

# ガドリニウム導入後の スーパーカミオカンデによる 太陽ニュートリノ測定

前川 雄音, 西村 康宏, 中野 佑樹<sup>A</sup>

Super-Kamiokande Collaboration

慶應義塾大学, 富山大学<sup>A</sup>

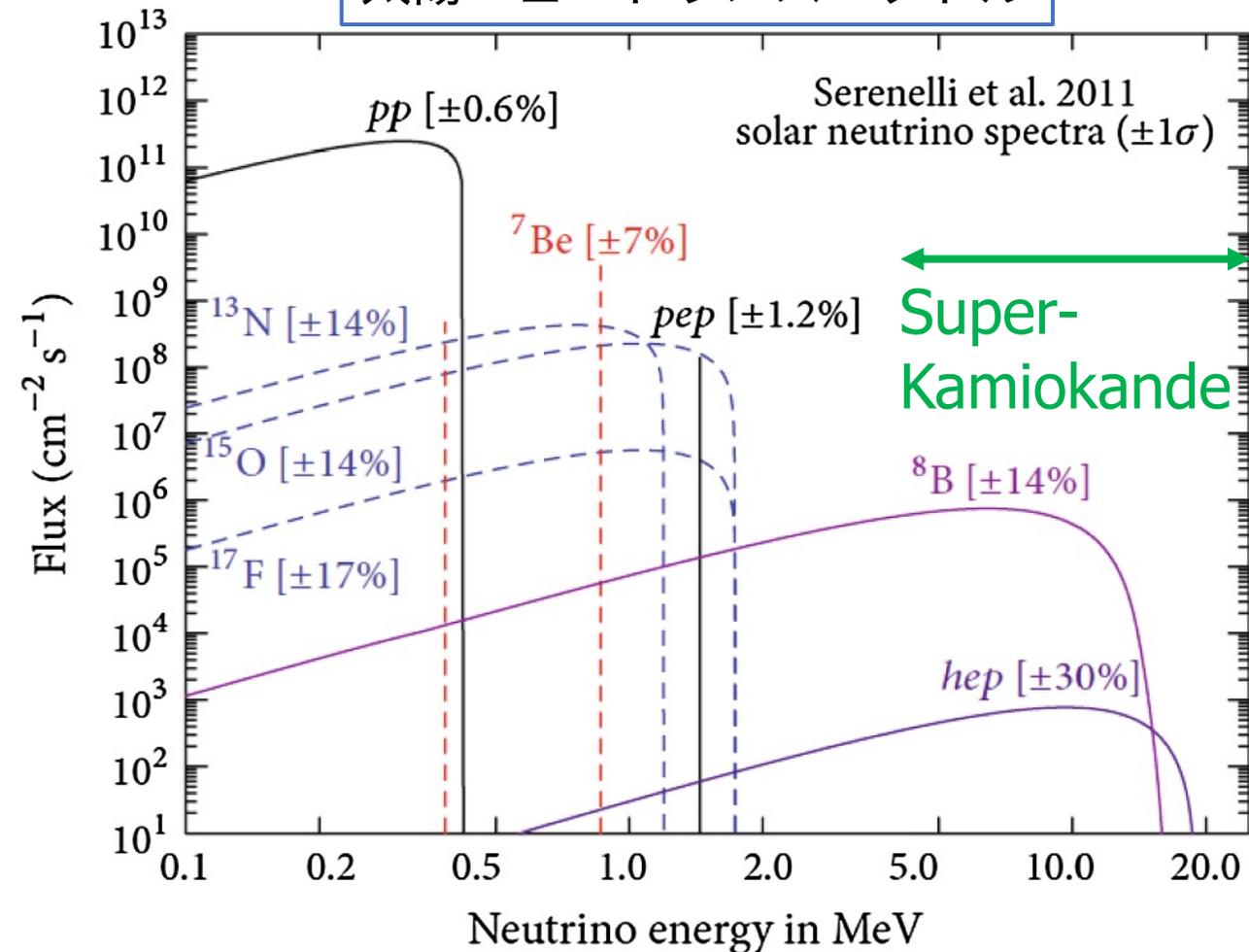
2024年9月16日

# 本発表の内容

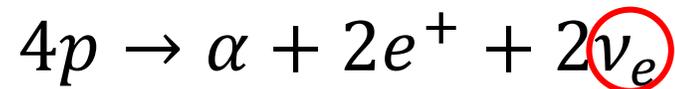
- 太陽ニュートリノ
- スーパーカミオカンデ
- 太陽ニュートリノ観測の動機
- SKにおける太陽ニュートリノ観測
- 結果
- まとめ

# 太陽ニュートリノ

太陽ニュートリノスペクトル



## 太陽内部の反応

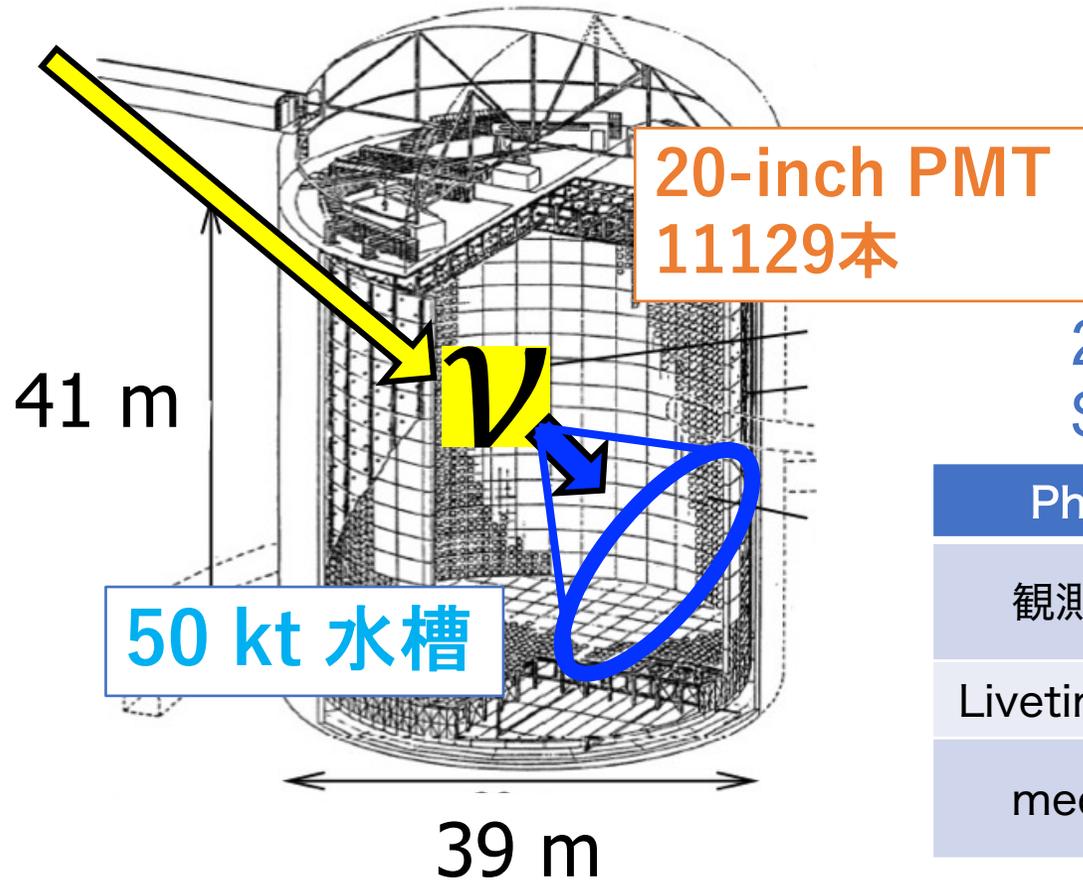


から、電子ニュートリノが放出される。  
太陽ニュートリノとして地表で観測。

スーパーカミオカンデでは $^8\text{B}$ ニュートリノ  
のエネルギー領域に感度を持ち、  
物質効果の高精度測定やhepニュートリノの  
観測を目指している。

# スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande; SK)

- 50 ktの水槽を持つ巨大水チェレンコフ検出器
- 11129本の20インチ直径光電子増倍管
- 多くの物理目標
  - 核子崩壊
  - 超新星爆発 $\nu$
  - 大気 $\nu$ ・太陽 $\nu$



2020年から極めて低BGなGdを溶解した  
SK-Gd実験が開始 Nucl. Instr. Meth. A 1027,166248 (2022)

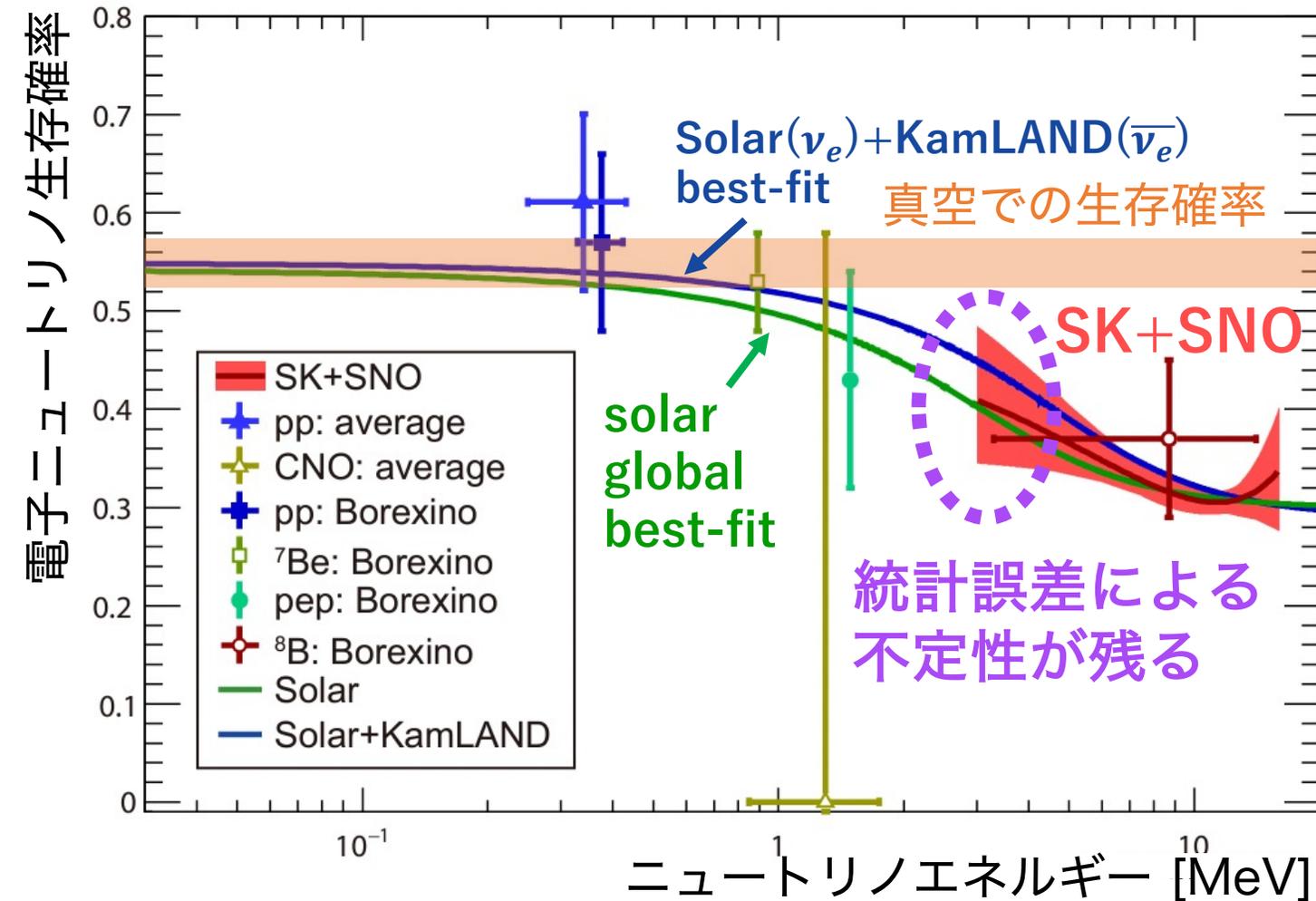
Phase	SK-I ~ SK-IV	SK-V	SK-VI	SK-VII
観測期間	1996/04 ~2018/05	2019/01 ~2020/07	2020/07 ~2022/06	2022/06 ~ (観測中)
Livetime/day	5805	379	561	404 (本解析時)
medium	超純水	改修 工事 超純水	Gd溶解水 (0.011%)	Gd溶解水 (0.033%)

