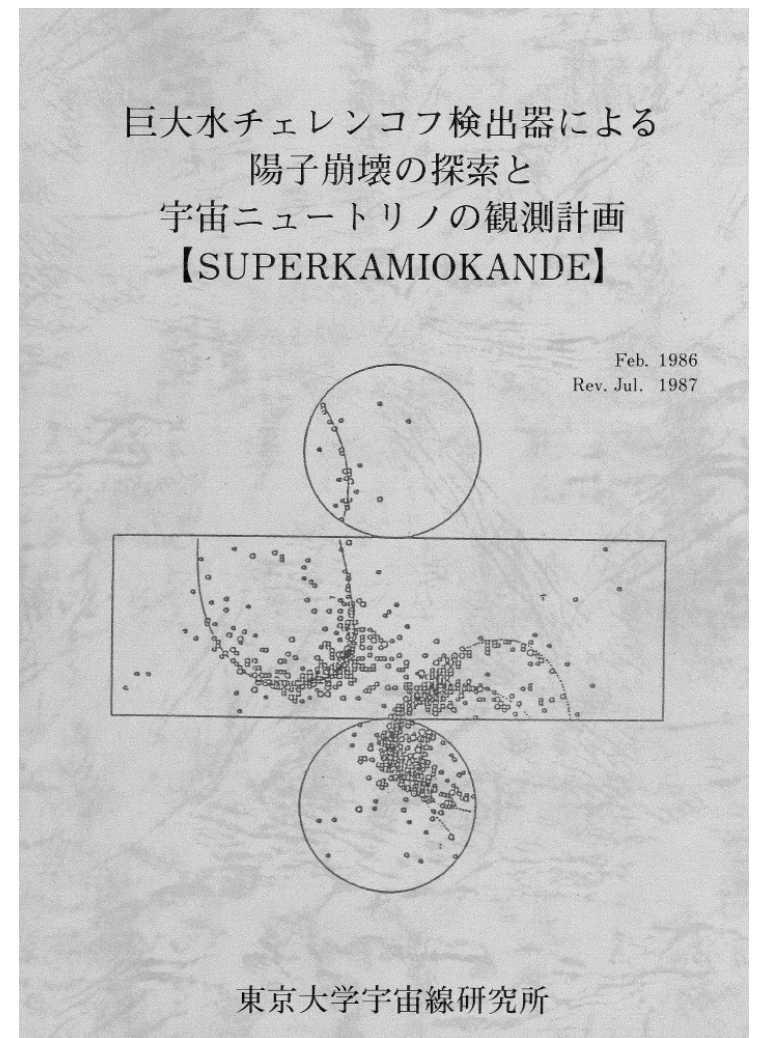
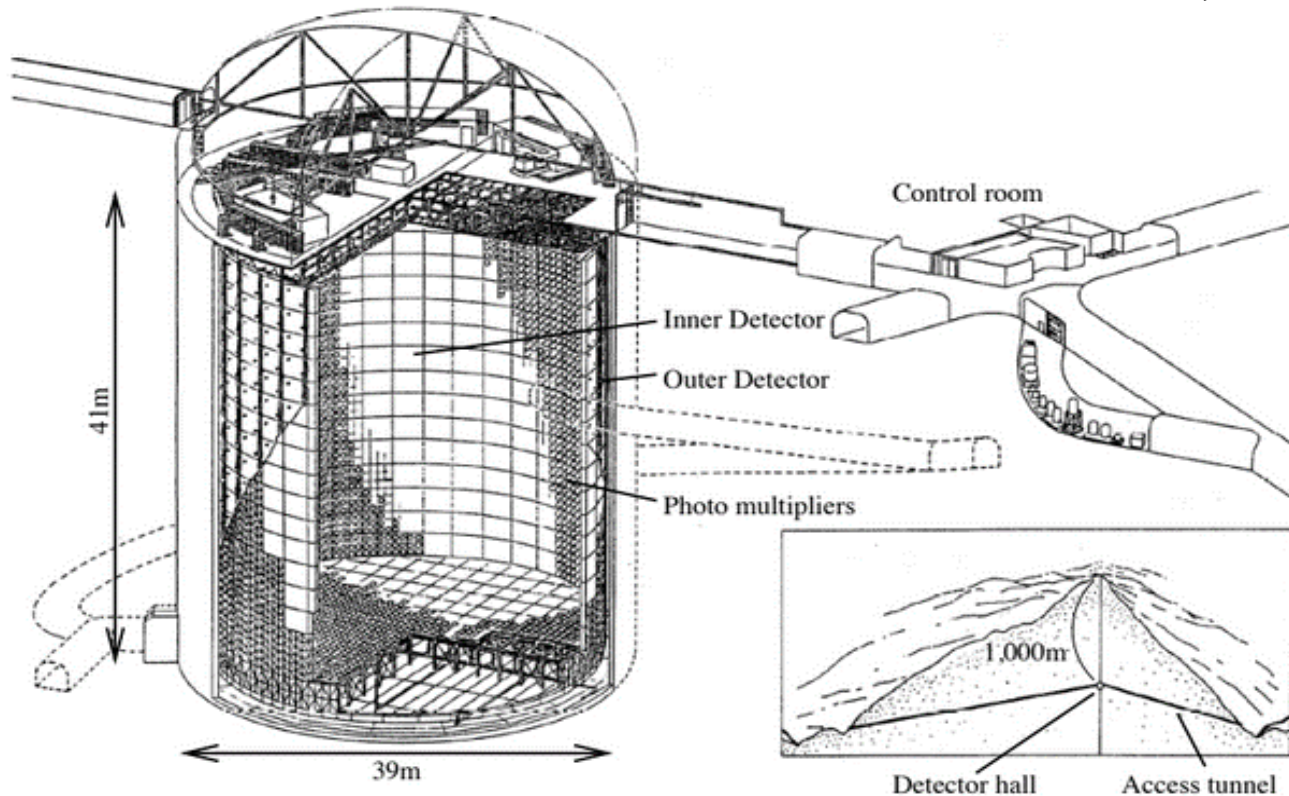


Super-Kamiokande

CRCタウンミーティング 2025

東京大学宇宙線研究所 関谷洋之

神岡地下1000mに約5万トンの純水を貯め
32500トンの内水槽を11129本の50cmPMTで観測



はしがき

本レポートは1986年2月に出したSuperkamiokande計画書を最近の成果をもとに改訂したものである。陽子崩壊に対する記述はほとんど変化はないが、そのもとになるシミュレーション計算は以前と比較して大幅に改善され、信頼度が増している。1986-1987年にかけて宇宙ニュートリノ、特に太陽ニュートリノ、超新星爆発によるニュートリノバーストおよびディフューズニュートリノの検出に向けて大きな努力が払われた。特に超新星SN1987aからのニュートリノバーストを世界で初めて捉えたことは大きな成果であった。本レ

SKの将来

1. 2029年3月まで

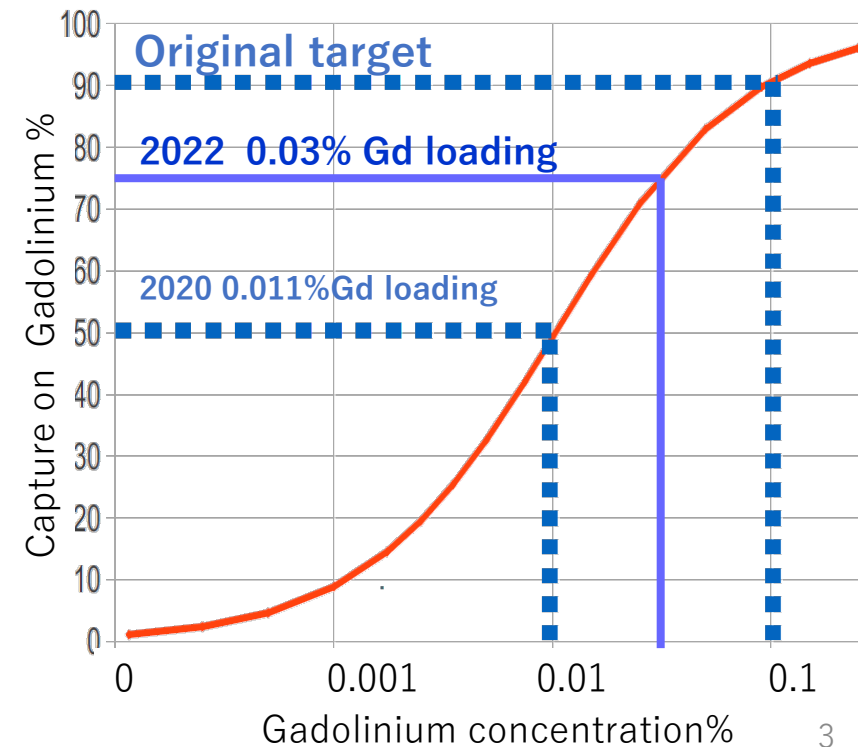
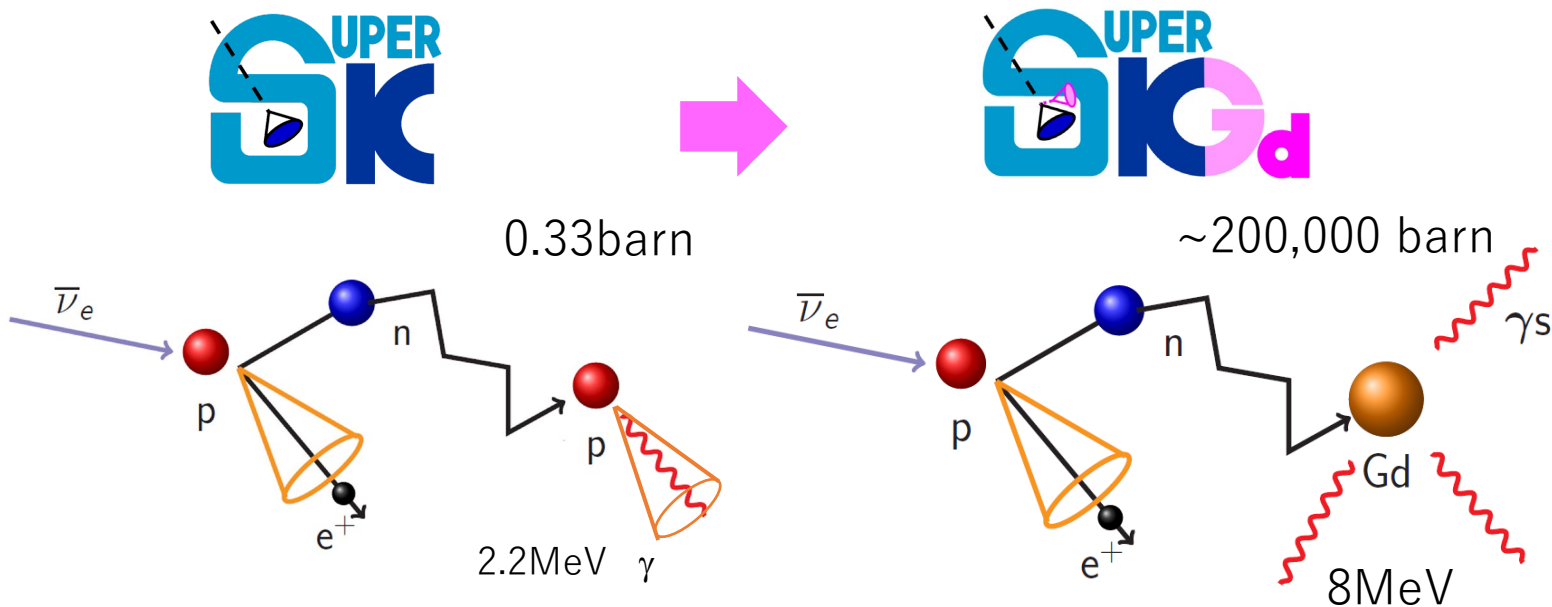
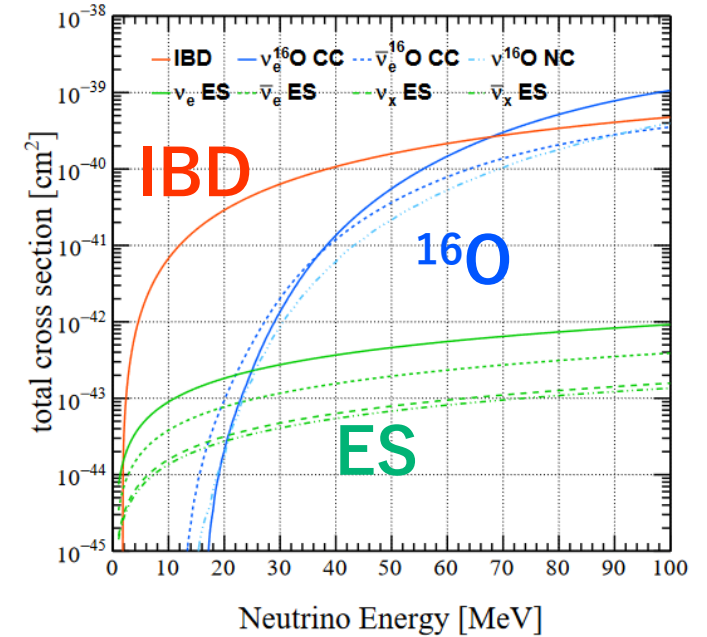
2. 2029年4月以降(とHK)

