


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

伊藤博士（東大宇宙線研）
2021年2月8日



目次

- SK-Gdスタートアップ
 - SK-Gd計画と目指す物理
 - Gd充填と中性子捕獲事象の観測
 - SK-Gd運転状況
- 太陽ニュートリノの観測
 - 太陽ニュートリノ観測の現状
 - 他ニュートリノ関連の結果
- まとめと今後の展望



Gd is now in
SK!

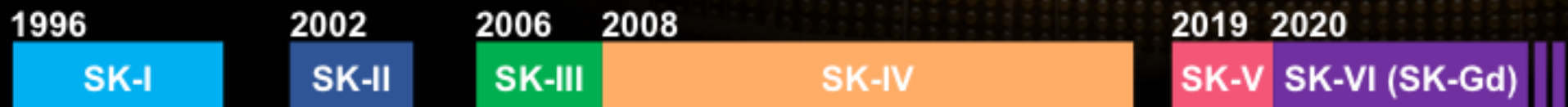


SK-Gdスタートアップ

スーパーカミオカンデ Super Kamiokande

- 50kton water Cherenkov detector
- 1km (2700 mwe) underground in Kamioka
- Various physics target

proton decay, atmospheric neutrino,
solar neutrino, accelerator neutrino,
super nova neutrino, super nova relic
neutrino, indirect dark matter search,
mono pole search, etc...



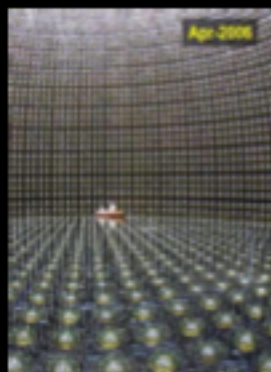
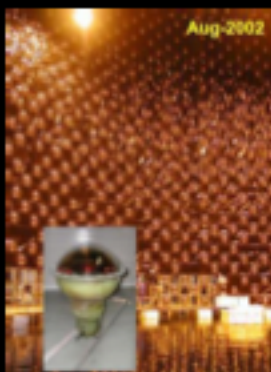
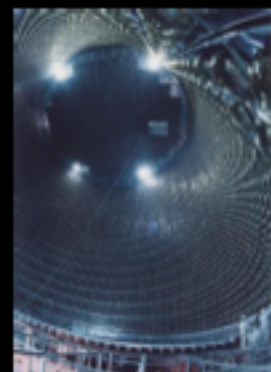
accident

