

天体活動と重元素生成の解明へ向けた 超新星ニュートリノ観測システムの高度化

東北大学ニュートリノ科学研究センター

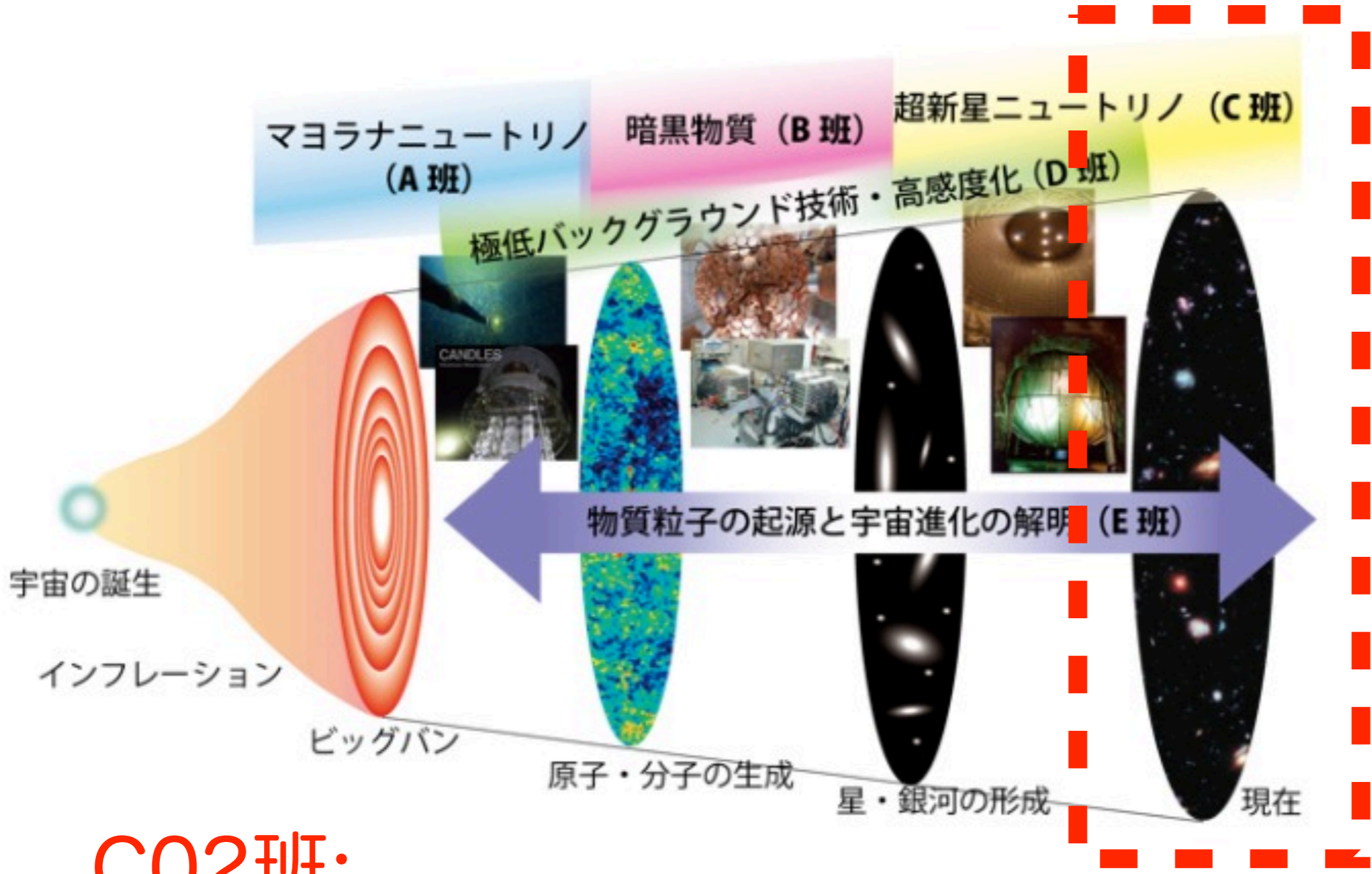
石徹白晃治

研究分担者:

梅田 秀之 (東大天文), 平出 克樹 (東大ICRR), 戸村 友宣 (東大ICRR)

連携研究者:

丸藤 祐仁 (東北大RCNS), 池田晴雄 (東北大RCNS)

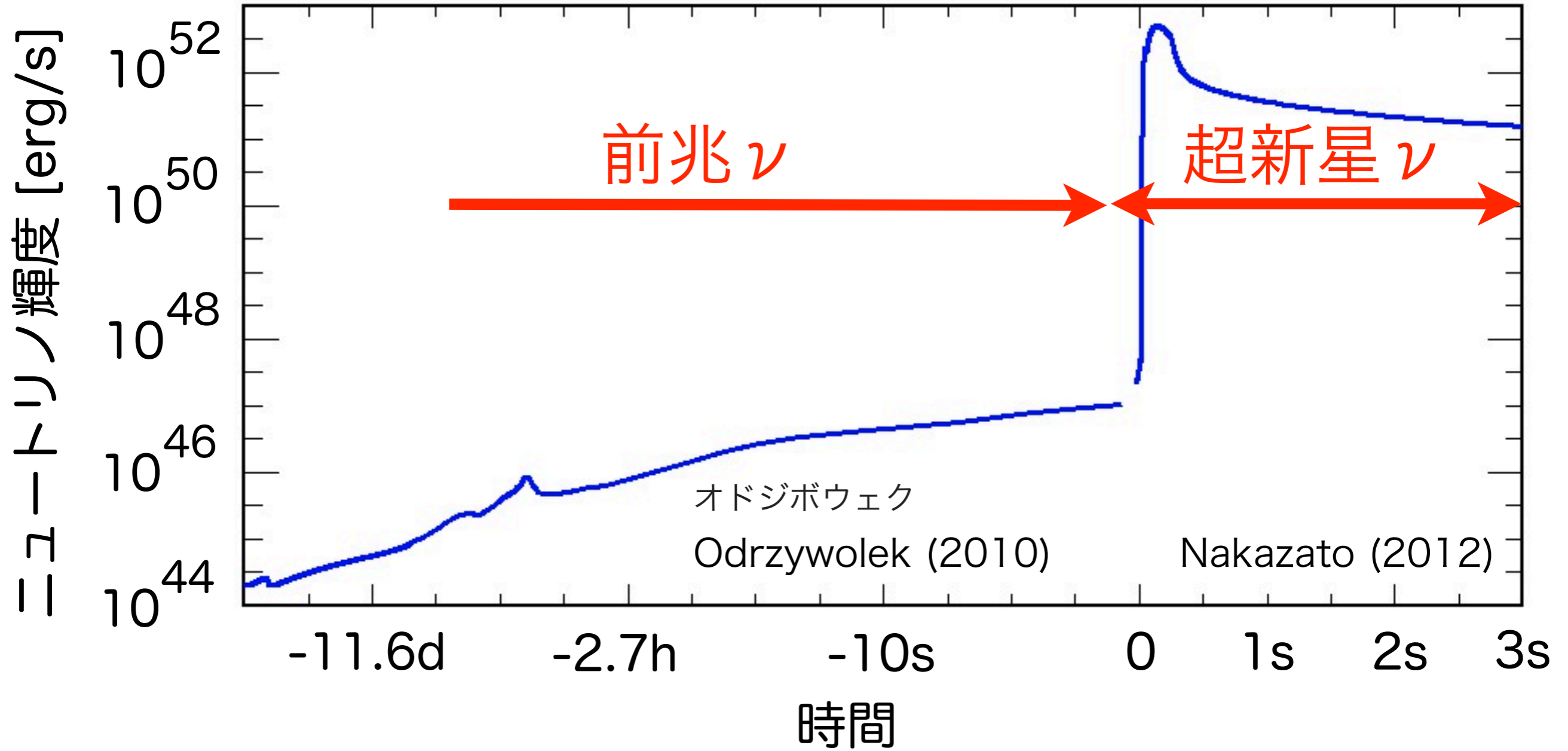


C02班:

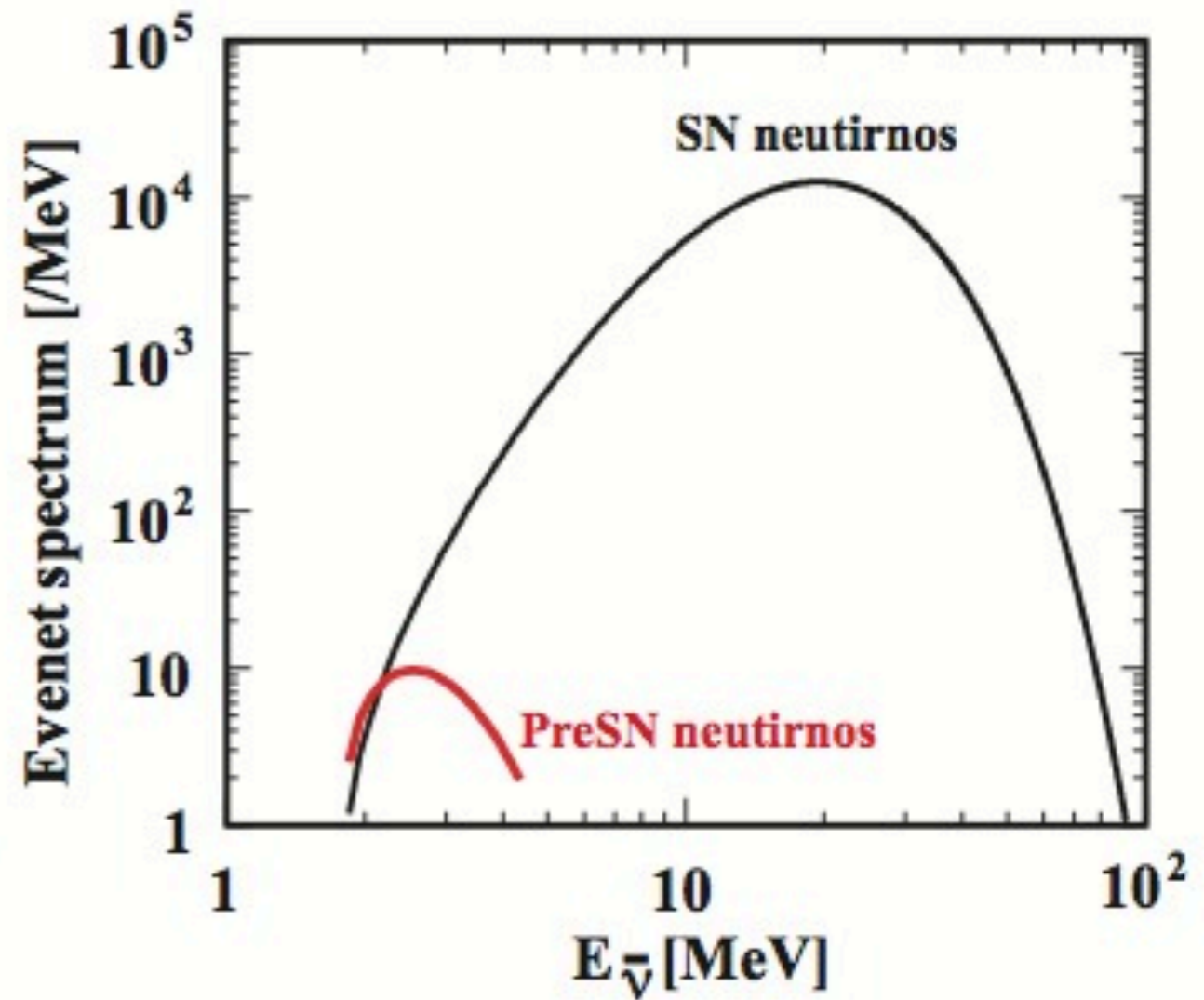
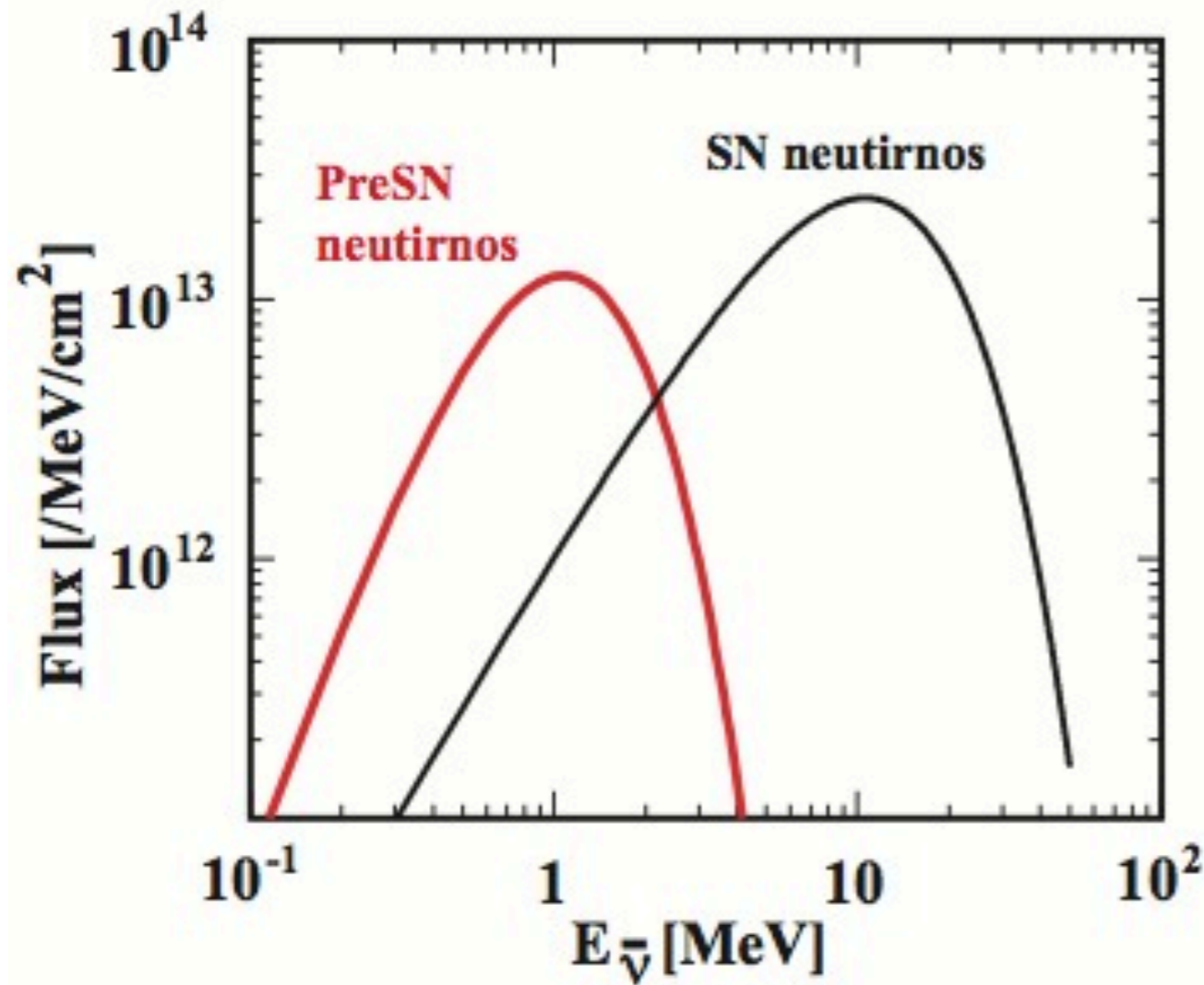
- 超新星爆発にいたる天体活動の解明
- 重元素起源の解明