3. SK-Gdのあと

1. SK-Gd Project

SKにおけるニュートリノ反応

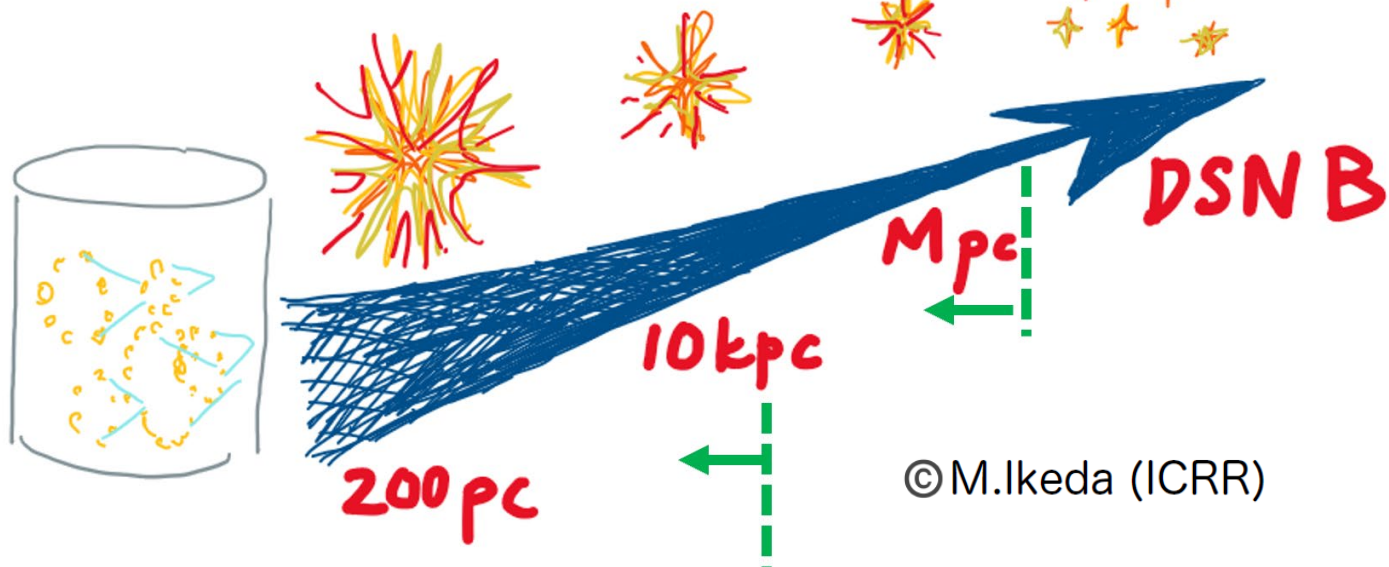
- 純水に**ガドリニウムを導入**することによって
中性子をタグし、逆 β 崩壊反応(IBM)をBGや
弾性散乱反応(ES)と区別できるようにし**反**
電子ニュートリノに対する感度を向上



SKにおける超新星ニュートリノ観測

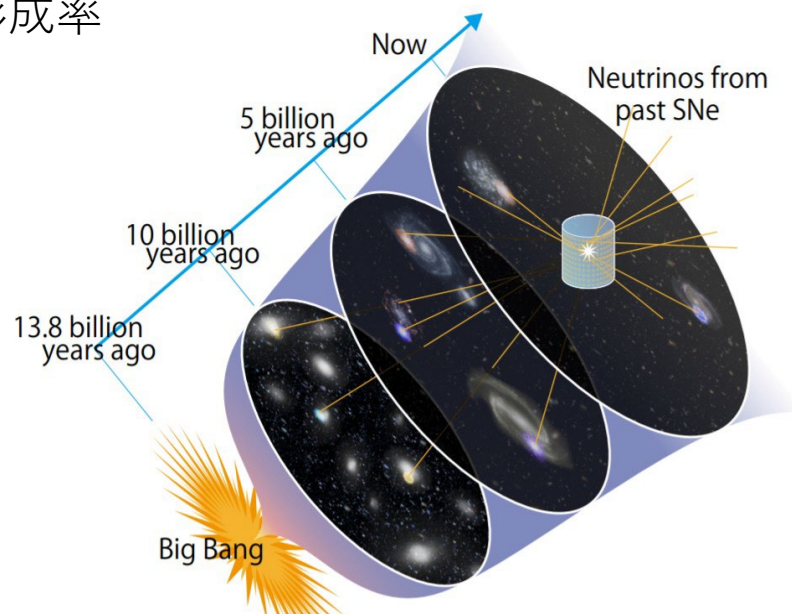
・ 銀河系内爆発に対する準備

爆発のメカニズム
親星の性質
マルチメッセンジャー天文学
ニュートリノ研究
“準備”が重要



・ 超新星背景ニュートリノ (DSNB) 探索

星形成の歴史、BH形成率
爆発の“平均”描像
“Secured source”

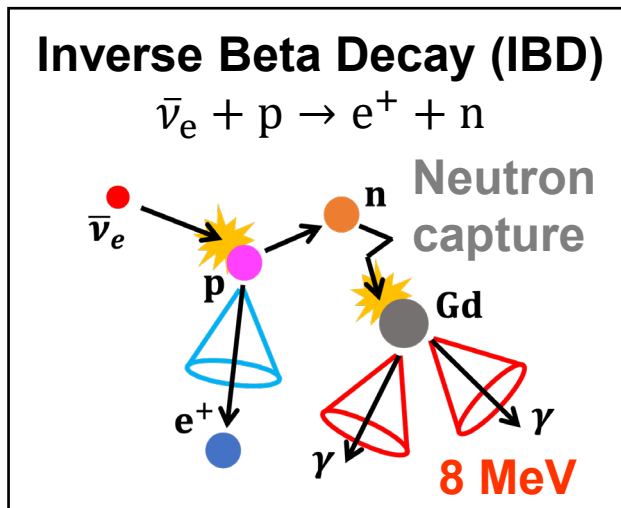


$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

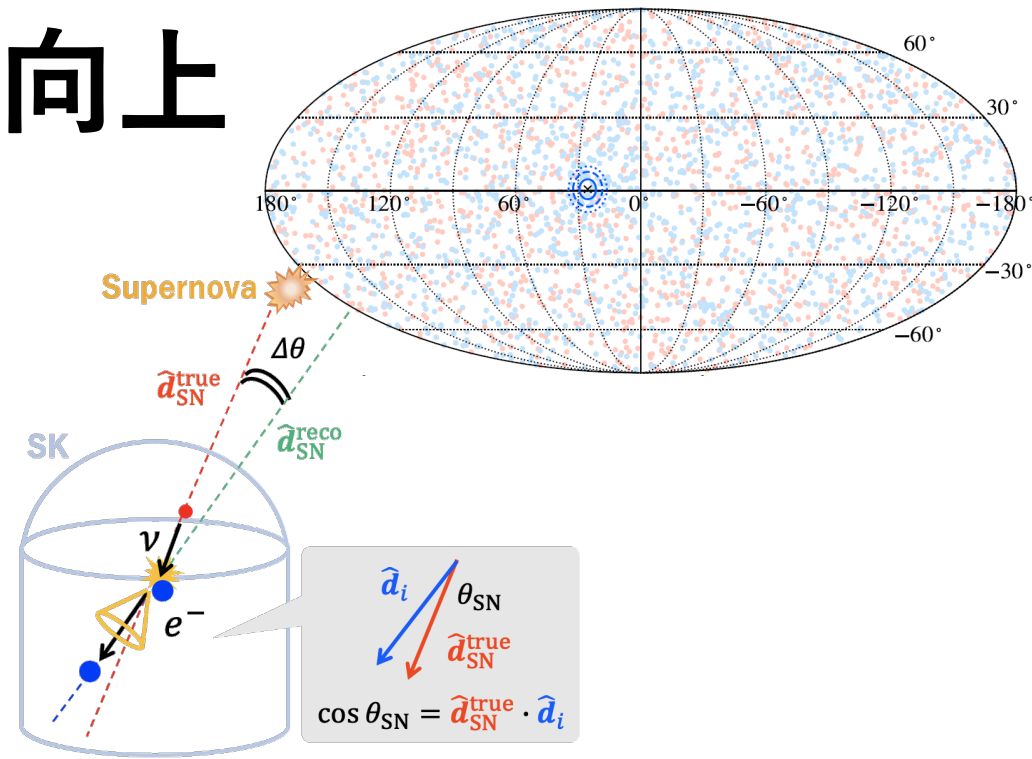
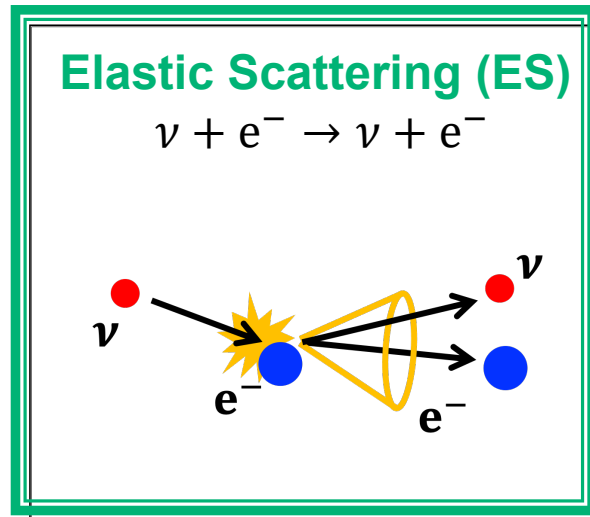
SN rate at z
(averaged)
SN spectrum

超新星爆発方向決定精度の向上

方向感度のないIBDは使わず



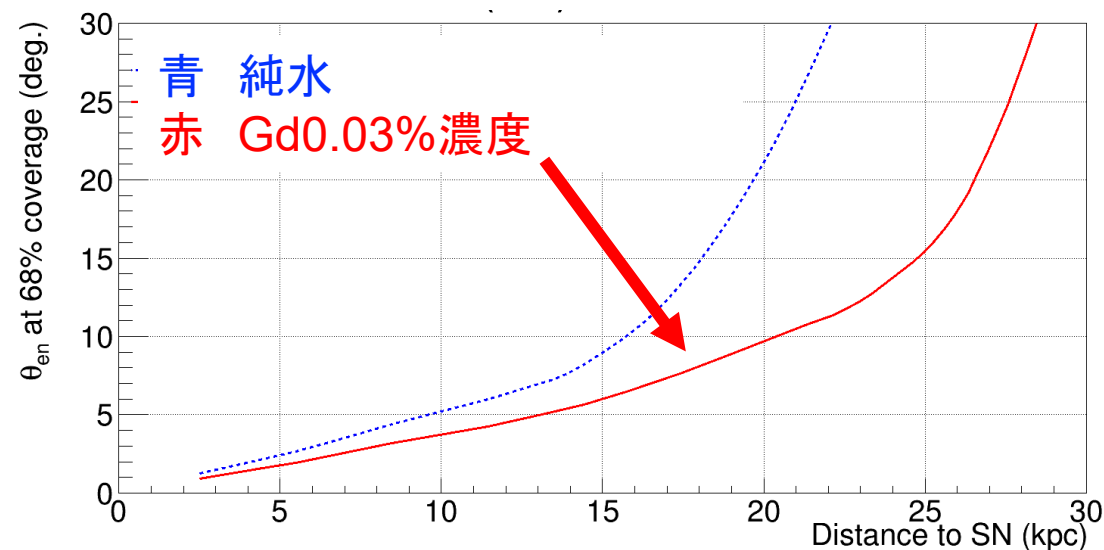
方向感度のある反応を選び出す



事象選別を活用した超新星爆発方向計算プログラムの開発

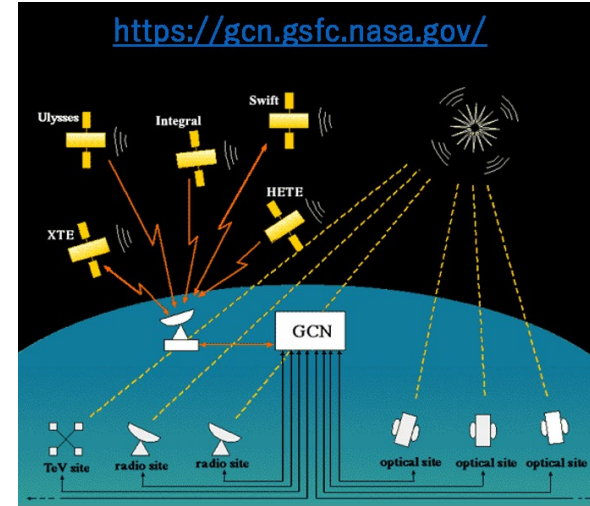
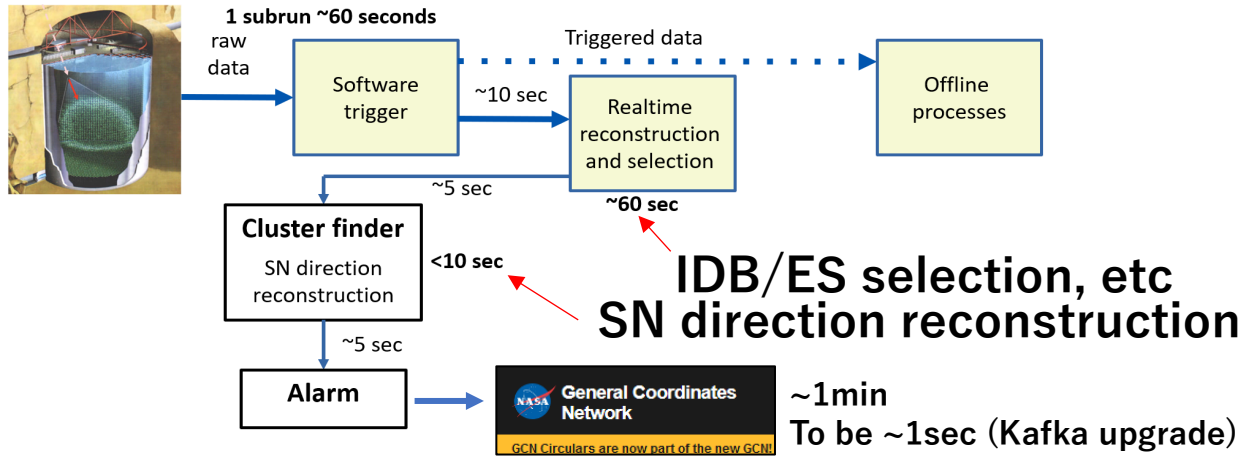
- マルチメッセンジャー観測のためのリアルタイム超新星アラームで方向精度が向上

