

スーパーカミオカンデの将来

中畑 雅行

東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設
カブリ数物連携宇宙研究機構

スーパーカミオカンデ(SK) これまで

19 96	19 97	19 98	19 99	20 00	20 01	20 02	20 03	20 04	20 05	20 06	20 07	20 08	20 09	20 10	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

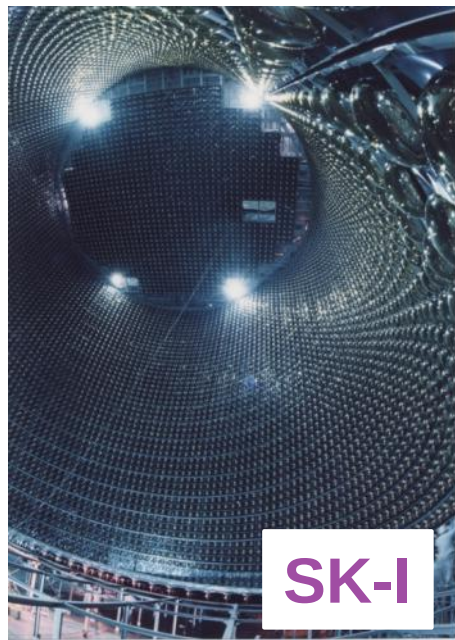
SK-I

事故

SK-II

SK-III

SK-IV



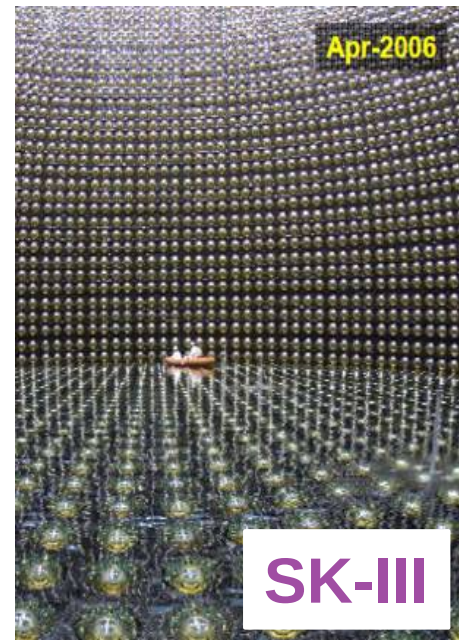
SK-I

11146 ID PMTs
(40% 被覆率)



SK-II

5182 ID PMTs
(19%被覆率)



SK-III

11129 ID PMTs
(40%被覆率)



SK-IV

電子回路更新
(2013年には高電圧発生装置の更新)

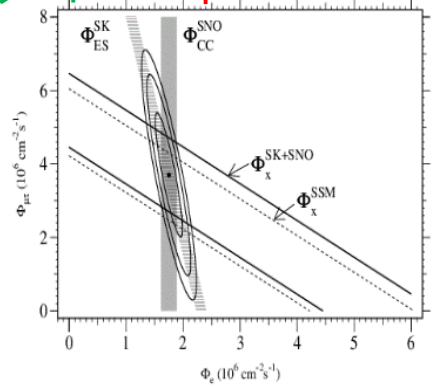
SKでの主要な発見

1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

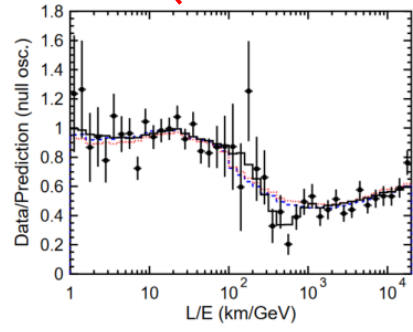
↑
SK
スタート

↑
K2K
スタート

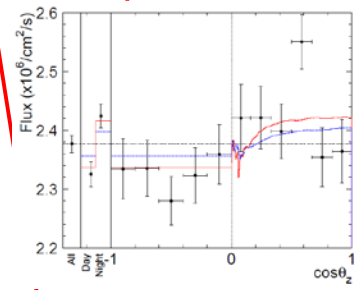
↑
T2K
スタート



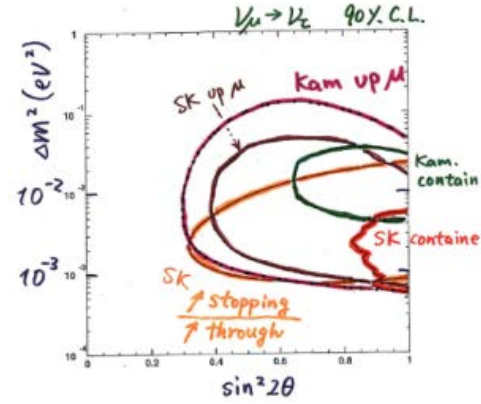
太陽ニュートリノ振動
の発見(SK vs. SNO CC)



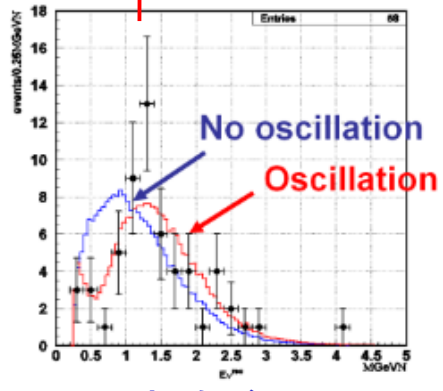
「振動」していること
を発見(大気 ν)



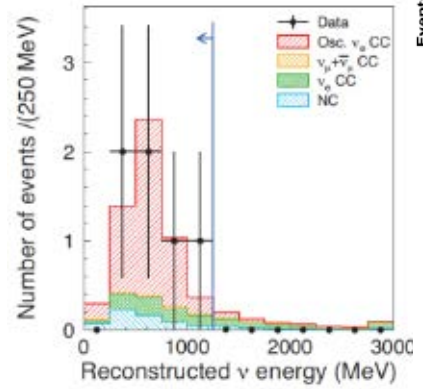
太陽ニュートリノ
昼夜変化



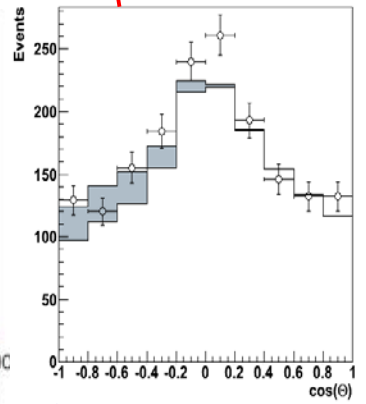
大気ニュートリノ
振動の発見



K2K実験がニュート
リノ振動を確認



T2Kによる電子ニュート
タウニュートリノ出
現を発見(大気 ν)



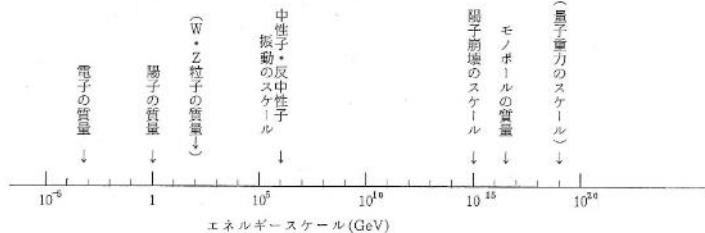
1991年度

平成 3 年度 概算要求説明資料

大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置

東 京 大 学

加速器で到達可能な
エネルギー範囲



以上2図よりわかるように、スーパー神岡地下実験計画では、非常に広いエネルギー範囲にわたる種々のニュートリノ源が観測可能であり、一方、陽子崩壊や、モノポール等は、現在考えられている最大の加速器でも全く到達不可能なエネルギーの物理が関係していることがわかる。

以下で期待される成果の個々について述べる。

① 太陽ニュートリノの精密測定

アメリカのディビスらによりおこなわれている実験及び現行神岡実験で太陽ニュートリノは理論予想値の約半分以下しか来ていることが観測されている。これは『太陽ニュートリノ問題』と名付けられ、この問題の解明が天文学・物理学上の重大な課題となっている。本研究では、太陽ニュートリノの水槽中での反応を精密測定することにより、『太陽ニュートリノ問題』を解決する。すなわち太陽中心の温度が予想値よりも実際に低いのか(天文学的問題)、またはニュートリノ自体の問題すなわち生成ニュートリノが途中で検出できない他のニュートリノに変換されたのか(物理学的問題)を同定する。もし、『太陽ニュートリノ問題』がニュートリノの性質によるなら、この観測はニュートリノに質量があることを意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実験事実となり、大統一理論等への波及効果ははかり知れない。またもし、『太陽ニュートリノ問題』が天文学的問題なら、やはり太陽の標準理論を否定することになり、この影響は天文学各方面に大きく波及する。

② 超新星爆発からのニュートリノの精密測定

超新星爆発からのニュートリノは、史上はじめて現行神岡地下実験により昭和62年2月23日に観測されたが、本研究では水槽中での超新星爆発ニュートリノ反応の観測を28倍の感度(有効質量の比)にて遂行する。この結果により超新星爆発(中性子星生成)のメカニズムの精密な実験的検証を行う。また、この観測は、ニュートリノの性質(ニュートリノの質量、ニュートリノ振動)の解明にも非常に重要なデータとなる。なお、この観測の天文学、物理学の多方面への波及効果がいかに大きいかは、すでに昭和62年2月23日の観測で実証されている。

③ 過去の超新星爆発による累積ニュートリノの精密測定

過去から引き続いて起っている超新星は、ニュートリノを宇宙に放出し、宇宙は徐々にこれらのニュートリノによって満たされてきた。このように累積したニュートリノの水中での反応を測定することにより過去における超新星の活動度すなわち宇宙の活動度を推測することができる。特に②で述べた超新星爆発からのニュートリノが検証されたため、過去の活動度の推測が信頼度を増している。現行神岡実験でも観測を試みているが、測定器が小さすぎて、有限値を得ていない。本計画の体積を持ってはじめて有限値が観測されるものと期待されている。

④ 大気ニュートリノの精密測定

地球に入射する陽子などの宇宙線は、大気中での反応でニュートリノを発生する。これら大気ニュートリノの角度分布や強度を精密に測定することによって、ニュートリノ振動の検証ができる。現行神岡実験では、大気ニュートリノの詳細な解析により、ある種のニュートリノ(ミュー・ニュートリノ)の反応断面積が予想の約60%しかないことを解明した。この結果は、上記ニュートリノ振動である可能性が高いが、この可能性を確実に検証するためには、本計画により、より詳細な測定が必要である。この可能性が検証されれば、①の太陽ニュートリノと同様ニュートリノの質量の存在を意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実験事実となり、大統一理論等への波及効果ははかり知れない。(ニュートリノ振動:ニュートリノが飛行中に他のニュートリノに変換すること。)

⑤ 高エネルギー太陽ニュートリノによる暗黒物質の探索

古くから、宇宙には光っていない物質が光で見える物質より、非常に多くあることがわかってきた(『見えない質量』の問題)。近年の観測によりこれらの『見えない物質』は我々の体を形作っている陽子や電子ではなく、全く新しい素粒子の可能性が段々高まってきている(暗黒物質)。これらの素粒子は太陽に捕獲され対消滅して高エネルギーニュートリノを発生する。本計画ではこのような高エネルギー太陽ニュートリノを捕らえることにより暗黒物質の正体を研究する。この研究は同時に未知の素粒子を探索する実験である。暗黒物質の正体を解明すればそれはおそらく、今まで知られている素粒子と全く違った素粒子であるので、素粒子物理学の急速な発展をうながすと共に、天文学宇宙論にとっては今世紀の最も重要な発見の一つとなる。特に、宇宙が閉じているか、閉じているかという根本的問題の解明にも重要な鍵となる。

⑥ 超高エネルギーニュートリノ点源の探索

若い中性子星や連星を形作っている中性子星は、陽子や原子核を超高エネルギーに加速している可能性が高い。これらの超高エネルギー陽子や原子核は星の大気と反応して超高エネルギーニュートリノを生成する。従って地球に飛来する超高エネルギーニュートリノの観測は中性子星における素粒子の加速機構を解明する鍵となる。

⑦ 陽子崩壊の探索

陽子崩壊を見つければ、素粒子の大統一理論の直接的検証になるとともに、宇宙の粒子・反粒子非対称性に対する実験的根拠を与え、かつビックバンが宇宙の特異点から始まったことを証拠立てることになる。本計画では測定器有効体積(22000トン)の内の陽子の崩壊を探索する。陽子崩壊の発見は疑いもなく本研究の最も重要な目的であり、また今世紀素粒子物理学の最も重要な発見の一つとなるであろう。現行神岡実験では陽子崩壊の強い候補はなく、考えるのはとんだ崩壊様式に対して、世界で最もきびしい寿命の下限を得ている。本計画では現行実験に比して28倍長い陽子の寿命まで測定可能となる。また陽子崩壊が発見され、その崩壊様式を決めれば、種々ある大統一理論のうちどれが正しいかを決定し、ひいては、重力まで含めた超統一理論への足がかりを与える。

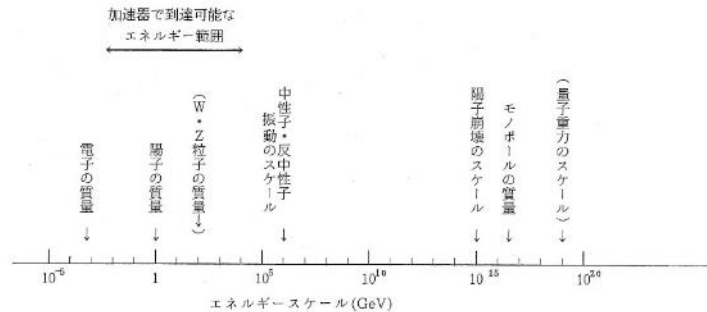
⑧ 中性子一反中性子振動の探索

ある種の大統一理論によれば、原子核中の中性子が反中性子に変換されることが予言されている。測定器内の水分子中の酸素原子核中でこの反応がおこると、変換された反中性子は残りの核子と反応して原子核をバラバラに壊してしまふ。この核反応を観測することにより中性子一反中性子振動を探索し、さらに大統一理論の検証を行なう。特に、中性子一反中性子振動の存在しうる大統一理論の種類は限られているので、大統一理論の大きな制限になる。

⑨ モノポール(磁気単極子)の探索

大統一理論の直接的帰結としてモノポールの存在が予言されている。モノポールは極端に質量が大きいため人工的に作ることは不可能で、宇宙生成すなわちビックバン直後の超高温の世界で生成されたと考えられている。ビックバンで生成されたモノポールは現在もこの宇宙を漂っている。本研究ではモノポールが太陽に捕獲され、太陽中でモノポールが陽子崩壊を引き起こし、その結果出てくるニュートリノを検出することにより、モノポールを探索する。モノポールの存在が確認されれば、大統一理論の考え方が正しいこと及び、宇宙がビックバンの超高エネルギーの状態から始まったことの直接的証拠となる。

達成度の評価



以上2図よりわかるように、スーパー神岡地下実験計画では、非常に広いエネルギー範囲にわたる種々のニュートリノ源が観測可能であり、一方、陽子崩壊や、モノポール等は、現在考えられている最大の加速器でも全く到達不可能なエネルギースケールの物理が関係していることがわかる。

