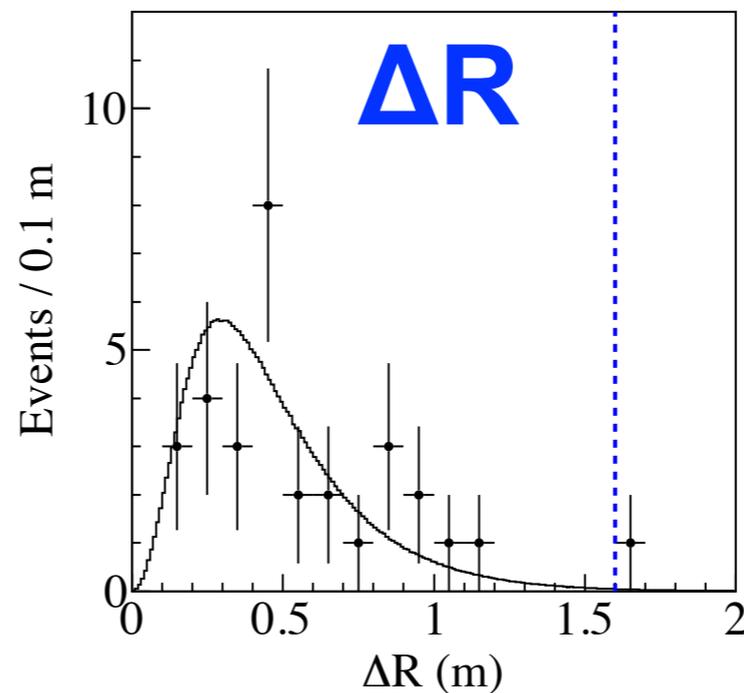
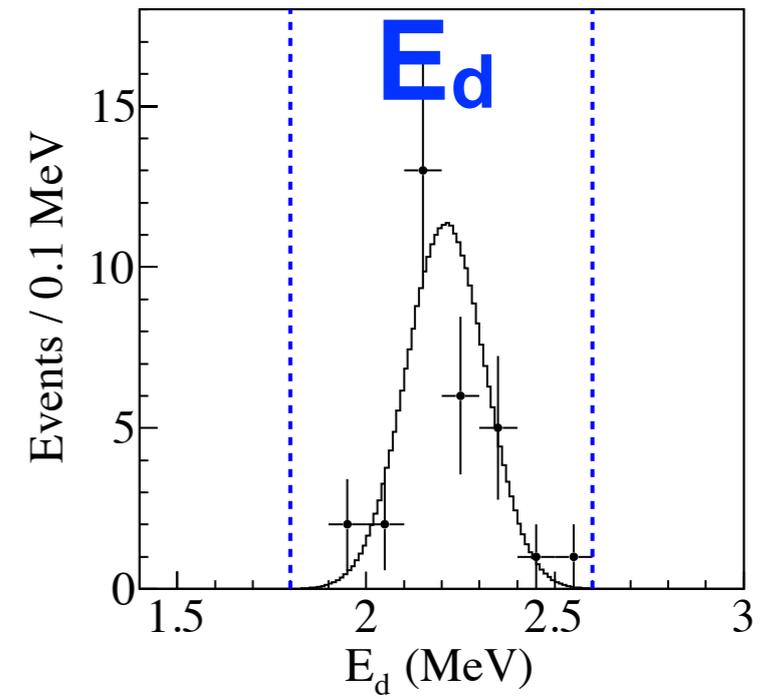
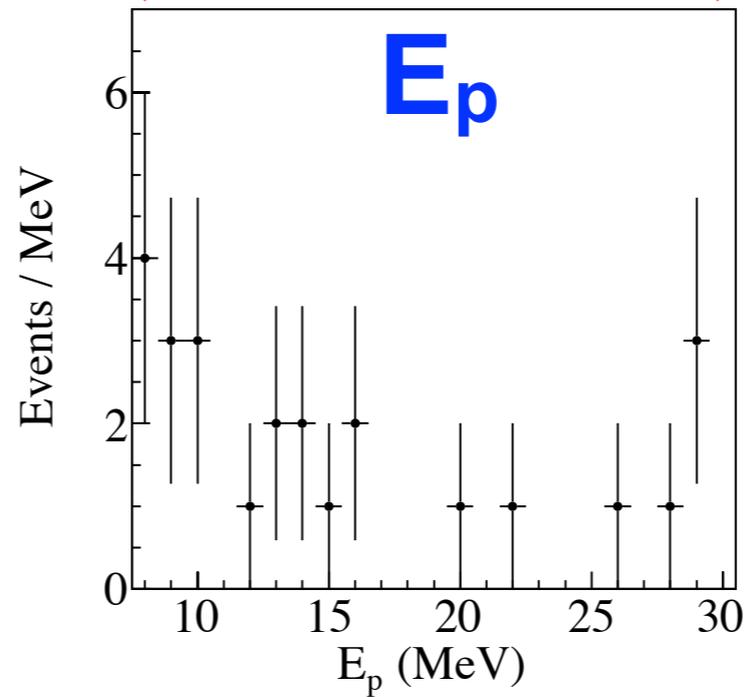
KamLANDでの観測結果 (2011)

逆ベータ崩壊

遅延同時計測



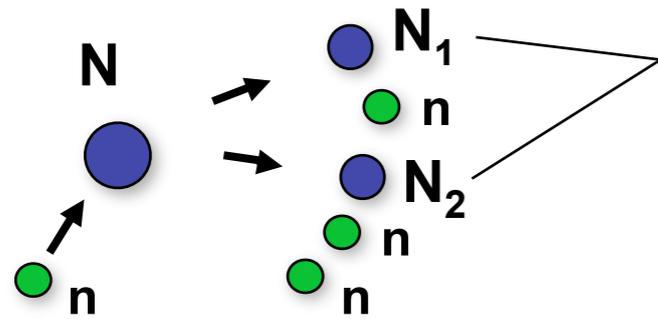
$8.3 < E_\nu < 31.8 \text{ MeV}$



遅延同時計測による
反ニュートリノ選定

25 events / 6.4 yr

バックグラウンド 1 : 原子炉ニュートリノ

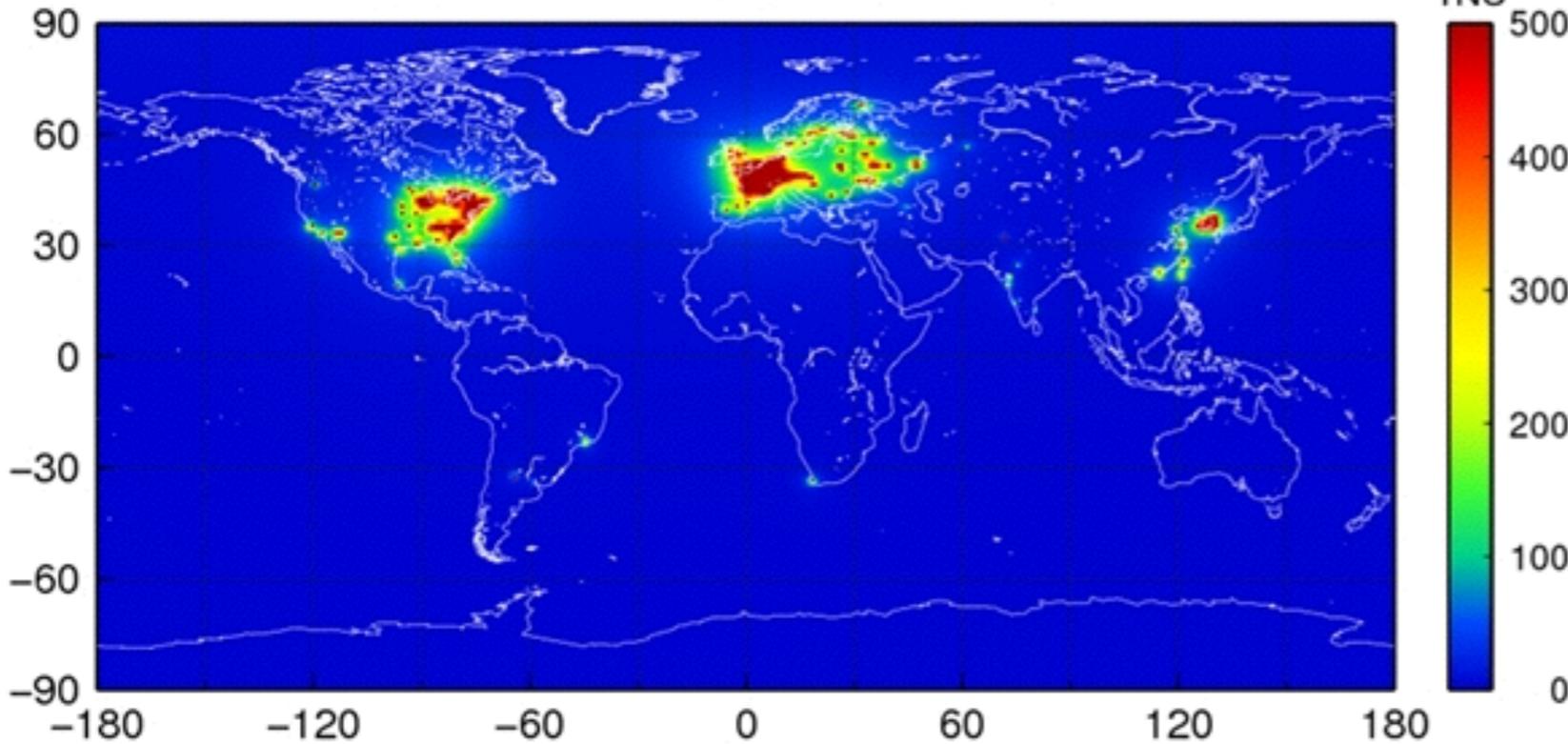


核分裂片 (中性子余剰核)



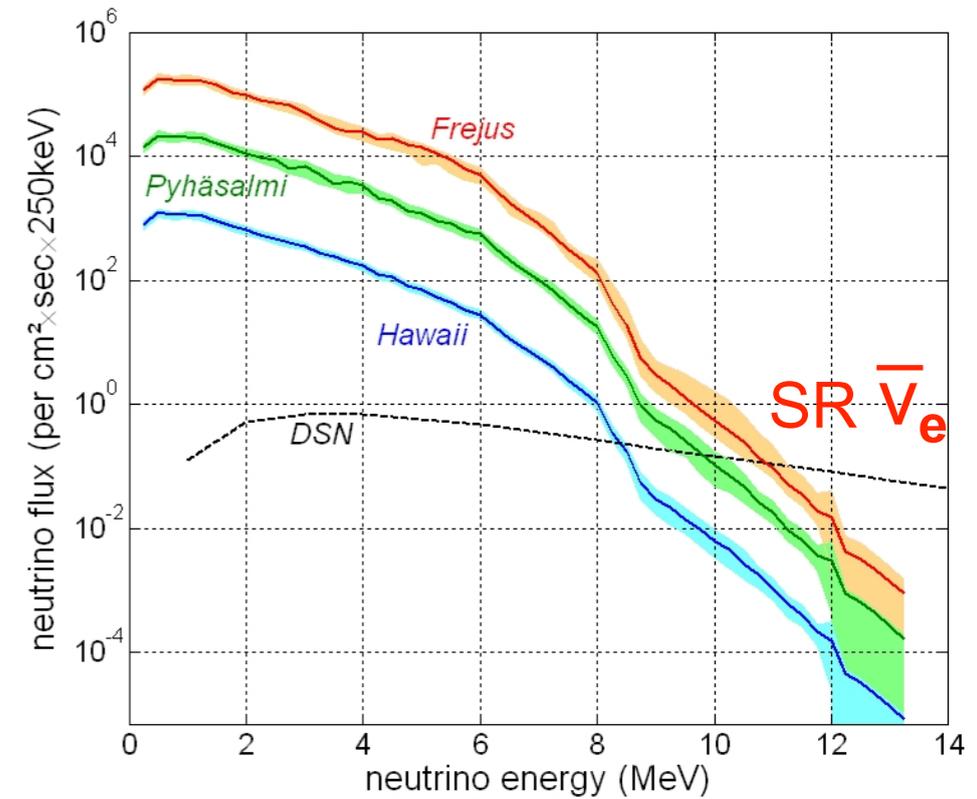
$\sim 6 \bar{\nu}_e / \text{fission}$

[1 TNU=1 event/ 10^{32} target protons /year]