本講演での報告

SKの観測条件が変化して以降、  
はじめての太陽ニュートリノ観測結果を報告する

S. Fukuda et al.[The Super-Kamiokande Collaboration],  
Nucl. Instrum.Methods Phys. Res. Sect. A501, 418 (2003)

# 太陽ニュートリノ：観測の動機



太陽ニュートリノ実験で振動パラメータが決定され電子 $\nu$ の生存確率が計算される。

5 MeV付近に太陽内部の物質効果 (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) 効果)によるup-turn。

Solar実験は $1.2\sigma$ ,  
Solar+原子炉は $2.1\sigma$  でup-turnを支持

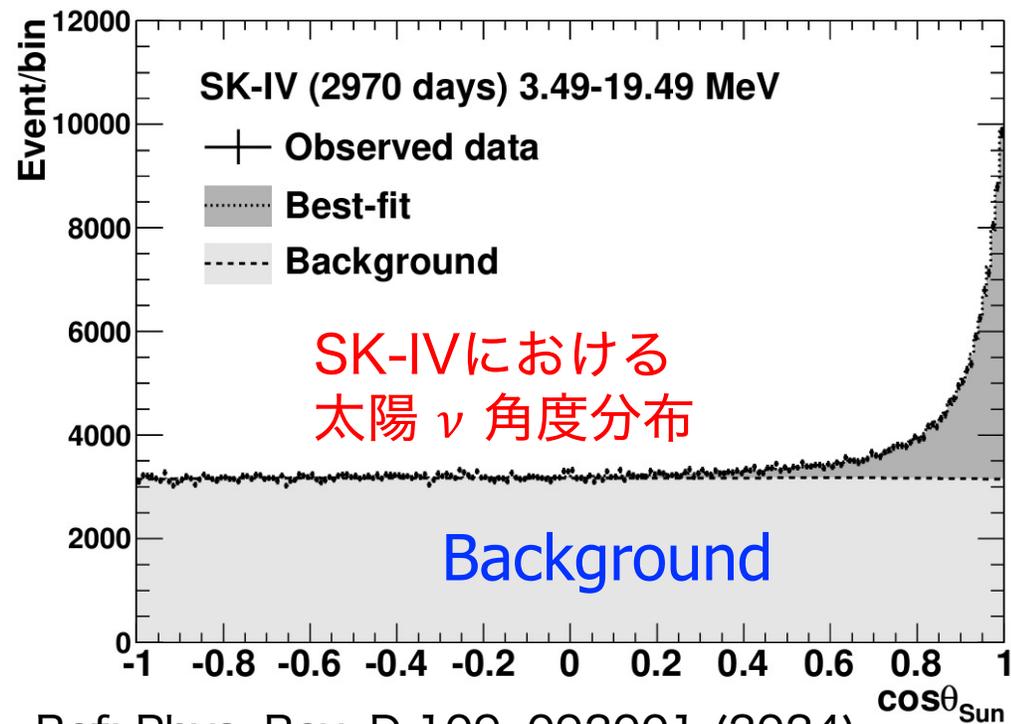
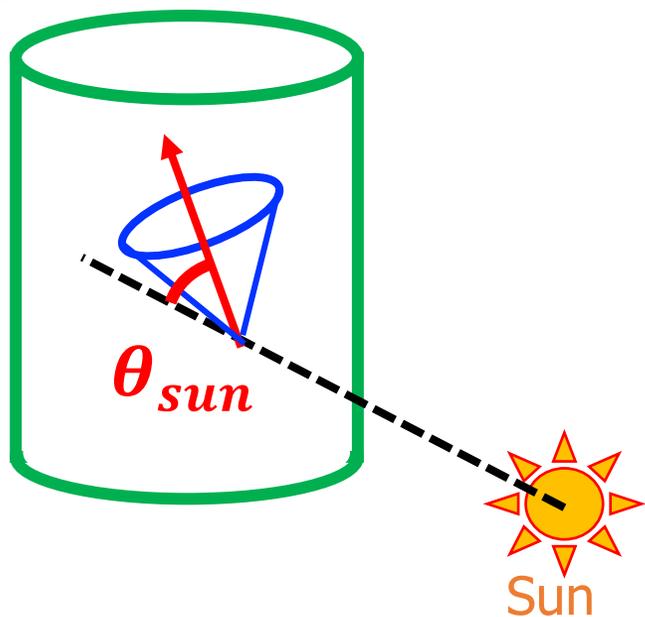
SKはこのEnergy範囲に感度を持つ。  
しかし、誤差が大きく  
高精度なEnergy Spectrumの測定が必要となる。

Ref: Phys. Rev. D 109, 092001 (2024)

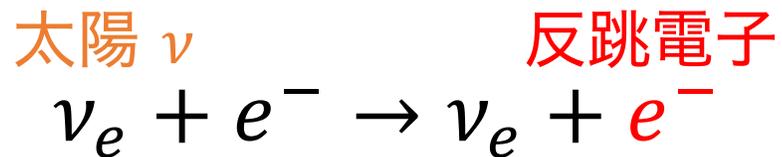
# SKにおける太陽ニュートリノ観測

$\nu_e - e^-$  反応の弾性散乱で生まれた反跳電子を測定

SK

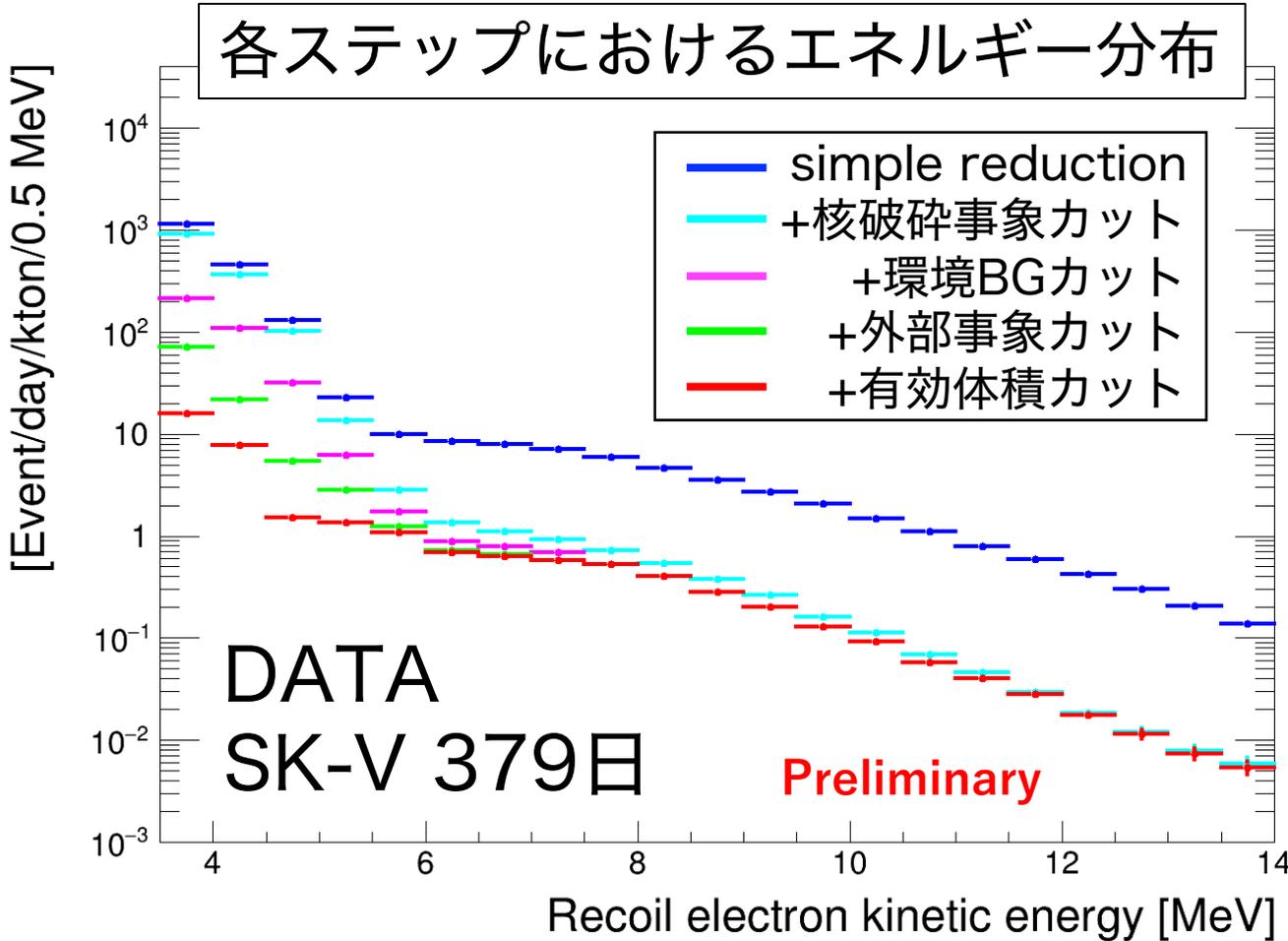


Ref: Phys. Rev. D 109, 092001 (2024)