full reconstruction

new electronics & DAQ

tank refurbishment

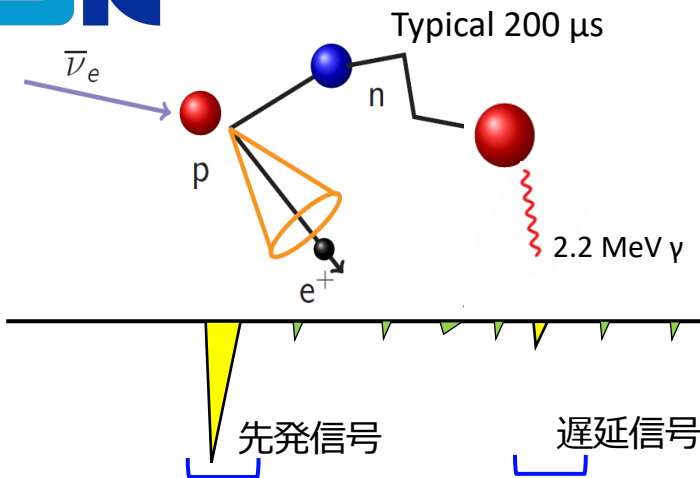
Gd loading



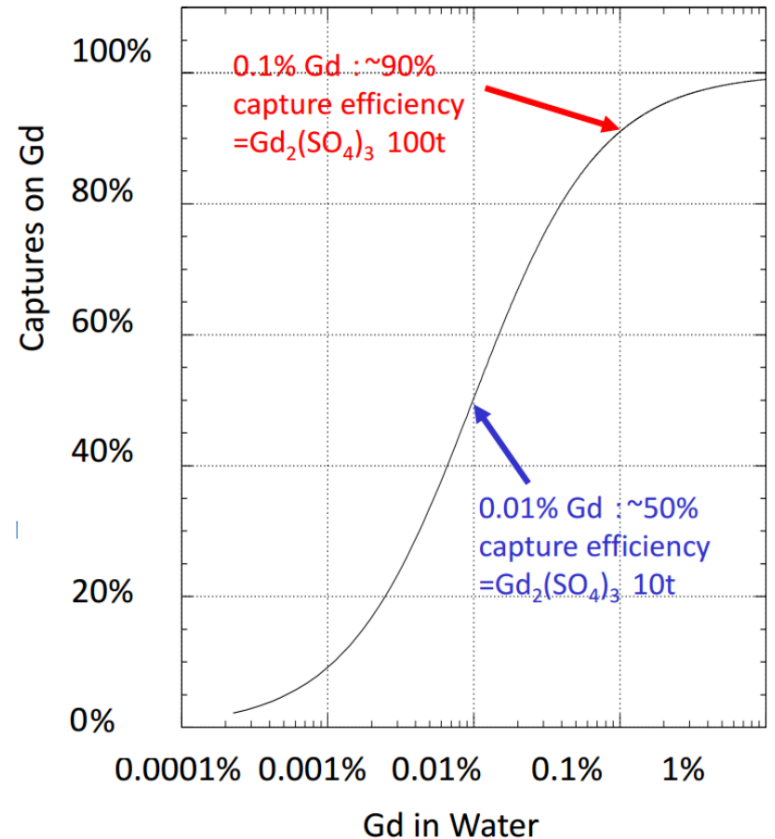
SK-Gd計画と目指す物理

PRL 93 (2004) 17110

- SKの水にガドリニウム(Gd)を溶解することにより、中性子の検出効率が飛躍的に改善される。(従来の中性子の検出効率~25%)
- Gdの利点
 - 中性子の反応断面積が高く、0.1%の濃度で~90%の捕獲確率をもつ。
 - 捕獲後、合計8MeVの γ 線を放出する。



コインシデンスすることで反電子ニュートリノ事象を検出



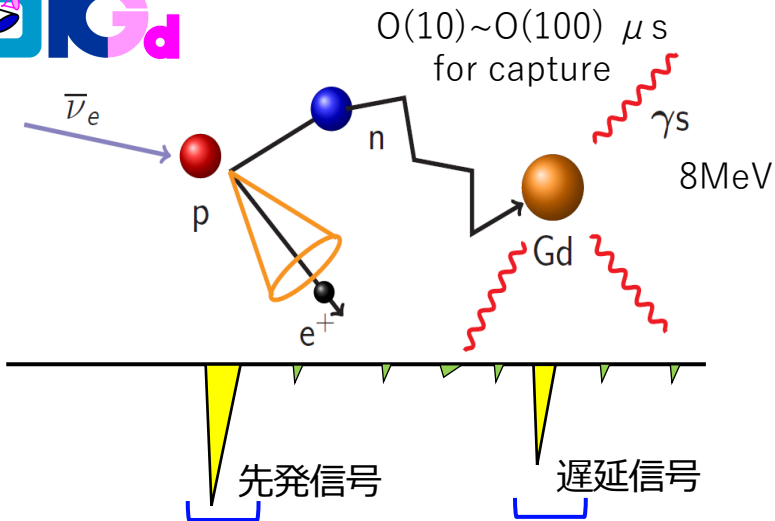
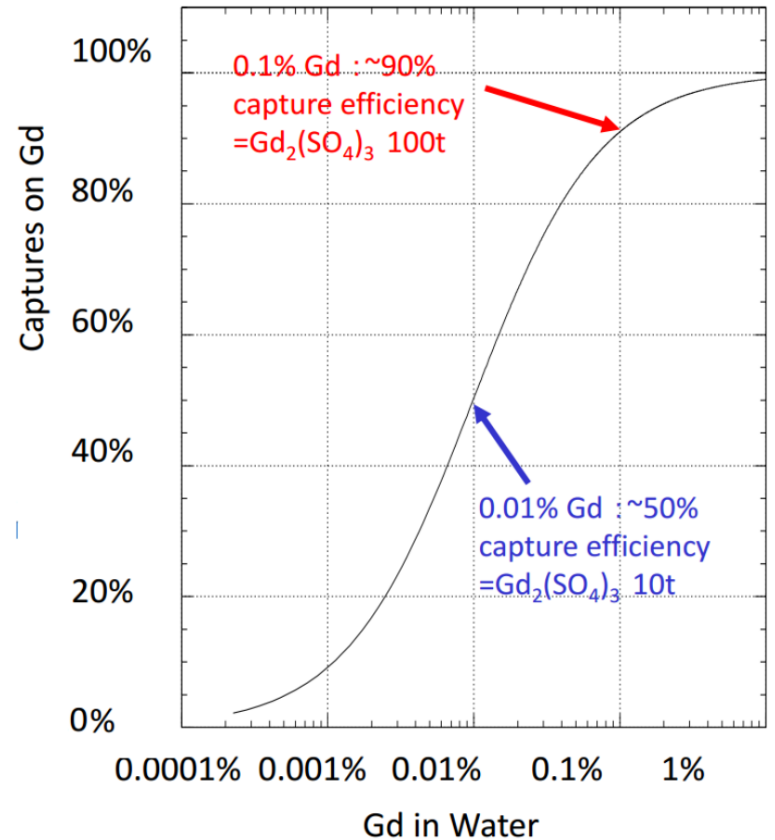
目指す物理

