

スーパーカミオカンデにおける 太陽ニュートリノ観測と SK-Gdの現状

家城 佳 (ICRR)

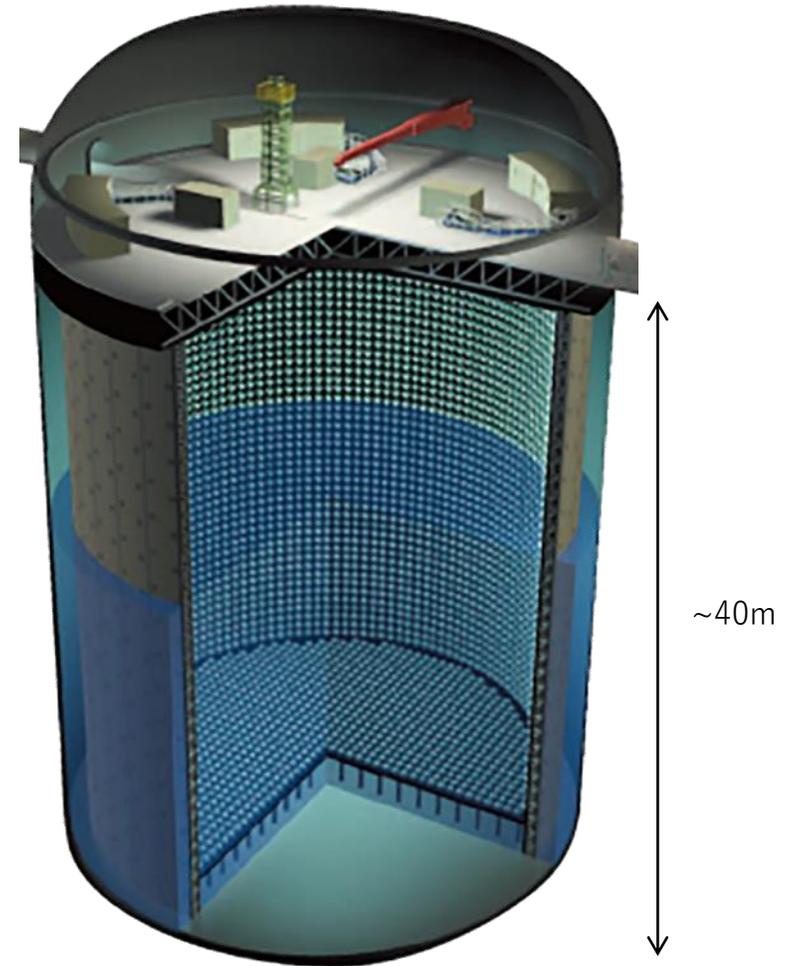
令和3年度 ICRR共同利用研究成果発表会



スーパーカミオカンデ(SK)概要

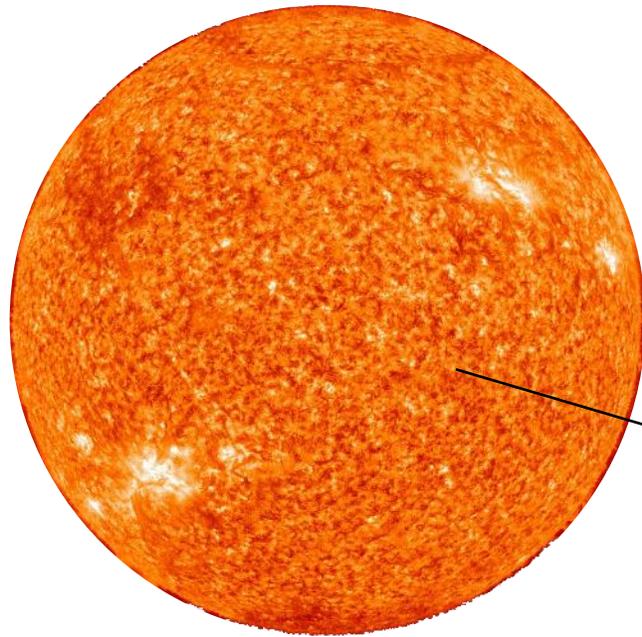
- 50ktonの水チェレンコフ検出器
 - 内水槽に>11000本の50cm PMT
- 2020年にGd0.01%を導入した(後述)
 - 超新星背景ニュートリノ観測等に効果を期待
 - 今後さらに濃度を増加する
- 物理ターゲット
 - 太陽ニュートリノ
 - 超新星ニュートリノ
 - 陽子崩壊
 - 大気ニュートリノ

| | |
|-------------|--|
| } ~MeV | |
| } 本講演 | |
| } >~100MeV | |
| } 午後の講演(田代) | |

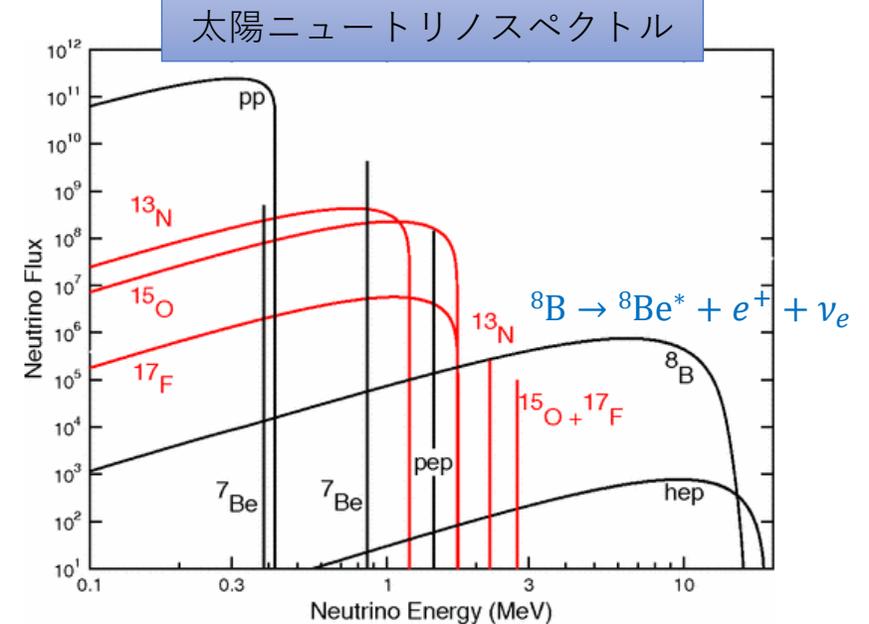


太陽ニュートリノ観測の現状

太陽ニュートリノ観測



- 太陽の核融合反応で発生するニュートリノを観測
 - SKで観測可能なのは主に ${}^8\text{B}$ からのニュートリノ
- 近年で注目されているトピック
 - ν 振動パラメータ (Δm_{21}^2) がKamLANDと $\sim 2\sigma$ ずれている (CPT対称性)
 - ν 振動における物質効果の精密測定、non-standard interaction検証
 - 太陽や地球の物質によって ν 振動が影響を受ける

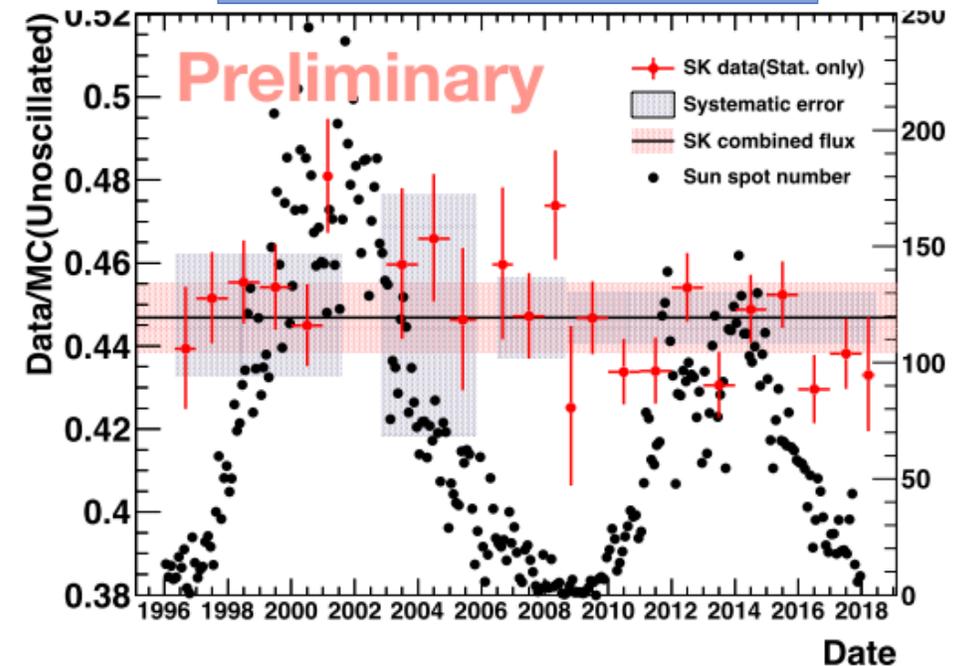


これまでの太陽ニュートリノ観測

- 1996年以降、太陽ニュートリノを観測し続けている
 - 11年周期の太陽活動(黒点の数)との相関は見られない。(太陽活動周期の原因は未だに解明されていない)
- SK-IVの2014年までの観測結果がpublished
 - 全SK-IVデータを使った観測結果も近日submit予定。解析も改善(エネルギー一様性補正、宇宙線核破碎BG選別etc.)
→ 次のページで結果を紹介
 - SK-V,IVのデータは鋭意解析中