SK-V, VI, VIIで最適化されたイベント選択で、太陽ニュートリノ信号の探索を行う。

# 太陽νイベント選択後のエネルギー分布



バックグラウンド:  
環境放射線, 核破砕事象 など

## イベント選択

$$significance = \frac{S}{\sqrt{S+B}}$$

( $S$ : 信号数,  $B$ : バックグラウンド数)

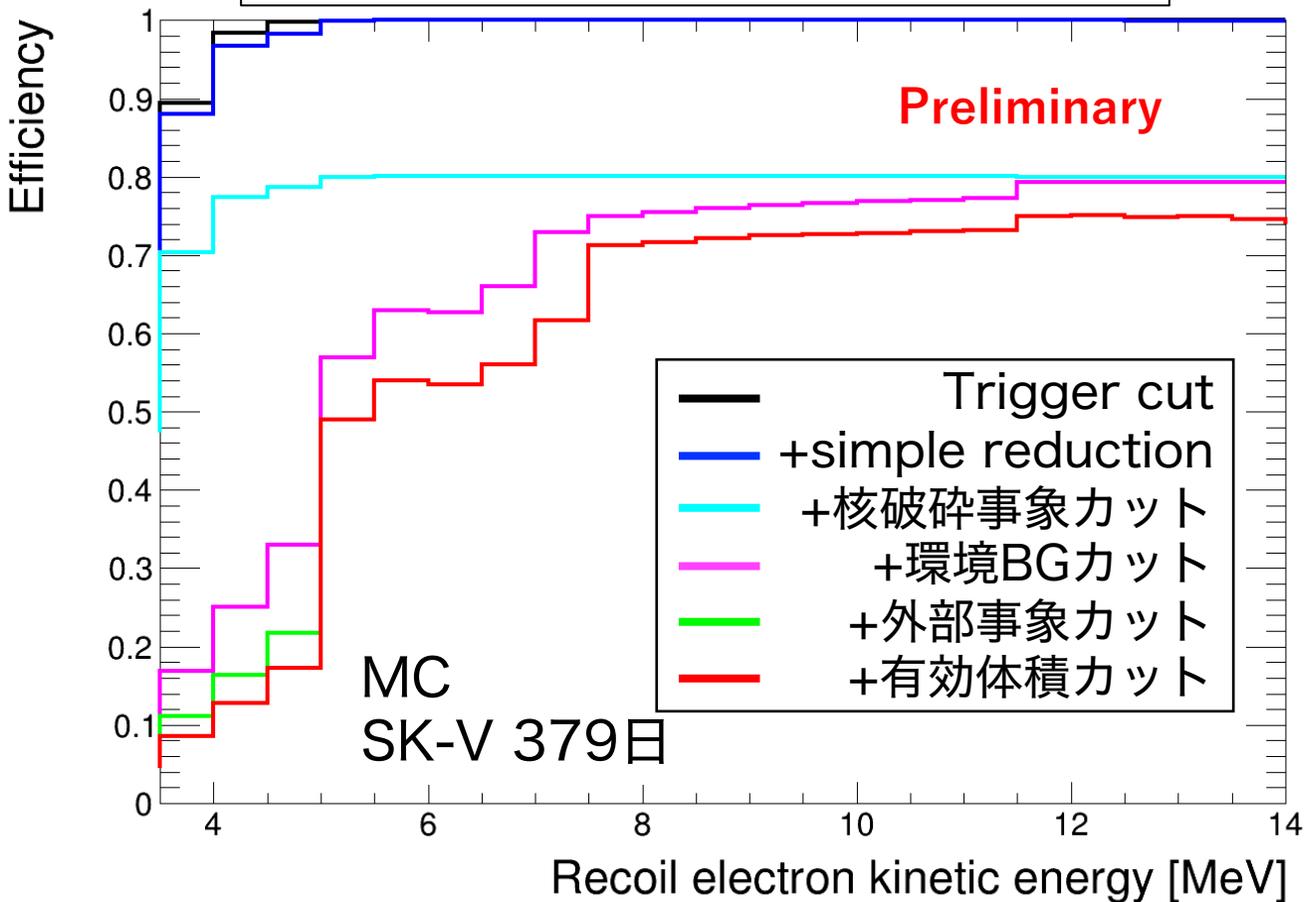
を最大化するようにイベント選択基準を決定。

SK-V, VI, VII それぞれで選択基準を最適化し、太陽ν事象を選択した

SK-VI (Gd 0.01%)の☒

# 太陽νイベントの選択効率

各ステップにおけるefficiency



太陽ニュートリノシミュレーションで  
選択効率を見積もった。

## イベント選択

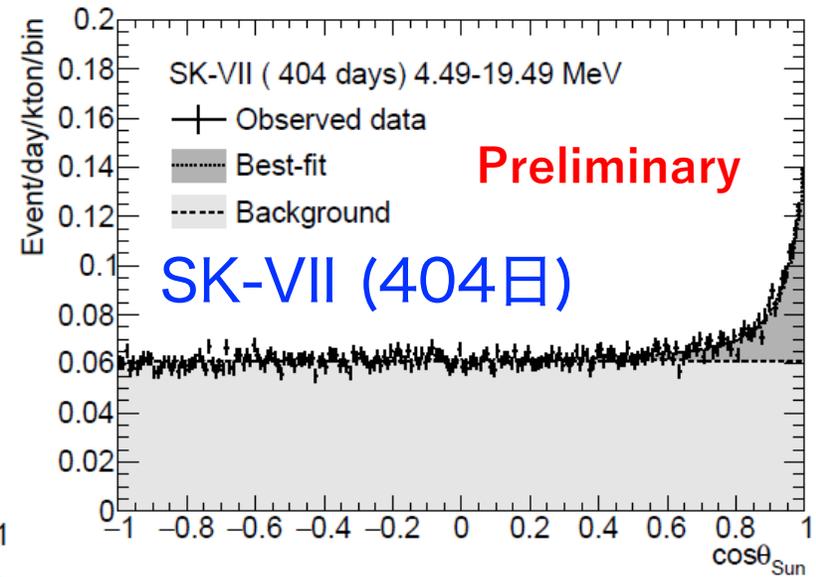
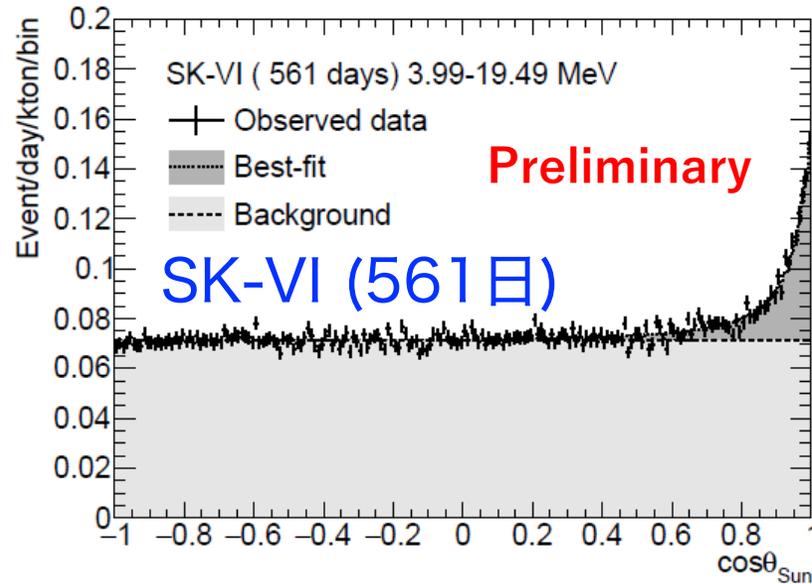
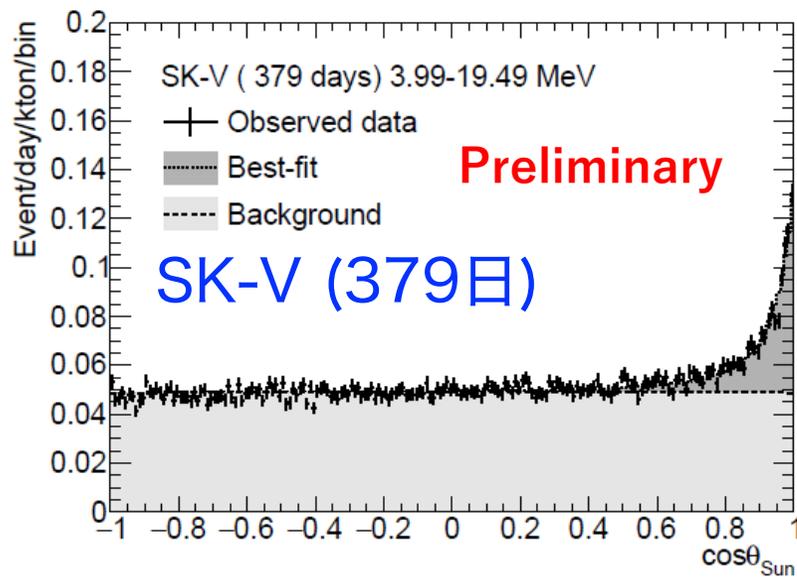
$$significance = \frac{S}{\sqrt{S+B}}$$