前兆ニュートリノ, ネットワーク観測

超新星前兆ニュートリノ



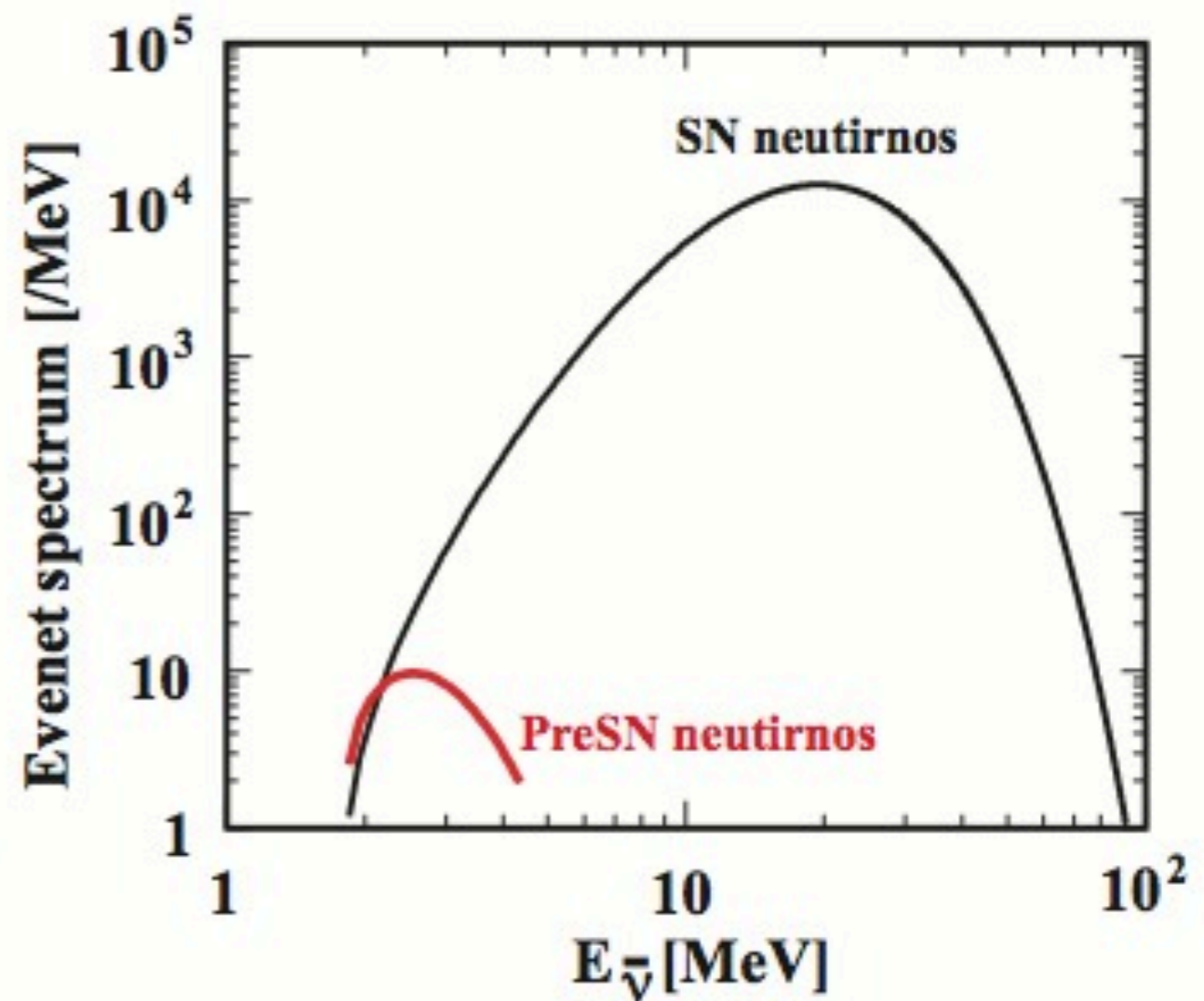
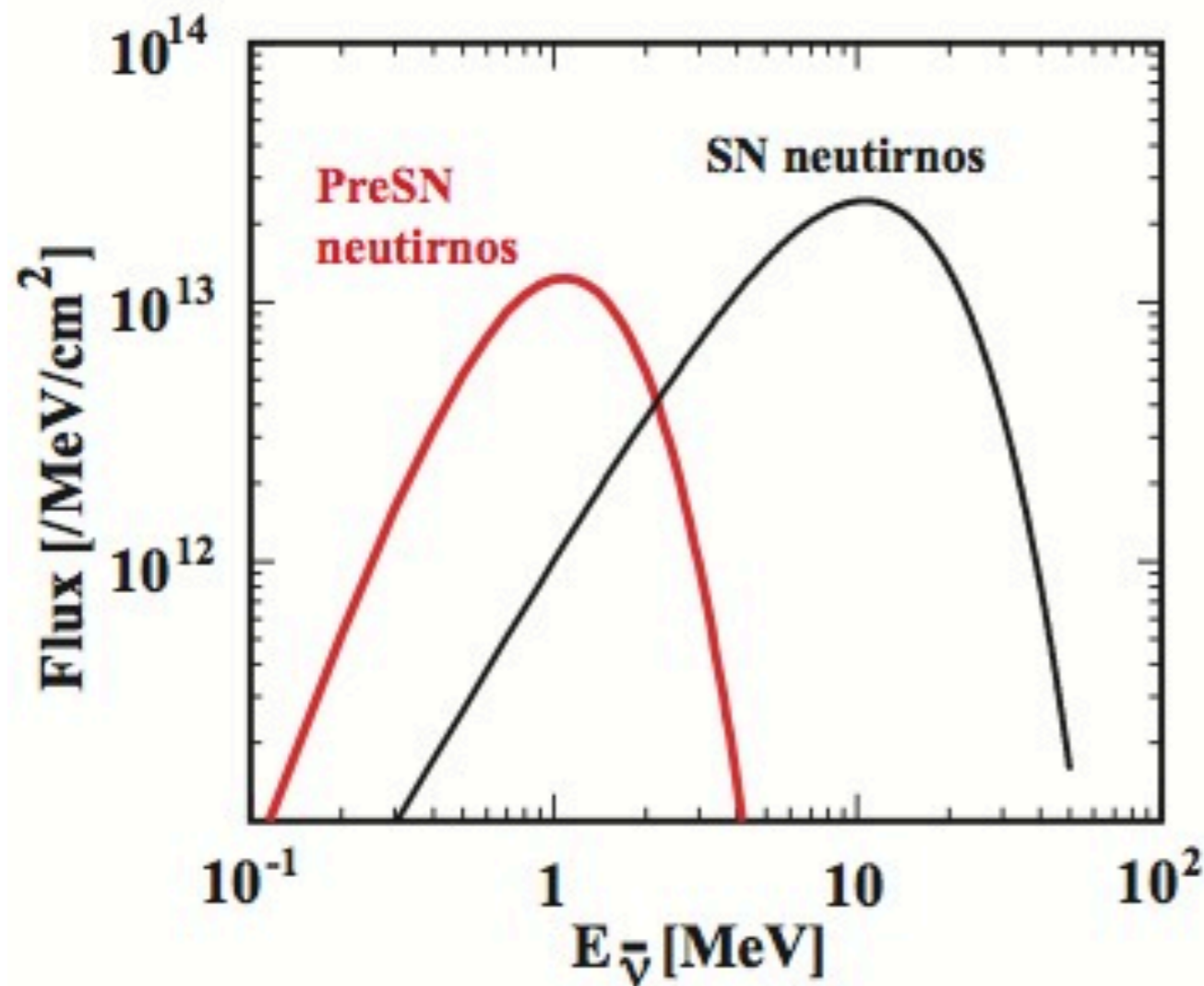
超新星前兆ニュートリノ



検出の意義

- 恒星進化の最終段階を解明 (加藤さんポスター)
- 爆発前アラーム

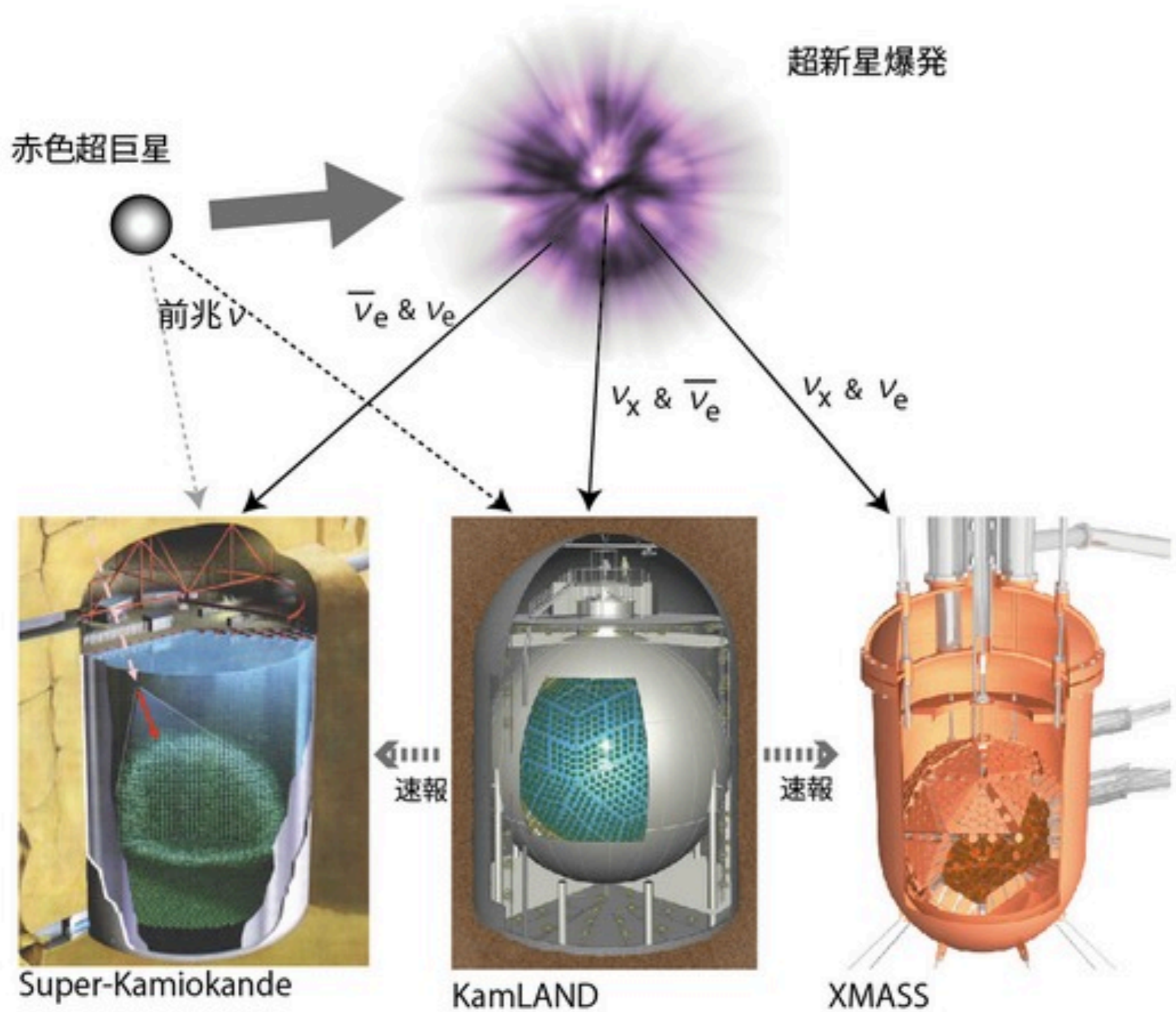
超新星前兆ニュートリノ



問題点

- 極めて稀な現象を捉える実験
 - > 高頻度事象に備えたDAQ高度化が必要

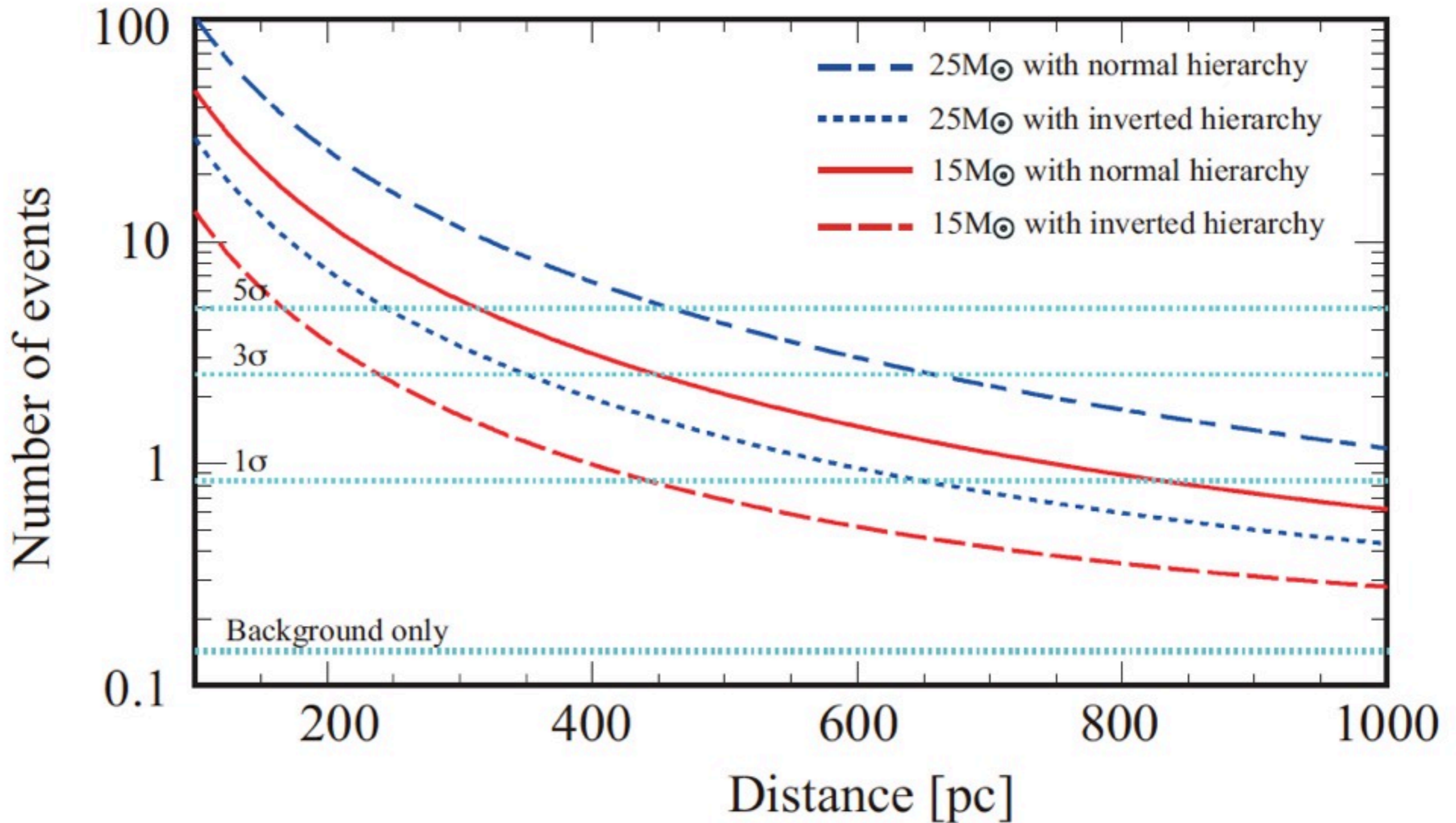
CO



前兆ニュートリノモニター

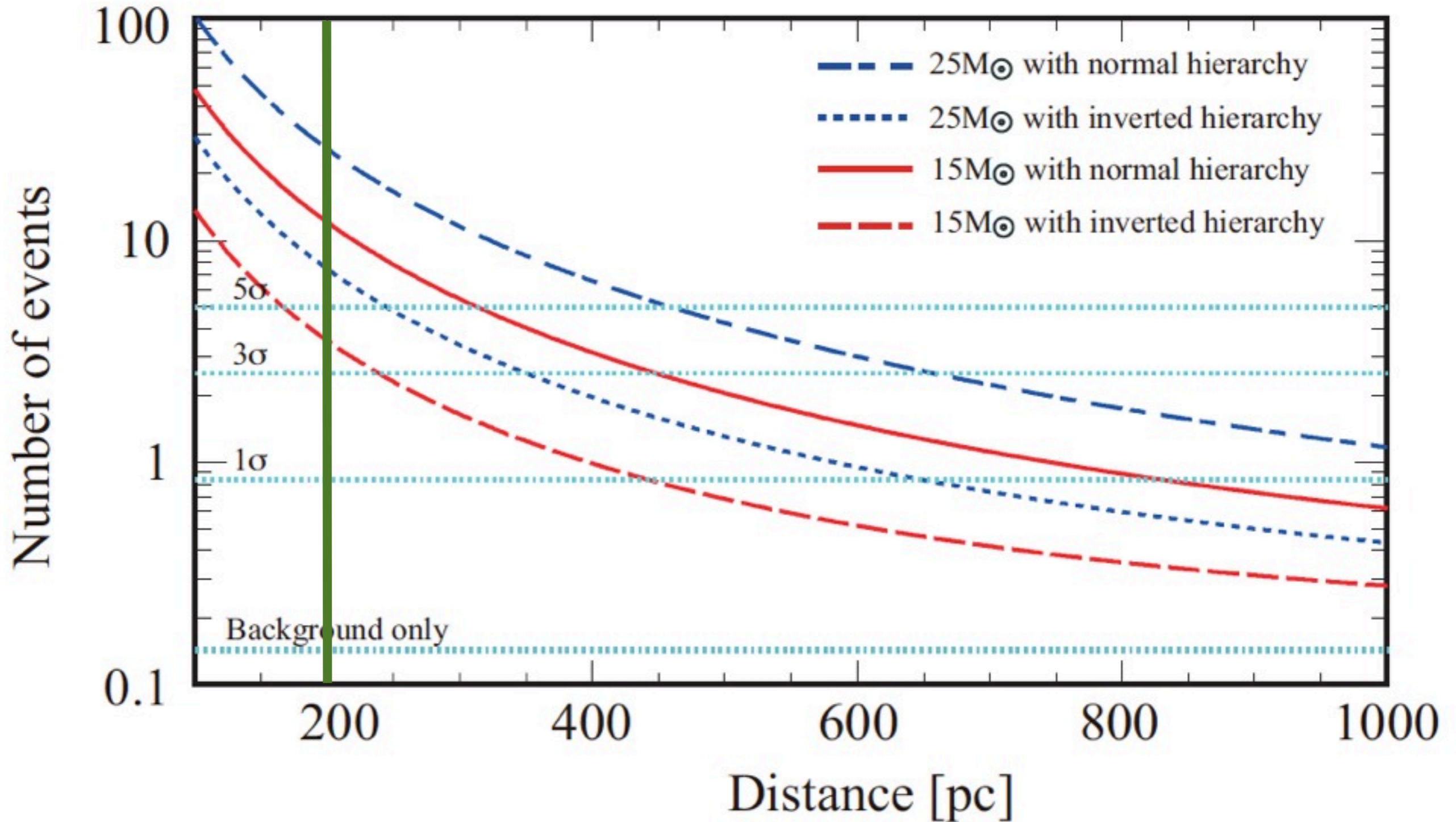
前兆ニュートリノ@KamLAND

爆発前の48時間(Odrzywolekモデル)



