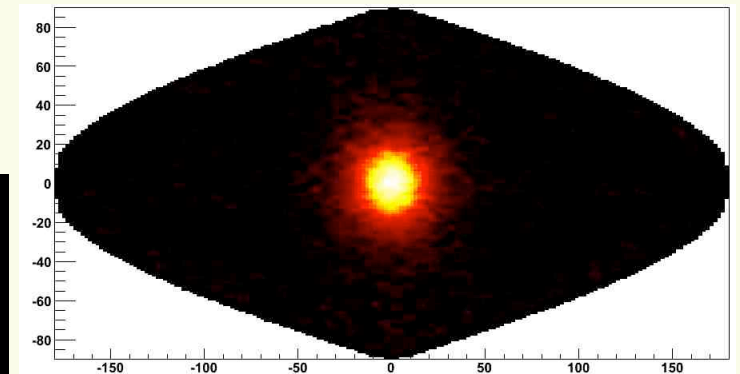
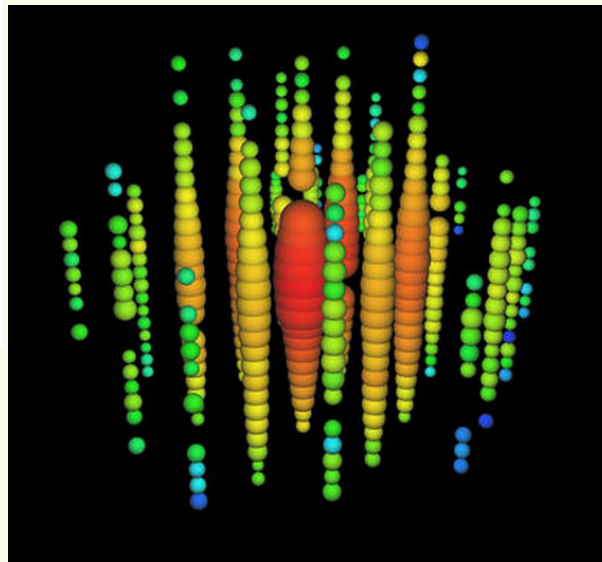
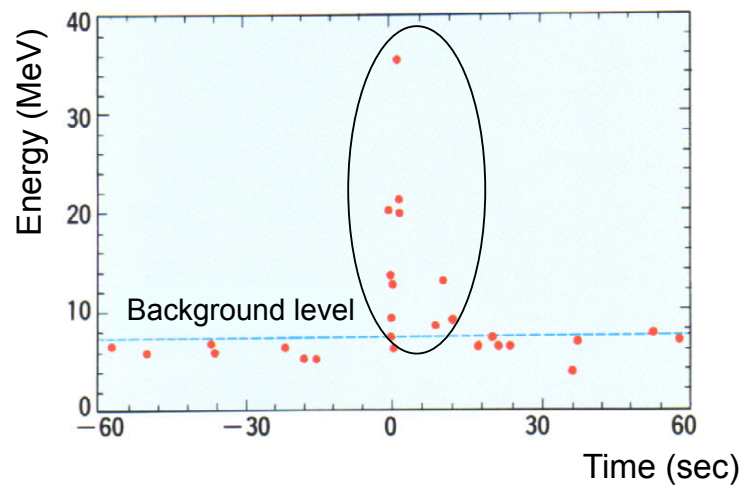


天体ニュートリノ研究の現状と展望

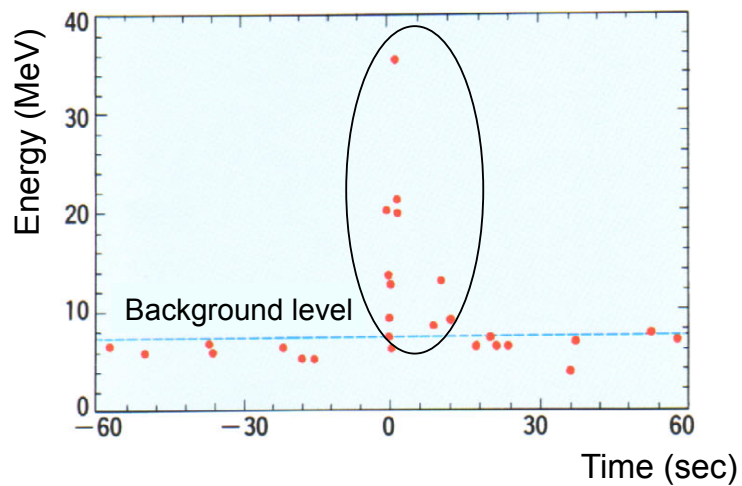


岡山大学・小汐由介

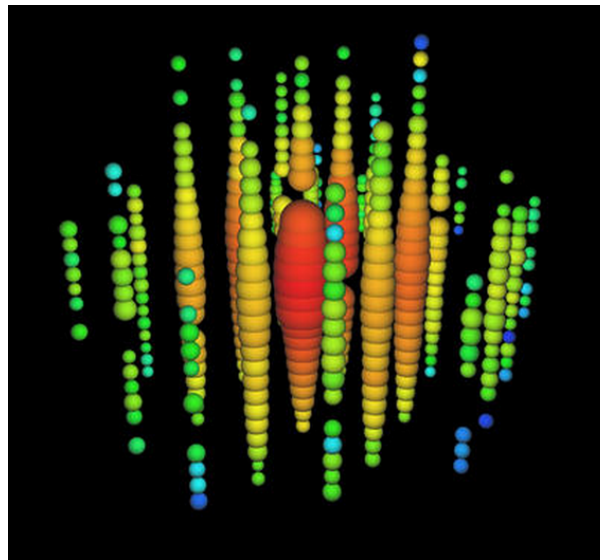
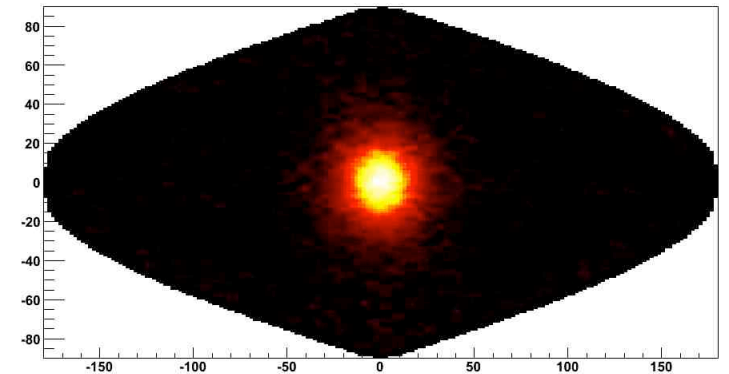
日本物理学会シンポジウム／2017年9月12日／宇都宮大学

これまでに観測された天体ニュートリノ

超新星ニュートリノ

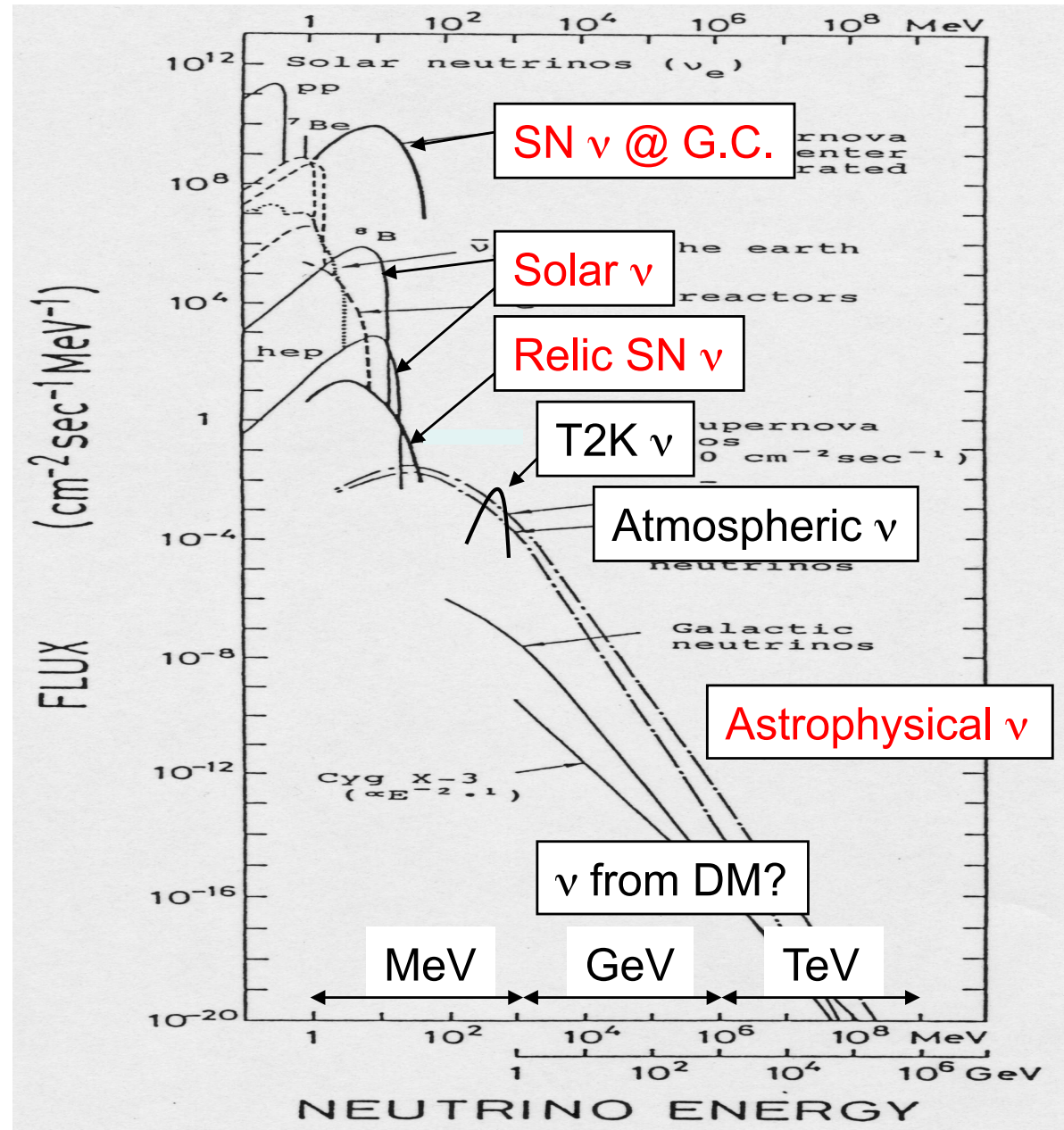


太陽ニュートリノ

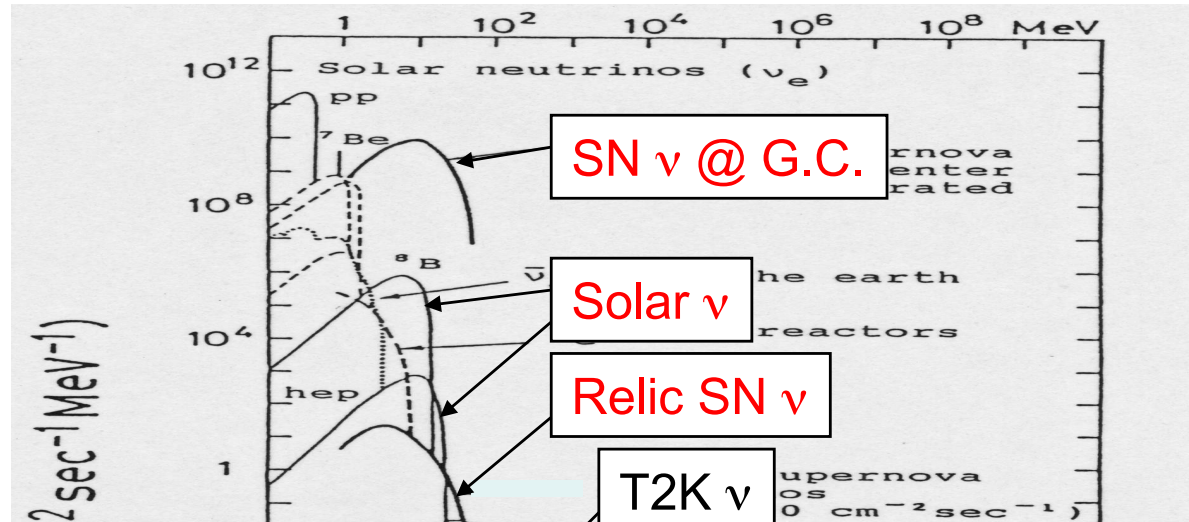


高エネルギー天体ニュートリノ

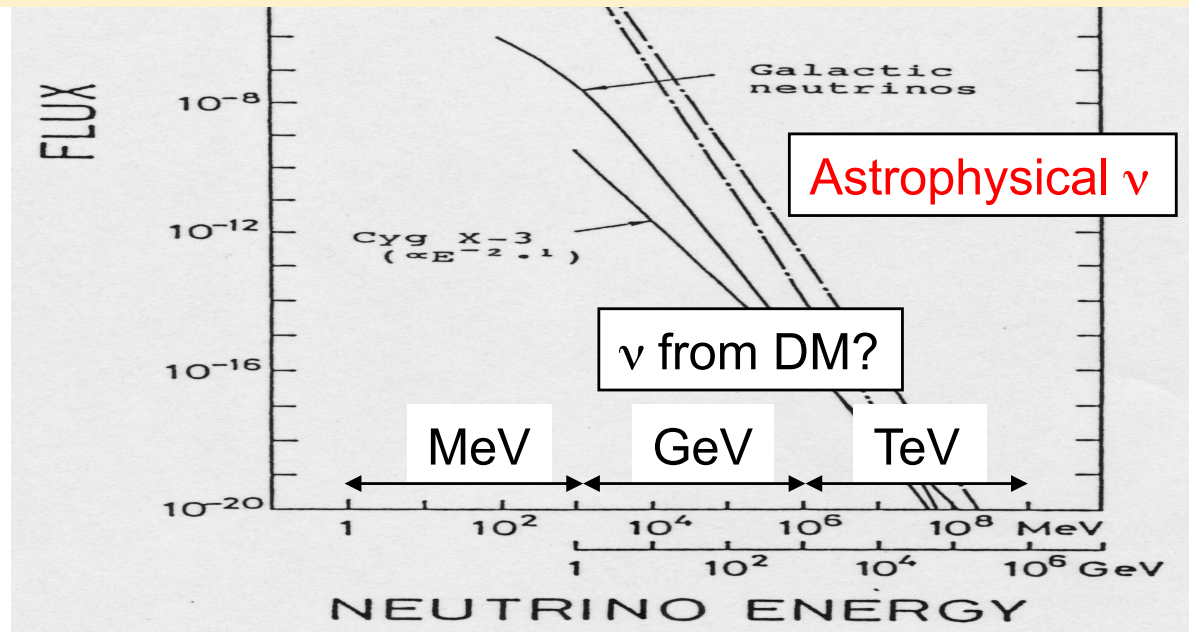
様々なニュートリノ源



天体ニュートリノ



超新星ニュートリノを中心に



2017年はSN1987Aの30周年記念の年

東京大学小柴ホール 2月12-13日, 2017

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=2935>

バースデーケーキ



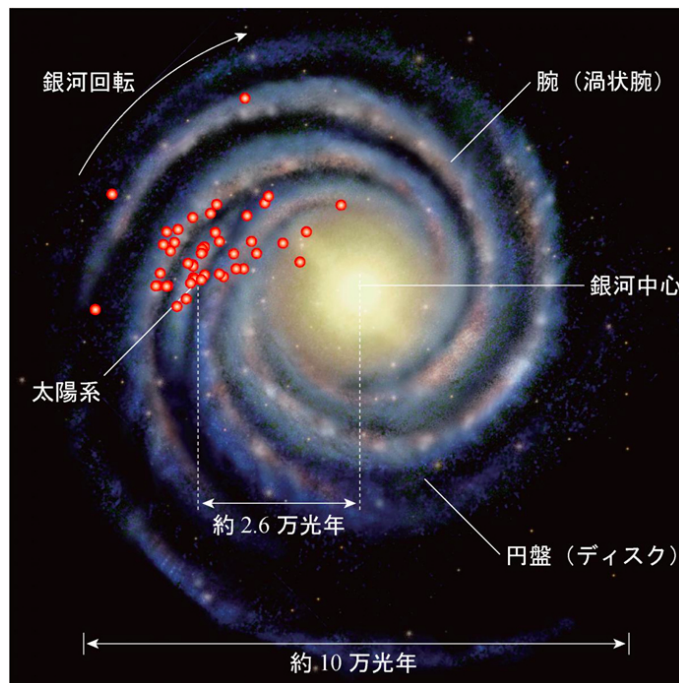
肉眼で見えるほど明るい超新星爆発は約400年ぶり
その後も30年間起こっていない

No chance for Supernova neutrino search for next hundred's years?