( $S$ : 信号数,  $B$ : バックグラウンド数)

を最大化するようにイベント選択基準を  
決定。

SK-V, VI, VII それぞれで選択基準を  
最適化し、太陽ν事象を選択した

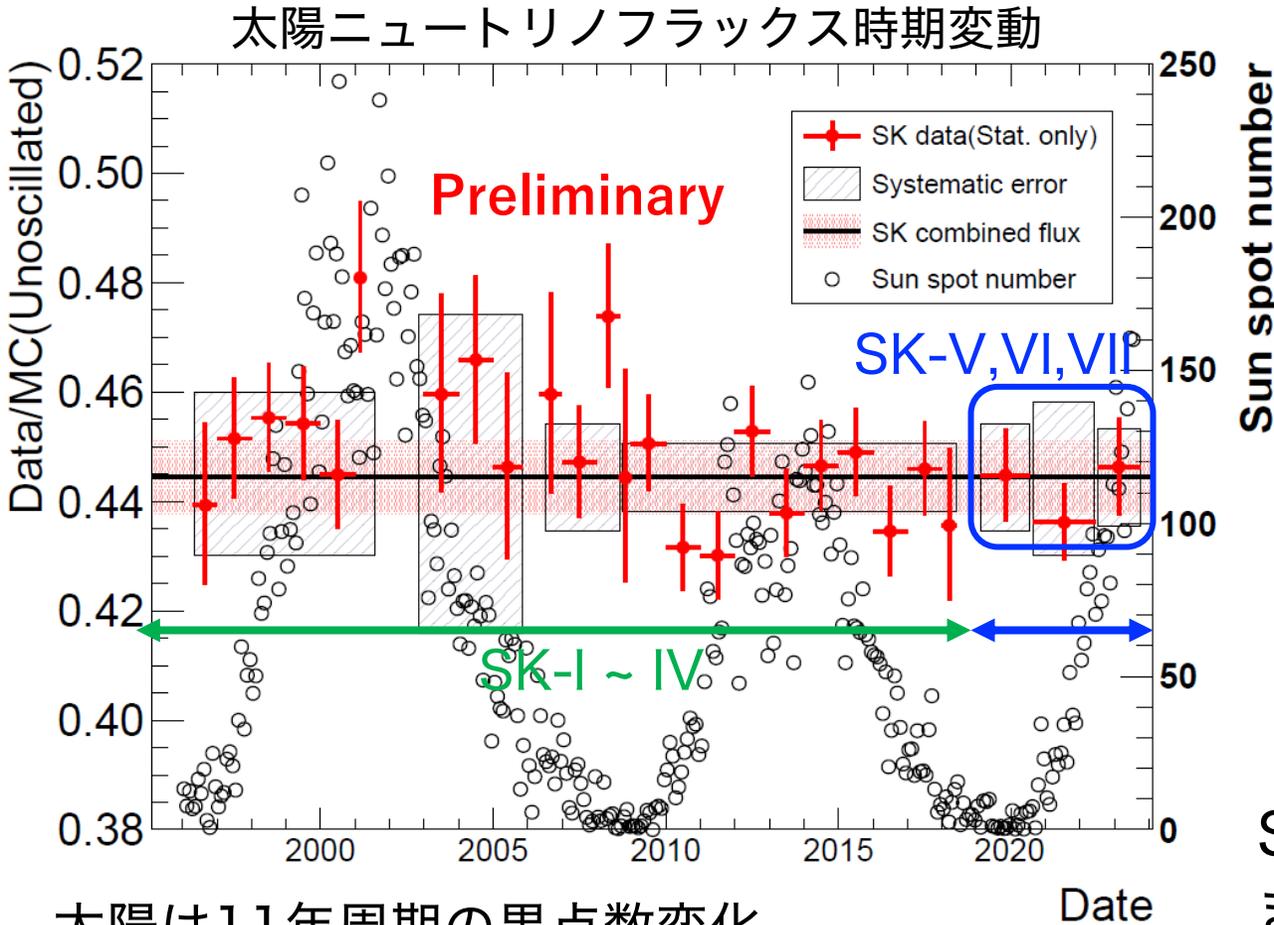
# 結果 (太陽ニュートリノ角度分布)



Phase	SK-V	SK-VI	SK-VII
Energy範囲/MeV	3.99-19.49	3.99-19.49	4.49-19.49
太陽ニュートリノ信号数	$6296^{+121}_{-119}$	$9173^{+150}_{-148}$	$6403^{+128}_{-126}$

改修工事後のSK-VおよびGdを溶解したSK-VI, SK-VIIにてバックグラウンド事象の変化はあるが、イベント選択の最適化により太陽ニュートリノ信号によるピークが確認できた。

# 結果 (太陽ニュートリノフラックス)



各phaseの太陽ニュートリノフラックス

Phase	Flux [ $\times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]
SK I-IV combined	$2.336 \pm 0.011 \pm 0.043$
SK-V	$2.34 \pm 0.04 \pm 0.05$
SK-VI	$2.29 \pm 0.05 \pm 0.07$
SK-VII	$2.34 \pm 0.05 \pm 0.05$

(SK- I-IV) Phys. Rev. D 109, 092001 (2024).

Flux計算はSNO実験の結果を使用  
Phys. Rev. C 88, 025501 (2013).