以下で期待される成果の個々について述べる。

① 太陽ニュートリノの精密測定

アメリカのディビスらによりおこなわれている実験及び現行神岡実験で太陽ニュートリノは理論予想値の約半分しか来ていないことが観測されている。この問題を解決するために、『太陽ニュートリノ問題』を解決する。すなわち太陽中心の温度が予想値よりも実際に低いのか(天文学的問題)、またはニュートリノ自体の問題すなわち生成ニュートリノが途中で検出できない他のニュートリノに変換されたのか(物理学的問題)を同定する。もし、『太陽ニュートリノ問題』がニュートリノの性質によるなら、この観測はニュートリノに質量があることを意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実験事実となり、大統一理論等への波及効果ははかり知れない。またもし、『太陽ニュートリノ問題』が天文学的問題なら、やはり太陽の標準理論を否定することになり、この影響は天文学各方面に大きく波及する。

② 超新星爆発からのニュートリノの精密測定

超新星爆発からのニュートリノは、史上はじめて現行神岡地下実験により昭和62年2月23日に観測されたが、この観測は(中性子星生成)の重要な実験的検証を行う。また、この観測は、ニュートリノの多方面への波及効果がいかに大きいかは、すでに昭和62年2月23日の観測で実証されている。

③ 過去の超新星爆発による累積ニュートリノの精密測定

過去から引き続いて起きている超新星は、ニュートリノを宇宙に放出し、宇宙は徐々にこれらのニュートリノで満たされている。このニュートリノの密度を測定することによって、過去の超新星爆発からのニュートリノの総量を測定できる。現行神岡実験でも観測を試みているが、測定値が理論値と一致しない。この問題を解決するために、『過去の超新星爆発による累積ニュートリノの精密測定』を行う。すなわち過去の超新星爆発からのニュートリノの総量を測定することによって、過去の超新星爆発の総量を測定できる。この観測は、ニュートリノの多方面への波及効果がいかに大きいかは、すでに昭和62年2月23日の観測で実証されている。

④ 大気ニュートリノの精密測定

地球に入射する陽子などの宇宙線は、大気中での反応でニュートリノを生成する。これら大気ニュートリノの観測は、大気中の物理過程の理解に重要な役割を果たしている。現行神岡実験では、大気ニュートリノの観測を試みているが、測定値が理論値と一致しない。この問題を解決するために、『大気ニュートリノの精密測定』を行う。すなわち大気中の物理過程の理解に重要な役割を果たしている。現行神岡実験では、大気ニュートリノの観測を試みているが、測定値が理論値と一致しない。この問題を解決するために、『大気ニュートリノの精密測定』を行う。すなわち大気中の物理過程の理解に重要な役割を果たしている。

トリノの詳細な解析により、ある種のニュートリノ(ミュー・ニュートリノ)の反応断面積が予想の約60%しかないことを解明した。この結果は、上記ニュートリノ振動である可能性が高いが、この可能性を確実に検証するためには、本計画により、より詳細な測定が必要である。この可能性が検証されれば、①の太陽ニュートリノと同様ニュートリノの質量の存在を意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実験事実となり、大統一理論等への波及効果ははかり知れない。(ニュートリノ振動:ニュートリノが飛行中に他のニュートリノに変換すること。)

⑤ 高エネルギー太陽ニュートリノによる暗黒物質の探索

古くから、宇宙に溢れている物質が光で見える物質より、非常に多くあることがわかっていた(『見えない物質』)。この『見えない物質』は、宇宙の全質量の約80%を占めると考えられている。この『見えない物質』の正体を明らかにすることは、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。高エネルギー太陽ニュートリノによる暗黒物質の探索は、この課題を解決するための重要な手段である。暗黒物質の正体を解明すればそれはおそらく、今まで知られていない素粒子と全く違った素粒子であるので、素粒子物理学の急速な発展をうながすと共に、天文学宇宙論にとっては今世紀の最も重要な発見の一つとなる。特に、宇宙が閉じているか、開いているかという根本的問題の解明にも重要な鍵となる。

⑥ 高エネルギーニュートリノ点源の探索

若い中性子星や星雲を形成している中性子星は、陽子や原子核を超高エネルギーに加速している可能性が大きい。この加速された粒子は、宇宙空間を飛行しながら、他の物質と衝突して、高エネルギーニュートリノを生成する。従って、高エネルギーニュートリノの観測は、中性子星における素粒子の加速機構を解明する鍵となる。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。

⑦ 陽子崩壊の探索

陽子崩壊が見つければ、素粒子の大統一理論の直接的検証になるとともに、宇宙の粒子・反粒子非対称性に対する疑問を解消することになる。本計画では、陽子崩壊の探索を行う。陽子崩壊の探索は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。陽子崩壊の探索は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。陽子崩壊の探索は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。

⑧ 中性子-反中性子振動の探索

ある種の大統一理論によれば、原子核中の中性子が反中性子に変換されることが予想されている。測定器内の水分中の陽子と中性子の間でこの反応が起こると、生成された反中性子は陽子の核子と反発して原子核をバラバラにする。特に、中性子-反中性子振動の存在しうる大統一理論の検証に重要な役割を果たしている。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。

⑨ モノポール(磁気単極子)の探索

大統一理論の直接的帰結としてモノポールの存在が予想されている。モノポールは極端に質量が大きいため人工的に作ることは不可能で、宇宙生成すなわちビッグバン直後の超高温の世界で生成されたと考えられている。モノポールの探索は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。モノポールの探索は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。モノポールの探索は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。

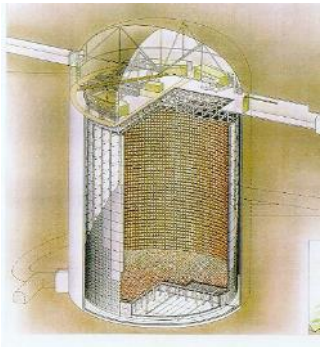
⑩ 高エネルギーニュートリノ点源の探索

若い中性子星や星雲を形成している中性子星は、陽子や原子核を超高エネルギーに加速している可能性が大きい。この加速された粒子は、宇宙空間を飛行しながら、他の物質と衝突して、高エネルギーニュートリノを生成する。従って、高エネルギーニュートリノの観測は、中性子星における素粒子の加速機構を解明する鍵となる。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。高エネルギーニュートリノの観測は、宇宙の未来を決定づける重要な課題である。

SKでの今後の研究

素粒子研究

- 大気ニュートリノによる質量階層性の研究
- 太陽ニュートリノによる振動の物質効果
- T2K実験によるニュートリノと反ニュートリノとの振動の違い
- 陽子崩壊(候補があれば、その確からしさをあげたい(後述))
- 暗黒物質間接探索(太陽や銀河中心からの高エネルギーニュートリノ)



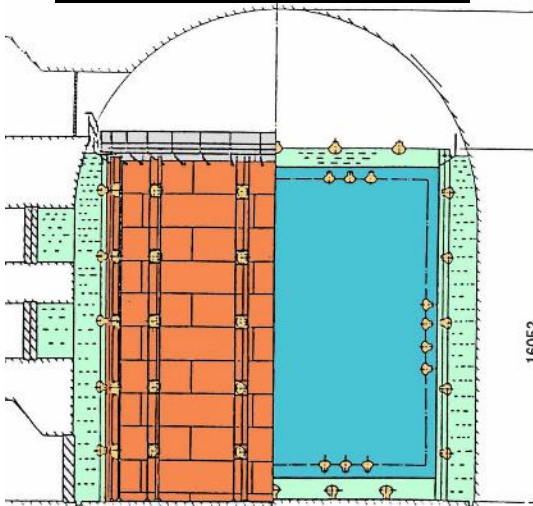
大型水チェレンコフ
宇宙素粒子観測装置
(スーパーカミオカンデ)

宇宙観測

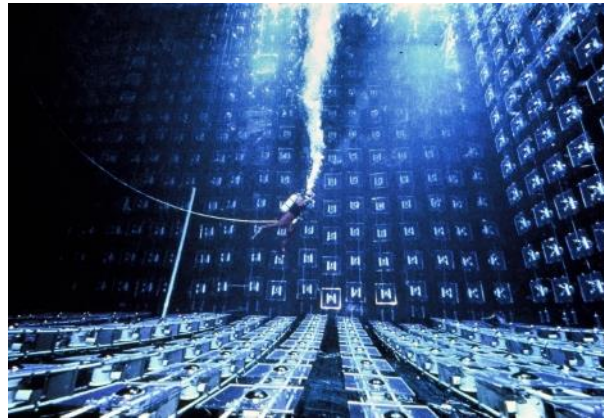
- 過去の超新星からのニュートリノ観測(超新星背景ニュートリノ)
- 運よく銀河系で超新星爆発が起これば高統計観測

SN1987A: supernova at LMC(50kpc)

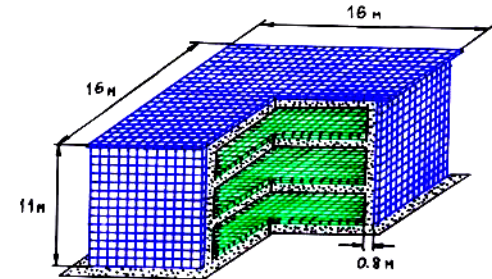
Kamiokande-II



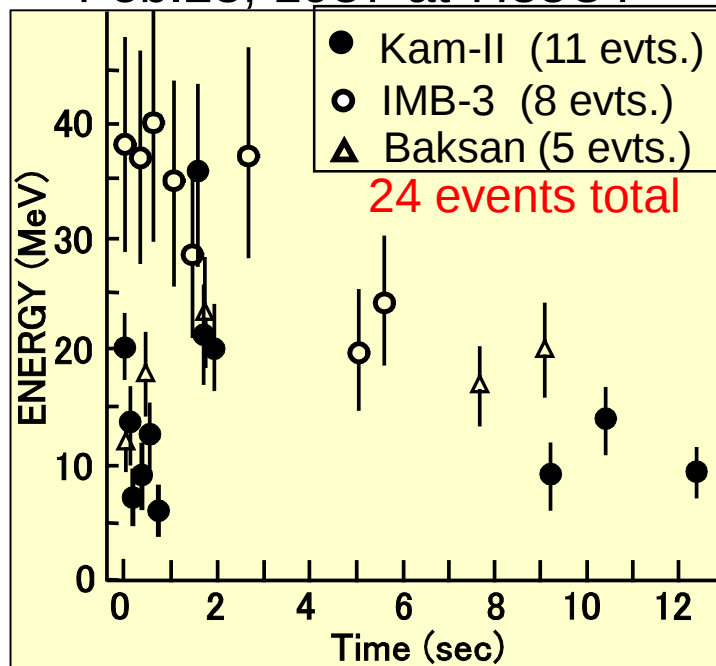
IMB-3



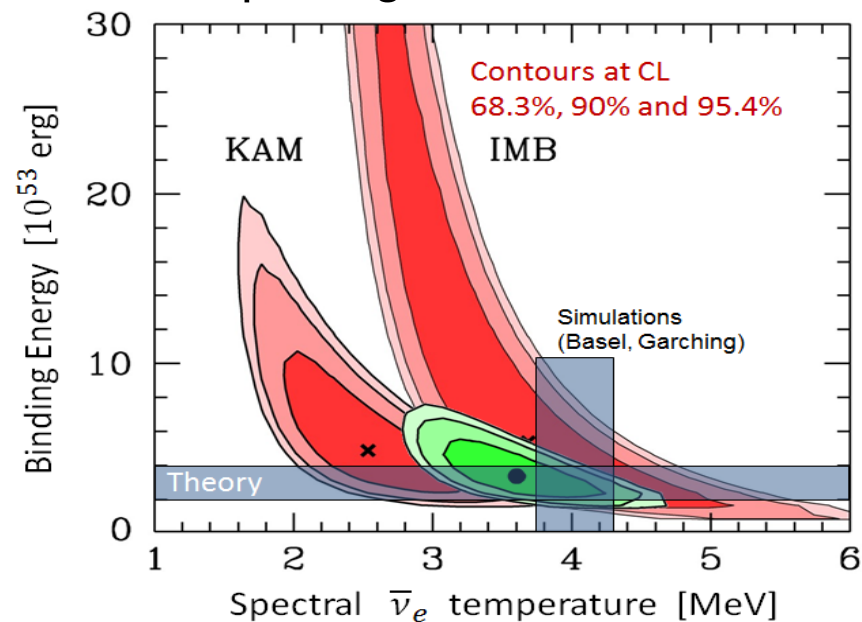
BAKSAN



Feb.23, 1987 at 7:35UT

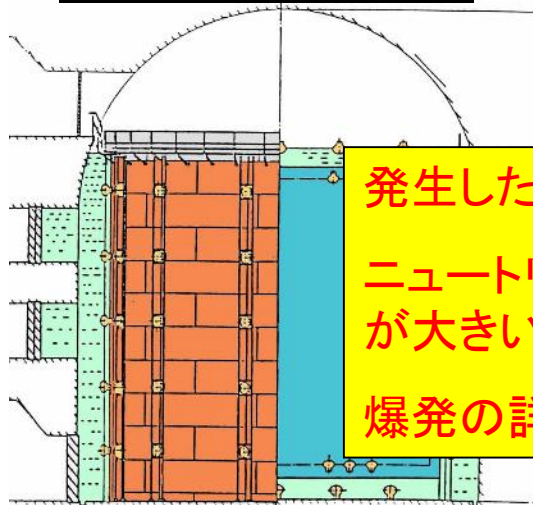


Interpreting SN 1987A Neutrinos



SN1987A: supernova at LMC(50kpc)