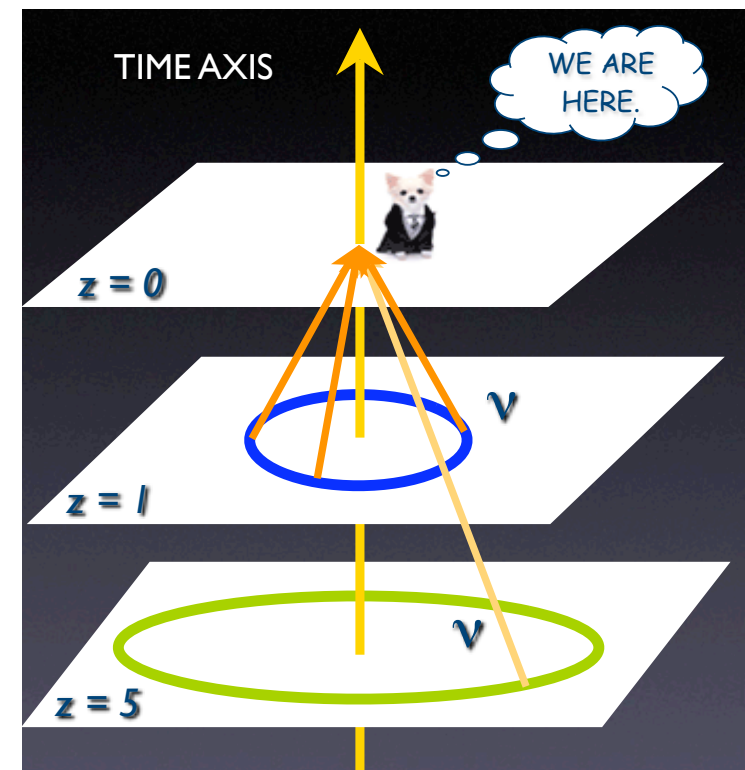


We believe, yes!

銀河系内超新星爆発
(a few per century)



超新星背景ニュートリノ

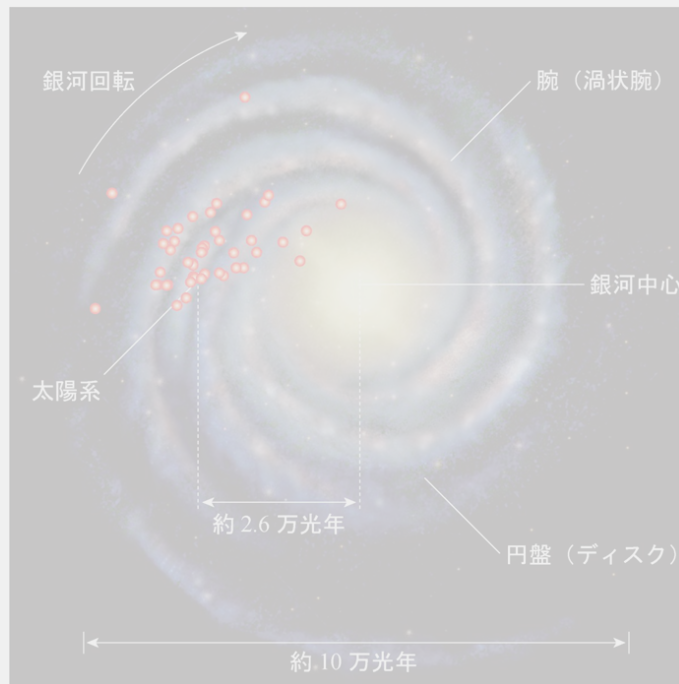


No chance for Supernova neutrino search for next hundred's years?

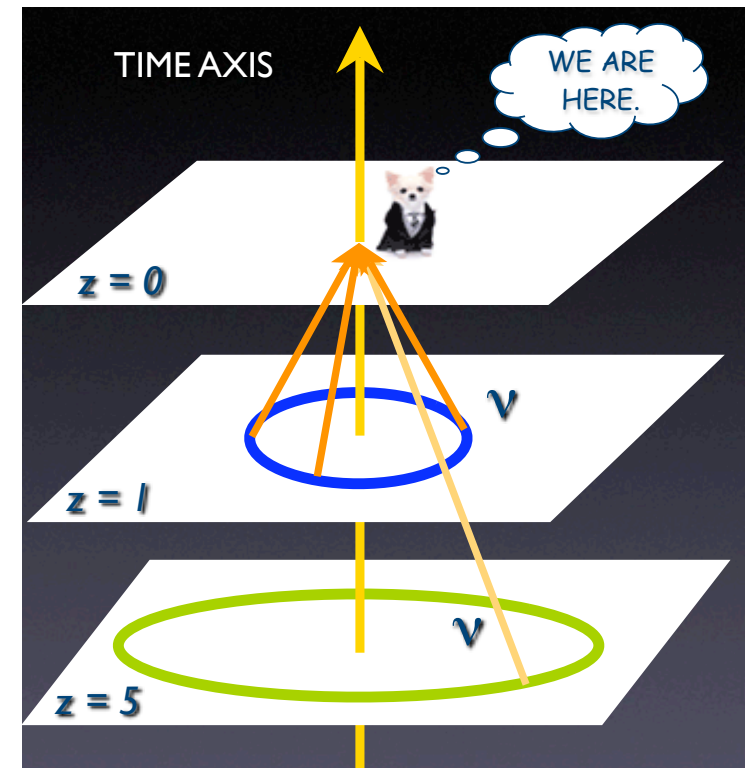


We believe, yes!

銀河系内超新星爆発
(a few per century)



超新星背景ニュートリノ



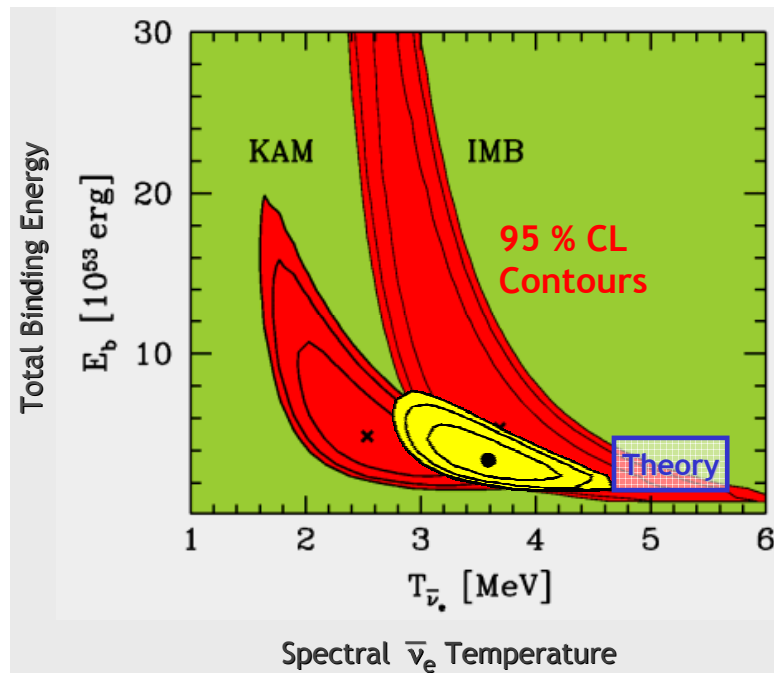
Physics Motivation

大質量星形成の歴史探索

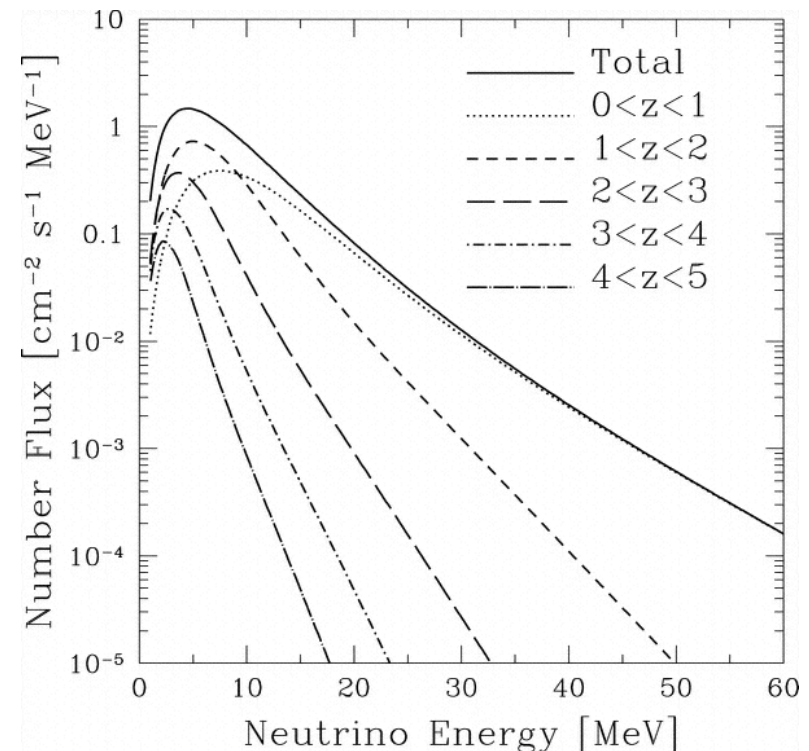
$$\frac{d\phi}{dE_\nu}(E_\nu) = \int_0^\infty \underbrace{[(1+z)\varphi[E_\nu(1+z)]]}_{\text{超新星爆発で放射されるニュートリノスペクトル}} \underbrace{[R_{SN}(z)]}_{\text{超新星爆発の頻度}} \left[\left| \frac{c dt}{dz} \right| dz \right]$$