太陽は11年周期の黒点数変化  
標準太陽模型では一定の太陽ニュートリノ  
放出が予測されている

SK-V, VI, VIIにおいて太陽 $\nu$ フラックスはこれ  
までの観測結果と矛盾のない結果が得られた。  
SK-Gdにおいても継続して太陽ニュートリノ  
観測ができることが確認された。

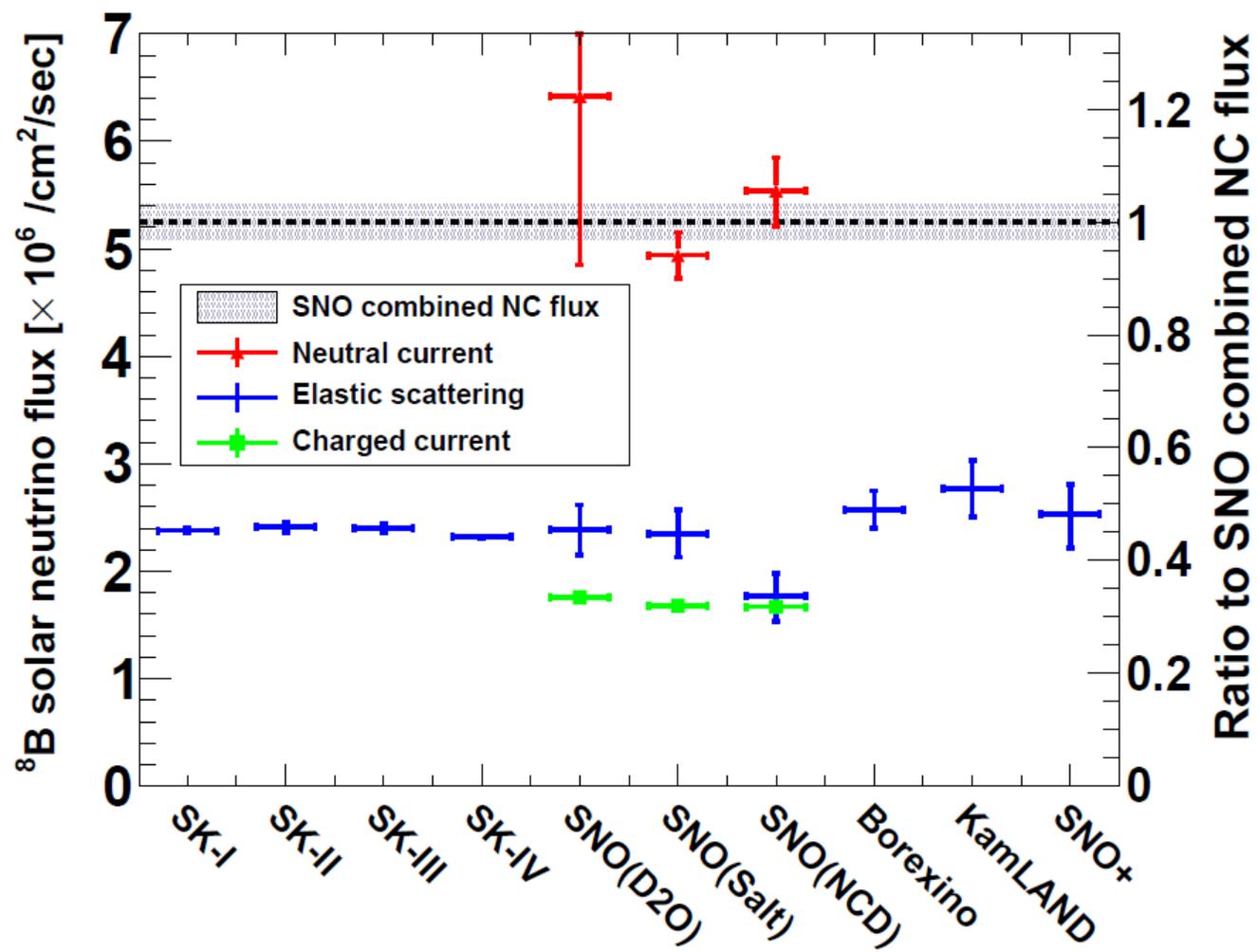
# まとめ

- 極めてバックグラウンドの小さいガドリニウムを添加したことにより、SK-Gdでも低エネルギー太陽ニュートリノ信号が確認できた。
- SKの過去の観測結果と矛盾しない太陽ニュートリノフラックス結果がSK-Gd以降のデータでも得られた。

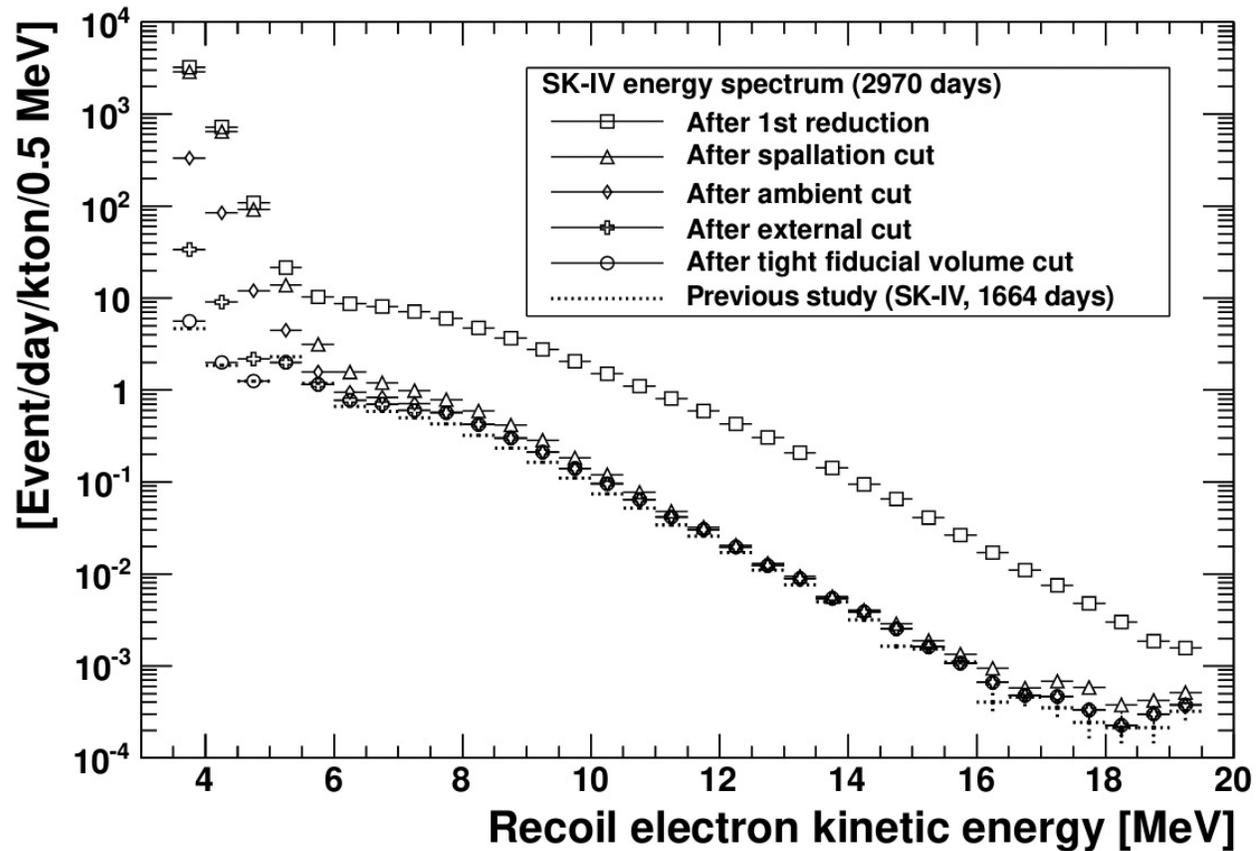
Phase	DATA/MC $\pm$ (stat.) $\pm$ (syst.)	Flux [ $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
SK I-IV combined	$0.445 \pm 0.002 \pm 0.008$	$2.336 \pm 0.011 \pm 0.043$
SK-V	$0.445 \pm 0.010 \pm 0.010$	$2.34 \pm 0.04 \pm 0.05$
SK-VI	$0.436 \pm 0.009 \pm 0.014$	$2.29 \pm 0.05 \pm 0.07$
SK-VII	$0.446 \pm 0.010 \pm 0.009$	$2.34 \pm 0.05 \pm 0.05$