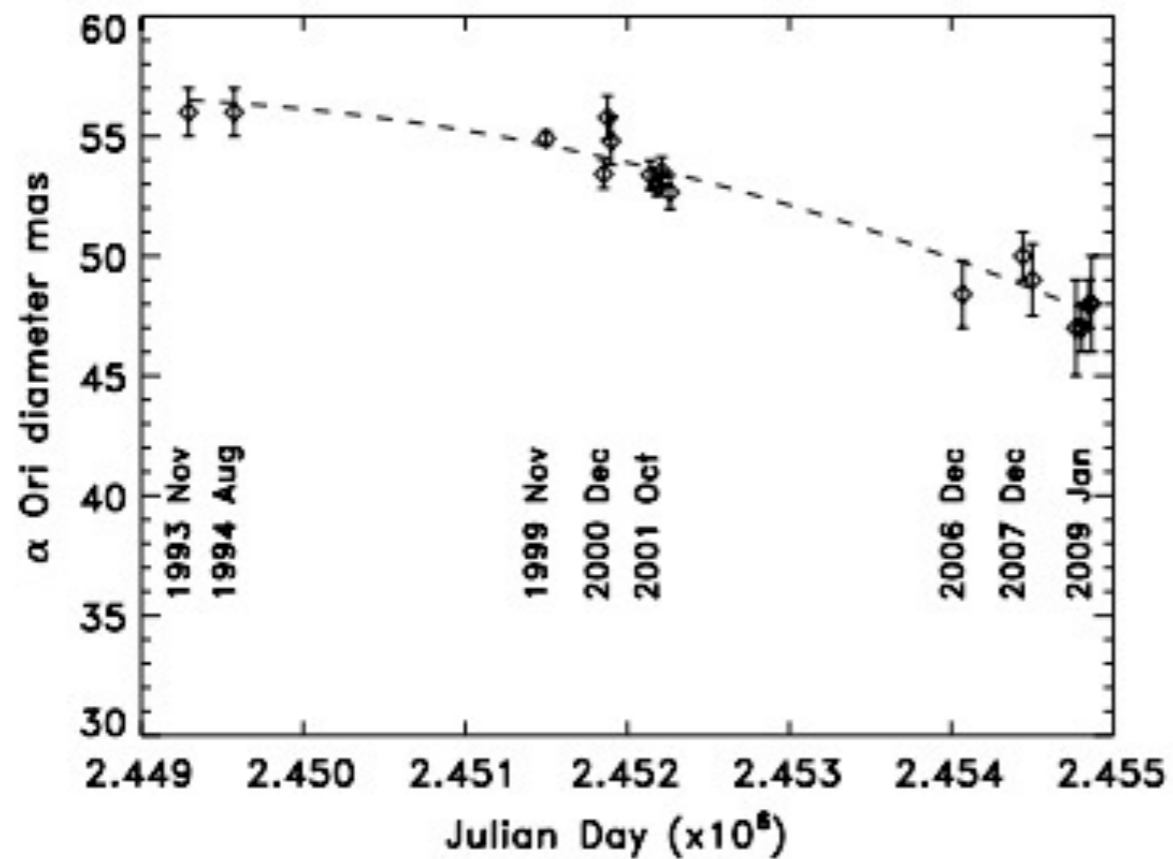
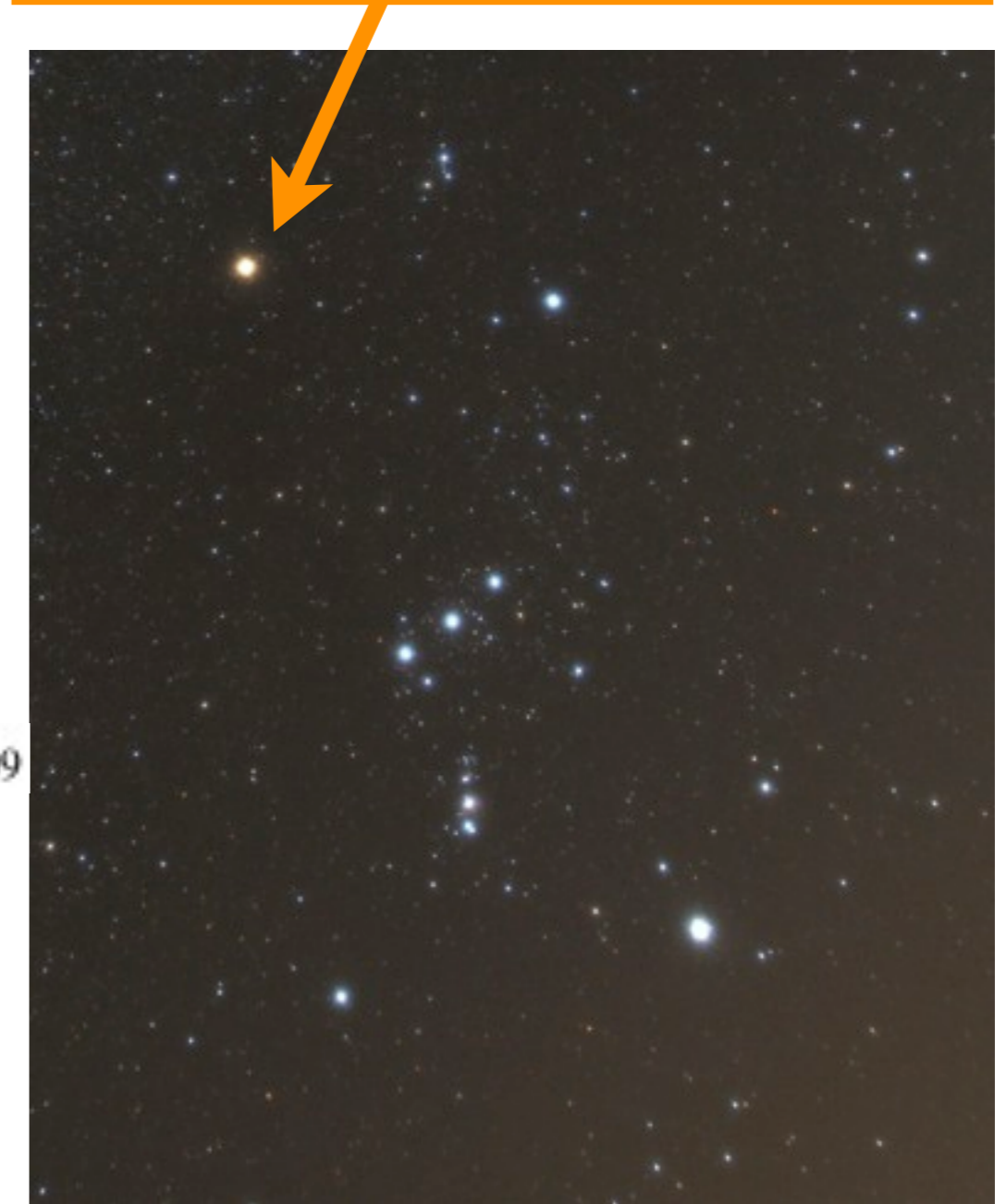
前兆ニュートリノ@KamLAND

爆発前の48時間(Odrzywolekモデル)



ベテルギウス

- 赤色超巨星
- 星進化の最終段階



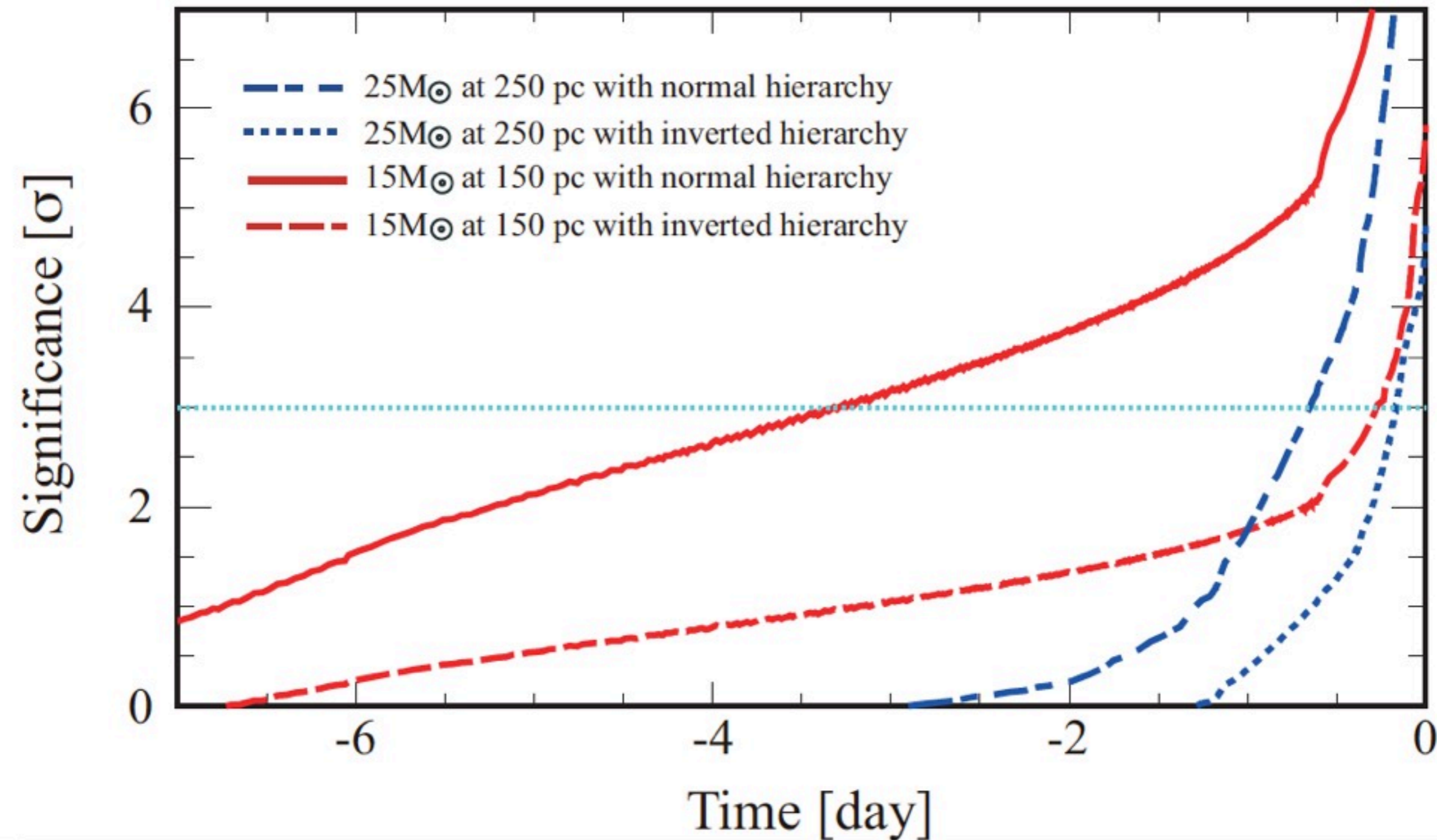
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 697:L127-L128, 2009

質量: $M=17-26 M_{\text{sun}}$

距離: $d=197 \pm 45 \text{ pc}$

爆発前アラーム@KamLAND

ベテルギウスを想定した 3σ 検出時間



爆発前アラーム配信@KamLAND

セミリアルタイムの σ を提供 (20-30分の遅延)

- KamLAND -> XMASSが稼働中 (シフトチェック)

SKの人は多忙で受け取ってくれない(涙)

- 登録ユーザーへの公開予定

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/SNmonitor/regist/>

- KamLANDは提供へ努力するが責任は負わない

- KamLANDの能力と限界を正しく理解する

- 一般へは提供しない. 研究グループ単位への提供

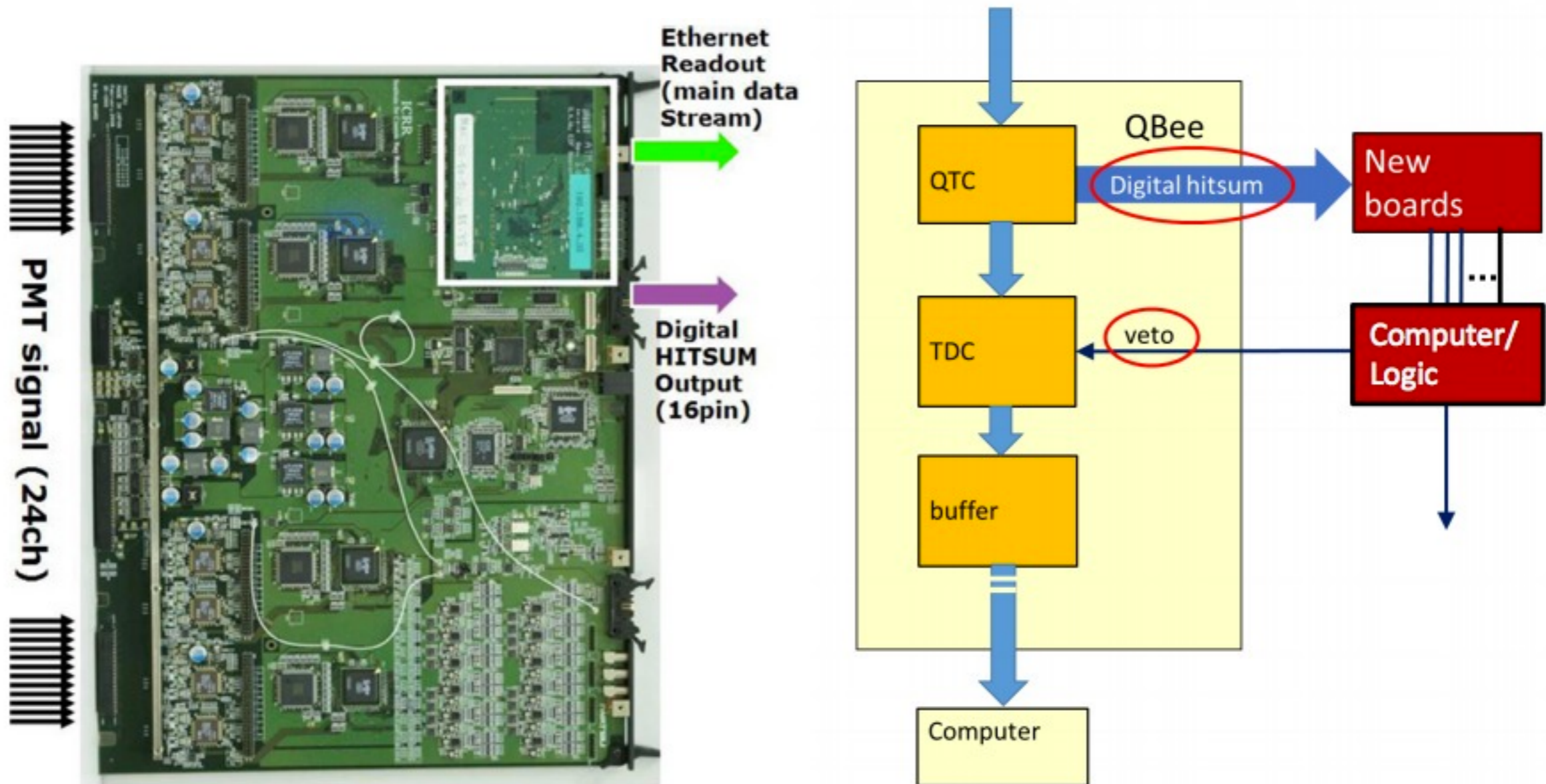
- 2次配布は禁止

DAQ高度化

DAQの現状@SK

Super-Kamiokande

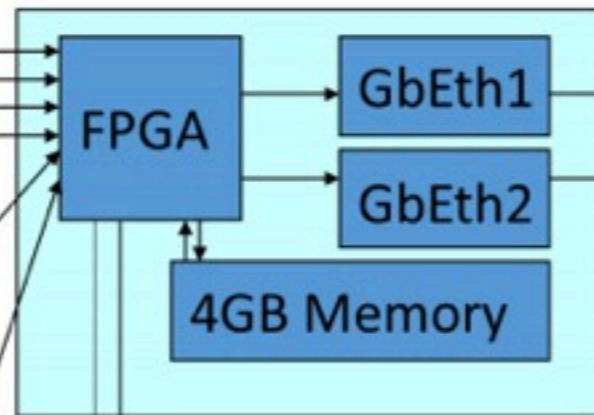
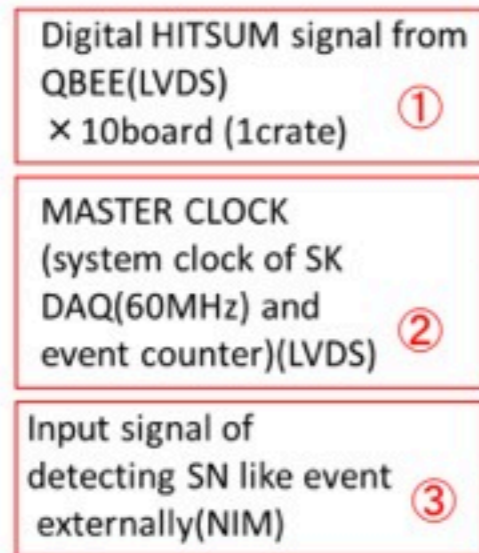
- ベテルギウス@200pcの場合, 最初の20%しか取れない
- 1/100の間引き and 専用DAQ