超新星爆発で放射されるニュートリノスペクトル

超新星爆発の頻度



Jegerlehner, Neubig, Raffelt, PRD 54 (1996) 1194

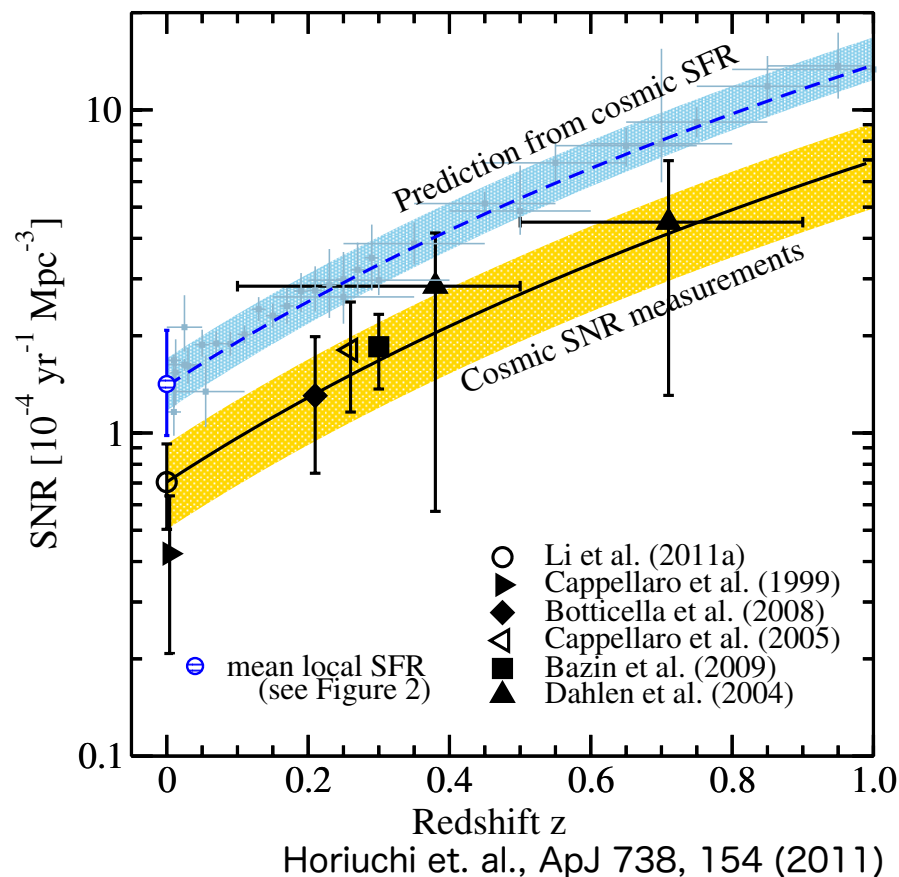


S.Ando, ApJ. 607; 20-31, 2004

Physics Motivation

超新星爆発の頻度

観測された超新星残骸から見積もった超新星の頻度は、SFRから予測される頻度に比べて半分くらいしかない。



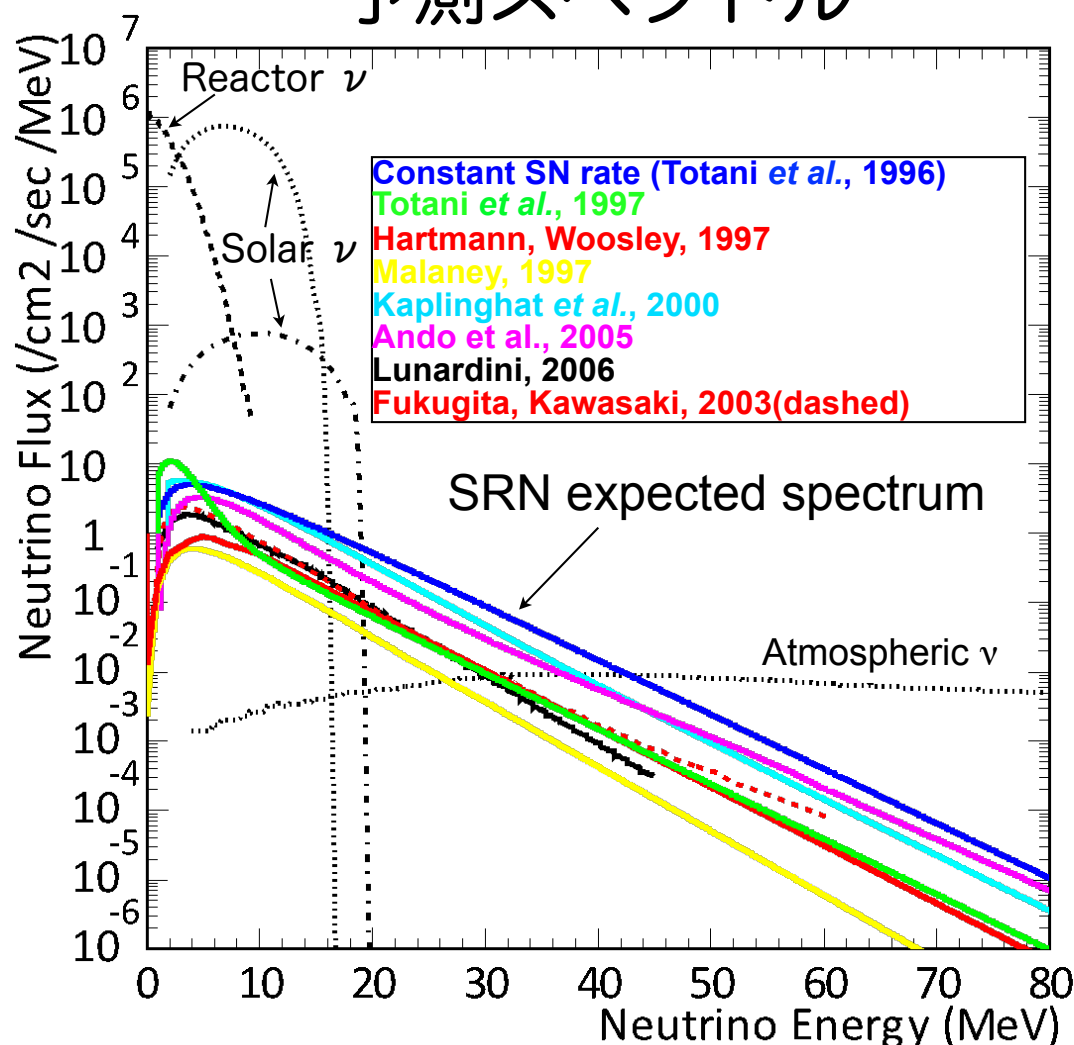
- ・明るさが暗い超新星があるのか？
- ・光を遮るものがあって見えないのか？

超新星背景ニュートリノの
観測が重要

観測の現状

超新星背景ニュートリノ探索

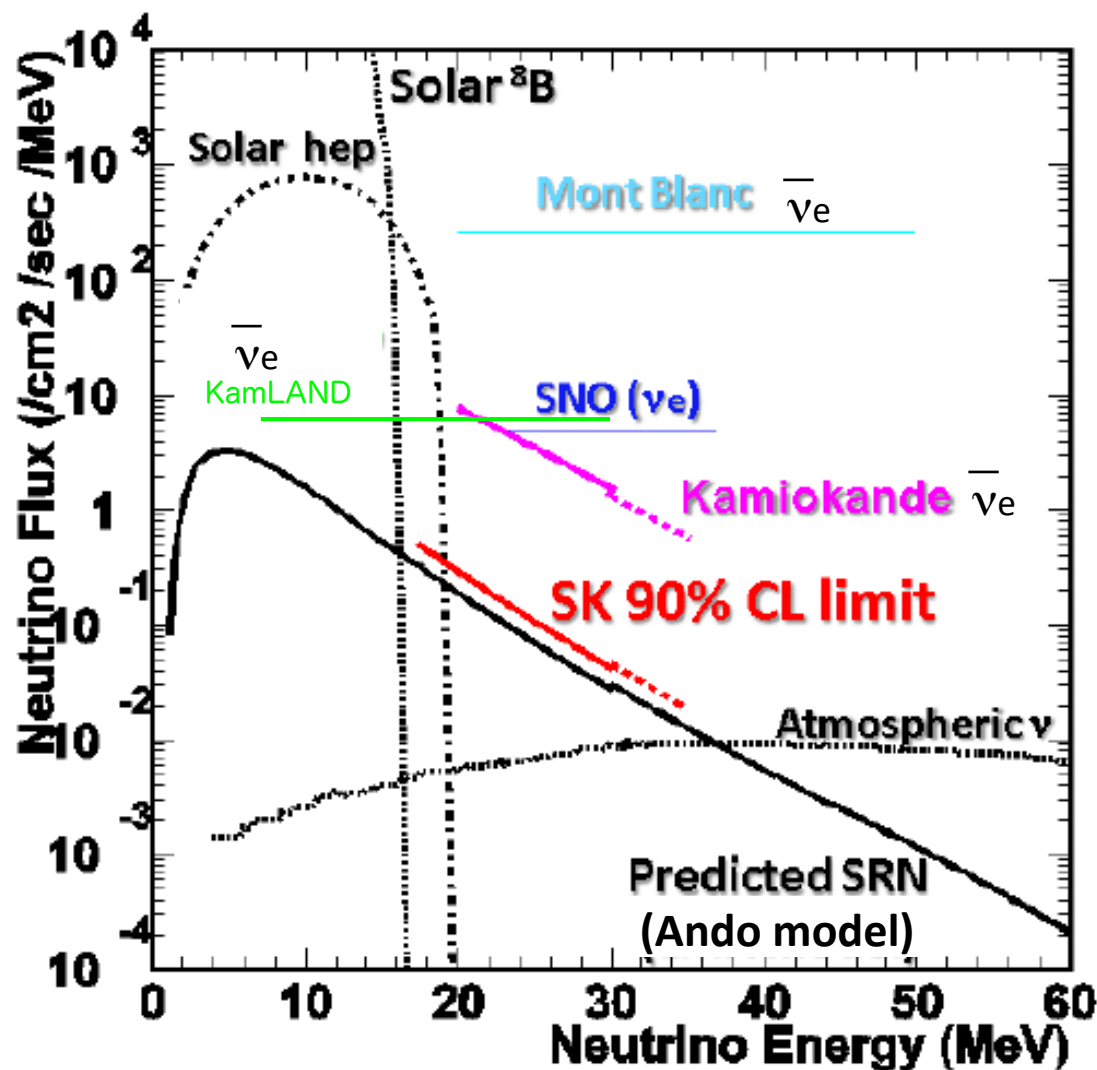
予測スペクトル



- ・約10秒間バースト的に発生する超新星爆発ニュートリノと異なり、常に漂っているフラックスの小さい信号の探索になる。したがってバックグラウンド事象との識別が鍵となる。
- ・等方的に発生することから、水チェレンコフ検出器での太陽ニュートリノ弾性散乱事象との区別には、方向情報が使える。
- ・バックグラウンド事象の識別には同時遅延計測手法が強力な武器

超新星背景ニュートリノ探索

上限値のみ

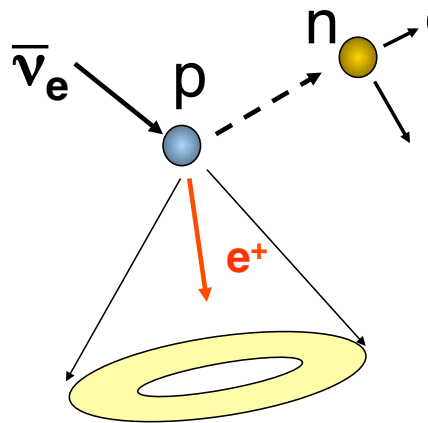


The best upper limit is provided by Super-K, 1.2/cm²/sec (90%CL) and it's close to the theoretical prediction.

Super-Kamiokande (2012)

SK collaboration, Phys. Rev. D 85, 052007 (2012)

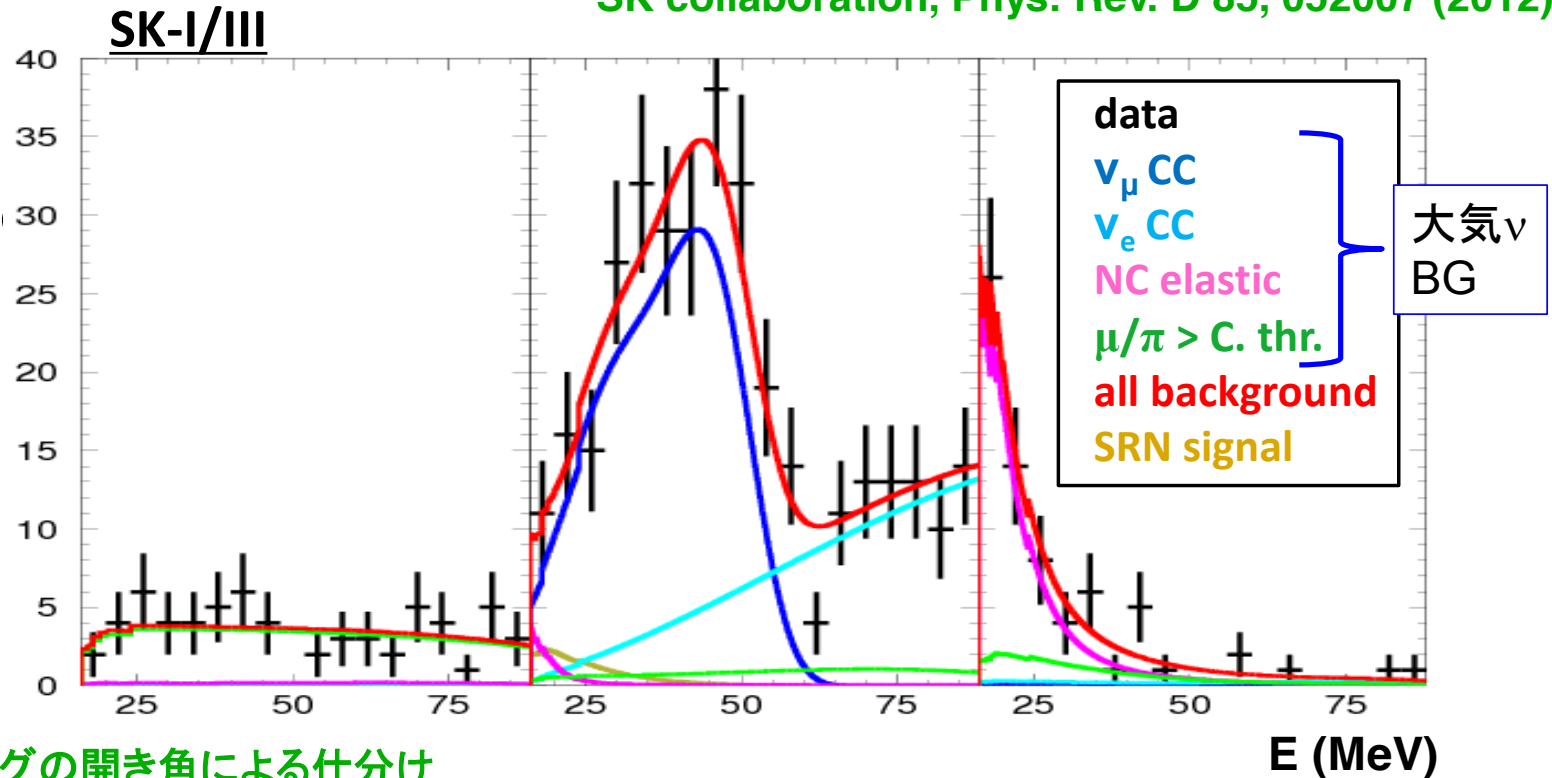
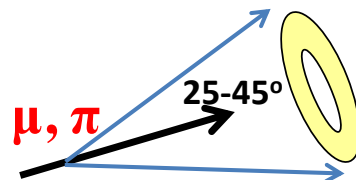
逆ベータ反応



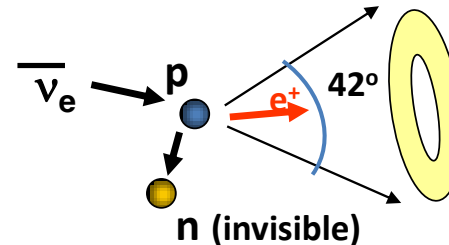
信号のエネルギーは
チェレンコフ光の強さ
から再構成される

リングの開き角による仕分け

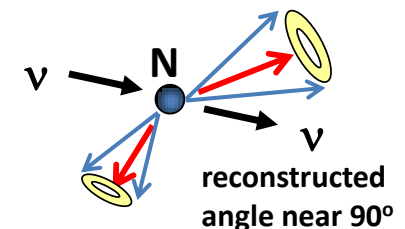
Low angle events



Signal Events



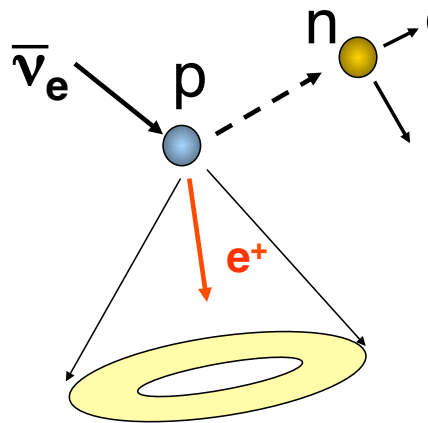
Isotropic Events



Super-Kamiokande (2012)

SK collaboration, Phys. Rev. D 85, 052007 (2012)

逆ベータ反応

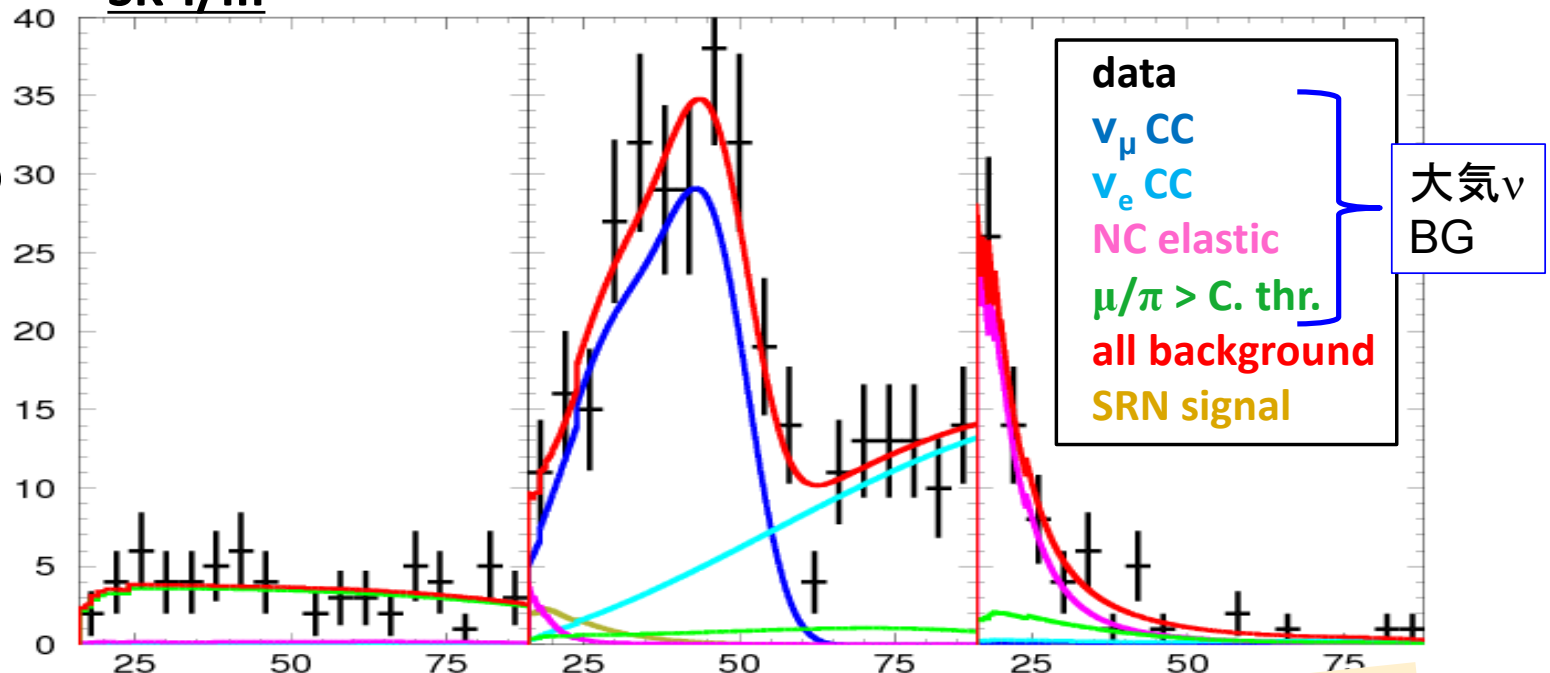


信号のエネルギーは
チェレンコフ光の強さ
から再構成される

リングの開き角による仕分け

Low angle

SK-I/III



バックグラウンドが支配的なので、
今後、統計をあげても感度があがらない

n (invisible)