- 今後、中性子タグを利用した核破砕BGの低減による信号数の増加を見込む (純水期実績: 12.6%の太陽 $\nu$ 効率向上 Phys. Rev. D 110, 032003 (2024) )。
- SK-Gd観測期間を追加した高精度なスペクトル解析を進め、MSW効果の検証を継続して行う。

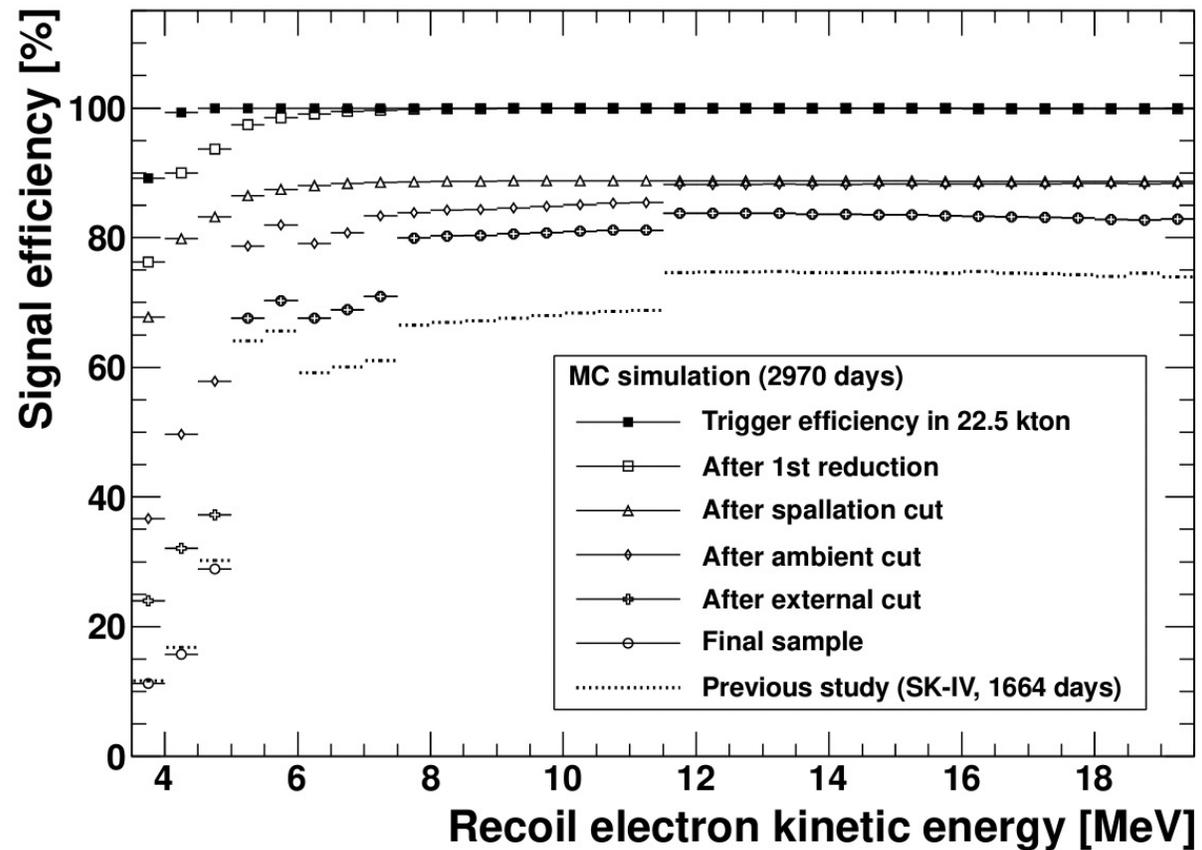
# Back Up

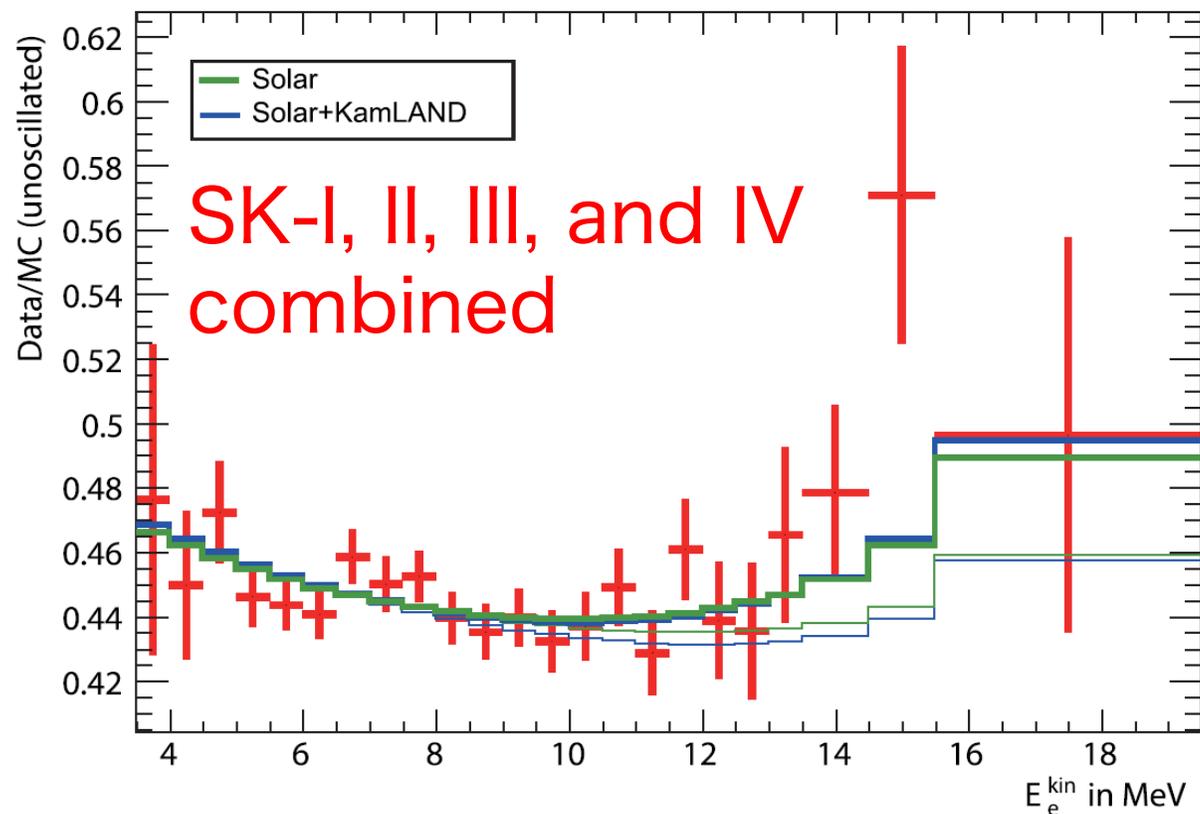