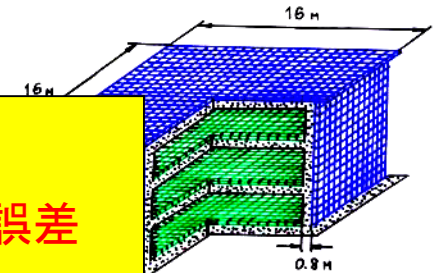
Kamiokande-II



IMB-3

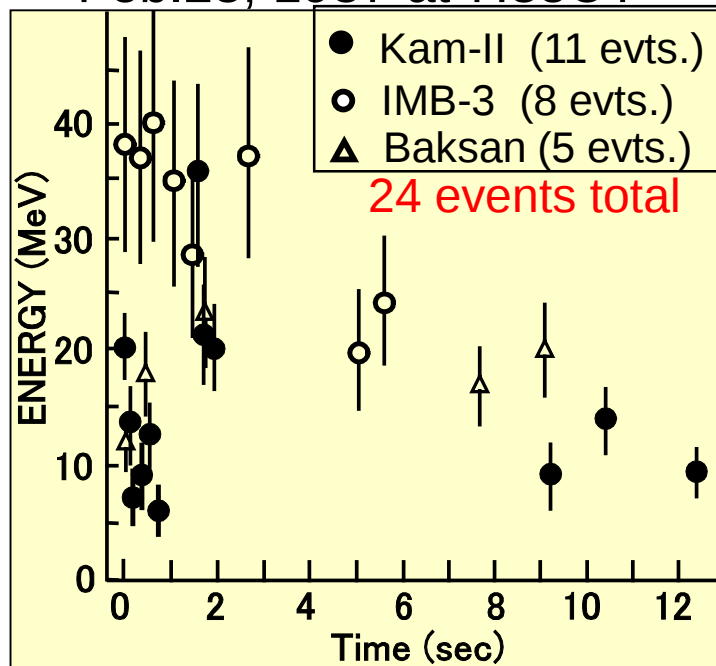


BAKSAN

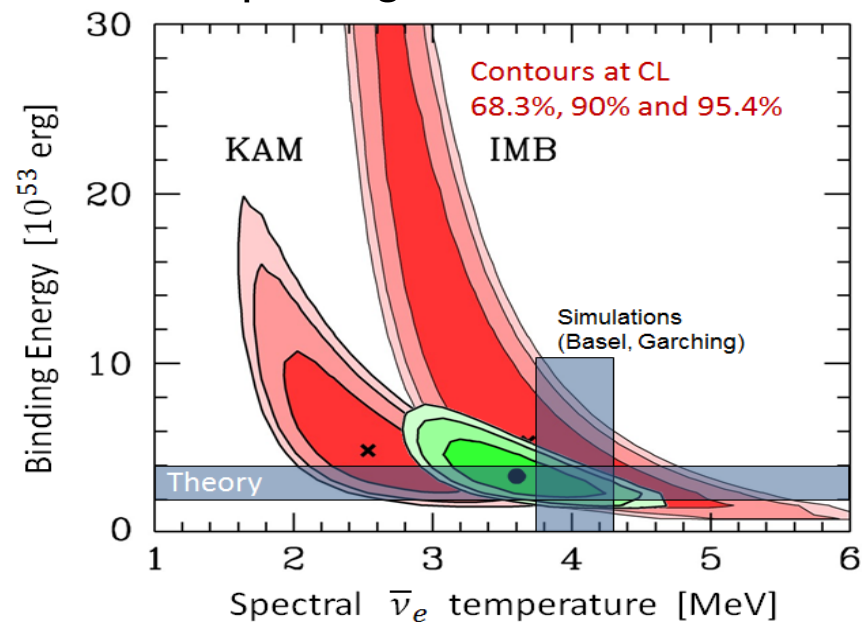


発生した総エネルギーはほぼ予想どおり。
ニュートリノの平均エネルギーは得られたが、誤差が大きい。
爆発の詳細な過程までは、わからなかった。

Feb.23, 1987 at 7:35UT

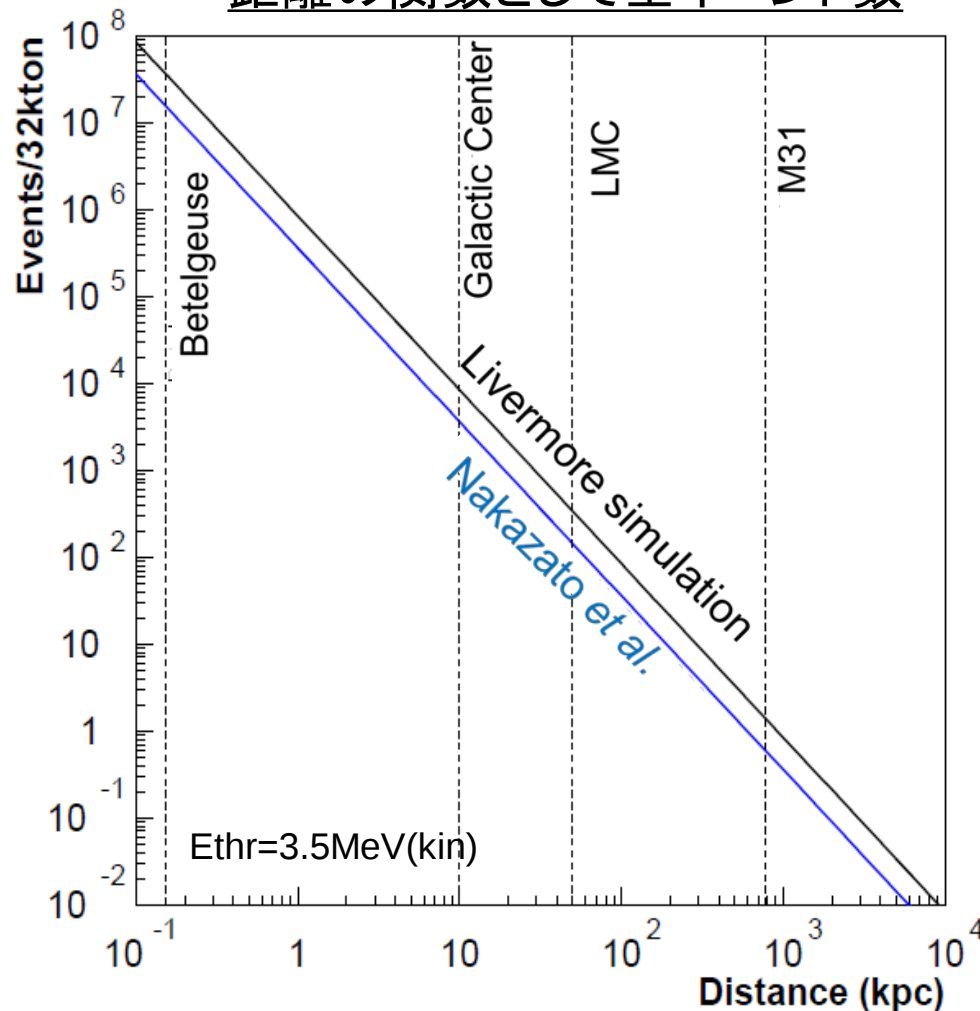


Interpreting SN 1987A Neutrinos

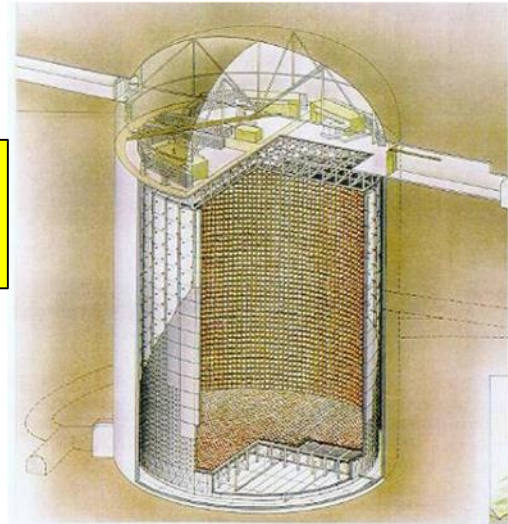


Super-Kでのイベント数予測

距離の関数として全イベント数



32kton water
Cherenkov



イベント数の予測

	Livermore	Nakazato
$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$	7300	3100
$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$	320	170
^{16}O CC	110	57

10 kpcでの超新星爆発

32kトン SK体積

4.5MeV(kin) 閾値

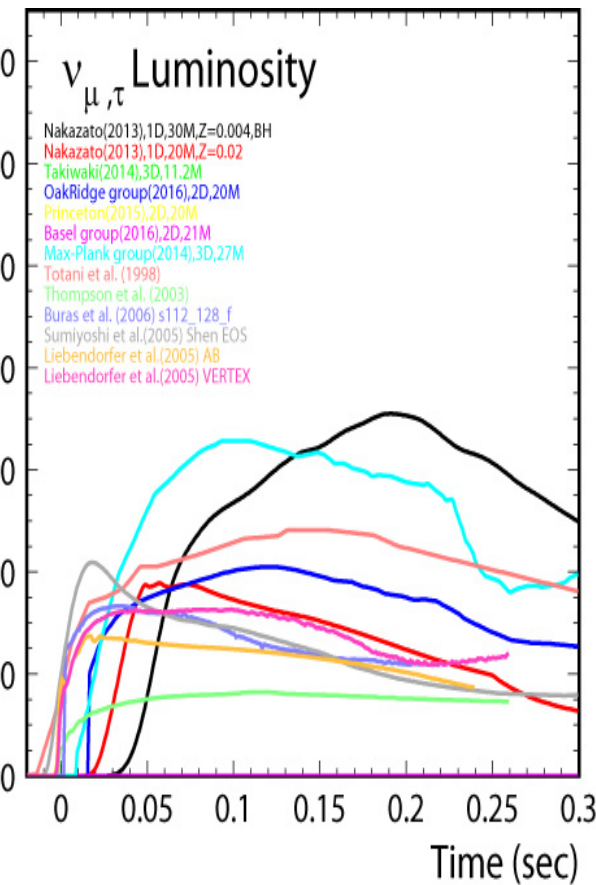
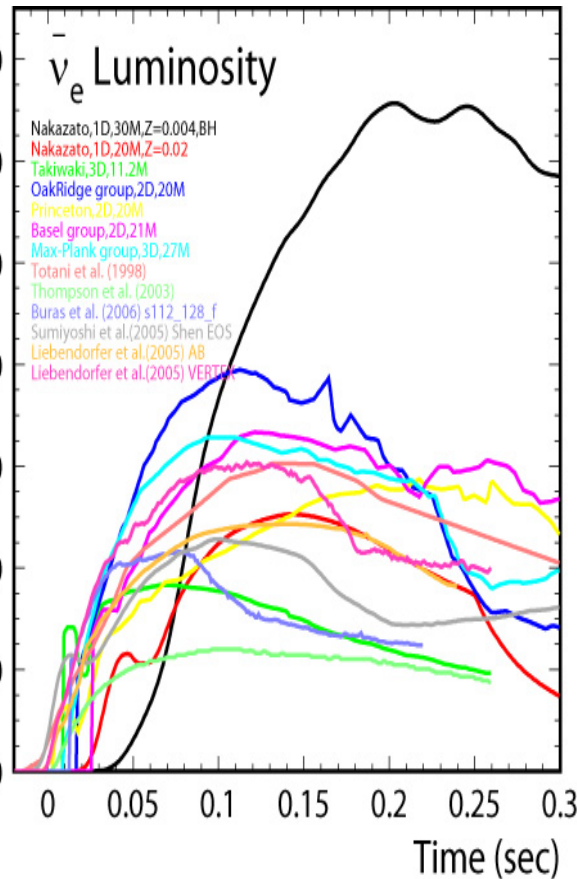
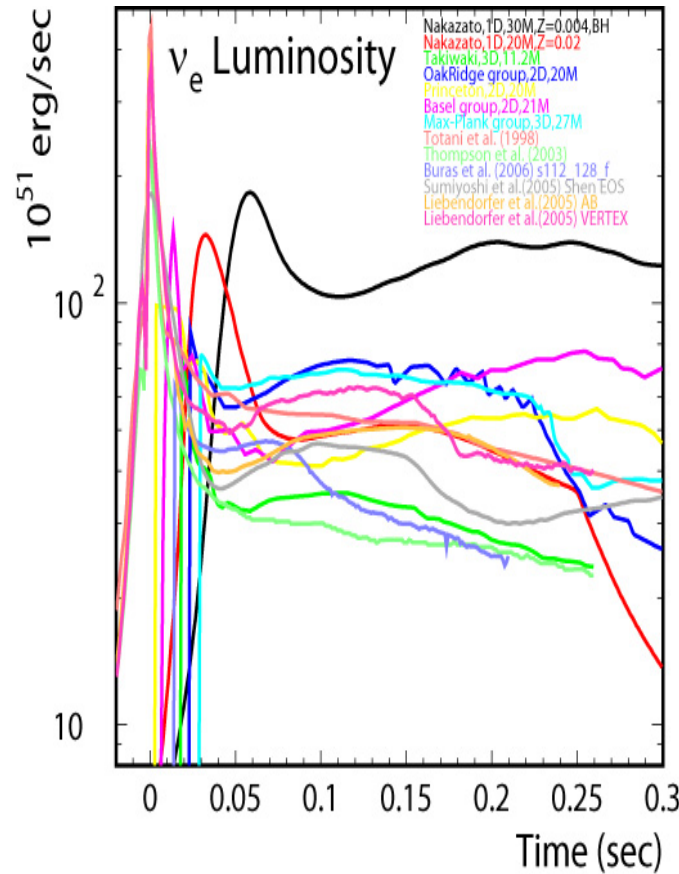
ニュートリノ振動なし

Livermore simulation T.Totani, K.Sato, H.E.Dalhed and J.R.Wilson, ApJ.496,216(1998)

Nakazato et al. K.Nakazato, K.Sumiyoshi, H.Suzuki, T.Totani, H.Umeda, and S.Yamada, ApJ.Suppl. 205 (2013) 2, (20M_{sun}, trev=200msec, z=0.02 case)



モデルによるニュートリノルミノシティの違い



Nakazato(2013), 1D, 30M, Z=0.004, BH
Nakazato(2013), 1D, 20M, Z=0.02
Takiwaki(2014), 3D, 11.2M
OakRidge group(2016), 2D, 20M
Princeton(2015), 2D, 20M
Basel group(2016), 2D, 21M
Max-Planck group(2014), 3D, 27M

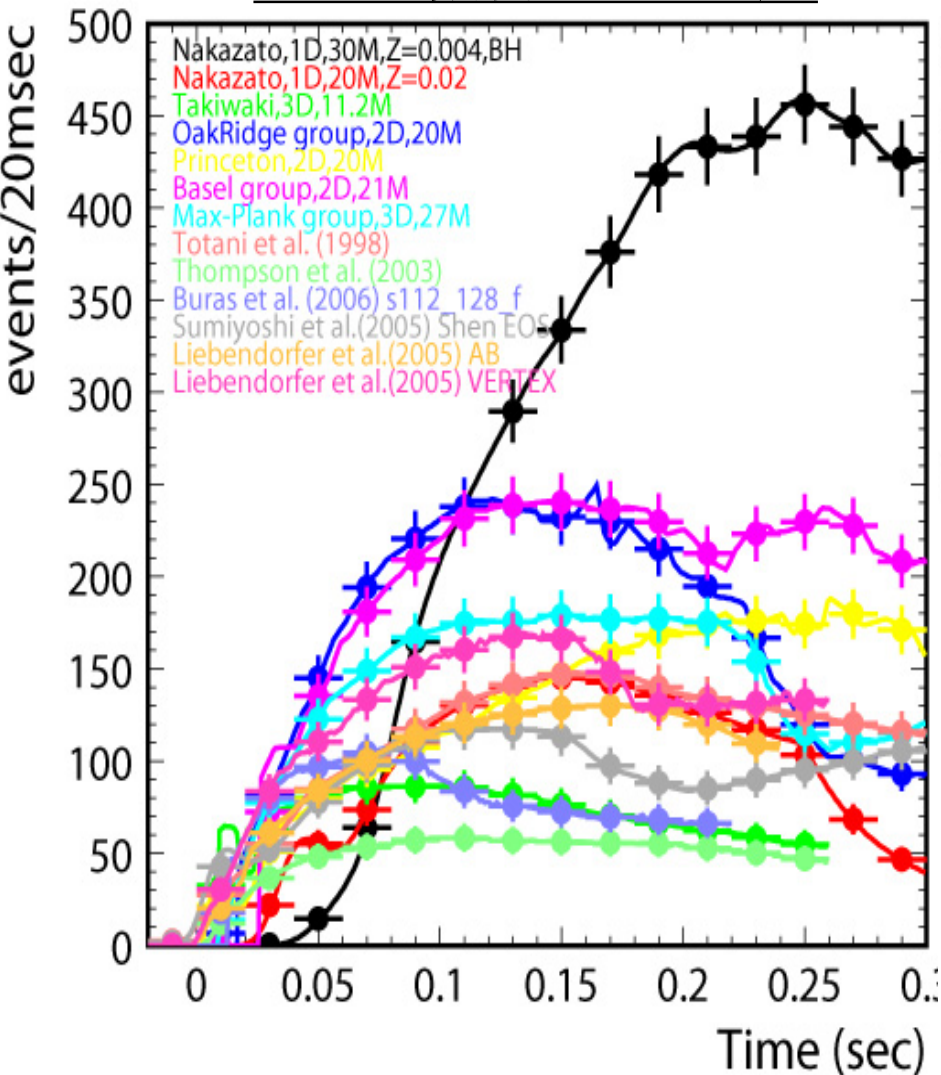
Totani et al. (1998)
Thompson et al. (2003)
Buras et al. (2006) s112_128_f
Sumiyoshi et al.(2005) Shen EOS
Liebendorfer et al.(2005) AB
Liebendorfer et al.(2005) VERTEX