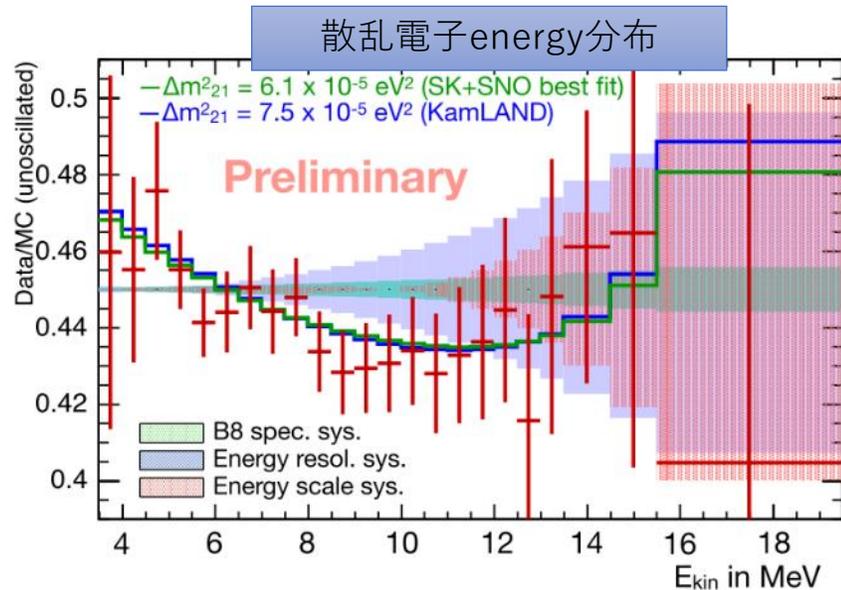
| Phase | 時期 | Livetime [days] | 備考 |
|----------|----------------------------------|-----------------|-------------|
| SK-I | Apr. 1996 – Jul. 2001 | 1496 | |
| SK-II | Oct. 2001 – Oct. 2005 | 791 | 事故後, PMT半分 |
| SK-III | July 2006 – Aug. 2008 | 548 | 再建後 |
| SK-IV | Sep. 2008 – May 2018 | 2970 | エレキupgraded |
| SK-V, VI | Jan 2019 – July 2020, Jul 2020 ~ | - | Gd導入(準備期間込) |

太陽ニュートリノと黒点の数

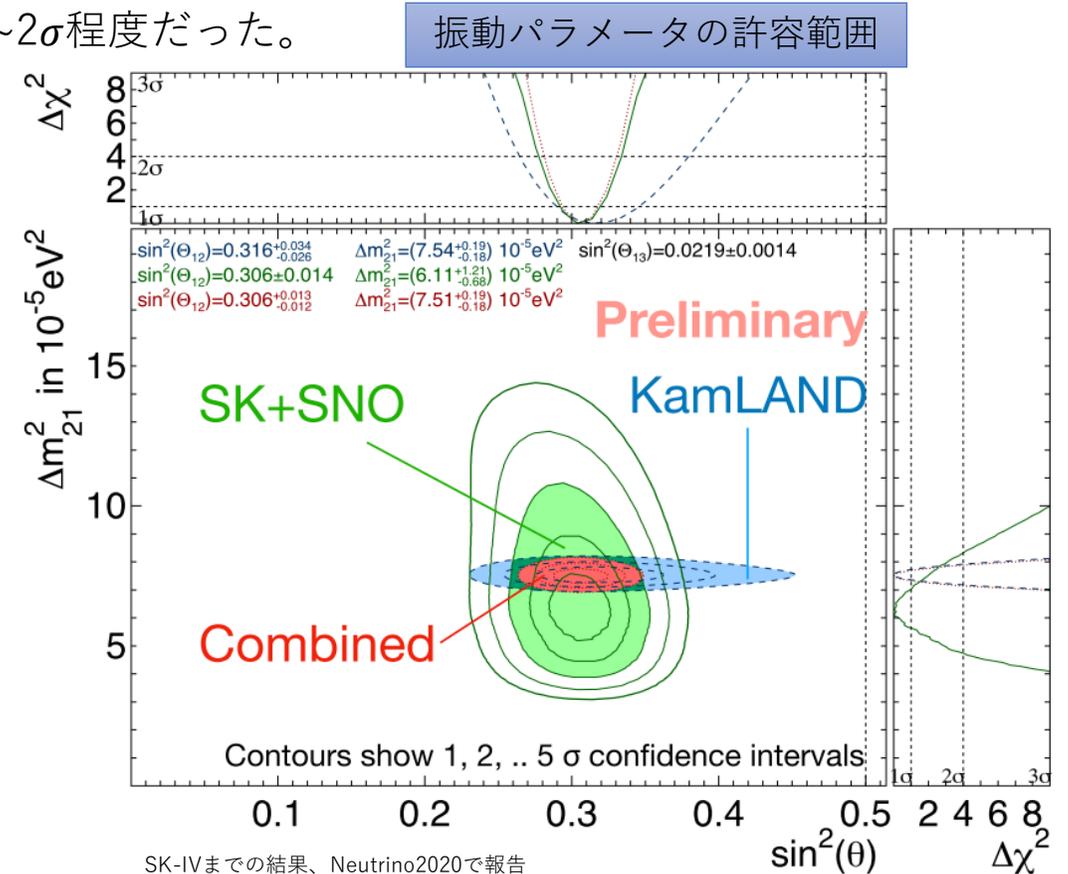


太陽ニュートリノ振動測定(SK I-IV)

- ν 振動のパラメータ($\Delta m_{21}^2, \sin^2 \theta_{12}$)に依存してエネルギースペクトルが変化する。
 - 太陽と地球の物質効果も影響する
- Δm_{21}^2 の測定値がKamLAND(原子炉 $\bar{\nu}_e$)の値とずれている
 - ずれは $\sim 1.4\sigma$ 程度。前回(2016年論文)の結果は $\sim 2\sigma$ 程度だった。
 - CPT対称性の検証



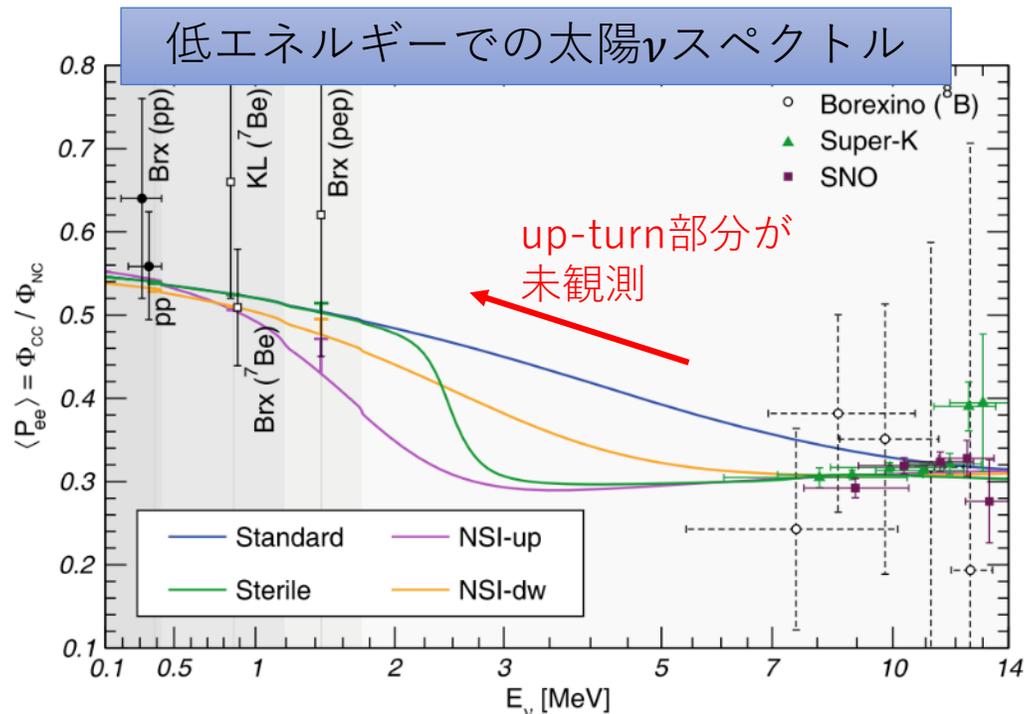
SK-IVまでの結果、Neutrino2020で報告



SK-IVまでの結果、Neutrino2020で報告

物質効果の測定

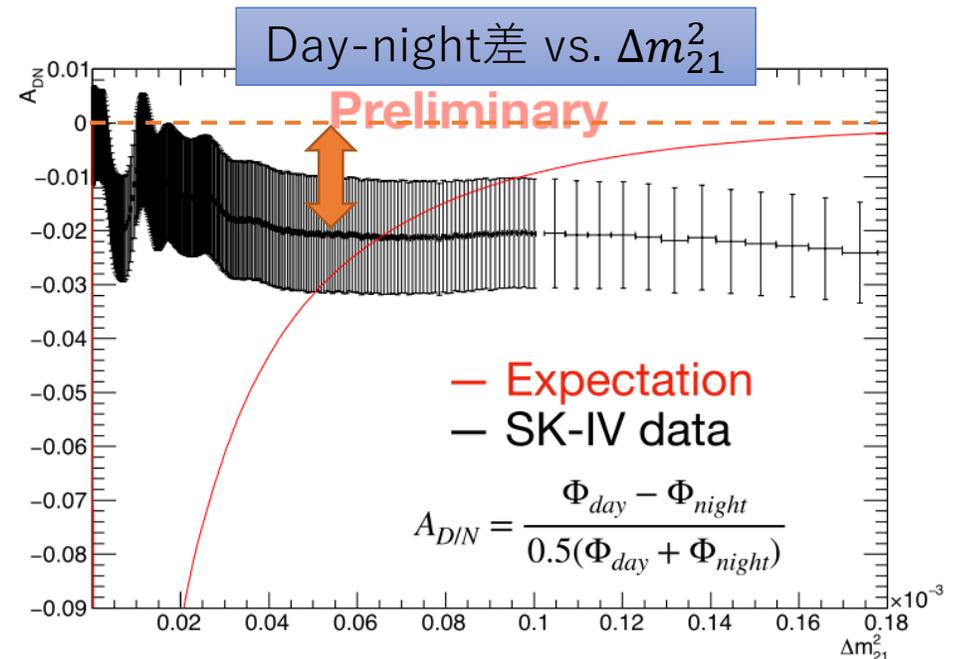
- Up-turn
 - エネルギースペクトルが太陽の物質効果によって3-4MeVくらいを境に変化する。
 - このtransitionは未だに観測できていない。
 - Non-Standard Interaction(NSI)のモデルによって異なるup-turnが予言されている。



Eur. Phys. J. A (2016) 52: 87

- Day-night effect
 - 地球の物質効果によって、昼と夜で観測される ν フラックスが変わる現象。
 - 地球における ν 物質効果の証拠。
~2 σ 程度の統計的優位さで見えている。