- 超新星背景ニュートリノの初観測
 - 近傍の超新星爆発に対する方向感度の向上
 - 陽子崩壊に対する背景事象の削減
 - ニュートリノ・反ニュートリノ弁別による大気ニュートリノ振動測定精度の向上
- など。。。

SK-Gd計画と目指す物理

PRL 93 (2004) 17110

- SKの水にガドリニウム(Gd)を溶解することにより、中性子の検出効率が飛躍的に改善される。(従来の中性子の検出効率~25%)
- Gdの利点
 - 中性子の反応断面積が高く、0.1%の濃度で~90%の捕獲確率をもつ。
 - 捕獲後、合計8MeVの γ 線を放出する。



目指す物理

- 超新星背景ニュートリノの初観測
- 近傍の超新星爆発に対する方向感度の向上
- 陽子崩壊に対する背景事象の削減
- ニュートリノ・反ニュートリノ弁別による大気ニュートリノ振動測定精度の向上

コインシデンスすることで反電子ニュートリノ事象を検出

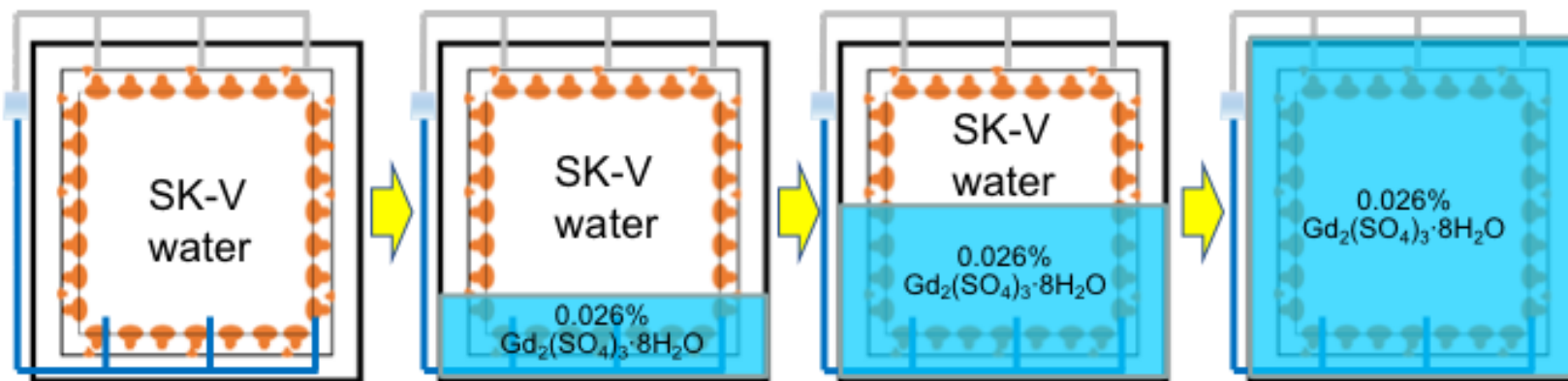
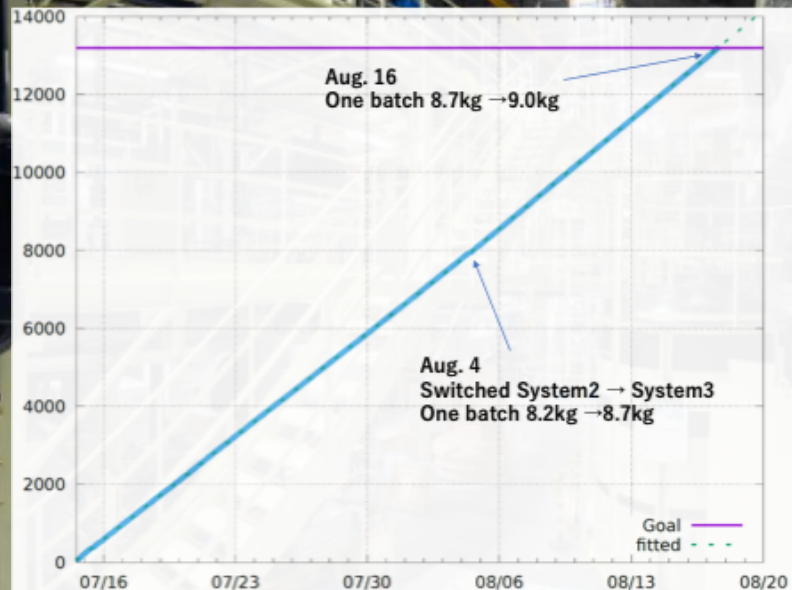
など。。。