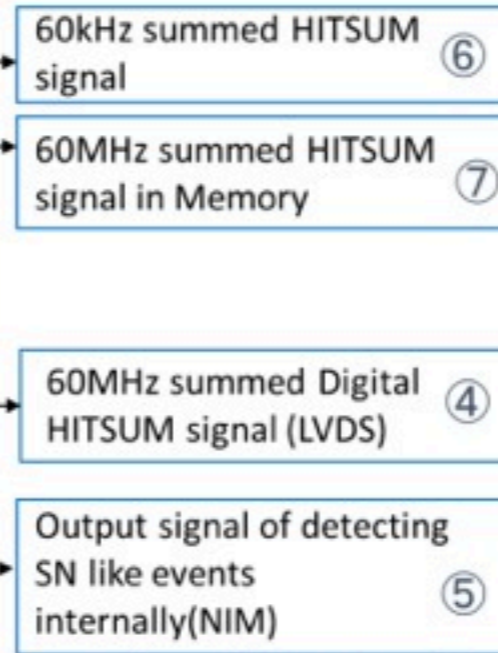
DAQの現状@SK

Block Diagram of SN Board

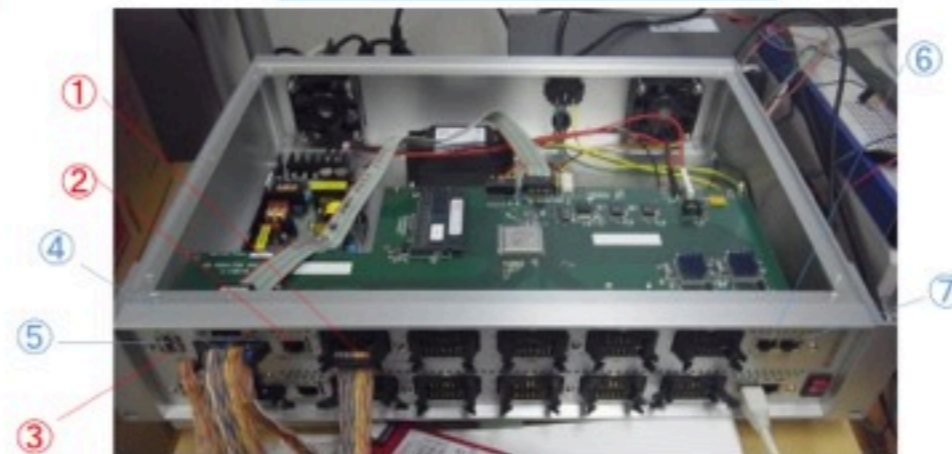
Input signal



Output signal



- FPGA (Vertex 5)
 - Sum up hitsum signals from 10 QBees (60 MHz)
 - Sum up 1024 60-MHz sum → 60 kHz
 - Generate SN trigger
- 4-GB memory (DDR2)
 - Store 60-MHz data of latest 1 min.
 - When supernova occurs, stop writing data and read it out.
- Gb Ethernet 1, 2 (SiTCP)
 - Send 60-kHz or 60-MHz sum to computer.



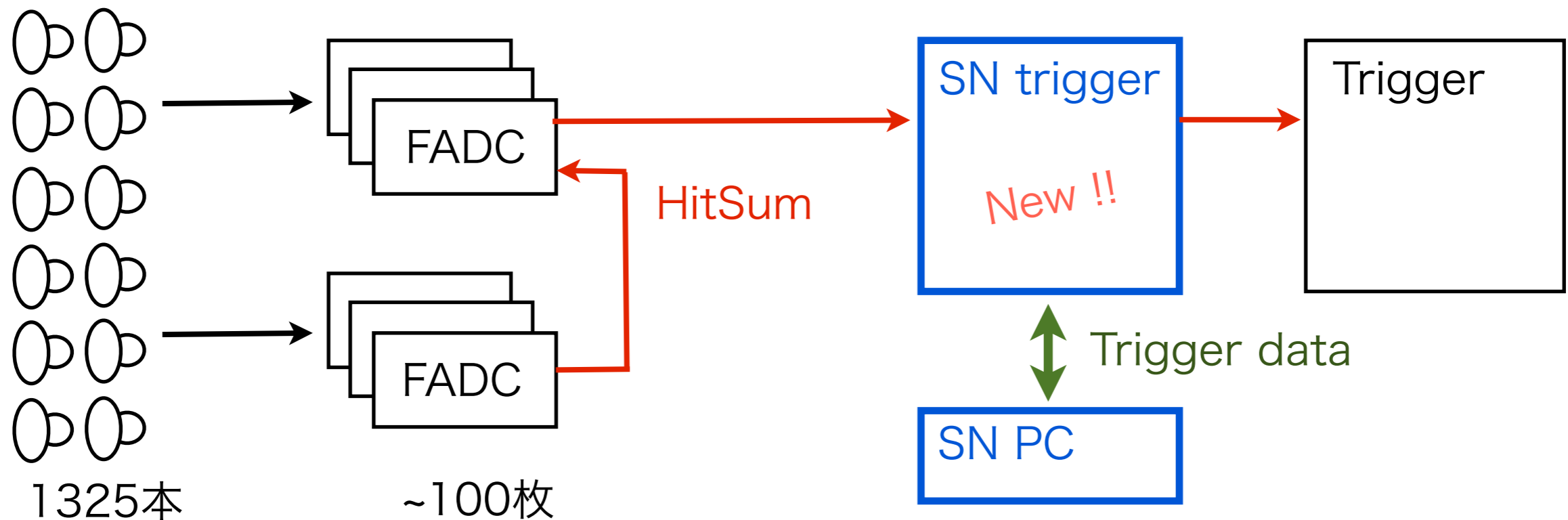
戸村さんの資料より

現状: コミッショニング中

DAQの現状@KamLAND

KamLAND

- ベテルギウス@200pcの場合, DAQ破綻
-> 最低限も取れる保証が無い
- オンボード 近傍SN判定 & 間引きロジックの開発
並行したTrigger data情報記録



DAQの現状@KamLAND

KamLAND

- オンボード 近傍SN判定の困難

厳しい判定条件: 判定される前にDAQ破綻

甘い判定条件: 1-2kcp SNに不要な間引き

今後の課題: 判定条件の最適化

- 新しいFront-End回路
 - 巨大なオンボードメモリー
 - 高速データ転送
 - 速いヒット判定 -> on-board vertex reconstruction

XMASSにおける超新星ニュートリノ観測

■Coherent elastic neutrino-nucleus scattering

$$\nu_x + (A, Z) \rightarrow \nu_x + (A, Z)$$

- XMASSにおける超新星ニュートリノ事象の主なプロセス。
- 全てのフレーバーに感度がある。
- O(10keV)以下の原子核反跳を観測する。

■Charged current neutrino-nucleus reactions

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z + 1)$$

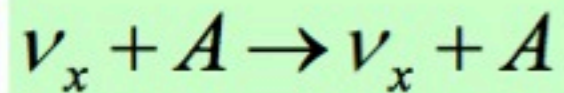
$$\bar{\nu}_e + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z - 1)$$

- 近傍超新星の場合には観測できる可能性がある。
- O(MeV)の電子事象なので、コヒーレント散乱とは区別できる。

平出さんスライド(超新星ニュートリノ研究会)

XMASSにおける超新星ニュートリノ観測

ニュートリノが原子核中の全核子と“コヒーレント”に反応して原子核が反跳される。



$$\left(\frac{d\sigma}{dT_A}\right)_w(T_A, E_\nu) = \frac{G_F^2 M}{8\pi} \left[1 + \left(1 - \frac{T_A}{E_\nu}\right)^2 - \frac{MT_A}{E_\nu^2} \right] Q_W^2 F^2(q^2)$$

$$Q_W = N - (1 - 4 \sin^2 \Theta_W)Z,$$

この反応が関与する場面

- 超新星爆発時のニュートリノに対するOpacity
- 暗黒物質の直接探索における究極的なバックグラウンド(solar, atmospheric and DSNB ν)

まだ一度も実験的に観測されていない

- 観測できるのは、原子核反跳のみ
- 反跳エネルギーは、数十keV以下



近年、暗黒物質の直接探索実験で低エネルギー閾値の大型検出器が実現した。

6

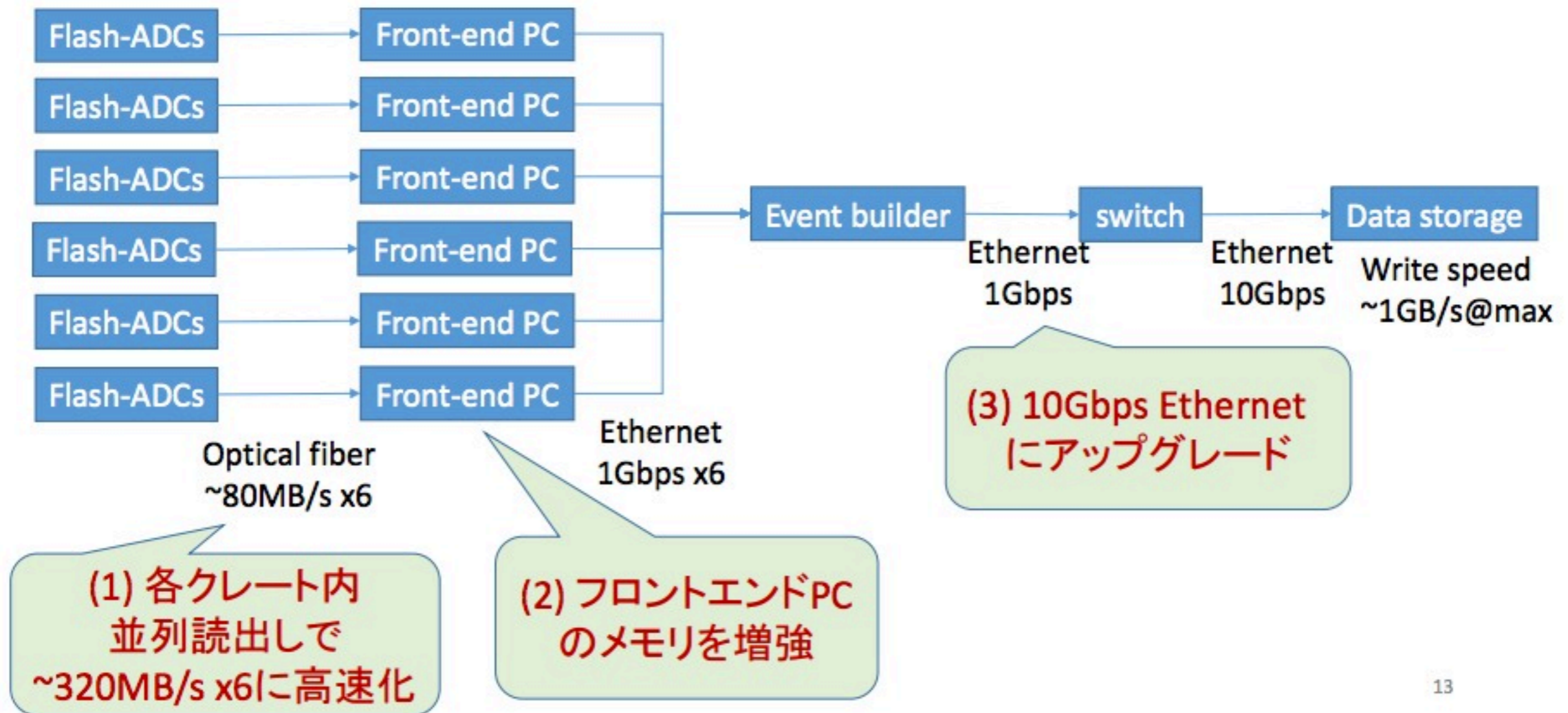
平出さんスライド(超新星ニュートリノ研究会)

KamLANDは $\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$ 反応がある。

KamLAND + XMASSでクロスセクションの決定も可能。

DAQの現状と高速化@XMASS

データ収集システムの高速度化



平出さんスライド(超新星ニュートリノ研究会)