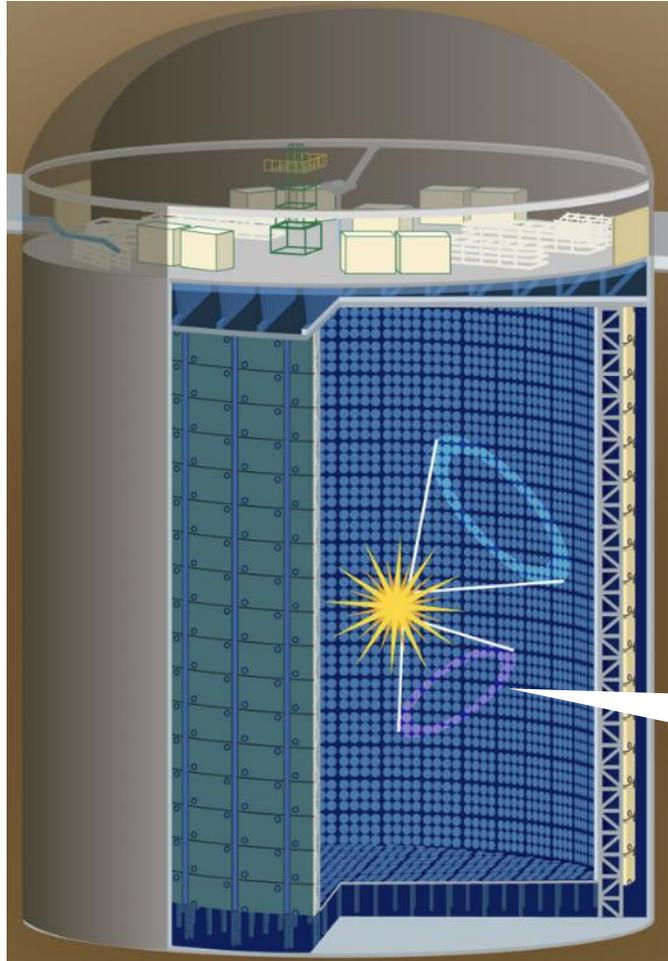
$$A_{DN}^{Fit} = (-2.1 \pm 1.1)\% [3.5 < E < 19.5 \text{ (MeV)}]$$



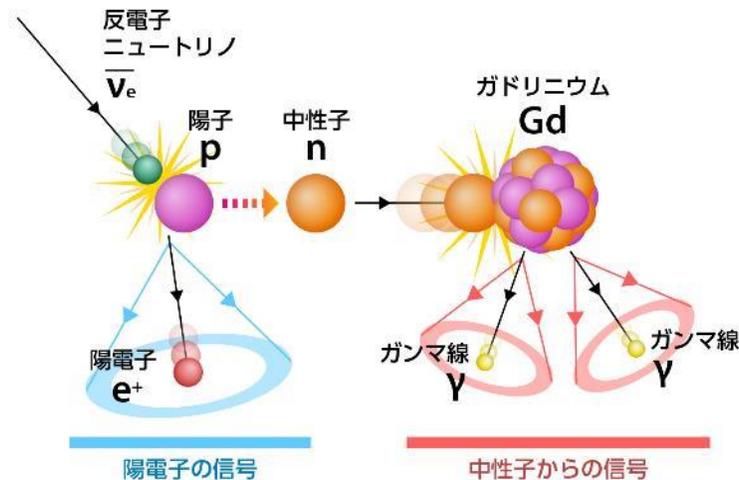
SK-IVまでの結果、Neutrino2020で報告

SK-Gdと超新星ニュートリノ

SK-Gdの目的

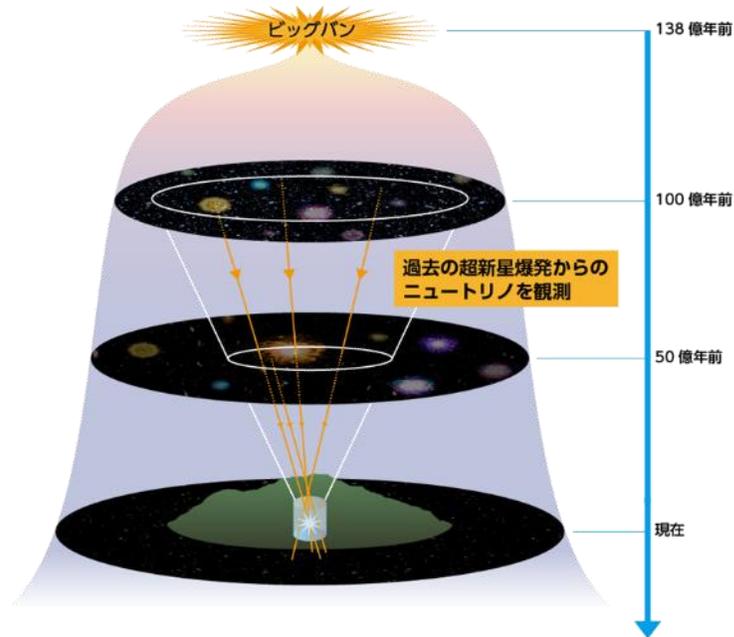


- Gdを用いて中性子をIDする
 - 中性子を吸収する断面積が大きく、吸収後に γ 線($\sim 8\text{MeV}$)を放出する。
- 物理ターゲット
 - **超新星「背景」ニュートリノの初観測**
 - 近傍の超新星爆発における方向感度向上
 - 陽子崩壊の背景事象削減
 - etc.

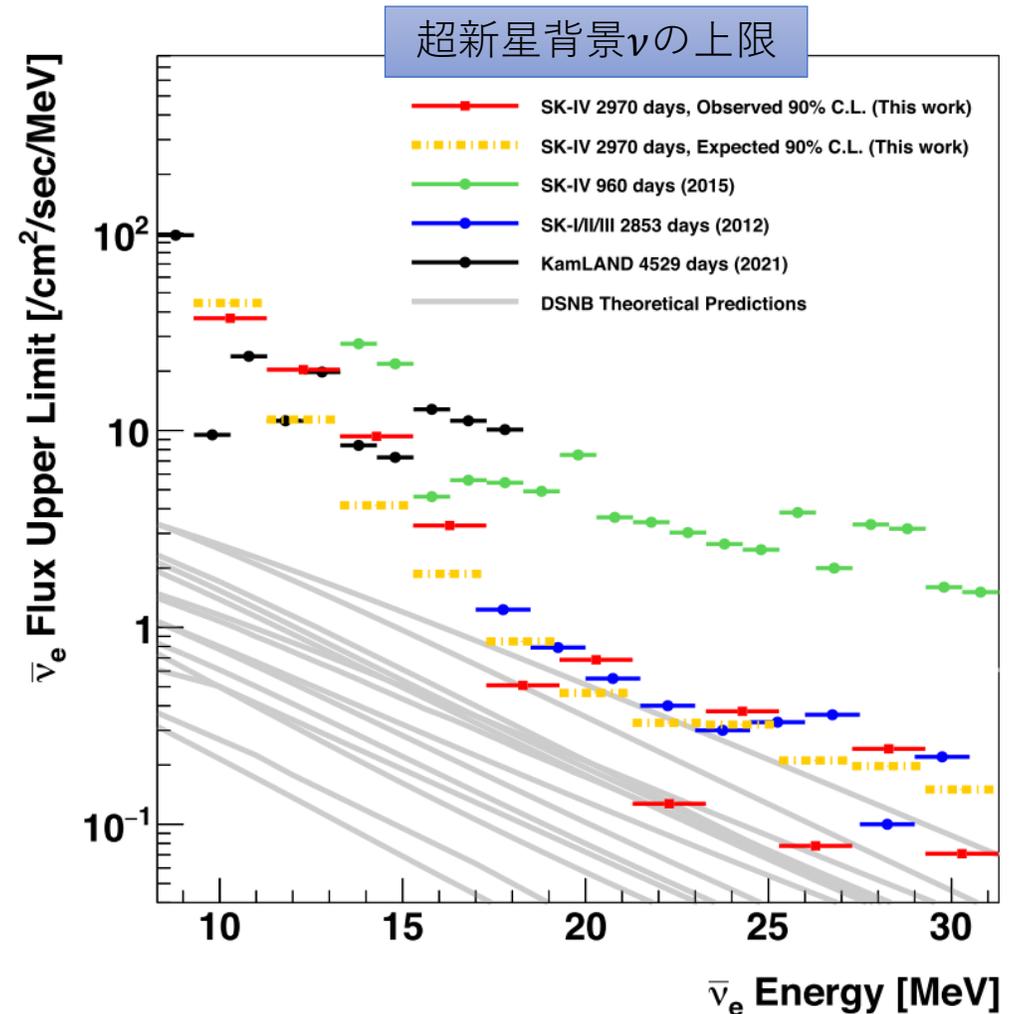


Prompt (e^+)と
delayed (n)の遅延同時計測

超新星「背景」ニュートリノ

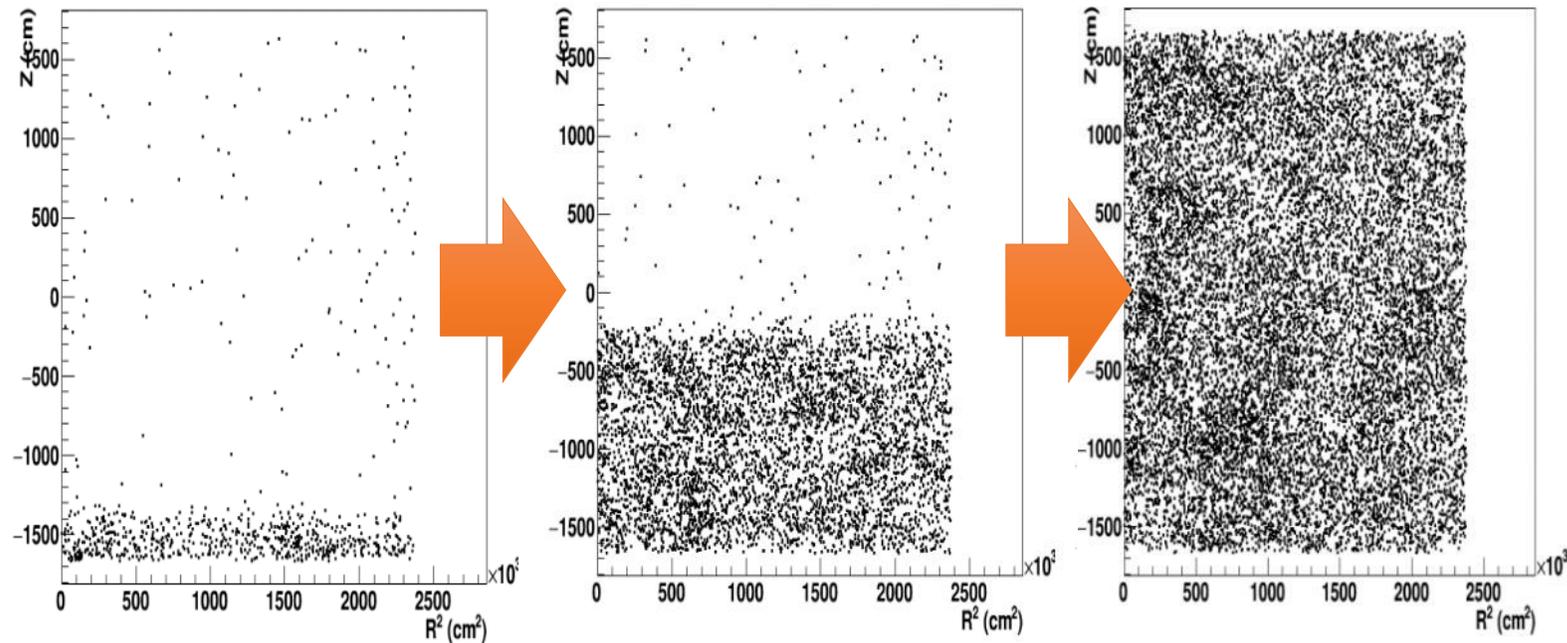


- 過去に起きた超新星爆発によるニュートリノを捉える。
 - 宇宙の進化の歴史のプローブ
- ~10-30MeVの領域で、BG(大気 ν , 宇宙線spallation後の ${}^8\text{Li}$ 崩壊)からのevent数超過を見る
 - 最新結果SK(I-IV): PRD104 122002(2021)
 - SKが上限値を与えており、既にいくつかのモデルが予想する領域に達している。→ **Gdで発見を目指す**