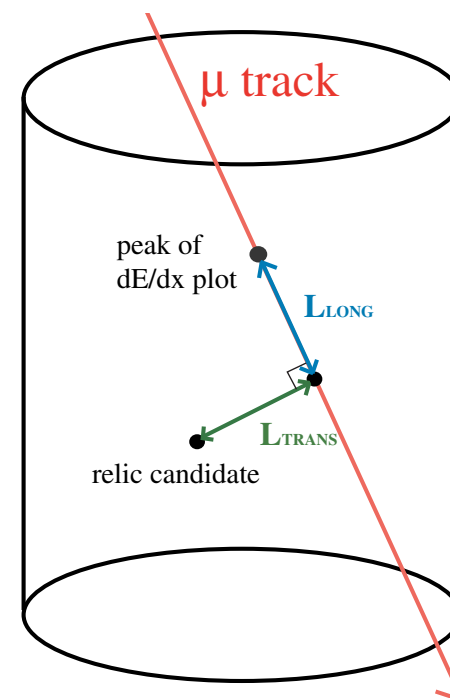
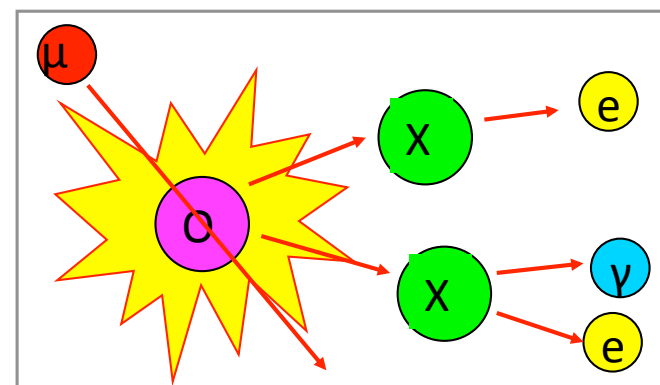
reconstructed
angle near 90°

バックグラウンド事象

(低いエネルギー領域： $E < 16\text{MeV}$)

ミューオンによる酸素原子核破碎

Isotope	$\tau_{1/2}(\text{sec})$	Decay mode	Kinetic Energy(MeV)
${}^{11}_3\text{Li}$	0.0085	β^- $\beta^- + n$	20.77 (31%) ~16 (61%)
${}^{13}_8\text{O}$	0.0090	$\beta^+ + p$	8~14
${}^{12}_7\text{N}$	0.0110	β^+	16.38
${}^{12}_4\text{Be}$	0.0114	β^-	11.66
${}^{14}_5\text{B}$	0.0161	β^-	14.07+6.09(γ)
${}^{13}_5\text{B}$	0.0173	β^-	13.42
${}^{12}_5\text{B}$	0.0204	β^-	13.37
${}^8_2\text{He}$	0.122	β^- $\beta^- + n$	10.56+0.99(γ) (11%)
${}^9_6\text{C}$	0.127	$\beta^+ + p$	3~13
${}^9_3\text{Li}$	0.178	β^- $\beta^- + n$	13.5 (75%) 11.0+2.5(γ) (25%) ~ 10 (35%)
${}^{16}_6\text{C}$	0.7478	$\beta^- + n$	~4
${}^8_5\text{B}$	0.77	β^+	13.73
${}^8_3\text{Li}$	0.84	β^-	12.5~13.0
${}^{15}_6\text{C}$	2.449	β^-	9.82 (32%) 4.51+5.30(γ) (68%)
${}^{16}_7\text{N}$	7.134	β^-	10.44(26%) 4.27+6.13(γ) (74%)
${}^{11}_4\text{Be}$	13.8	β^-	11.48 (61%) 9.32+2.1(γ) (29%)

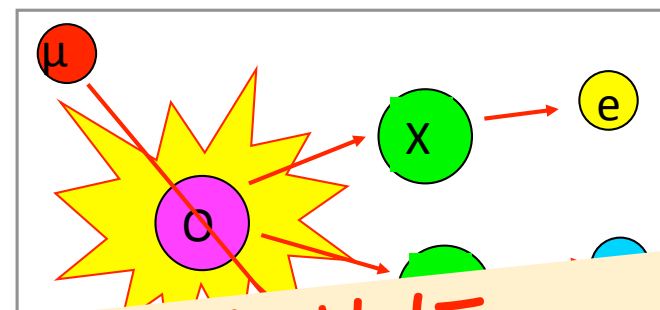


バックグラウンド事象

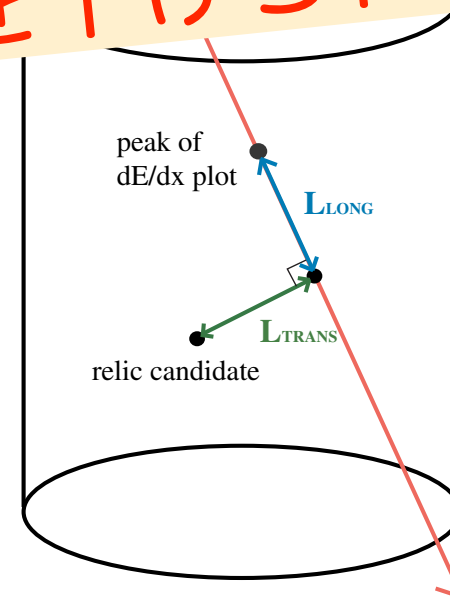
(低いエネルギー領域： $E < 16 \text{ MeV}$)

ミューオンによる酸素原子核破碎

Isotope	$\tau_{1/2}(\text{sec})$	Decay mode	Kinetic Energy(MeV)
${}^{11}_3\text{Li}$	0.0085	β^- $\beta^- + n$	20.77 (31%) ~16 (61%)
${}^{13}_8\text{O}$	0.0090	$\beta^+ + p$	8~14
${}^{12}_7\text{N}$	0.0110	β^+	16.38
${}^{12}_4\text{Be}$	0.0114	β^-	11.66
${}^{14}_5\text{B}$	0.0161	β^-	14.07+6.09(γ)
${}^{13}_5\text{B}$	0.0173	β^-	13.42
${}^{12}_5\text{B}$	0.0204	β^-	~10 (35%)
${}^6_6\text{C}$	0.7478	$\beta^- + n$	~4
${}^8_5\text{B}$	0.77	β^+	13.73
${}^8_3\text{Li}$	0.84	β^-	12.5~13.0
${}^{15}_6\text{C}$	2.449	β^-	9.82 (32%) 4.51+5.30(γ) (68%)
${}^{16}_7\text{N}$	7.134	β^-	10.44(26%) 4.27+6.13(γ) (74%)
${}^{11}_4\text{Be}$	13.8	β^-	11.48 (61%) 9.32+2.1(γ) (29%)



このバックグラウンドのために
エネルギー閾値(16MeV)を下げられない



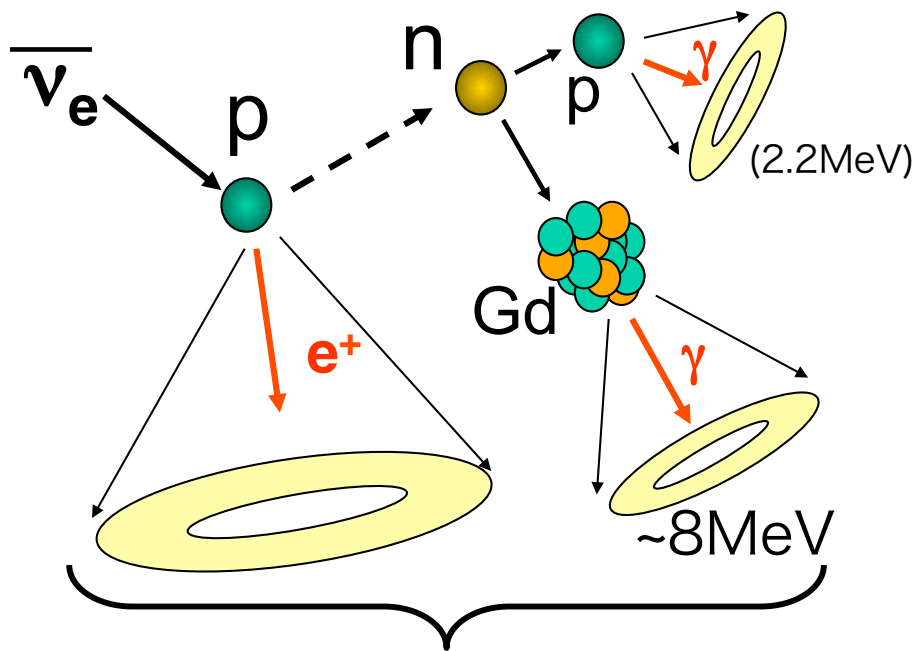
超新星背景ニュートリノの発見には至っていないが
理論予測値には近づいている

バックグラウンドを如何に落とし
エネルギー閾値を下げるか？



Super-K Gd 実験

Super-K with Gadolinium



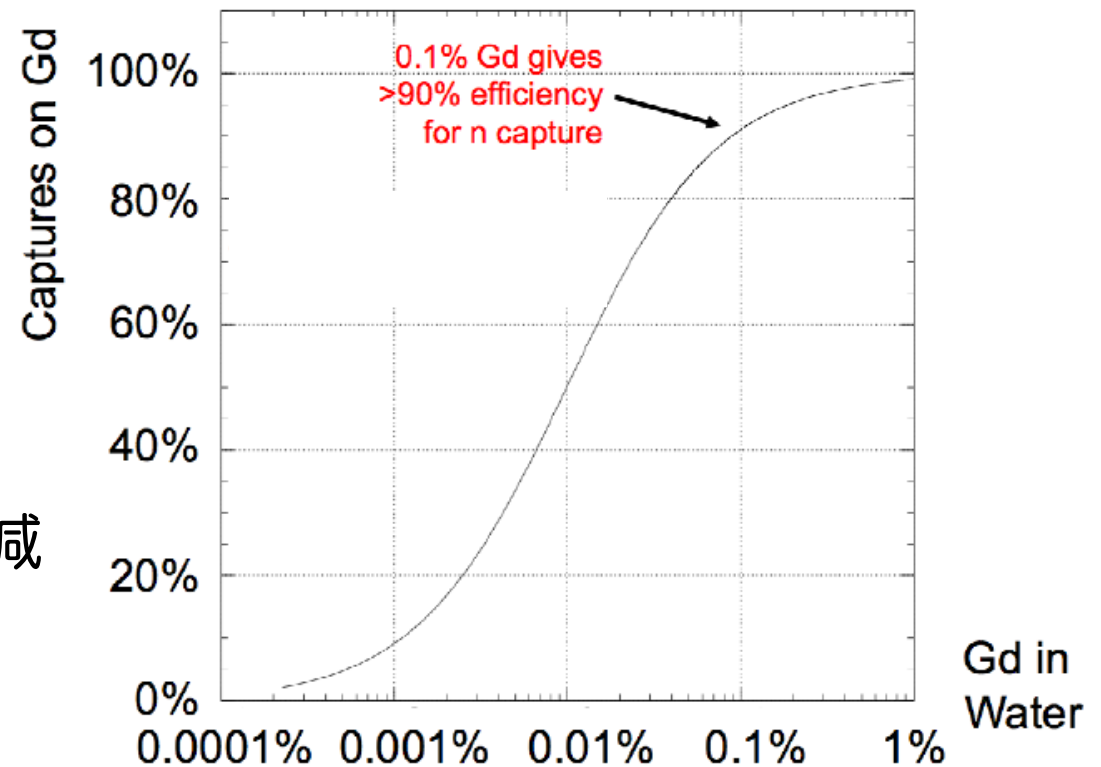
同時遅延計測

$\bar{\nu}_e$ 信号に対するBGを劇的に削減

$\Delta T \sim 20 \mu\text{sec}$

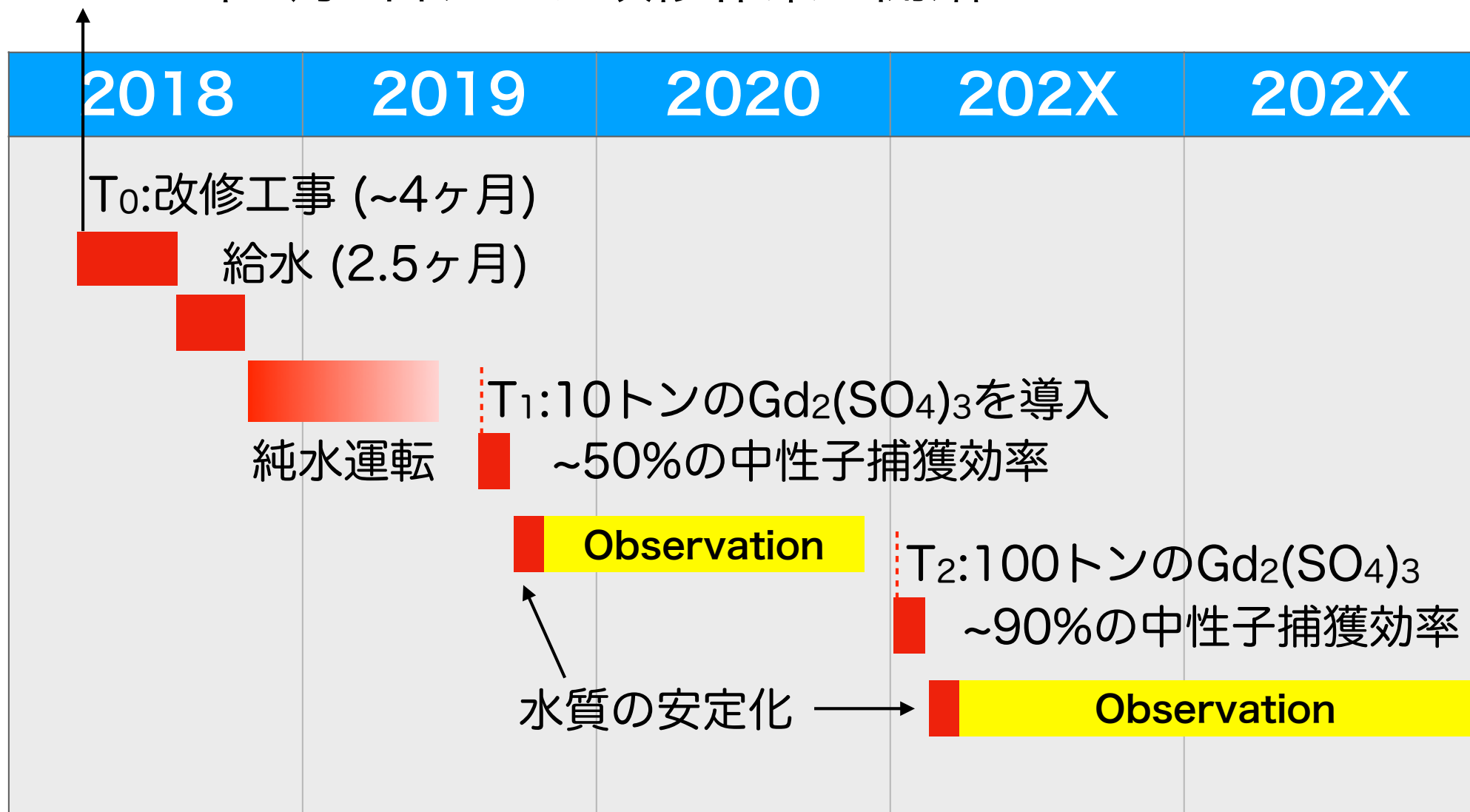
Vertices within $\sim 50\text{cm}$

Dissolve Gadolinium into Super-K
J.Beacom and M.Vagins,
Phys.Rev.Lett.93 (2004) 171101