Gd充填

- 13トンの硫酸ガドリニウム(Gd換算で5tに相当)をSKに充填

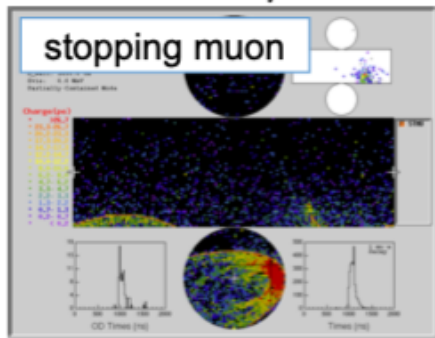
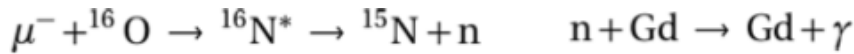
Gd濃度0.01%に相当

(7/14 ~ 8/16)

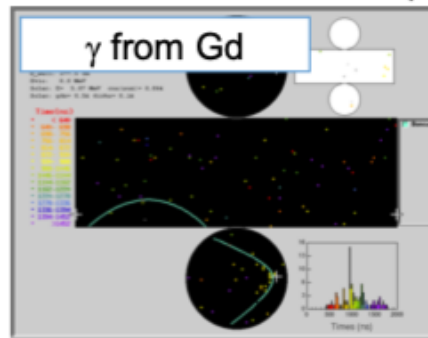


Gd中性子捕獲事象の観測

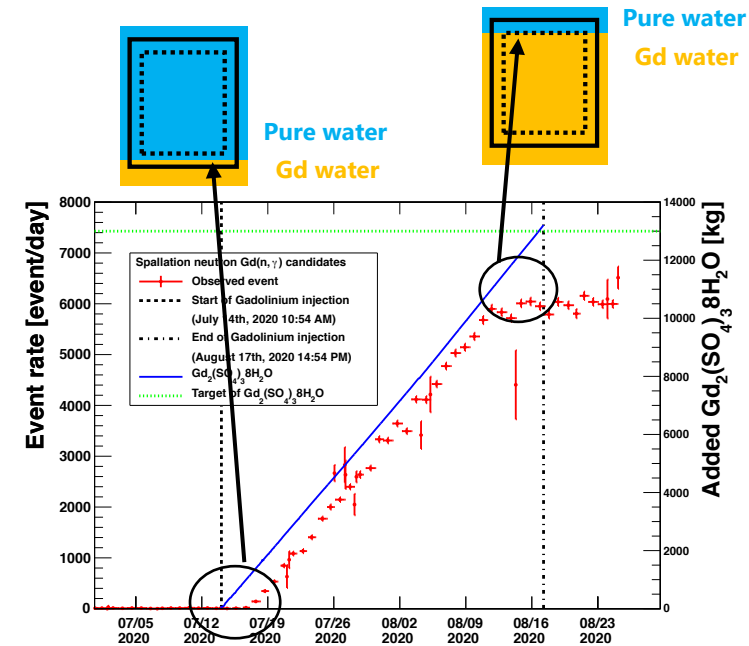
- ミューオン核破砕 ^{16}N 由来の中性子