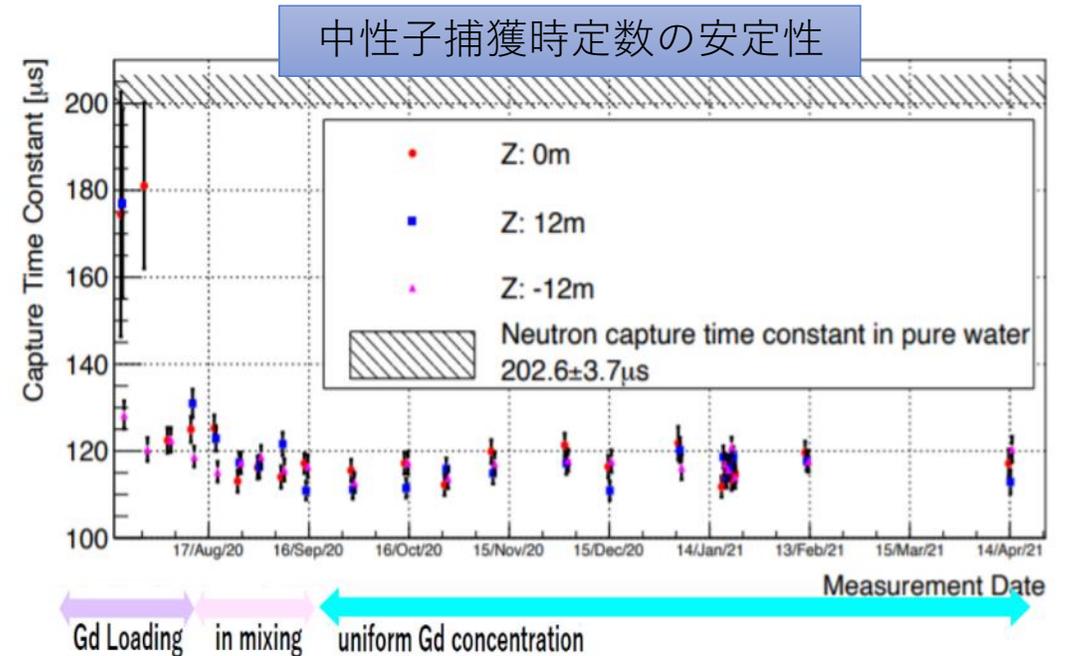
Gd 0.01%導入 in 2020

- 13トンの $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ を導入した。
 - Gdで0.01%相当
 - Gd導入論文がNIMAにaccept済み
- タンクの底面側からGd水溶液を入れていった。
 - 中性子捕獲反応(宇宙線核破砕由来)の事象が下から増えていくのが確認できた。
 - 導電率や原子吸光光度計の測定により、濃度が一様であることを確認。



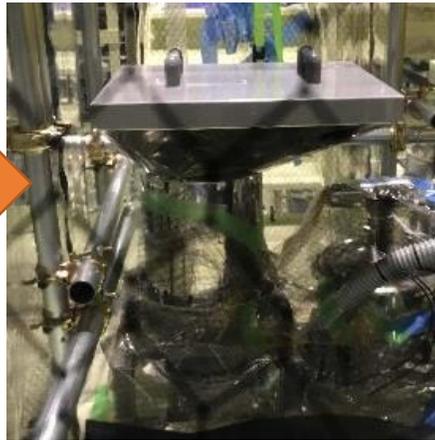
Gd導入後の検出器性能

- レーザー光やLINAC電子ビームを用いた測定
 - 水の透過率など基本的な検出器性能に大きな変化が無いことを確認。
- AmBe線源を用いた中性子捕獲時定数のモニター
 - 時定数(~116us、Gd濃度に依存)はシミュレーションと一致し、時期変動なし。

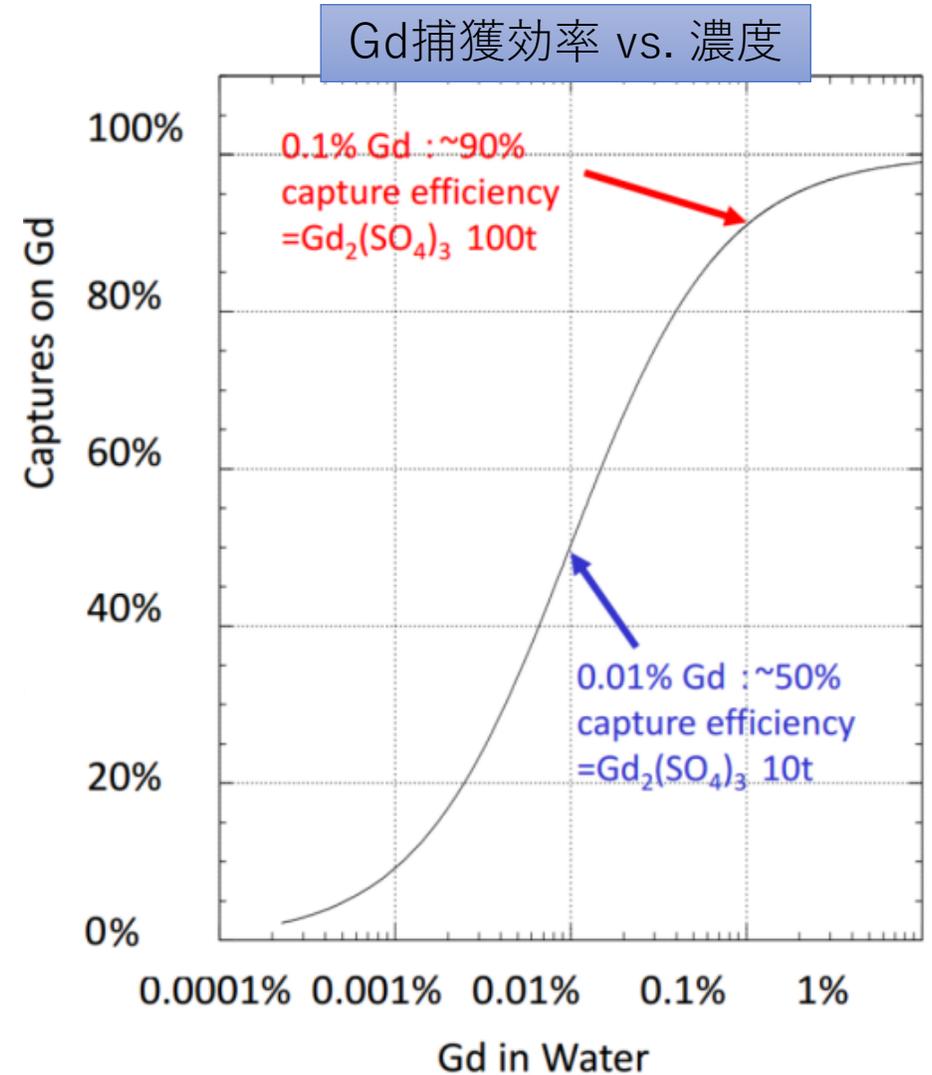


Gd濃度の増加予定

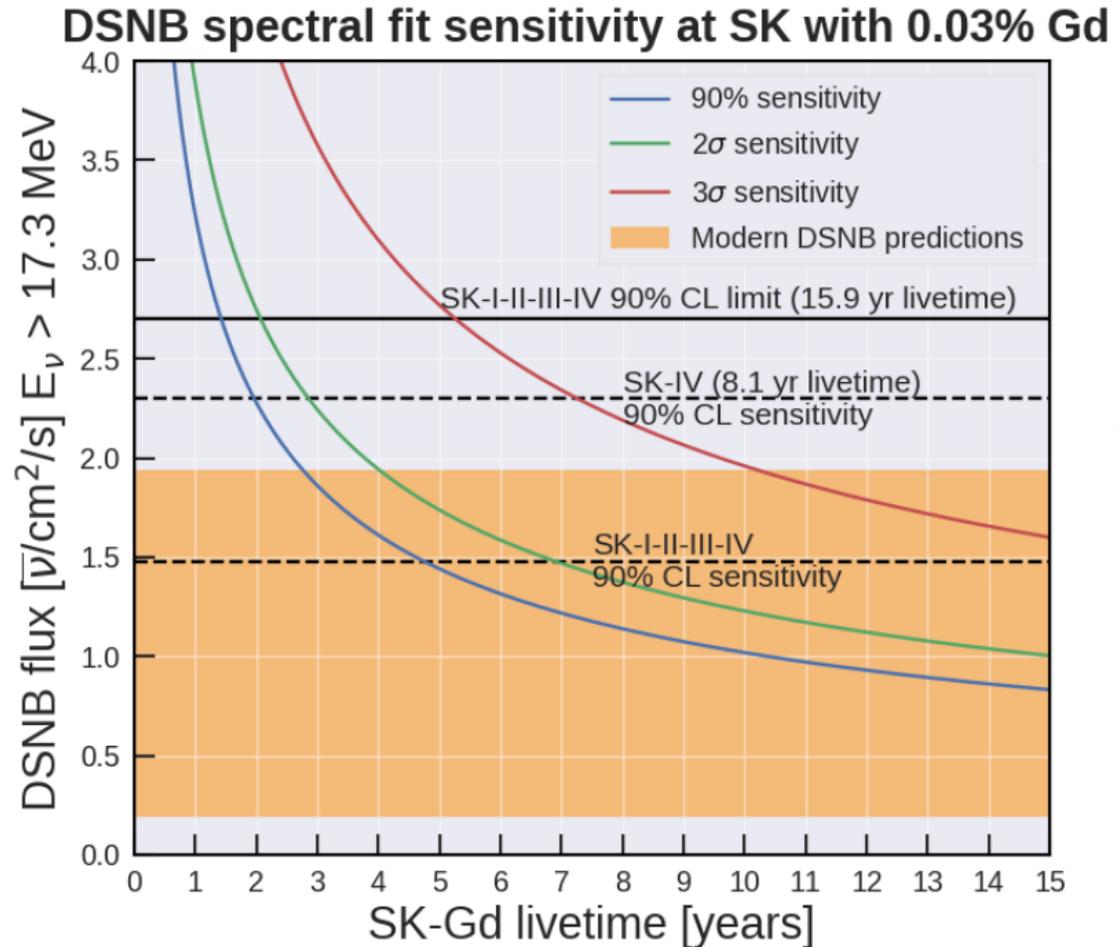
- 今年5-6月頃にGd濃度を増加する。
 - 現在0.011% → 0.03%へ
 - 中性子捕獲の効率が50% → 75%に向上見込み
- Gd粉末倍増での溶解を行うため、昨年12月に溶解装置の配管改造と試運転を実施した。