3万光年で約3度の分解能を達成
(広視野大型望遠鏡の視野に匹敵)

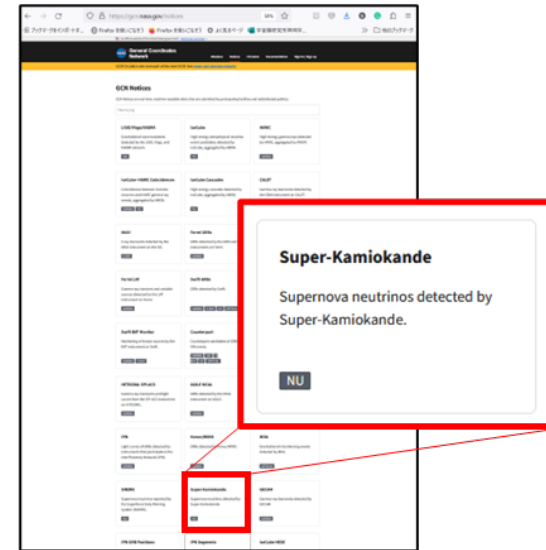


超新星爆発マルチメッセンジャー観測体制の構築

観測から1.5分でGCN Notice を自動発行



SK_SN Notice on GCN

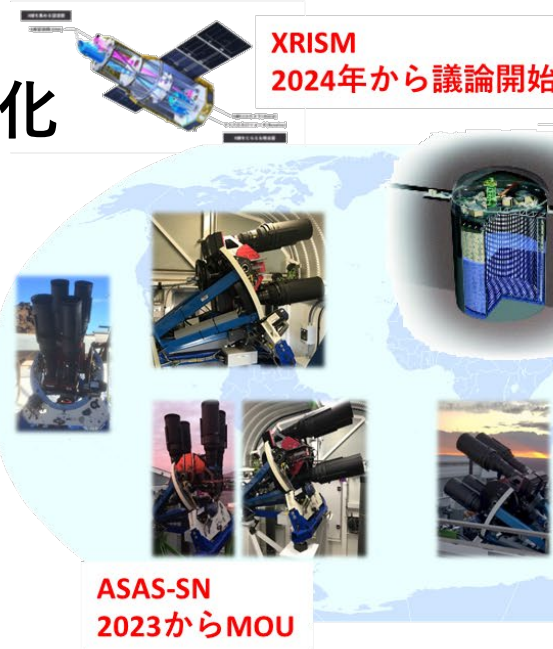


光学、X線望遠鏡との協力体制の強化

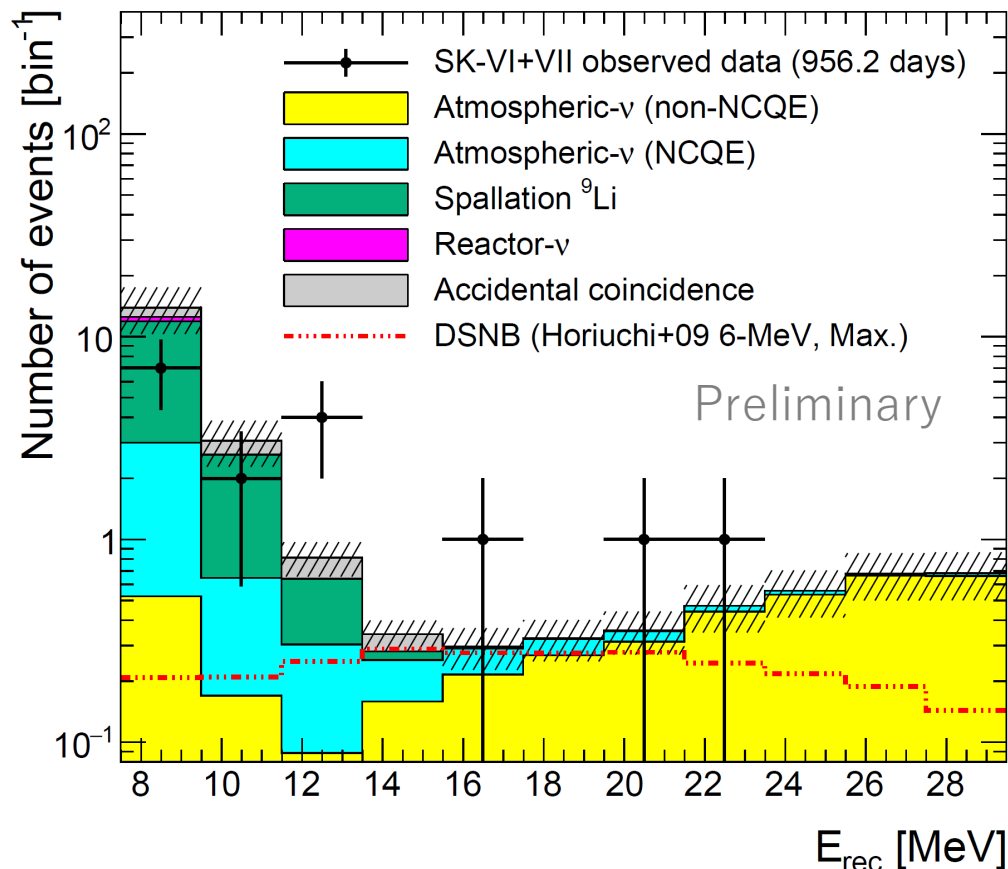
SK観測から各望遠鏡が追観測開始までの時間を可能な限り短くできるようにMoUを締結して協力：
ASAS-SN、Tomo-e Gozen

突発天体対応のためのTarget of Opportunity (ToO) 観測の枠組みの中で具体的にSKに対応する運用のMoU等の検討中：

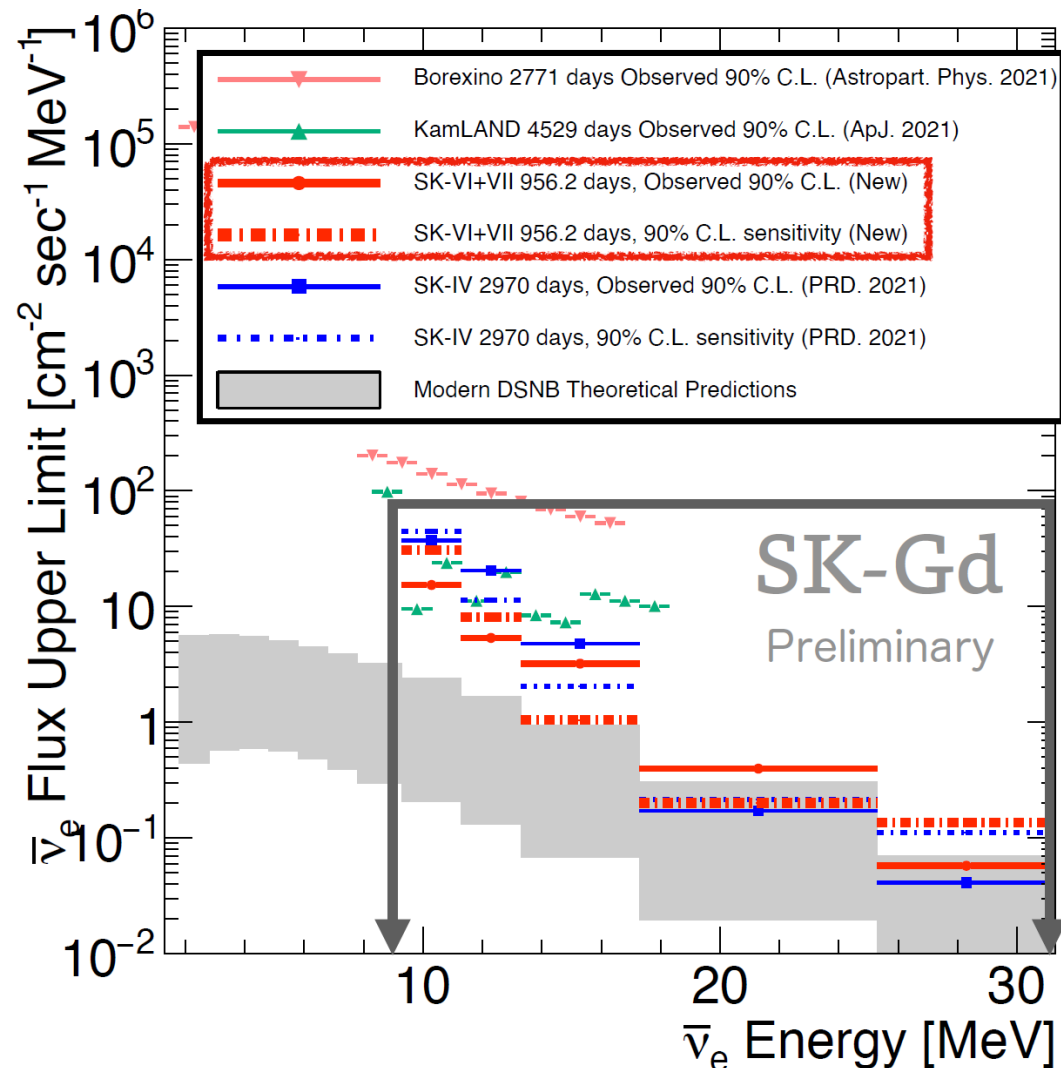
すばる、XRISM



SK-Gd初期のDSNB探索結果 (Neutrino2024)



- 明確なexcessはみとめられないが、BGの揺らぎのみで観測データを説明できる確率(p値>0.04)



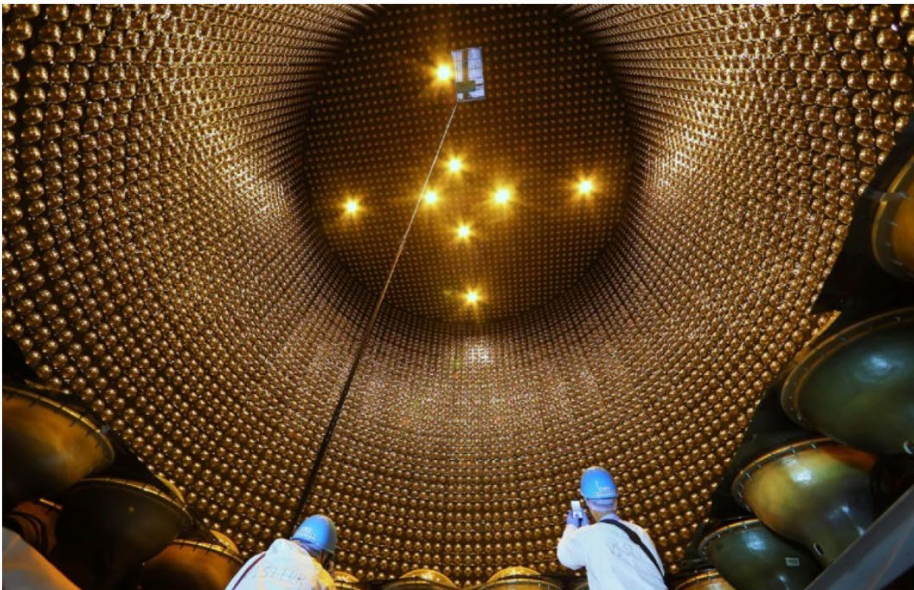
- ~10MeV以上で世界最高感度を実現

NEWS | 09 July 2024

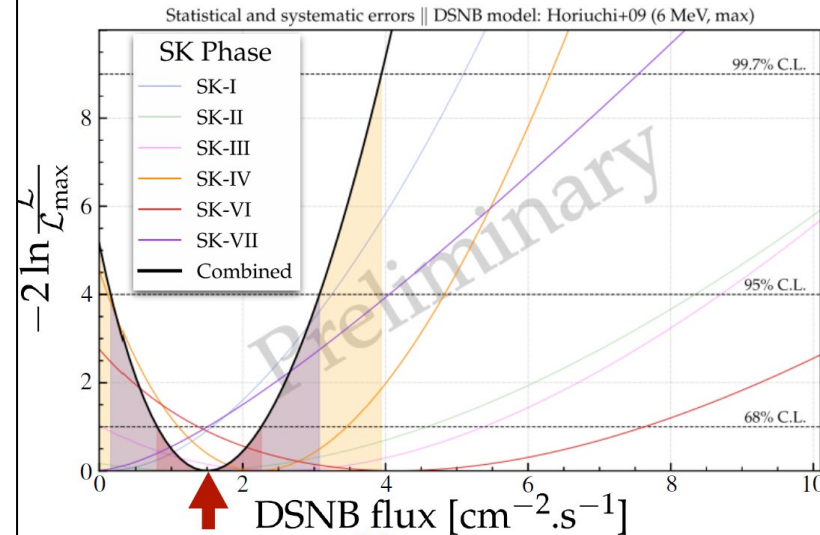
Huge neutrino detector sees first hints of particles from exploding stars

Japan's Super-Kamiokande observatory could be seeing evidence of neutrinos from supernovae across cosmic history.

