

# TA×4 SDによる大天頂角 空気シャワー事象の再構成手法の構築

2024/3/26 空気シャワー研究会

ICRR 小山千里

# TA × 4 実験への拡張

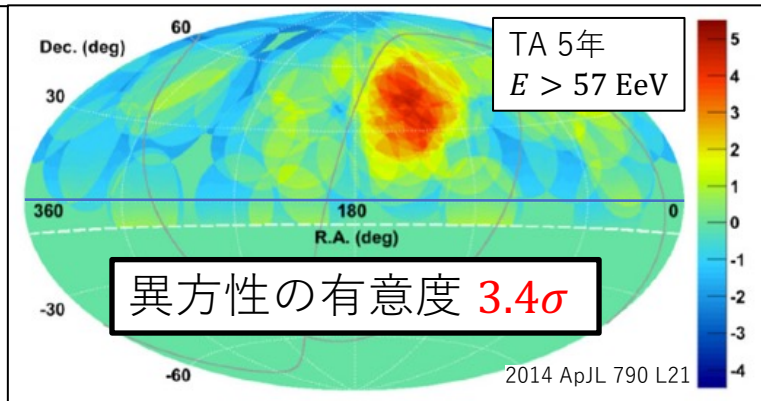
## TA × 4 (TA times 4) 実験

TA実験に比べアレイの面積を4倍に拡張  
→ **最高エネルギー宇宙線**に特化した観測

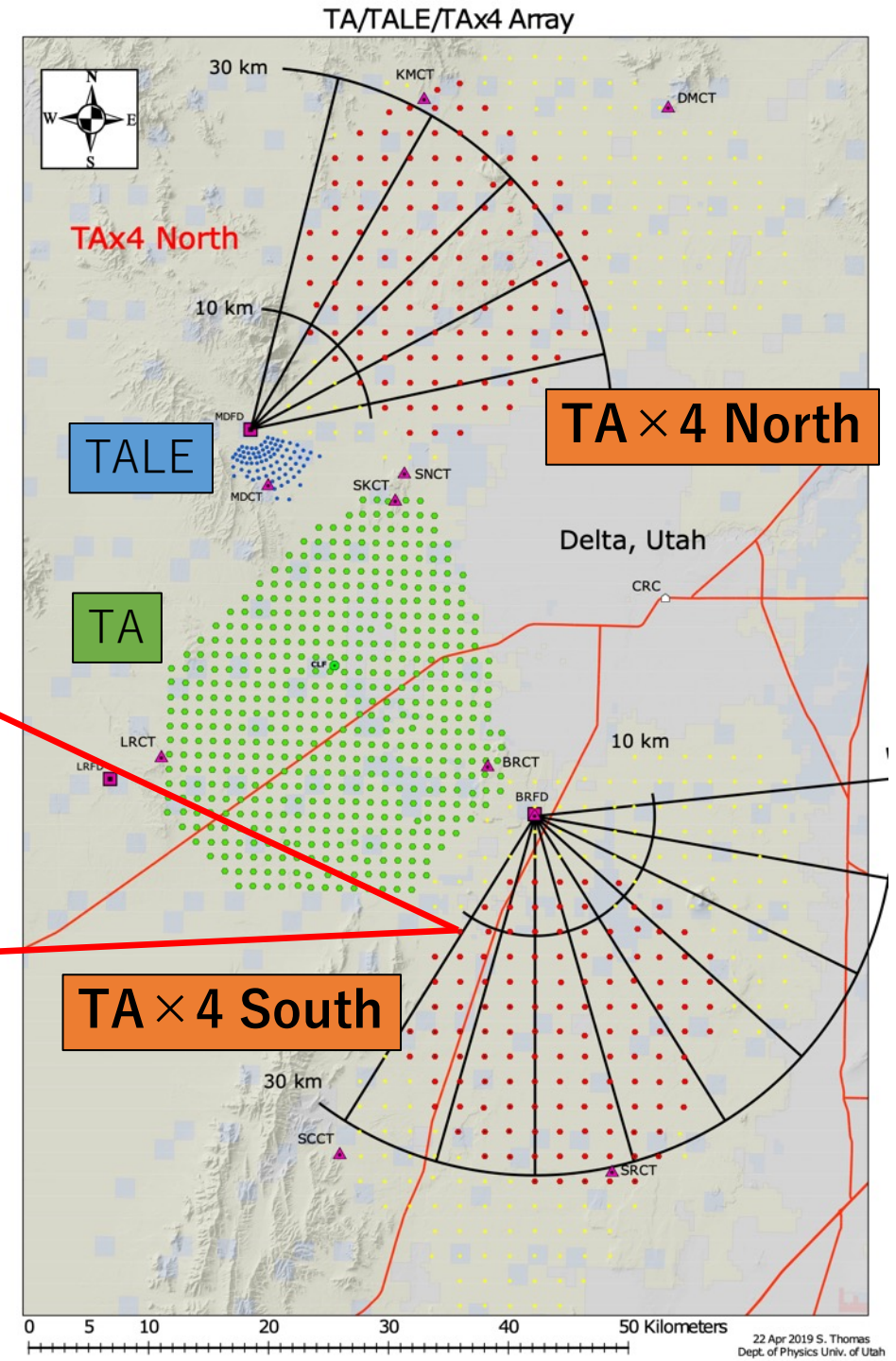
### TA × 4 SD

- **500台**を2.08 km間隔で設置
- 2019年にうち257台(TAの~2.5倍)を設置
- 6つのサブアレイとTA SDで構成
- 完成後は~**2800 km<sup>2</sup>**をカバー

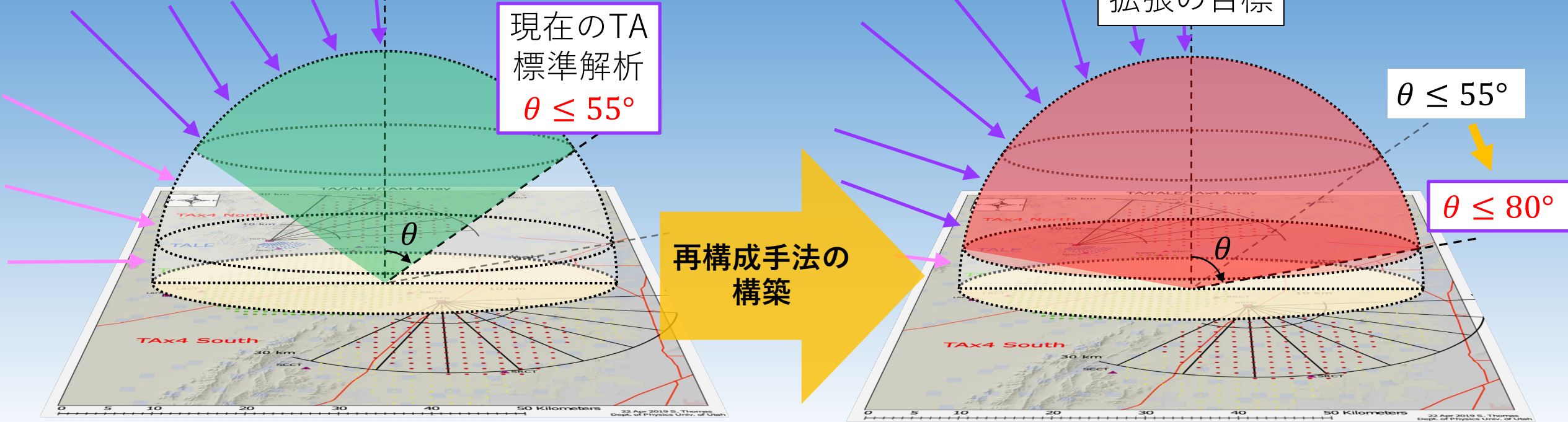
TA実験の異方性解析の例：**TA hotspot**



**TA × 4で  
異方性の確証  
( $> 5\sigma$ )を目指す**



# 本研究の目的とその意義

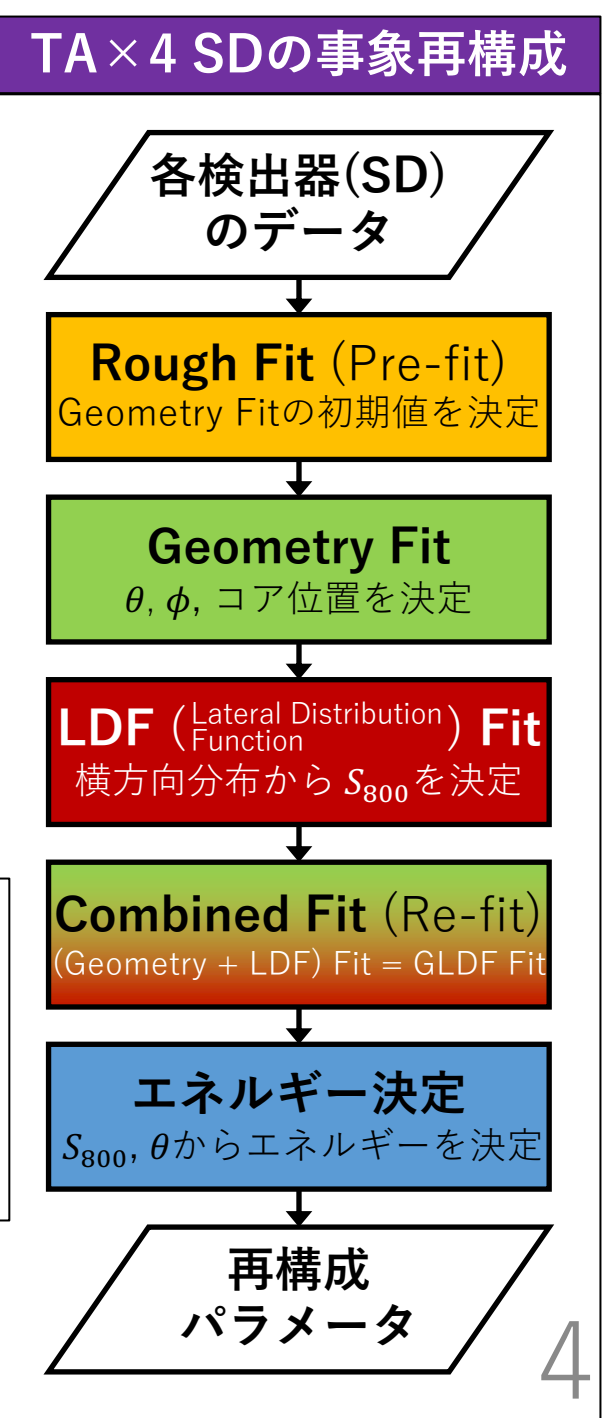
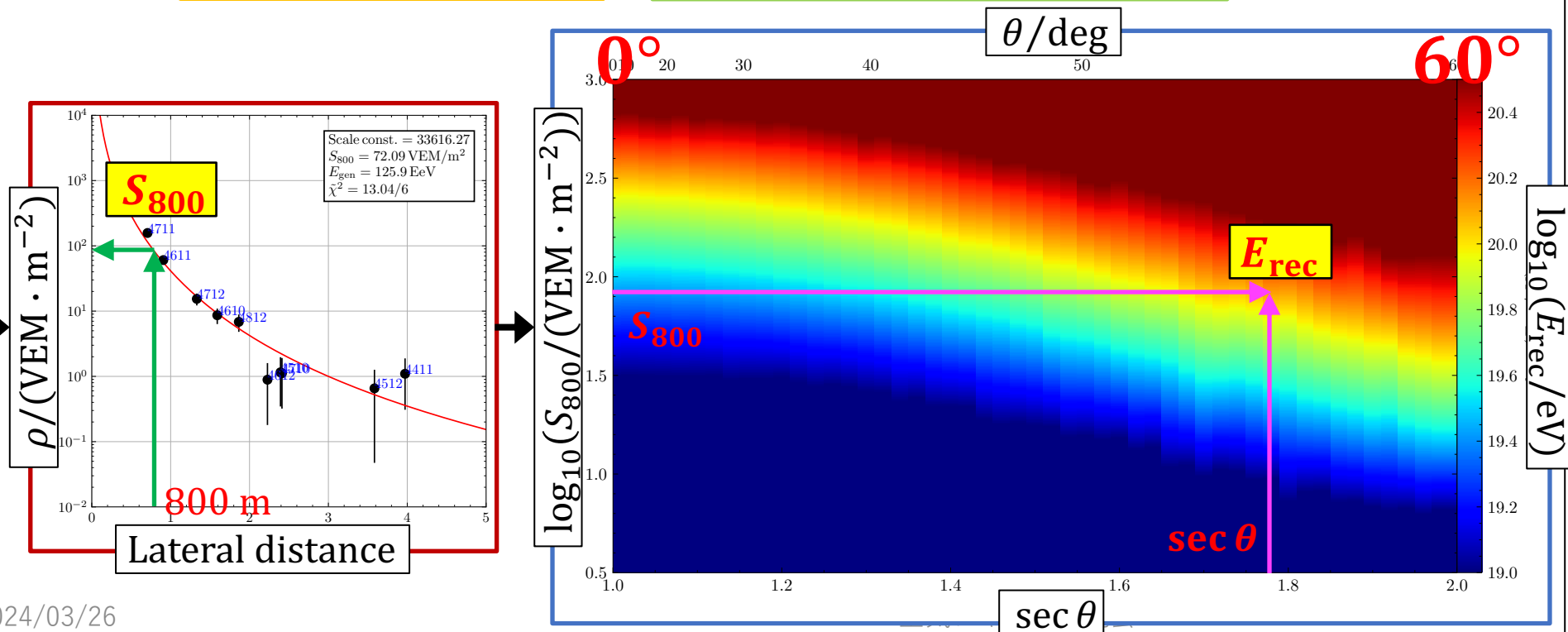
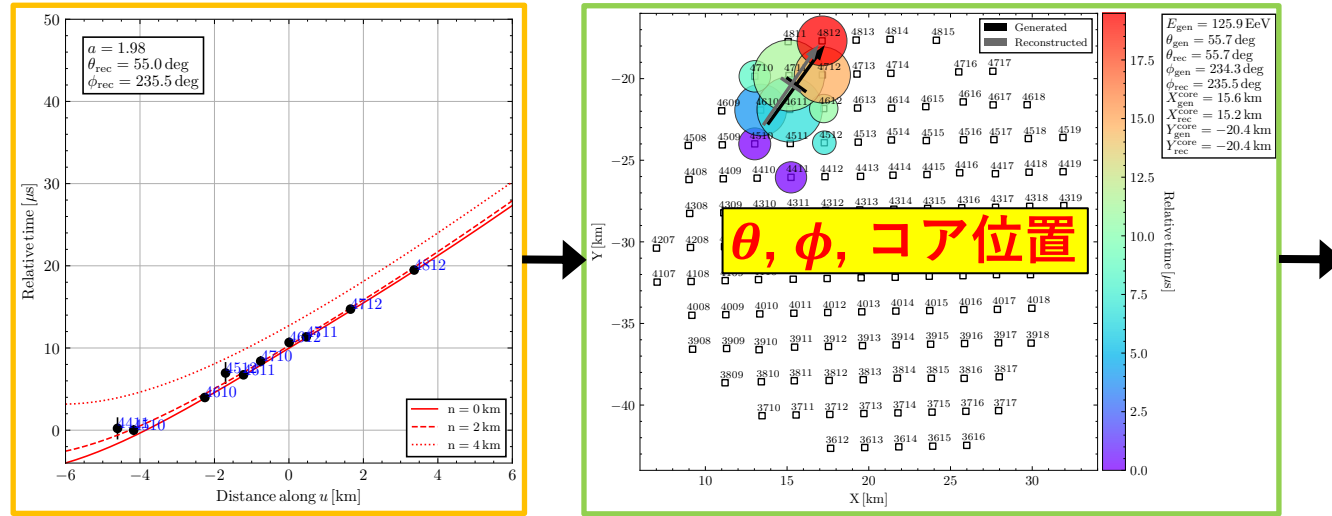