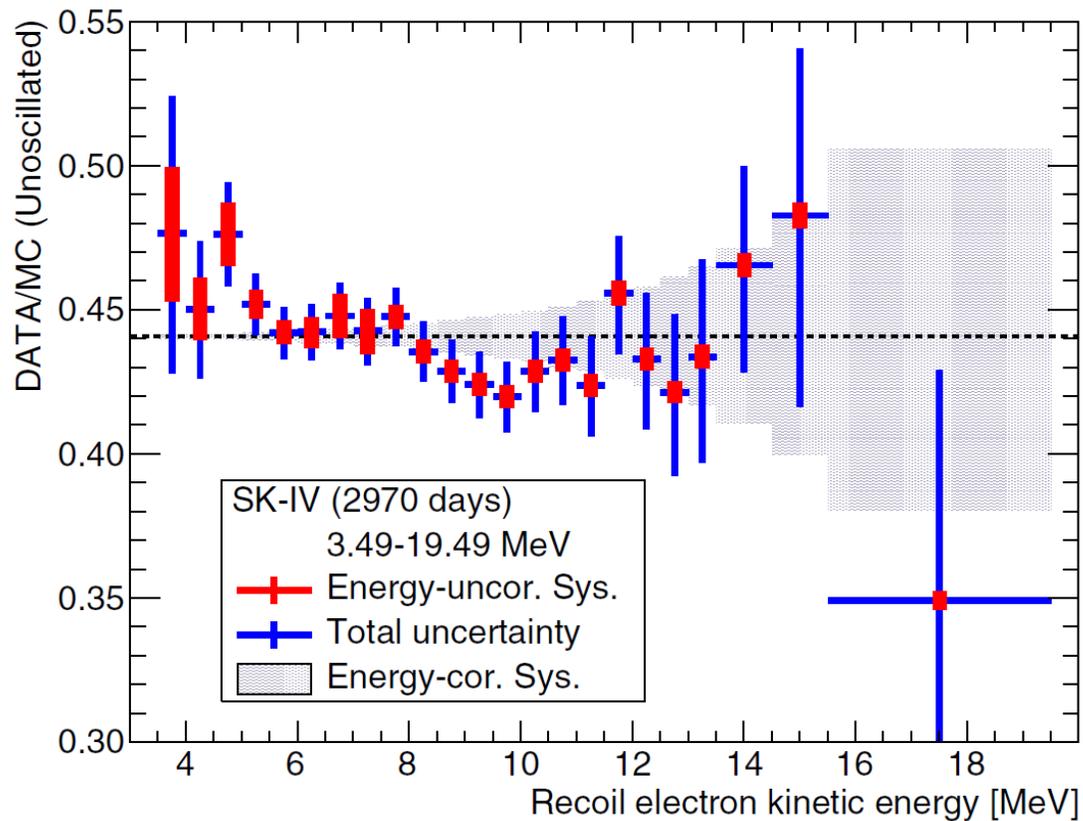


Phys. Rev. D 109, 092001 (2024).

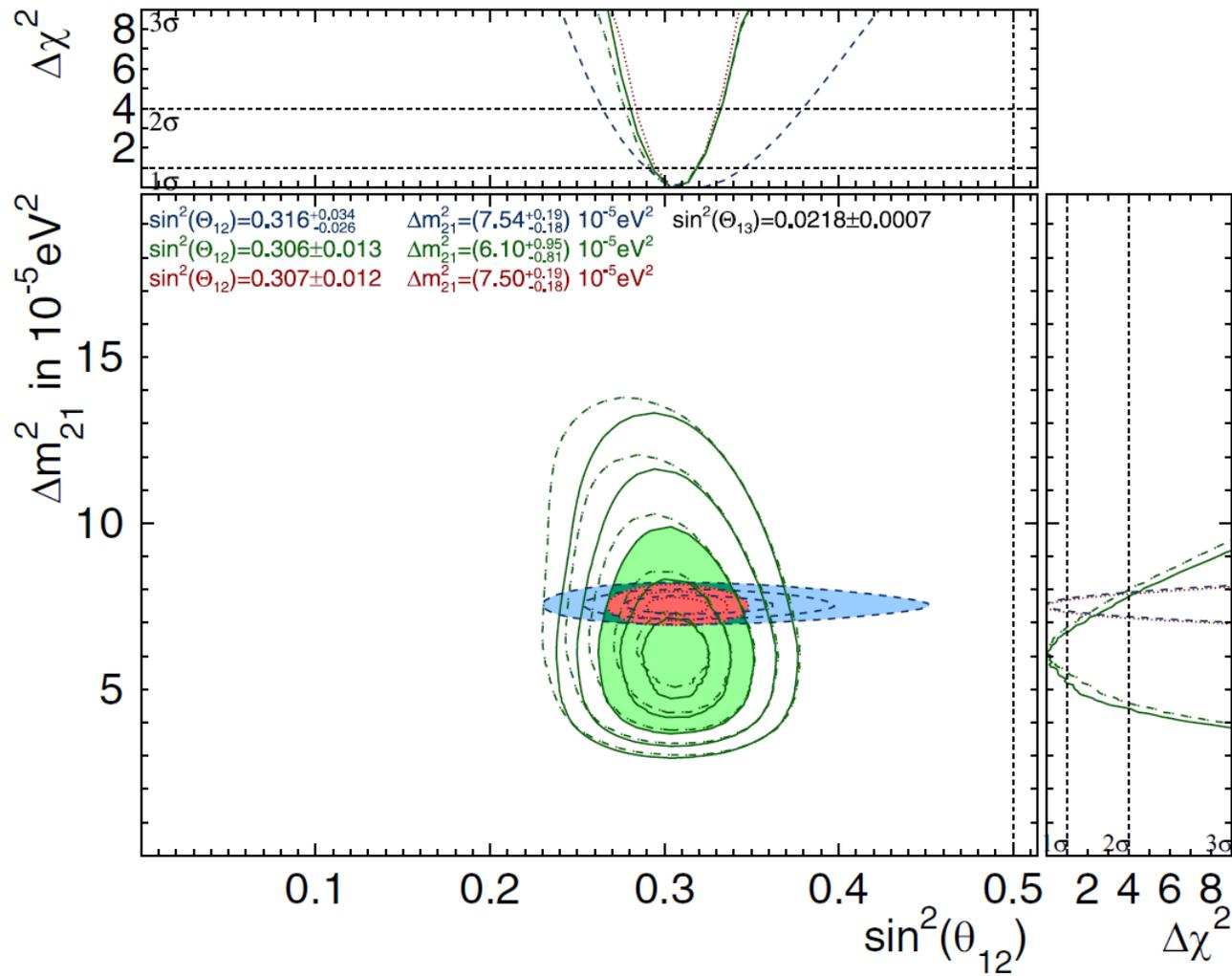


Phys. Rev. D 109, 092001 (2024).





Phys. Rev. D 109, 092001 (2024).



Phys. Rev. D 109, 092001 (2024).