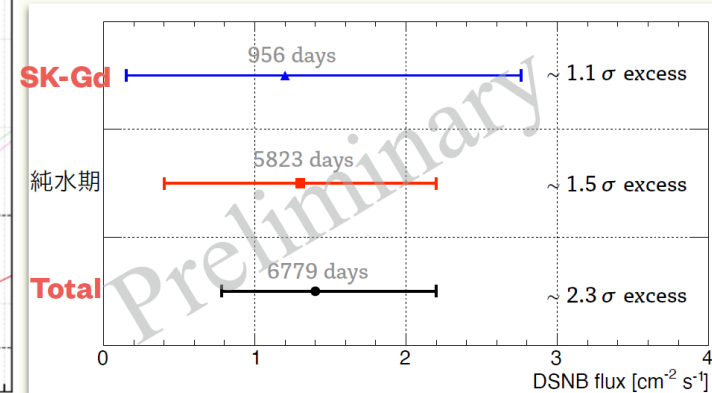
By Davide Castelvecchi



Hints ?



Best fit: $1.4^{+0.8}_{-0.6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



SK6779 日のデータ (5823 日の純水と956 日 のGd水)

2.3 σ でzero DSNB仮定を棄却

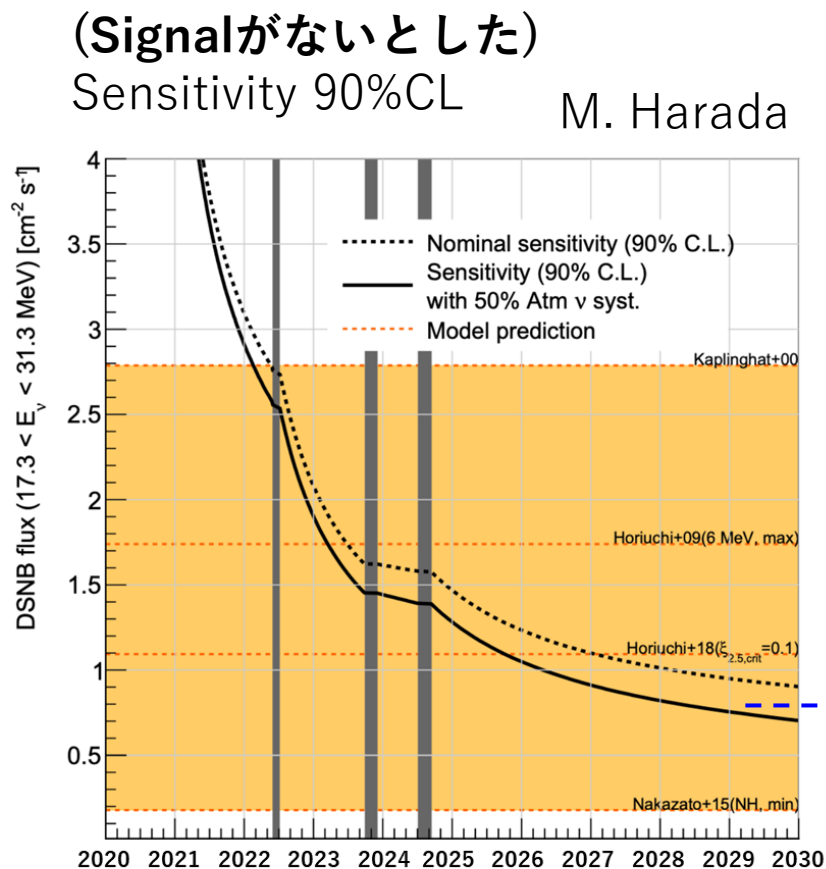
- 解析閾値を下げると共に、T2K実験等により大気ニュートリノBGの理解を進め、発見を目指す。

2. 2029年4月以降

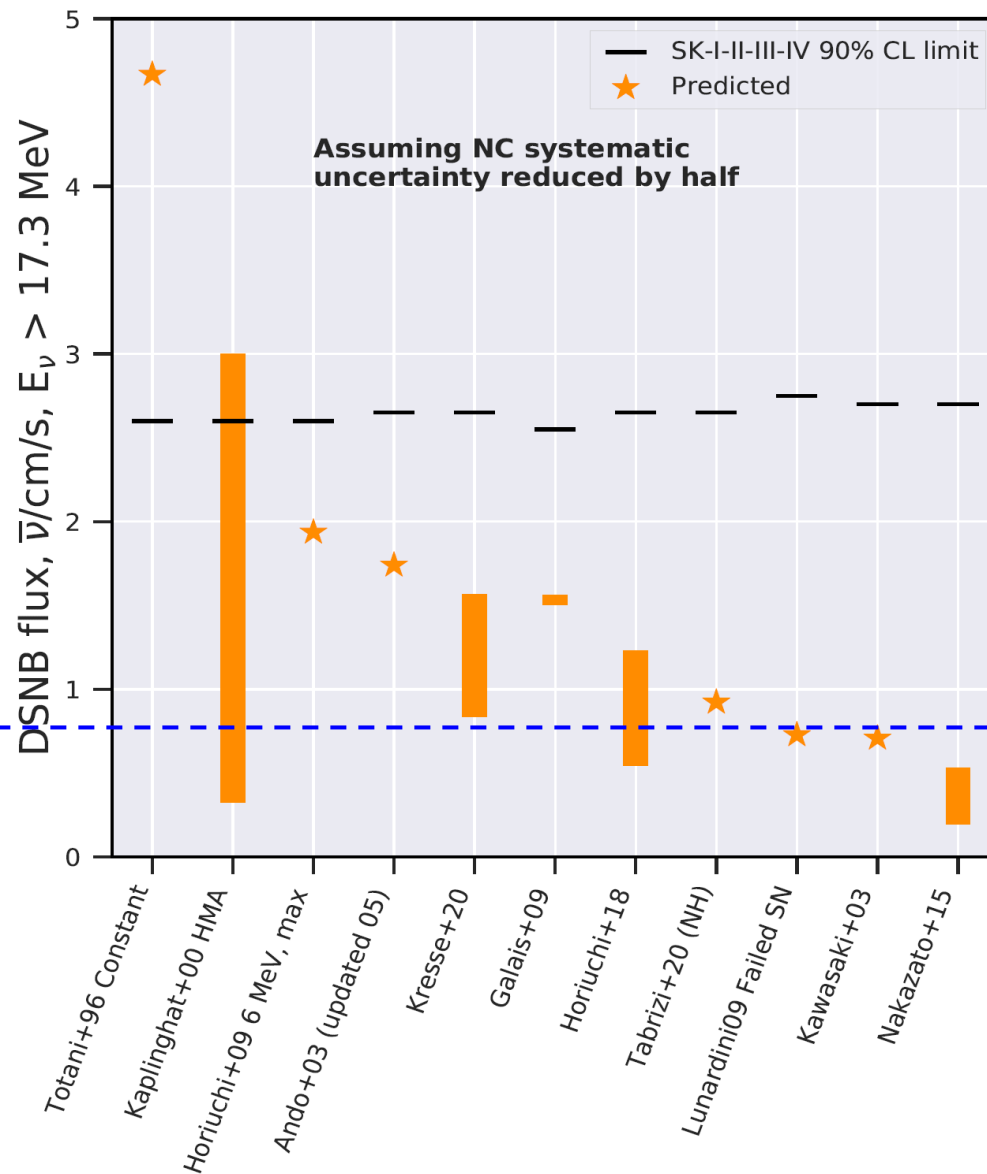
HKとのオーバーラップ期間について

今後のDSNB探索

- 解析閾値を下げると共に、T2K実験や機械学習の更なる導入により大気ニュートリノBGを理解し、**発見**もしくは**各モデルの検証**を目指す。



Coil#3が切れてしまっていた期間
"SK7.5" 216日(Live time150日)は
SK6相当のefficiencyと仮定



Super-Kamiokande
Phys. Rev. D **104**, 122002 (2021)



2029年4月

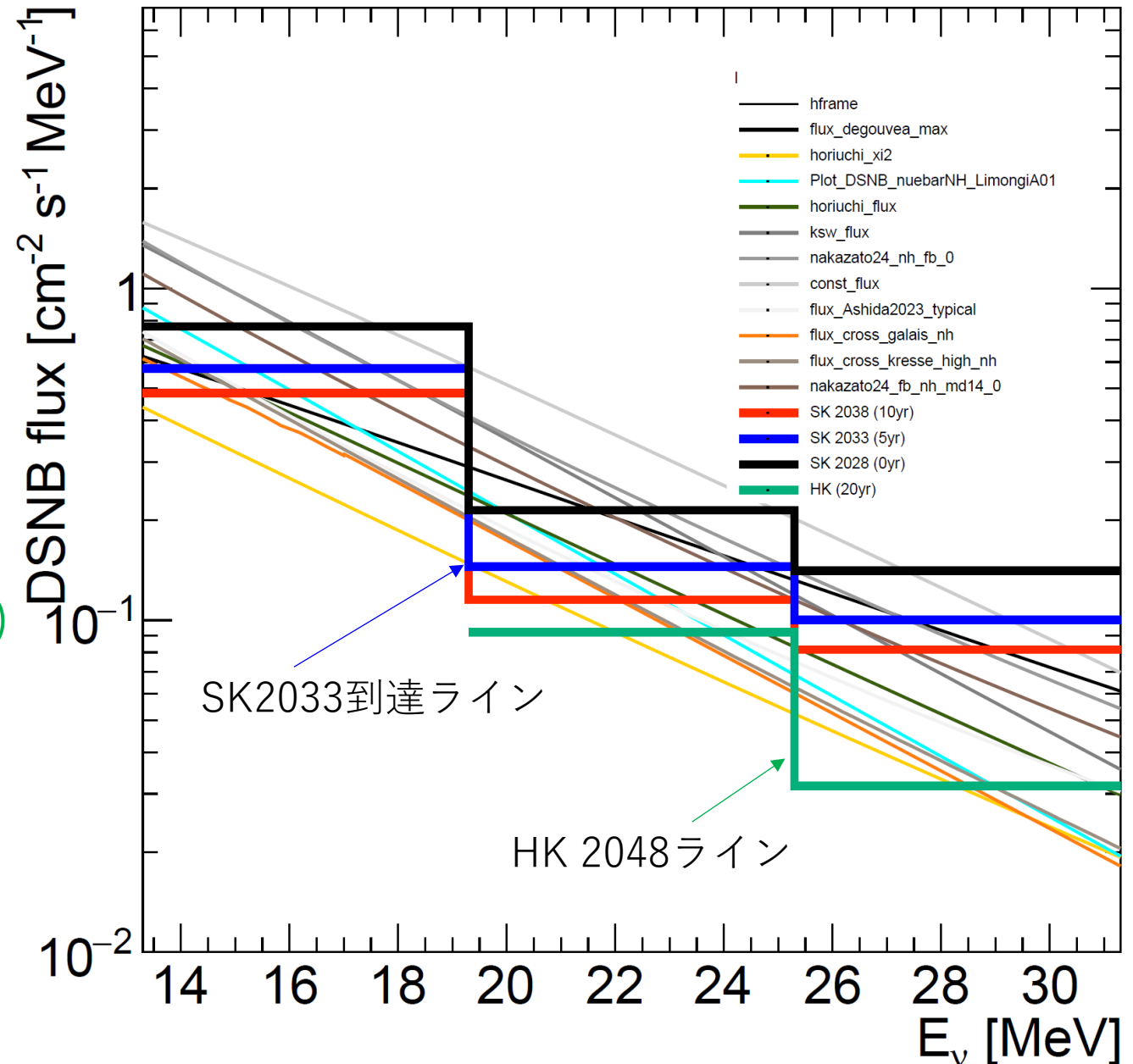
3 σ Sensitivity

- モデル識別/パラメータ測定
を見据えて3 σ での感度

- SK FY2028 + 0 年
- SK FY2028 + 5 年 (FY2033)
- SK FY2028 + 10 年 (FY2038)
- HK FY2028 + 20 年 (FY2048)

HK design reportの仮定

- 中性子タグなし
- Spallation CUTが完璧:
Spallation BG=0
Signal efficiency
 - 19-25MeV 54%, >25MeV 100%



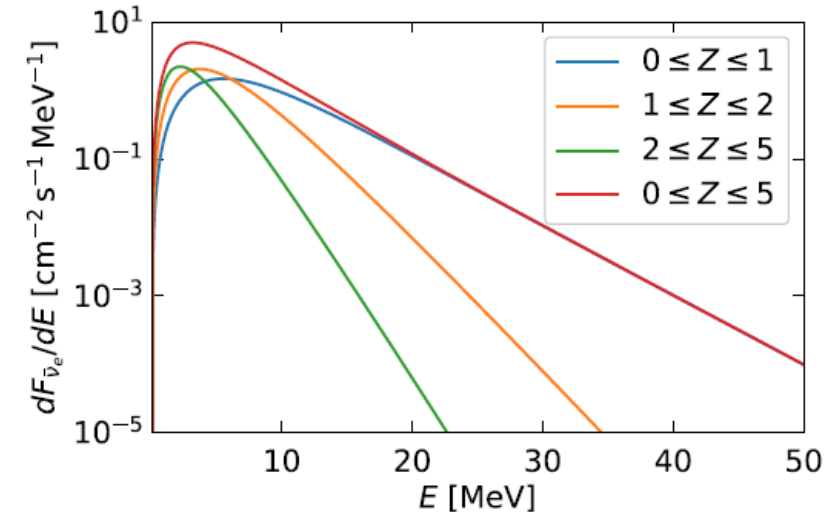
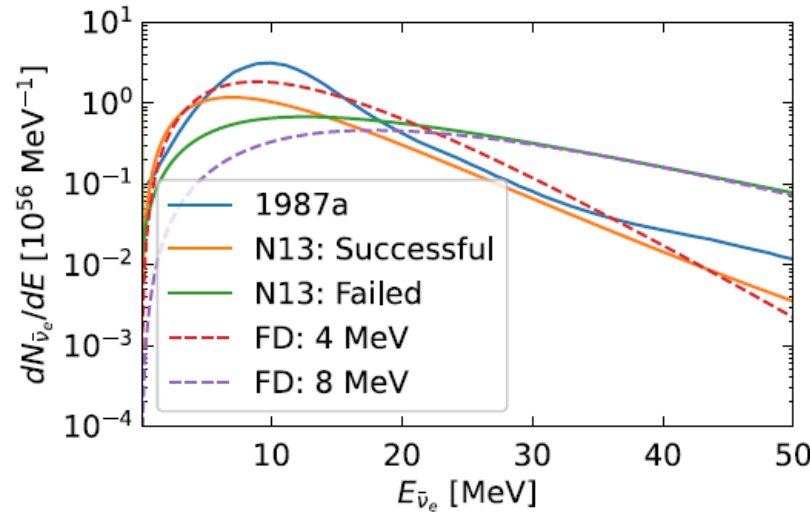
SKやHKで早々に 3σ で見えたとして