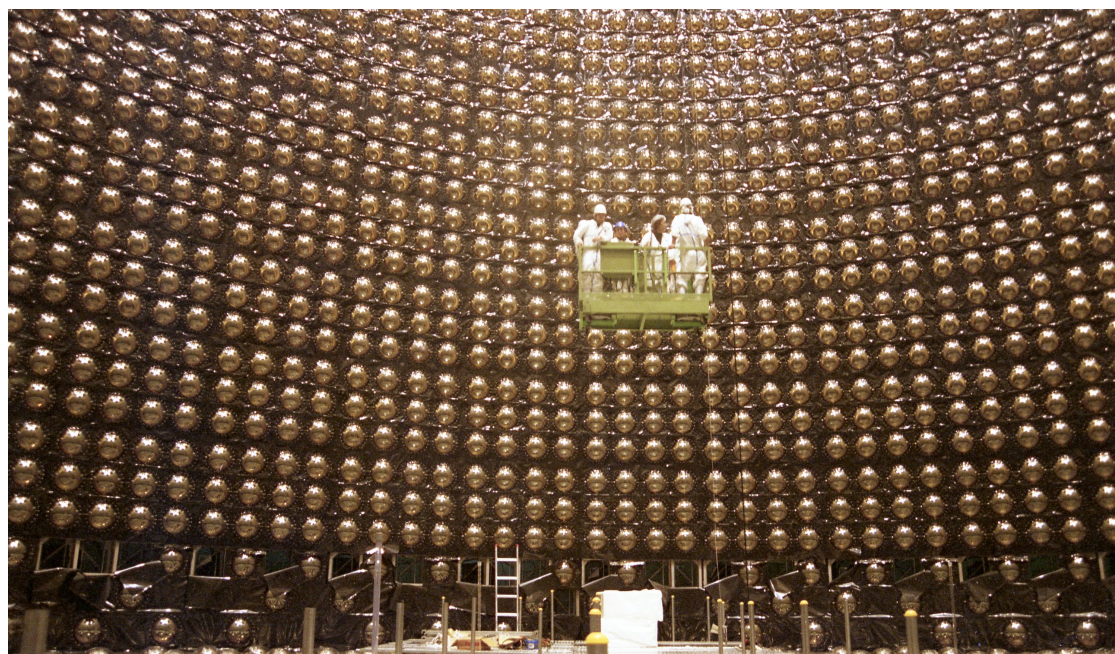
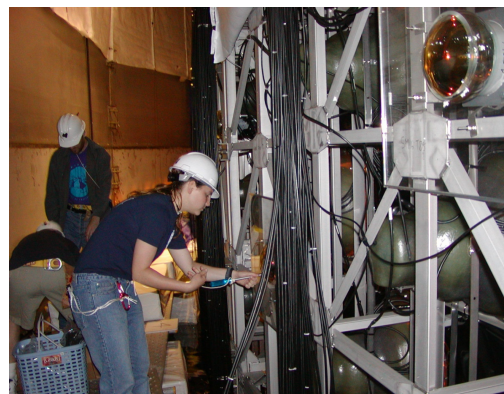
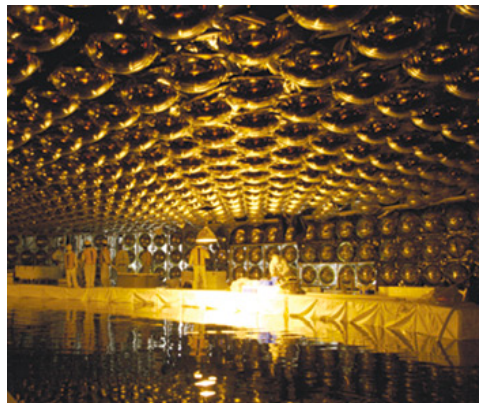


Super-K Gd スケジュール

2018年6月1日タンク改修作業を開始



Super-K Gd

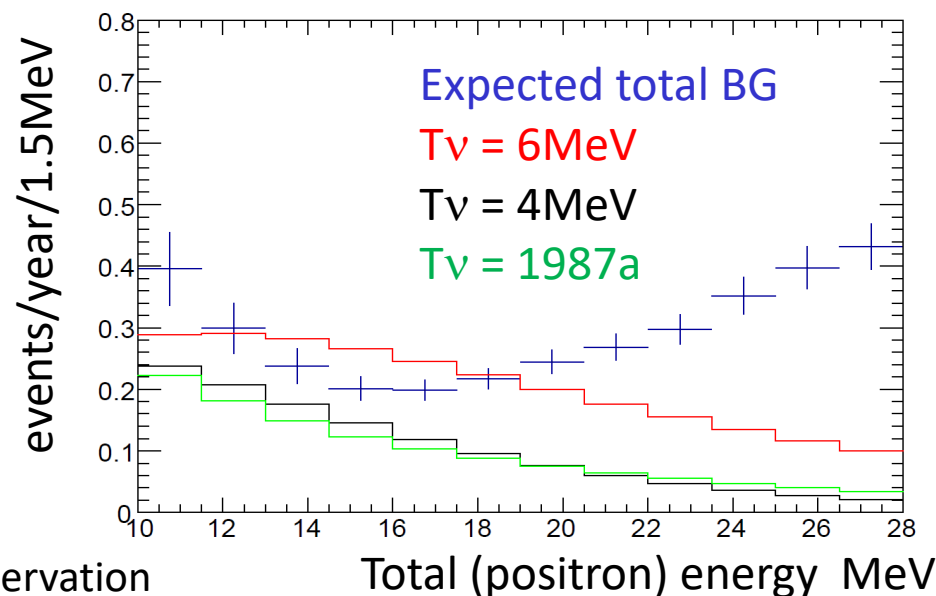


Super-K Gd で期待される感度

DSNB flux:

Horiuchi, Beacom and Dwek,
PRD, 79, 083013 (2009)

- It depends on typical/actual SN emission spectrum



DSNB events number with 10 years observation

HBD models	10-16MeV (evts/10yrs)	16-28MeV (evts/10yrs)	Total (10-28MeV)	significance (2 energy bin)
$T_{\text{eff}} 8\text{MeV}$	11.3	19.9	31.2	5.3σ
$T_{\text{eff}} 6\text{MeV}$	11.3	13.5	24.8	4.3σ
$T_{\text{eff}} 4\text{MeV}$	7.7	4.8	12.5	2.5σ
$T_{\text{eff}} \text{SN1987a}$	5.1	6.8	11.9	2.1σ
BG	10	24	34	----

最初の発見が期待できる

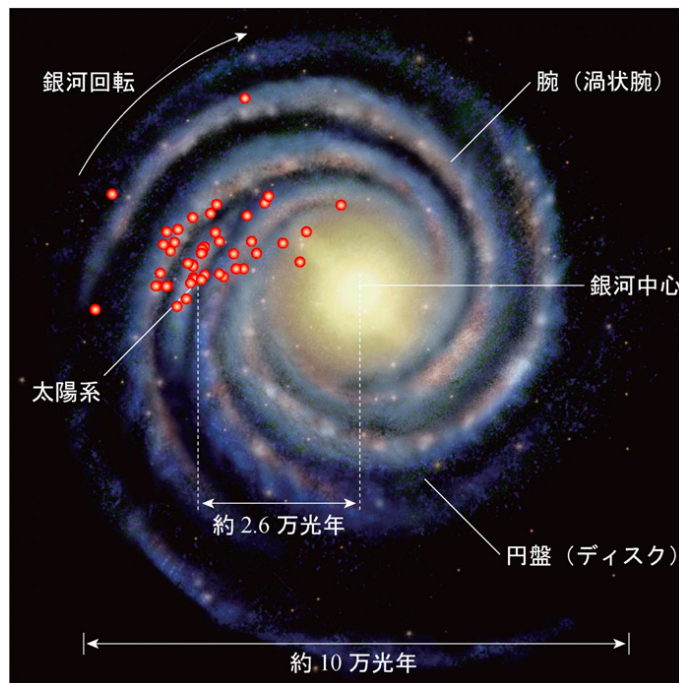
近い将来の発見が期待される

No chance for Supernova neutrino search for next hundred's years?

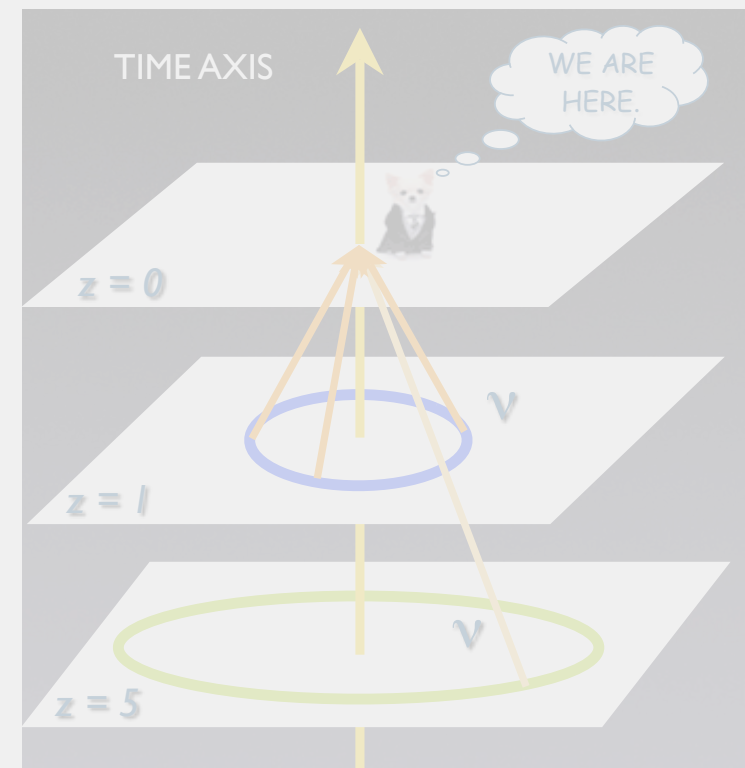


We believe, yes!

銀河系内超新星爆発
(a few per century)

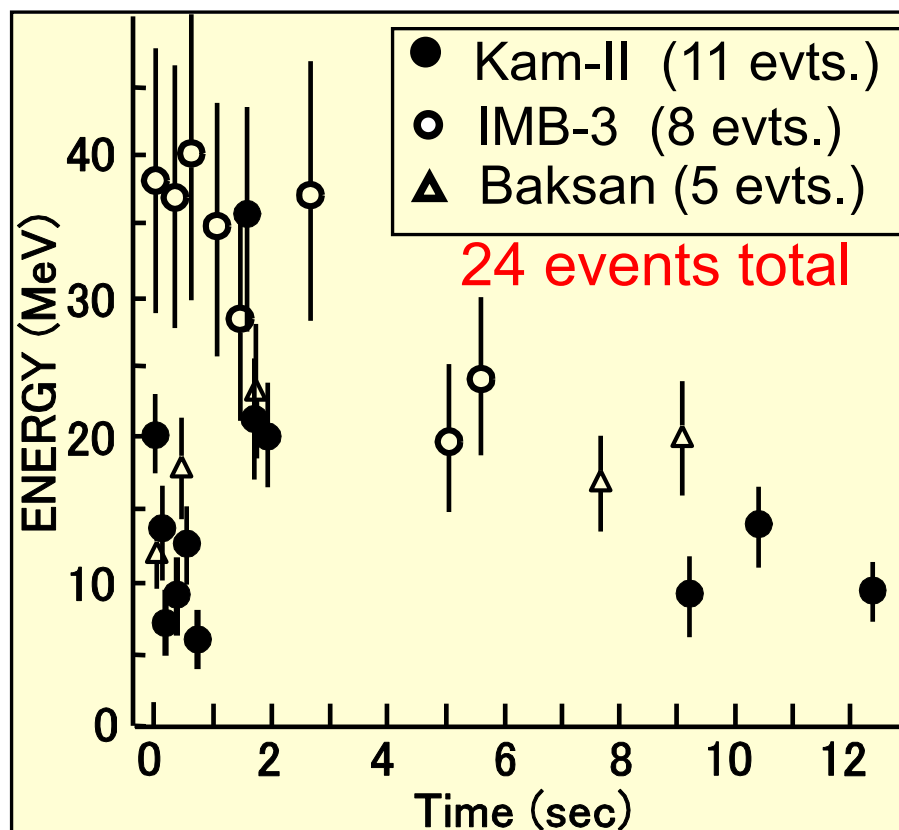


超新星背景ニュートリノ

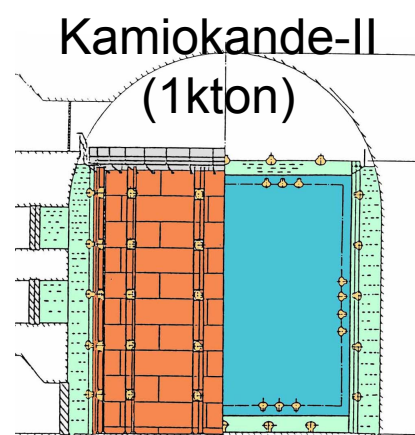


超新星1987A (大マゼラン雲)

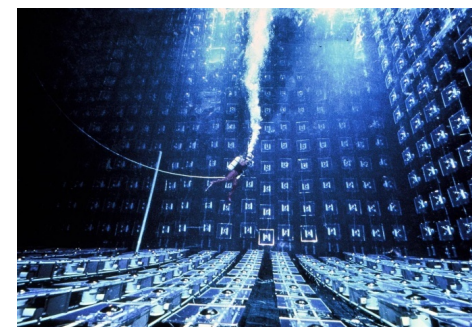
1987年2月23日 7:35 (UT), 50kpc (16万光年)



Water Cherenkov

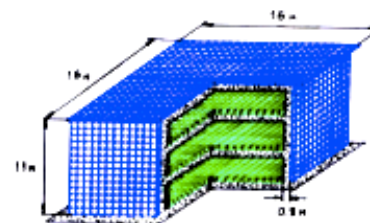


IMB-3 (8kton)