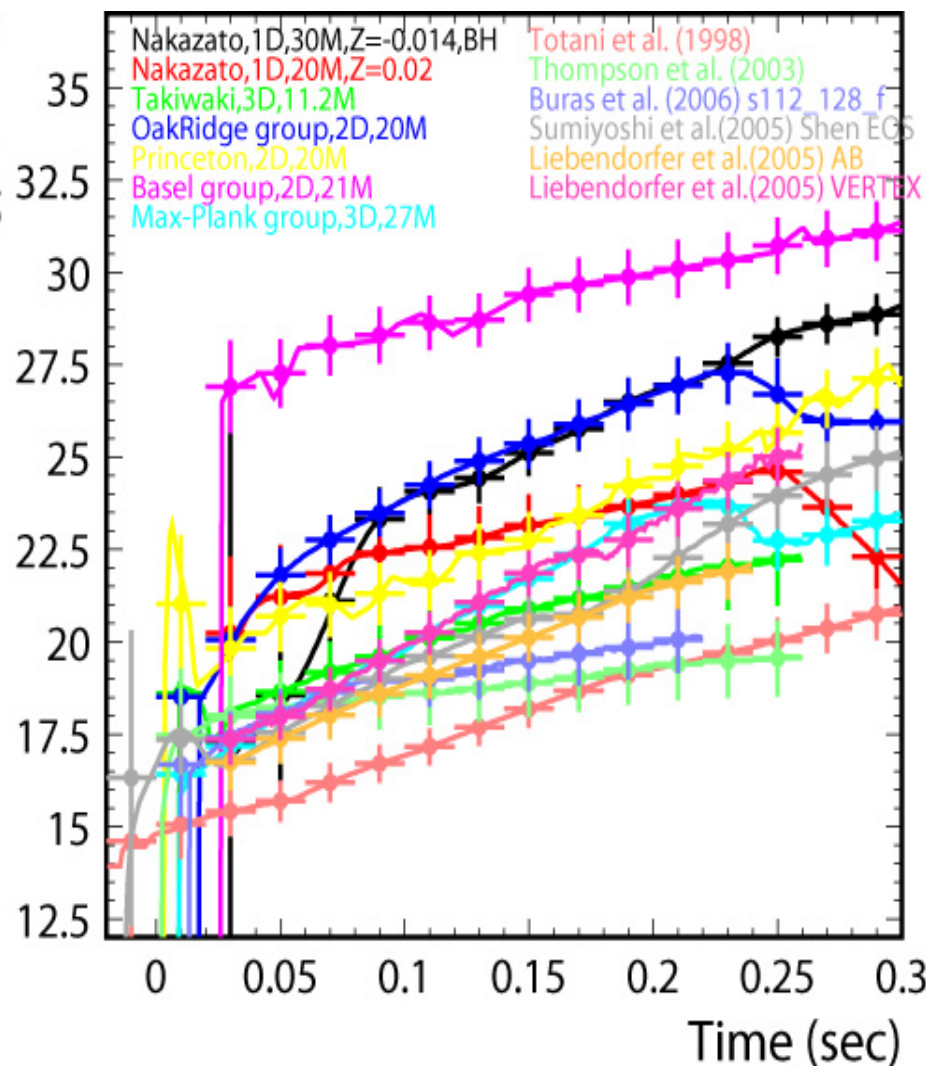
モデルの違いに対するSKデータの感度

10kpcでの超新星を仮定

イベント頻度の時間発展



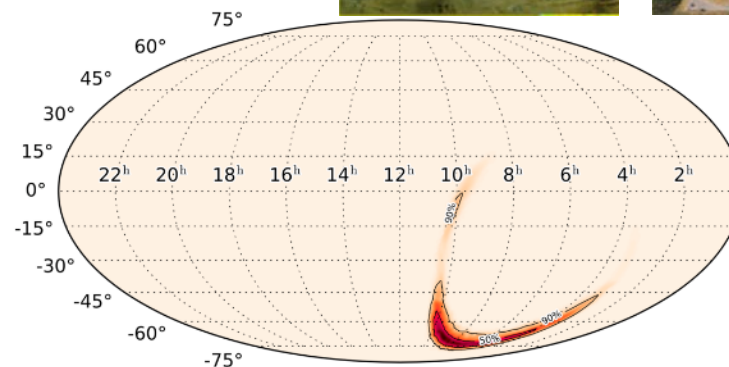
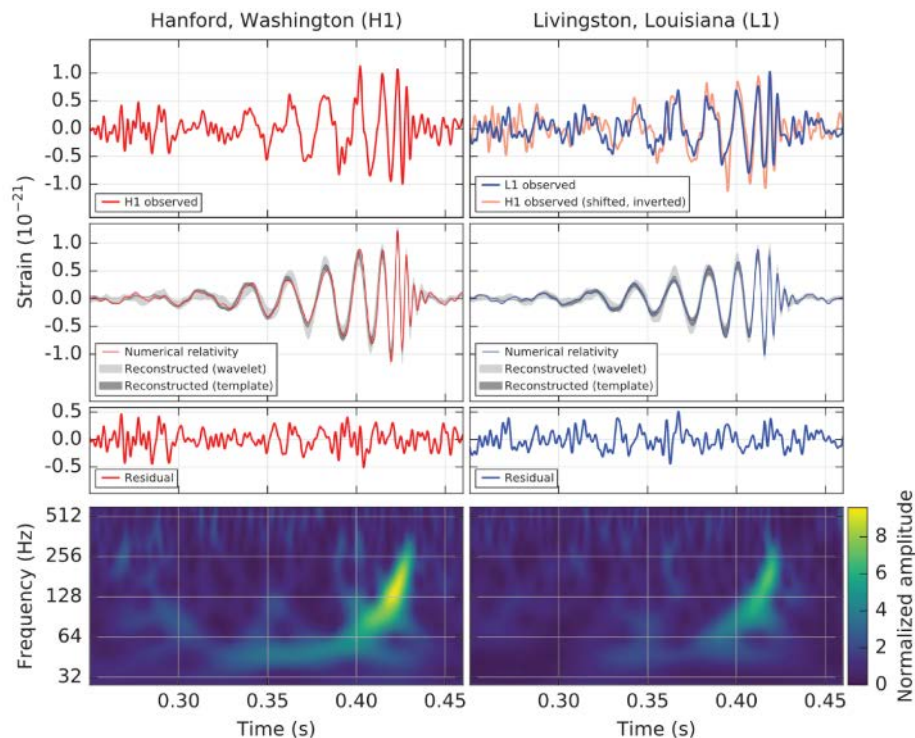
平均エネルギーの時間発展



モデルの識別ができるほどの高統計

LIGOによるGW150914の観測

09:50:45(UTC) Sep.14,2015, PRL 116, 061102(2016)



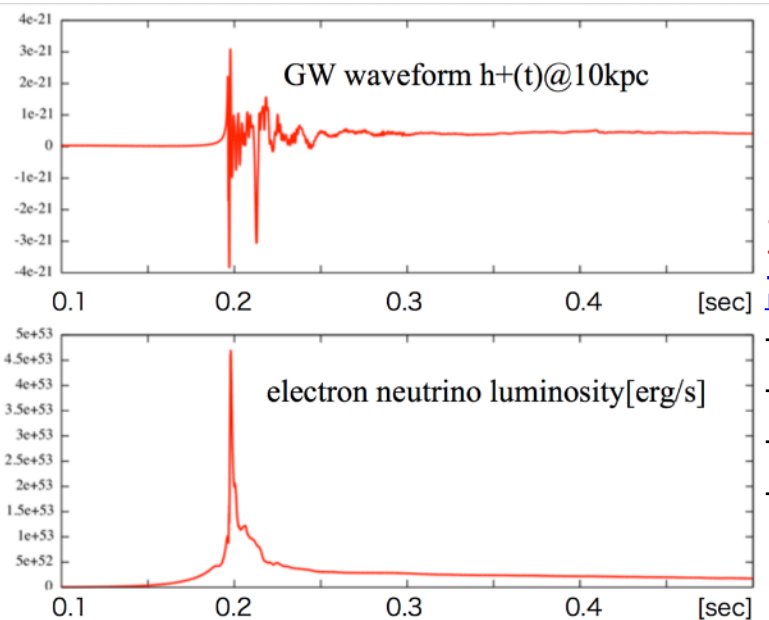
- ふたつの観測装置: LIGO Hanford and Livingston
- ブラックホール-ブラックホール合体からの重力波
- 物理のインパクト
 - 重力波の初観測 (5.1σ)
 - 連星ブラックホールの初めての直接観測

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



「重力波天文学」への扉が開かれた。

ニュートリノと重力波による超新星爆発観測



- 2D 数値シミュレーション(Suwa et.al. 2013)
 - $11.2M_{\odot}$, 高速回転コアモデル
 - 横軸は重力崩壊からの時間

重力波とニュートリノの同時計測から何がわかるか？

詳細な超新星爆発メカニズムを解明

- 重力波、ニュートリノそれぞれは内部のコアの情報を与える
- 物質の情報(重力波), 熱の情報(ニュートリノ)
- 爆発の各フェーズにおける重力波、ニュートリノ信号が重要
- コアバウンス, 中性子化バースト, 衝撃波失速/復活, SASI(Standing Accretion Shock Instability) など

ふたつの重要な特色:

1. コアバウンスと中性子化バーストの時間

- 重力波の信号から、内部コアの回転に関する情報が得られる。ニュートリノルミノシティの立ち上がりと中性子化バーストの時刻からコアバウンスの時刻を決めることができる。

2. 衝撃波の失速と復活のタイムスケール

- ニュートリノ駆動爆発メカニズム(delayed explosion) を調べることが重要。
- 衝撃波の挙動(ショックの不安定性は、重力波やニュートリノ強度の変動を生じさせる。)

次の銀河系内超新星爆発は、マルチメッセンジャー天文学により華々しい観測になる！

銀河系内での重力崩壊型超新星爆発頻度

➤ 歴史に残る超新星爆発からの見積もり

- $3.4^{+7.8}_{-2.8}$ 個 / 100年 (Adams et al., ApJ,778,164(2013))
- $2.5^{+0.8}_{-0.5}$ 個 / 100年 (Tammann et al., ApJS,92,487(1994))
- 5.7 ± 1.7 個 / 100年 (Strom, A&A,288,L1(1994))

➤ 大質量星生成率

- 1—2 個 / 100年 (Reed, AJ,130,1652(2005))

➤ ^{26}Al の生成率

- 1.9 ± 1.1 個/ 100年 (Diehl et al.,Natur,439,452006(2006))

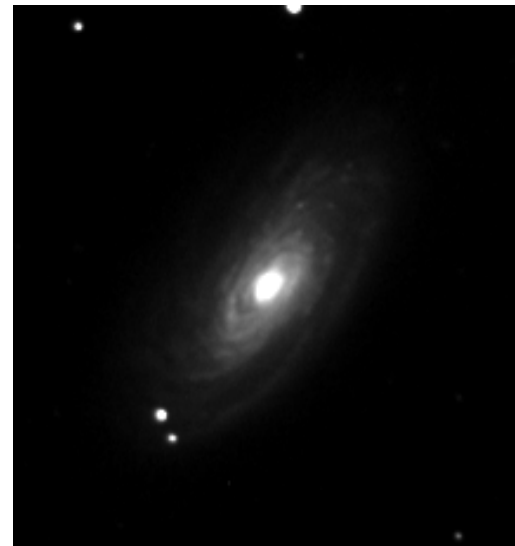
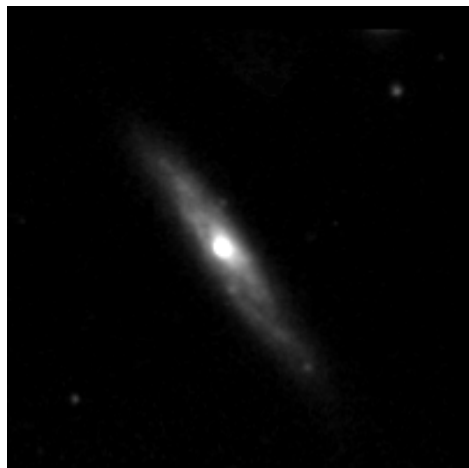
➤ Pulsar生成率

- 2.8 ± 0.1 個/ 100年 (Keane&Kramer,MNRAS,391,2009(2008))
- 10.8^{+7}_{-5} 個/ 100年 (Faucher-Giguère&Kaspi.,ApJ,643,332(2006))

➤ Extragalacticからの推定

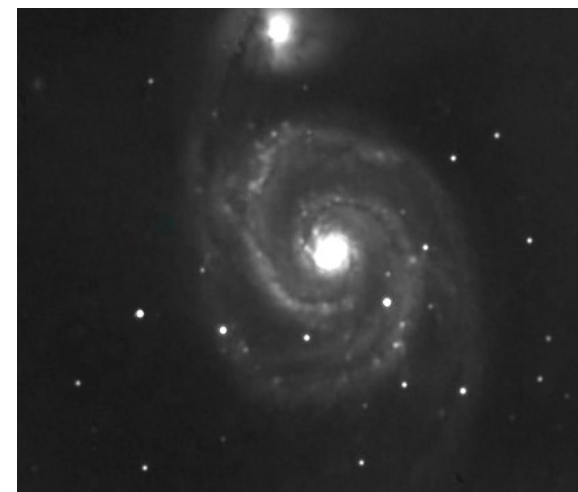
- 2.8 ± 0.6 個/ 100年 (Li et al.,MNRAS,412,1473(2011))