Modelの検証

体積 or 閾値？
どちらが重要？

諏訪雄大氏

S.Ando et al., Proc. Jpn. Acad., Ser. B, Phys. 99 (2023) 10



- $\sim 10\text{MeV}$ のDSNBのピーク（熱的成分）が押さえられれば、星形成率SFRへの制限が付けられそう。つまり、 $z \sim 2$ くらいまでの大質量星の死の頻度が求められる。
 - 昔の宇宙の質量関数IMFにもアプローチできるか。
- $20\text{MeV} \sim$ の冪的スペクトルの領域はoverallに何かを求められるわけではない。
 - ただ、大統計データがあるので二つのエネルギー領域に分割することでspectral hardnessが測れるかも **SKの低エネルギーでの観測の重要性**
 - この情報は、単に熱的放射なのかそれともBH形成の際の降着流による圧縮加速で発生した冪乗スペクトルなのかの制限に対応する

→HK で lowE 領域で想定感度に達するまでは、lowE(SK) vs highE(HK) での解析が、物理的にも重要

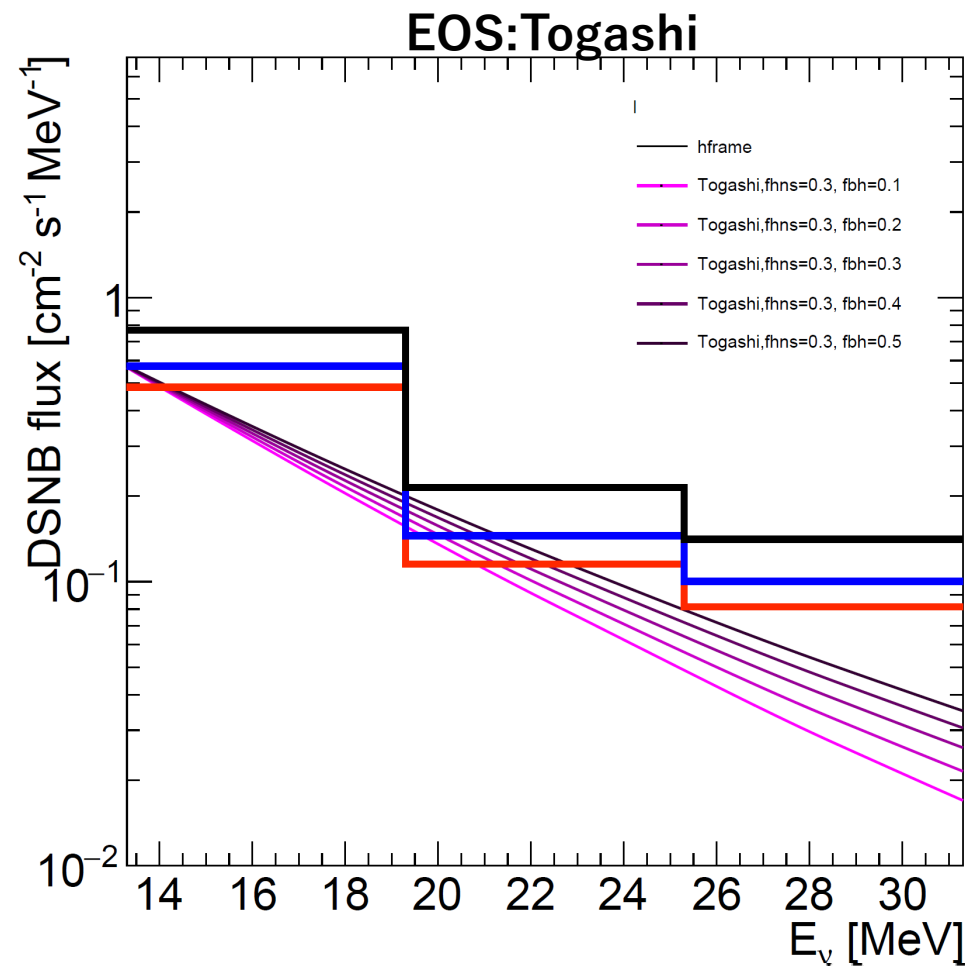
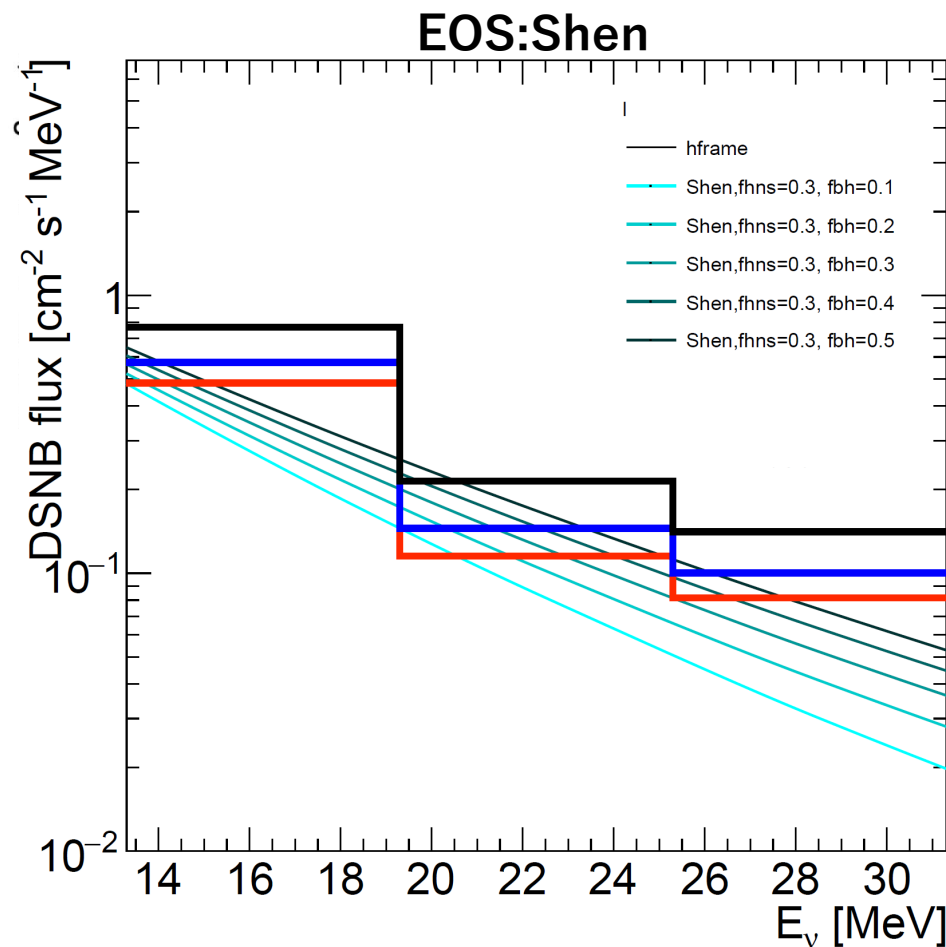
BHに着目するならば

Ashida, Nakazato (2022)

3 σ sensitivity Harada

- SK FY2028 + 0 年
- SK FY2028 + 5 年(2033)
- SK FY2028 + 10 年(2038)

> 20MeVのBHになる割合の違いによる幂の違いがみられるか

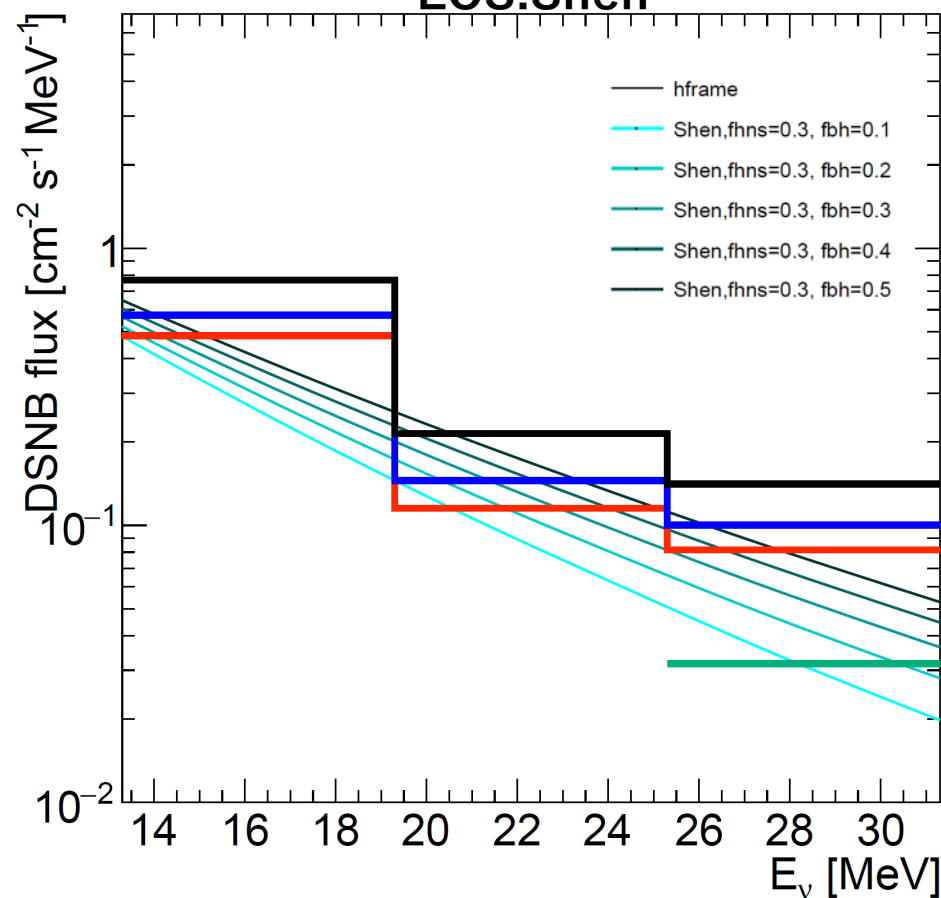


BHに着目するならば

Ashida, Nakazato (2022)