Liquid Scintillator

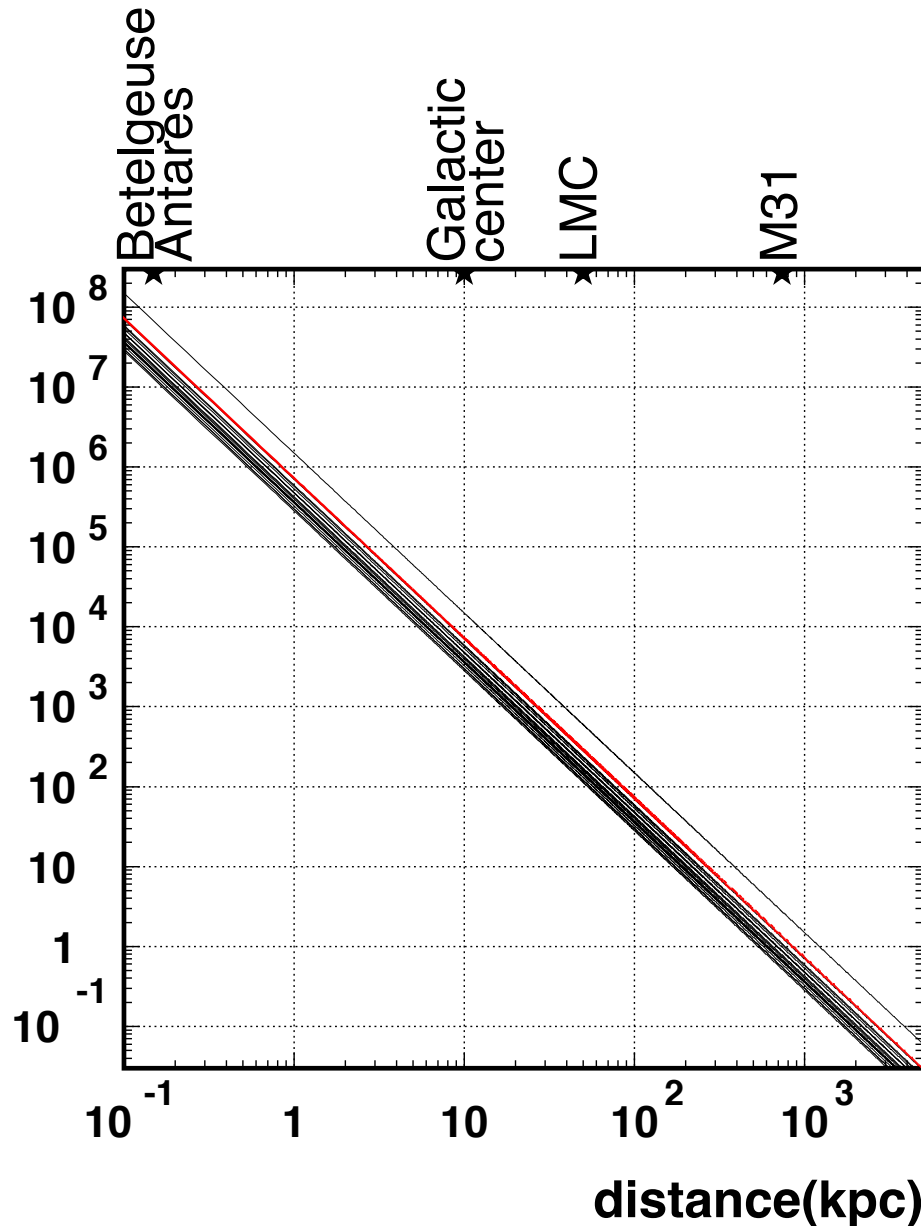
Baksan



ニュートリノ天文学の幕開け

今起こったら？

Super-Kamiokande



Nakazato et.al. ApJ.Suppl. 205 (2013) 2

<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/index.html>

M_{init}	Z	Supernova models			BH models
		$t_{\text{revive}}=100\text{ms}$	$t_{\text{revive}}=200\text{ms}$	$t_{\text{revive}}=300\text{ms}$	
$13M_{\text{solar}}$	0.02	258kB	257kB	256kB	---
$20M_{\text{solar}}$		258kB	257kB	257kB	
$30M_{\text{solar}}$		257kB	257kB	255kB	
$50M_{\text{solar}}$		257kB	256kB	256kB	
$13M_{\text{solar}}$	0.004	258kB	257kB	257kB	4.97MB (Shen) 2.69MB (LS220) ---
$20M_{\text{solar}}$		258kB	257kB	256kB	
$30M_{\text{solar}}$		---			
$50M_{\text{solar}}$		259kB	258kB	257kB	

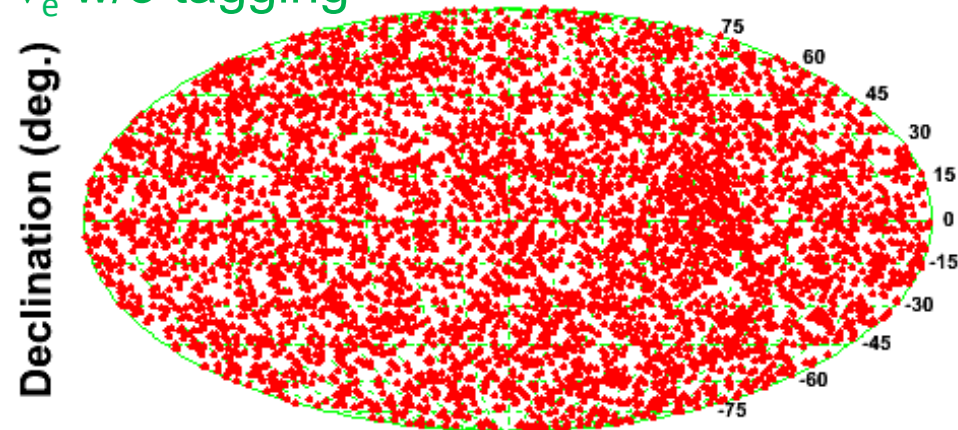
at 10kpc, 4.5MeV energy threshold



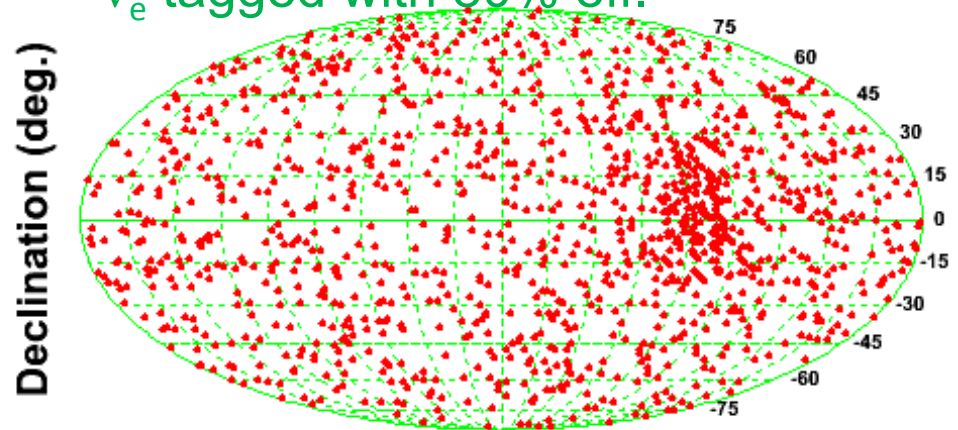
2.8k~15k ev
 (inverse beta decay
 7300 event for
 Livermore model)

Super-K Gd

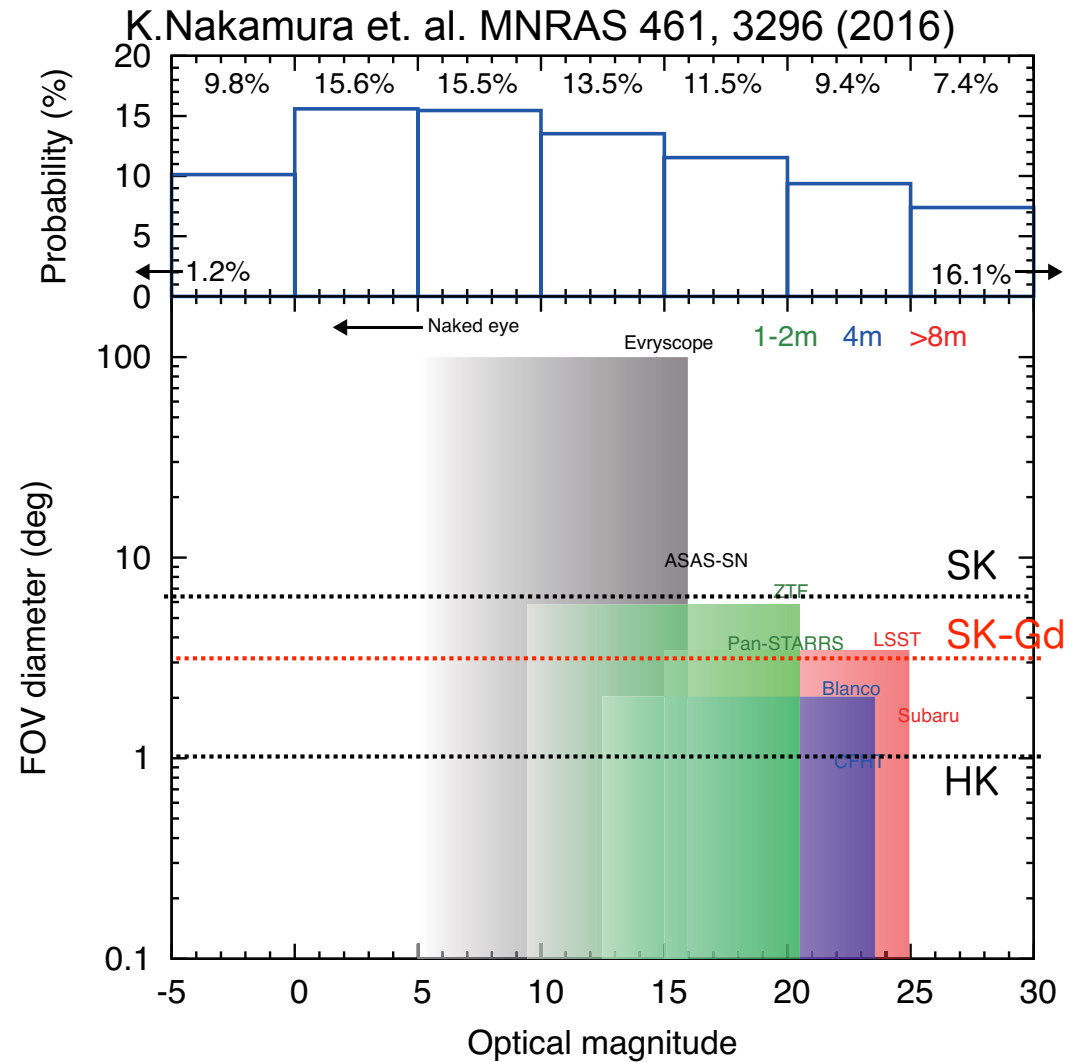
$\bar{\nu}_e$ w/o tagging



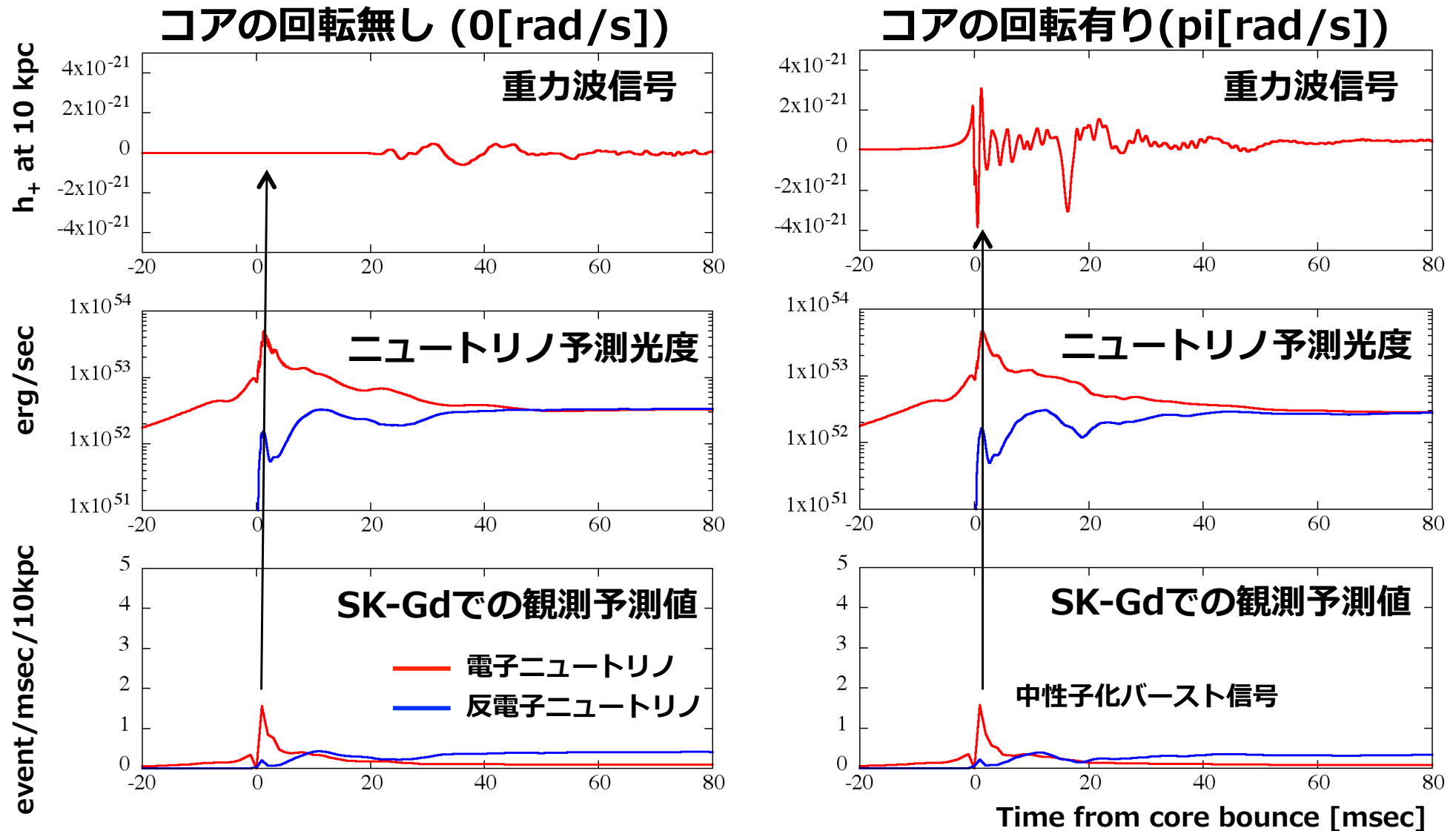
$\bar{\nu}_e$ tagged with 80% eff.



Right ascension (deg.)