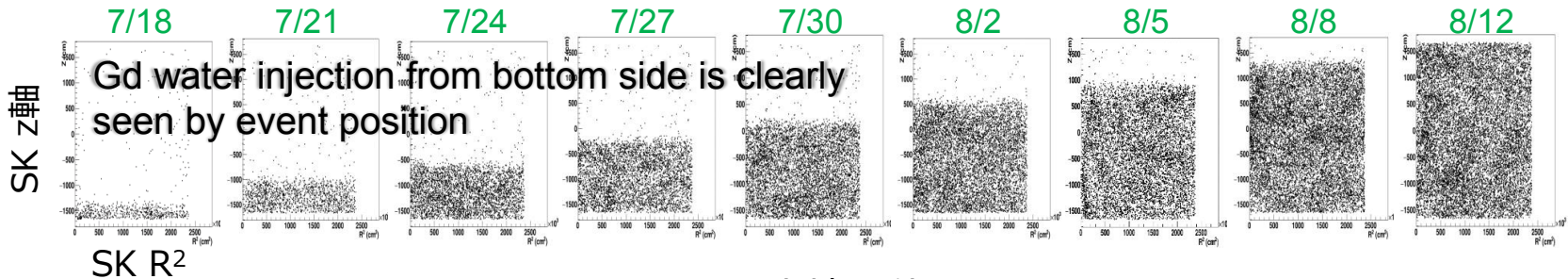
先発信号



遅延信号



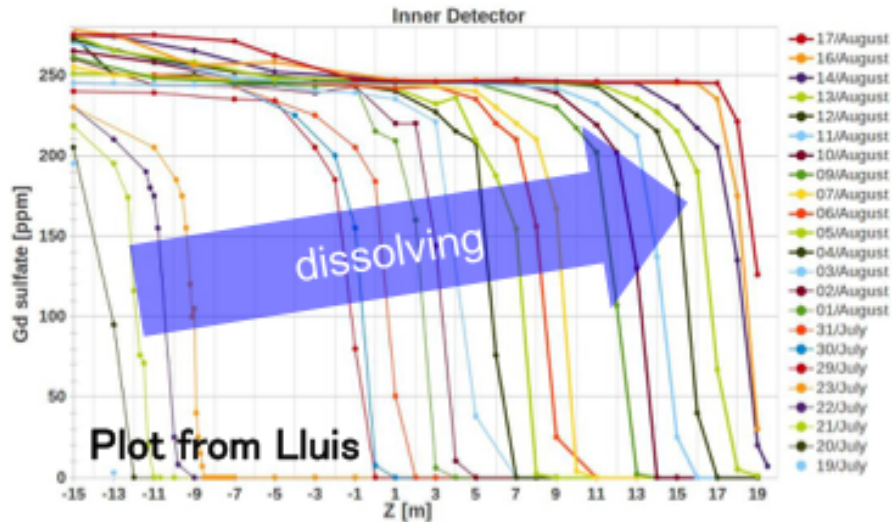
- ミューオン核破砕によって生成された中性子捕獲事象



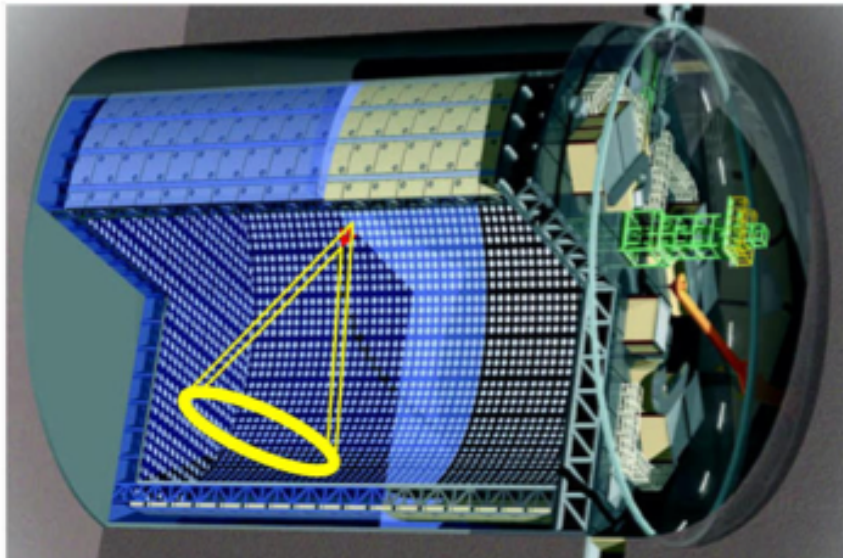
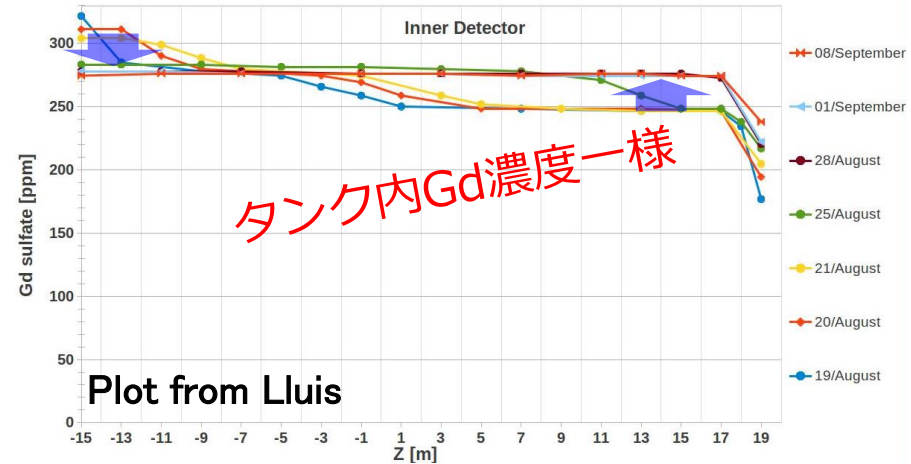
下からの充填に伴って、
Gd捕獲事象の位置上昇が明らかに確認できる。

SK-Gdの運転状況

7/19～8/17 (Gd充填中)