> 20MeVのBHになる割合の違いによる幂の違いがみられるか

EOS:Shen

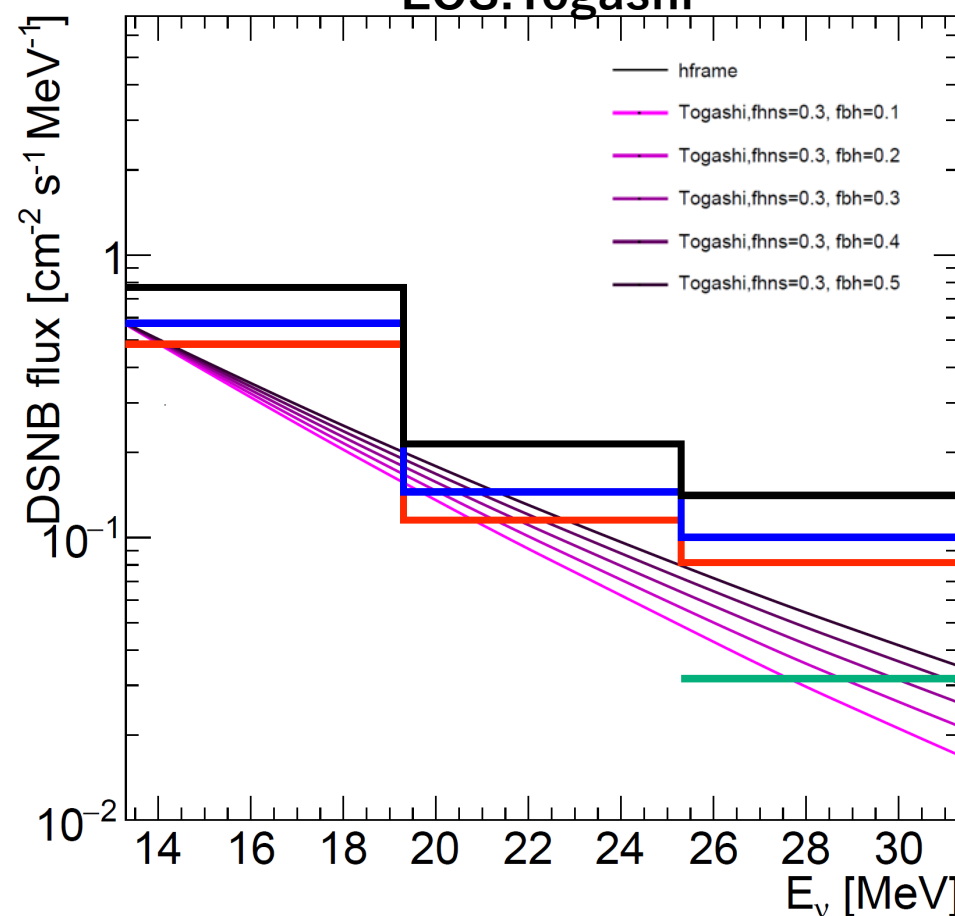


Low E(SK) vs High E(HK)で相補的

3 σ sensitivity Harada

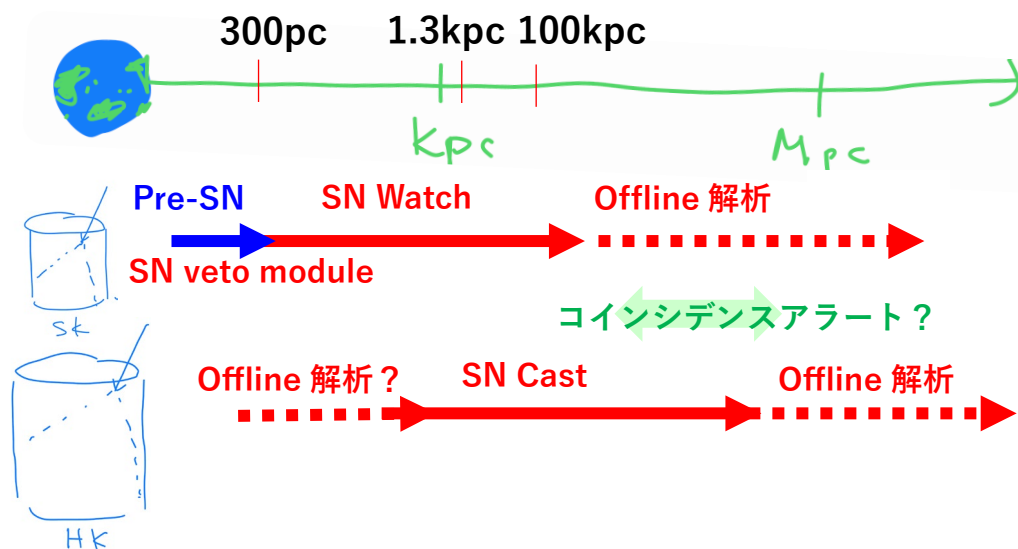
- SK FY2028 + 0 年
- SK FY2028 + 5年(2033) ← ここまではほしい
- SK FY2028 + 10年(2038)
- HK FY2028 + 20年(2048)

EOS:Togashi

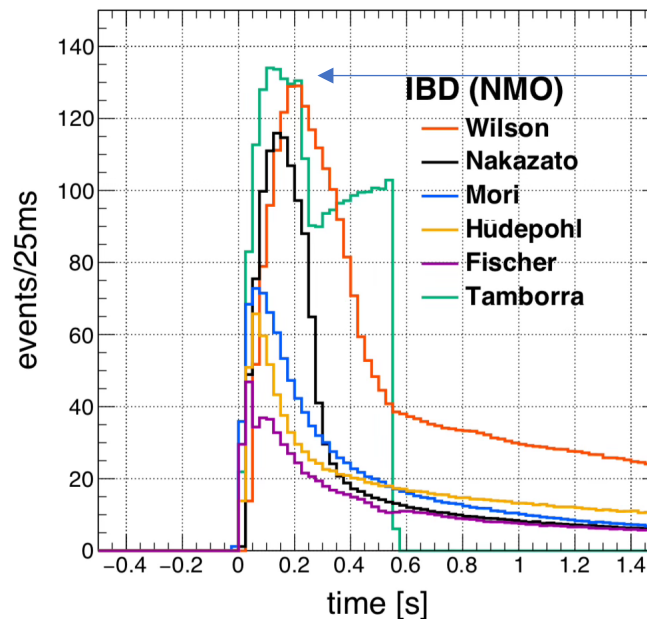


SN Burstの守備範囲

- Pile up問題 M. Ikeda
 - 検出器内でのmultiple event



SKでのイベント数予測 SN@10kpc
Kashiwagi (2024)



- Pile upが始まる距離

5kHz@10kpc

~5MHz@300pc

FV 8倍のHKに焼き直し

40kHz@10kpc

~2.5MHz@1.3kpc

そのままでは1.3kpcまでのアラーム(角度分解能)は
SKが有利：Offline での解析は頑張れる

HKで1.3kpcまでもカバーするには

- VETO module等ハードウェア改善、Hitアラーム確立?
 - 閾値を下げてpre-SNができるようにする
- もちろん**SK/HK coincidence**出来たら最高

High EにおけるHKとの相乗効果

R. Wendell

- J-PARCビームの左右非対称性測定

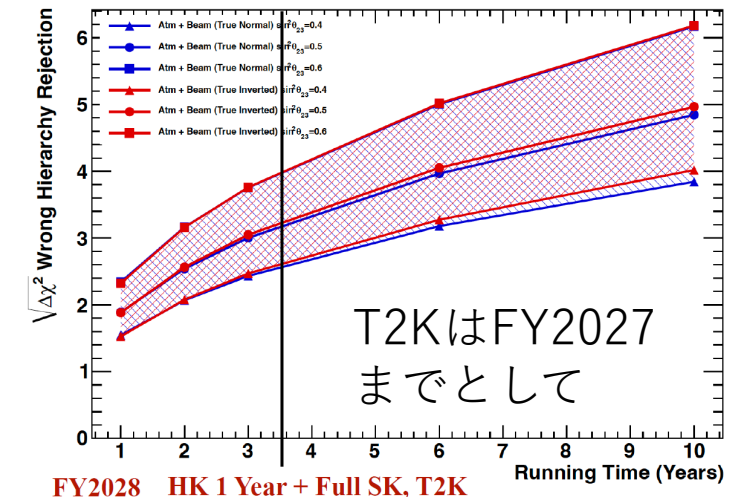
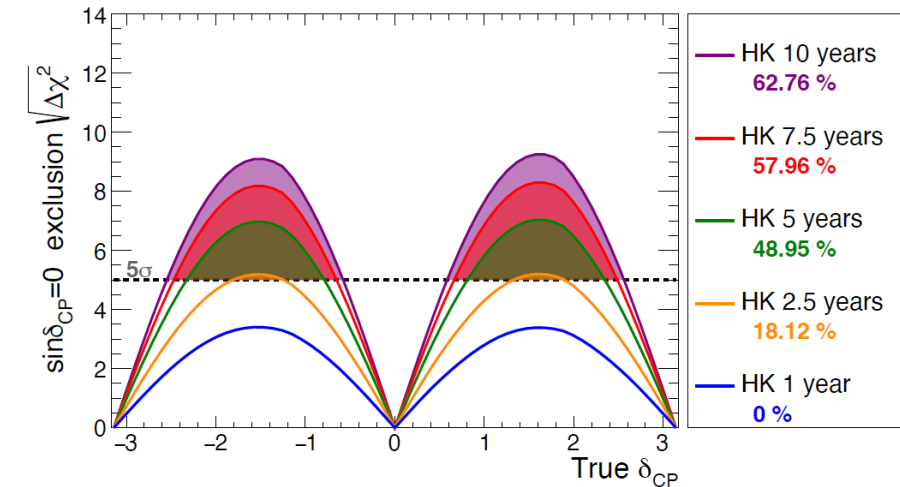
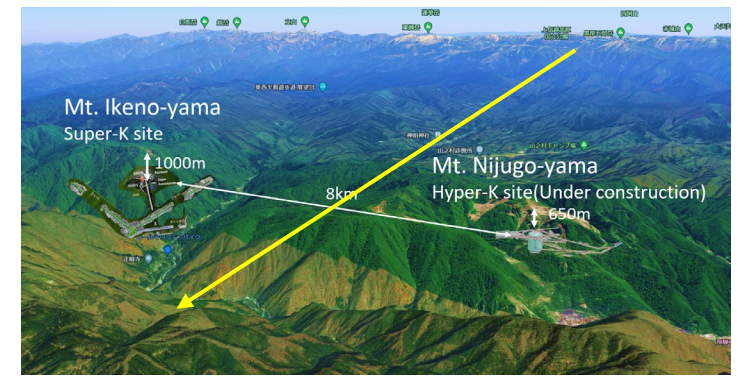
- Left-Right Asymmetryを測定できる。
NDはSKの向き：Systematicな理解

- 統計精度の向上（+10%）

- SKにより統計量（データの蓄積）が約10%増加し、物理解析の精度が向上する。
- SKにはすでにHK2.5年分の統計がある

- SK・T2K・HKの統合解析

- Mass Orderingの決定を、HK本格稼働後のより早い段階で行うことが期待できる。
- HK1年(2029年4月)でMOも 3σ
→ JUNOとの競争において不可欠？



Ultra High EにおけるHKとの相乗効果

SKとHKのトラックマッチングを取ることが可能

R. Wendell

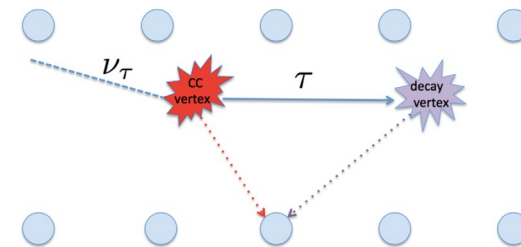
- Earth-skimming tau neutrinos, $\sim 10^{16}$ eVを検出できる可能性がある。

- IceCubeの“double-bang”(タウニュートリノ事象)との比較 (Phys.Rev.Lett. 132 (2024) 15, 151001) 7 candidates

- 同時多発するupmuイベントの観測

- 上向き高エネルギーミューニュートリノ反応
- $O(1000)$ kmの岩盤深部を通過する超高エネルギーニュートリノの観測

- SK/EGADS/KamLAND(XMASS OD)でやるべき？
→ 共同の茂住地下稀事象探索

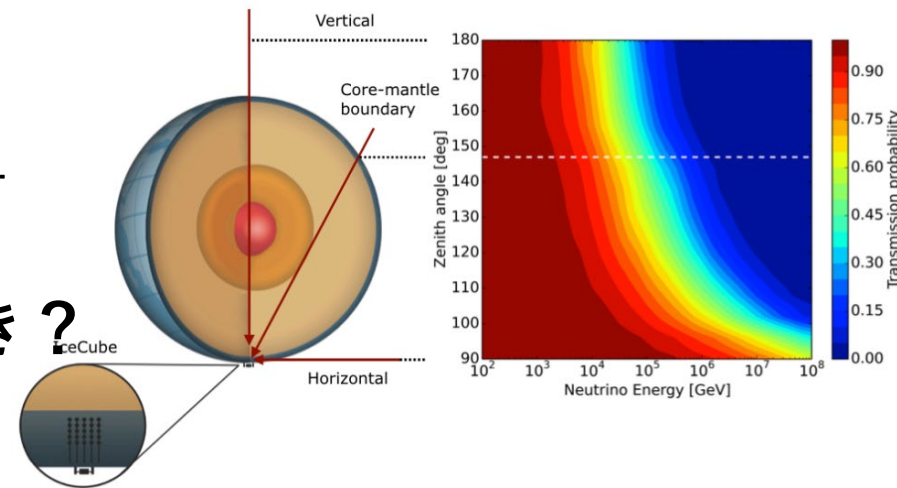


IceCUBE Double-bang

τ崩壊

- 83%: electron, hadronに崩壊→ cascade生成
 ν_τ CC相互作用とτ崩壊後にそれぞれcascadeが生成された際の信号を“double bang”と呼ぶ
- 17%: muonに崩壊→track生成

arXiv:1711.08119



3. SK-Gdの後の将来

- 5/27~のコラボレーションミーティングで議論する予定
- SK内の若手（学生、ポスドク~80名）組織
“SK Early Career Researcher Group”で若手主導の議論も進行中

SK CM Summer 2024

SK Early Career Researcher group

Proposal by A. Santos (PhD student, LLR), S. Fujita (PhD student, IPMU), and M. Harada (post-doc, ICRR) to the SK collaboration.

Two initial goals of this group:

- To strengthen connections between early career members through social events
- To regularly discuss projects, share ideas and expertise, and in doing so further strengthen the SK physics program
- Target participants: Master's, PhD, and post-doc researchers

A poll was distributed by email to ~80 people prior to the collaboration meeting:

- There were 25 initial interested respondents

自由な発想でSK/SK-Gdの設備を有効利用した
新しい物理の探求

- SK-Gd-Nd
- SK-F
- SK-Li
- With Xenon TPC(High density/Low density)
- ..