55°から80°までの拡張で…

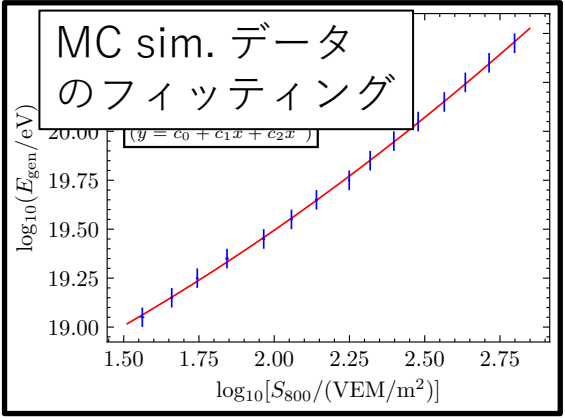
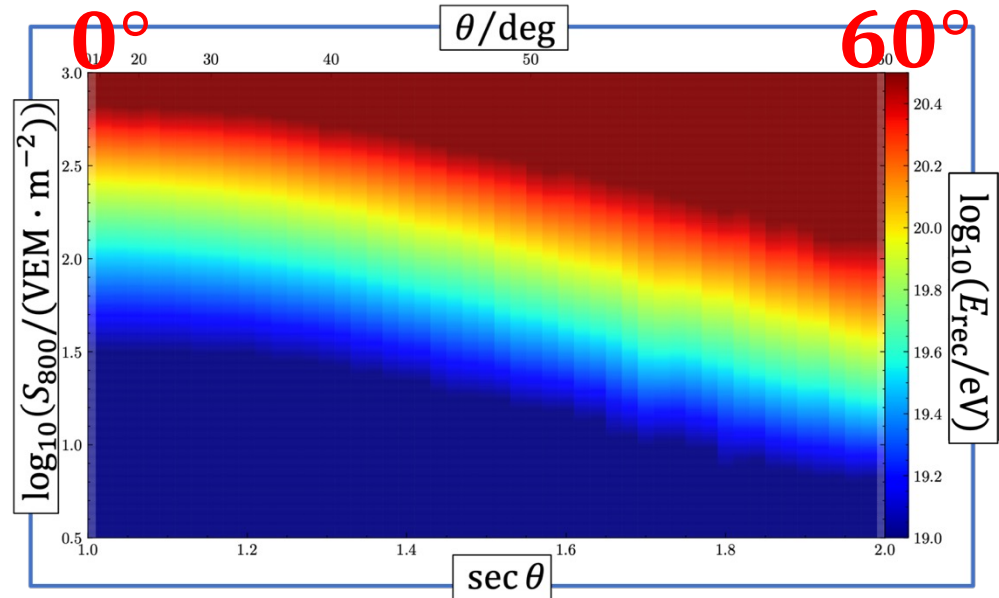
有効面積はおよそ**1.5倍** ⇒ TA×4完成後は**TAの6倍**の面積をカバー  
また、**過去にも遡って**面積が拡大(⇔ 検出器の新設) ⇒ **TA×4 SD 4年 → 6年**  
さらに、**TA SDの解析にも**手法を応用可能 ⇒ **TA SD 15.5年 → 23年**

本研究の目的は、TA×4 SDによる  
**大天頂角空気シャワー事象の再構成手法の確立**

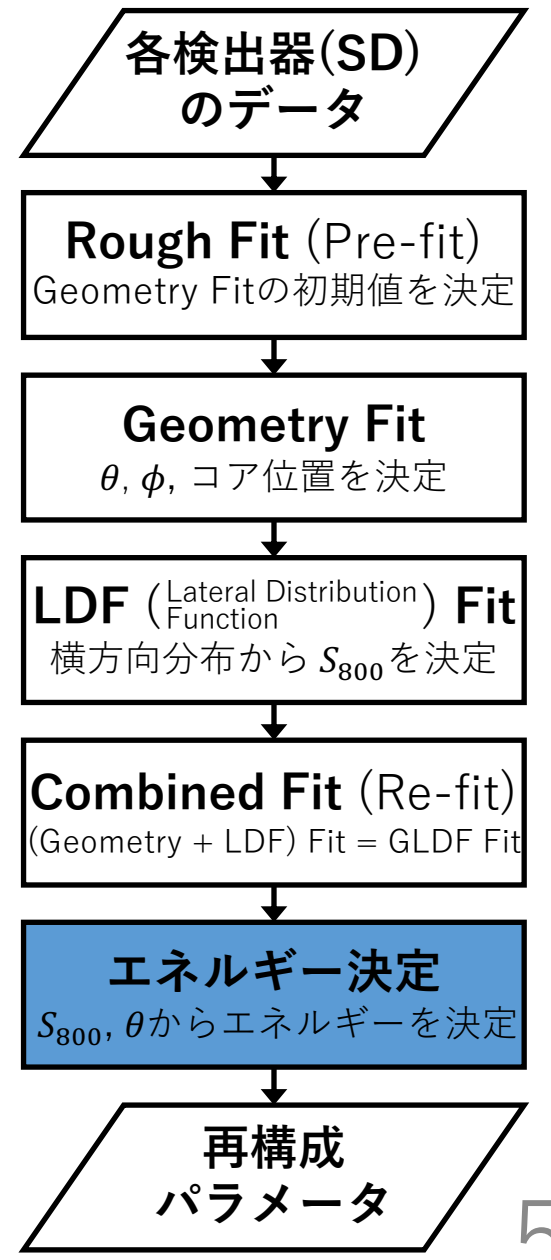
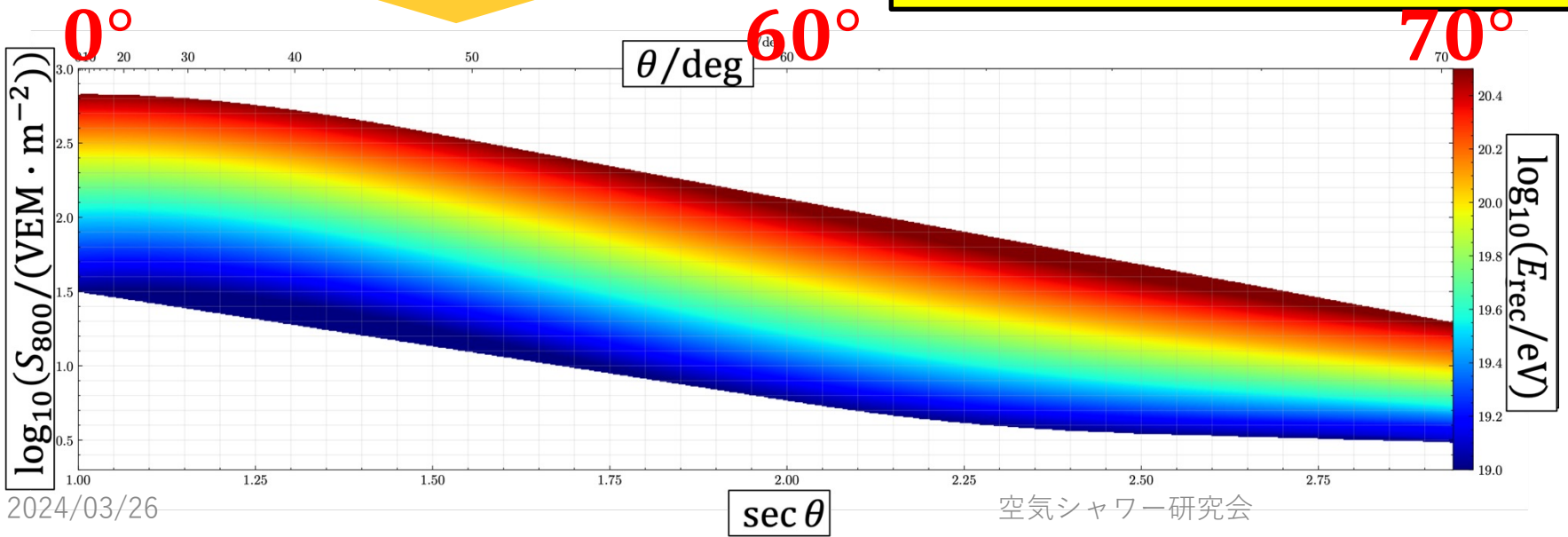
# TA×4 SDの事象再構成



# エネルギー推定テーブルの拡張



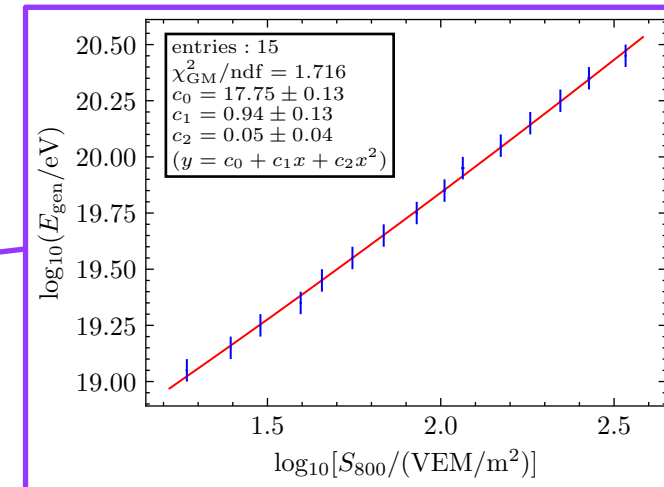
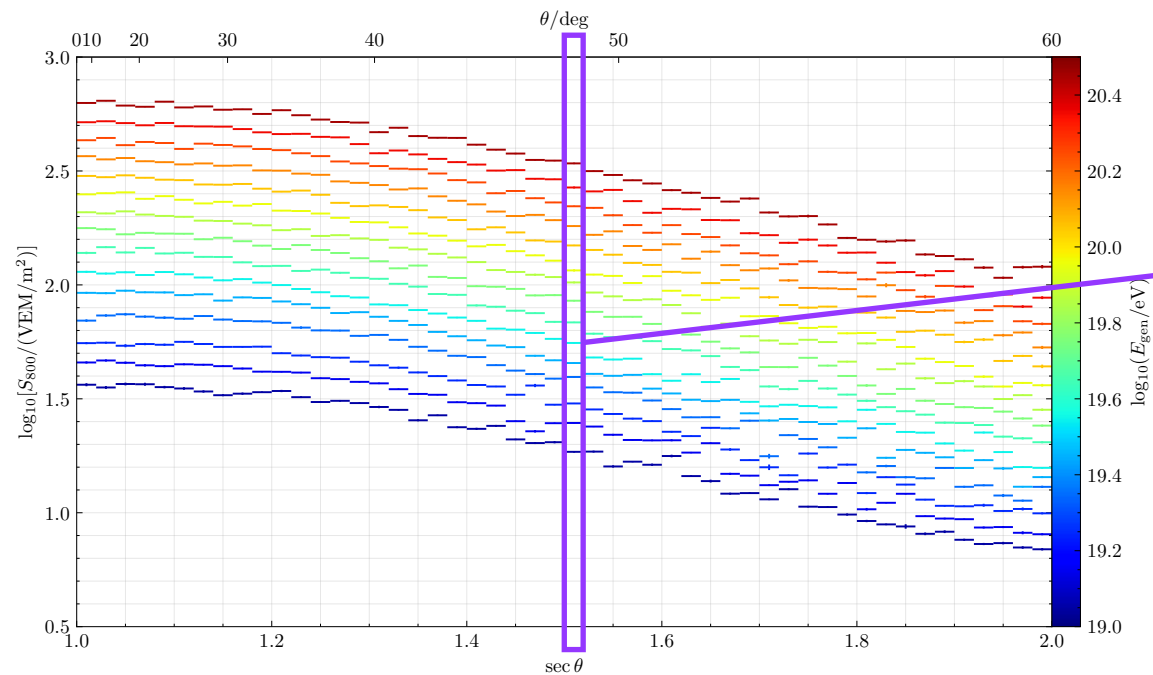
**本研究では従来のエネルギー推定テーブル(天頂角 $60^\circ$ まで)を天頂角 $70^\circ$ まで拡張**



# エネルギー推定テーブルの拡張

## 大天頂角側に拡張する方法

- ① オリジナルと同様,  $\sec\theta$ ごとに分割しフィットを行う
  - 方法の変更がない ×MCデータの大量生成が必要 例)  $70^\circ$ までの拡張でデータ数は約2倍
- ② 従来の $\sec\theta$ ごとに分割してフィットする方法からエネルギーごとに分けてフィットする方法に変更
  - 大天頂角側に外挿できれば, 必ずしも新しいMCデータを必要としない
  - ×フィットの方法を変更する必要がある

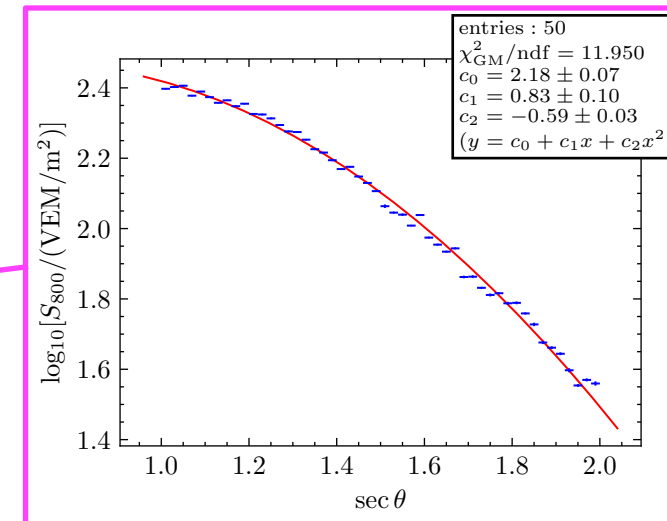
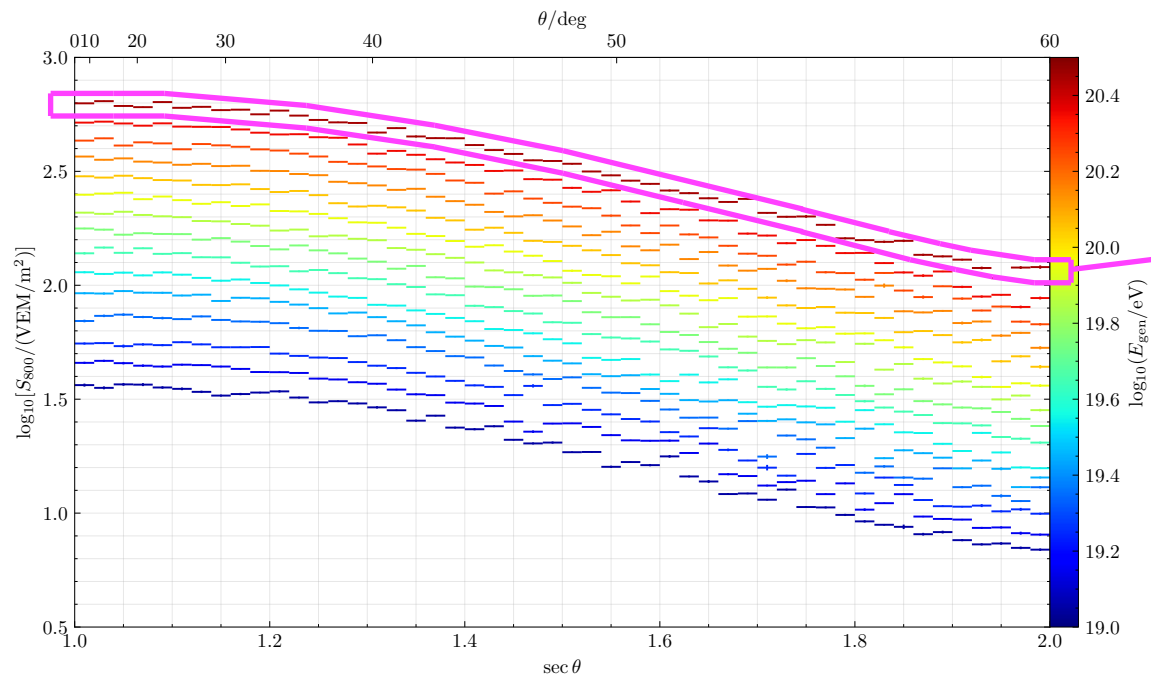


$\sec\theta$ とエネルギーを細かく分割し各ビンの中で $S_{800}$ の平均を計算  
→エネルギーを $S_{800}$ の関数としてフィット

# エネルギー推定テーブルの拡張

## 大天頂角側に拡張する方法

- ① オリジナルと同様,  $\sec \theta$ ごとに分割しフィットを行う
  - 方法の変更がない ×MCデータの大量生成が必要 例) 70°までの拡張でデータ数は約2倍
- ② 従来の $\sec \theta$ ごとに分割してフィットする方法から**エネルギーごとに分けて**フィットする方法に変更
  - 大天頂角側に外挿できれば, 必ずしも新しいMCデータを必要としない
  - ×フィットの方法を変更する必要がある