8/19～9/9 (Gd充填後)



SKタンク内のGd濃度を深さごとに分析

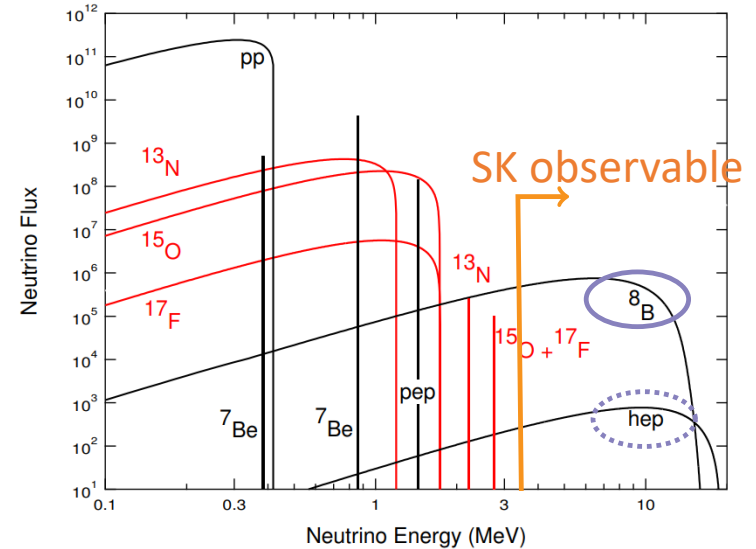
- 採取しSKの水の、導電率と原子吸光器(AAS)による分析でGd濃度を評価。
- Gd充填中、Gd水と純水の境界面が上昇していることを異なる手法でも確認できた。
- Gd充填後、タンク内のGd濃度は0.01%一様で安定運転できている。

The image shows the interior of the Super-Kamiokande detector, a large cylindrical tank filled with water. The walls are lined with a dense array of photomultiplier tubes (PMTs) that detect light produced by neutrino interactions. A central support structure is visible, and a small window is located at the top. The overall atmosphere is dimly lit, with the PMTs providing a warm, golden glow.

スーパーカミオカンデによる
太陽ニュートリノ観測

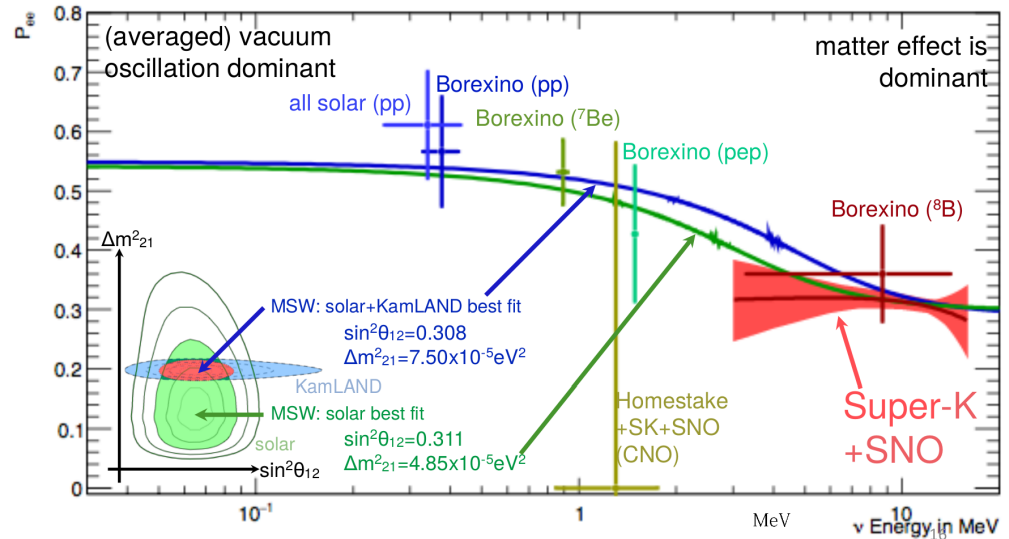
太陽ニュートリノ観測

- スーパーカミオカンデでは、 ^8B , hep 太陽ニュートリノに感度をもつ。
- 弾性散乱事象を観測しているため、飛来方向から太陽ニュートリノを同定できる。