内容は、Adams et al., ApJ,778,164(2013))より



宇宙には $\sim 10^{20}$ 個の恒星があり、その約0.3%が超新星爆発に至る。

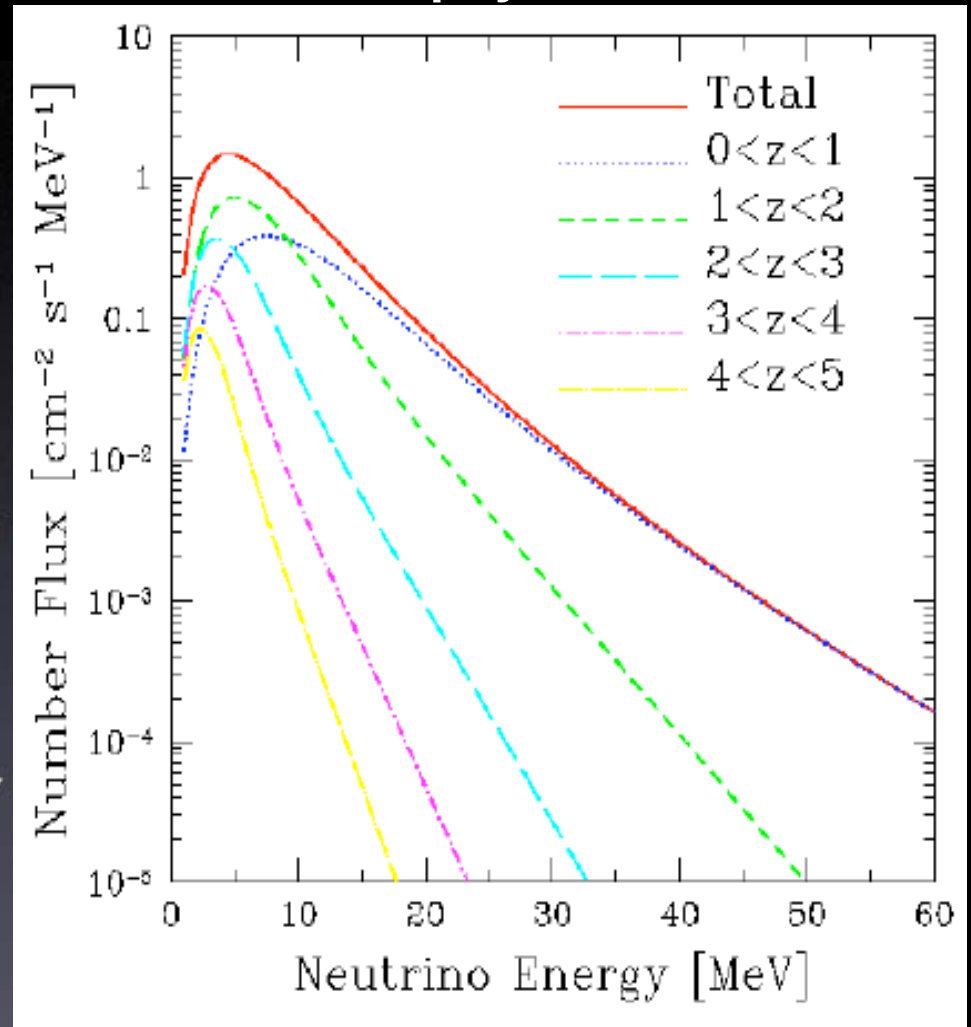
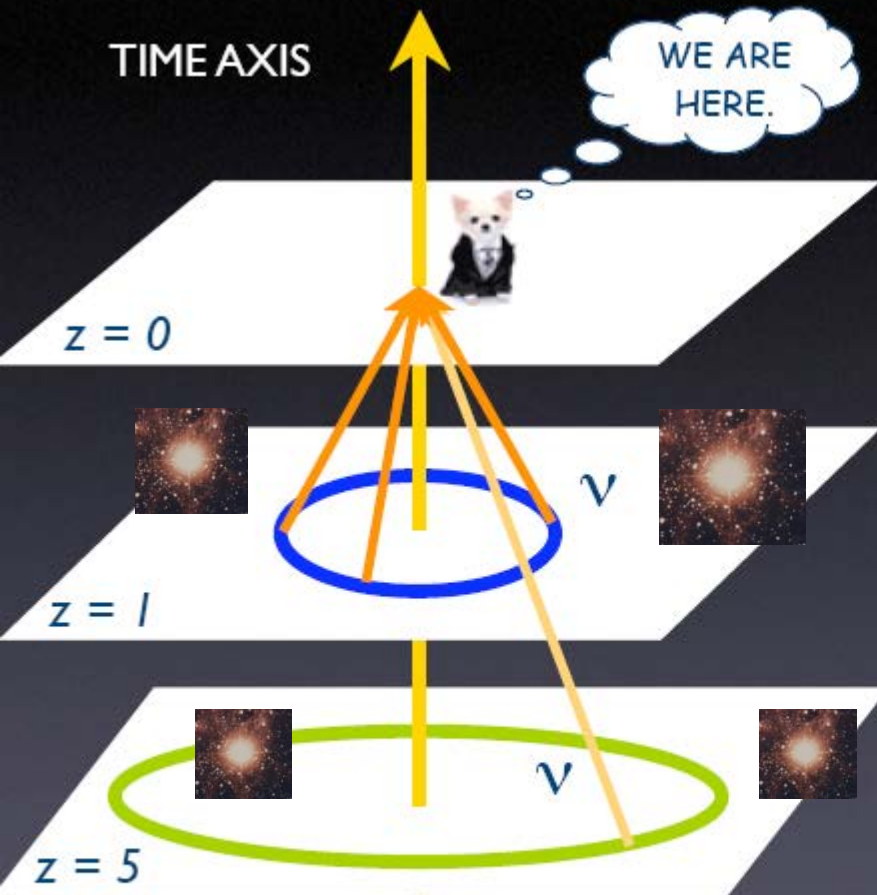
したがって、宇宙の開闢から今までに約 10^{17} 回の超新星爆発がおきてきたことになる。それにとまなうニュートリノ(超新星背景ニュートリノ)は宇宙に満ちている。



超新星背景ニュートリノ

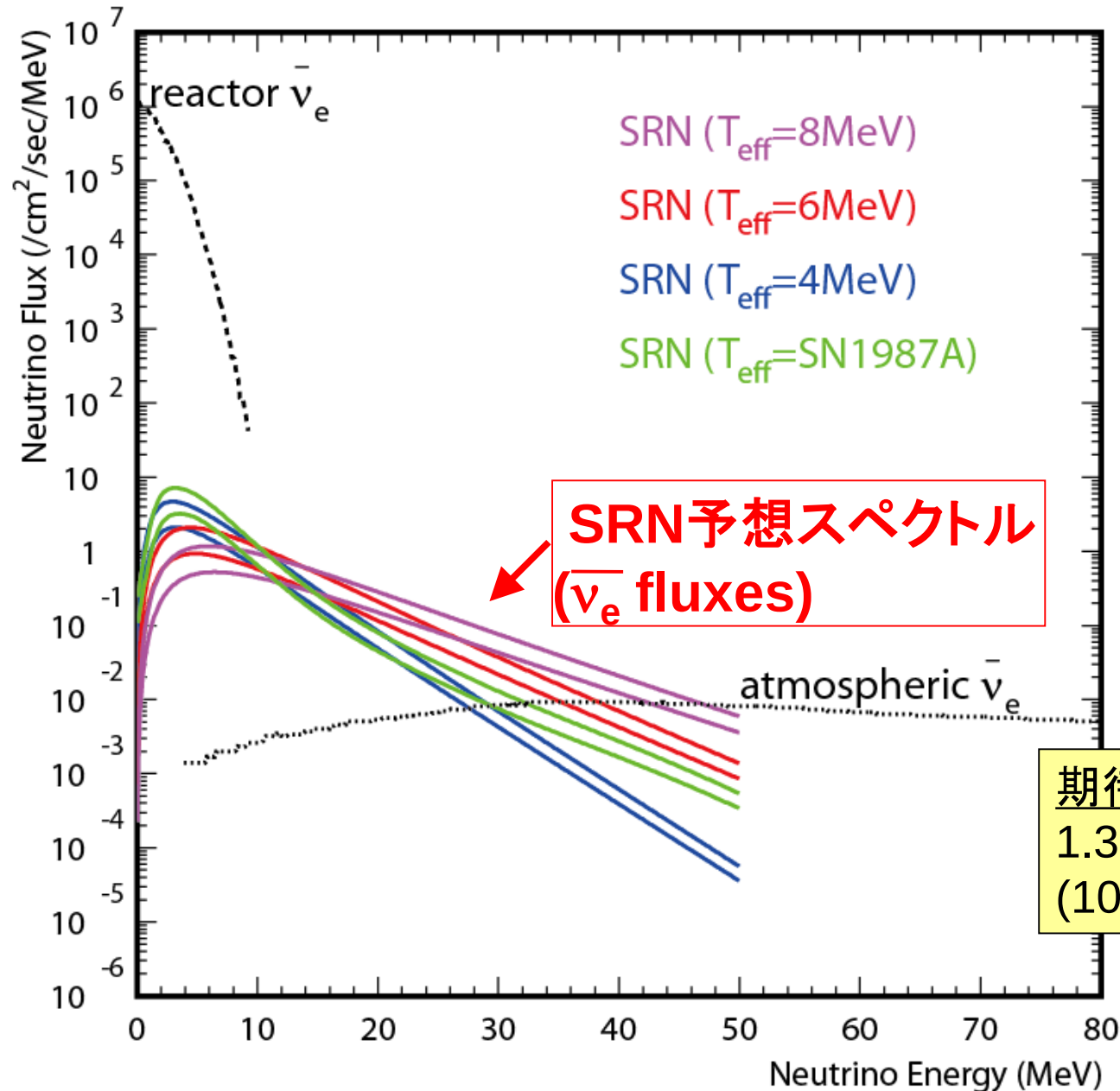
今までに $\sim 10^{17}$ 個の超新星

S.Ando, Astrophys.J.607:20-31,2004.



$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

超新星背景ニュートリノ(SRN)のスペクトル

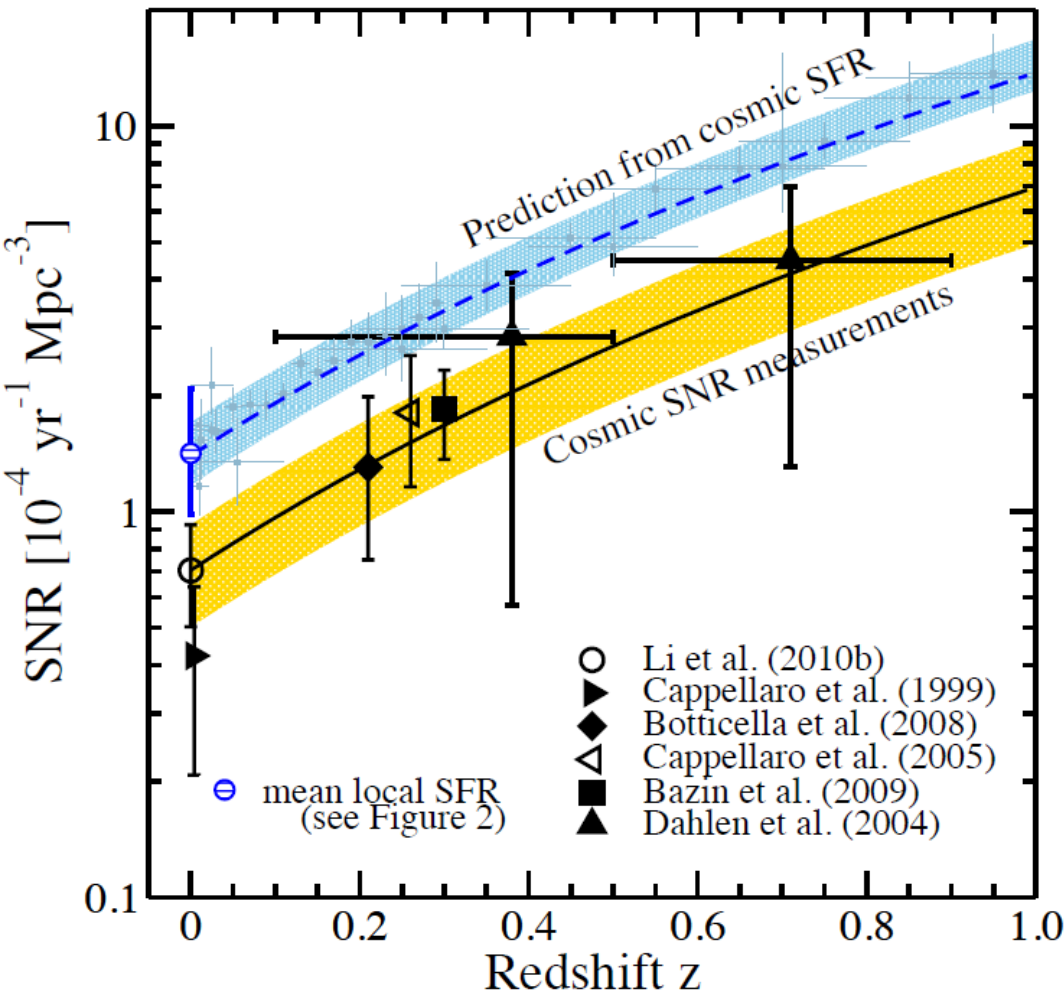


SRN flux の計算は、Horiuchi et al. PRD, 79, 083013 (2009)

期待されるSRN信号の数
1.3 -6.7 events/year/22.5kt
(10-30MeV)

SKの有効体積

超新星の頻度



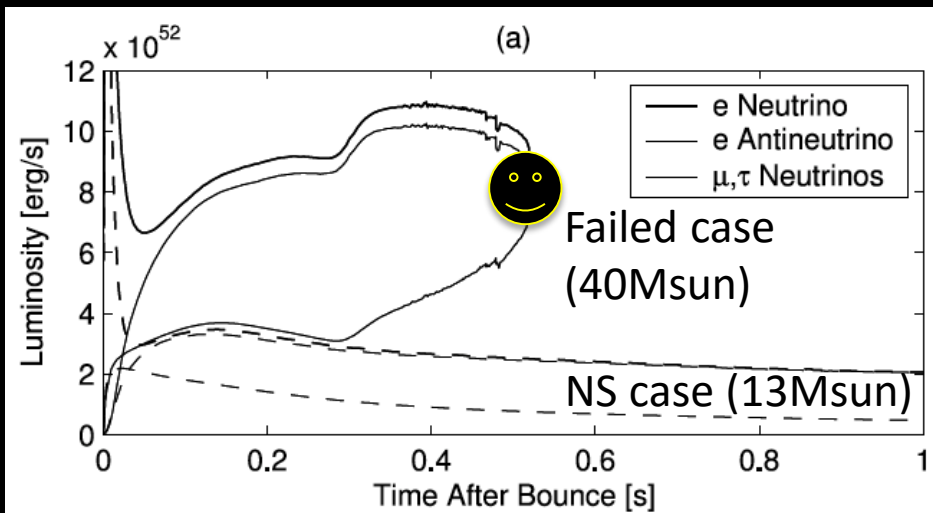
- ◆ 観測された超新星頻度は、SFRから予想される頻度比べて半分ぐらいしかない。
- ◆ この原因は何か？
 - 明るさが暗い超新星があるのか？
 - 光を遮るものがあるか？

ニュートリノ観測によってこれらの疑問に答える。

Observing failed collapse

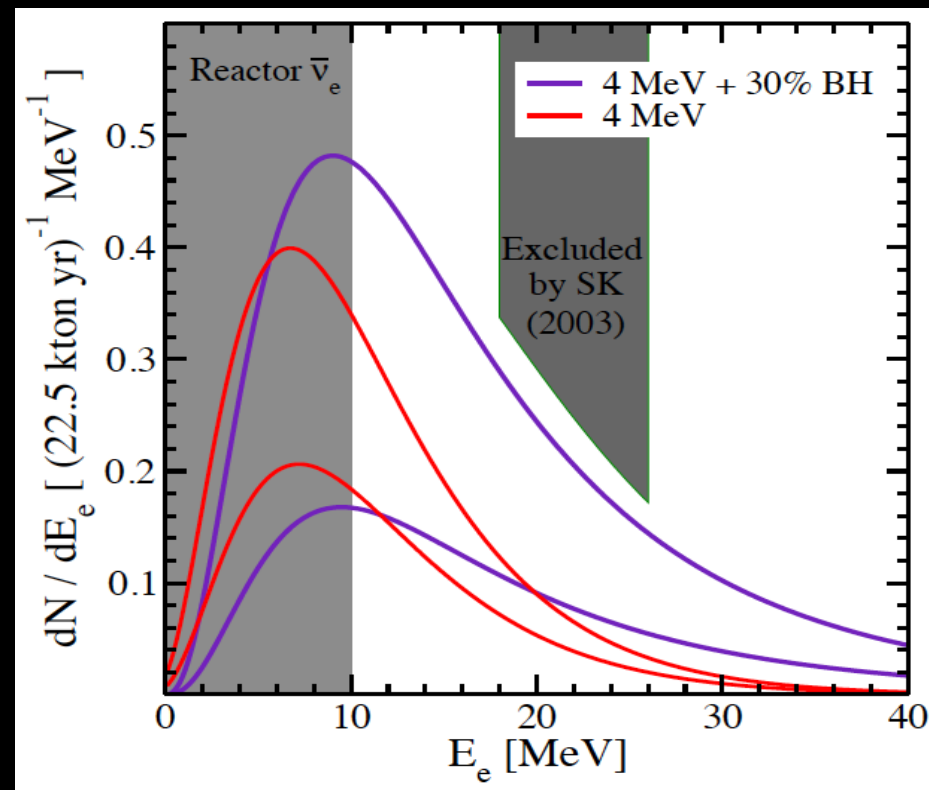
Galactic core collapse: neutrino emission drops; can be detected