Barbara Ricci, Neutrino Telescope 2011

実験場所による違い



M. Wurm et al. arXiv:0701305

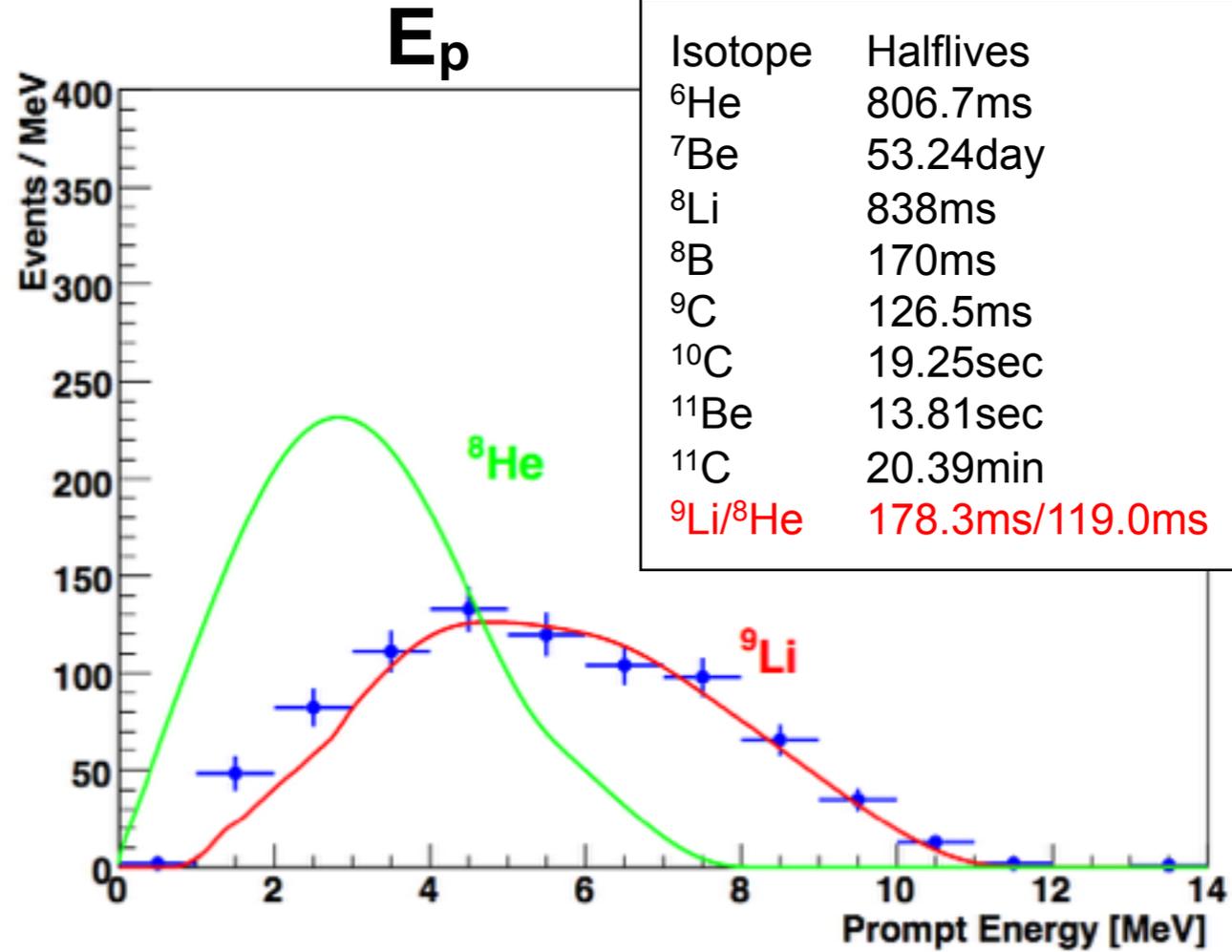
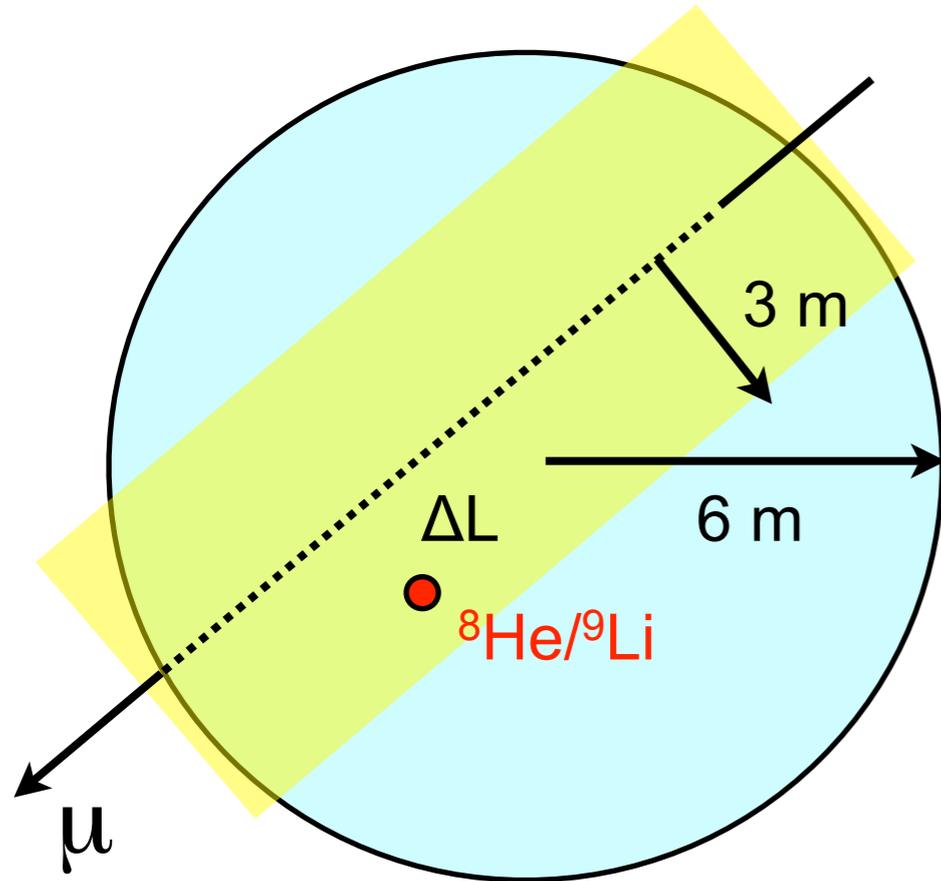
熱出力のデータから正確にフラックスを計算



~10 MeV以上での原子炉ニュートリノの寄与は十分に小さい

バックグラウンド 2 : 原子核破砕イベント

宇宙線ミュオンによる核破砕

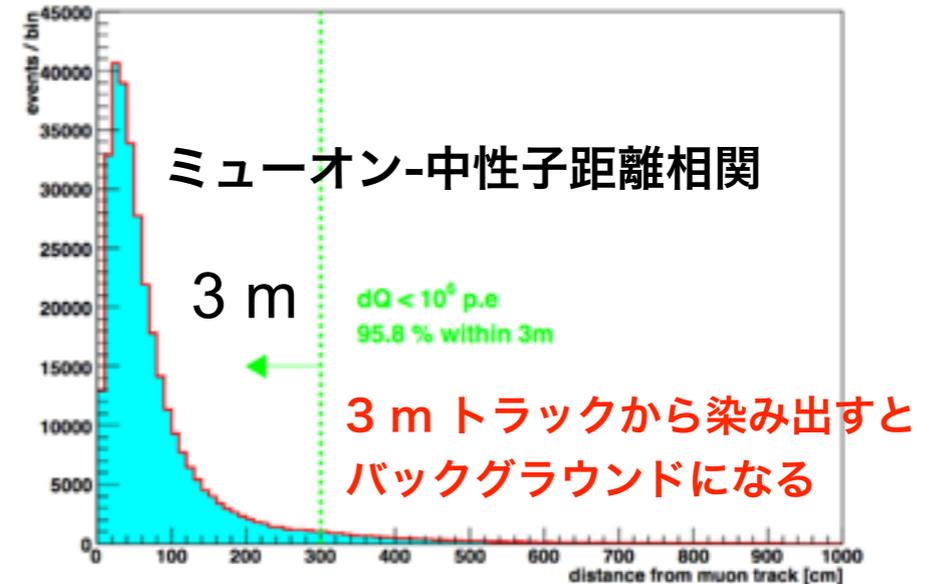
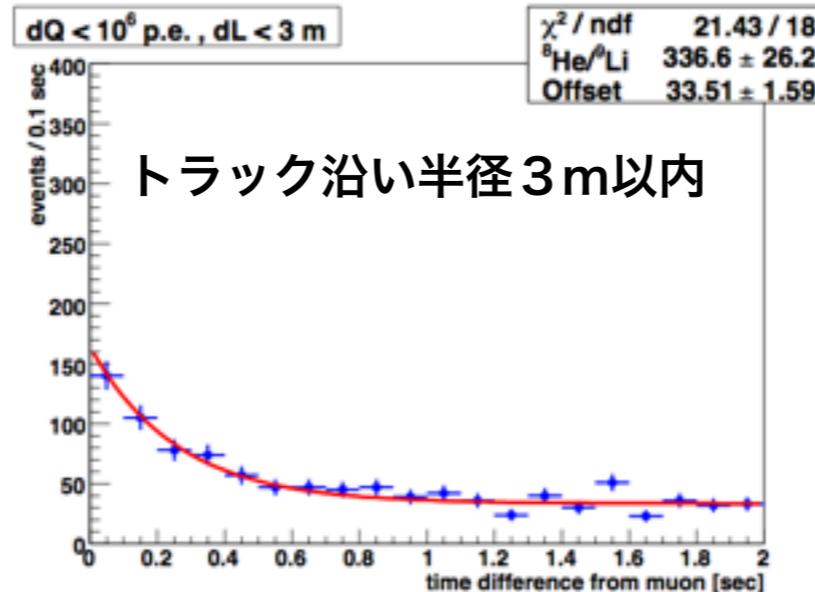
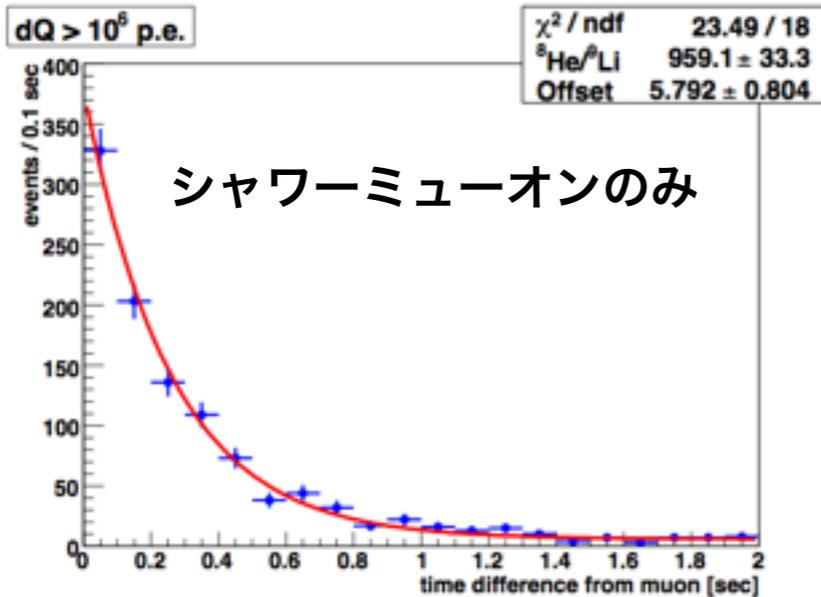