SK, KamLAND, XMASSで技術的な協力をしながら開発を進める

ネットワーク観測で 迫る超新星元素合成

超新星元素合成

重元素生成は宇宙の歴史の一つの鍵

超新星元素合成のポイント

- 爆発1s以降のニュートリノ駆動風の Y_e
(1核子当りの陽子数)
- 観測的には ν_e と $\bar{\nu}_e$ の平均エネルギーと関連

r過程元素合成 or νp 過程元素合成

和南城さんの話

実際のエネルギー決定精度

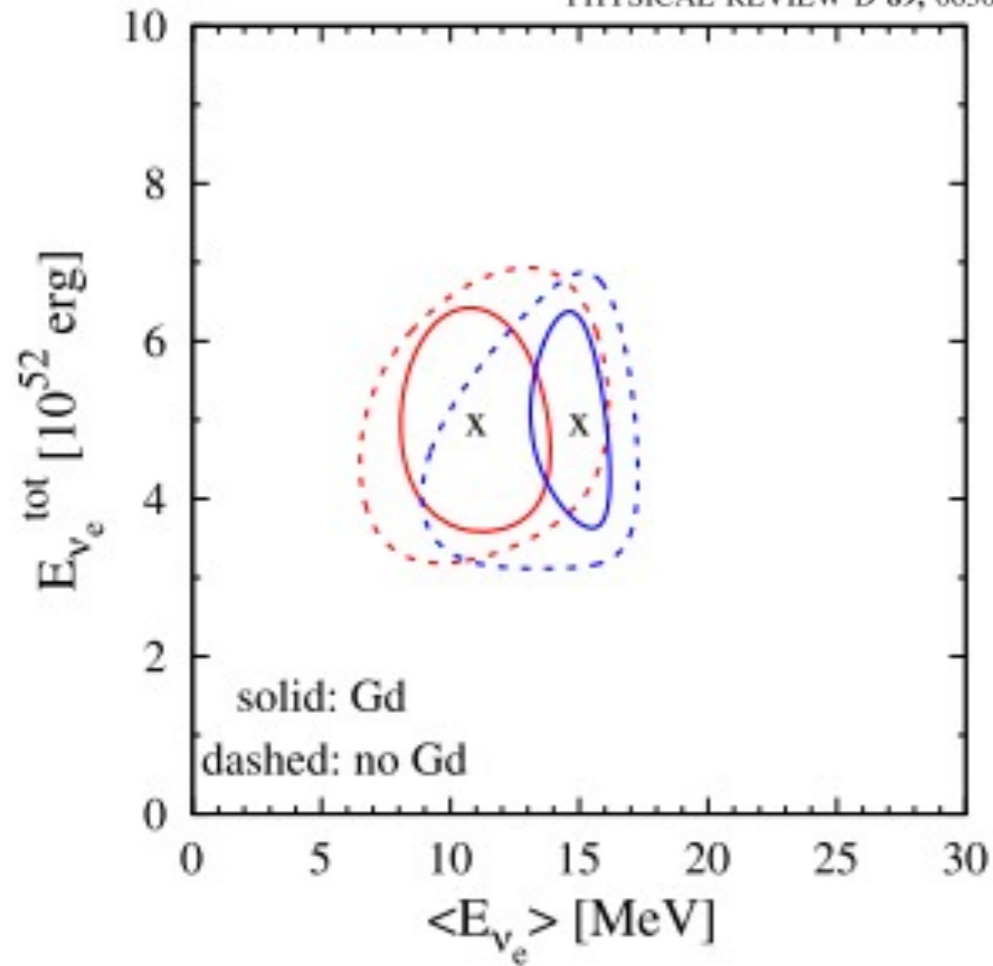
- 単独の検出器では ν_e が難しい
- OやCの反応, 近傍ならXMASS

SK + KamLANDの可能性

エネルギー決定精度

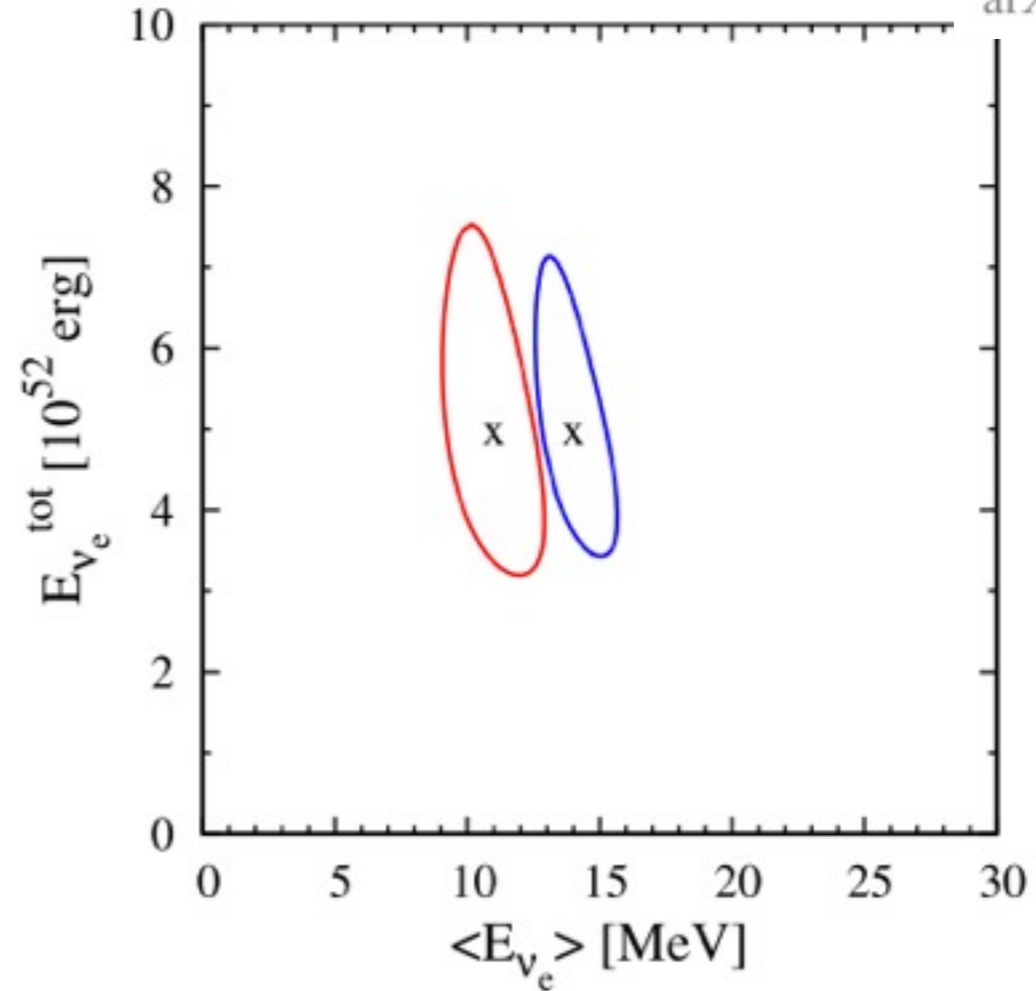
SK (+ 究極の液シン検出器)

PHYSICAL REVIEW D 89, 063007 (2014)



JUNO (+ 究極の水チェレンコフ検出器)

arXiv:1412.8425v1



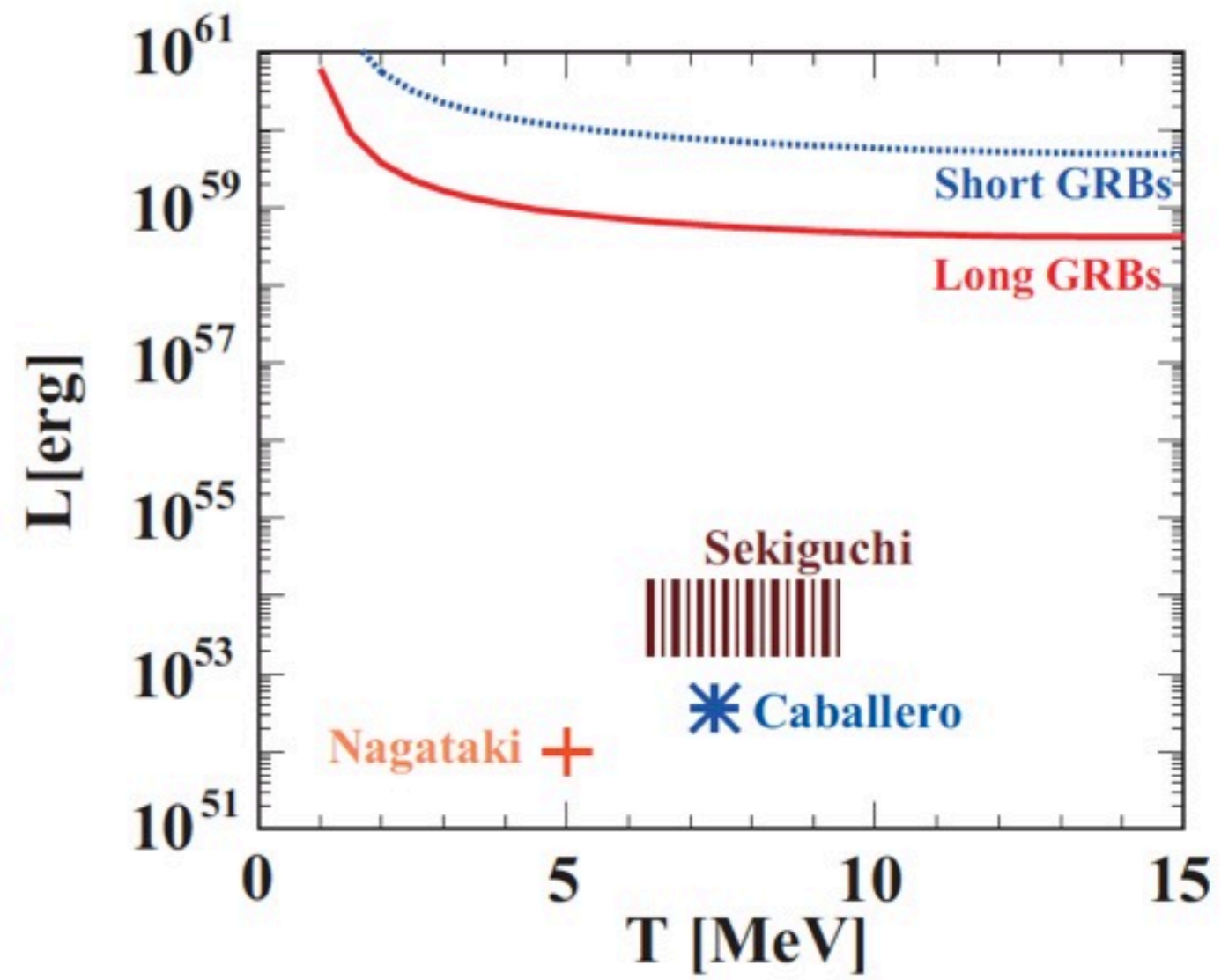
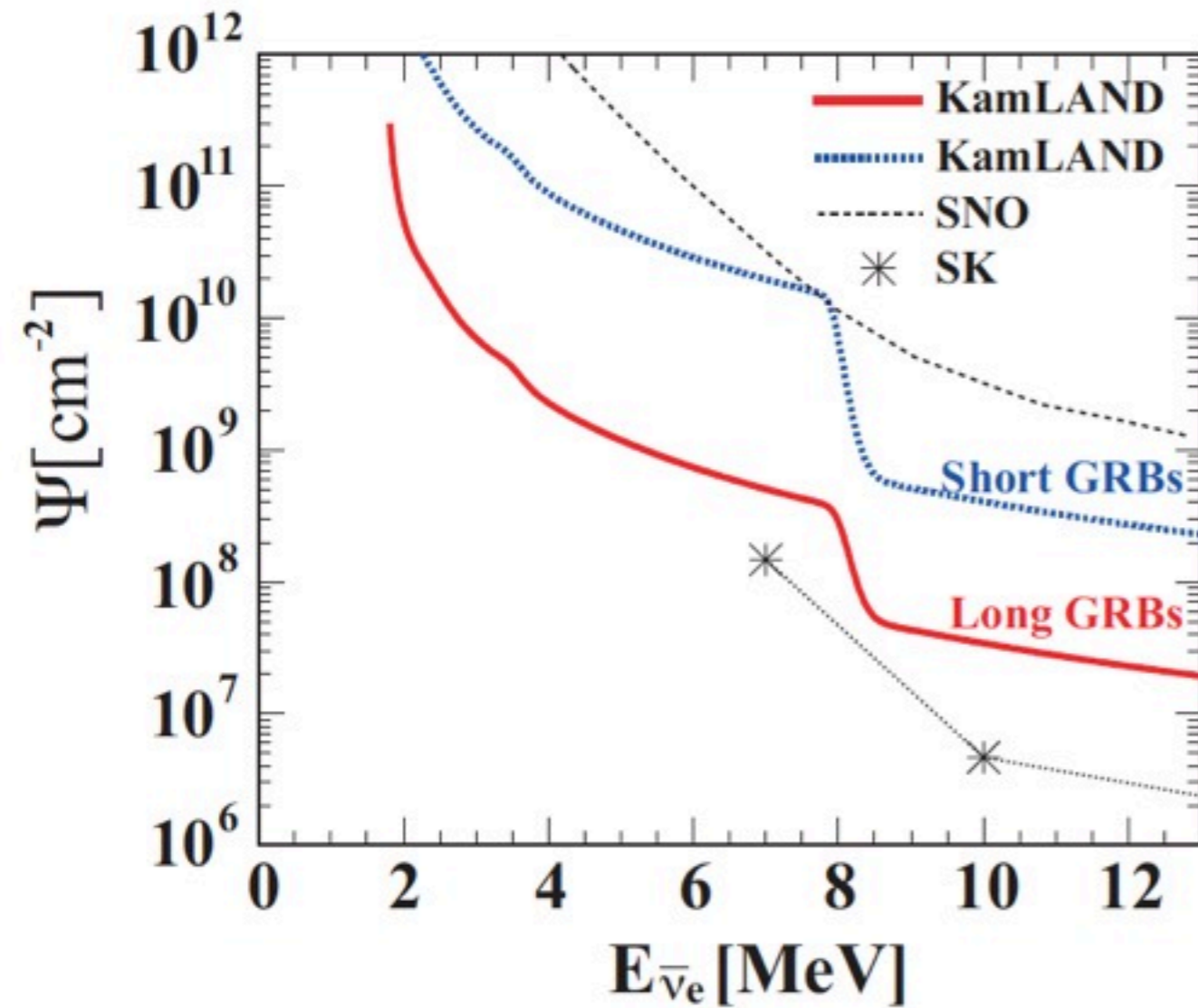
現実的な状態でのSK + KamLANDを検討