大型化された
粉入れポート



超新星背景 ν に対する感度向上見込み

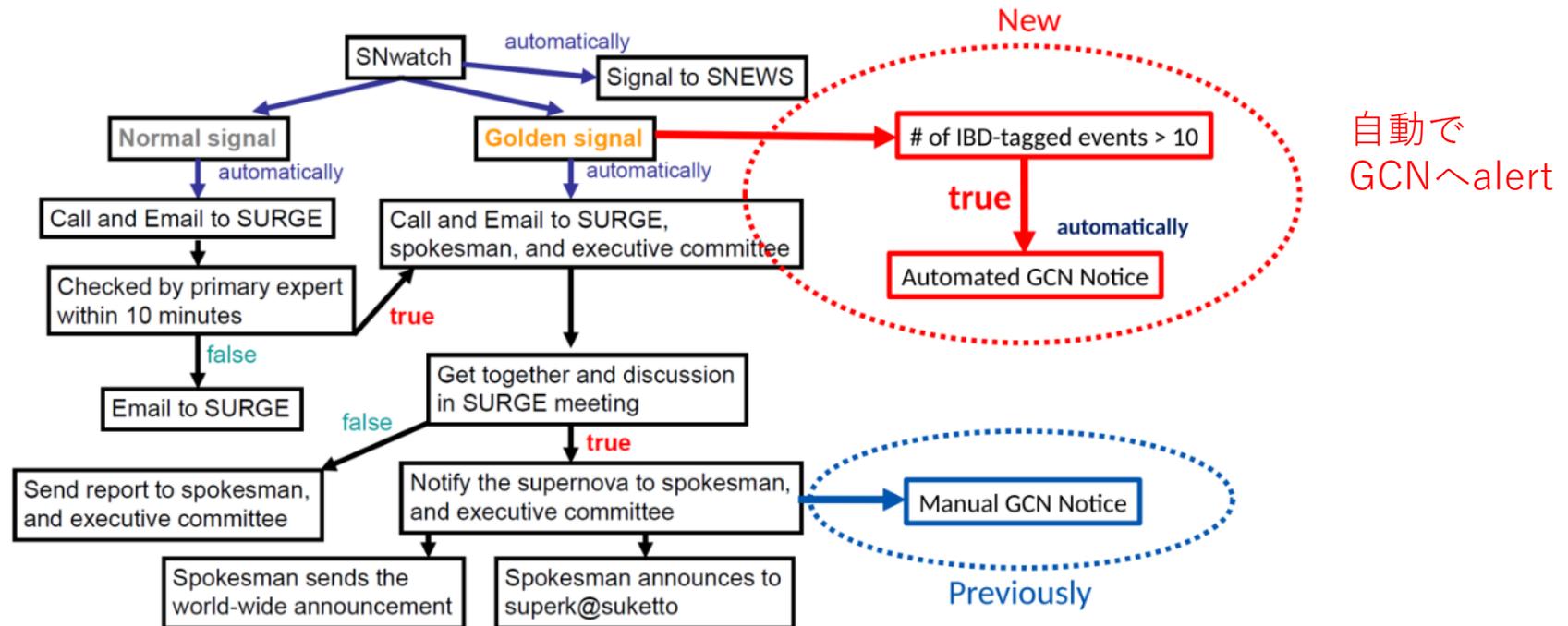


(※DSNB = 超新星背景ニュートリノ)

Gdにより、各種モデルが予言する領域へさらに踏み込む。

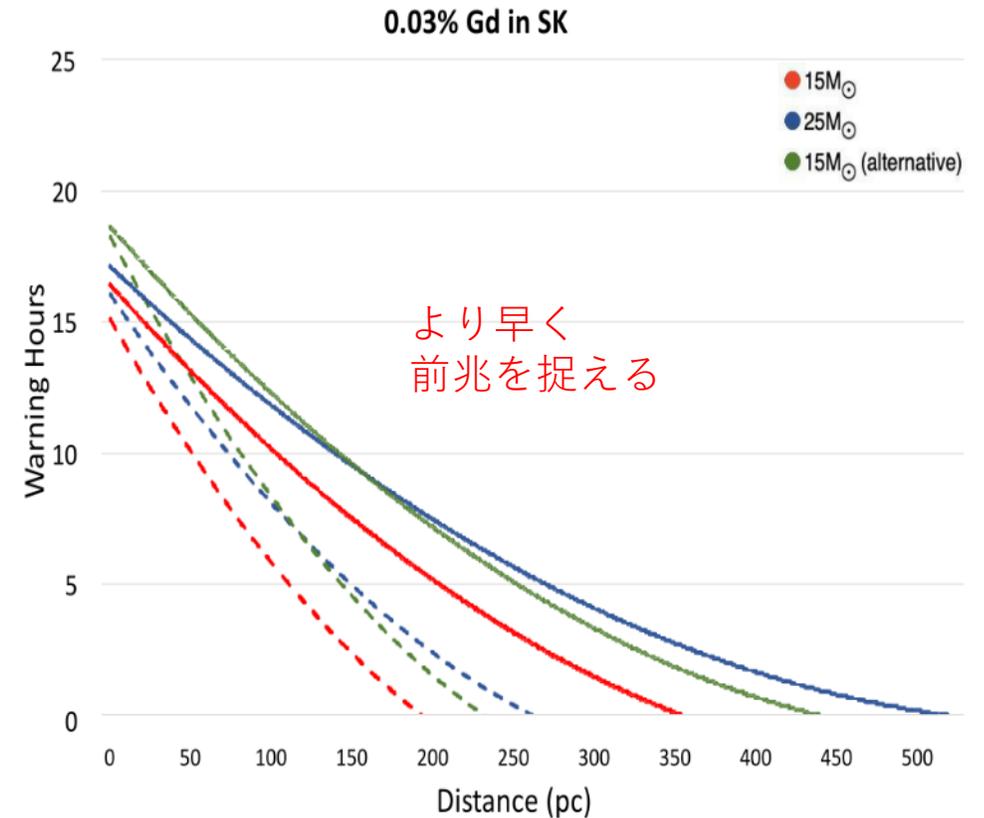
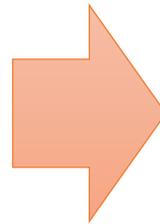
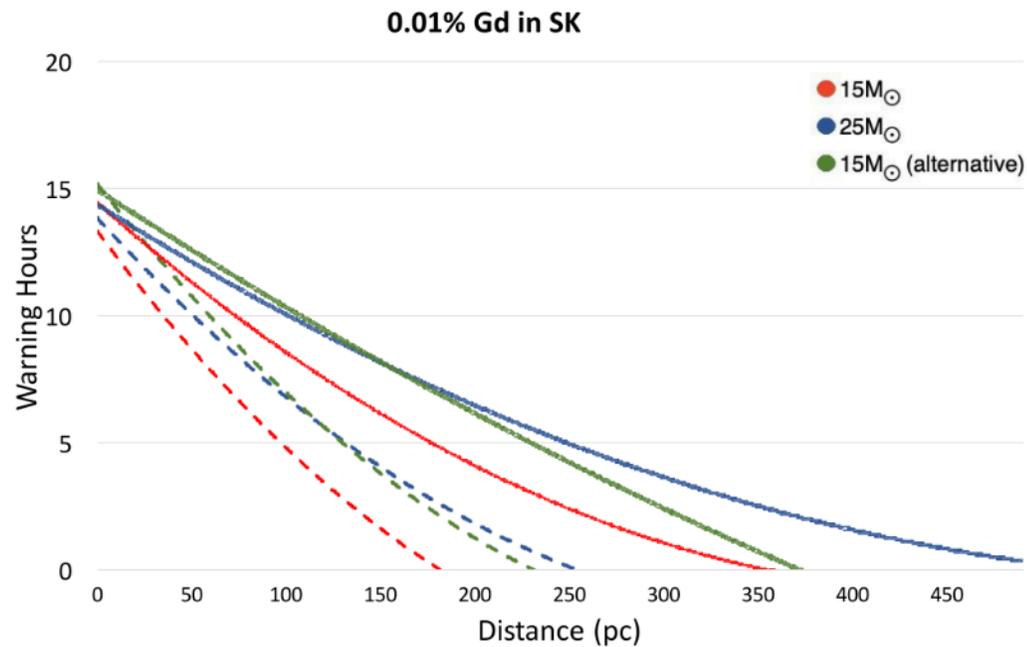
超新星爆発アラートのupgrade

- 超新星爆発が起きた際、大きな信号(golden burst)の場合はエキスパートの確認(~1時間)を待たずに自動(~10分)でGCN(γ 線観測グループ)にアラートを送れるようになった。
 - Gdにより方向感度のある $ve \rightarrow ve$ と方向感度のない $\bar{\nu}_e p \rightarrow en$ を区別できるので、方向測定の精度も上がる。(~10kpcのSNに対して $5^\circ \rightarrow 3^\circ$)