重力波とニュートリノ



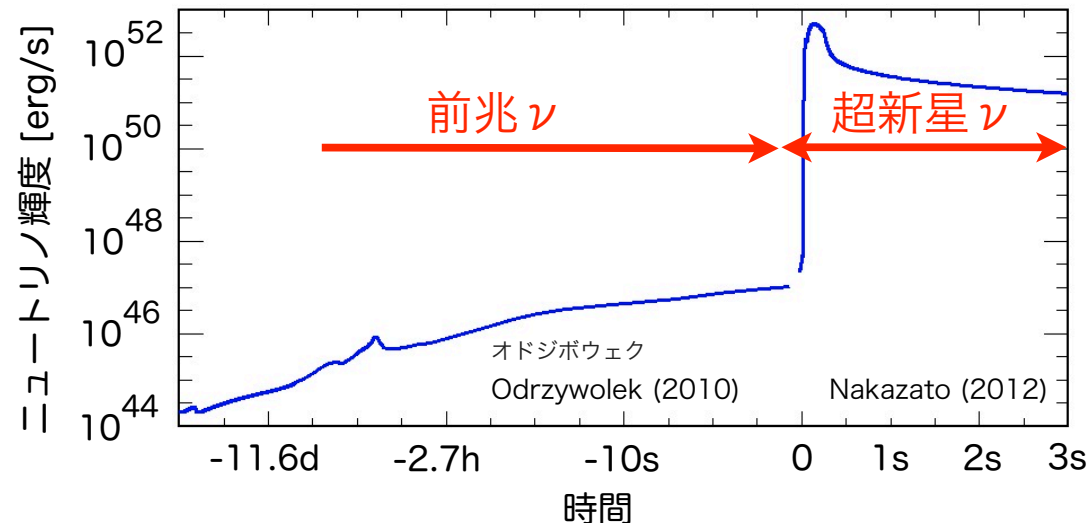
ニュートリノ信号と重力波信号からコアの回転の有無がわかる

KamLAND

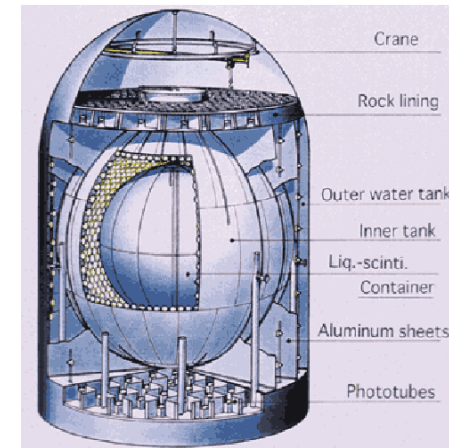
もし超新星爆発がベテルギウス ($\sim 200\text{pc}$) で起こったら

Si 燃焼による超新星爆発の“予言”が可能

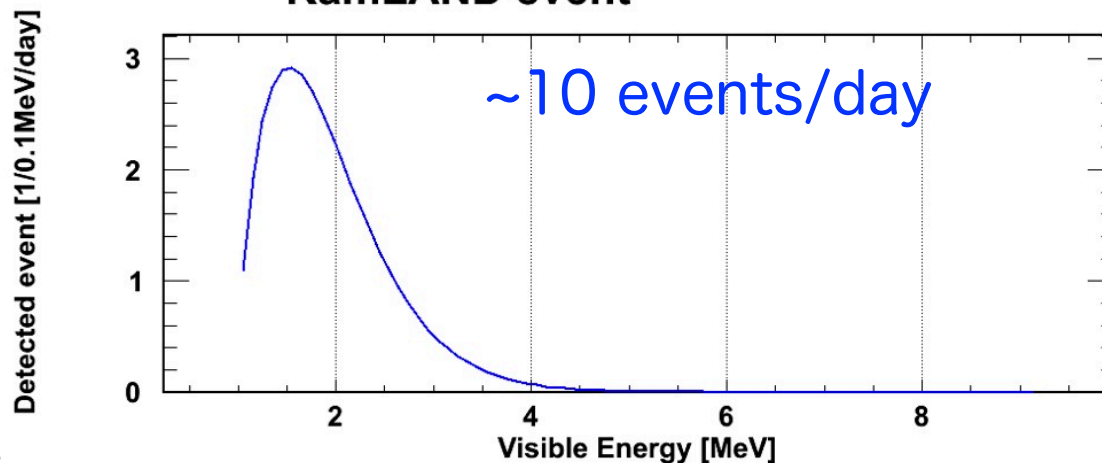
(石徹白さんが詳しい)