Isotope	Halfives	Decay Mode
${}^6\text{He}$	806.7ms	β^-
${}^7\text{Be}$	53.24day	EC
${}^8\text{Li}$	838ms	β^-
${}^8\text{B}$	170ms	β^-
${}^9\text{C}$	126.5ms	β^+
${}^{10}\text{C}$	19.25sec	β^+
${}^{11}\text{Be}$	13.81sec	β^-
${}^{11}\text{C}$	20.39min	β^+
${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	178.3ms/119.0ms	$\beta^- + n$

ΔT

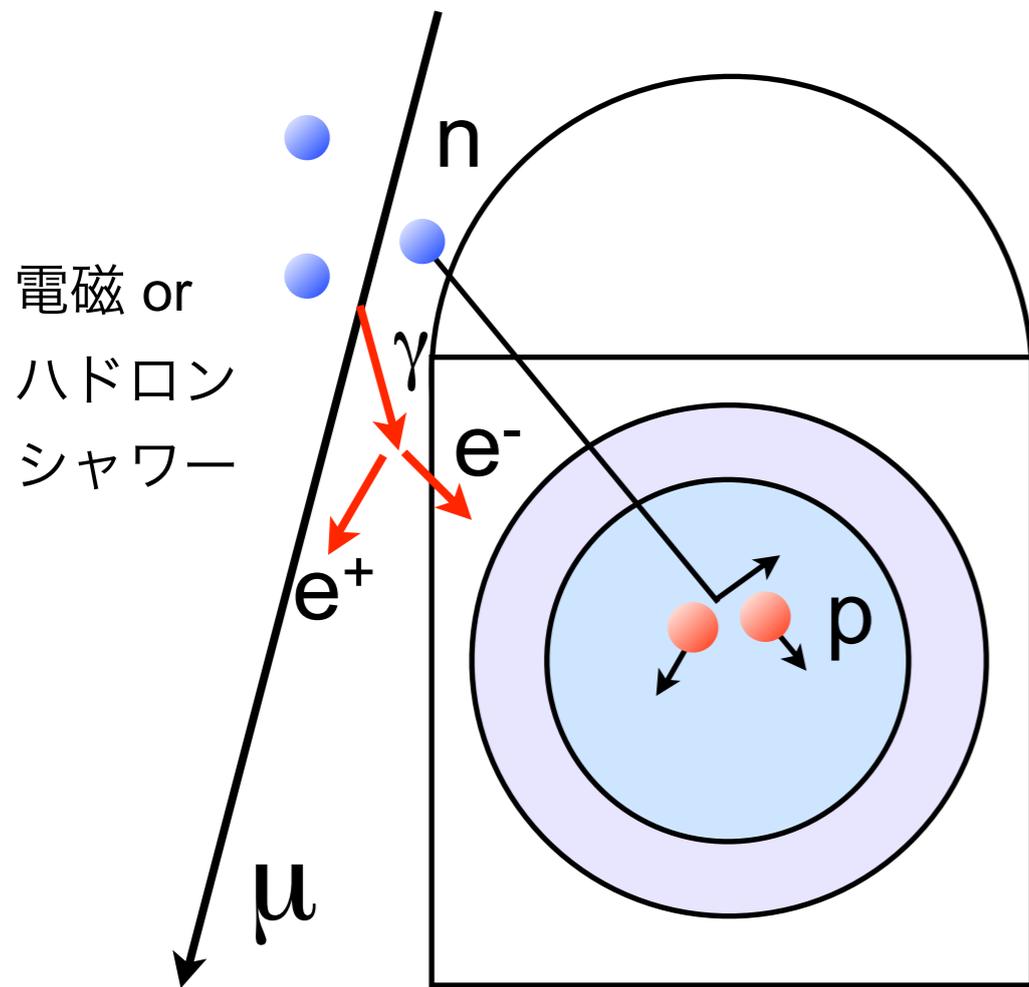
ΔT

ΔL



バックグラウンド 3 : 高速中性子

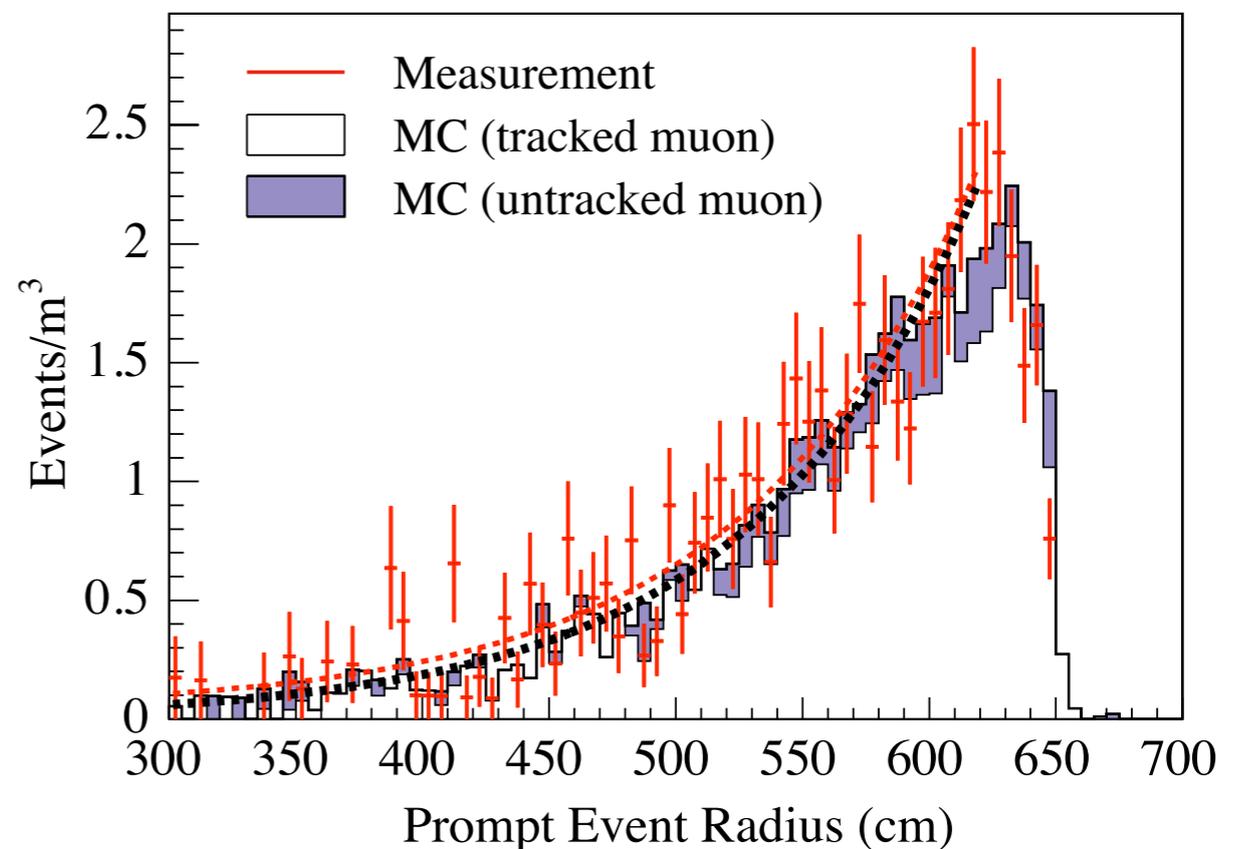
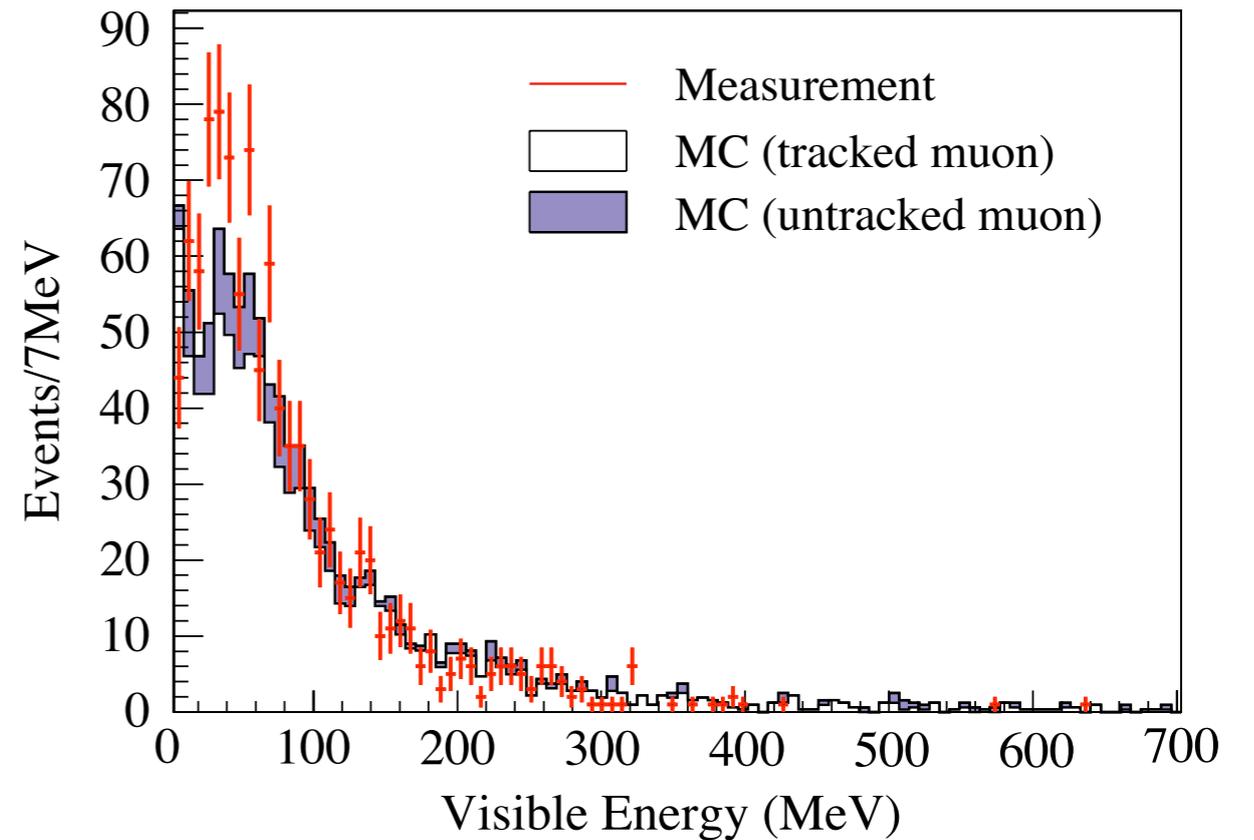
外部検出器でタグされるミュオン