超新星爆発の前兆信号も観測可能

- 爆発の前兆となるSi-burning由来のニュートリノ信号についてはSK内部で既にアラームを運用しており、Gd濃度増加によってより早期のアラームが可能となる。
- KamLANDとも連携する方向で準備を進めている。



まとめ

- 太陽ニュートリノ観測が進行中
 - 振動パラメータ $\Delta m_{21}^2, \sin^2 \theta_{12}$ の測定、物質効果の精密測定
 - SK-IV最後までデータの使った論文を投稿予定。
- SK-Gd
 - 今年0.01%→0.03%にGd濃度を増加する予定。
 - 中性子検出効率が50→75%に
 - 超新星爆発背景ニュートリノの発見感度が向上する見込み。
 - 超新星爆発のアラートもupgradeされた。
 - 超新星爆発の兆候も早期に捉えることが期待される。

Backup slides

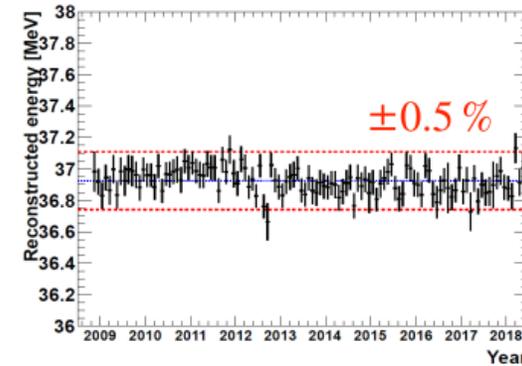
Analysis Improvements

- Detector simulation improvements [Poster #350: Y. Nakano]
 - Improved PMT hit timing simulation
 - Improved modeling of water quality non-uniformity
- Analysis improvements [Poster #350: Y. Nakano]
 - Correction for PMT gain drift (introduced in 2017)
 - Improved correction for non-uniform energy response
- Improved spallation cut [Poster #166: S. Locke]
 - 12% more signal efficiency while keeping spallation rejection efficiency at a similar level (~90%)

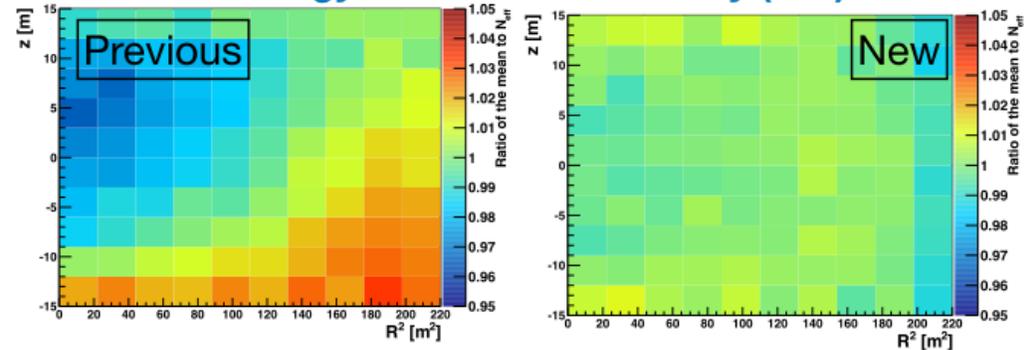
E-scale non-uniformity (MC) 1.7% \rightarrow 0.5%

Gained ~1 year worth statistics

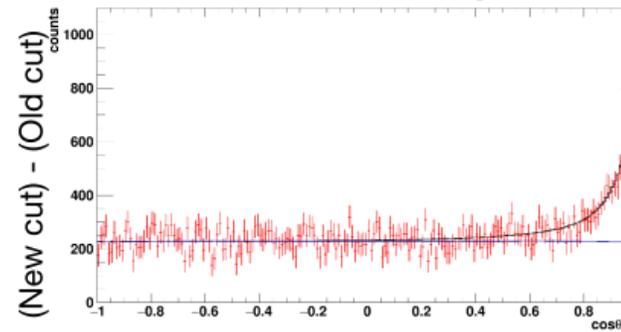
Energy scale stability (decay-e from cosmic μ)



Energy scale non-uniformity (MC)



Additional events w/ new spallation cut

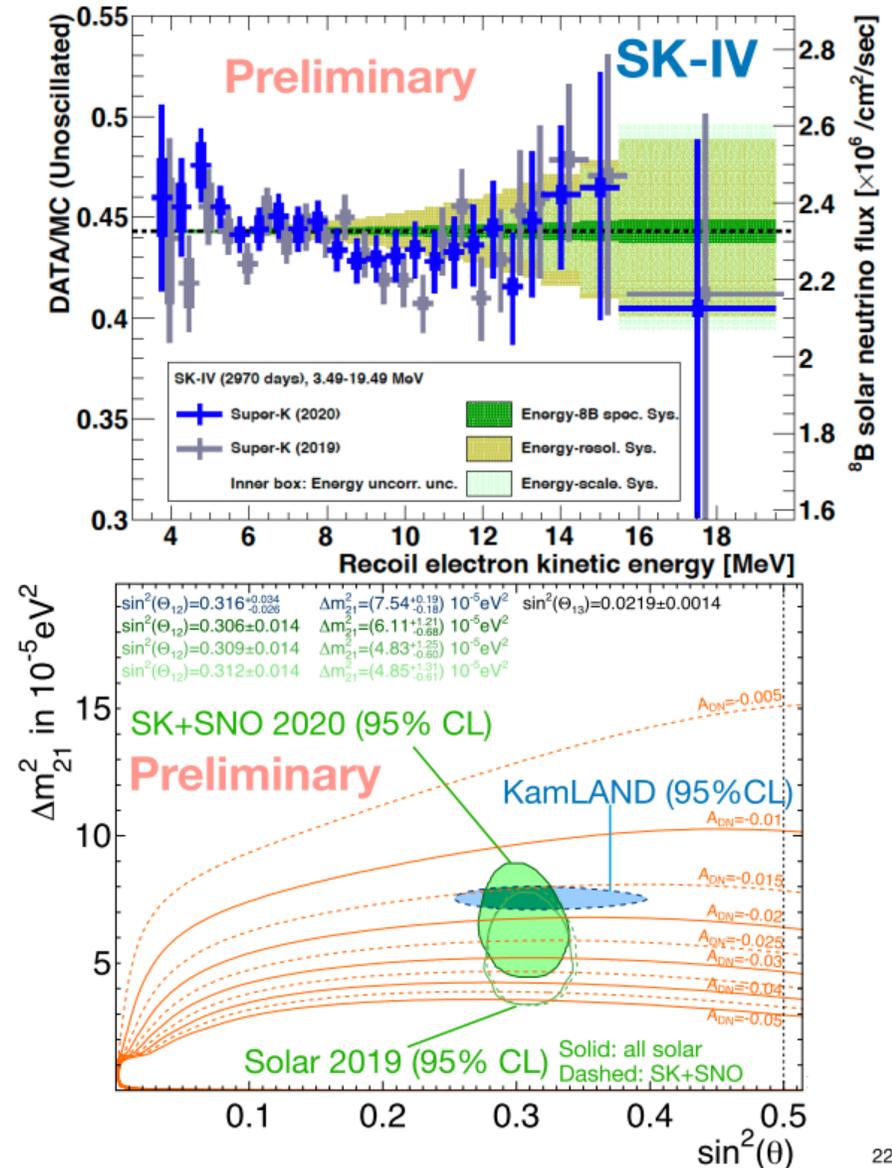


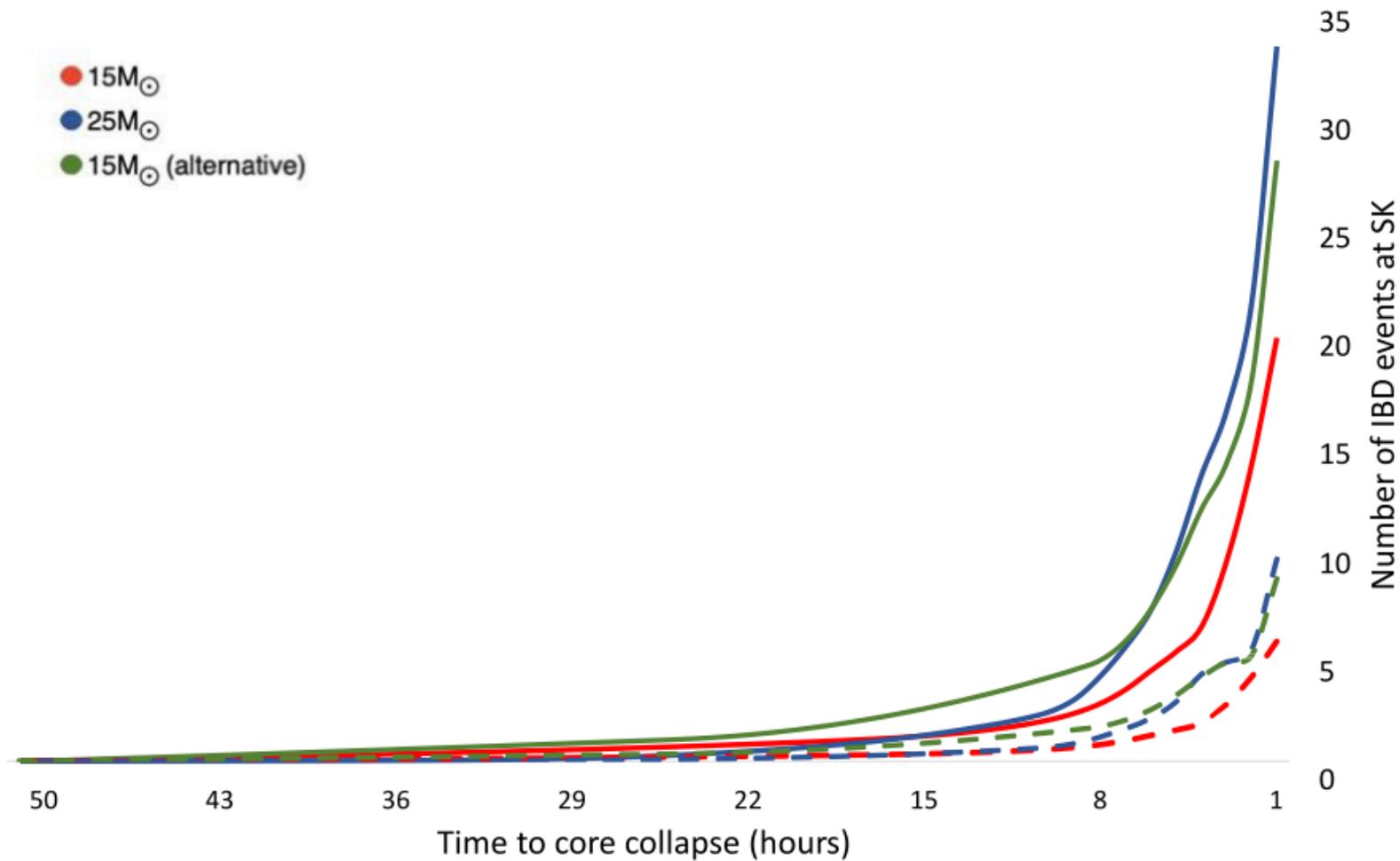
Difference from the previous results

- Best fit value of solar Δm_{21}^2 changed from $4.8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ (2019) to $6.1 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- Spectrum analysis:
 - Data/MC ratio at $E < 6 \text{ MeV}$ slightly shifted upward
 - Shift of prediction due to improved detector simulation
 - Added statistics due to improved spallation cut
 - Event migration due to new reconstruction tool
- Day/Night asymmetry:

$$A_{DN}^{Fit} = (-3.6 \pm 1.6(stat) \pm 0.6(syst)) \% \rightarrow A_{DN}^{Fit} = (-2.1 \pm 1.1) \%$$