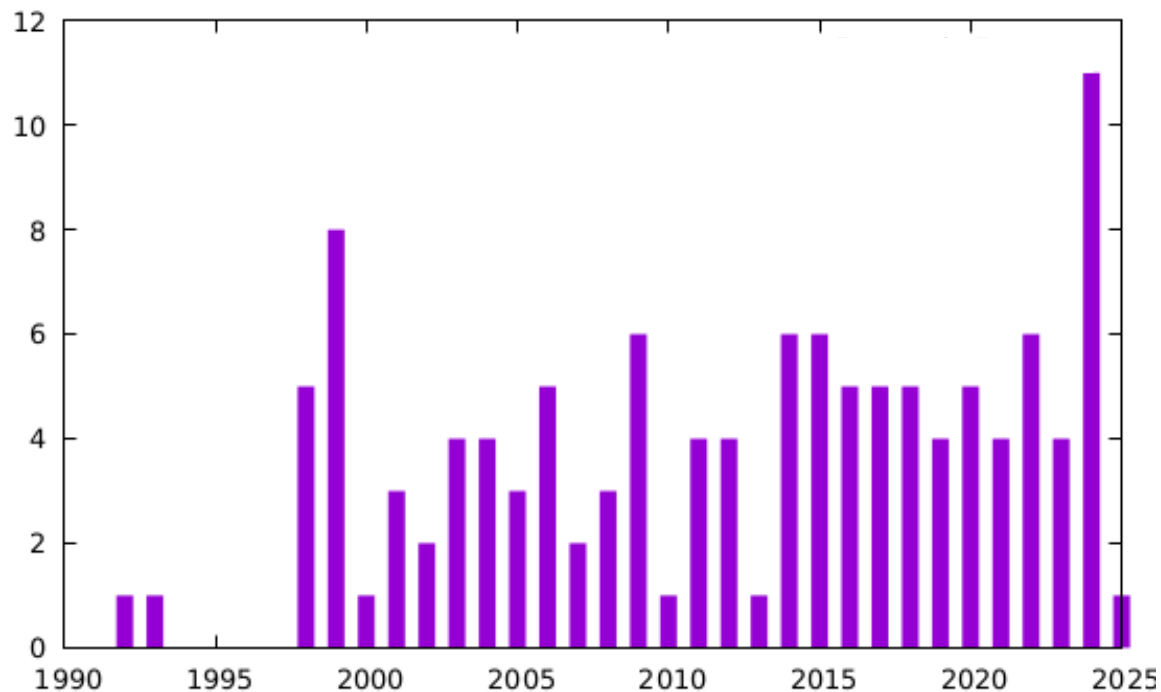
0 $\nu\beta\beta$ 探索を目指すアイデアが多い

→ SKだけでなく茂住の将来を検討する必要性

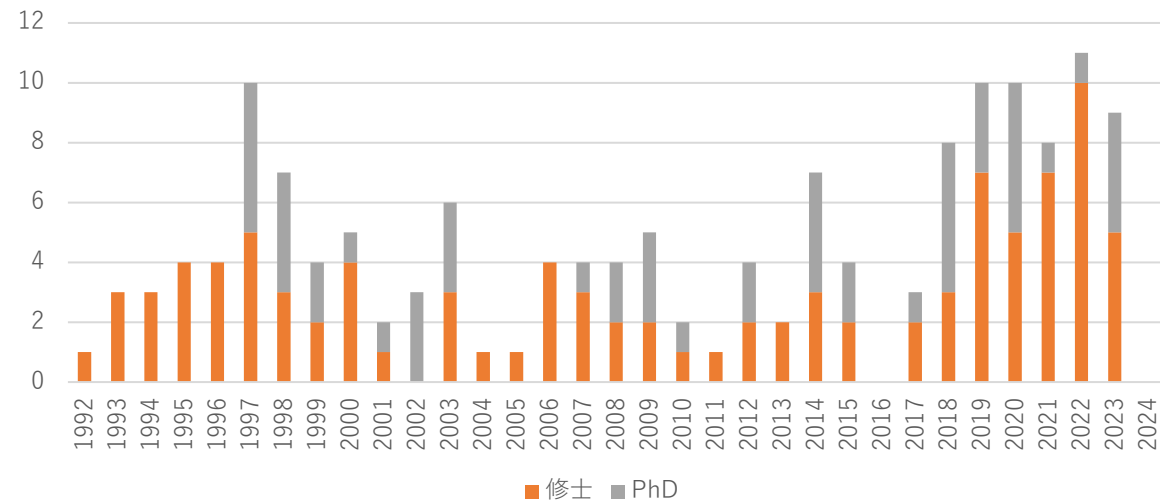
将来←次世代育成 (SK only K2K,T2K含まず)

論文 計121本

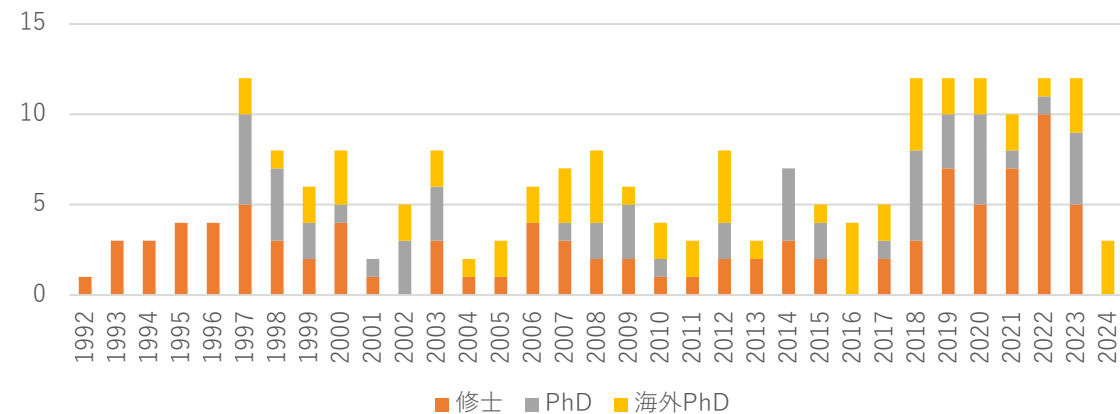
- SK-Gd Project以降 5本/年
- 2024年は1998年を超えた
- 今後も量産予定



SK学位取得者数ー国内研究機関のみ



海外PhD込み



- 国内 修士98人 博士54人
 - 海外 Ph. D. 58人
- SK-Gd Project以降 増加中

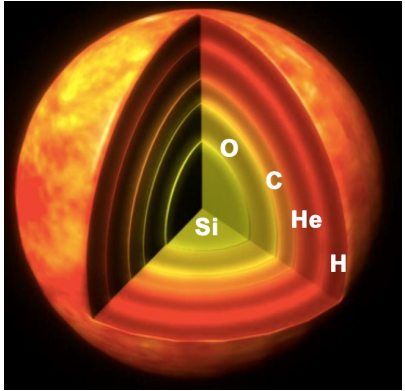
まとめ

- 将来SKでDSNBを捉えられる
- 将来SKでDSNBから得られる物理を最大化できる
- 将来もSKは近傍SN Burstが得意
- 将来もSKの統計がCP、MOに効く
- 将来もSKがあればUltra HighE等新たな可能性
- SKの後の将来もSKで検討している

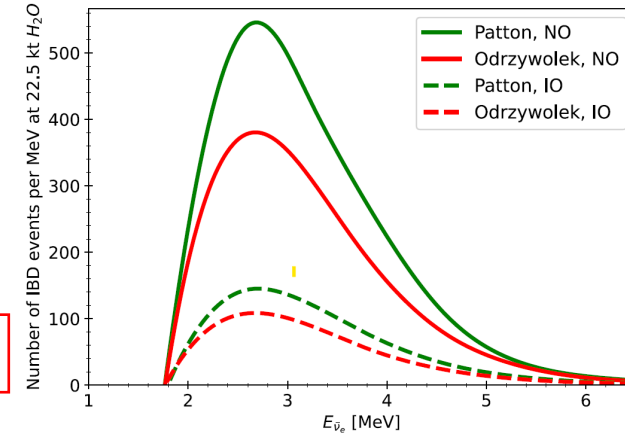
Si燃焼時の pre-supernova alarm

ベテルギウス爆発前のSKでニュートリノエネルギースペクトル

L.Machado et.al., ApJ. 935 40 (2022)



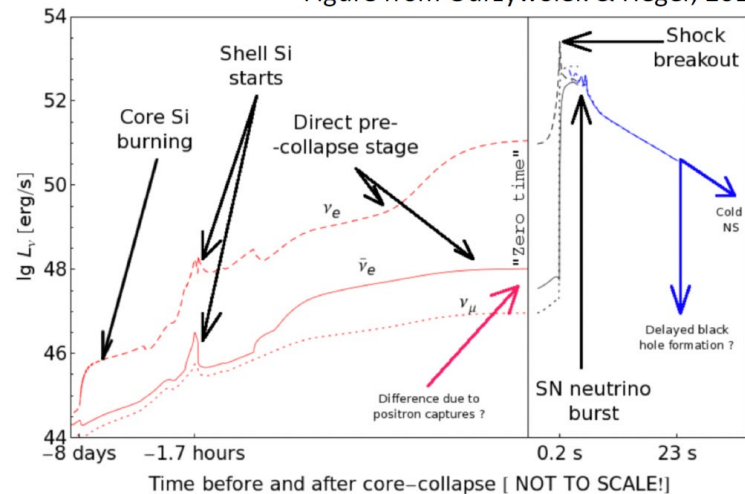
Burning Stage	Duration	Average ν energy
C	300 years	0.71 MeV
Ne	140 days	0.99 MeV
O	180 days	1.13 MeV
Si	2 days	1.85 MeV



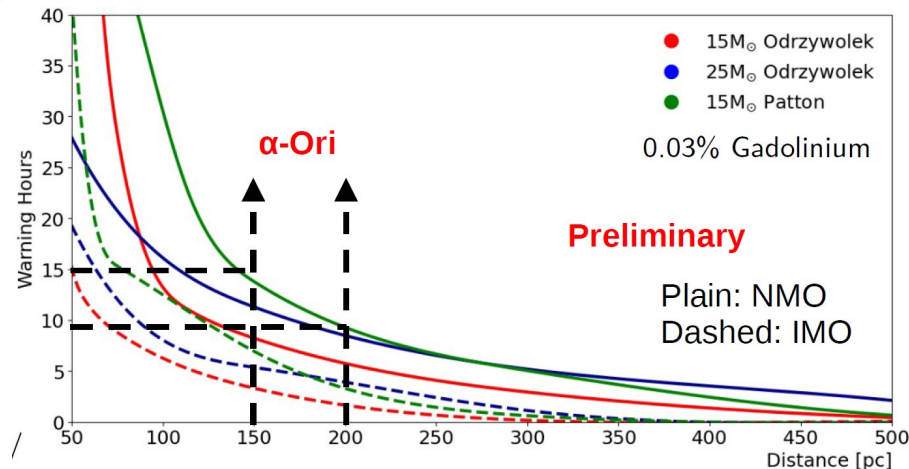
エネルギーが低く、
難しかったが、IBDへ
感度上昇により可能
になった

・ 近傍超新星爆発の”予報”