林田さんのポスター, 途中経過

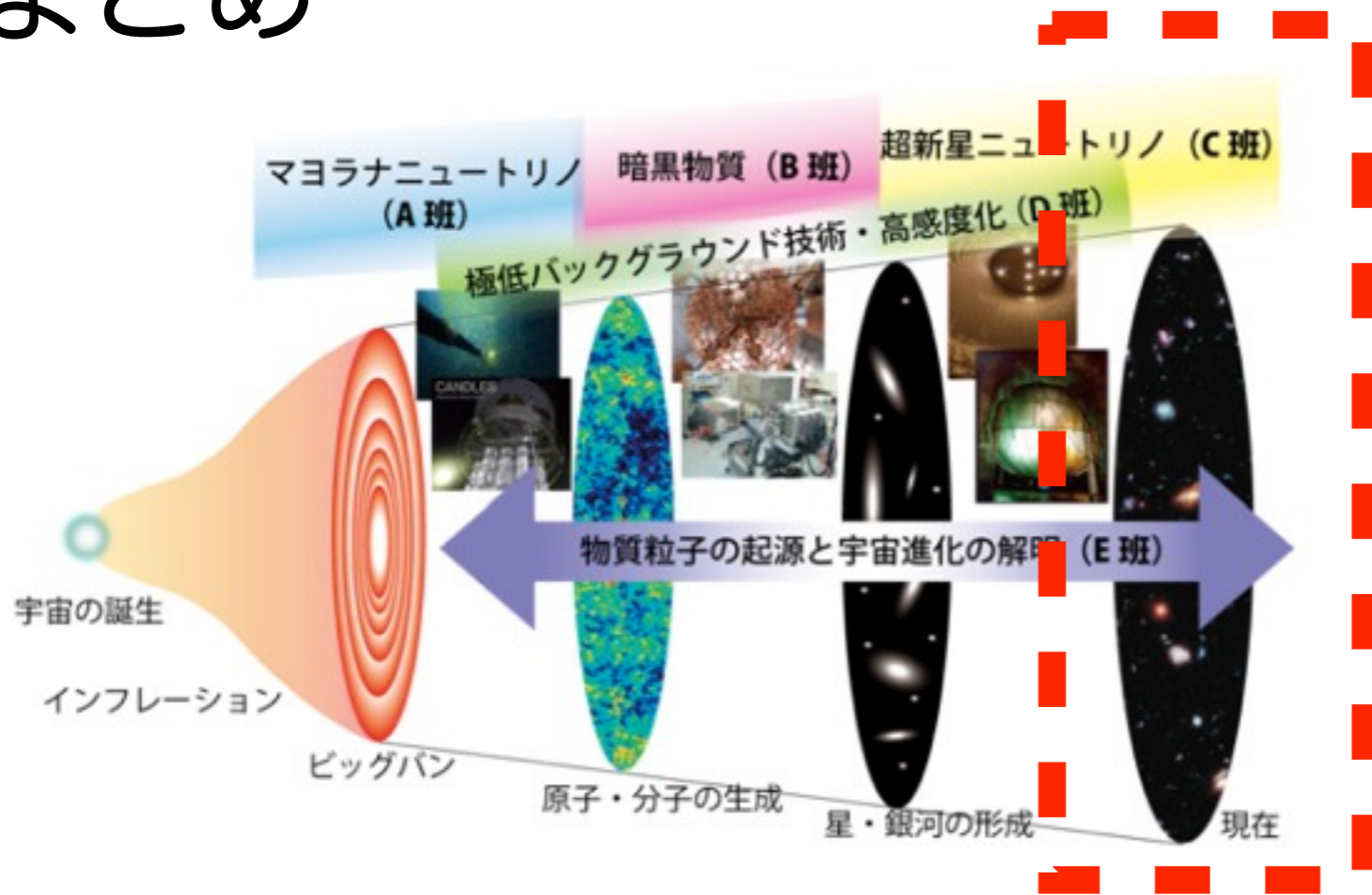
その他

KamLANDによるGRB起源ニュートリノ探索

arXiv:1503.02137



まとめ



- 天体活動の解明
- 重元素の起源

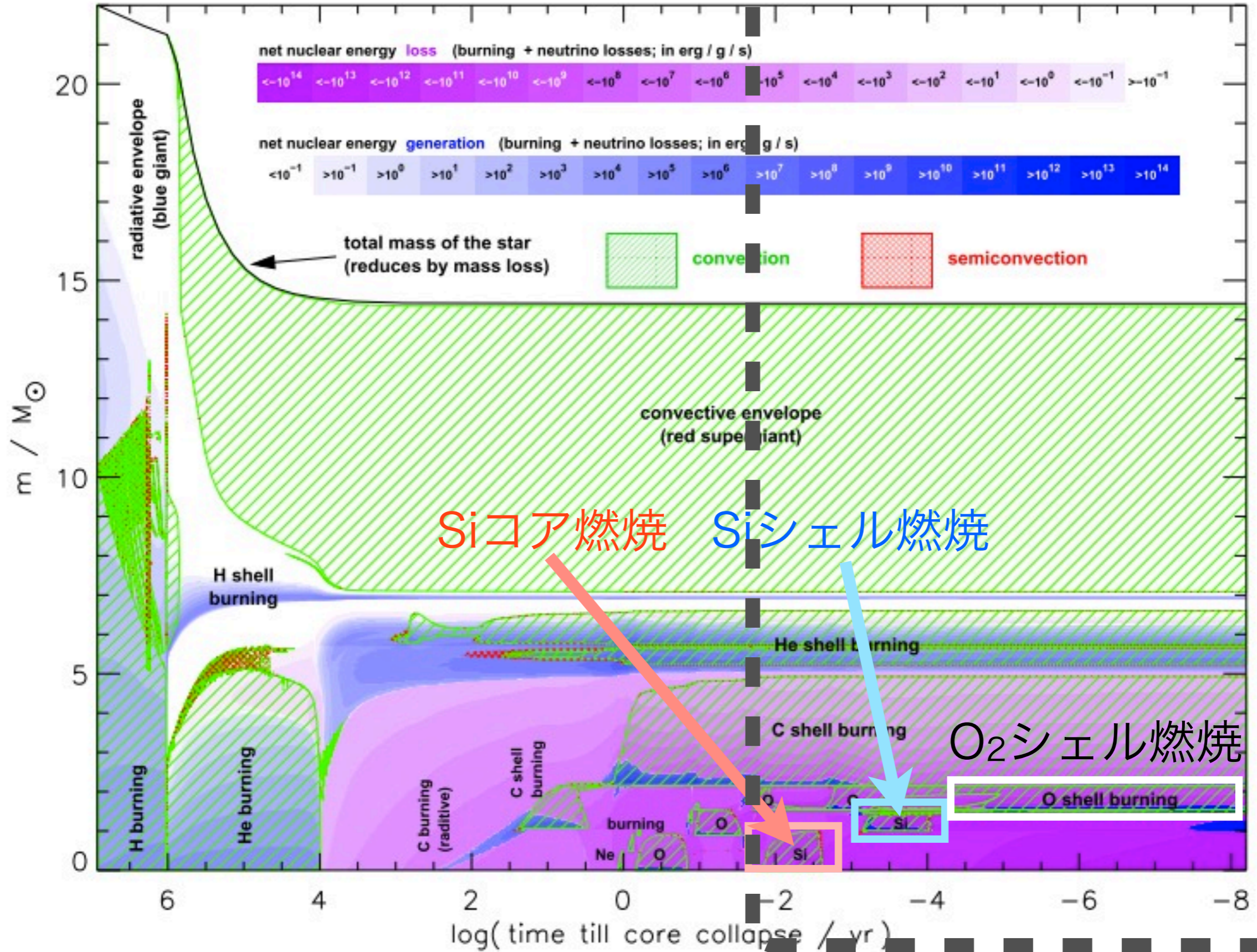
近傍超新星爆発へそなえた観測システム高度化

- 前兆 ν による爆発前アラーム

- SK, XMASS, KamLANDでの観測体制強化

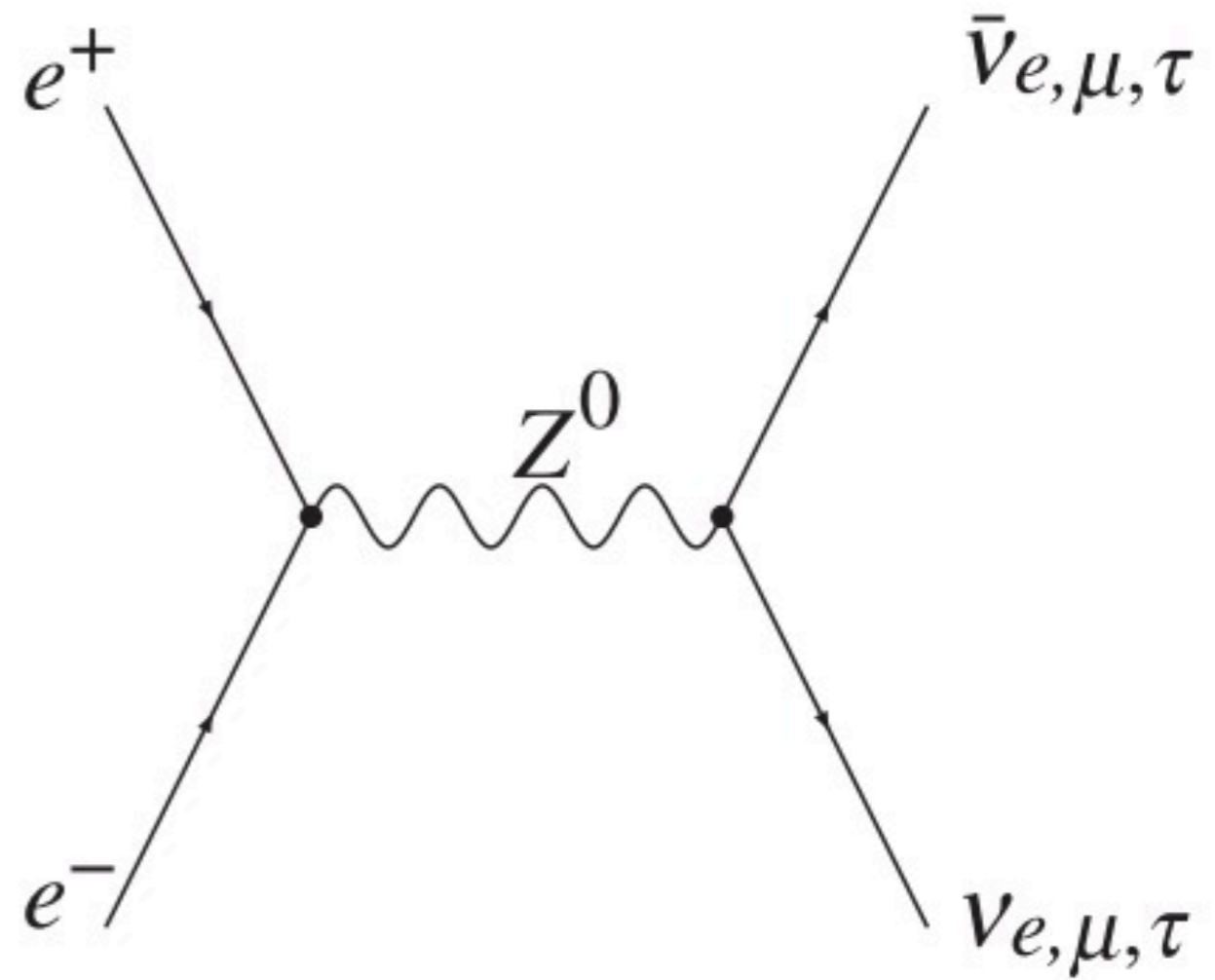
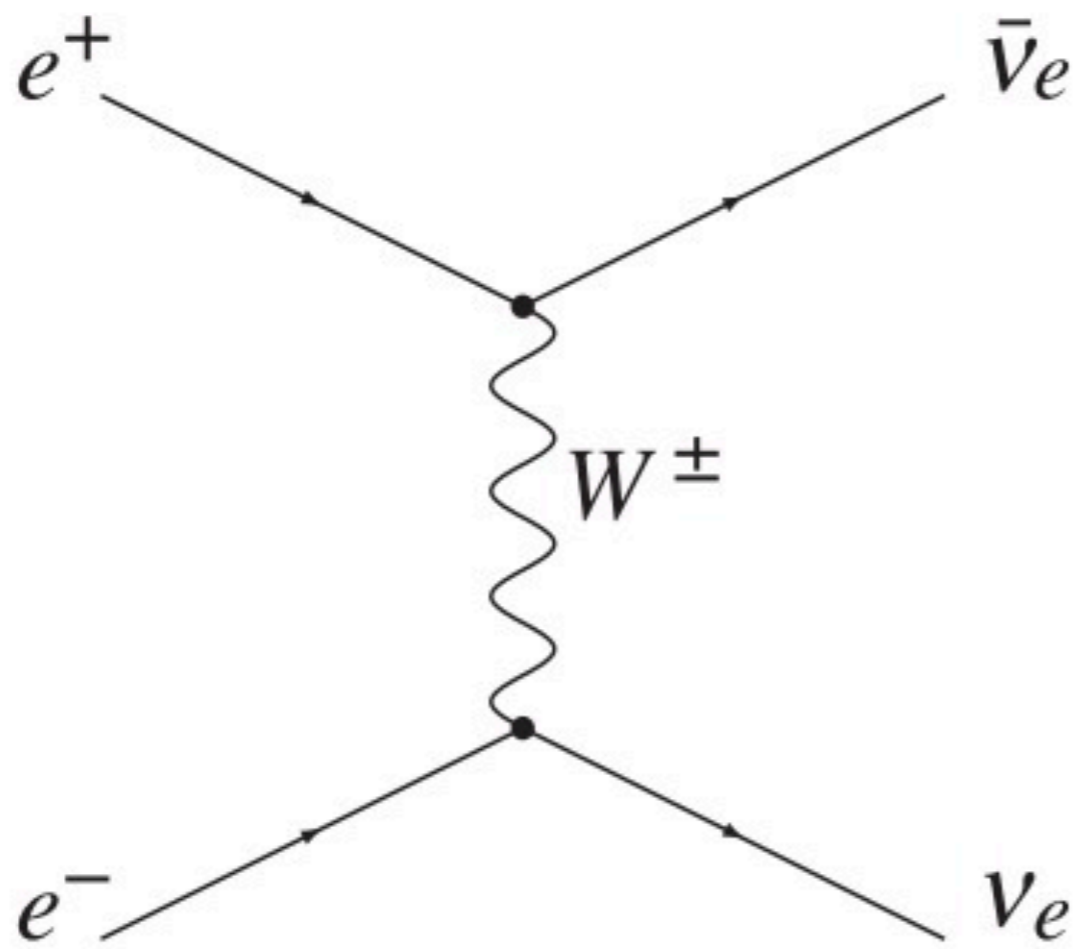
超新星爆発があれば全力でデータ解析

星構成の進化

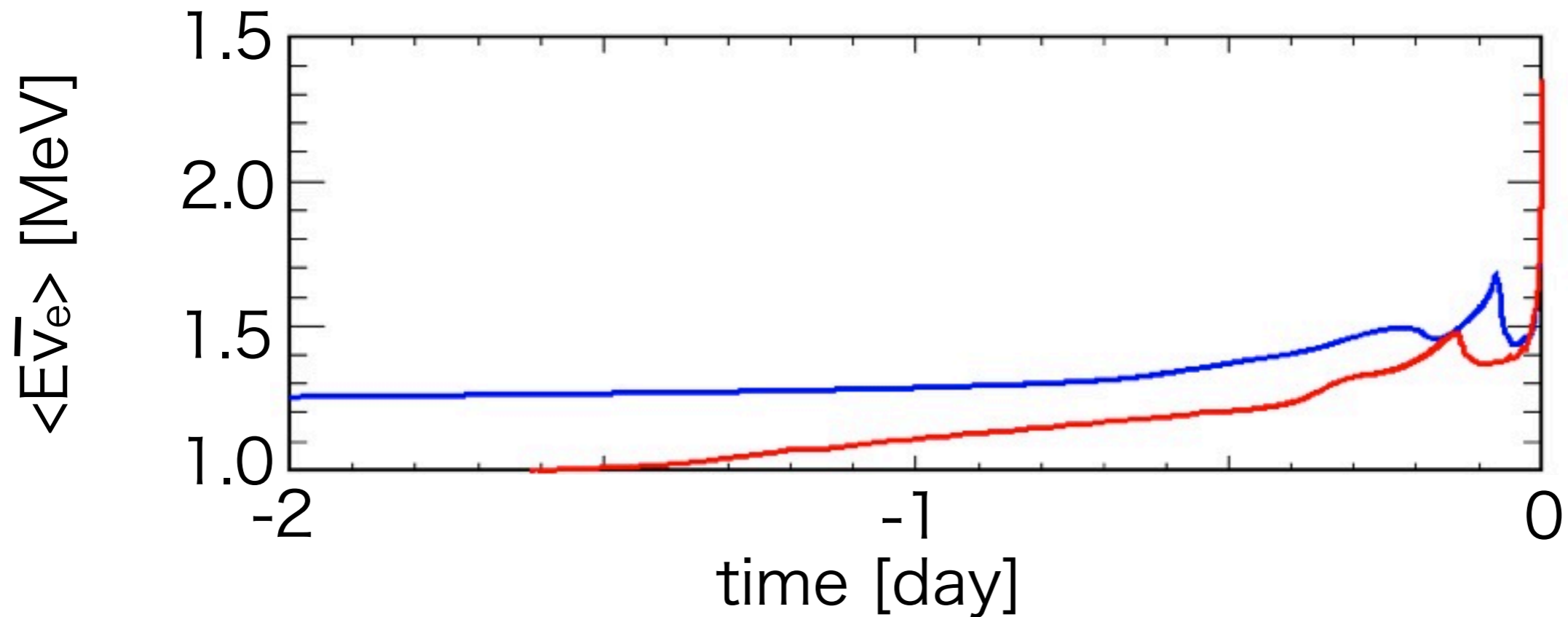
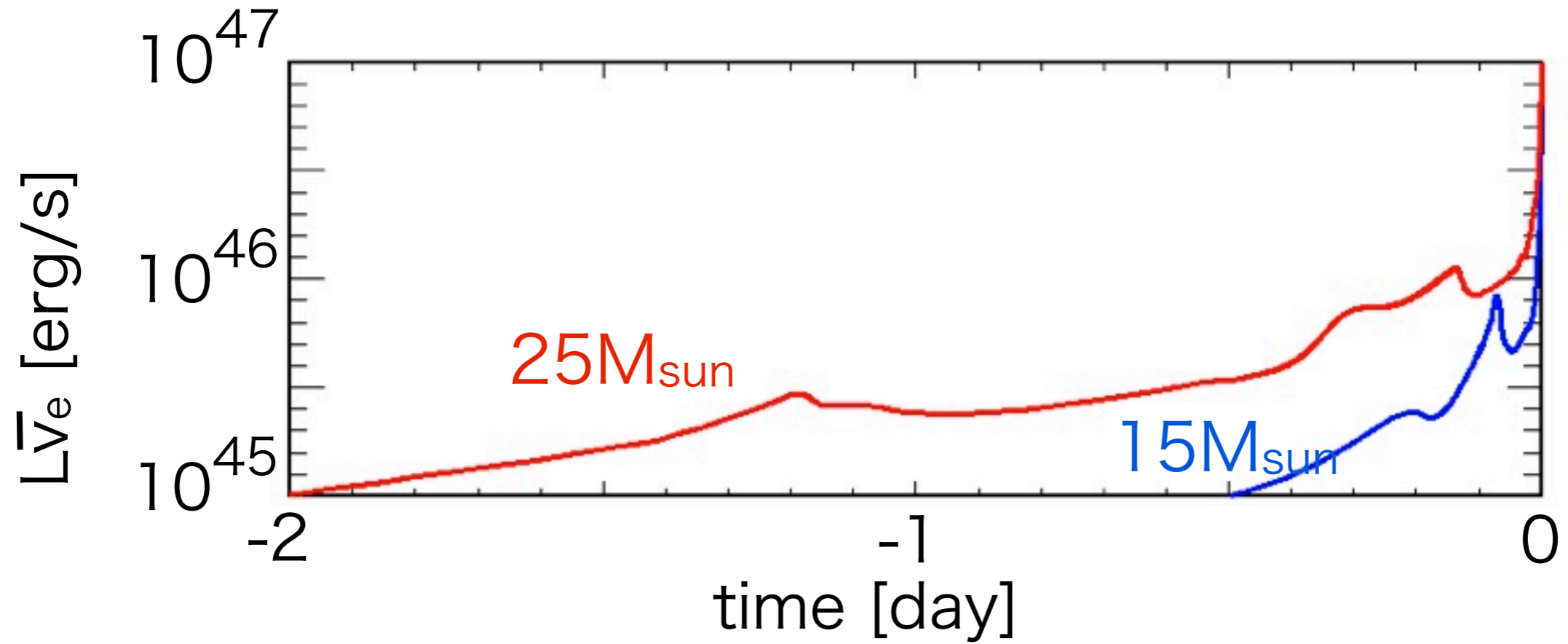