中性子の減衰長

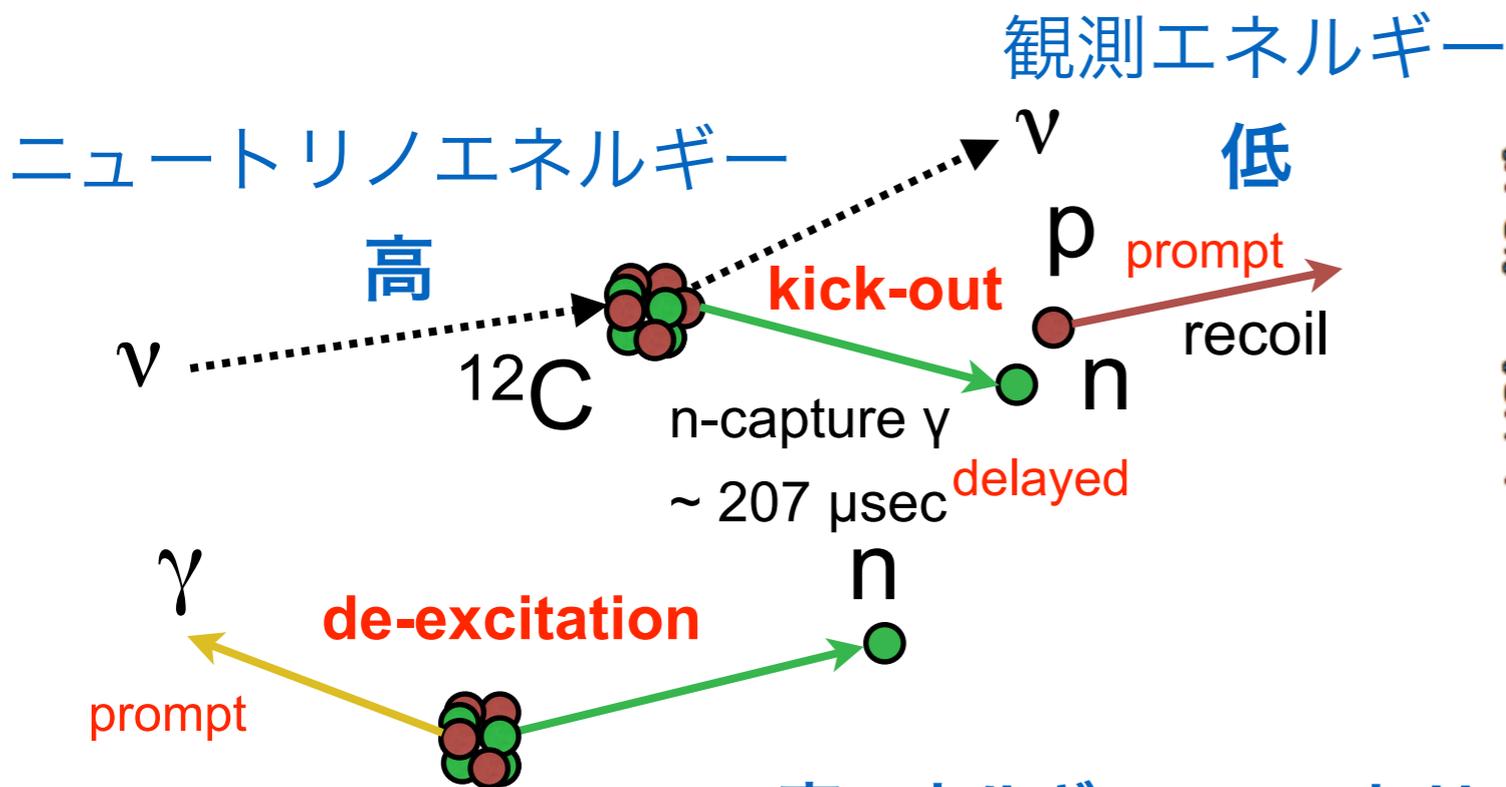
データ	$70 \pm 2 \text{ g/cm}^2$
MC (Geant4)	$69 \pm 2 \text{ g/cm}^2$

誤差の範囲内で一致

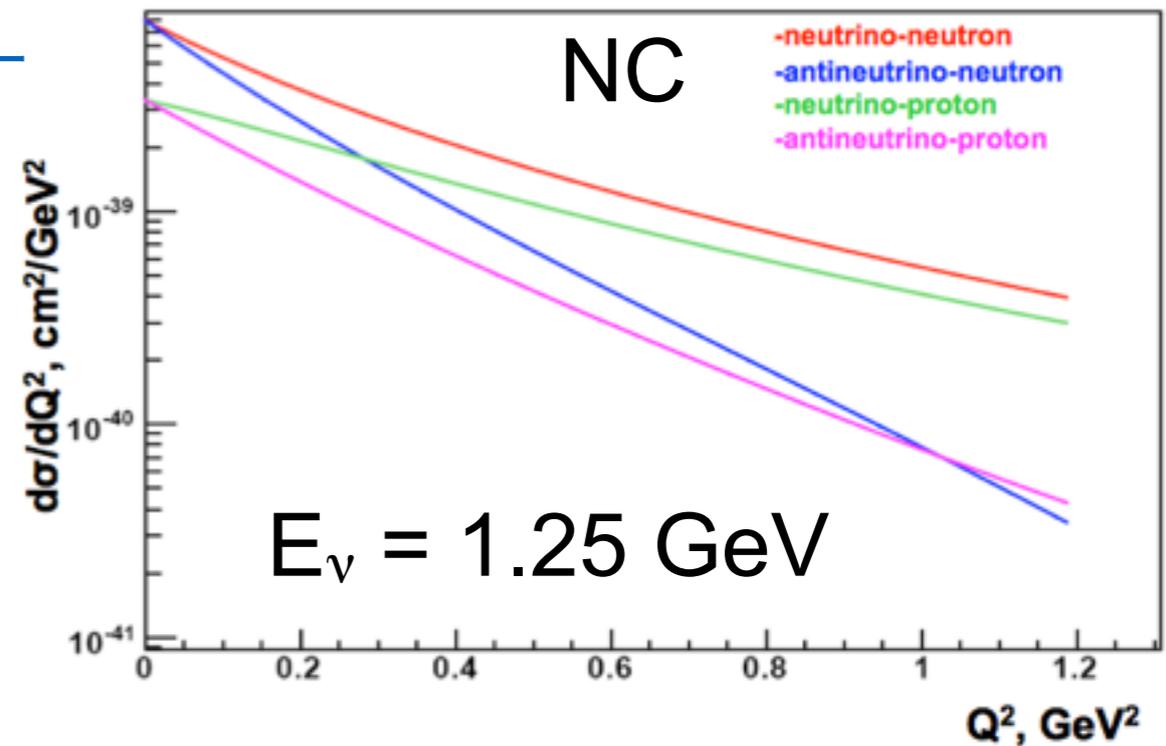


バックグラウンド 4 : 大気ニュートリノ

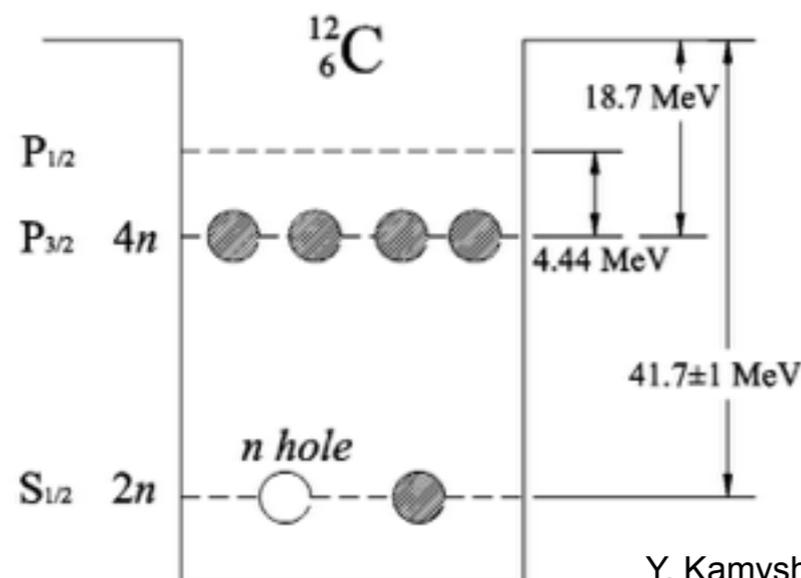
^{12}C との中性カレント反応の特徴



微分断面積



高エネルギーニュートリノ ~ GeVでも低エネルギーに寄与する



Y. Kamyskov et al. Phys. Rev. D67, 076007

さらに...
結合エネルギー・
終状態 (崩壊) の
寄与を考慮する

BG期待数 ($7.5 < E < 30.0 \text{ MeV}$)