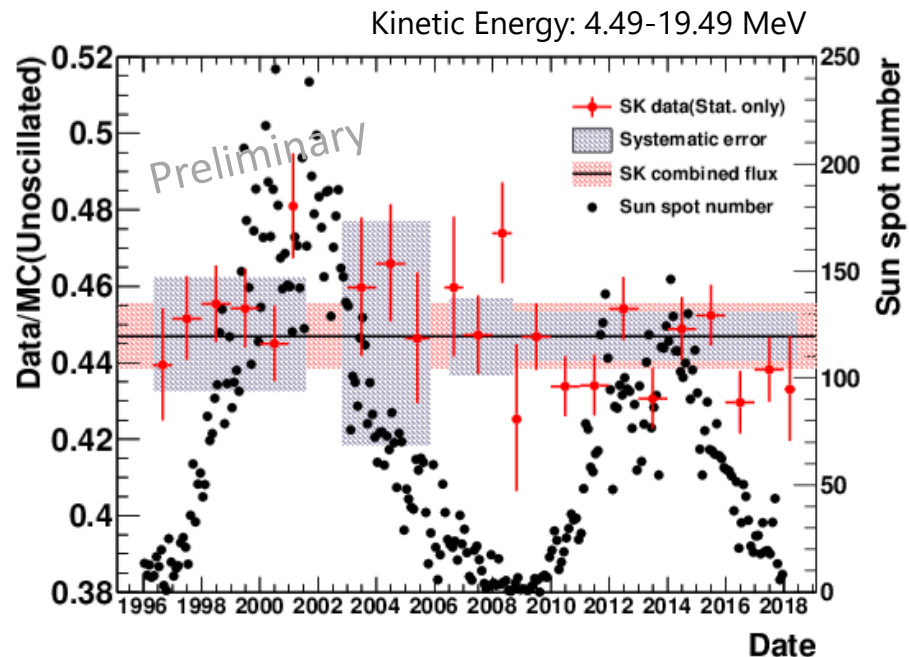
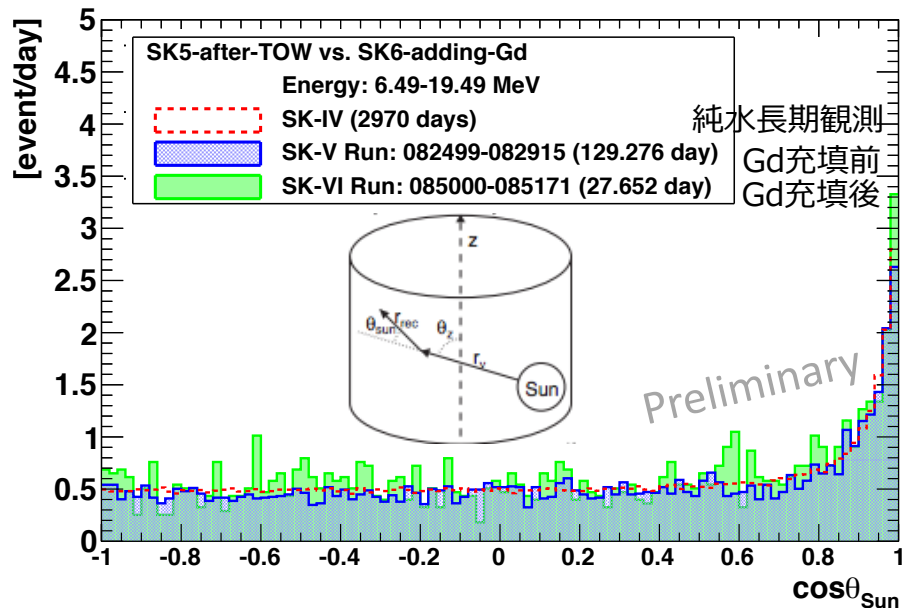


太陽ニュートリノ観測の目的：

- ニュートリノ振動パラメータ θ_{12} 、 Δm_{12}^2 の測定
- MSW効果の精密検証
- Matter dominantからVacuum dominant領域への遷移の観測 (アップターン)
- 地球によるMSW効果の測定 (昼夜の ν 頻度非対称性)