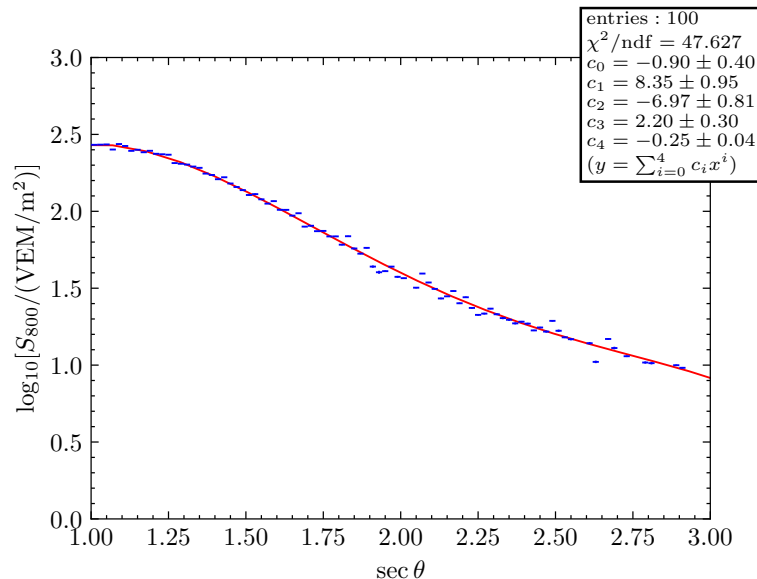
$\sec \theta$ とエネルギーを細かく分割し各ビンの中で $S_{800}$ の平均を計算  
→ $S_{800}$ を $\sec \theta$ の関数としてフィット

# エネルギー推定テーブルの拡張

## 大天頂角側に拡張する方法

- ① オリジナルと同様,  $\sec \theta$ ごとに分割しフィットを行う
  - 方法の変更がない
  - ×MCデータの大量生成が必要 例)  $70^\circ$ までの拡張でデータ数は約2倍
- ② 従来の $\sec \theta$ ごとに分割してフィットする方法から**エネルギーごとに分けてフィットする方法に変更**
  - 大天頂角側に外挿できれば, 必ずしも新しいMCデータを必要としない
  - ×フィットの方法を変更する必要がある

エネルギーごと細かく分割して $\sec \theta - S_{800}$ をプロット ( $\theta \leq 70^\circ$ )  
&  $S_{800}$ を $\sec \theta$ の関数として**4次の多項式**でフィット



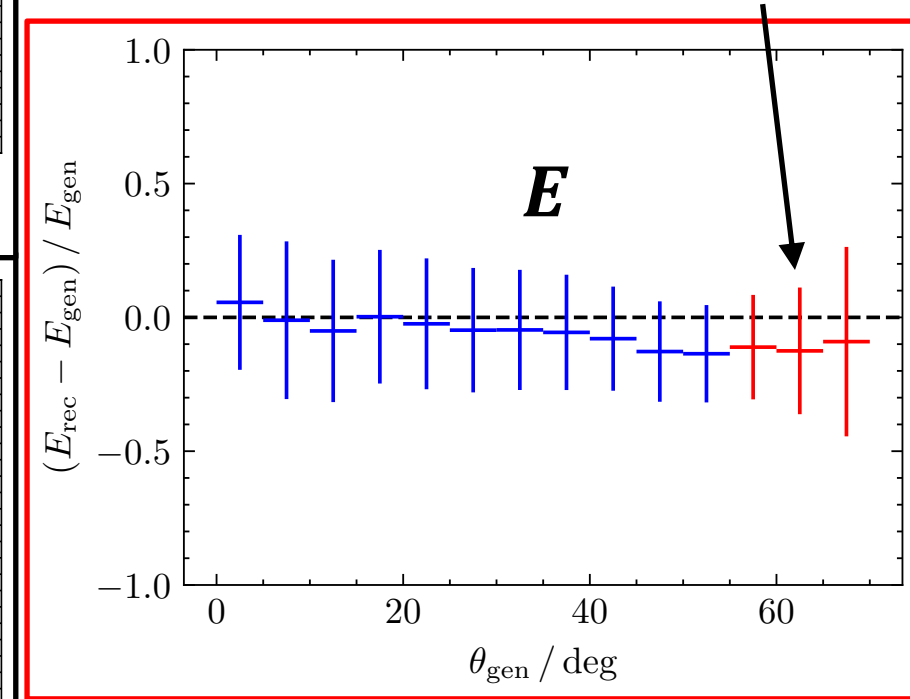
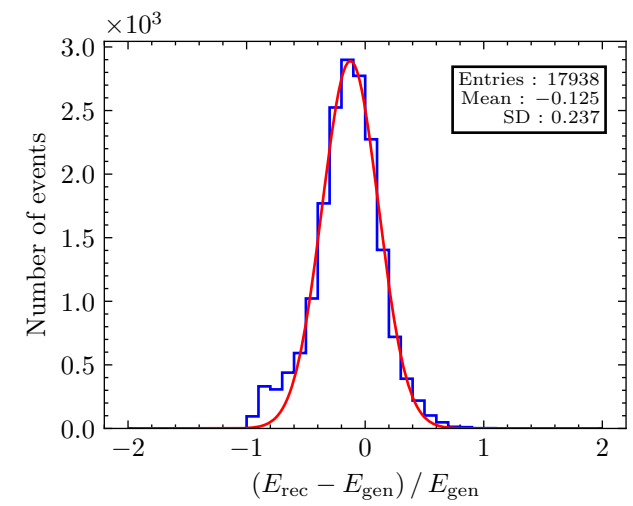
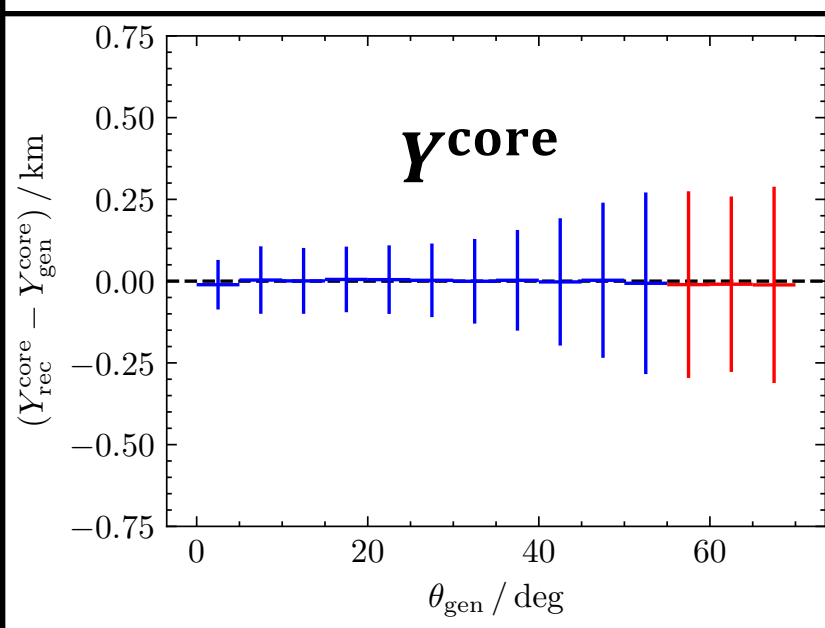
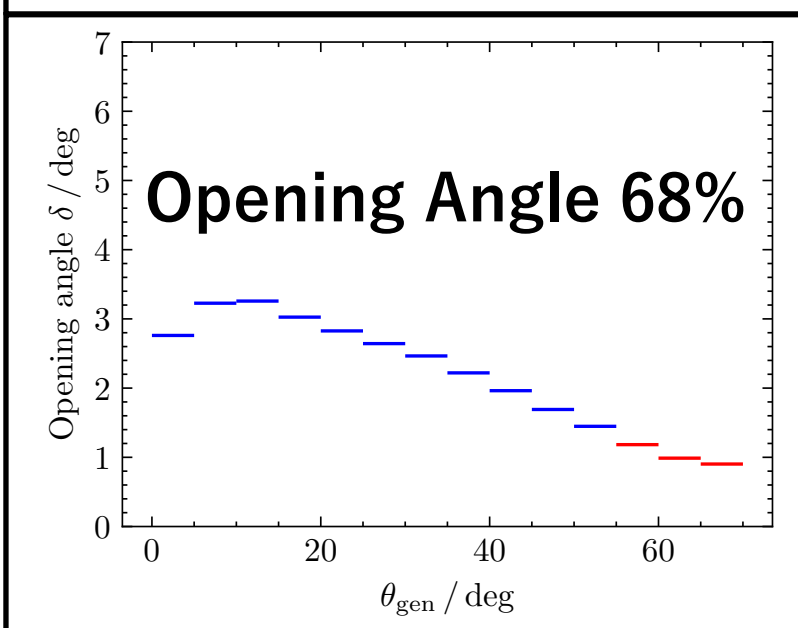
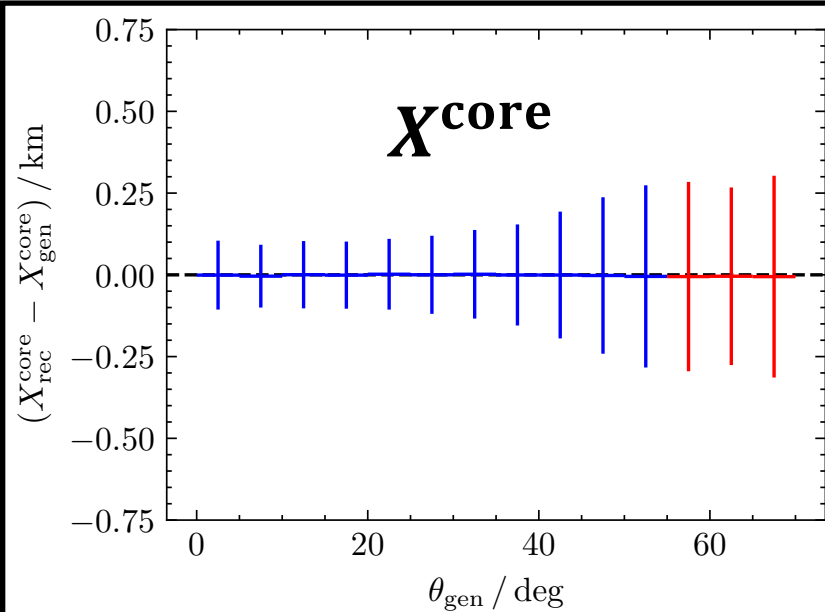
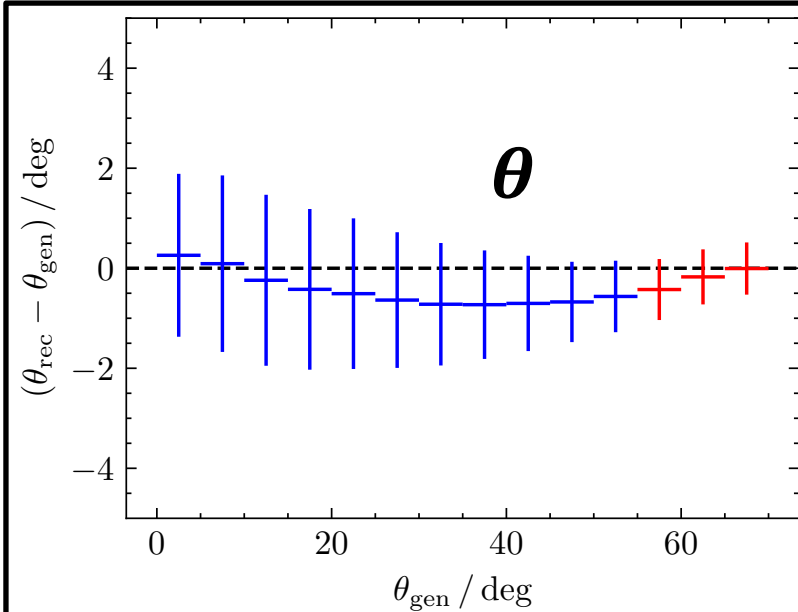
エネルギーは対数で0.1ずつ,  $\sec \theta$ は0.02ずつ  
分割し各ビンの中で $S_{800}$ の平均を計算

→ $S_{800}$ を $\sec \theta$ の関数としてフィット  
(左図は  $19.95 \leq \log_{10}(E_{\text{gen}}/\text{eV}) < 20.05$ の例)



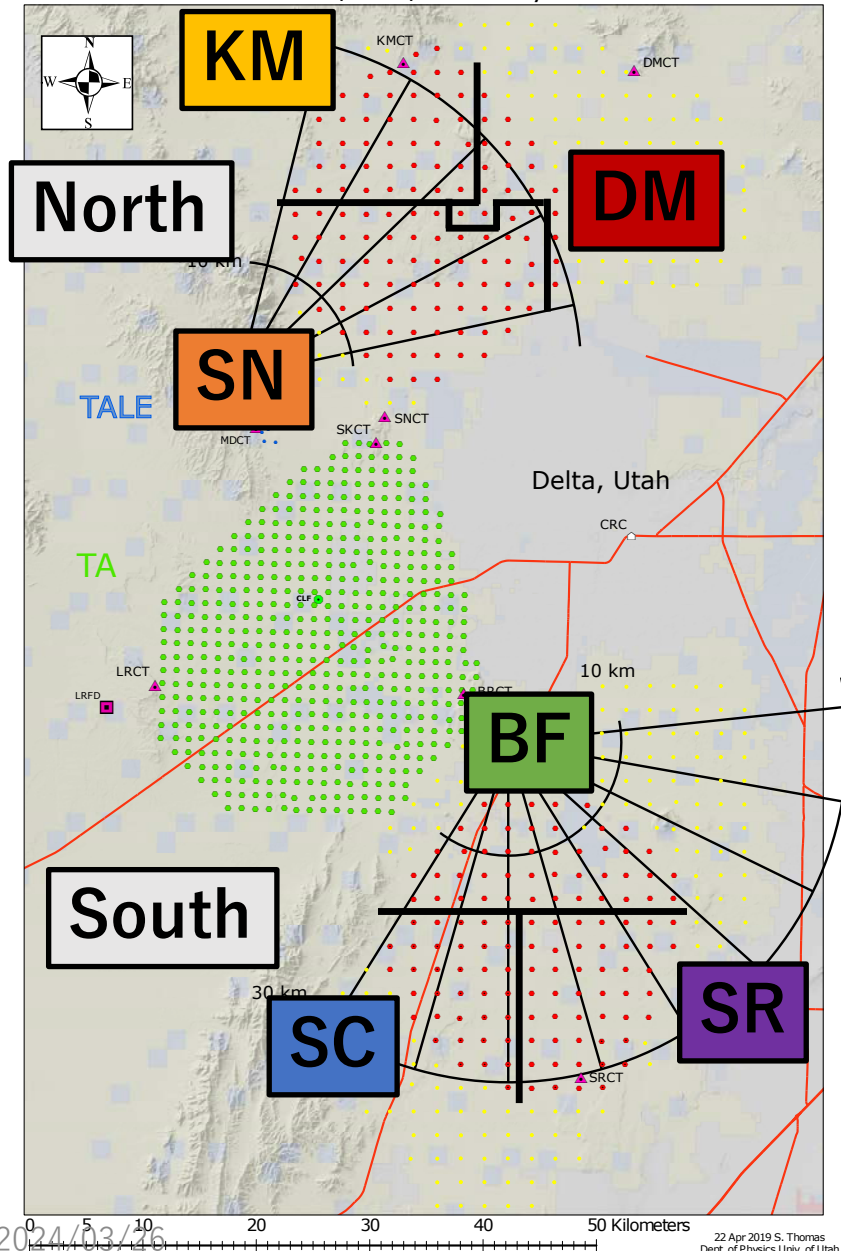
# 再構成精度の検証

$E_{\text{gen}} = 10^{20.1}$  eVの例



# Data/MC 比較

TA/TALE/TAx4 Array



## Data

実データ

	北側アレイ (North)			南側アレイ (South)		
	KM	DM	SN	BF	SR	SC
観測期間 [yymmdd]	191008- 221031	191026- 221031	191008- 221031	191104- 221031	191008- 221031	191008- 221031
地表面積 [km <sup>2</sup> ]	~120	~40	~230	~150	~140	~110