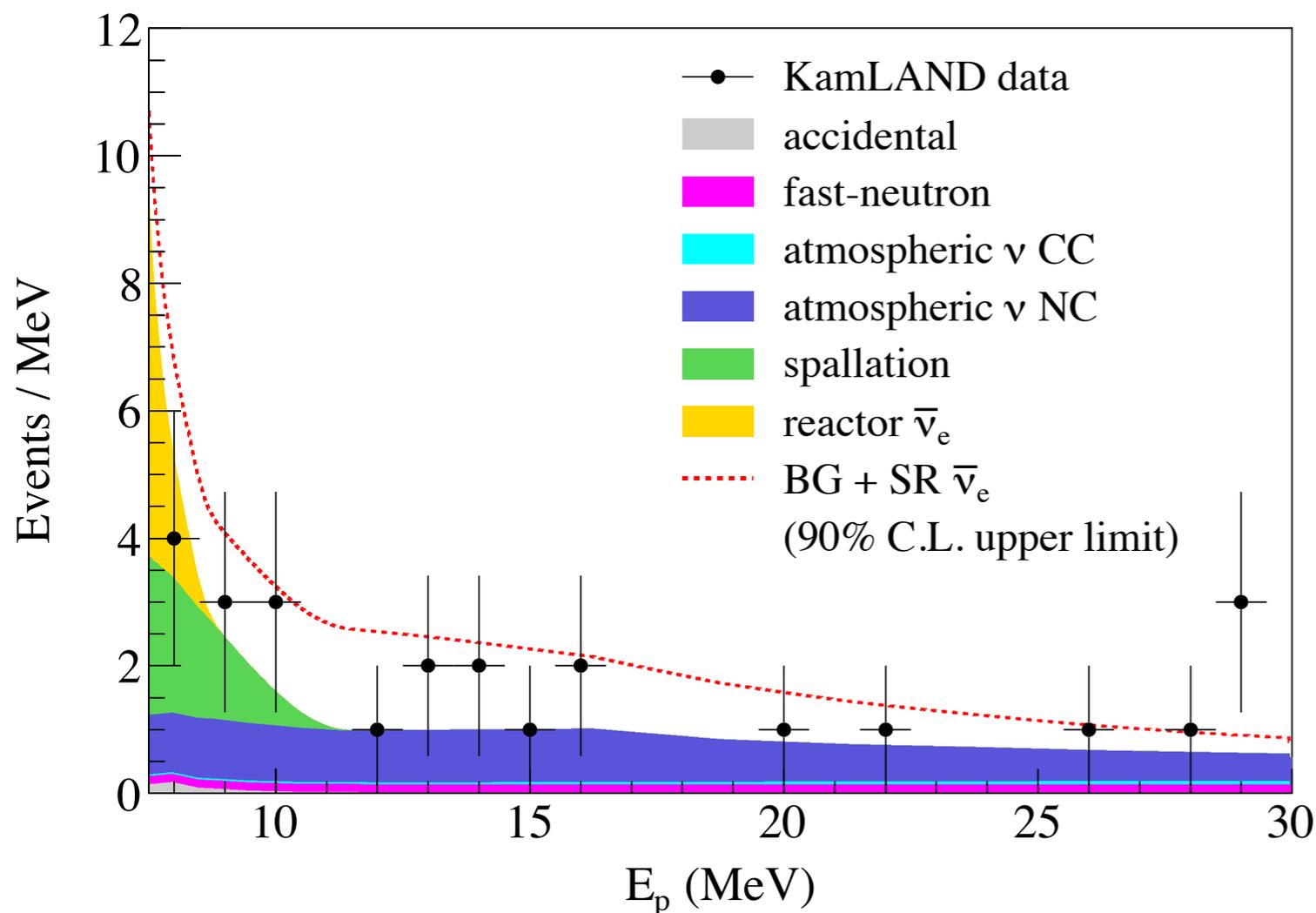
Reaction	Number of Events
$\nu(\bar{\nu}) + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + ^{11}\text{C} + \gamma$	13.2
$\nu(\bar{\nu}) + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + ^{10}\text{B} + p$	1.4
$\nu(\bar{\nu}) + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + ^6\text{Li} + \alpha + p$	1.4
$\nu(\bar{\nu}) + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + ^9\text{Be} + 2p$	0.3
$\nu(\bar{\nu}) + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + 2n + ^{10}\text{C}$	0.1
Total	16.4 \pm 4.7

SRNフラックス上限値

Estimation and Best-fit

	SRN	Reactor	⁹	atm. NC	atm. CC	Fast Neutron	Accidental
Estimated	-	2.2 ± 0.7	4.0 ± 0.3	16.4 ± 4.7	0.9 ± 0.2	3.2 ± 3.2	0.22 ± 0.01
Best-fit	0	2.2	4	14.8	0.9	2.9	0.22

free parameters



大気ニュートリノ中性カレント

Estimated
(from cross section) 16.4 ± 4.7

Best-fit
(from KamLAND data) $14.8^{+5.8}_{-5.4}$

断面積を基にした計算と良く一致

大気ニュートリノの中性カレント
がSRNの探索感度を制限

LENA実験のバックグラウンド予測

シミュレーション

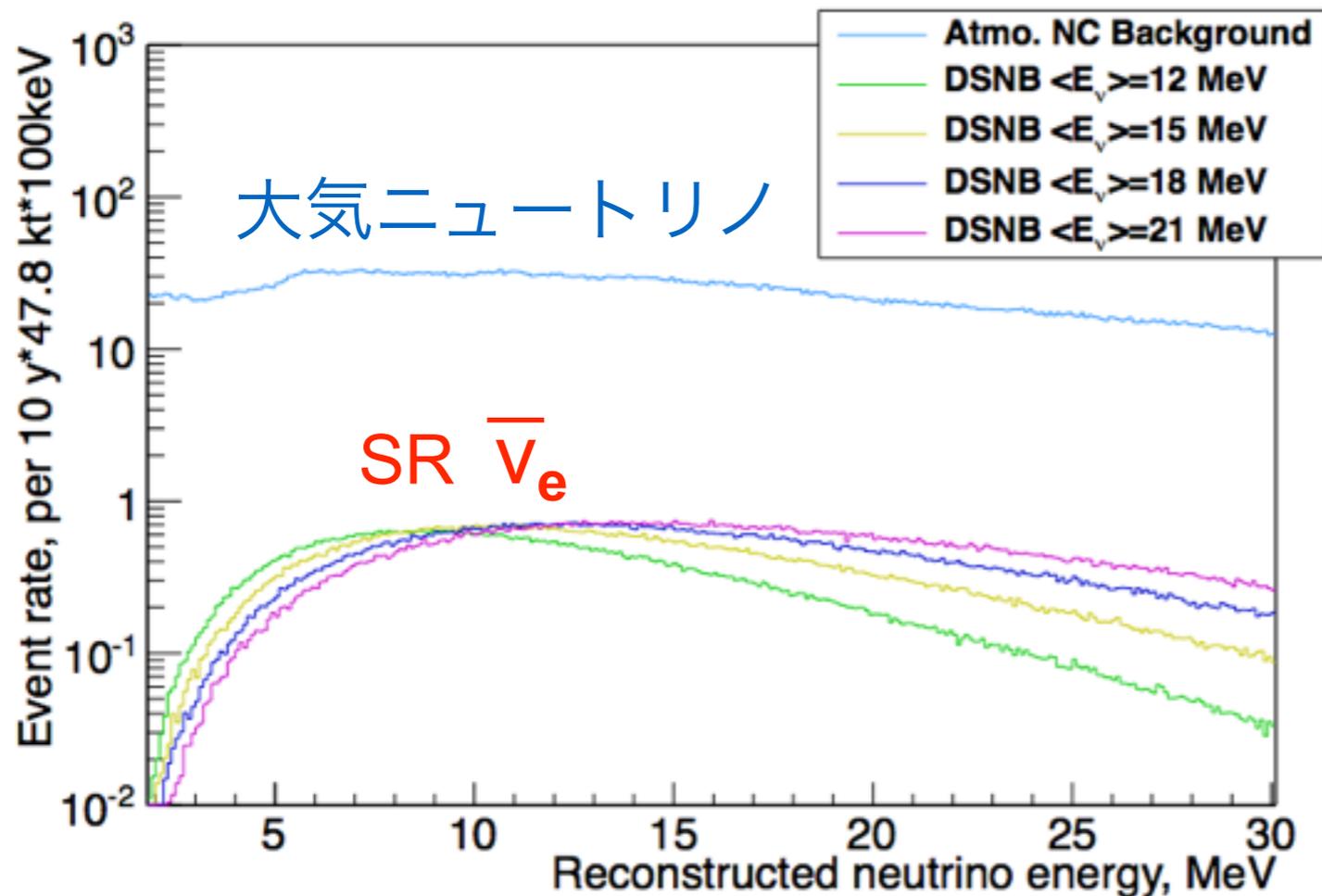
Neutrino MC generator

GENIE

Neutrino-Nucleon interaction cross section
+ final state interaction (intra-nuclear cascade)