太陽ニュートリノ観測の現状

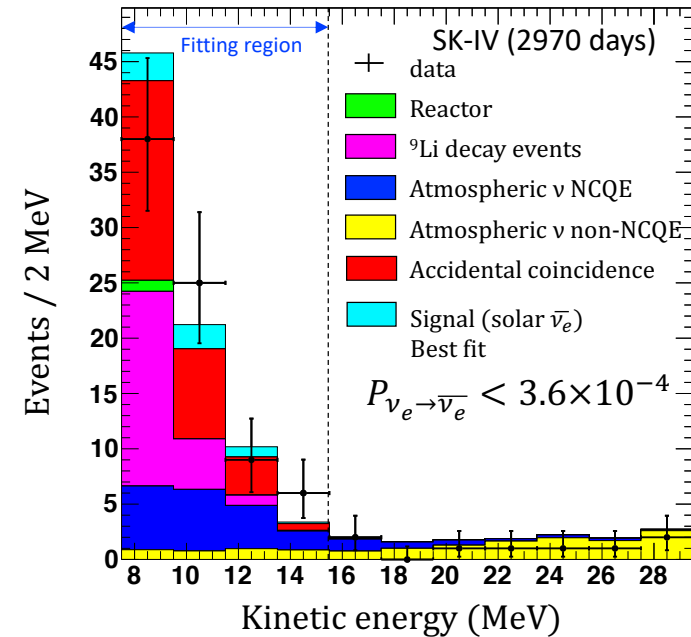


Phase	Live days [days]	DATA/MC	Flux w/ sys. error [$10^6/\text{cm}^2/\text{sec}$]	Extracted Signal (stat. error only)
SK-I	1496	$0.453 \pm 0.005^{+227}_{-225}$	$2.38 \pm 0.02 \pm 0.08$	2244^{+227}_{-225}
SK-II	791	$0.459 \pm 0.010 \pm 0.030$	$2.41 \pm 0.05^{+0.16}_{-0.15}$	7210^{+153}_{-151}
SK-III	548	$0.458 \pm 0.008 \pm 0.010$	$2.40 \pm 0.04 \pm 0.05$	8148 ± 133
SK-IV (update)	2970.08	$0.443 \pm 0.003 \pm 0.006$	$2.33 \pm 0.01 \pm 0.03$	$63890^{+318}_{-379}(\text{stat}) \pm 907(\text{syst})$
Total	5805	$0.447 \pm 0.002 \pm 0.008$	$2.346 \pm 0.011 \pm 0.043$	More than 101k events

他のニュートリノ関連の結果

○ 太陽反電子ニュートリノ探索 [arXiv.2012.03807](https://arxiv.org/abs/2012.03807)

- 太陽内部で $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ 遷移するローレンツ不変を破るような新物理を探索する。
- SK-IVデータからsolar $\bar{\nu}_e$ を探索した。予想される背景事象と一致し、 $P_{\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e}$ 90%CLの上限を決定した。
- この結果を元に、SK-Gdにおけるsolar $\bar{\nu}_e$ の感度を $P_{\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = (2.2 \sim 2.7) \times 10^{-5}$ と推定した。



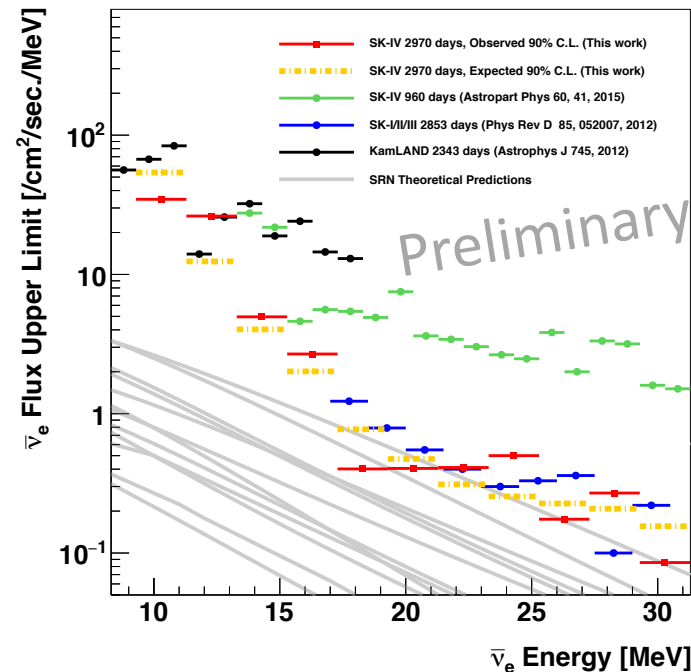
○ 超新星背景ニュートリノ(SRN)探索

- SK-IVデータからSRNを探索した。モデルに依存しない $\bar{\nu}_e$ flux上限を決定し、理論予想と比較した。
- 論文準備中

○ 太陽フレア・ニュートリノ

○ 超新星ニュートリノバースト探索

○ GRBに関連したニュートリノ探索 [arXiv.2101.03480](https://arxiv.org/abs/2101.03480)



まとめと今後の展望

- 2020年度はSKにGdを充填して、SK-Gdが開始された。
- 中性子タグによる反電子ニュートリノの検出効率を飛躍的に向上し、超新星背景ニュートリノの観測などを目指す。
- 中性子Gd捕獲事象の観測に成功し、充填している様子をモニターできている。**Gd濃度0.01%**で安定した運転を実現している。
- SK-IV(純水長期観測フェイズ)のデータ解析で、太陽ニュートリノの観測、及びsolar $\bar{\nu}_e$, SRN探索などの結果が出始めている。
- 今後SK-Gdの更なる感度改善に向けて、1～2年以内に**0.02～0.03%Gd濃度**まで増やすことを目指す。