## MC

シミュレーション  
データ

実データと同じ観測期間  
TA実験の11年間スペクトルで重み付け  
通信塔間トリガーシステムは**未実装**

一次粒子：**陽子**

相互作用モデル：**QGSJETII-04**

天頂角： **$0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$**

方位角： **$0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$**

# Data/MC 比較

## 事象選別条件

$$N_{SD} \geq 5$$

$$\theta \leq 65^\circ$$

$$\text{reduced } \chi^2 \leq 4$$

$$\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$$

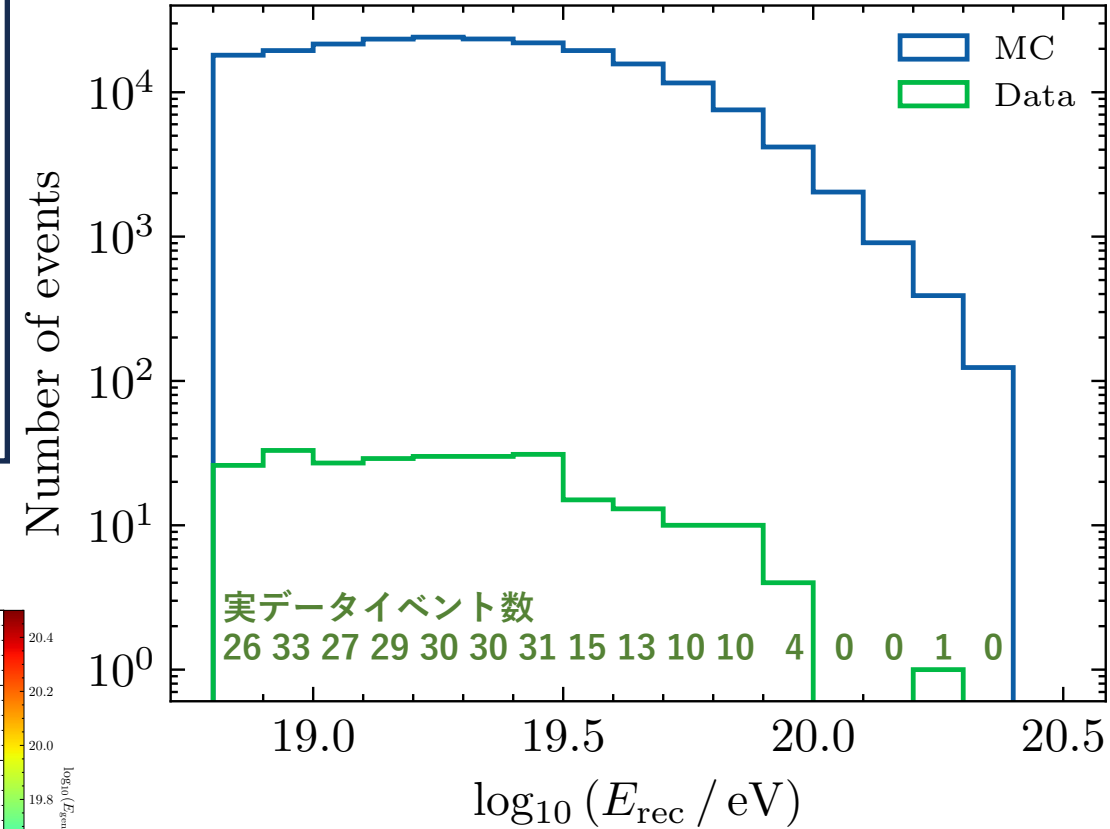
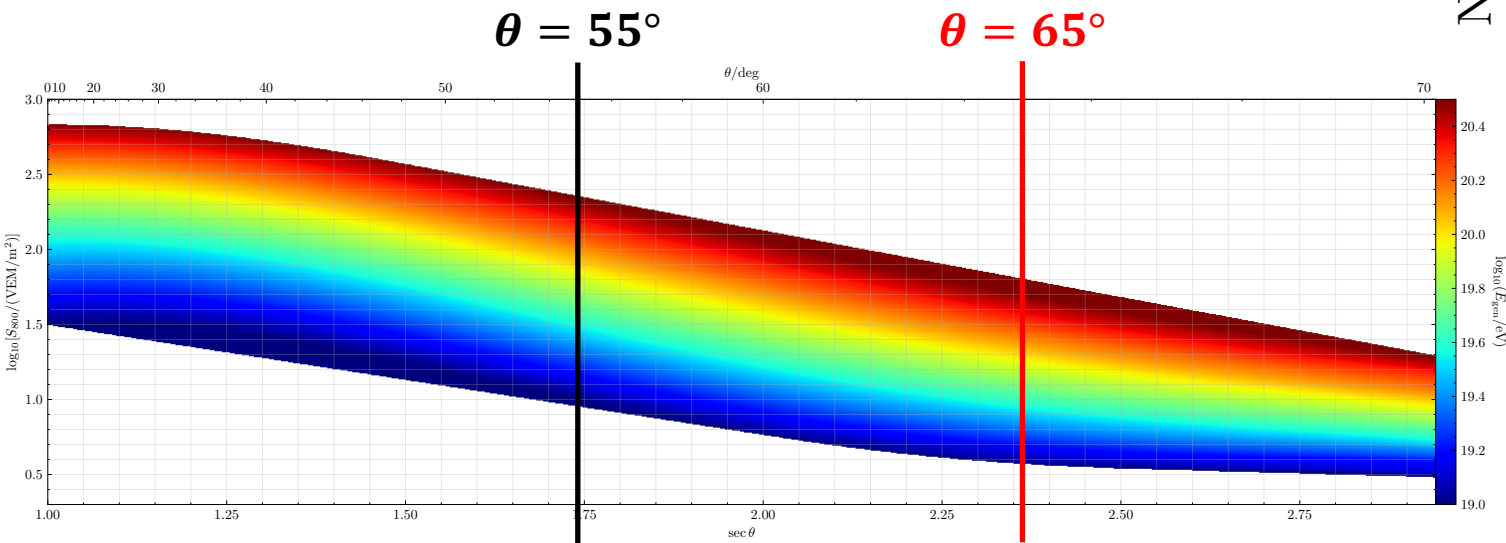
$$\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$$

$$D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$$

- TA × 4 SDの従来の解析から  
**天頂角の条件のみ**変更

⇒他の選別条件やエネルギー  
スケール( $\epsilon_{sc} = 1.36$ )は同じ

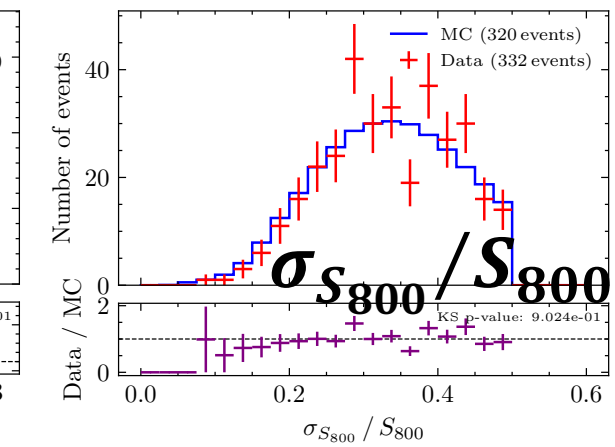
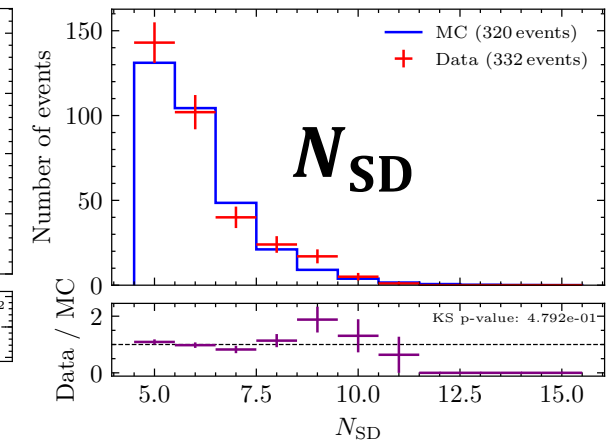
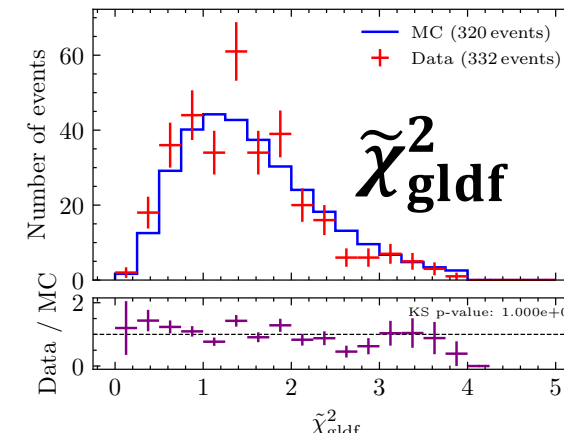
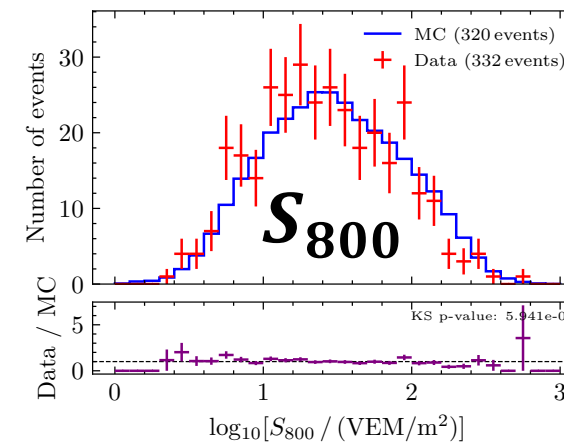
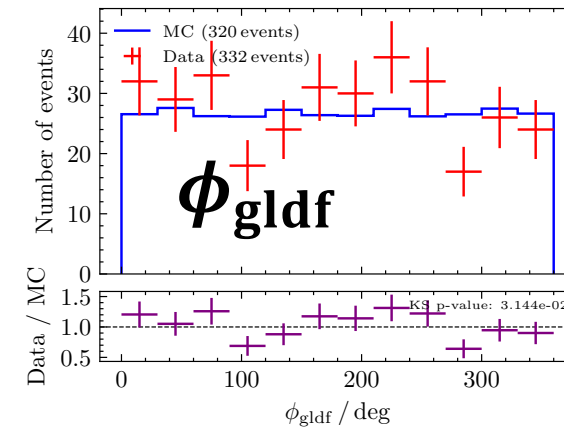
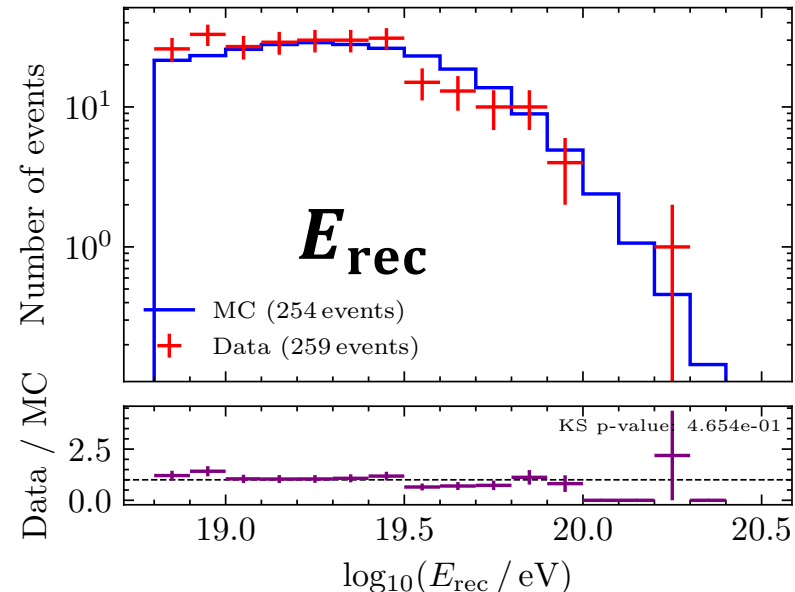
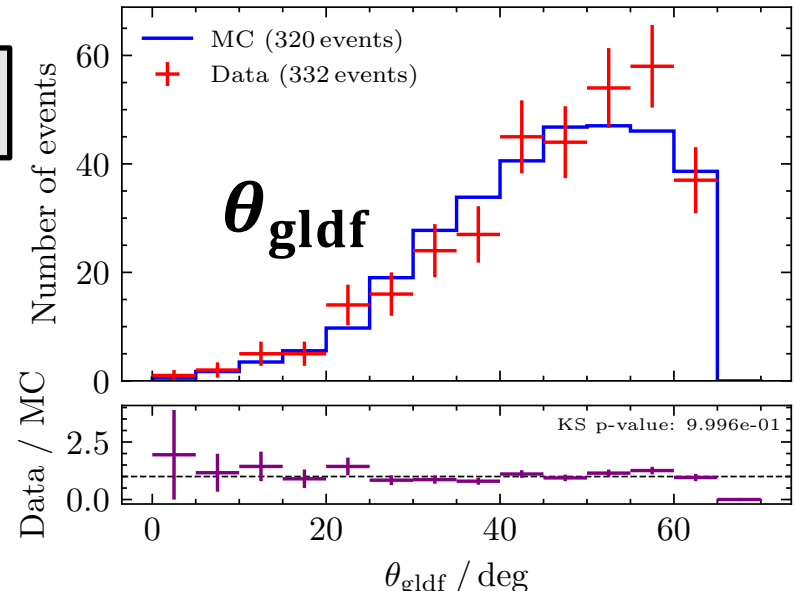
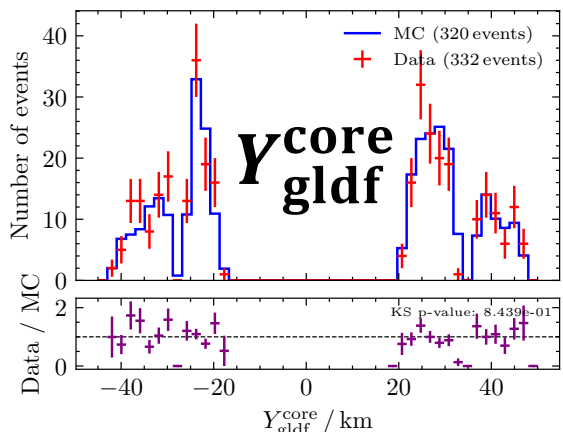
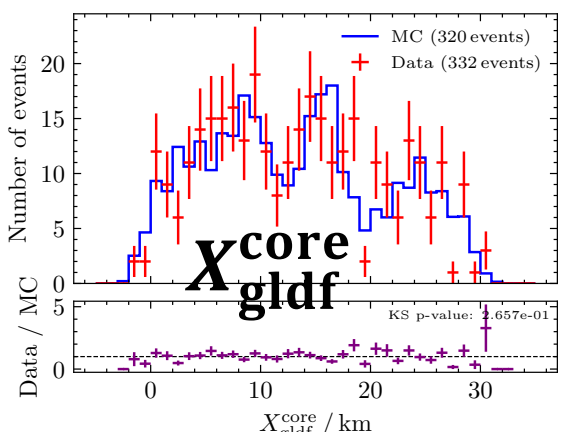
- 6つのサブアレイのデータ  
を足し合わせて比較



再構成された事象のエネルギー分布  
(緑 : Data, 青 : MC)

# Data/MC 比較

North + South



大天頂角領域  
事象を含めても  
両者に有意な差は  
存在しない

# エネルギースペクトルの測定

宇宙線フラックス

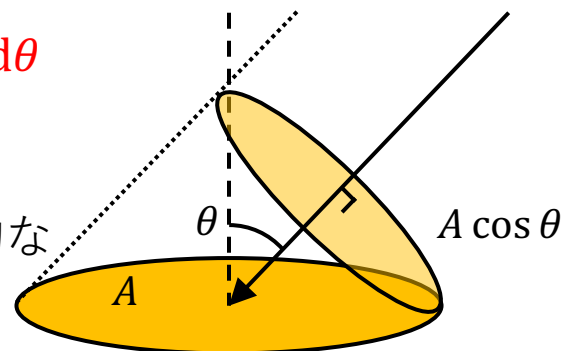
$$J_i = \frac{\sum_{\text{sub-arrays}} \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{Data}})_i}{\Delta E_i}}{\sum_{\text{sub-arrays}} \left[ \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{MC}})_i}{(N_{\text{gen}}^{\text{MC}})_i} A_{\text{gen}} \Omega_{\text{gen}} T \right]}$$

$$\epsilon_i(E_{\text{gen}}, E_{\text{rec}}) \equiv \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{MC}}(E_{\text{rec}}))_i}{(N_{\text{gen}}^{\text{MC}}(E_{\text{gen}}))_i}$$

ビン間の染み出しを考慮した再構成効率  
(=TA実験の11年間のスペクトルを仮定)

$$\begin{aligned} A_{\text{gen}} \Omega_{\text{gen}} &= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_{\text{max}}} \frac{A_{\text{gen}} \cos \theta \sin \theta d\theta}{\sin \theta} \\ &= A_{\text{gen}} \cdot \pi \sin^2 \theta_{\text{max}} \end{aligned}$$

天頂角によってアレイの実効的な面積が変化することを考慮



サブアレイ	KM	DM	SN	BF	SR	SC
地表面積 [km <sup>2</sup> ]	~120	~40	~230	~150	~140	~110
生成面積 $A_{\text{gen}}$ [km <sup>2</sup> ]	330.0	251.3	486.4	418.0	344.9	283.0
観測期間 [yymmdd]	191008-221031	191026-221031	191008-221031	191104-221031	191008-221031	191008-221031
観測日数 $T$ [days]	1120	1102	1120	1093	1120	1120