Particle tracking

Geant4



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 %

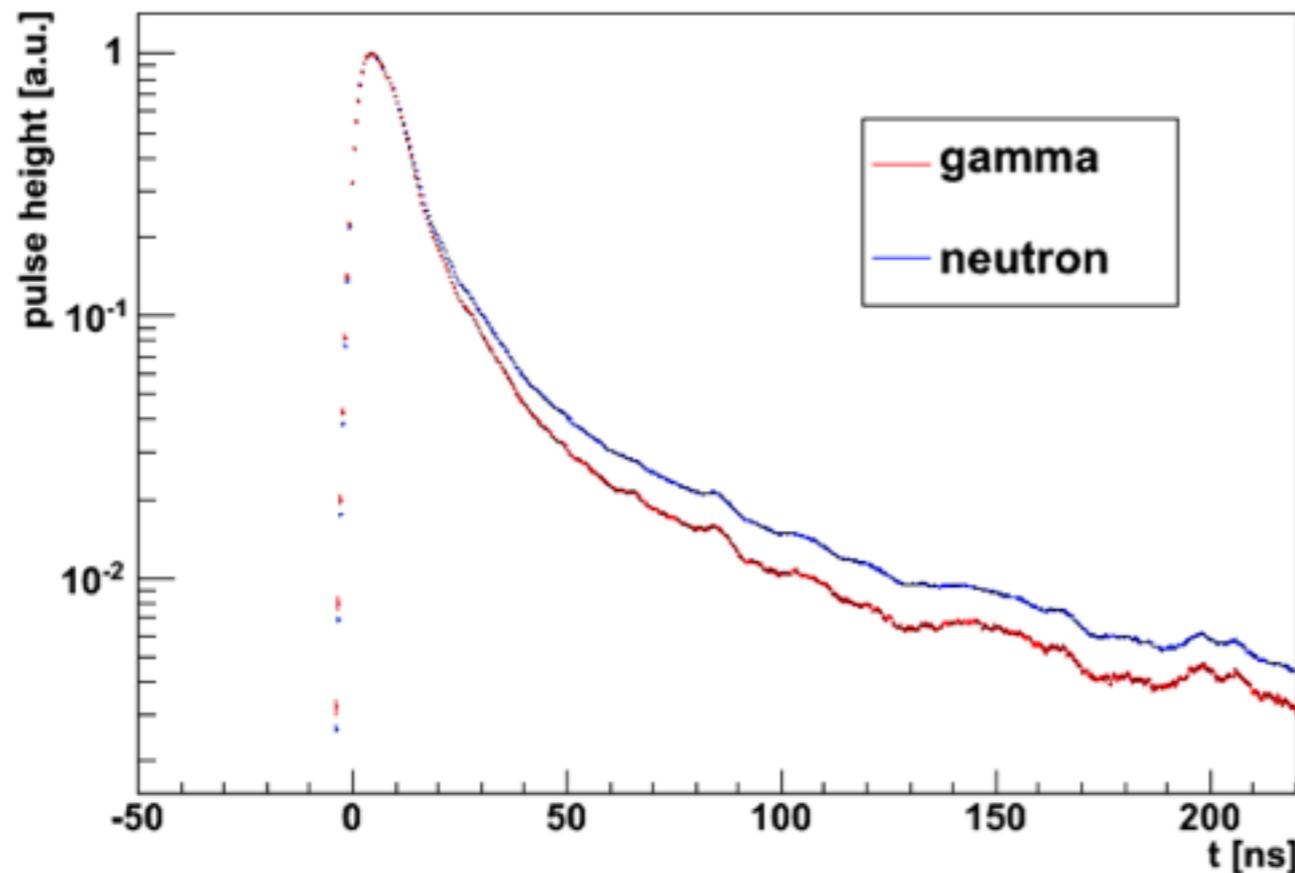
R. Mollenberg et al. arXiv:1409.2240

KamLANDのバックグラウンド予測と良く一致

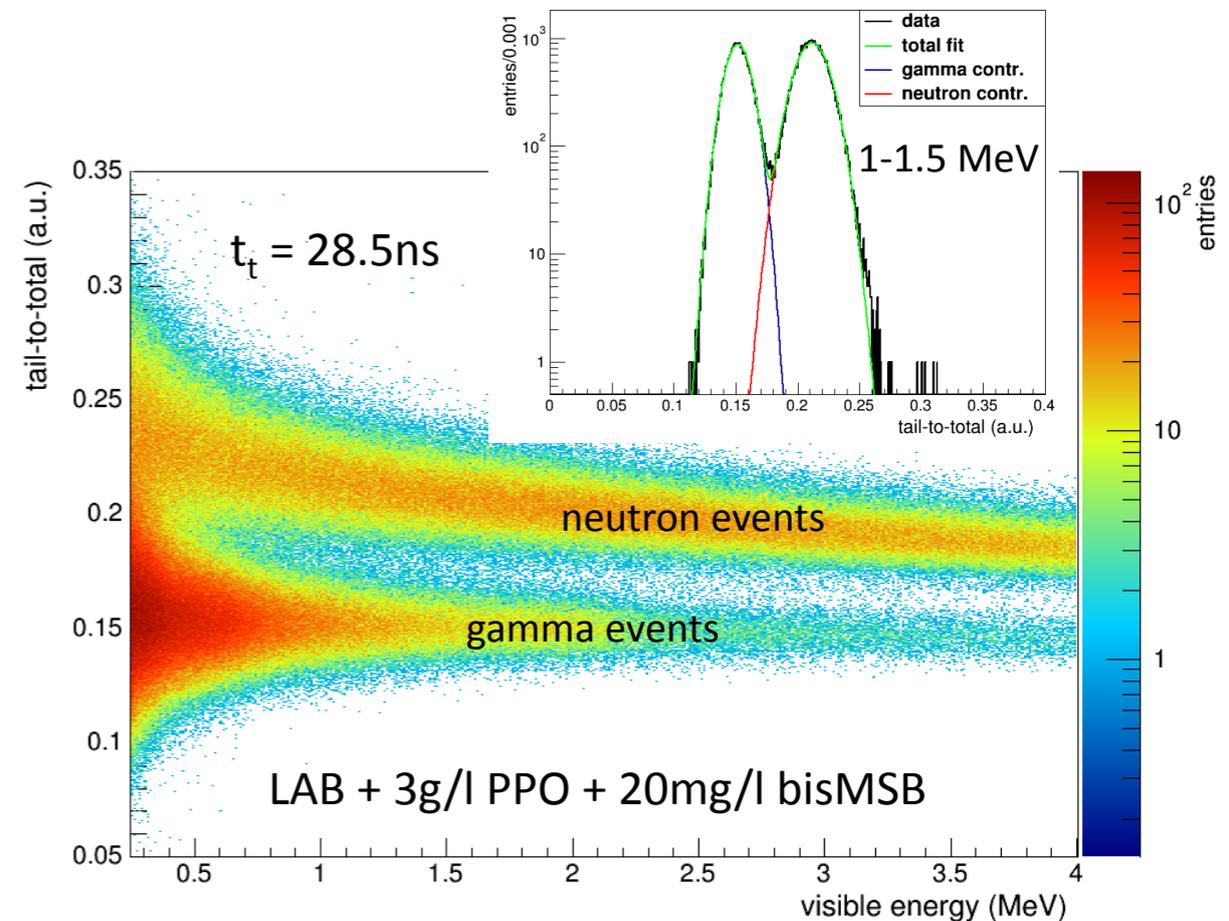
LENA実験のバックグラウンド対策

軽粒子 (e^+/e^-)と重粒子 (p)の発光波形の違いを利用した識別

PSD (pulse shape discrimination)



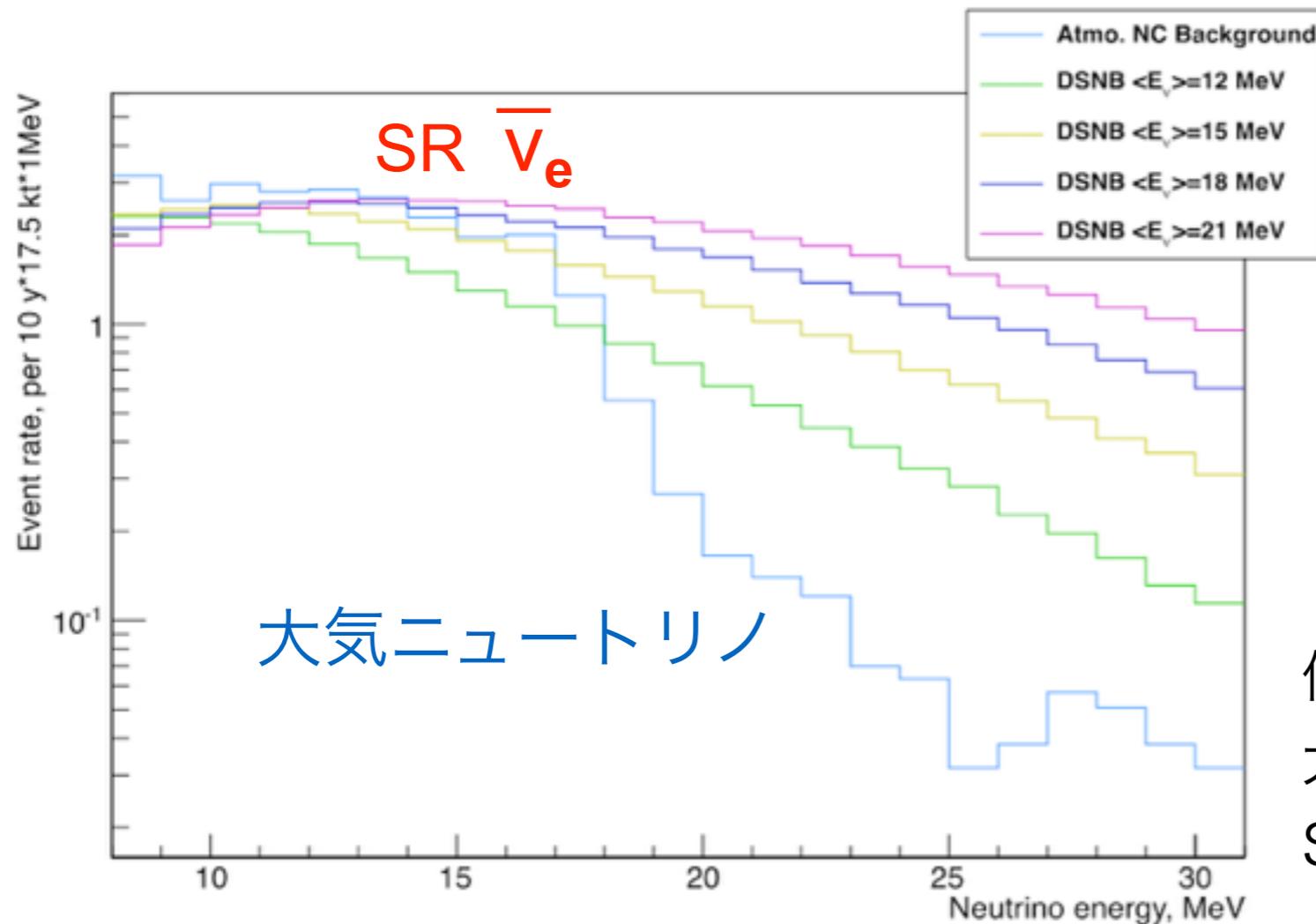
R. Mollenberg et al. arXiv:1409.2240



L. Oberauer, 17th Lomonosov conference, 2015

LAB (リニアアルキルベンゼン) ベースの液体シンチレータでのPSD性能を評価

PSDカット後のバックグラウンド予測



液体シンチレータのPSD性能
+
光散乱による発光波形の歪み
(光シミュレーション)



信号検出効率40%のPSDカットで
大気ニュートリノバックグラウンドを
SRN信号予測数と同程度まで削減

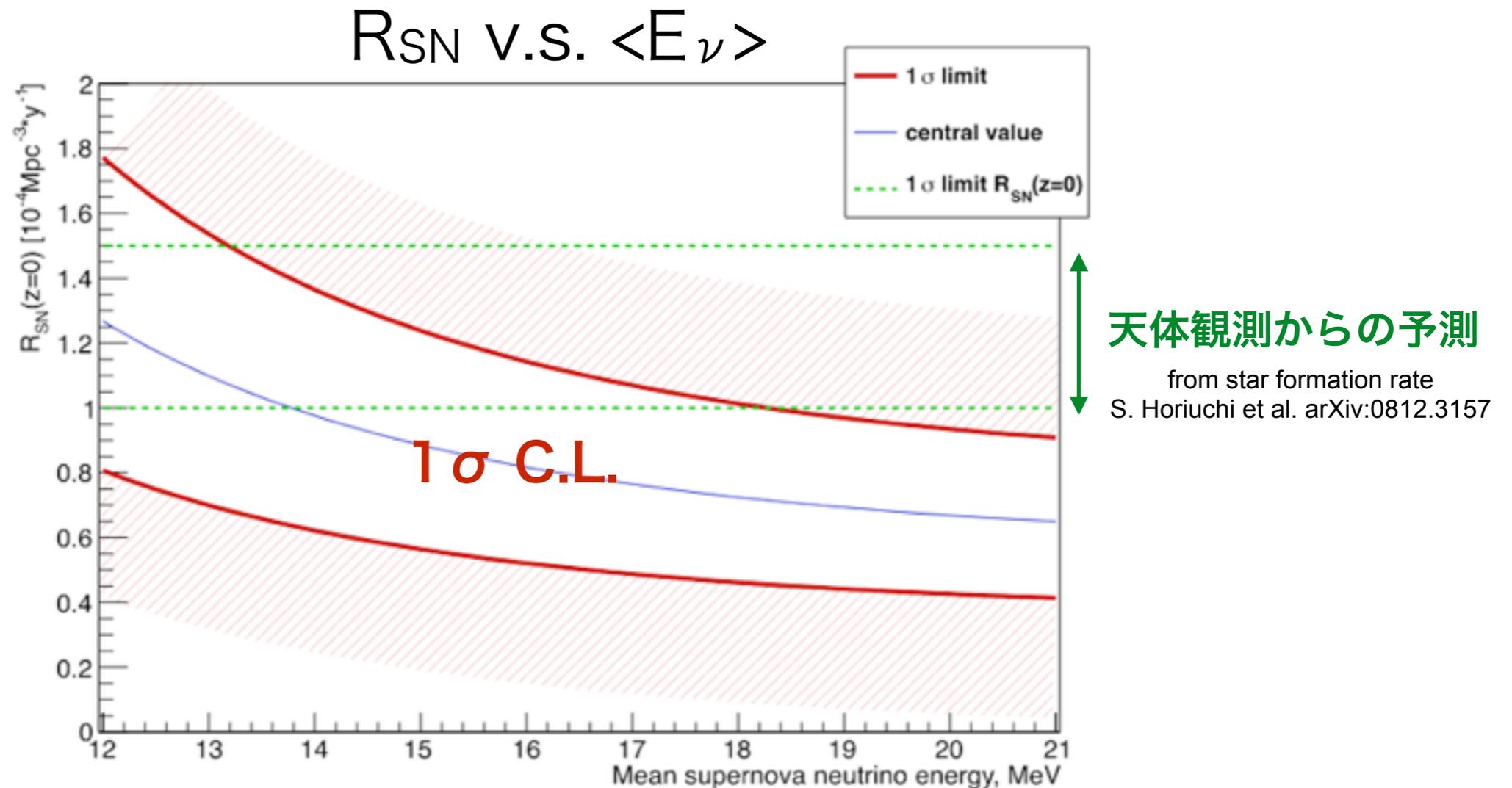
L. Oberauer, 17th Lomonosov conference, 2015