生成過程

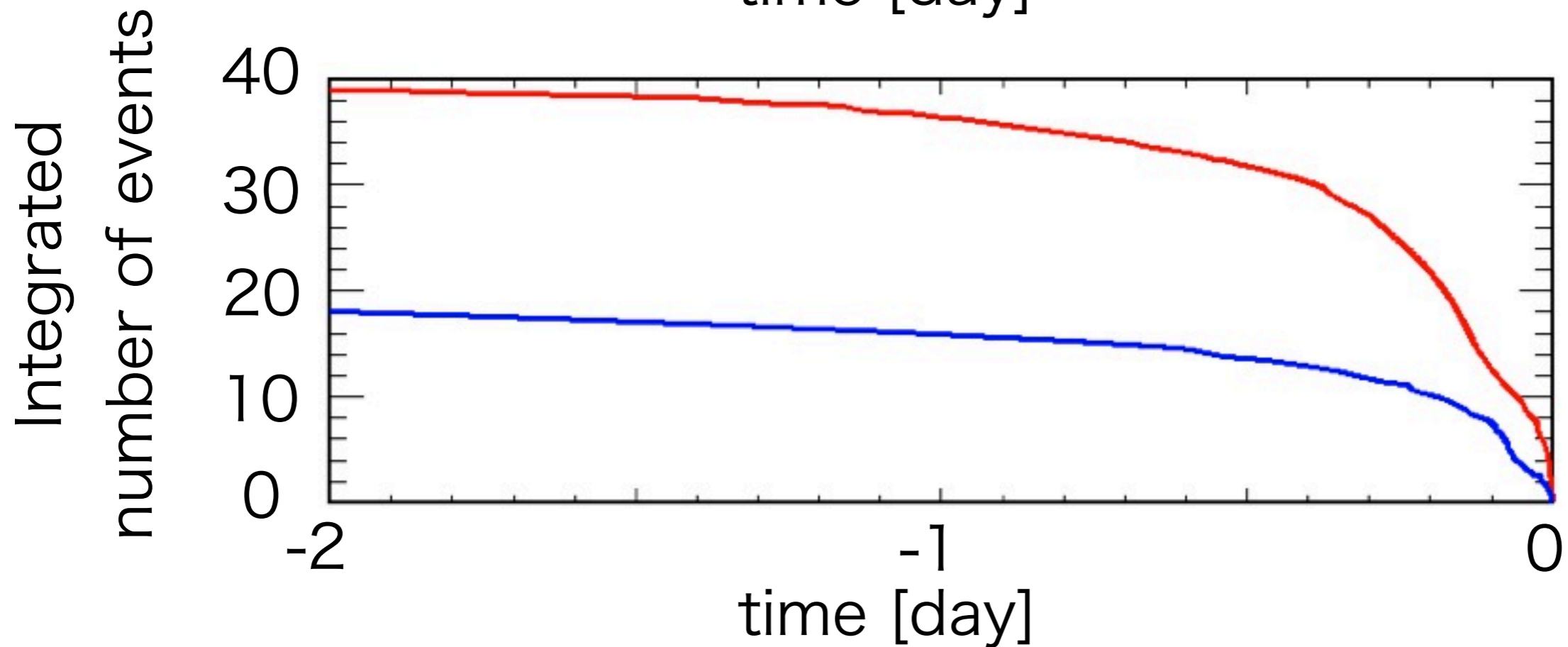
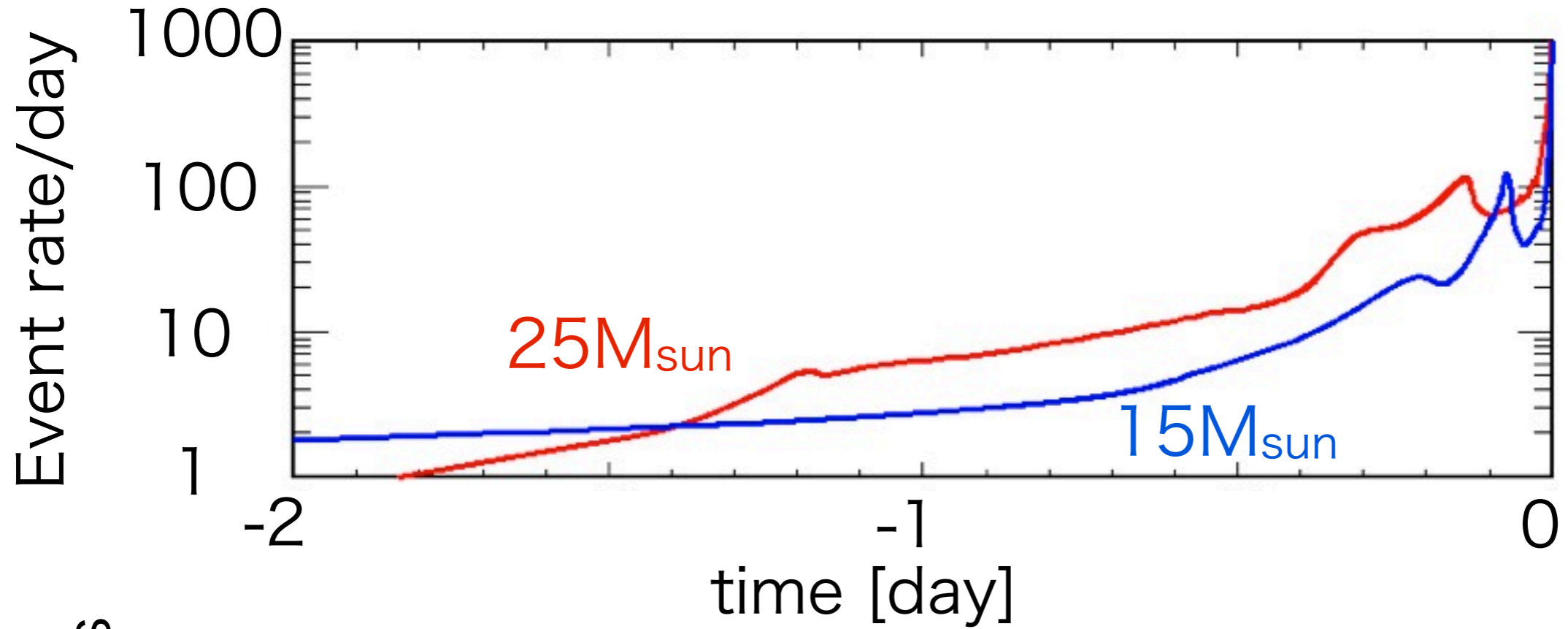
对生成



前兆ニュートリノ (Odrzywolekモデル)



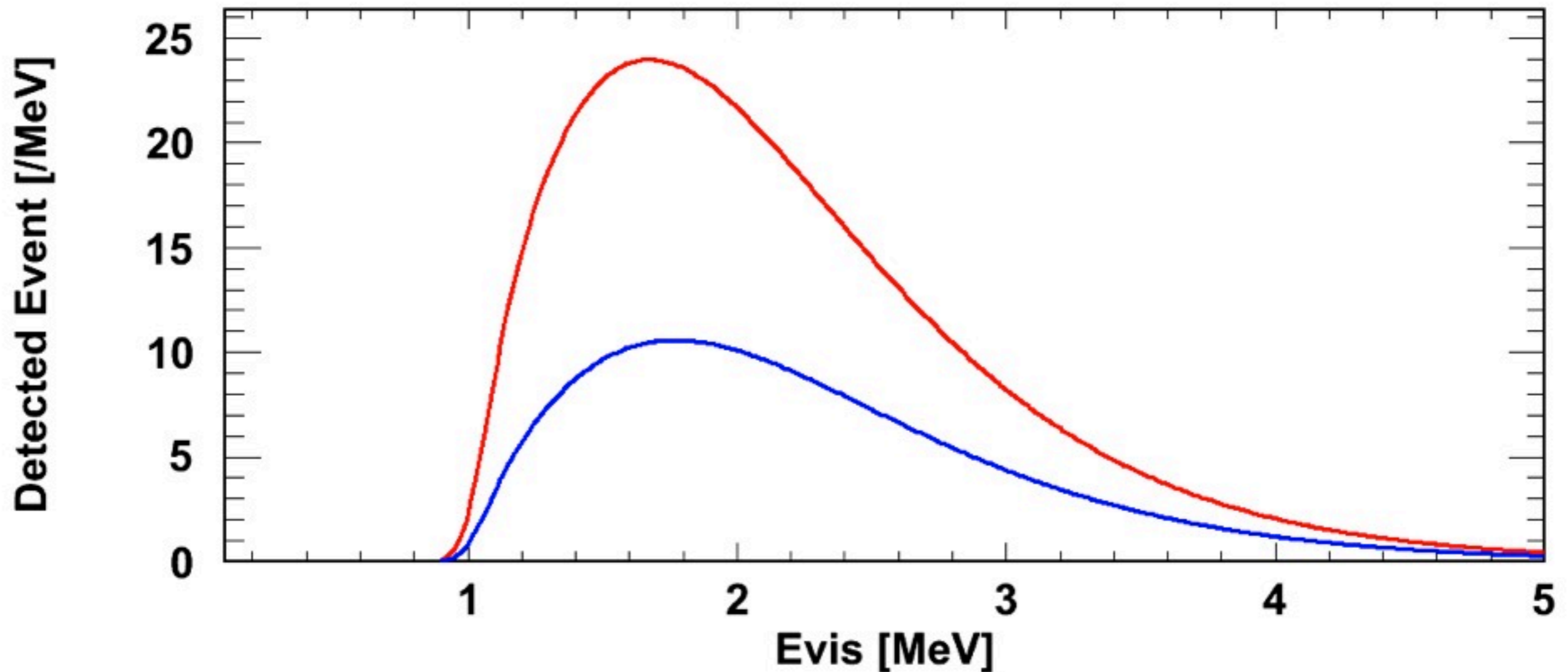
予想イベント数@KamLAND (d=200pc)



予想イベント数@KamLAND

$$17.7 \left(\frac{200 \text{ pc}}{d} \right)^2 \left(\frac{N_T}{5.98 \times 10^{31}} \right) \left(\frac{\langle \epsilon_s \rangle}{0.7} \right) \left(\frac{\epsilon_{\text{live}}}{0.903} \right)$$

$$38.4 \left(\frac{200 \text{ pc}}{d} \right)^2 \left(\frac{N_T}{5.98 \times 10^{31}} \right) \left(\frac{\langle \epsilon_s \rangle}{0.7} \right) \left(\frac{\epsilon_{\text{live}}}{0.903} \right)$$



ニュートリノ振動

$$F = pF_{\bar{\nu}_e} + (1 - p)F_{\bar{\nu}_x}$$

p : survival probability

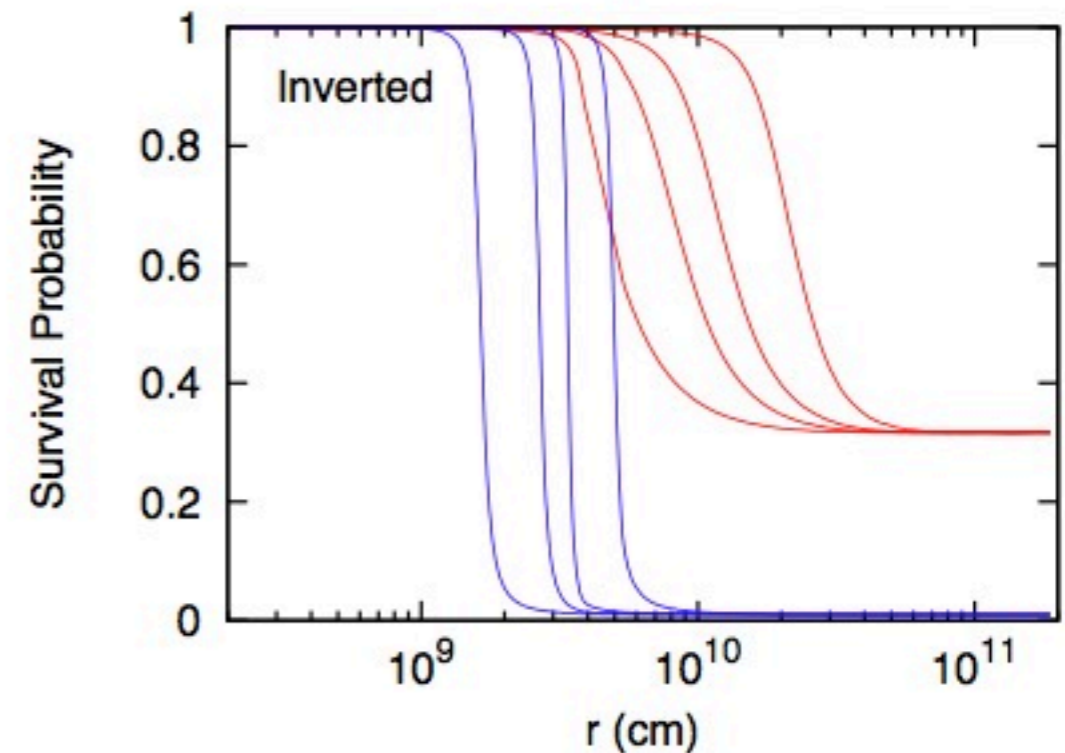
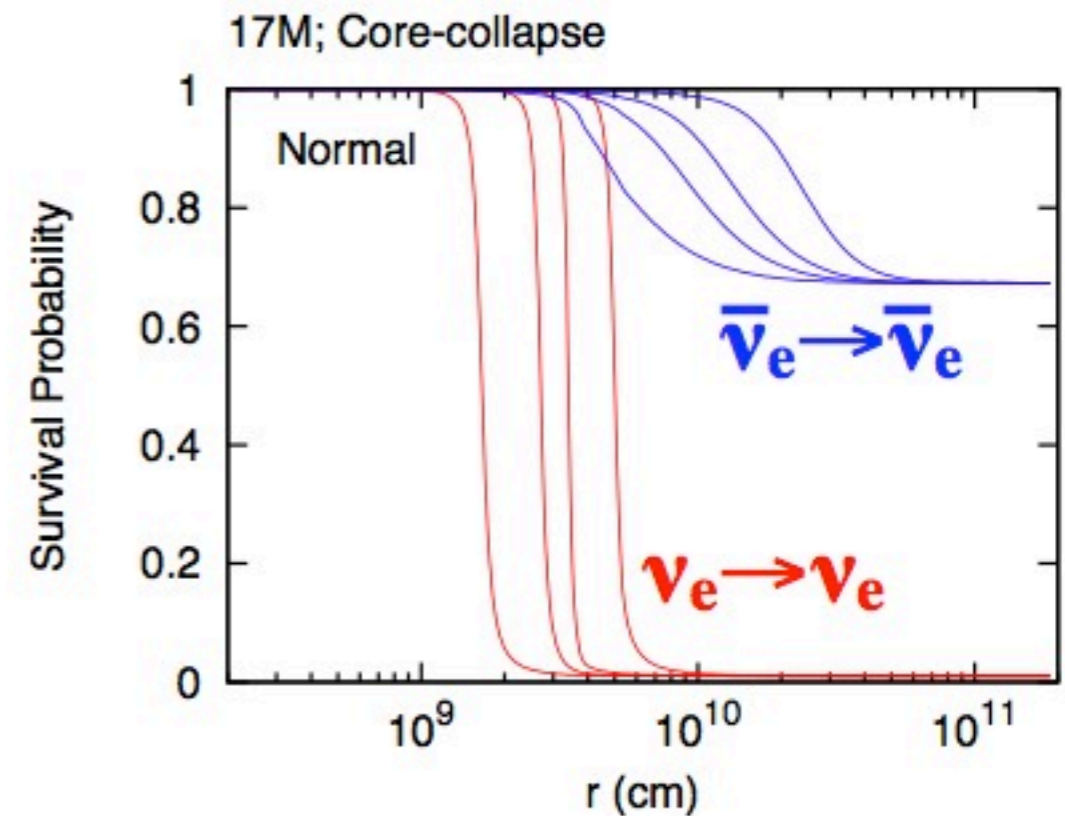
標準質量階層構造: $p=0.69$

逆質量階層構造: $p=0$

Table 3

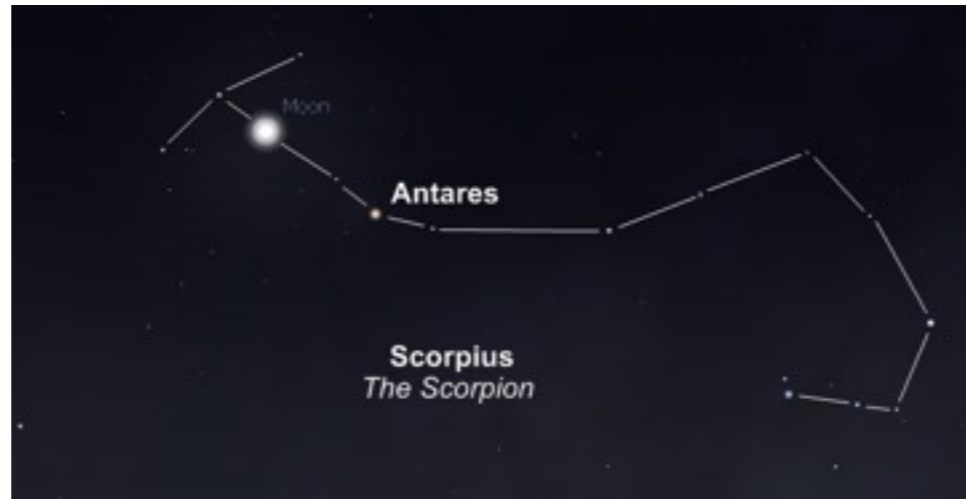
Fraction of given neutrino flavor emitted by pair-annihilation, used in formula (9)

Burning phase	ν_e ($\bar{\nu}_e$) fraction (%)	$\nu_{\mu,\tau}/\nu_e$ ratio	Average ν_x energy (MeV)
C	42.5	1:11.4	0.71
Ne	39.8	1:7.8	0.99
O	38.9	1:6.9	1.13
Si	36.3	1:5.4	1.85



Astroparticle Physics

Volume 21, Issue 3, June 2004, Pages 303–313



さそり座アンタレス(150pc)



ペガサス座イプシロン星
(210pc)



とも座π(250pc)