Beacom et al (2001)



Liebendoerfer et al (2004)

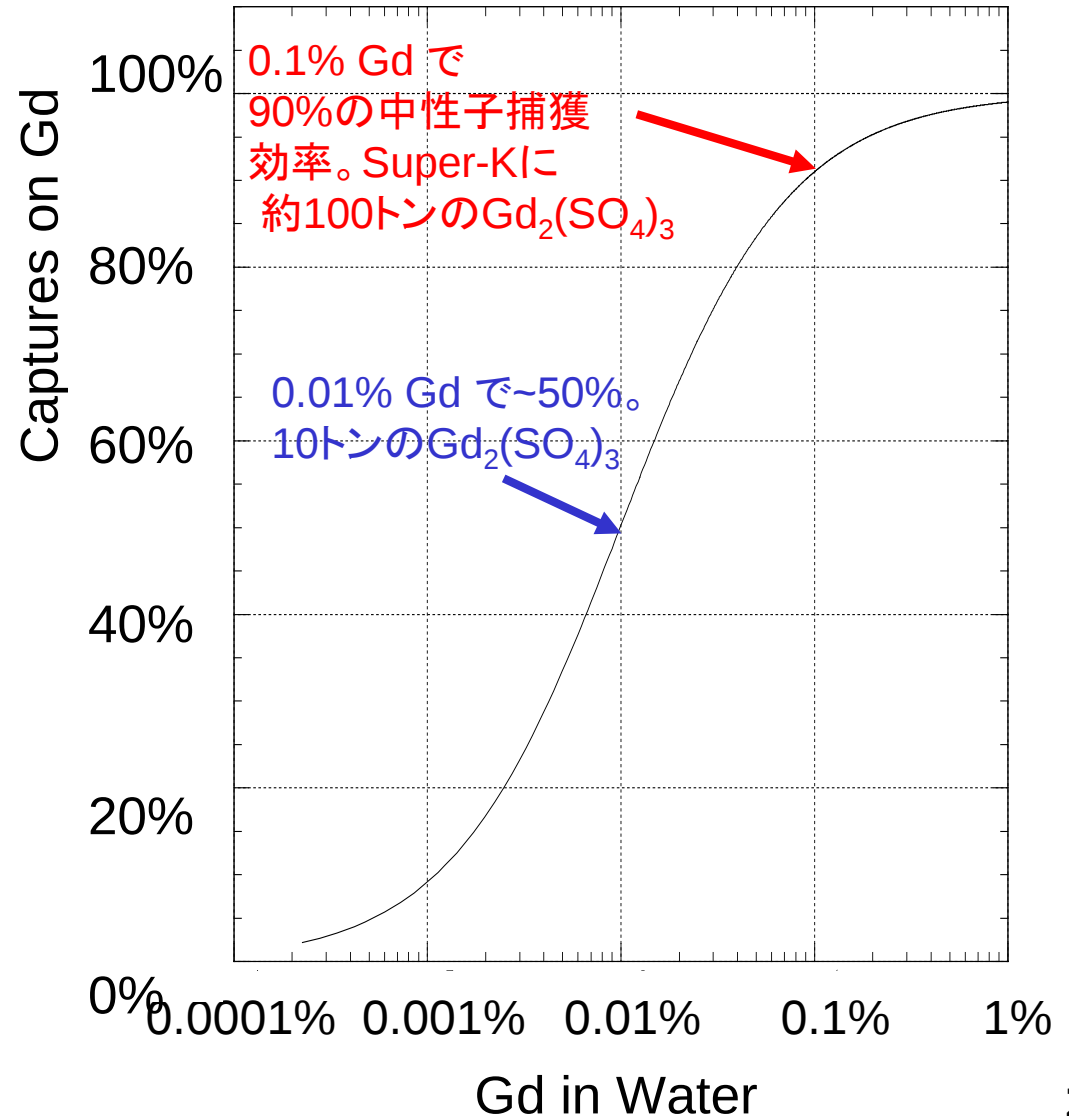
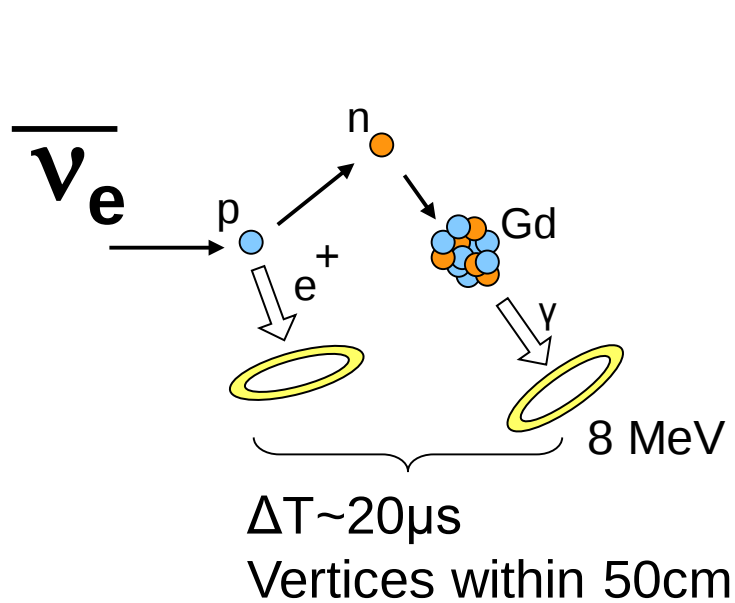
Diffuse supernova neutrino background: *guaranteed* signal, failed collapse can significantly increase the expected flux.



Lunardini (2009), Lien et al (2010), Keehn & Lunardini (2010), Nakazato (2013), Yuksel & Kistler (2014)

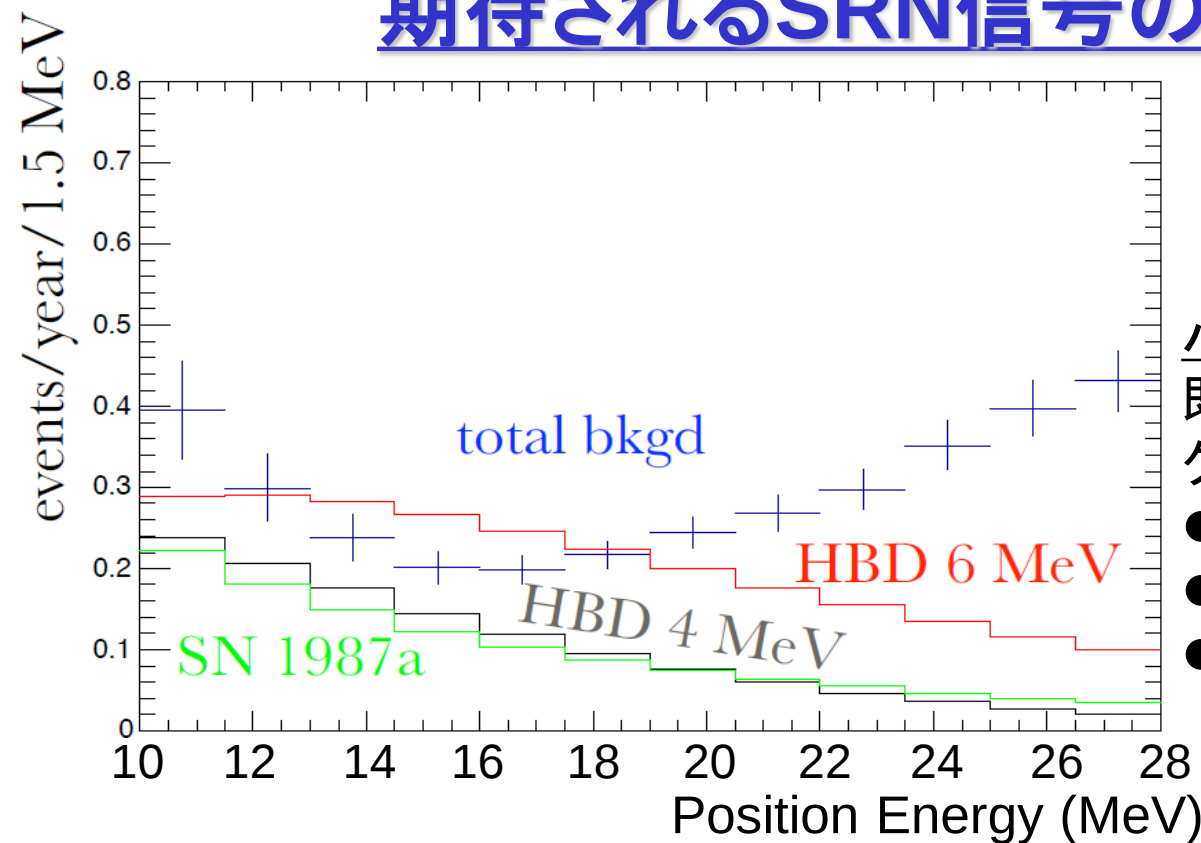
Gdによる中性子同時計測

ガドリニウムは中性子捕獲断面積が大きい物質。
捕獲後、総計 8 MeV のガンマ線が放出される。



期待されるSRN信号の有意度

preliminary



SRN flux の計算は、
Horiuchi, Beacom and Dwek,
PRD, 79, 083013 (2009)

バックグラウンド(BG)の仮定
既存のBGと比べて中性子タ
グすることによって、

- ν_μ CC BGは、1/4
- ν_e CC BGは、2/3
- NC elastic BGは、1/3 (中
性子数が1であることを要
求)

モデル	10-16MeV (evts/10yrs)	16-28MeV (evts/10yrs)	Total (10-28MeV)	有意度 (2 energy bin)
HBD 8MeV	11.3	19.9	31.2	5.3 σ
HBD 6MeV	11.3	13.5	24.8	4.3 σ
HBD 4MeV	7.7	4.8	12.5	2.5 σ
HBD SN1987a	5.1	6.8	11.9	2.1 σ
BG	10	24	34	----

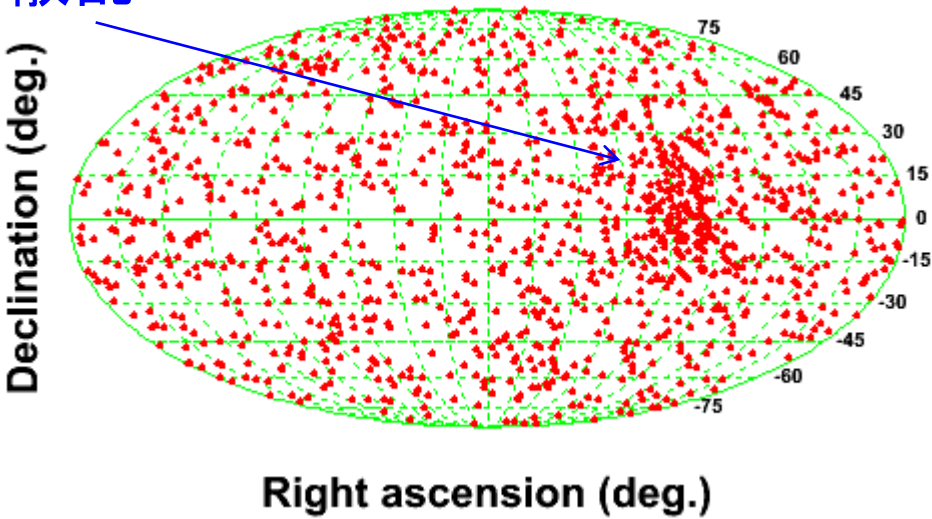
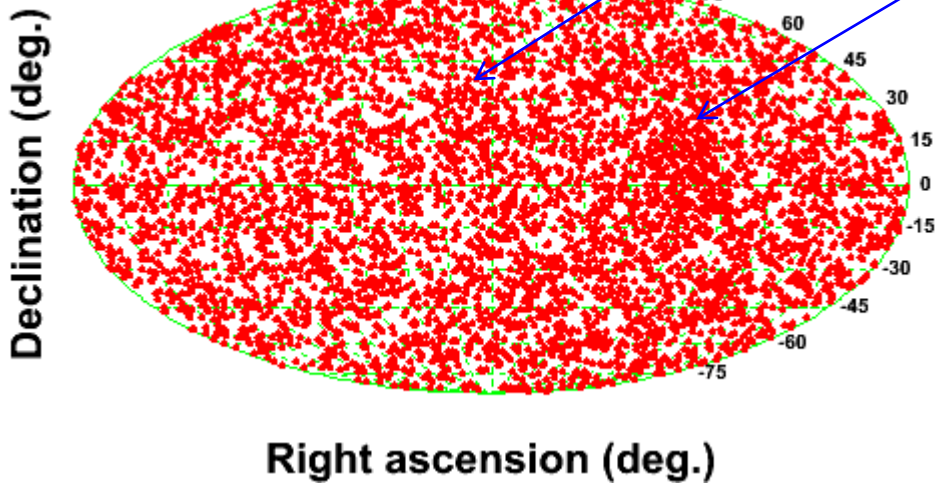
超新星爆発が我々の銀河で起きた場合

超新星の方向決定精度を向上

(10kpcの距離での超新星爆発のシミュレーション)

$\bar{\nu}_e$ の同定なし $\bar{\nu}_e + p$ 反応 $\nu + e$ 散乱

$\bar{\nu}_e$ を80%の効率で同定

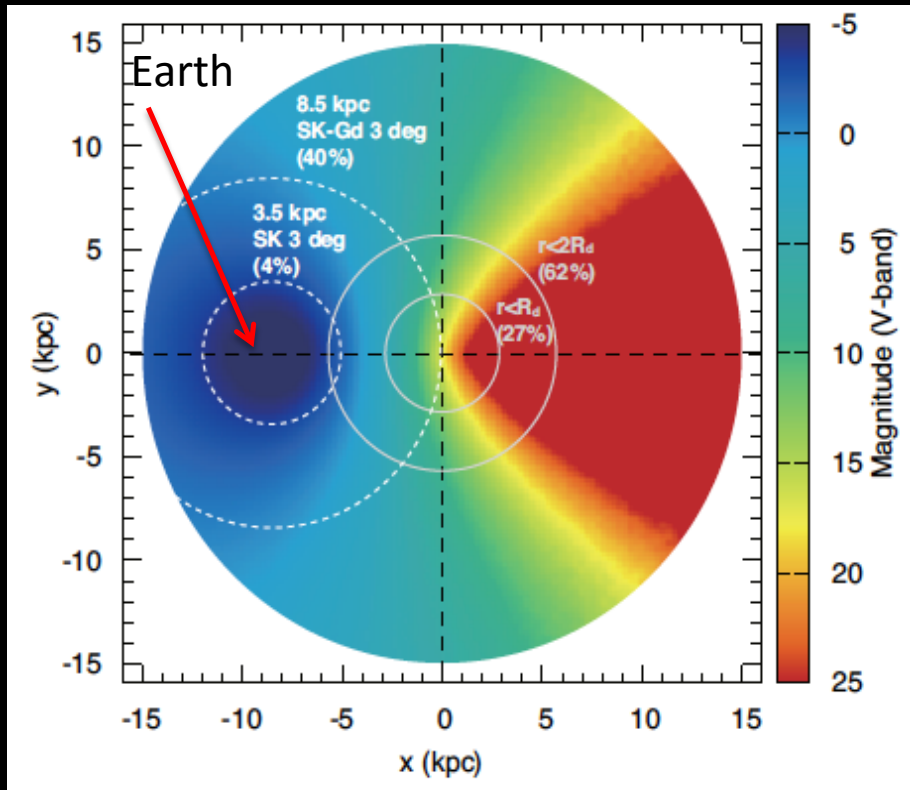


反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)を同定できれば、方向性を持った電子散乱事象($\nu + e$ 散乱)をより選択しやすくなり、超新星の方向決定精度が良くなる。具体的には10kpcの距離の場合、 $\sim 5^\circ \rightarrow \sim 3^\circ$ (90% C.L.)に改善できる。