事象選別条件はData/MC比較と同じ

TA × 4 SDの従来の解析(選別条件:  $\theta \leq 55^\circ$ )

$$A_{\text{gen}} \Omega_{\text{gen}}(\theta_{\text{max}} = 60^\circ) \cong A_{\text{gen}} \cdot 2.36$$

**本研究**(選別条件:  $\theta \leq 65^\circ$ ) ↓ **1.2倍**

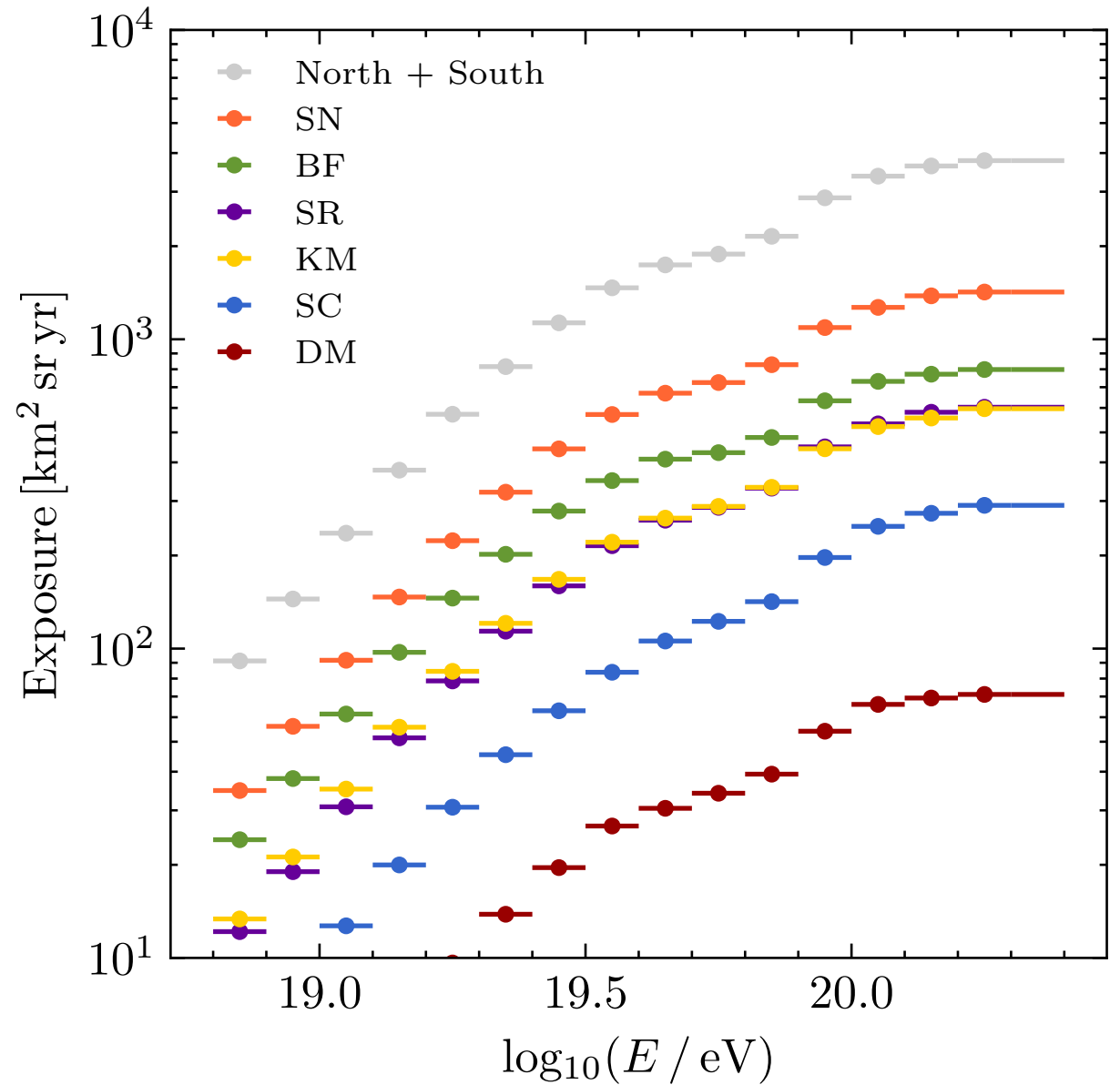
$$A_{\text{gen}} \Omega_{\text{gen}}(\theta_{\text{max}} = 70^\circ) \cong A_{\text{gen}} \cdot 2.77$$

# エネルギースペクトルの測定

$$J_i = \frac{\sum_{\text{sub-arrays}} \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{Data}})_i}{\Delta E_i}}{\sum_{\text{sub-arrays}} \left[ \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{MC}})_i}{(N_{\text{gen}}^{\text{MC}})_i} A_{\text{gen}} \Omega_{\text{gen}} T \right]}$$

$$\text{Exposure}_i = \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{MC}})_i}{(N_{\text{gen}}^{\text{MC}})_i} A_{\text{gen}} \Omega_{\text{gen}} T$$

エネルギーが最も高いビンでExposureが小さくなった  
→ Exposureがフラットとなることを仮定し、  
それより低いエネルギーのビンと同じ値を用いた



# エネルギースペクトルの測定

$$J_i = \sum_{\text{sub-arrays}} \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{Data}})_i}{\text{Exposure}_i \cdot \Delta E_i}$$

$E \geq 10^{18.8}$  eVについて  
実データイベント数  $N_{\text{rec}}^{\text{Data}}$  の比較

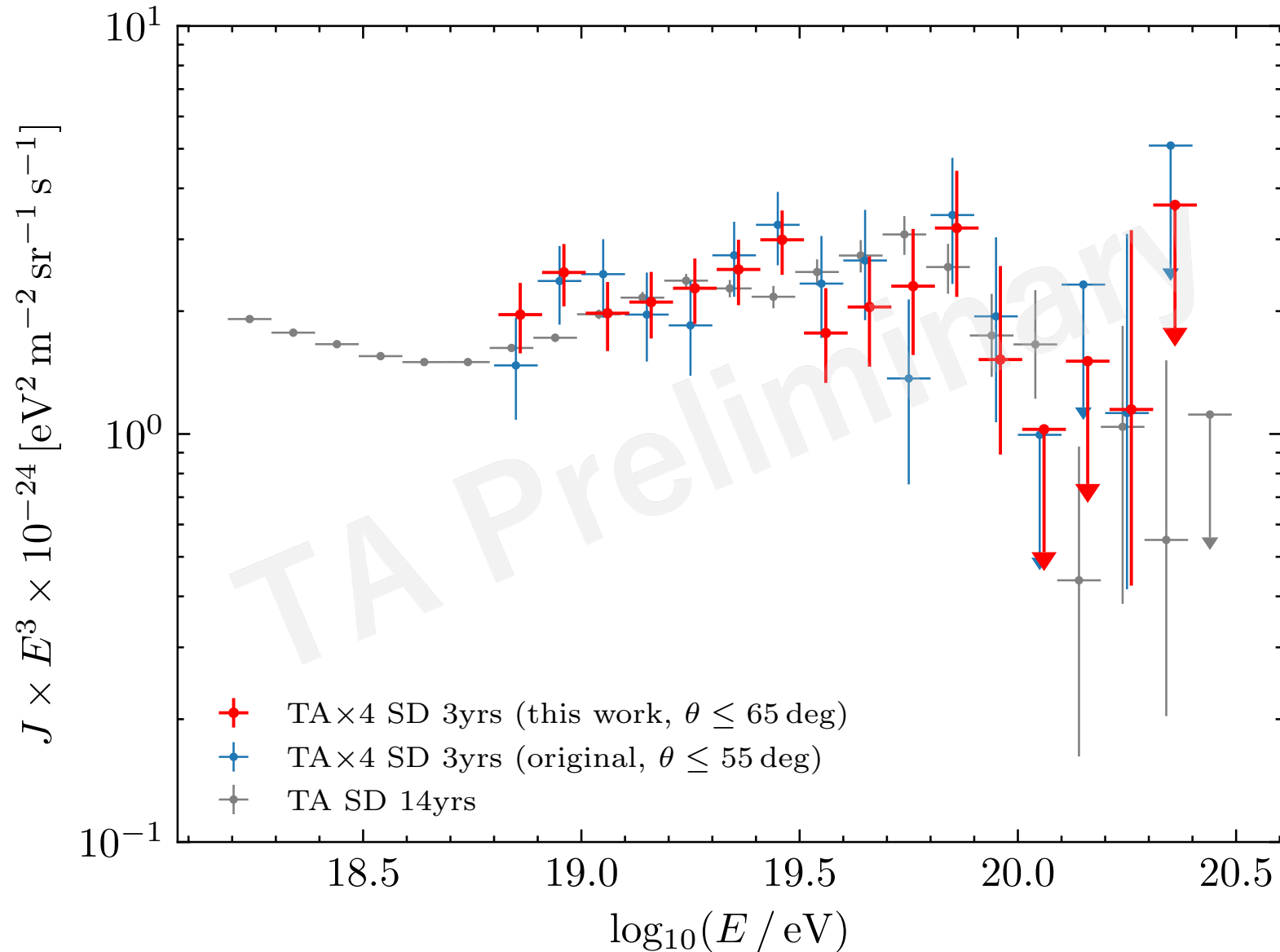
TA×4 SDの従来の解析  
(選別条件:  $\theta \leq 55^\circ$ )

$$N_{\text{rec}}^{\text{Data}} = 186$$

↓ **1.4倍**

**本研究** (選別条件:  $\theta \leq 65^\circ$ )

$$N_{\text{rec}}^{\text{Data}} = 259$$



# まとめ

- **事象再構成におけるエネルギー決定過程の大天頂角領域への拡張**  
エネルギー推定テーブルを天頂角70°まで拡張
- **実データとシミュレーションデータの再構成結果の比較**  
⇒両者に有意な差が**存在しない**ことを確認
- **実データを用いた初期解析**  
⇒**大天頂角領域**の事象を含めたエネルギースペクトルをはじめて決定

## 今後取り組むこと

- これまでの解析における**系統誤差**を評価
- **エネルギースペクトル**のより詳細な解析や**異方性**に関する解析
- **TA SD**の天頂角70°までの領域にも同様の解析を適応
- **さらなる大天頂角領域**への拡張



# Back up

# SN

2019/10/08~  
2022/10/31

Selection criteria:

$$N_{SD} \geq 5$$

$$\theta \leq 70^\circ$$

$$\text{reduced } \chi^2 \leq 4$$

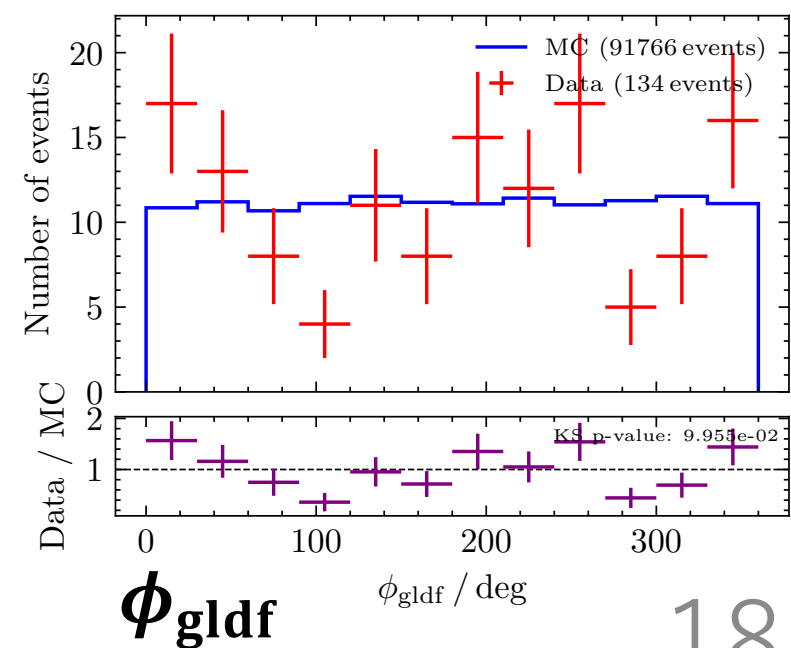
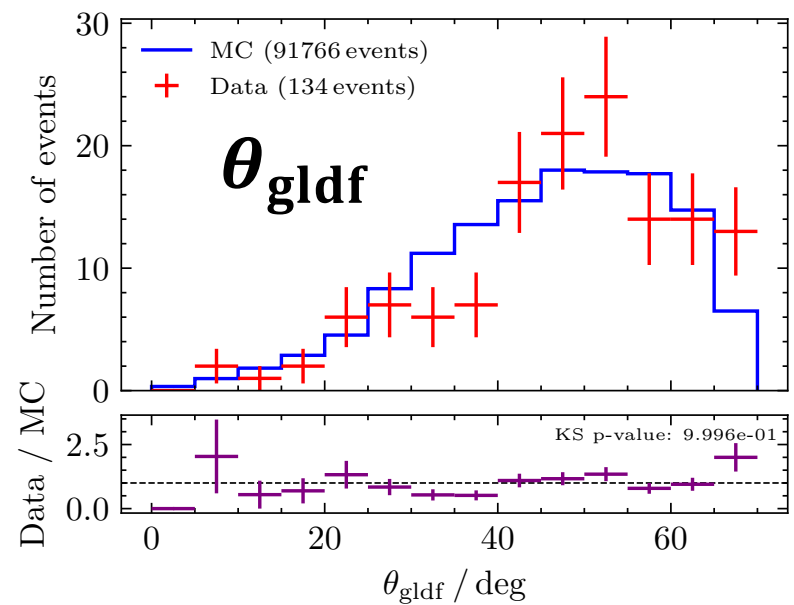
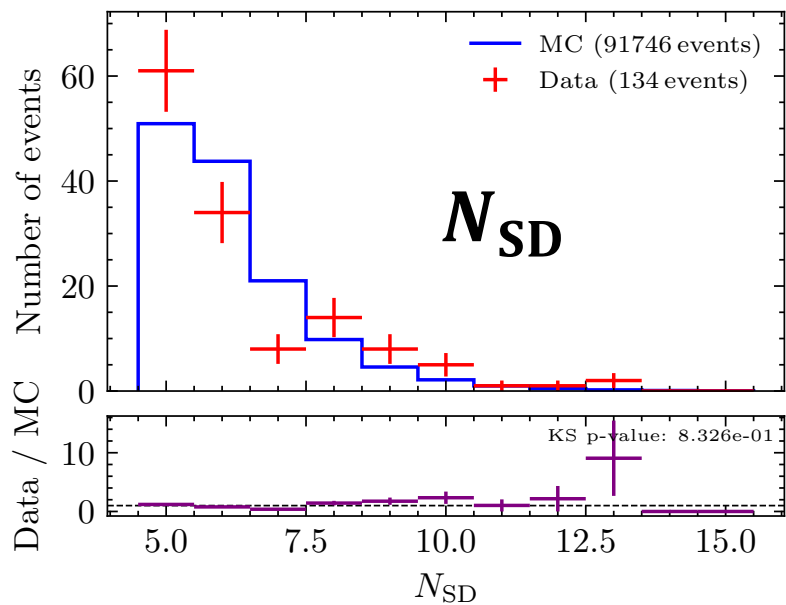
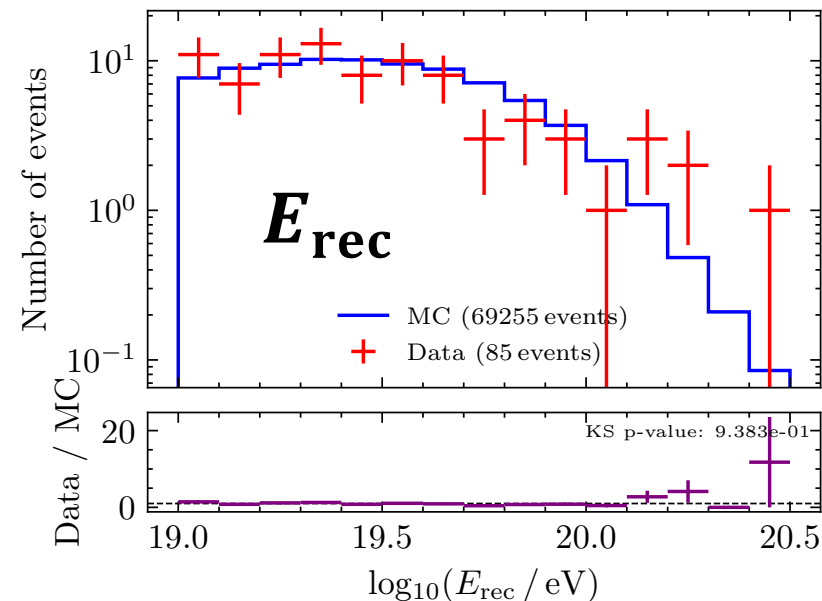
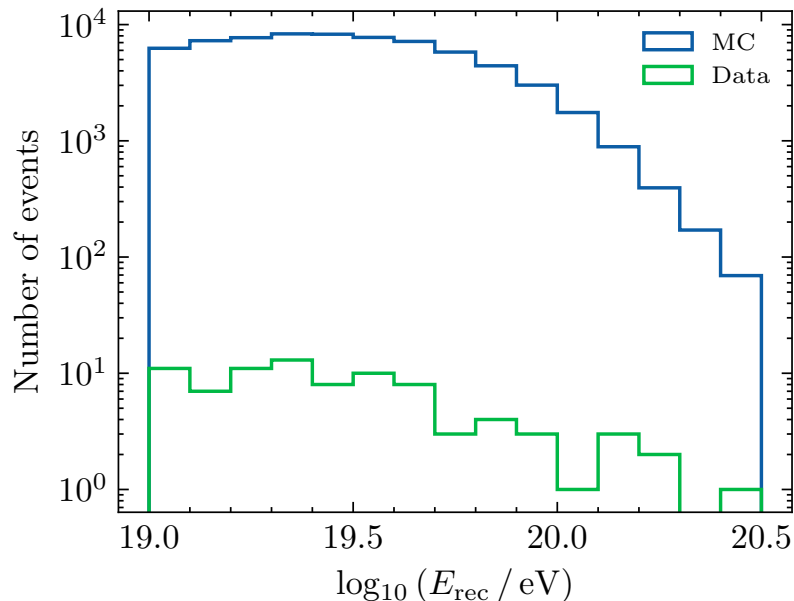
$$\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$$