Figure from Odrzywolek & Heger, 2010



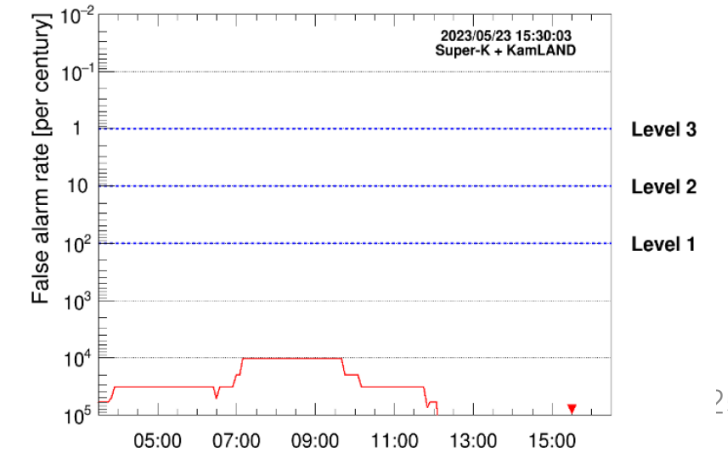
ベテルギウス(α -Ori)の場合
10～15時間前にアラームを出せる



KamLANDとのコインシデンスで確度の高いアラーム
を発報するシステムを構築 →2027年度まで
KamLAND停止中はSK単独だが協力して運用継続

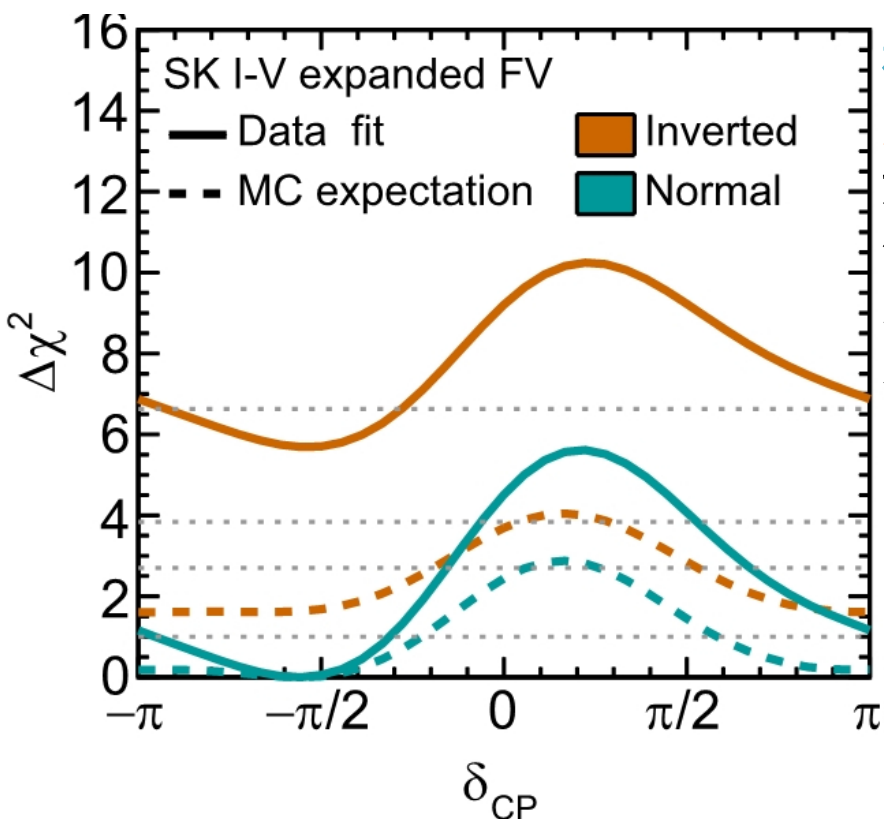
<https://www.lowbg.org/presnalarm/>

False Alarm Rate over the last 12 hours



大気ニュートリノ精密観測による質量階層性の研究

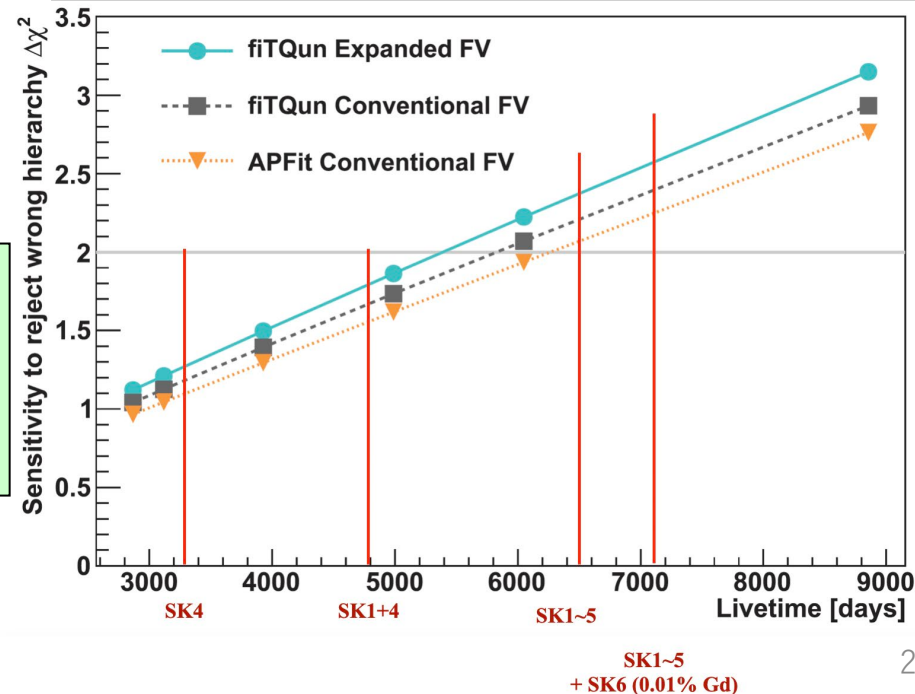
- SK純水期全6511日分のデータを解析。その期間の全大気ニュートリノ数は、約66,000事象。
- タンク外周部1m分の有効体積を拡張して利用した上、イベントの中性子数の活用、複数リングの詳細な解析を行い、ニュートリノと反ニュートリノの違いの分別をより精密い解析を改良。



標準階層性(水色線)と逆階層性(橙線)を仮定した場合のカイ自乗検定値($\Delta\chi^2$ は最小値からの差)。横軸はCP非対称パラメータ(δ_{CP})を表している。

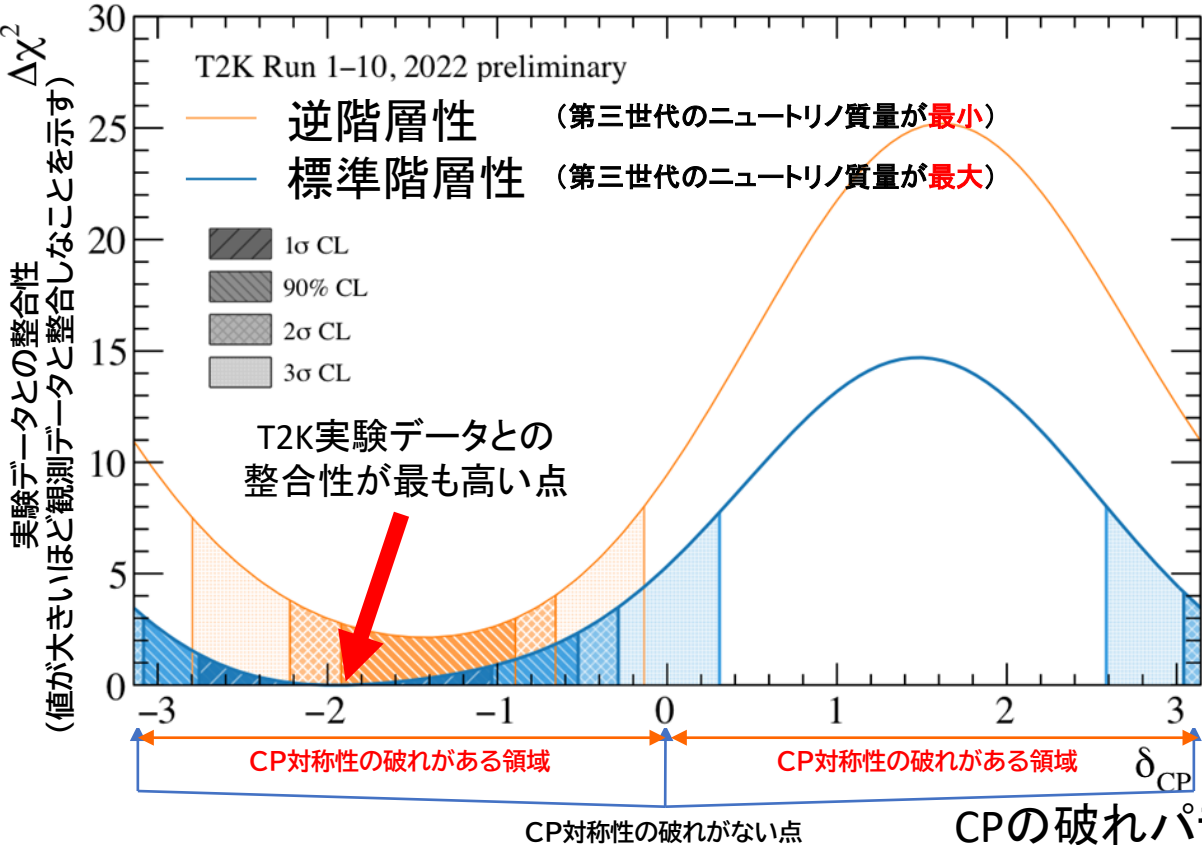
標準階層性が、より観測データと一致していることを示している。逆階層性を92.3%の信頼度で棄却している。

後継計画では、Gdによりニュートリノ反応モデルを精密化、 $\nu/\bar{\nu}$ の識別により、信頼度99%以上の達成を目指す。



T2K実験によるCP対称性の破れの研究

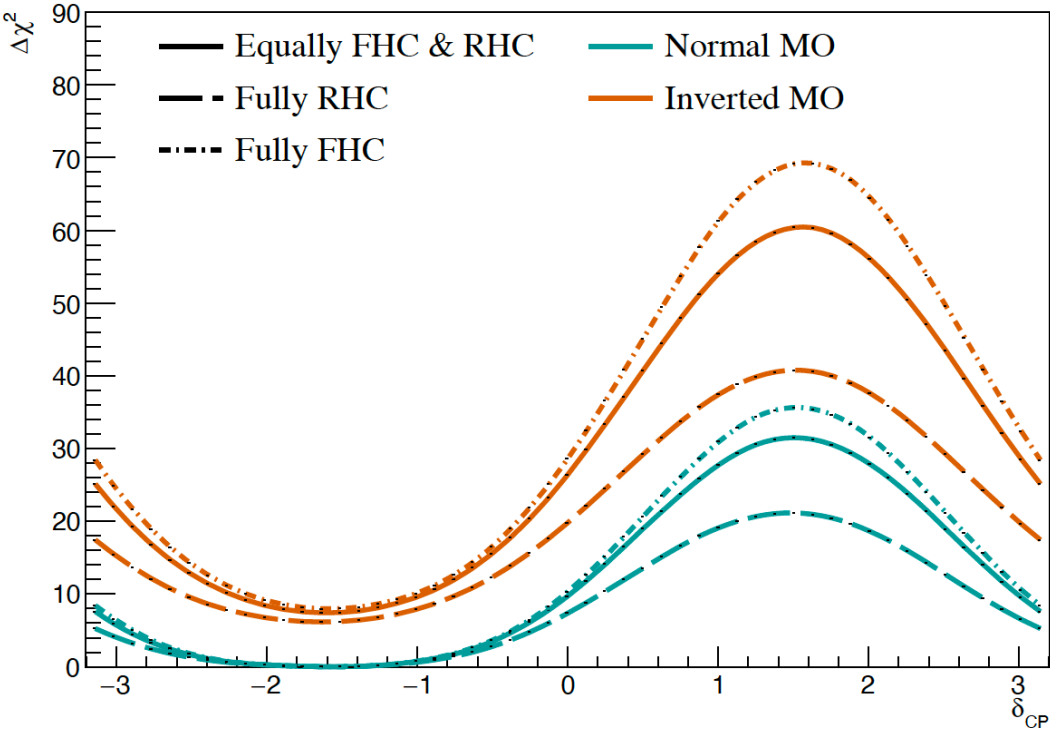
ν_μ 19.7x10²⁰ POT, $\bar{\nu}_\mu$ 16.3x10²⁰ POT 分のデータを解析



CP対称性の破れ(ニュートリノと反ニュートリノの違い)があることを90%以上の確率で示唆する結果を得た。

CPの破れパラメータ
破れていない場合
 $\delta_{CP}=0$ or 2π
破れが最大の場合
 $\delta_{CP}=-\frac{1}{2}\pi$ or $+\frac{1}{2}\pi$

SK+T2Kの2027年までの期待値



後継計画においては、今の解($\delta_{CP} \sim -1/2\pi$, CPの破れが最大の点の一つ)が正しければ99%でCP対称性の破れを検証可能。

大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索

450 キロトン・年のデータ

$p \rightarrow e^+ \pi^0$ の探索結果

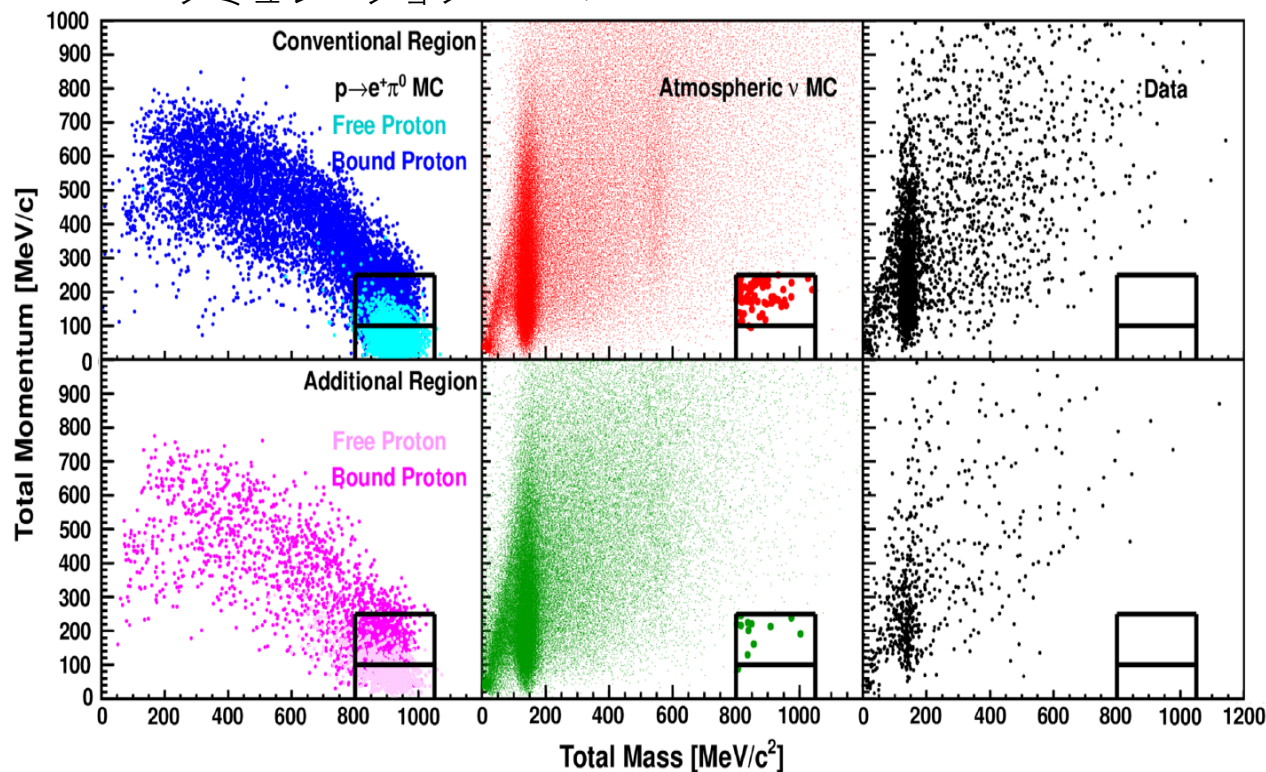
陽子崩壊の

シミュレーション

大気ニュートリノの

シミュレーション

観測データ



壁から2m以上

壁から1 ~ 2 m

陽子崩壊信号では中性子がほとんど放出されないが、バックグラウンドとなる大気ニュートリノ反応では比較的高い確率で中性子が放出される。このため、後継計画では、真の候補事象が起されればGdによる中性子の情報により、信頼度の高い事象と認識できる。

主要な陽子崩壊モード ($p \rightarrow e^+ \pi^0$, $\mu^+ \pi^0$) の探索を行ったが、有意な信号は観測されなかった。それぞれのモードで、 2.4×10^{34} 年 ($e^+ \pi^0$)、 1.6×10^{34} 年 ($\mu^+ \pi^0$) という陽子寿命の下限値が得られた。また、365 キロトン・年のデータを用いて $p \rightarrow \nu K^+$ 探索も行ったが、崩壊の兆候は発見されず、 8.2×10^{33} 年という寿命の下限値を得た。これらはいずれも世界最高感度の結果となっている。