Electromagnetic follow up

Magnitude of optical signal:

Important WHERE supernova occurs:

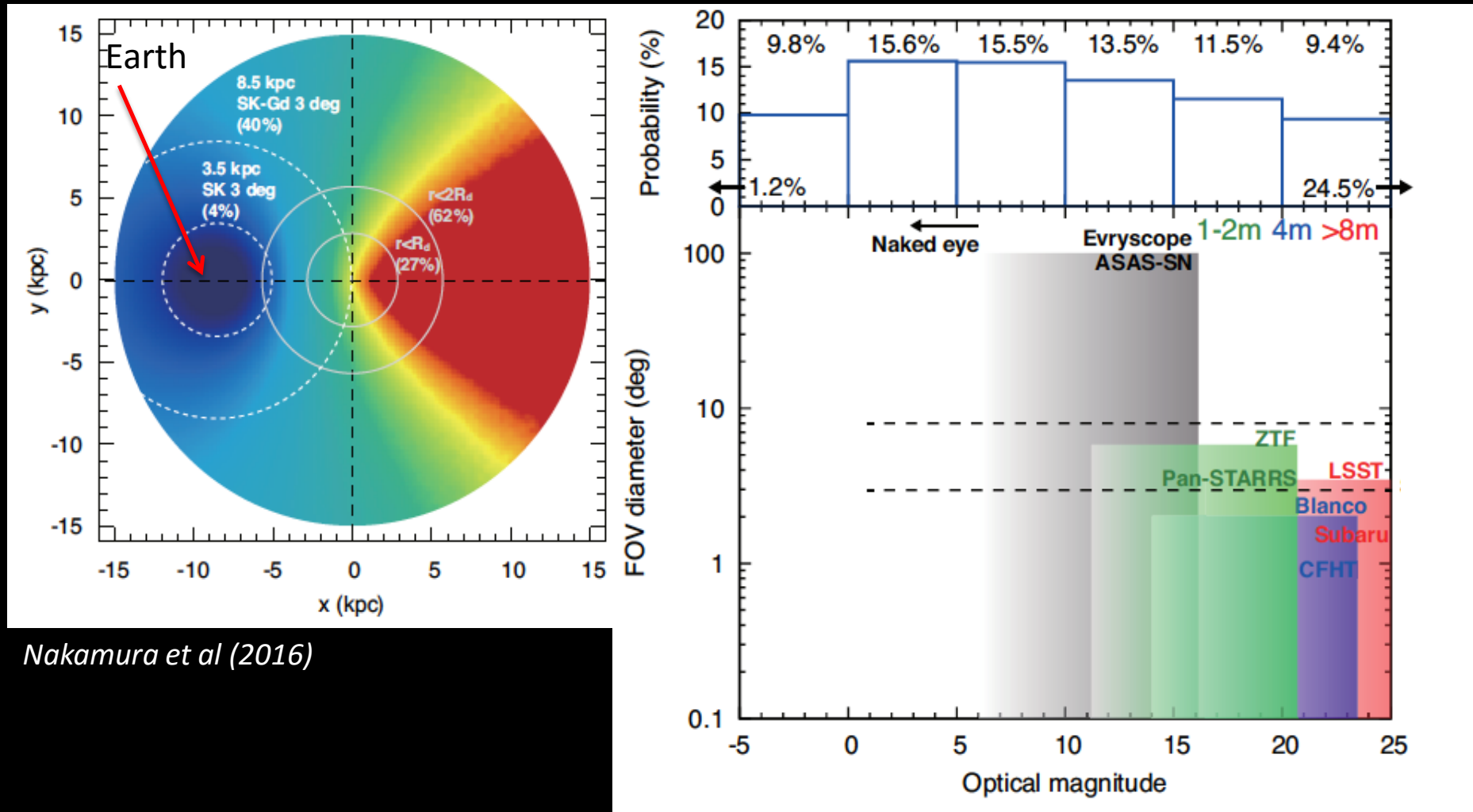


Nakamura et al (2016)

Electromagnetic follow up

Magnitude of optical signal:

Important WHERE supernova occurs:



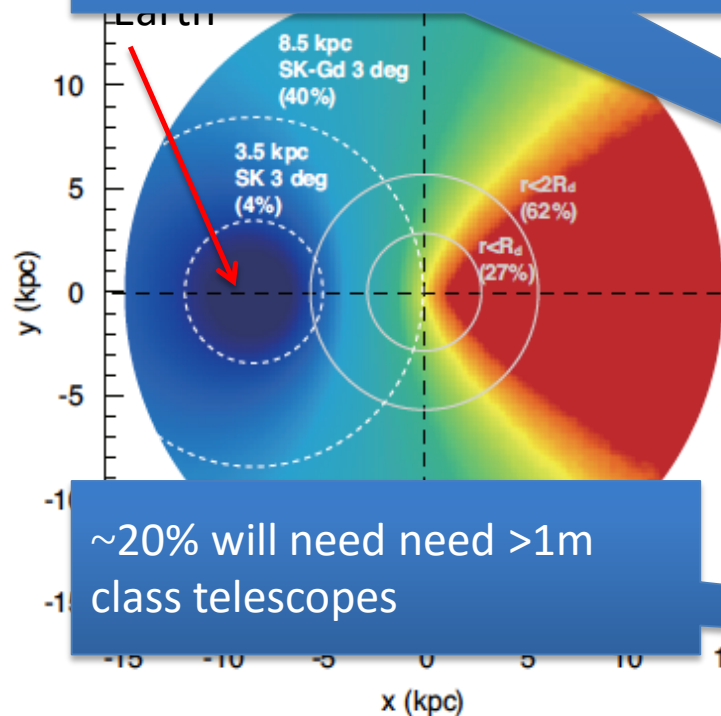
Nakamura et al (2016)

Electromagnetic follow-up

~25% of CCSNe are hard to reach even with modern 8m telescopes

Magnitude of optical signal:

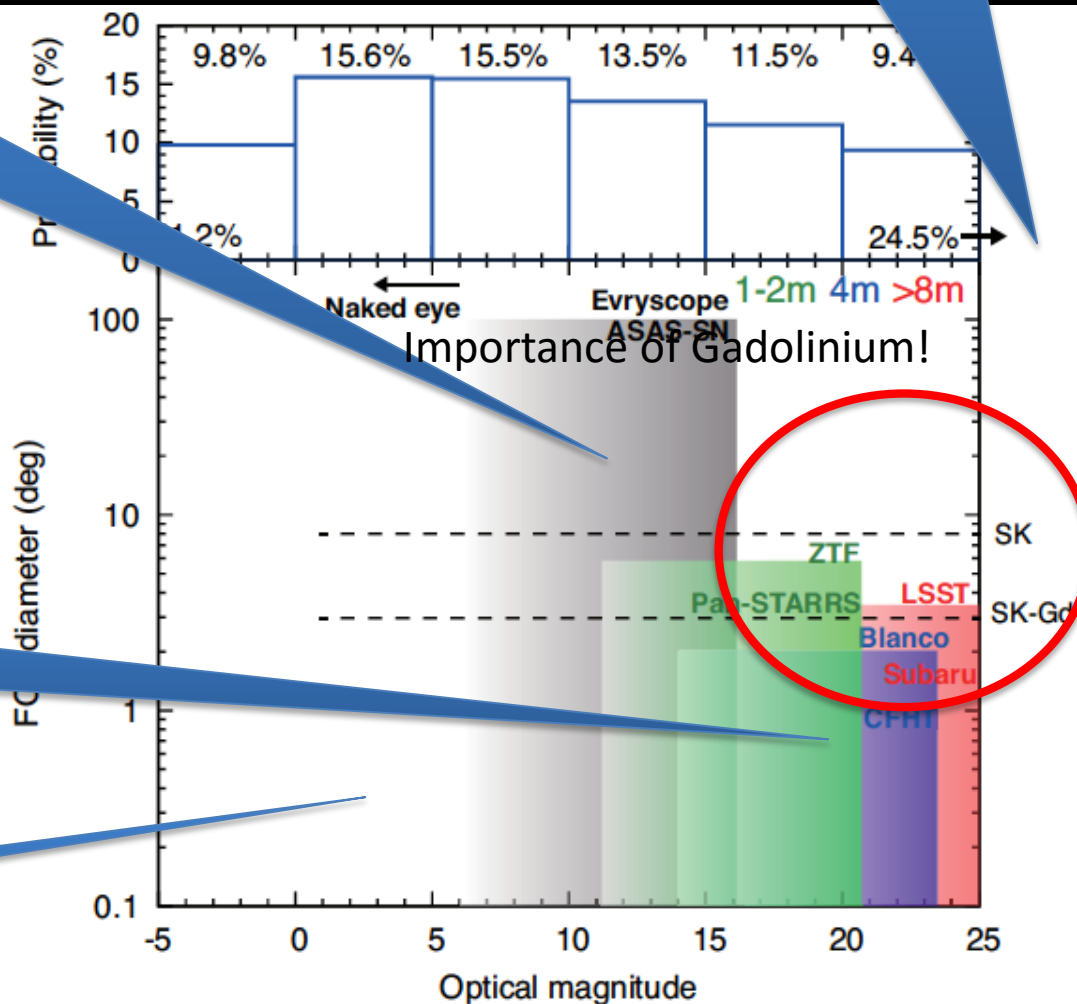
Importance of Gadolinium: ~40% are within reach of large FOV <1m class telescopes



~20% will need need >1m class telescopes

Nakamura et al (2016)

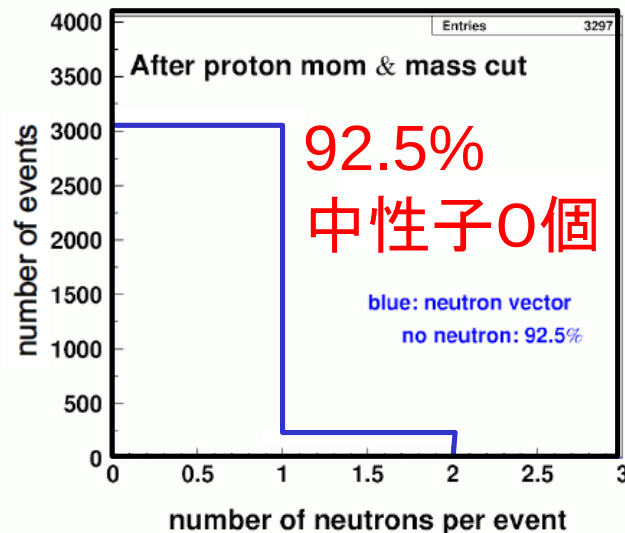
~15% may be too bright



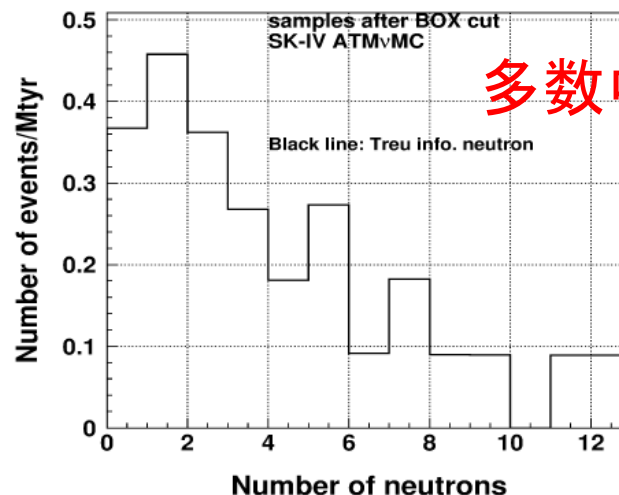
陽子崩壊のバックグラウンド低減

中性子の生成数分布

$P \rightarrow e^+ \pi^0$ MC



大気ニュートリノバックグラウンド



多数中性子発生

Super-Kで10年後に候補が見つかったとした場合:

現在のバックグラウンドレベル: 0.58 events/10 years

中性子がないことを要求した場合: 0.098 events/10 years

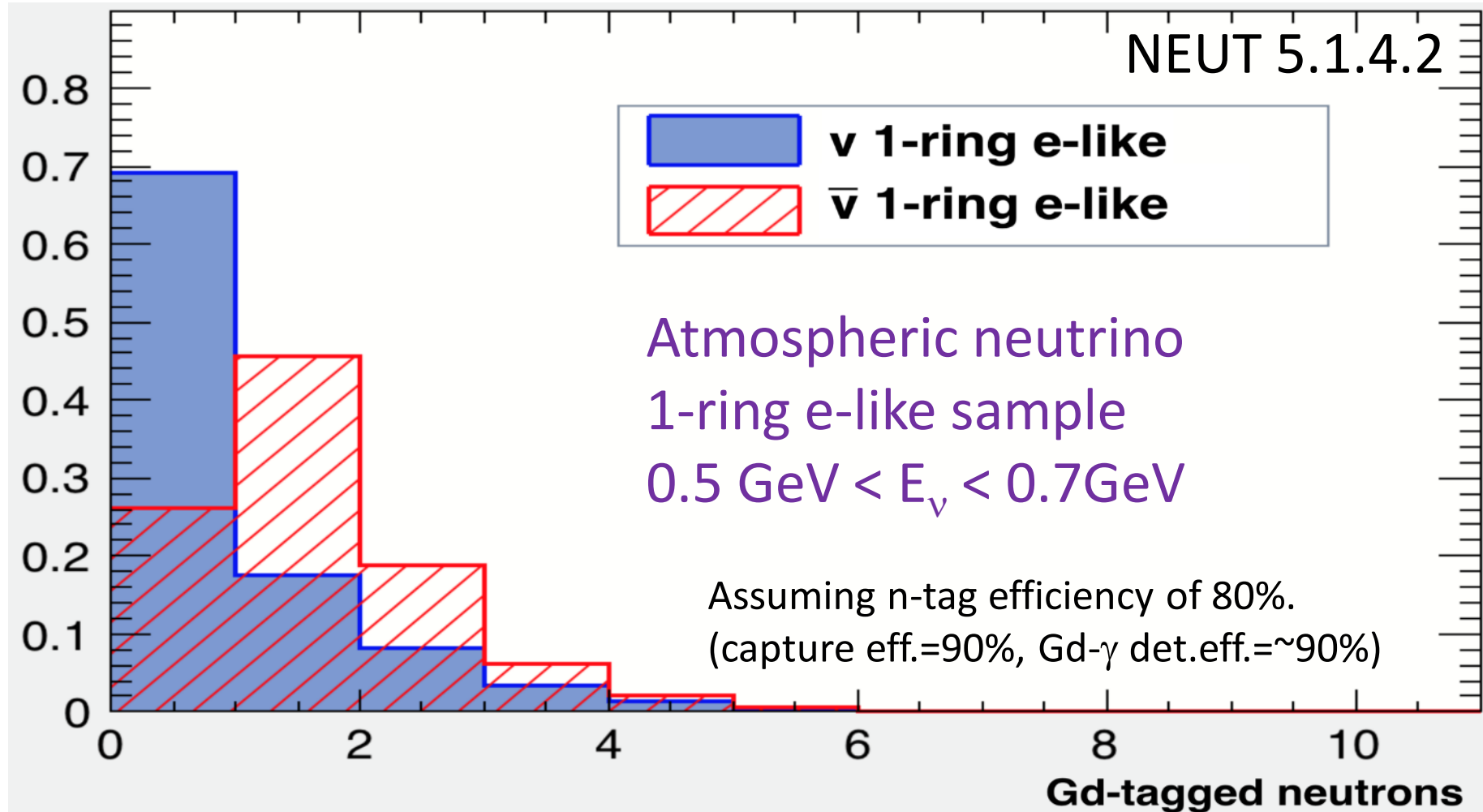
バックグラウンドとしての確率は、

44%(中性子の情報なし) から 9%(中性子の情報あり) へ改善できる。

T2K実験への寄与

Plots were made by M. Ikeda and P. Fernandez

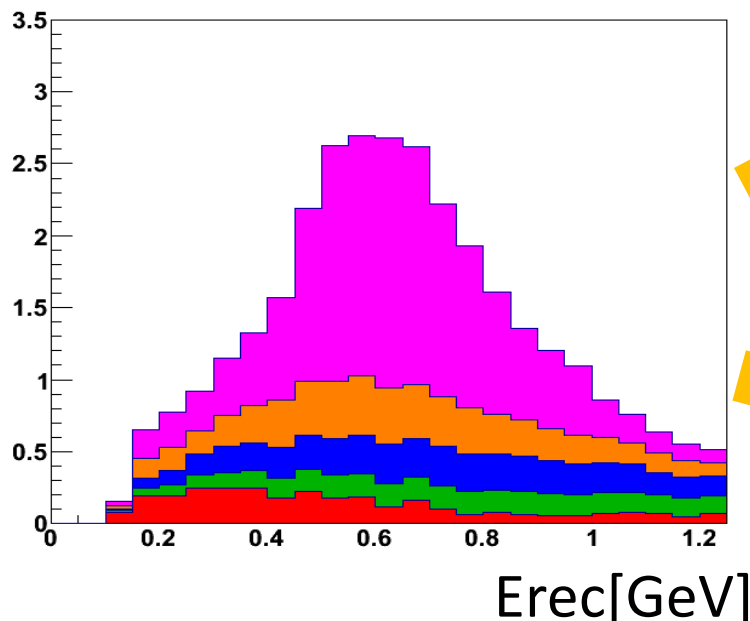
T2Kエネルギー領域でのイベント当たり中性子の生成数



中性子数の情報により, ν_e と $\bar{\nu}_e$ を~70%の効率で分けられる

反ニュートリノデータ取得モードでの $\bar{\nu}_e$ 濃縮サンプル

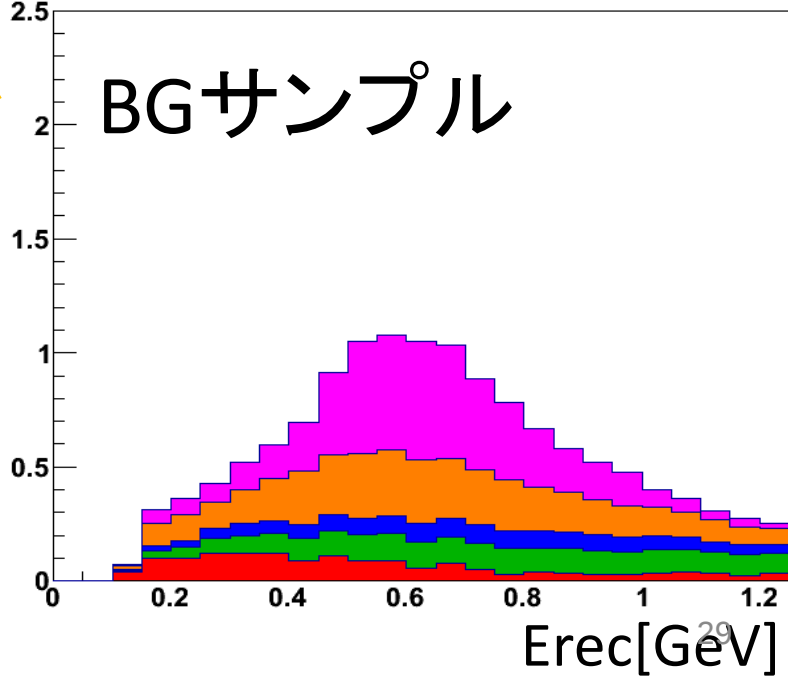
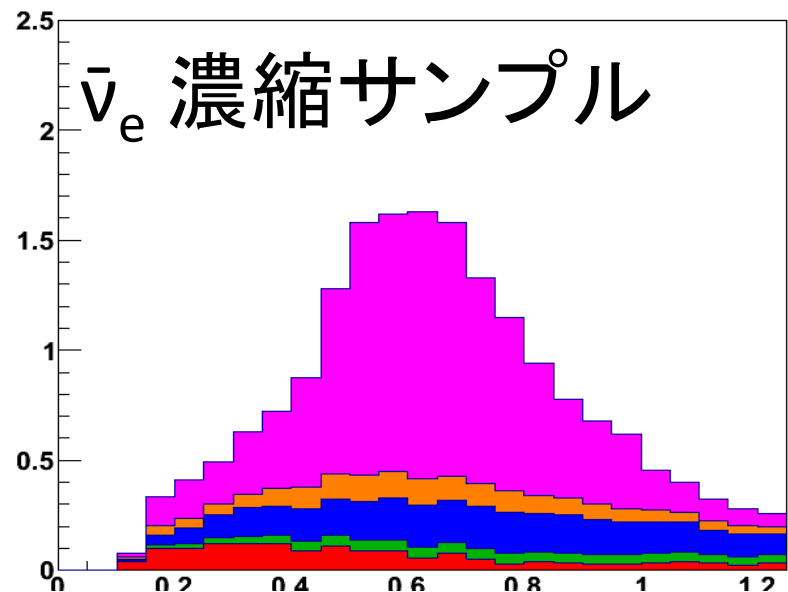
Signal $\bar{\nu}_e$, Signal ν_e
 $\bar{\nu}_e$, ν_e , ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$



ビーム統計量: 3.9×10^{21} POT
振動パラメータ: $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$,
 $\delta cp=-90^\circ$, $\Delta m^2_{32} = 0.0024 \text{ eV}^2$, $\sin^2 \theta_{23}=0.5$, NH

ν_e and $\bar{\nu}_e$ separation = 70%
is assumed w/o energy dependence

Note: Directional information of e/e+ is not used



試験用実験装置 (EGADS)

Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems

透過率測定器
(UDEAL)



240本の増倍管を付けた
200 m³ タンク



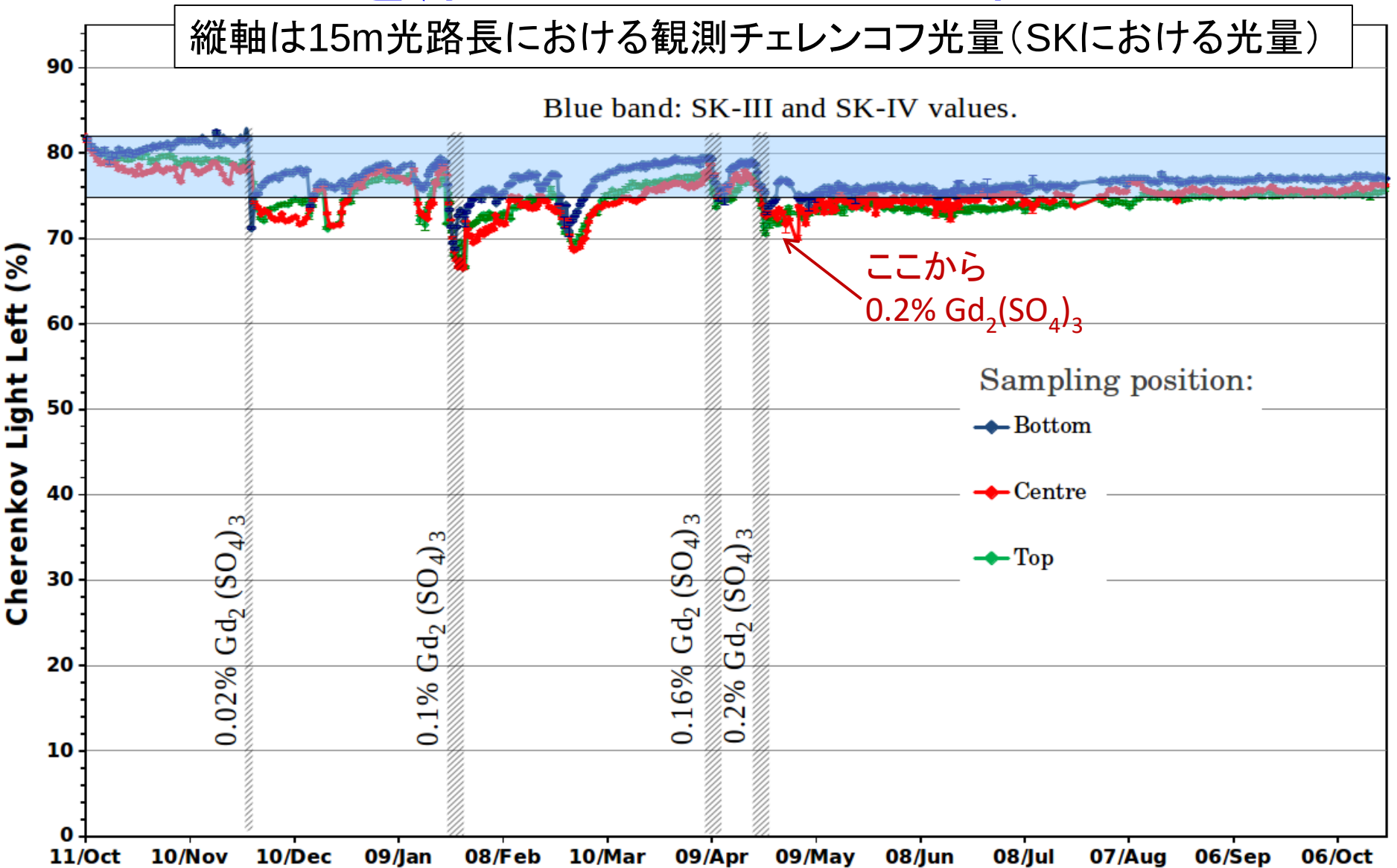
15m³ 溶解槽



Gd水循環装置
(Gdを保持しつつ水を純化する装置)



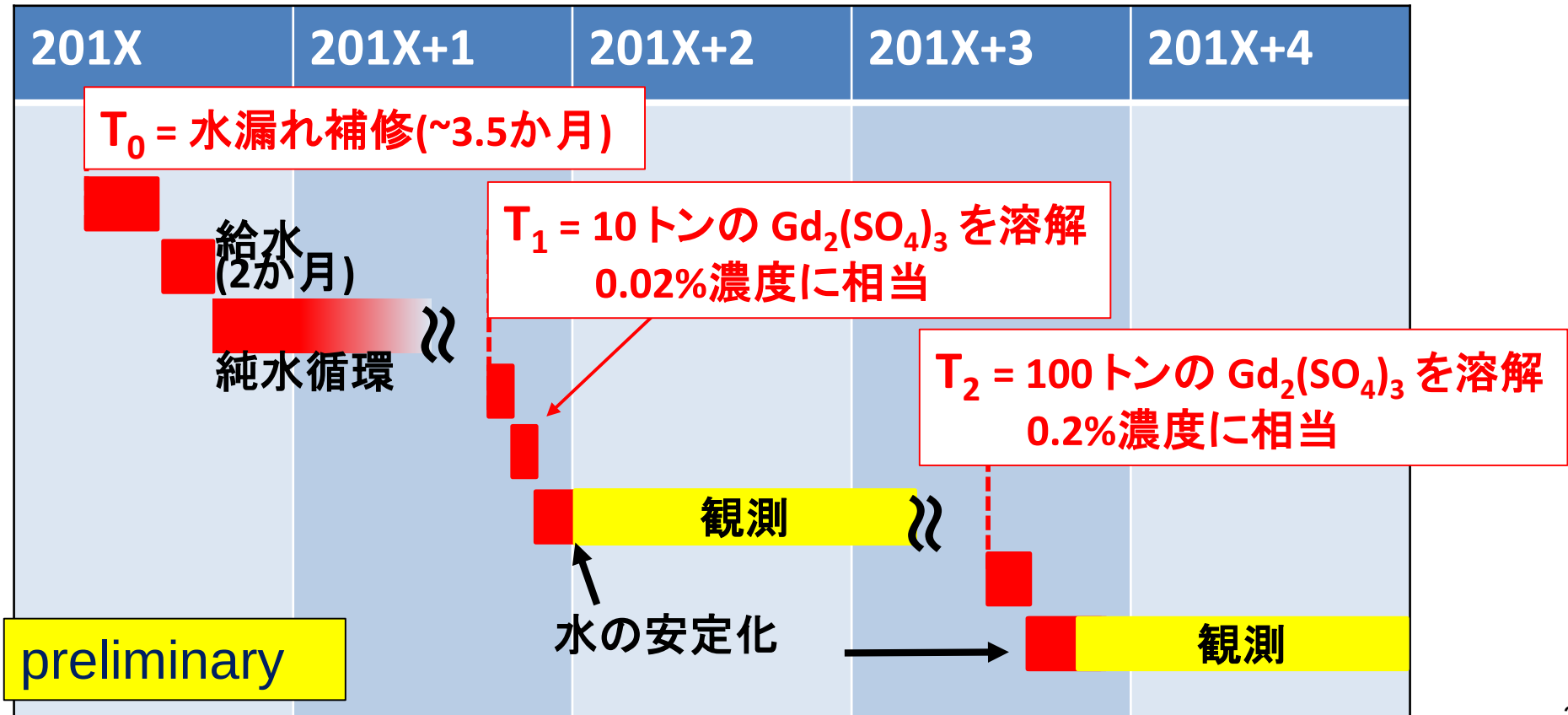
Gdを添加した水の透過率



0.2% $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ の15m光路長における観測チェレンコフ光量は~75%。
超純水の値(~82%)と比べて0.2% $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ は92%、つまり光のロスが8%程度

SKグループでの承認、T2Kとの協定

On June 27, 2015, the Super-Kamiokande collaboration approved the SK-Gd project which will enhance neutrino detectability by dissolving gadolinium in the Super-K water. T2K and SK will jointly develop a protocol to make the decision about when to trigger the SK-Gd project, taking into account the needs of both experiments, including preparation for the refurbishment of the SK tank and readiness of the SK-Gd project, and the T2K schedule including the J-PARC MR power upgrade. Given the currently anticipated schedules, the expected time of the refurbishment is 2018.



まとめ

- Super-Kは1996年にスタートして約20年間、ニュートリノ振動の研究で成果をあげてきた。
- 今後はさらなる精密観測を継続するとともに、ガドリニウムによる中性子タグによって装置の高度化を進めていく予定である。
- 中性子タグによって超新星背景ニュートリノの初観測の可能性がある。
- 超新星爆発が起きた場合の方向決定精度が向上する。
- 陽子崩壊のバックグラウンド低減、T2K実験における $\bar{\nu}_e / \nu_e$ 識別にも寄与する。
- 数年後には水漏れタンク補修に始まり、準備を進めたい。