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

LANA実験でのSRN検出

仮定 10年観測 (信号検出効率40%のPSDカット)

$\langle E_\nu \rangle = 12 \text{ MeV}$, バックグラウンド不定性 = 5%



L. Oberauer, 17th Lomonosov conference, 2015

- 信号検出の有意性

3σ @ 10 year

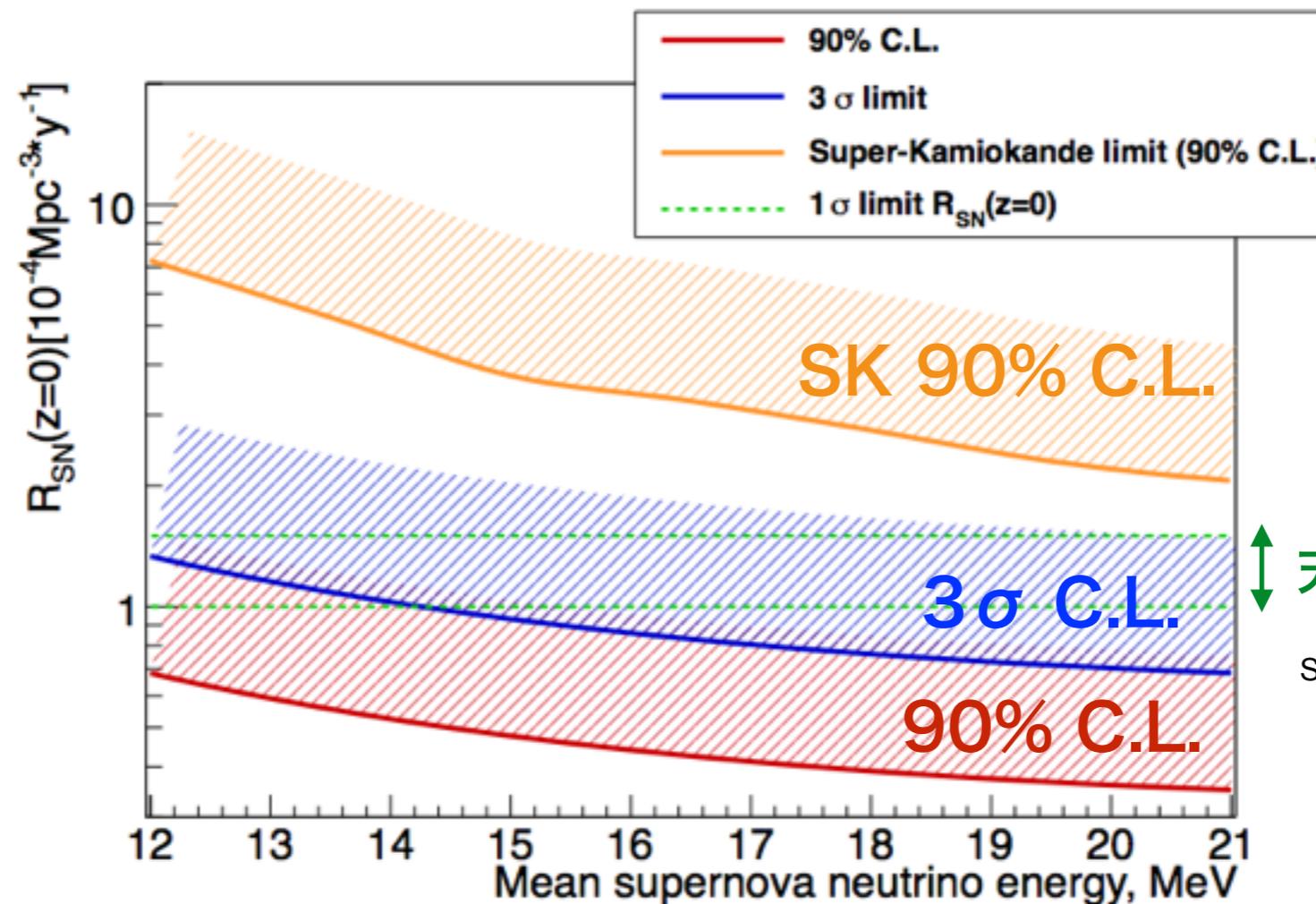
- $\langle E_\nu \rangle$ に対する制限

R_{SN} の精度が上がれば $\langle E_\nu \rangle$ の決定にも貢献

LANA実験でのSRN制限

仮定 10年観測 (信号検出効率40%のPSDカット)
信号無し, バックグラウンド不定性 = 5%

R_{SN} v.s. $\langle E_\nu \rangle$



天体観測からの予測

from star formation rate
S. Horiuchi et al. arXiv:0812.3157

R. Mollenberg et al. arXiv:1409.2240

- SRNモデルの排除
- SRN制限の更新

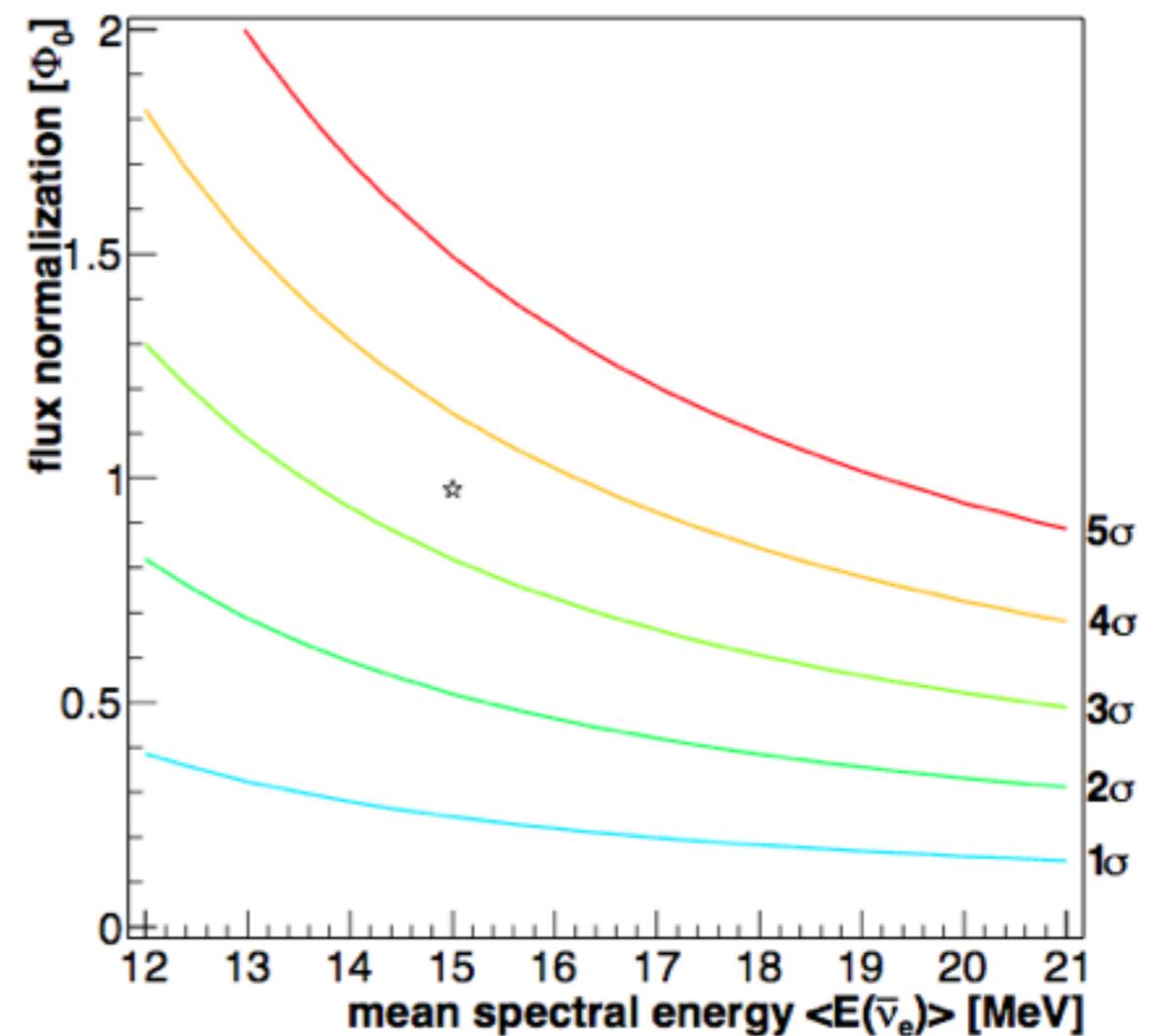
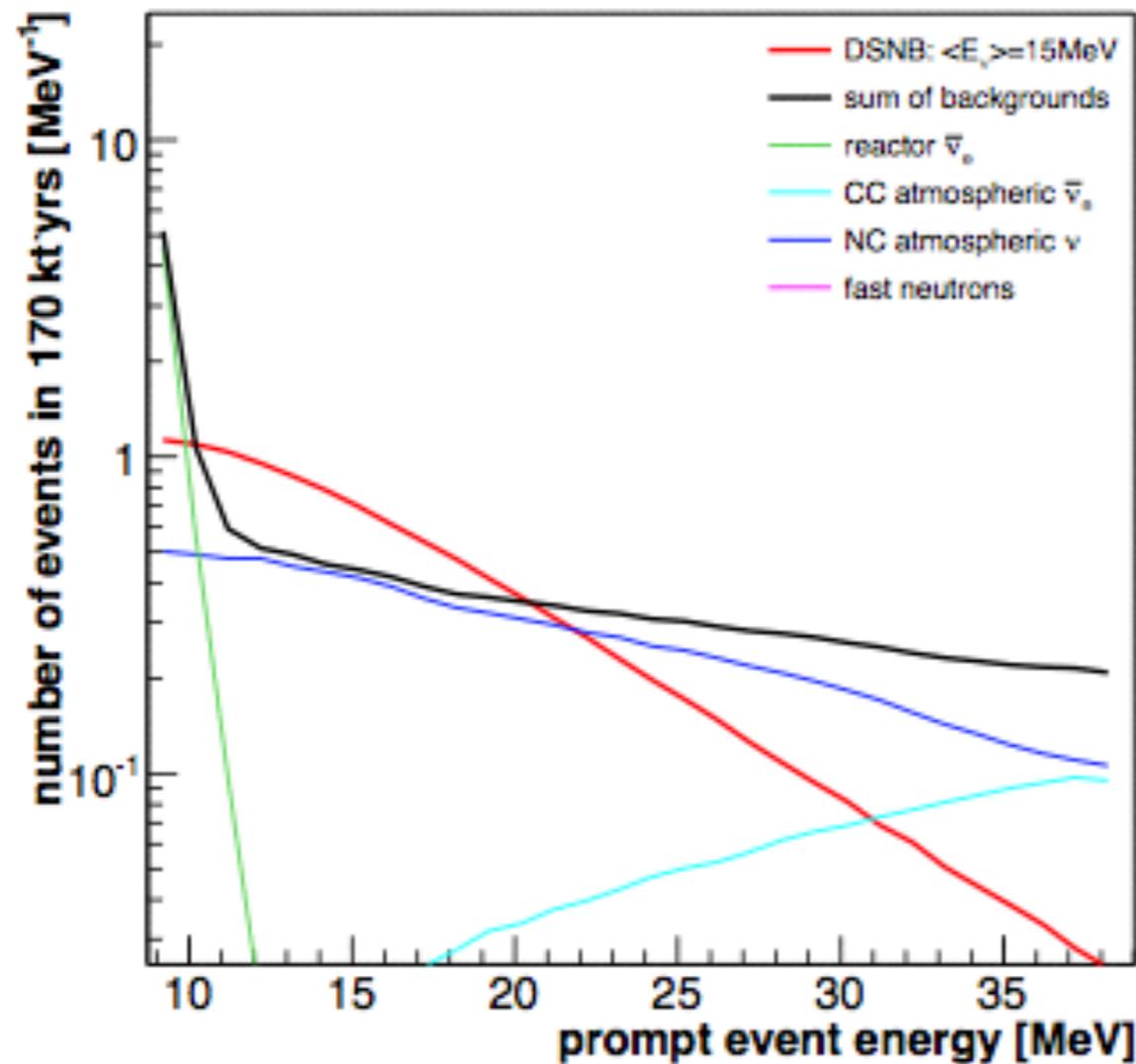
90% C.L.で全ての標準的なモデルを排除