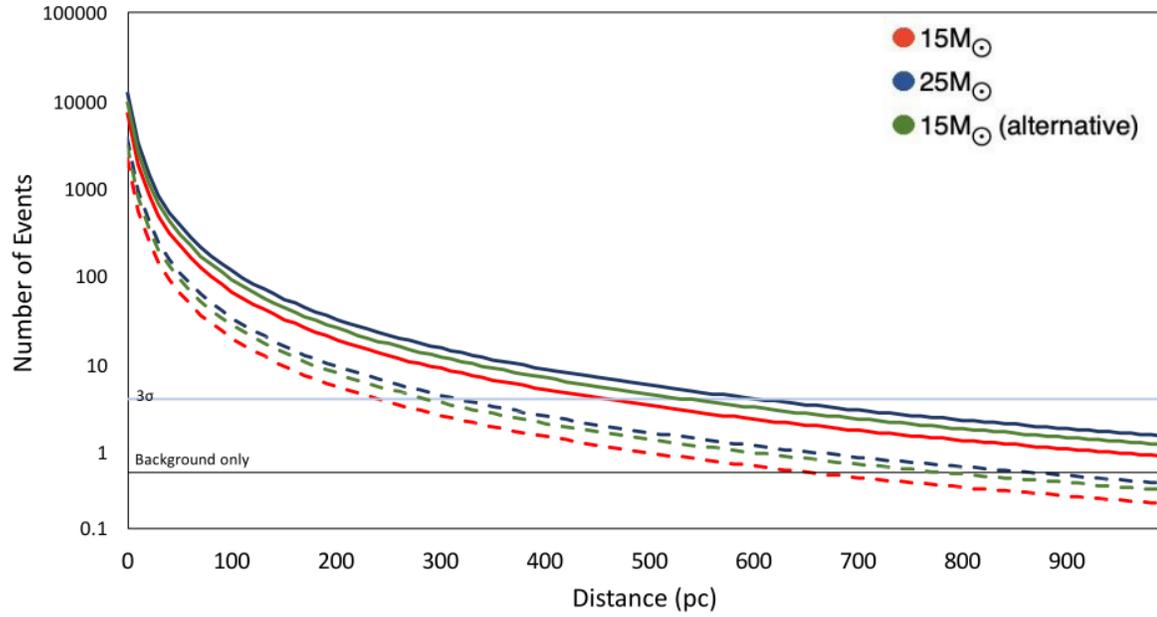
- Event migration due to new reconstruction
- Previous analysis used data up to Feb 2014 (SK-IV: 1664 days)
- Added ~1300 days of data fluctuated towards smaller D/N asymmetry
- Both impacted to the shift of best fit Δm_{21}^2 value by roughly equal amount (in term of change of $\Delta\chi^2$)



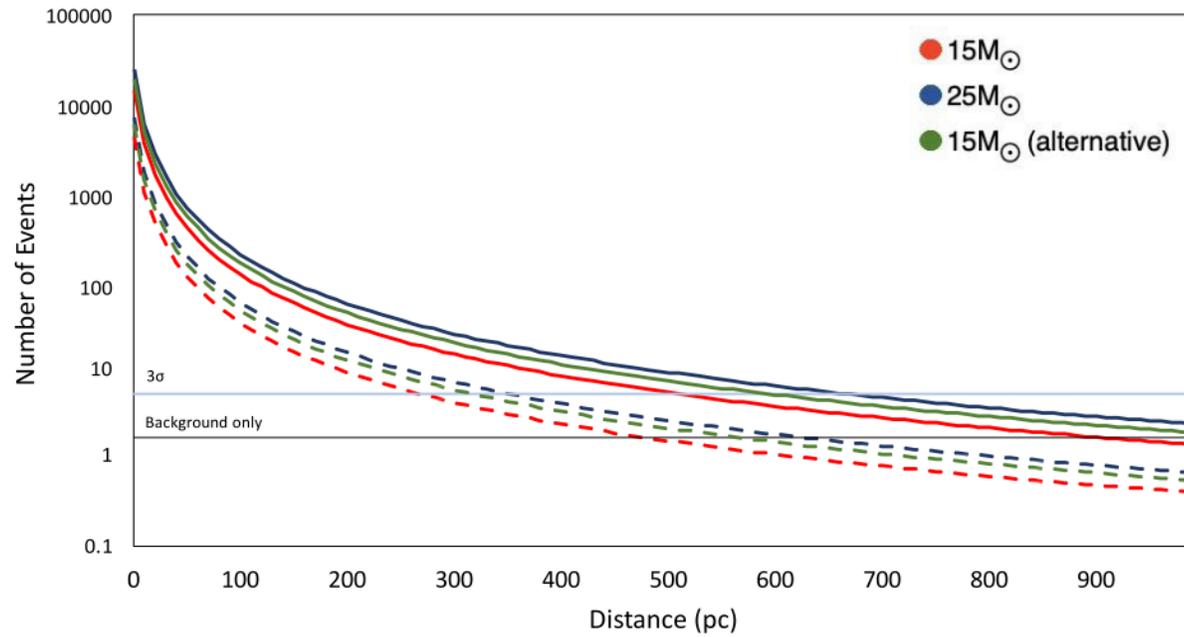


Evolution of the number of IBD events at Super-Kamiokande with 0.01% Gd as a massive star ($d = 200\text{pc}$) approaches the core-collapse. Solid lines show normal neutrino mass hierarchy and dashed lines show inverted neutrino mass hierarchy. The considered fluxes are evaluated for stars with $15 M_{\odot}$ and $25 M_{\odot}$ (Odrzywolek, et al 2010 Acta Phys. Pol. B 41, 1611). An alternative model (Patton, et al 2017 ApJ 851 6) is shown for $15 M_{\odot}$ stars.

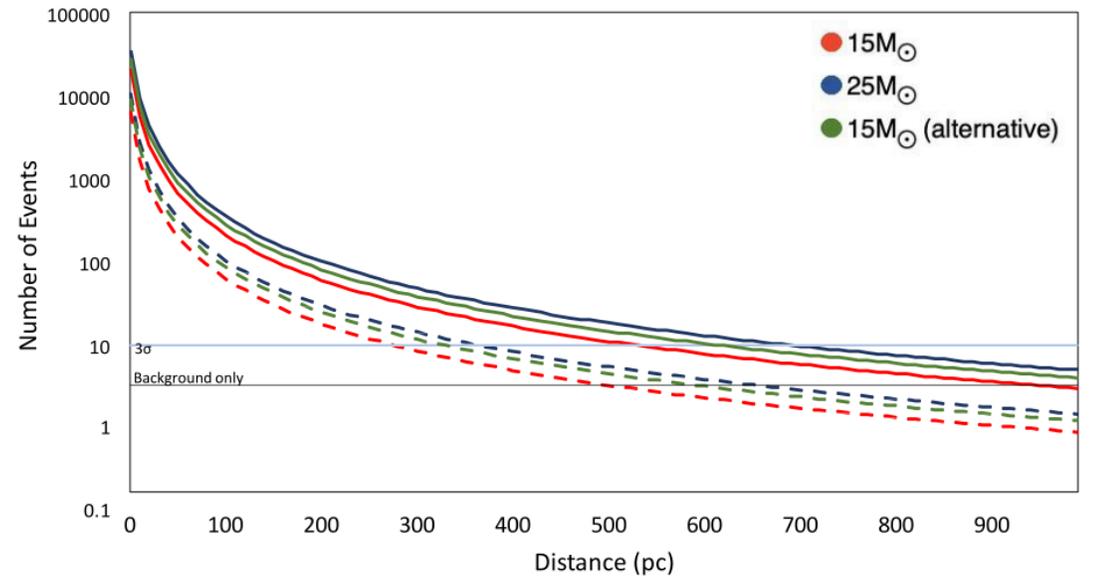
0.01% Gd



0.03% Gd



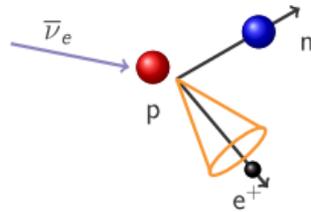
0.10% Gd



DSNB: Signal and Backgrounds

Rare event search: a few interactions / year / SK

- Primary signal: Inverse Beta Decay ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)

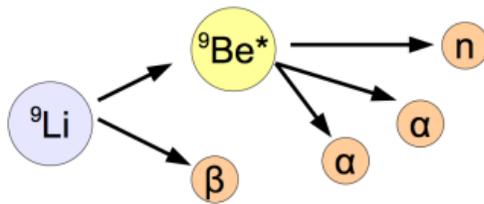


Detecting both position and neutron is the key to reduce backgrounds

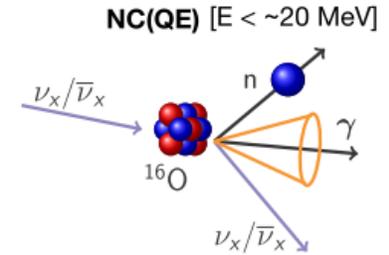
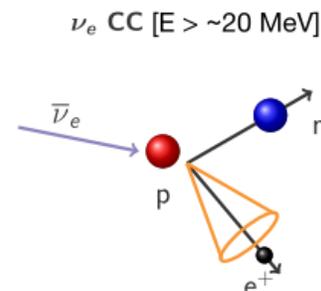
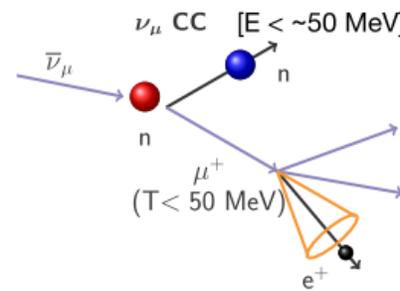
- Backgrounds that mimic $e^+ + n$ pair:

- ${}^9\text{Li}$ (from cosmic μ spallation)**

[$E < \sim 15$ MeV]

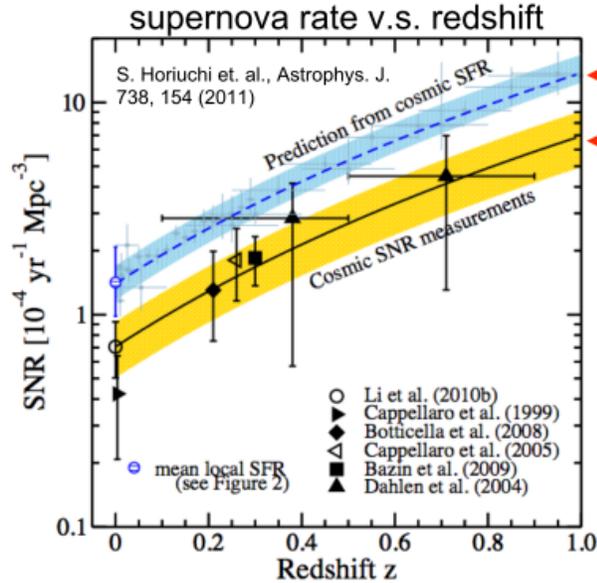


- Atmospheric neutrinos** [Poster #175: S. Sakai]



- Accidental coincidence (mostly spallation products + fake-neutrons)** [$E < \sim 15$ MeV]
- Reactor neutrinos** [$E < \sim 10$ MeV] [Poster #221: A. Goldsack]

Star Formation History



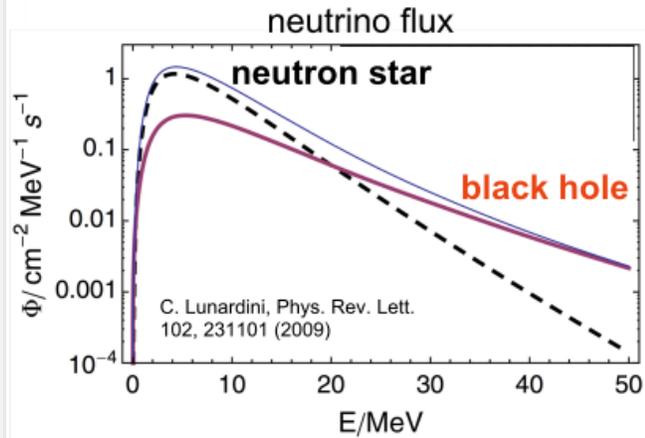
← **core-collapse rate** predicted from star formation rate

← **observed supernova rate** visible supernovae

factor ~ 2 smaller than the expectation from star formation rate

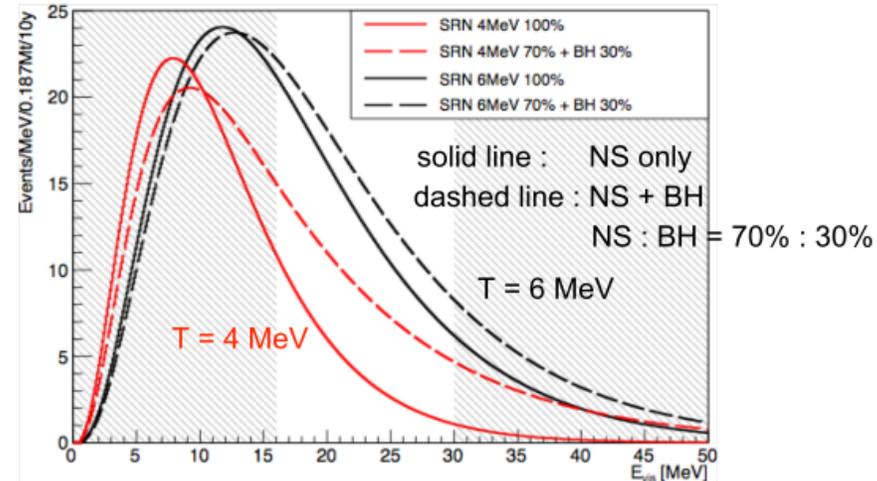
→ **invisible dim supernova or black hole formation?**

supernova explosions in massive stars (~ 30 solar mass) result in **black hole formation, high E neutrino production**



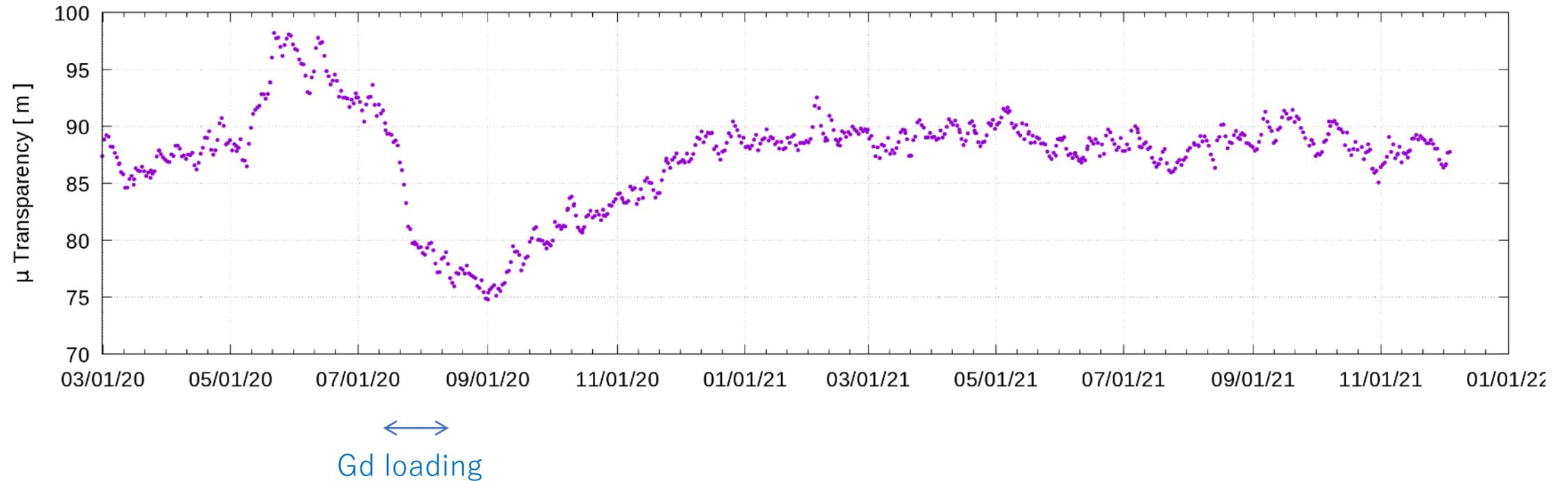
harder in black hole formation

expected spectrum in Hyper-K (10 year)



History of black hole formation can be investigated

Water transparency

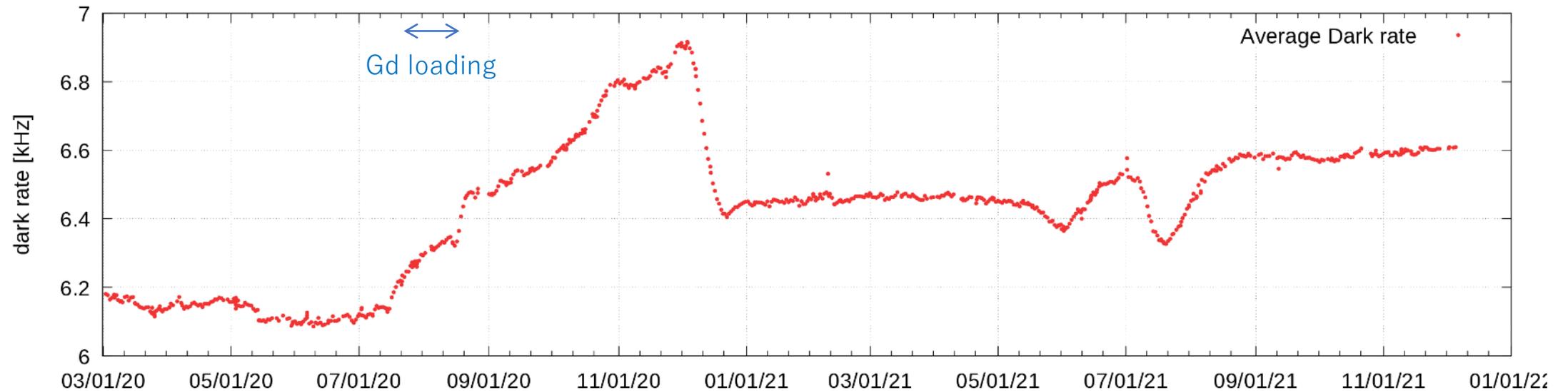
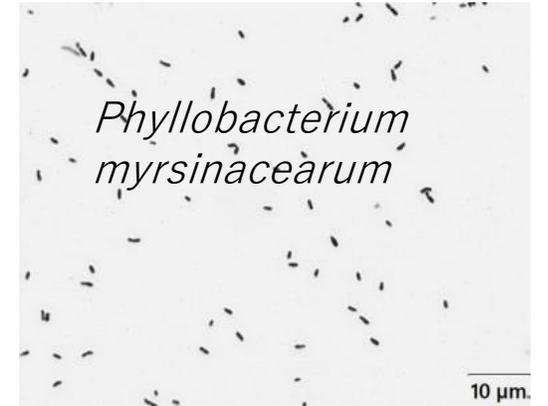


Water transparency is good after Gd loading.

Dark noise

Dark noise rate became higher after loading Gd. We don't know the reason yet.

There is bacteria (*Phyllobacterium myrsinacearum*) in water which became dominant species after loading. Maybe it is emitting light.



UV lamp sterilizer

This month, we will install UV lamps to kill bacteria. We already have them in the recirculation line, but we would like to add it at the last stage of recirculation system.