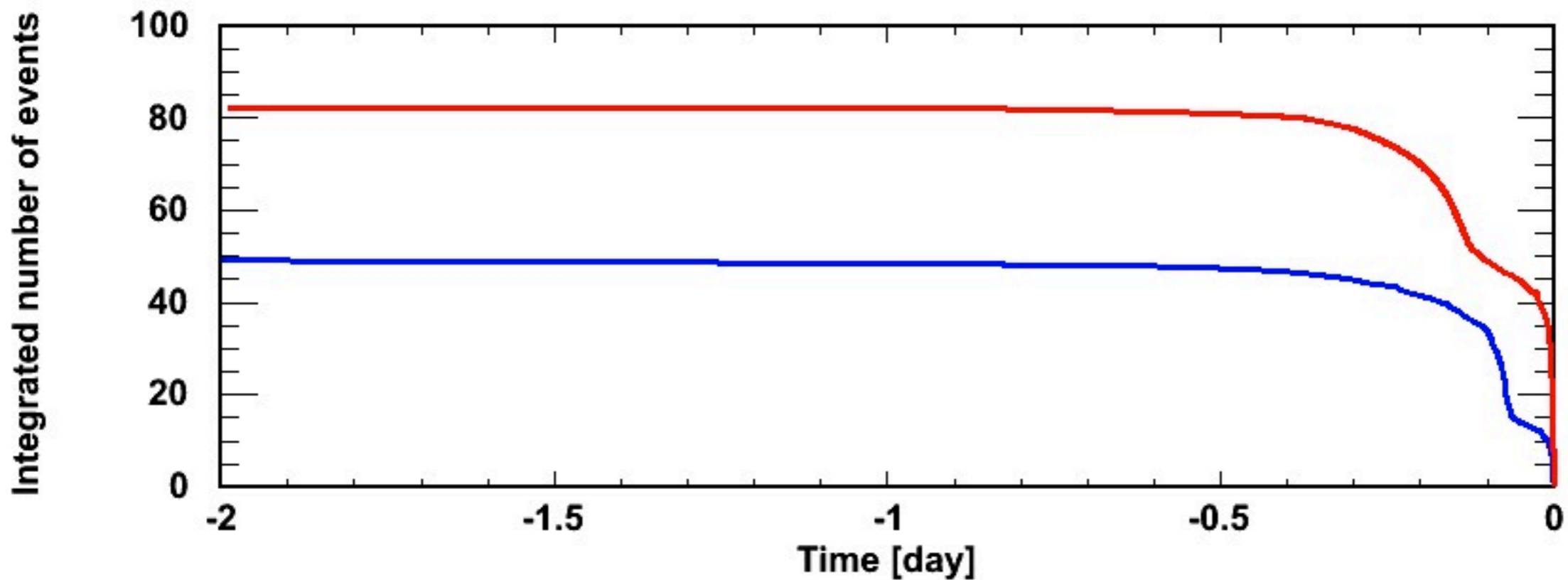


(340pc)

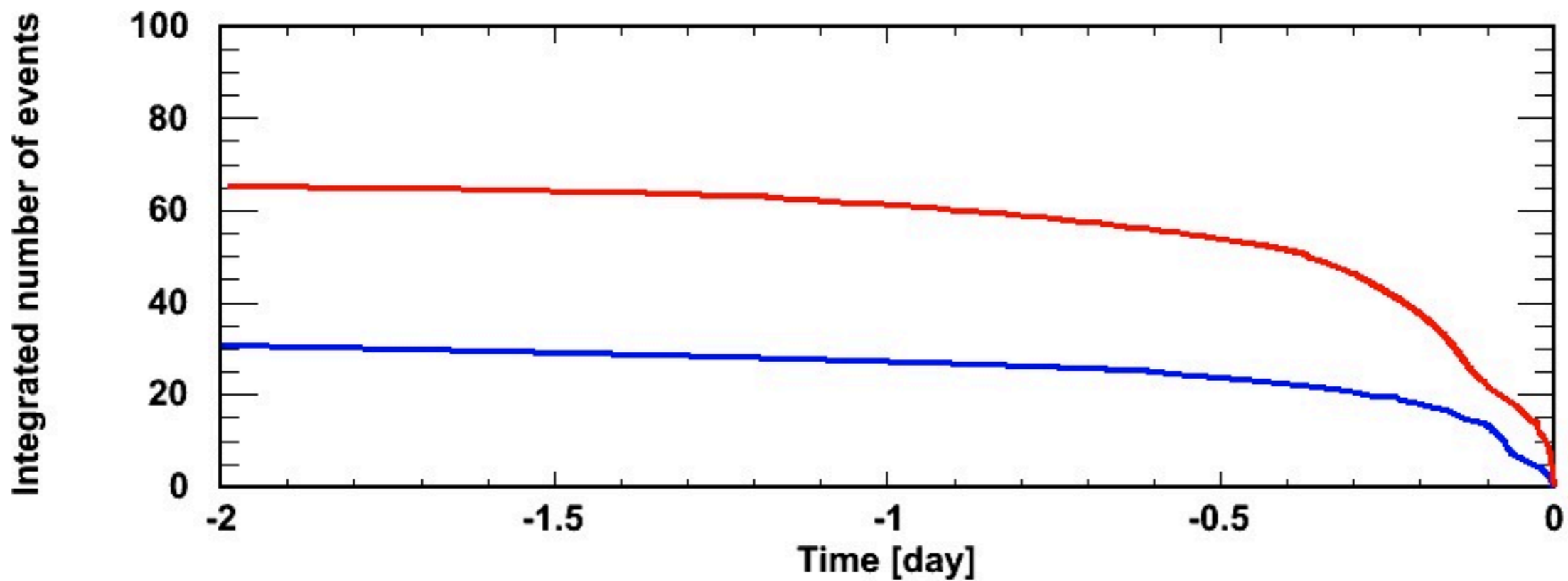


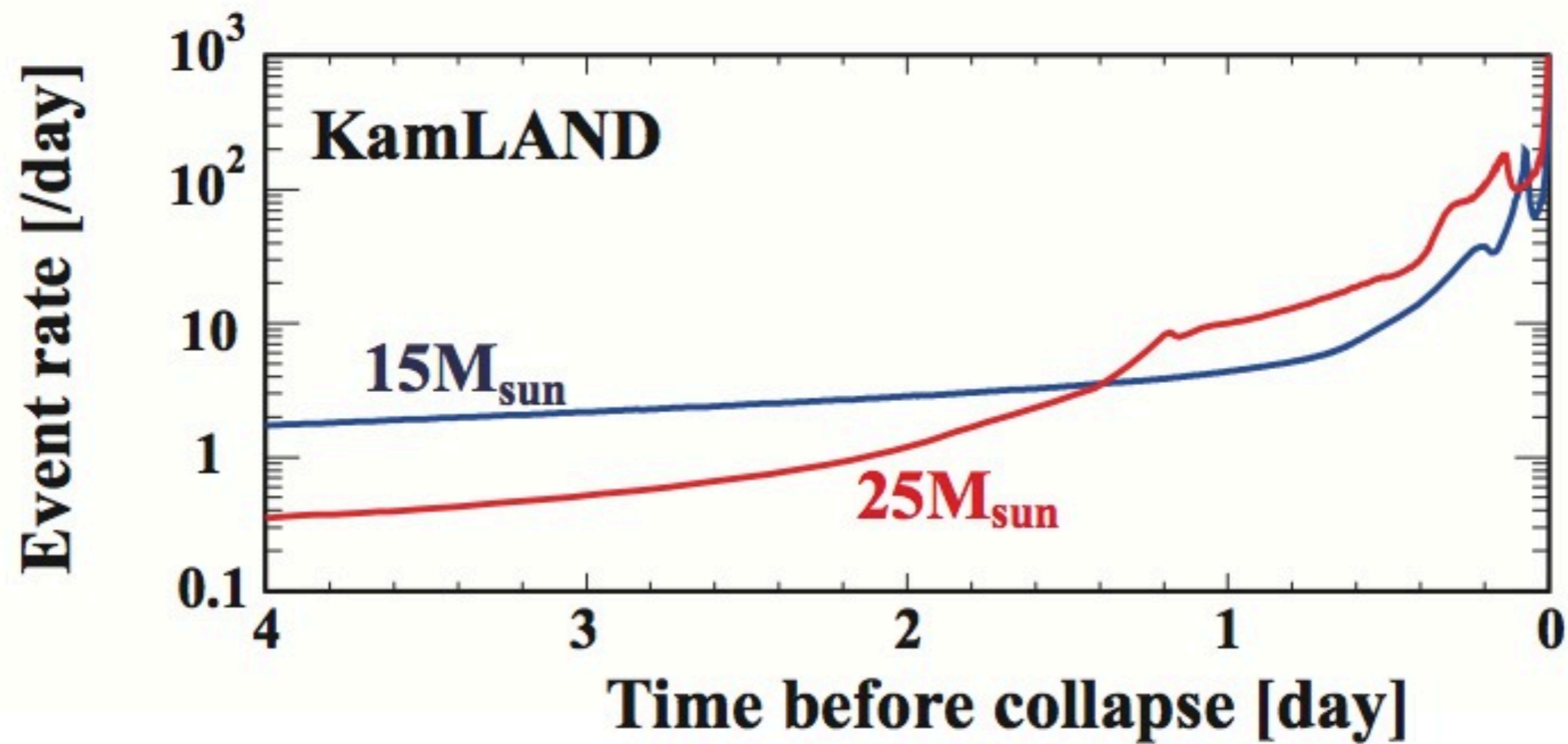
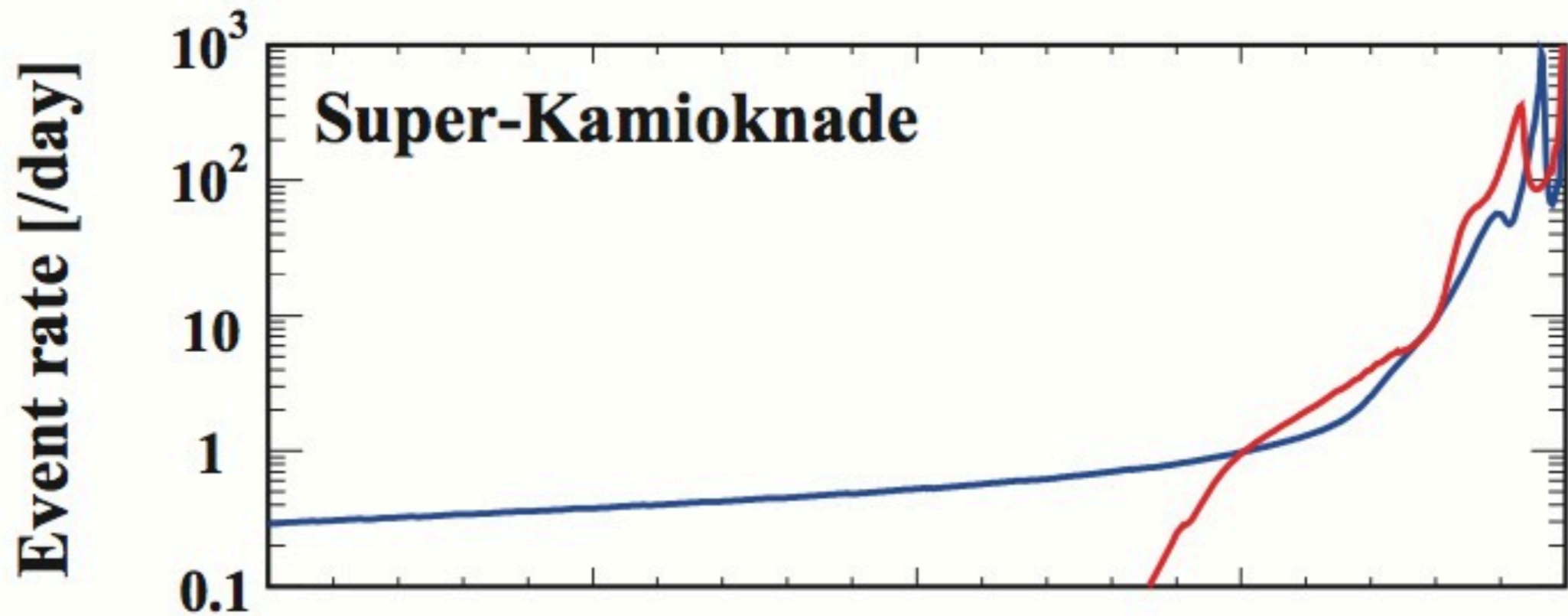
おおいぬ座シグマ星(340pc)

Super-Kamiokande

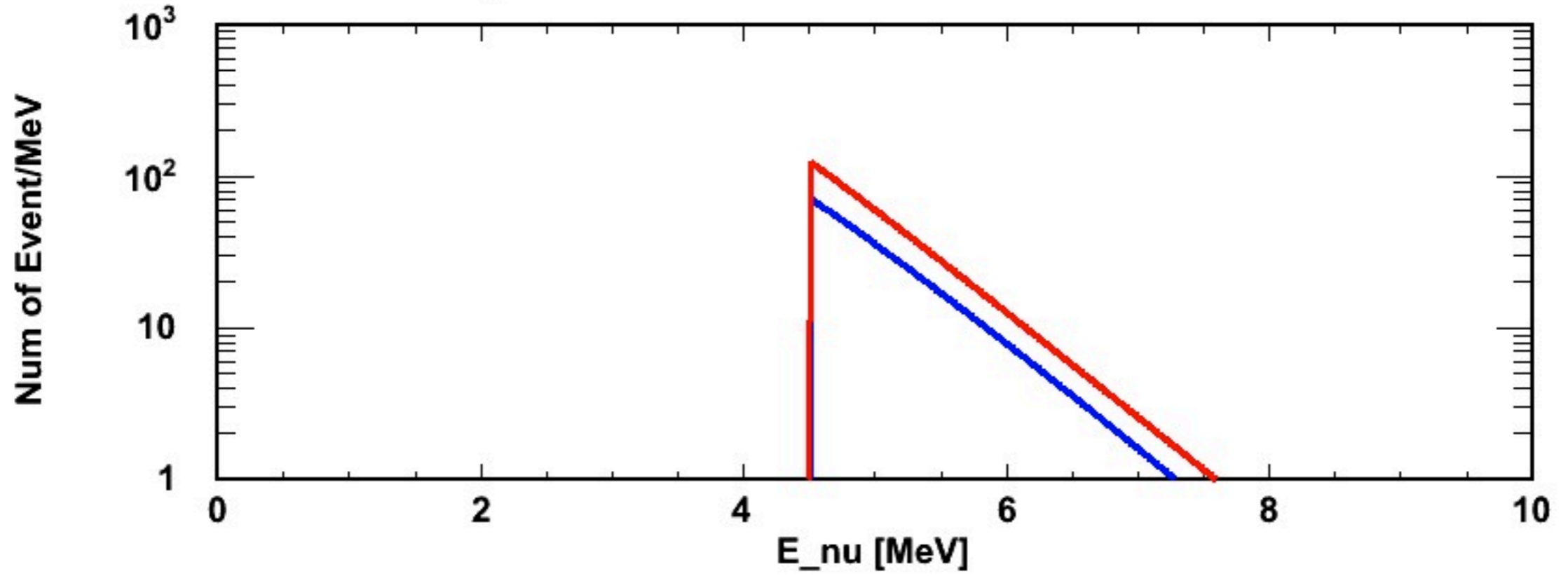


KamLAND

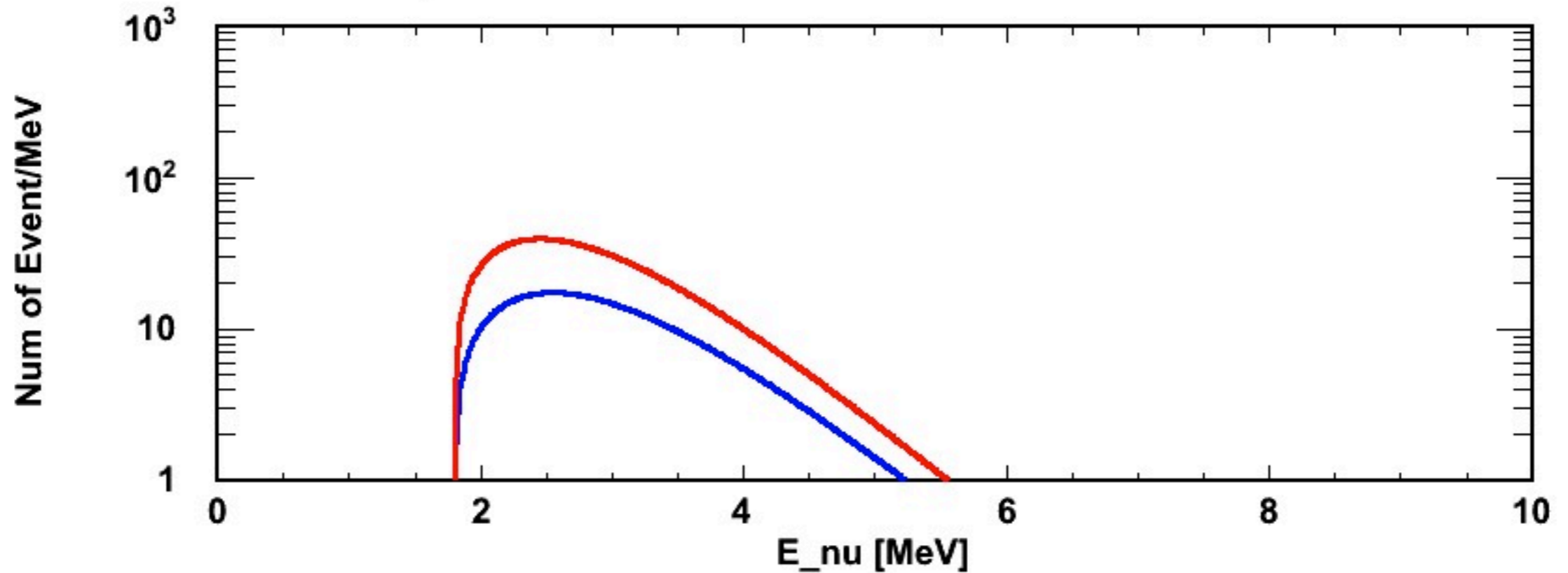




Super-Kamiokande



KamLAND



KamLAND: detection principle

Anti-neutrino detection: **delayed coincidence measurement**

- **time-spatial correlated events**
- Reduction of background events