現在のSKの制限よりも8倍改善

JUNO実験でのSRN検出

仮定 10年観測（信号検出効率40%のPSDカット）

$\langle E_\nu \rangle = 15 \text{ MeV}$, バックグラウンド不定性 = 5%

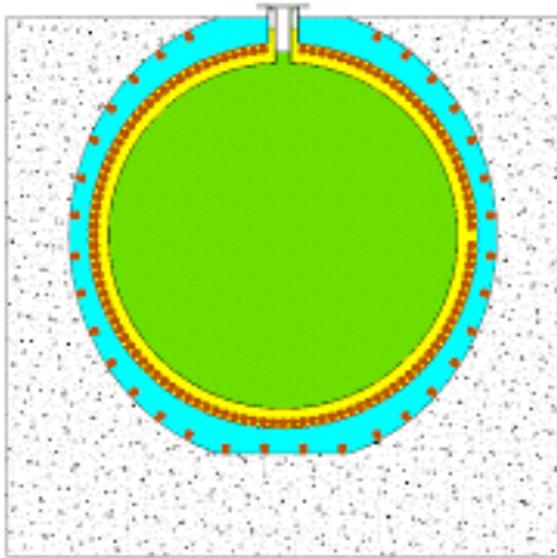


- 信号検出の有意性

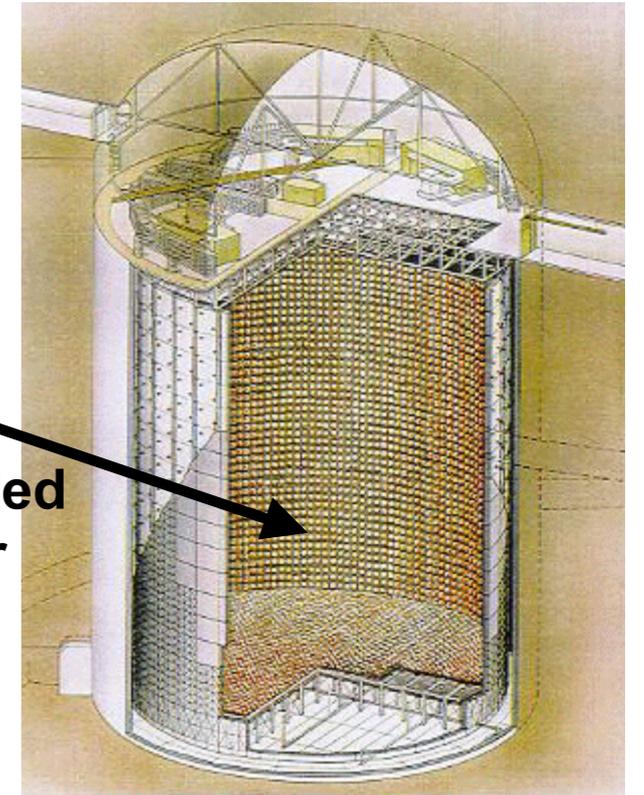
3 σ @ 10 year (レート+エネルギースペクトル)

SRN測定の展望

JUNO (20 kton)

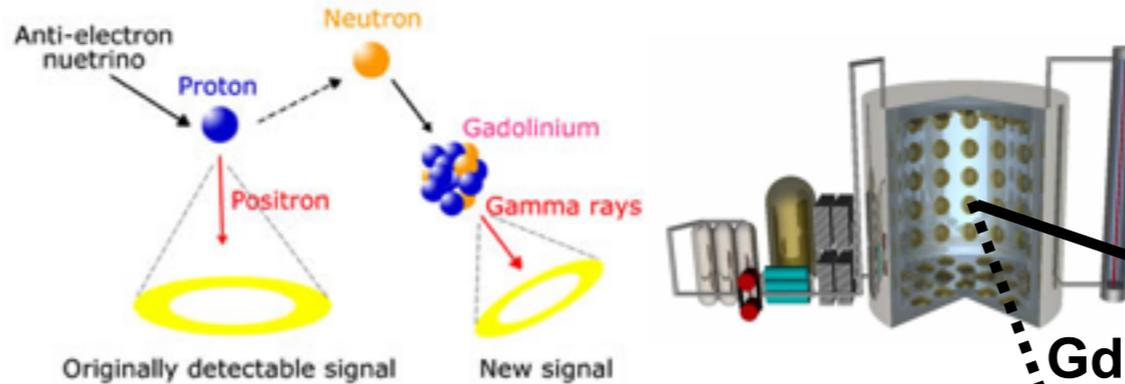


Super-K (50 kton)



GADZOOKS!

低バックグラウンド



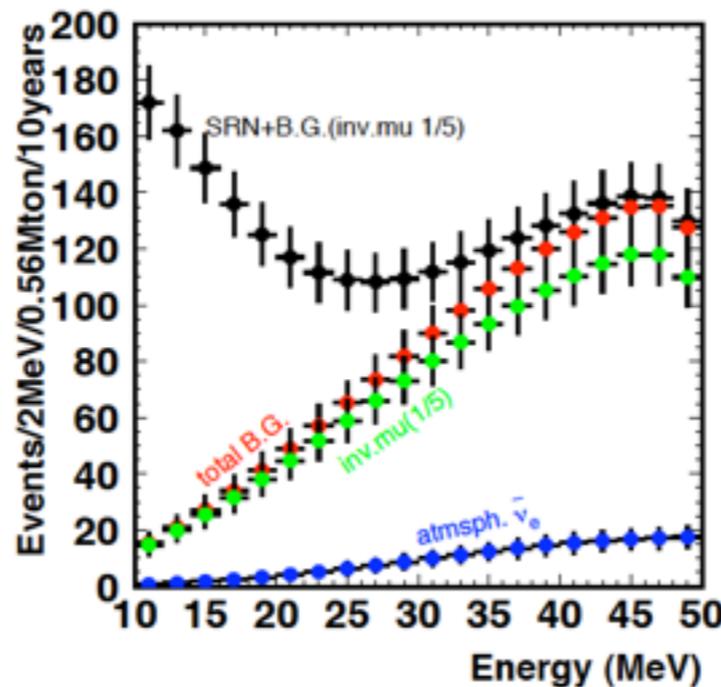
Gd loaded Water

まずはSRN発見を目指す

LENA (50 kton)

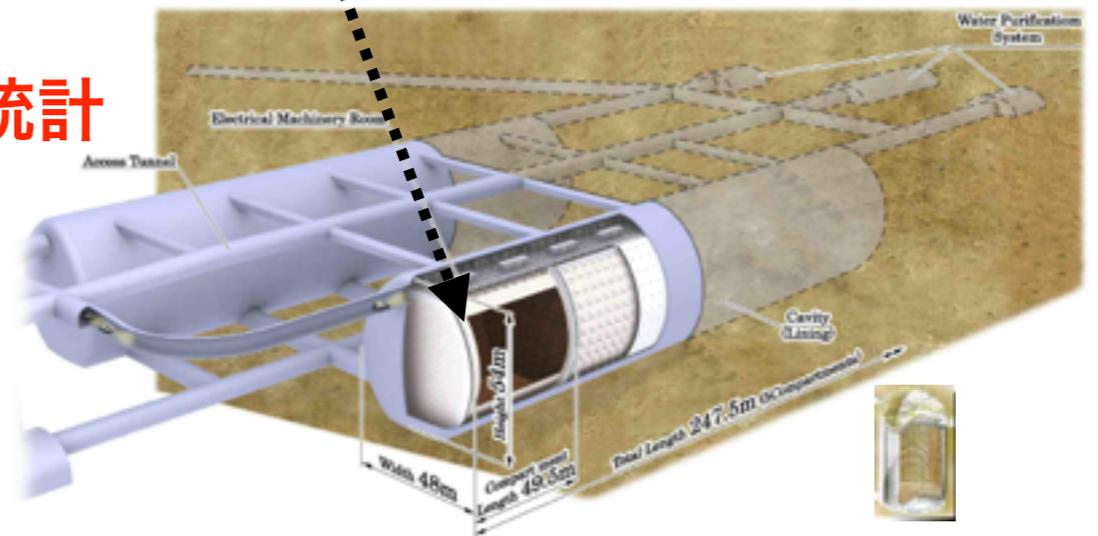


Hyper-K 10 years



高統計

Hyper-K (1 Mton)



Size of Super-K

SRN測定によって超新星爆発・宇宙形成史のモデルを制限する

まとめ

- 様々な天体ニュートリノ（太陽・地球・超新星・超新星背景ニュートリノ）が液体シンチレータ検出器の観測範囲であり、将来は 20 kton を超える大型検出器が稼動予定である。
- KamLAND 実験での超新星背景ニュートリノ探索によって、大気ニュートリノバックグラウンドが探索感度を制限することが明らかとなり、将来実験では波形識別（PSD）によって 2 桁程度のバックグラウンド除去を必要とする。
- まずは 3σ 程度での検出（10 年観測 @ LENA, JUNO）を目指す。SK-Gd との統合解析で有意性はさらに高まる。