arXiv 1506.01175



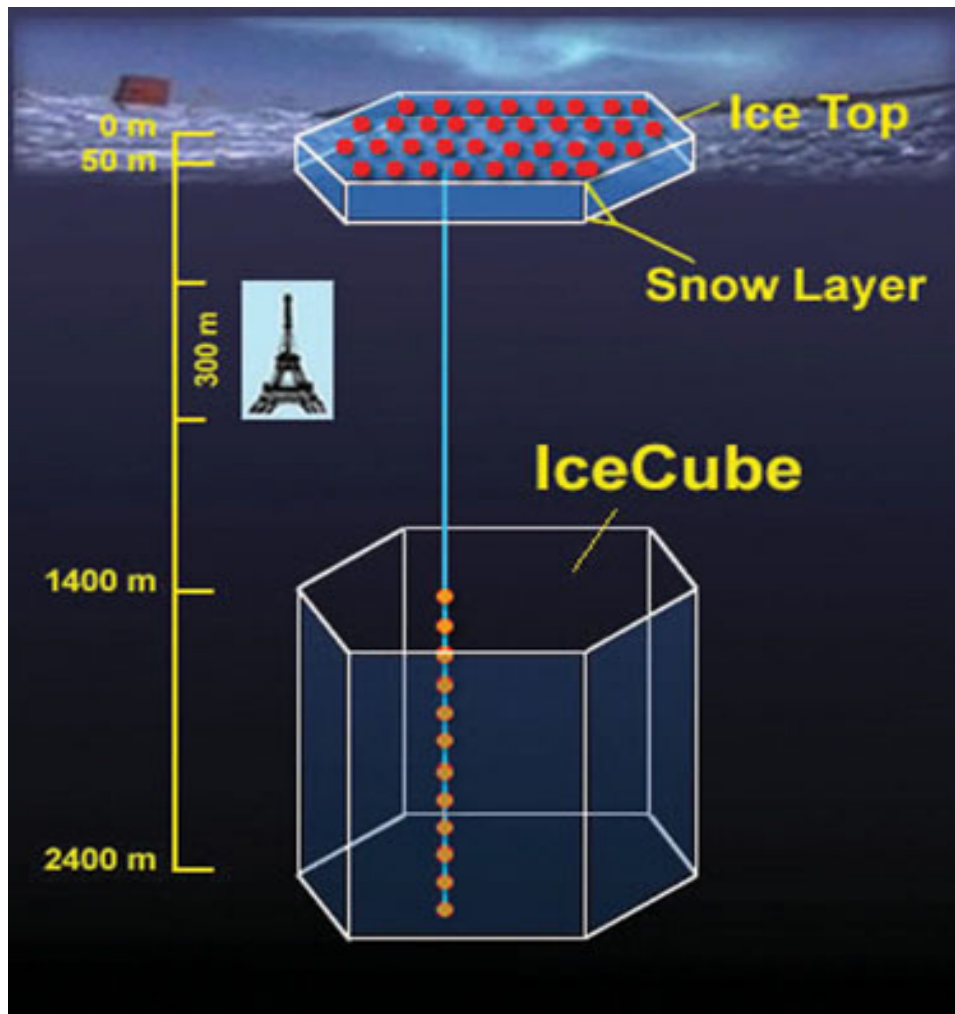
KamLAND event



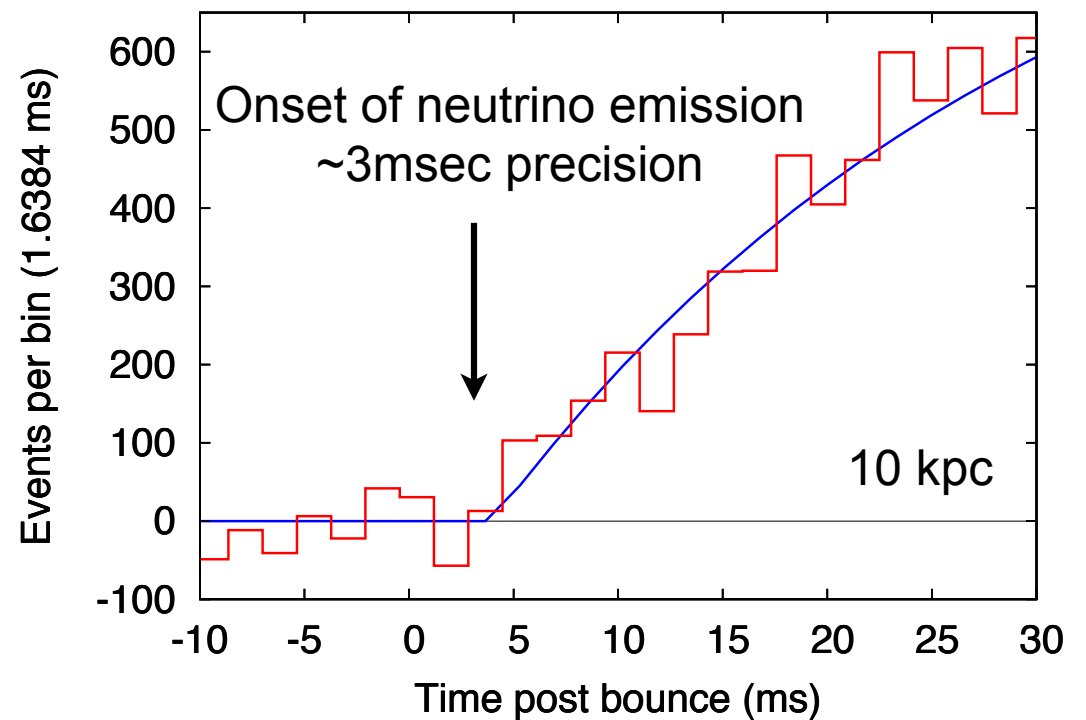
Super-K Gd でも

IceCube

Giga-ton detector



PMT の single rate の上昇により
到来時間を精度良く測定

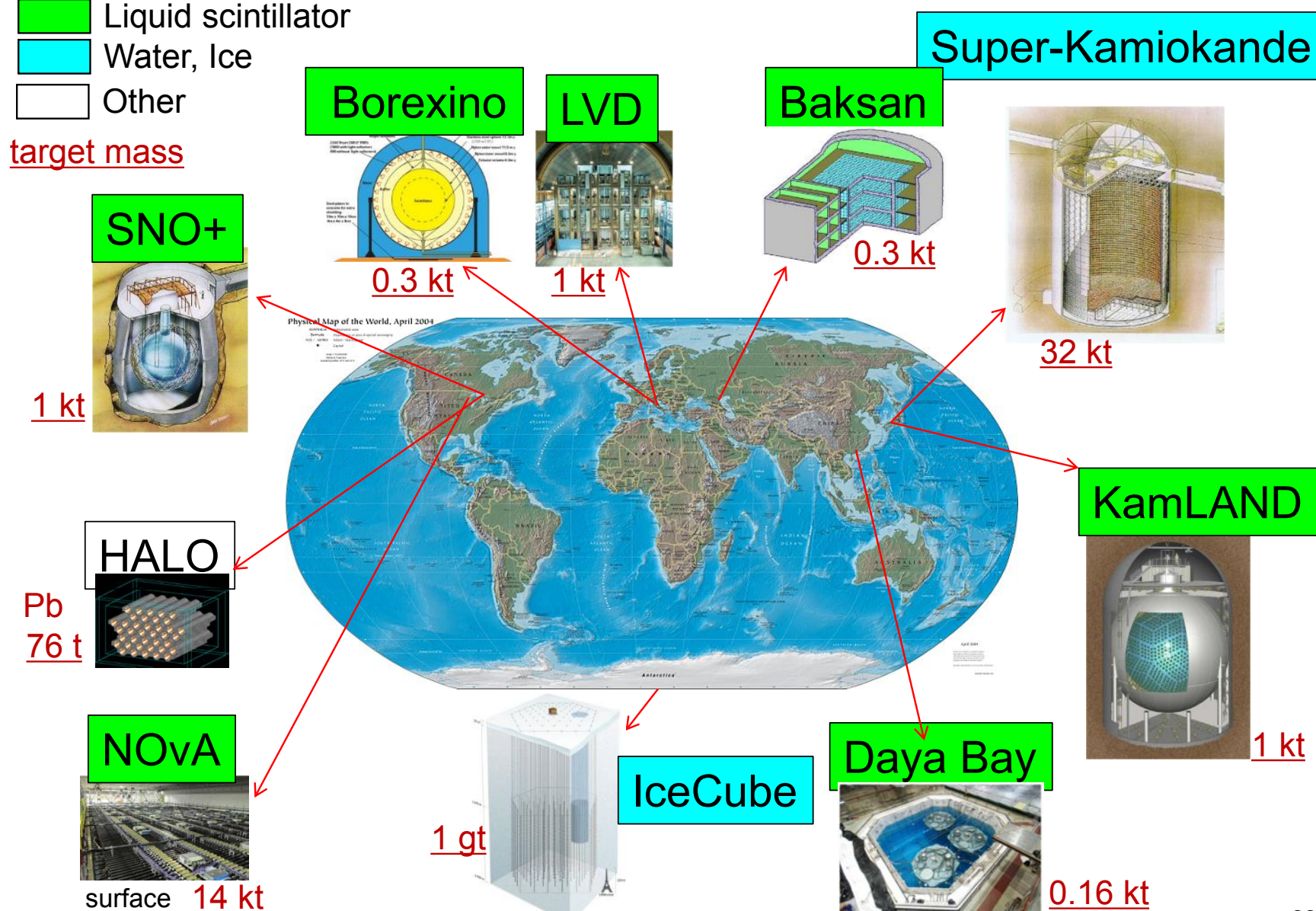


Halzen, Raffelt : arXiv : 0908.2317

世界の超新星ニュートリノ検出器

Liquid scintillator
 Water, Ice
 Other

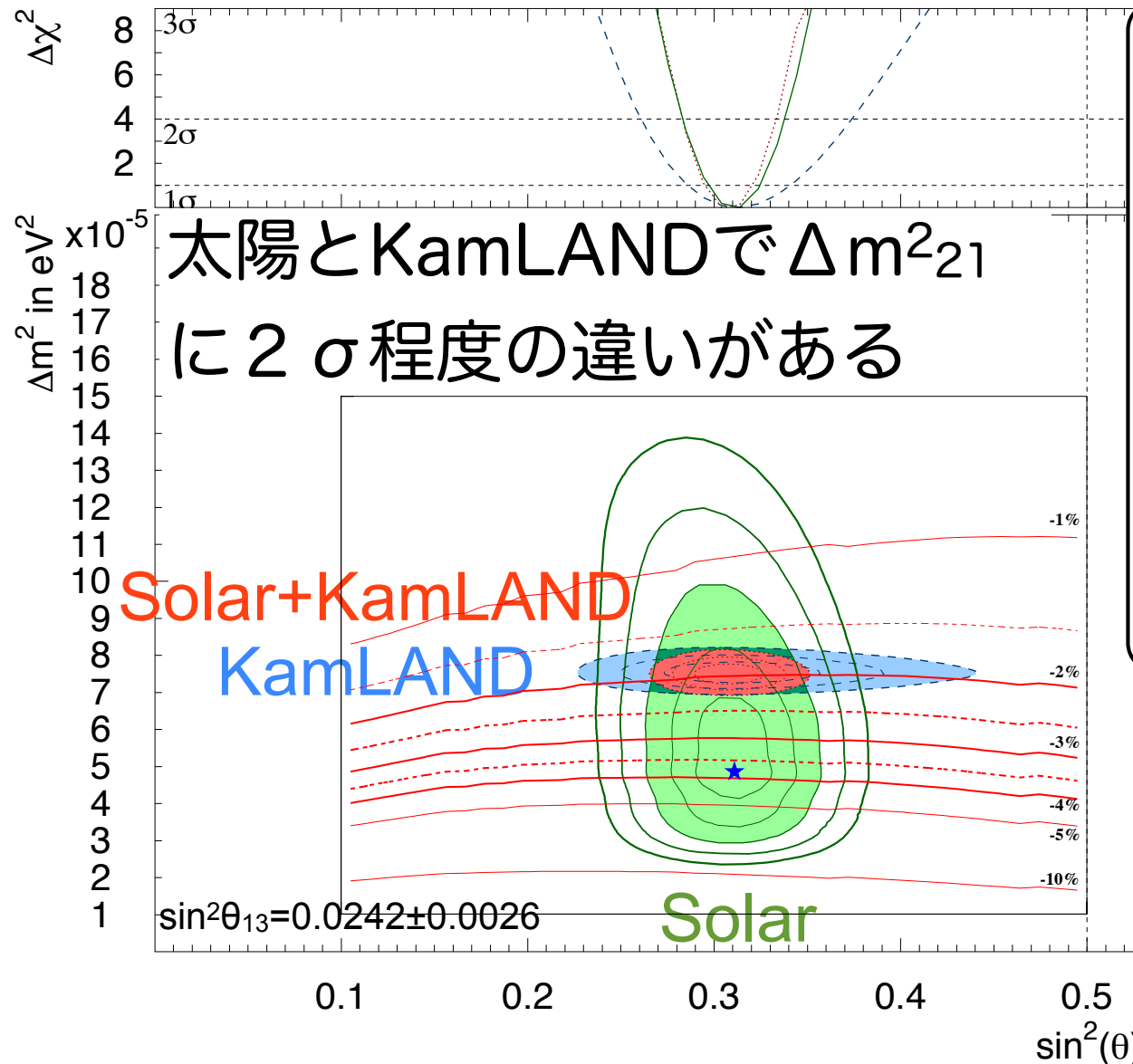
target mass



いくつもの検出器が
次の近傍超新星爆発を待っている

太陽ニュートリノ

太陽ニュートリノ振動



$$\sin^2 \theta_{12} = 0.316^{+0.034}_{-0.026}$$

$$\Delta m^2_{21} = 7.54^{+0.19}_{-0.18}$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.308 \pm 0.014$$

$$\Delta m^2_{21} = 4.85^{+1.33}_{-0.59}$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.307^{+0.013}_{-0.012}$$

$$\Delta m^2_{21} = 7.49^{+0.19}_{-0.18}$$

The unit of Δm^2_{21} is 10^{-5} eV^2

昼夜変動

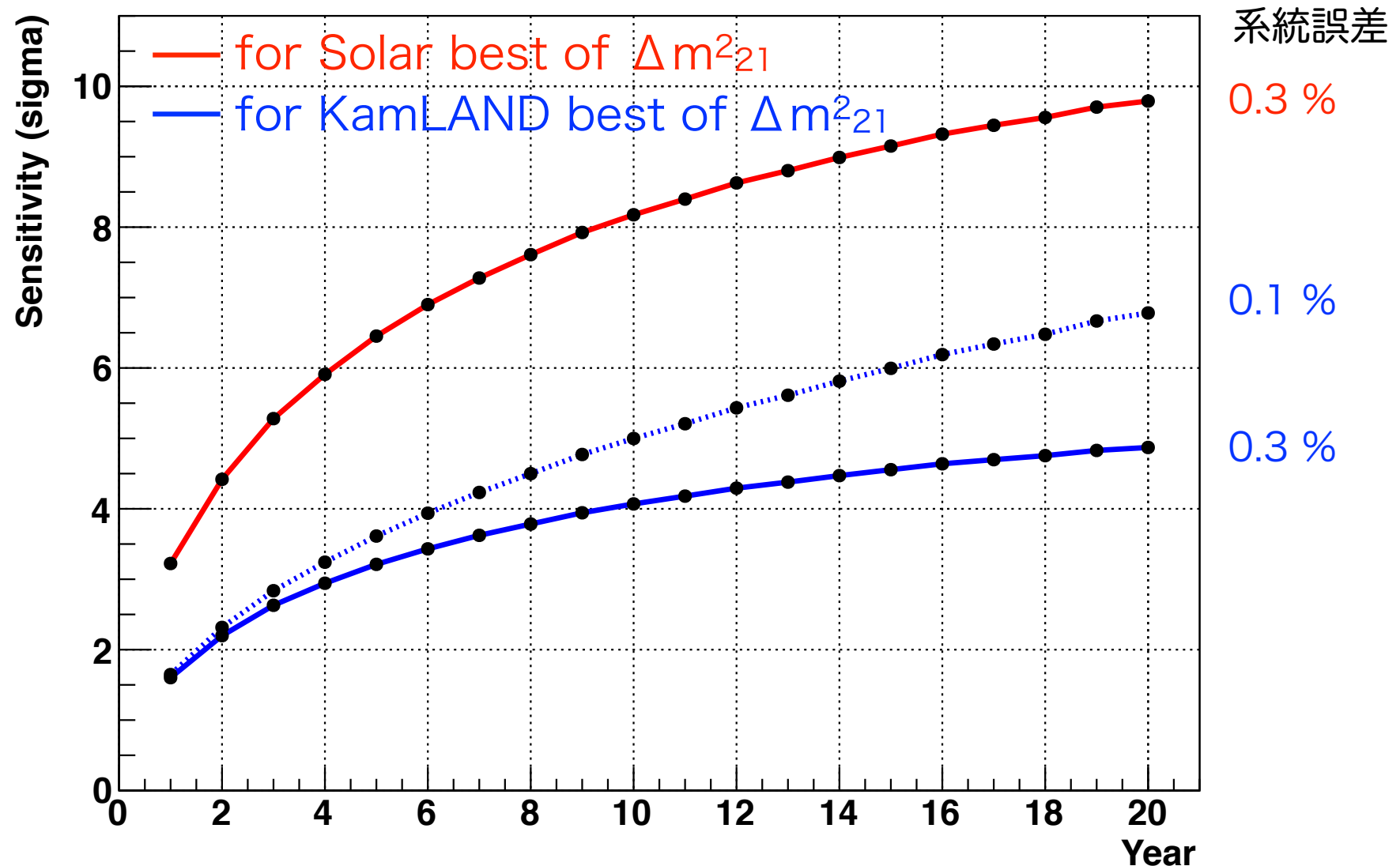
~4% at solar best

~2% at KamLAND

($E_{\text{th}} = 6.5 \text{ MeV}$)

ハイパーカミオカンデ

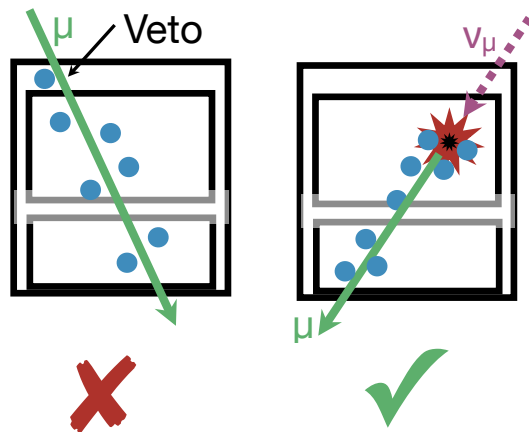
昼夜変動を用いたパラメータの決定感度



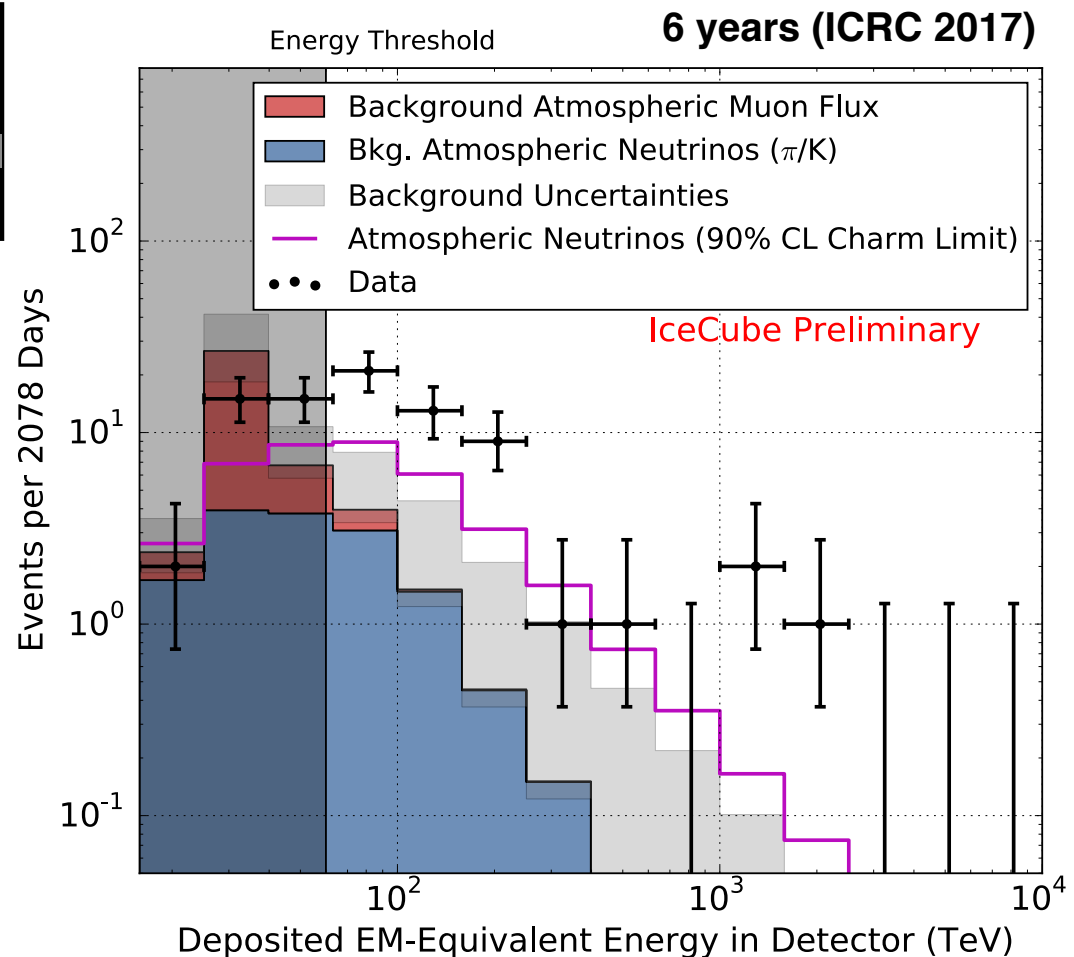
高エネルギーニュートリノ

IceCUBEの最新結果

High-energy starting events in IceCube



- Selected events that start in IceCube volume
- **82 events in 6 years** (54 in 4 years)

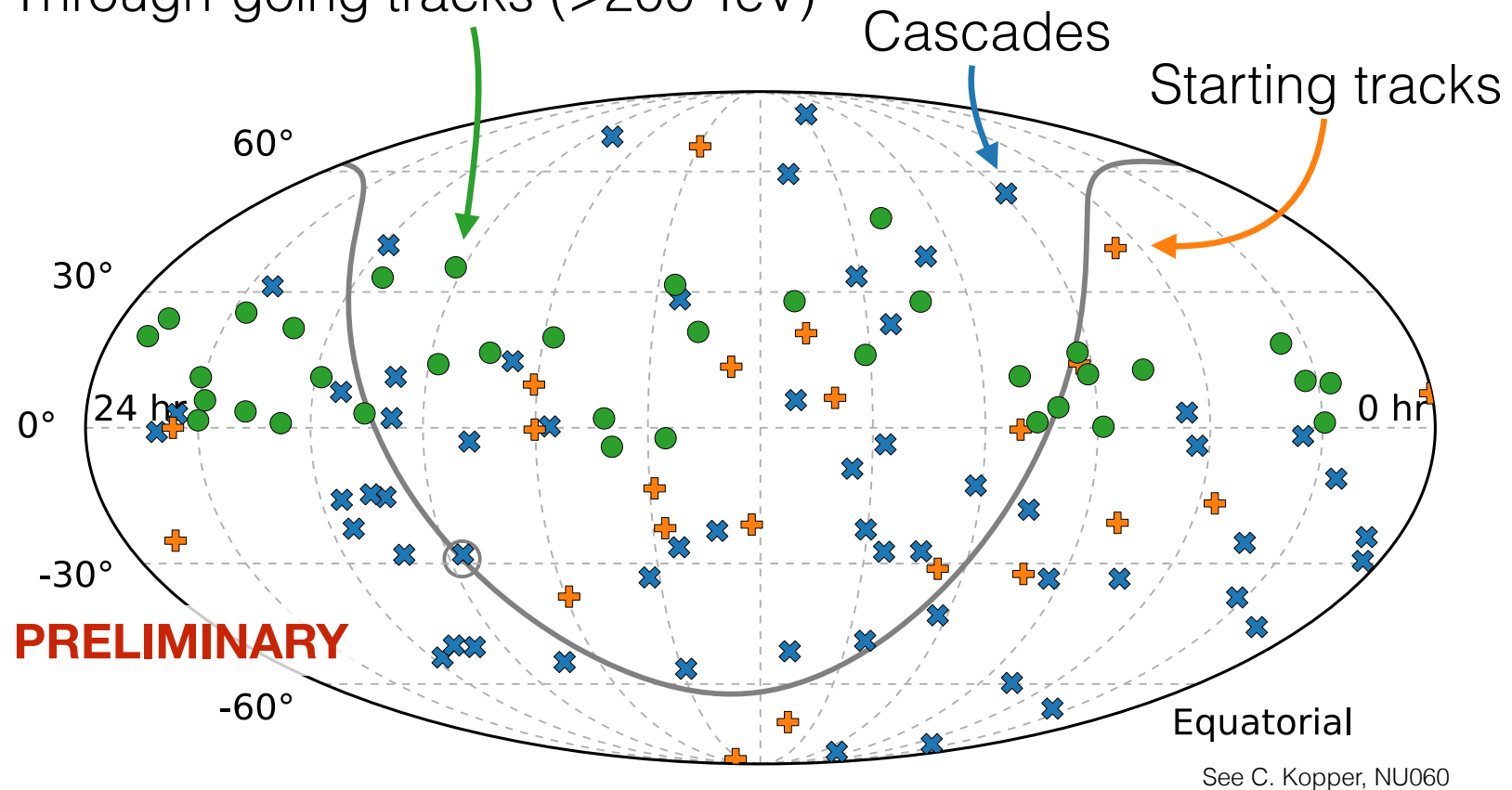


IceCUBEの最新結果

High-energy neutrinos on the sky

13

Through-going tracks (>200 TeV)



No evidence of clustering in high-energy neutrino directions ($> 50\%$ astrophysical).

まとめ

- 超新星背景ニュートリノ：発見に向けて準備中
- 近傍超新星爆発：一度起こると、爆発メカニズムの解明が飛躍的に進む
- 太陽ニュートリノ：精密観測フェーズ。新しい物理？
太陽モデルの精密化
- 高エネルギー天体ニュートリノ：続々と信号を観測。
今後の展開に期待