$$\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$$

$$D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$$

**Area**  
normalize

**NOT**  
scaled  
energy



# SN

2019/10/08~  
2022/10/31

Selection criteria:

$$N_{SD} \geq 5$$

$$\theta \leq 70^\circ$$

$$\text{reduced } \chi^2 \leq 4$$

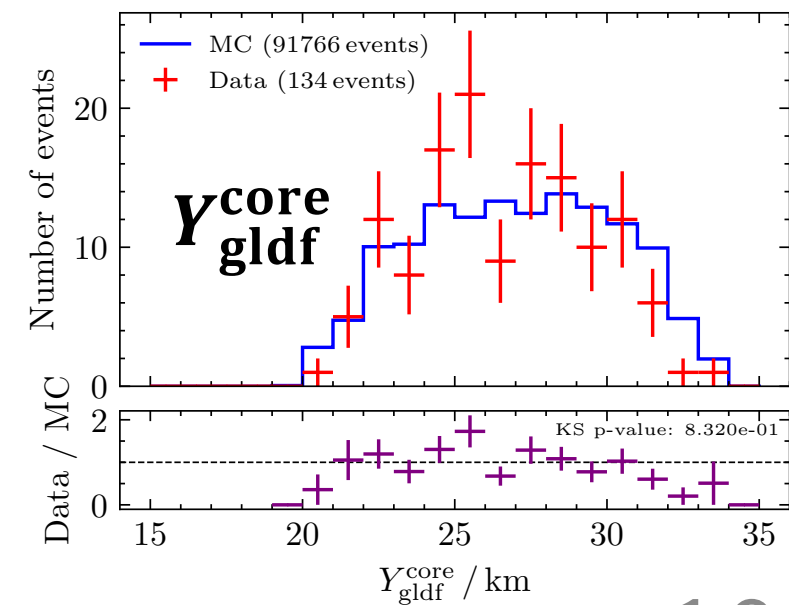
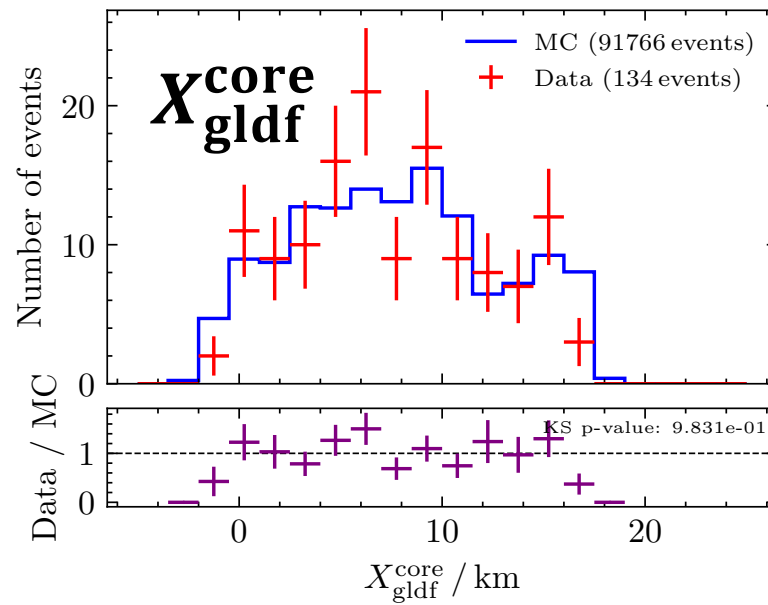
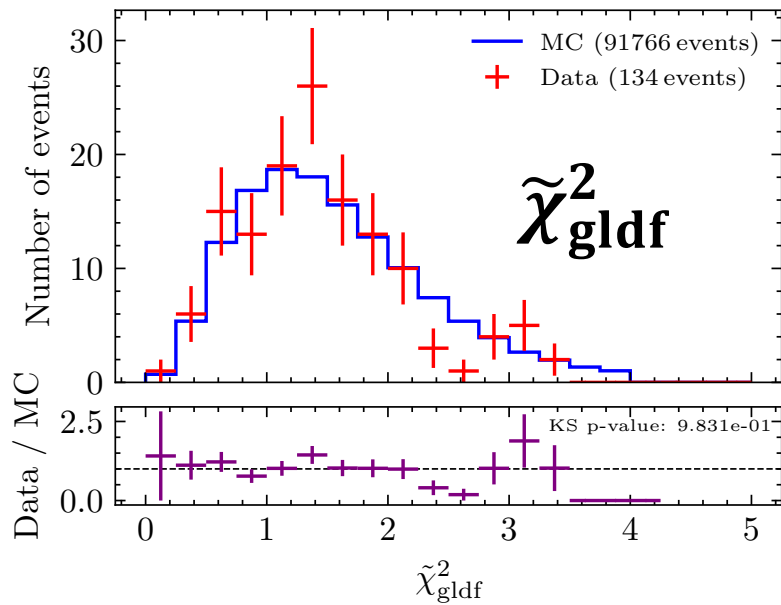
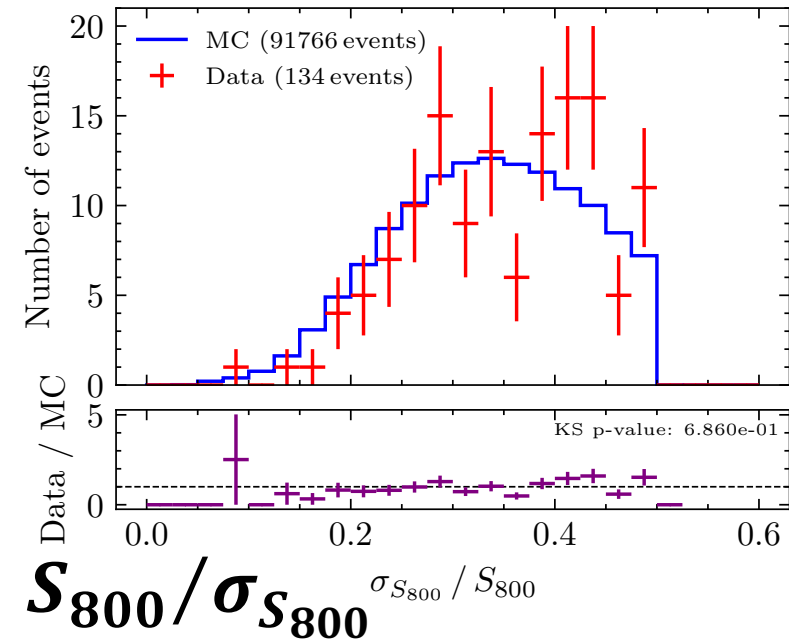
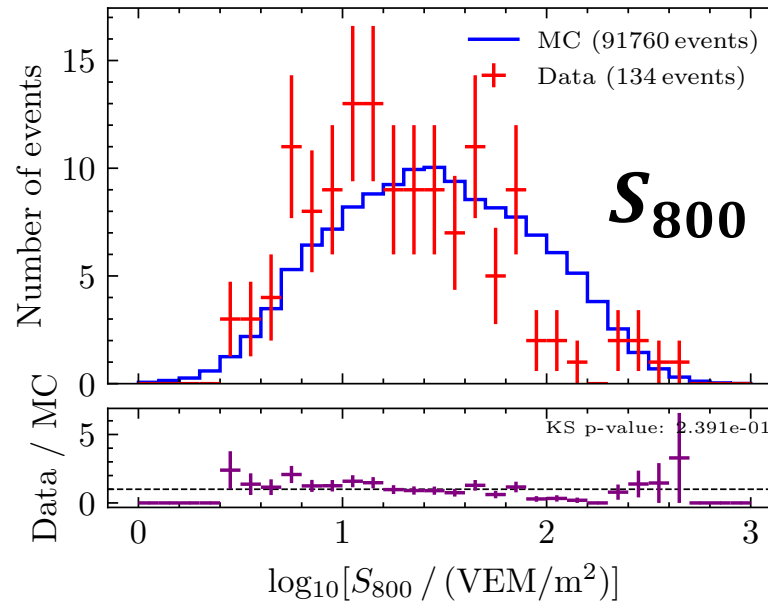
$$\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$$

$$\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$$

$$D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$$

**Area**  
normalize

**NOT**  
scaled  
energy



# SN

2019/10/08~  
2022/10/31

Selection criteria:

$$N_{SD} \geq 5$$

$$55^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$$

$$\text{reduced } \chi^2 \leq 4$$

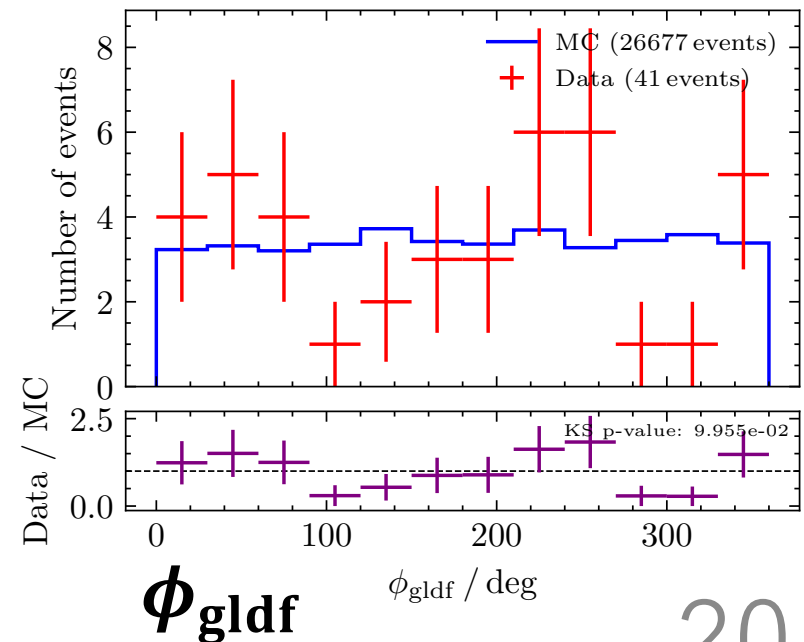
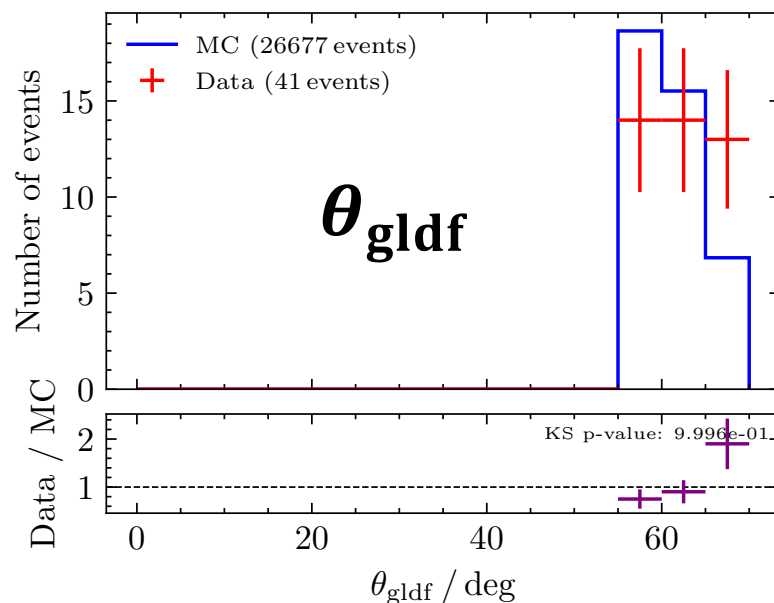
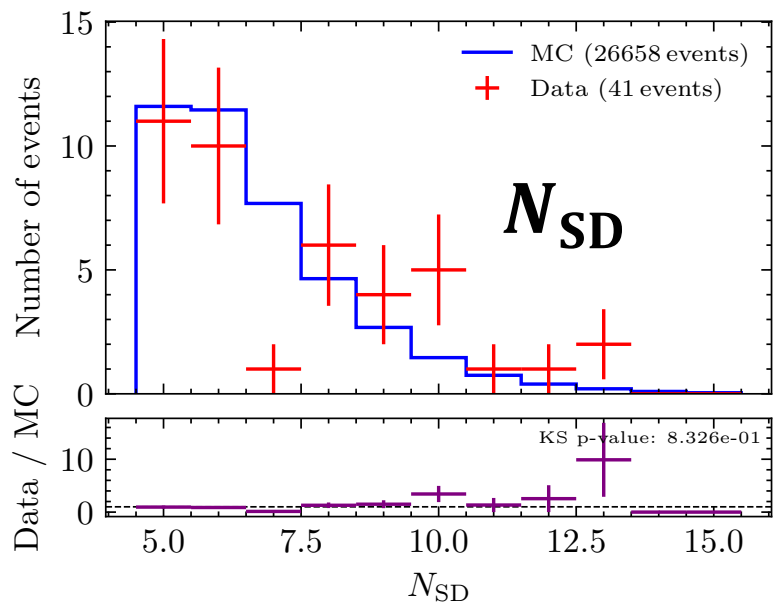
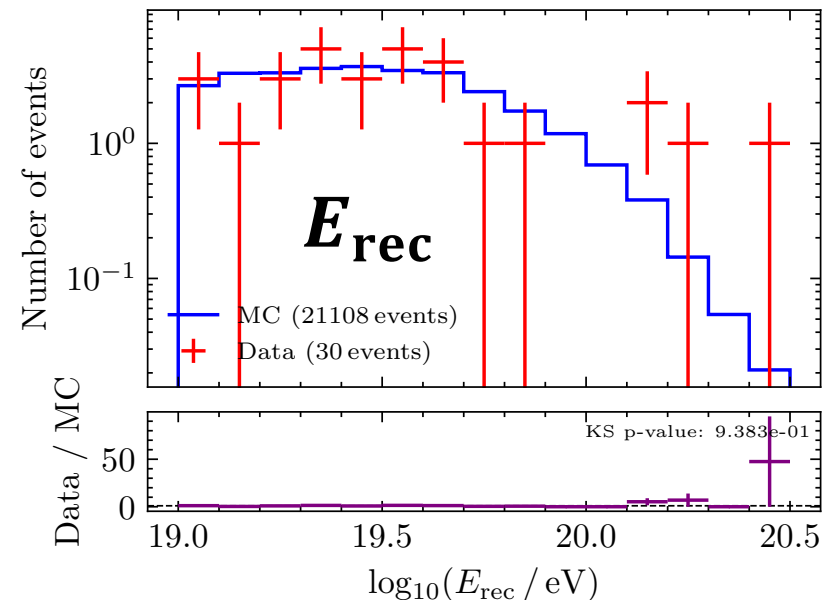
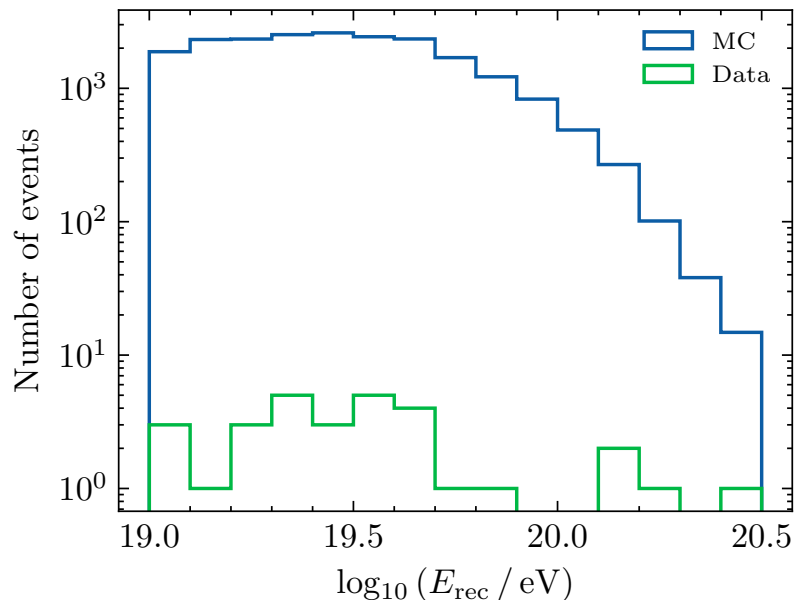
$$\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$$

$$\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$$

$$D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$$

**Area**  
normalize

**NOT**  
scaled  
energy



# SN

2019/10/08~  
2022/10/31

Selection criteria:

$N_{SD} \geq 5$

$55^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$

reduced  $\chi^2 \leq 4$

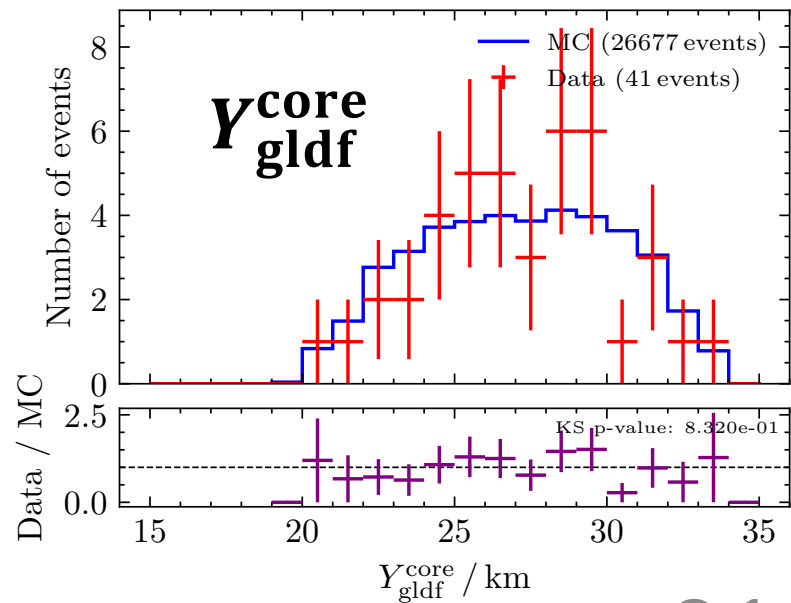
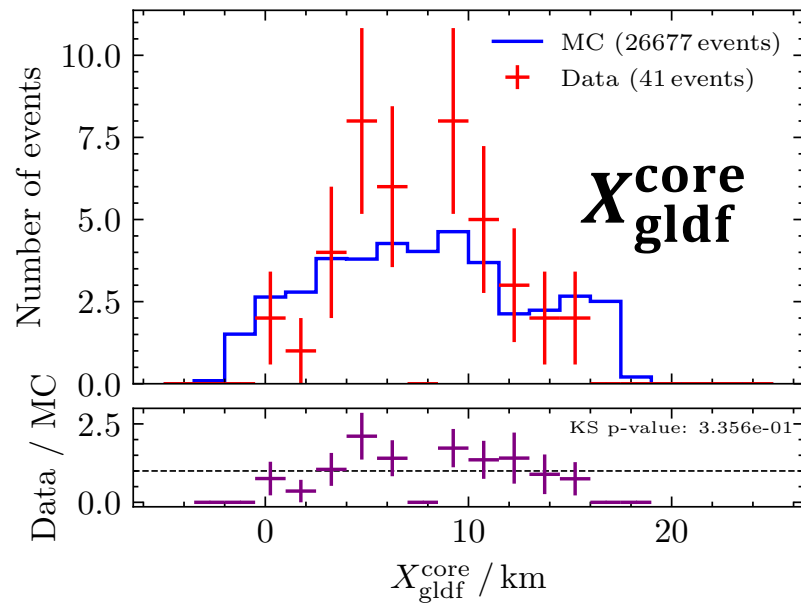
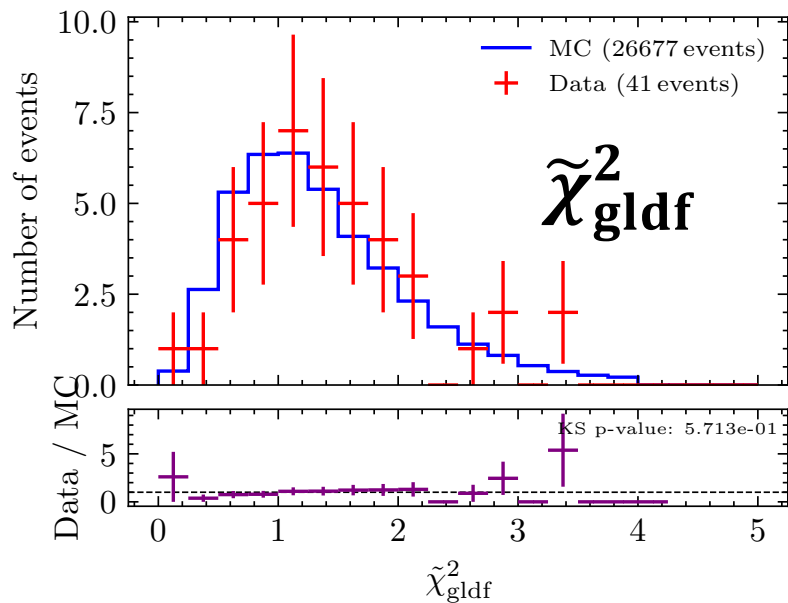
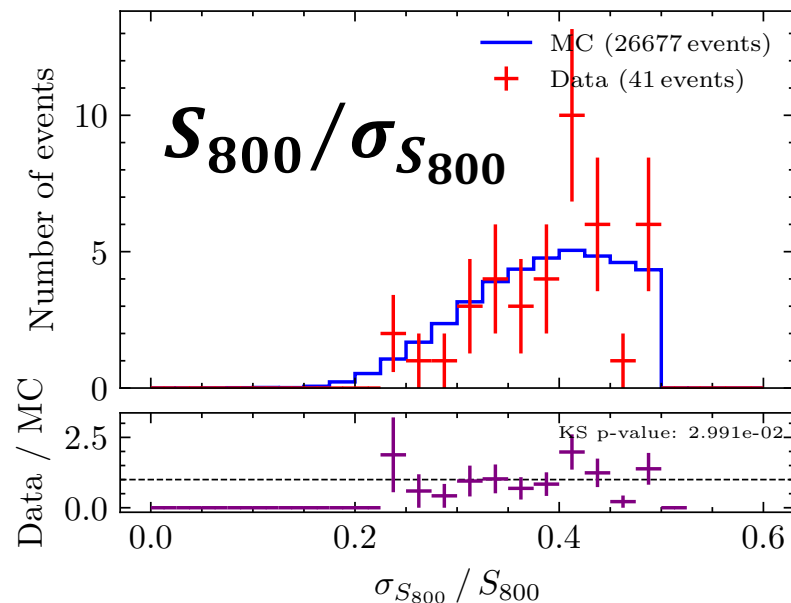
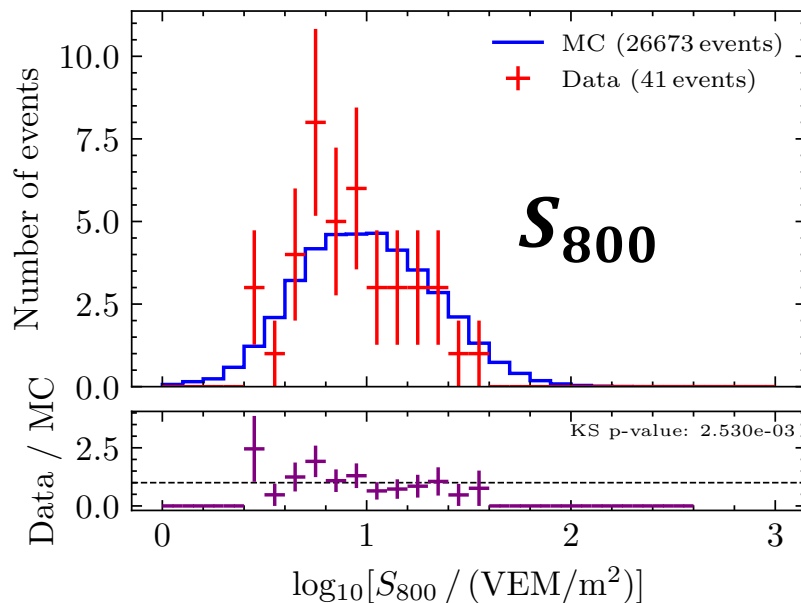
$\sigma_{S800} / S_{800} \leq 0.5$

$\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$

$D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$

**Area**  
normalize

**NOT**  
scaled  
energy



**BF**2019/11/04~  
2022/10/31

Selection criteria:

$N_{SD} \geq 5$

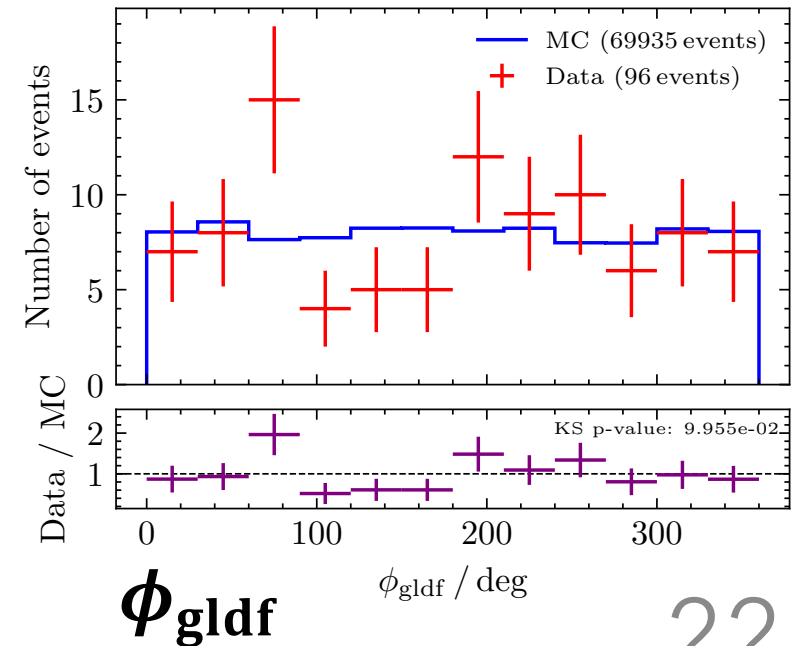
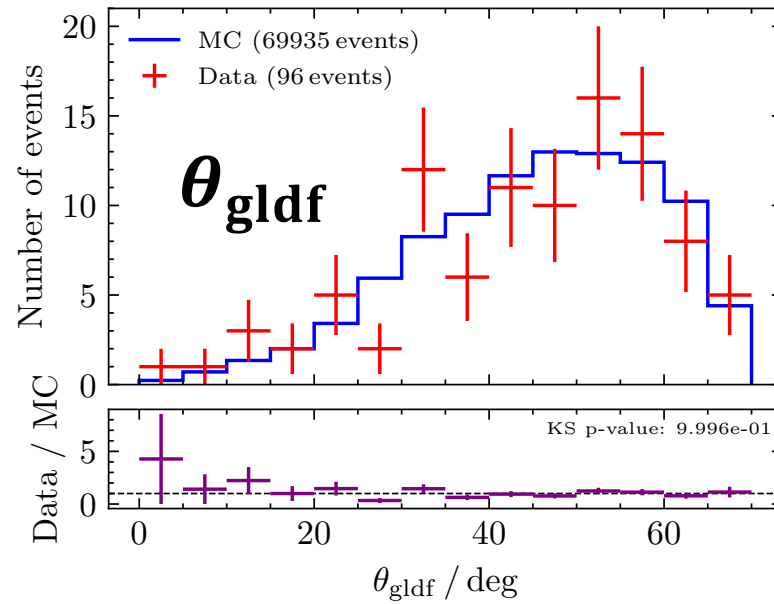
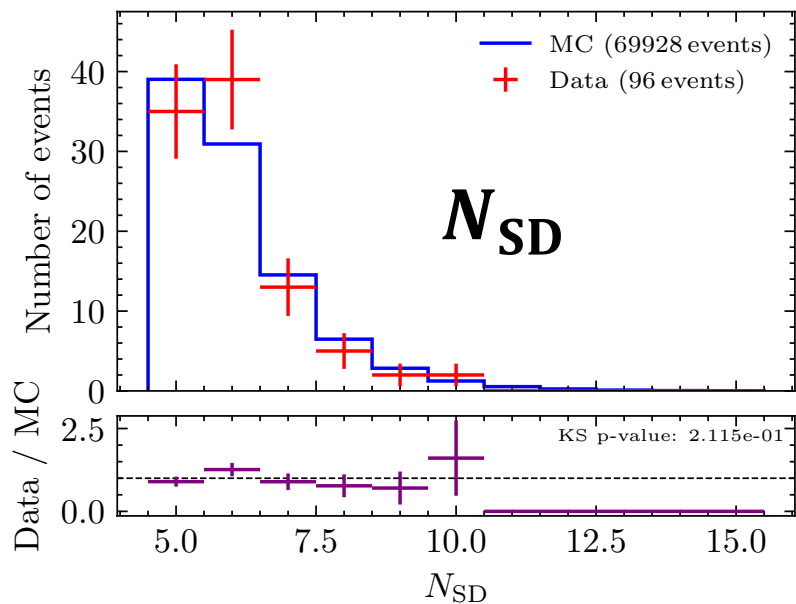
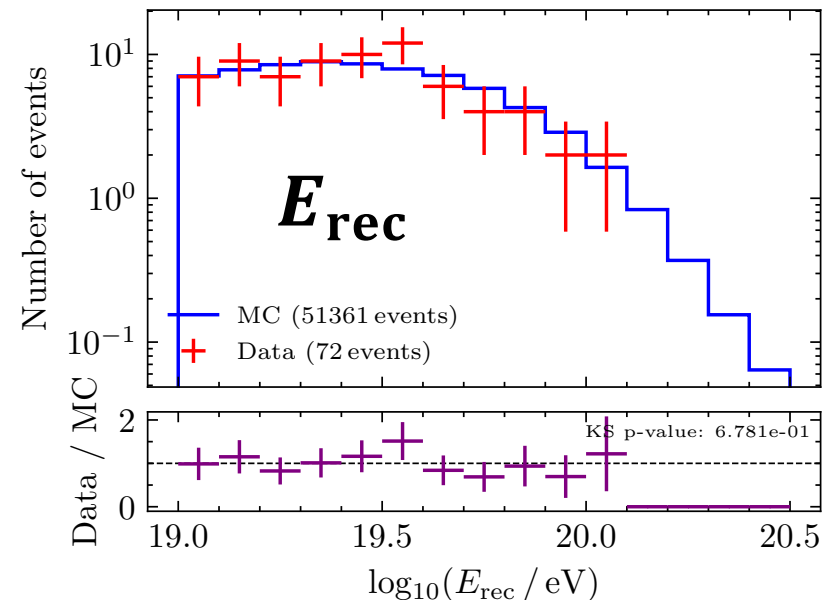
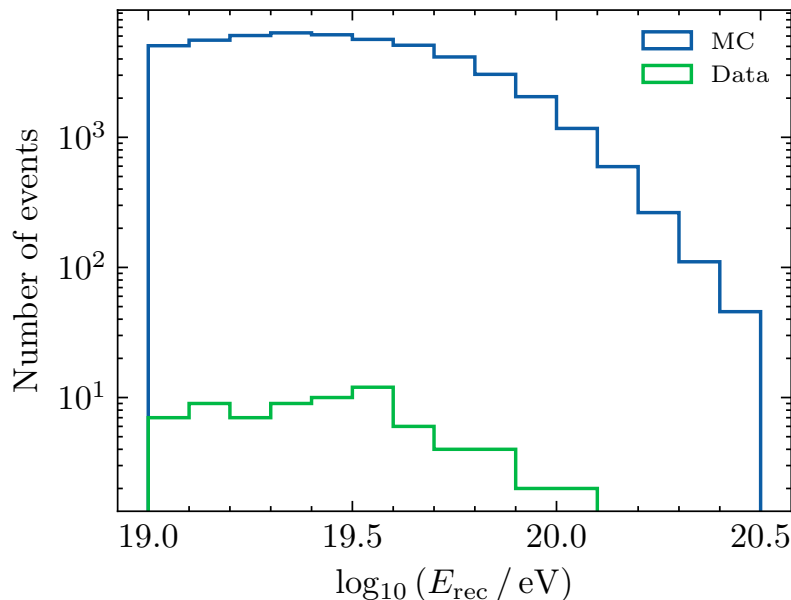
$\theta \leq 70^\circ$

reduced  $\chi^2 \leq 4$

$\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$

$\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$

$D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$

**Area**  
normalize**NOT**  
scaled  
energy

**BF**

2019/11/04~  
2022/10/31

Selection criteria:

$N_{SD} \geq 5$

$\theta \leq 70^\circ$

reduced  $\chi^2 \leq 4$

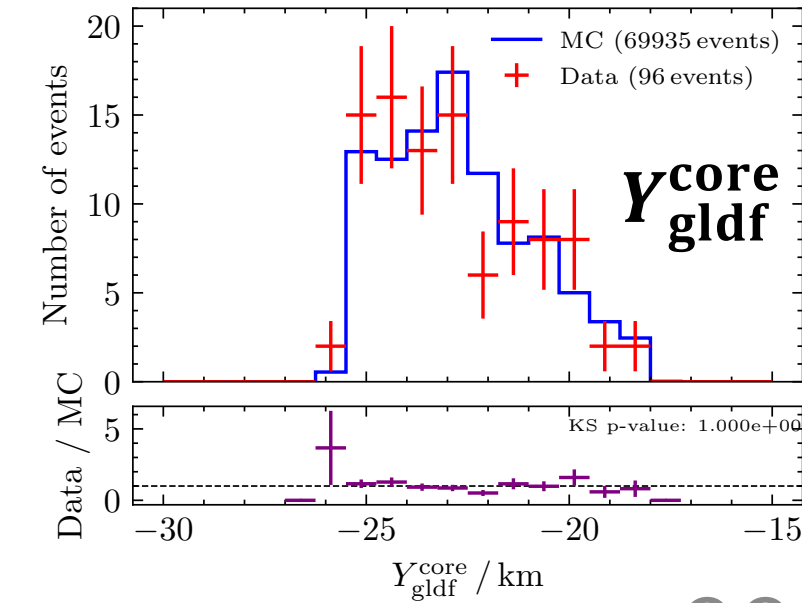
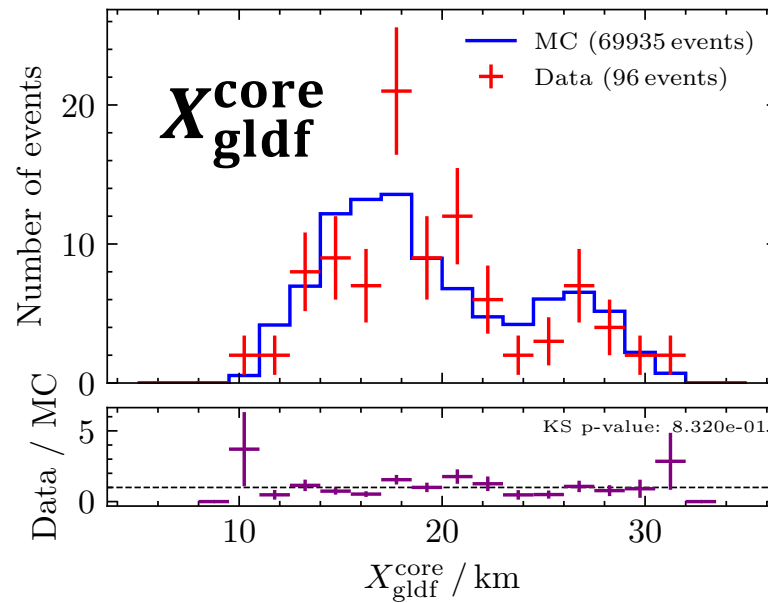
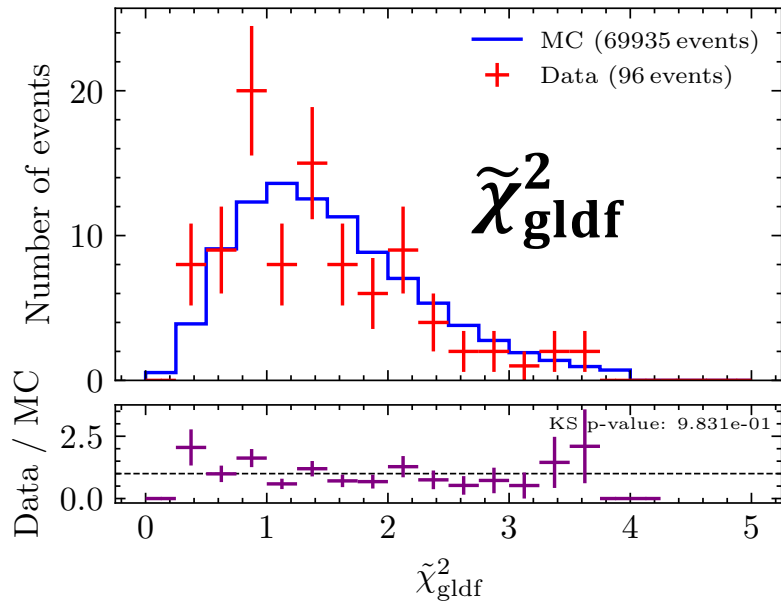
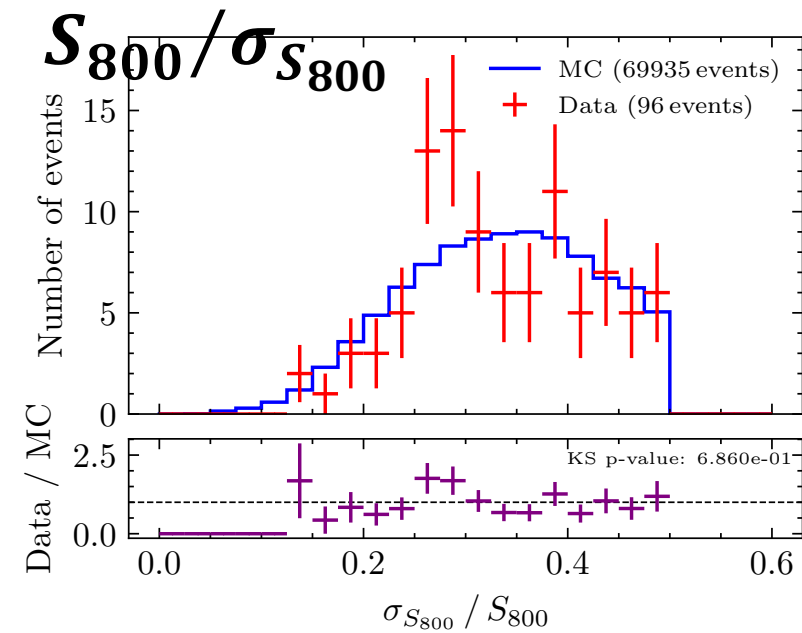
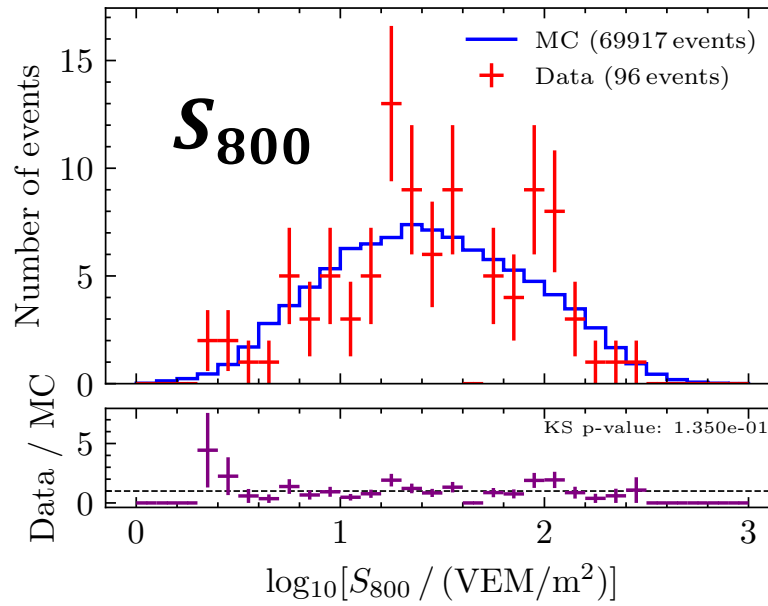
$\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$

$\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$

$D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$

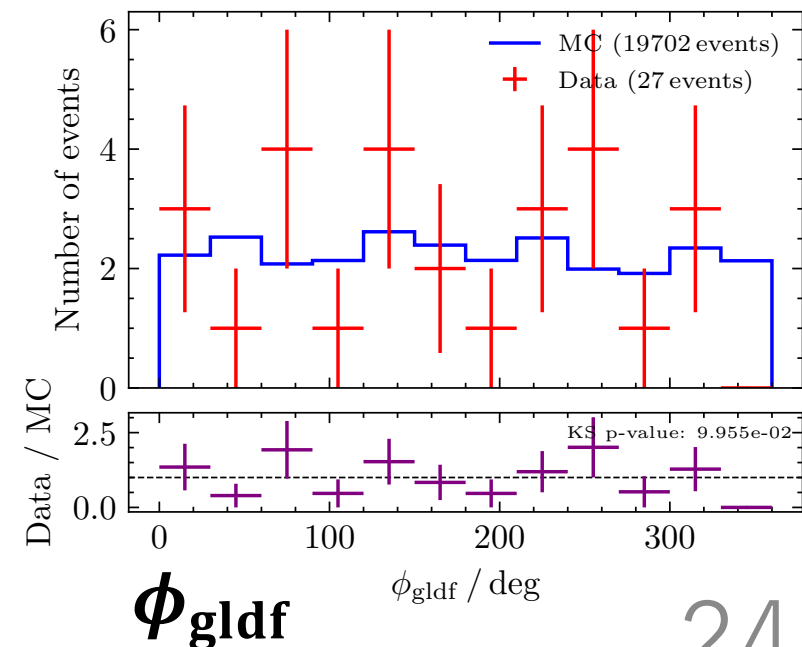
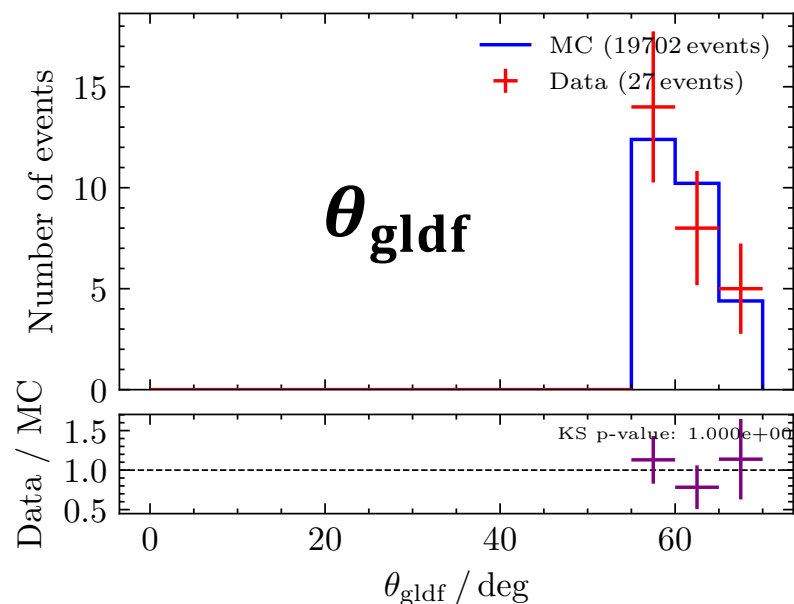
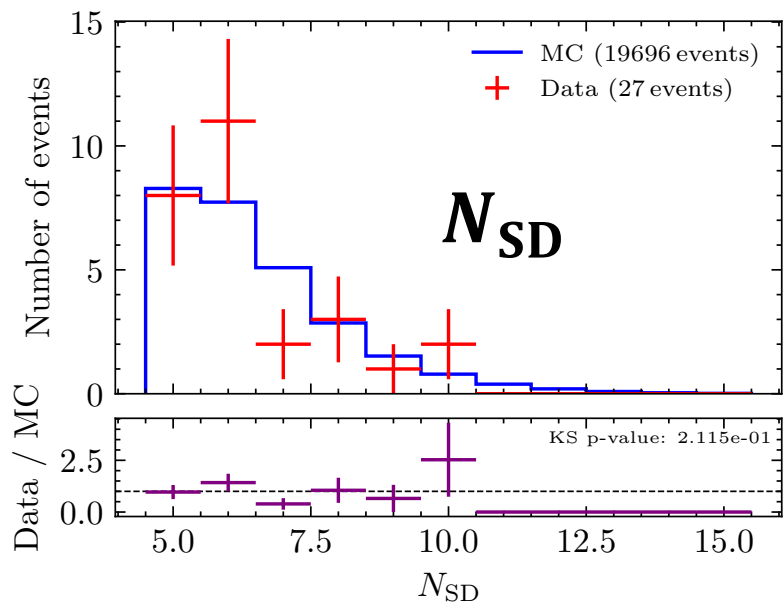
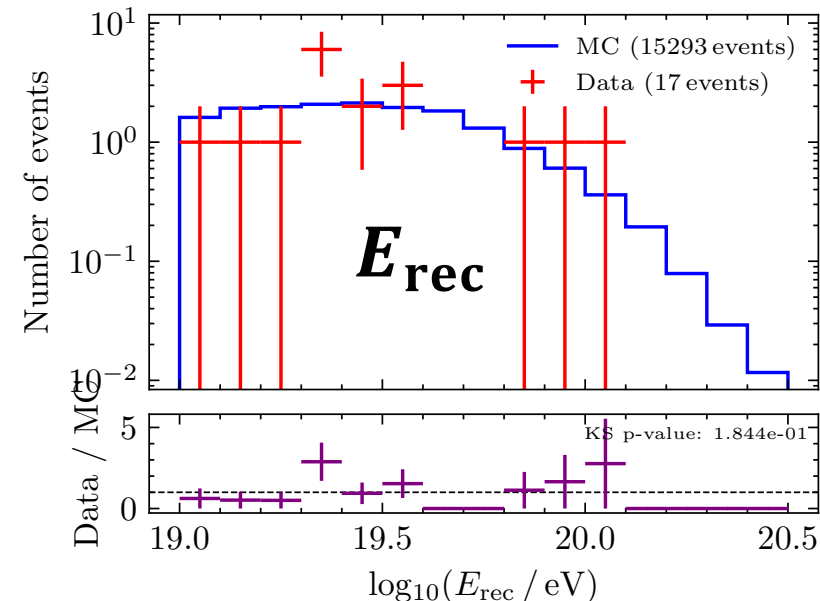
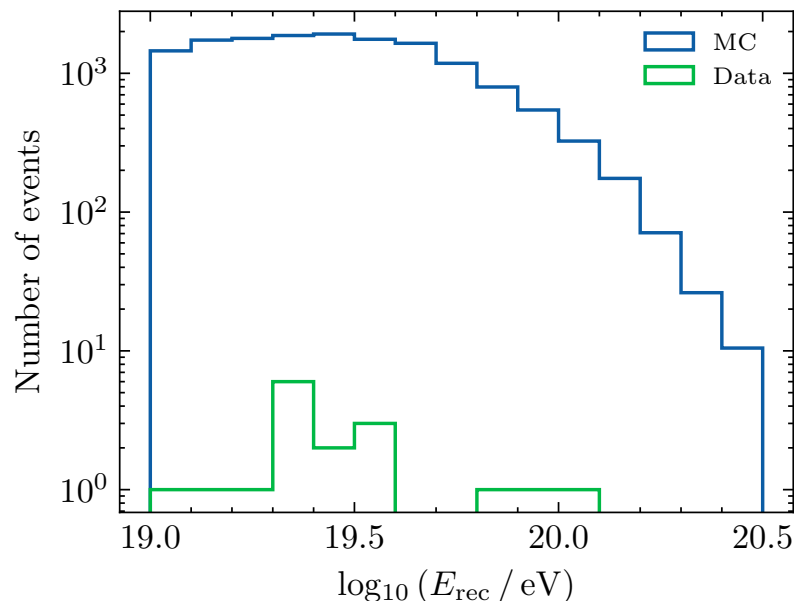
**Area**  
normalize

**NOT**  
scaled  
energy



**BF**2019/11/04~  
2022/10/31

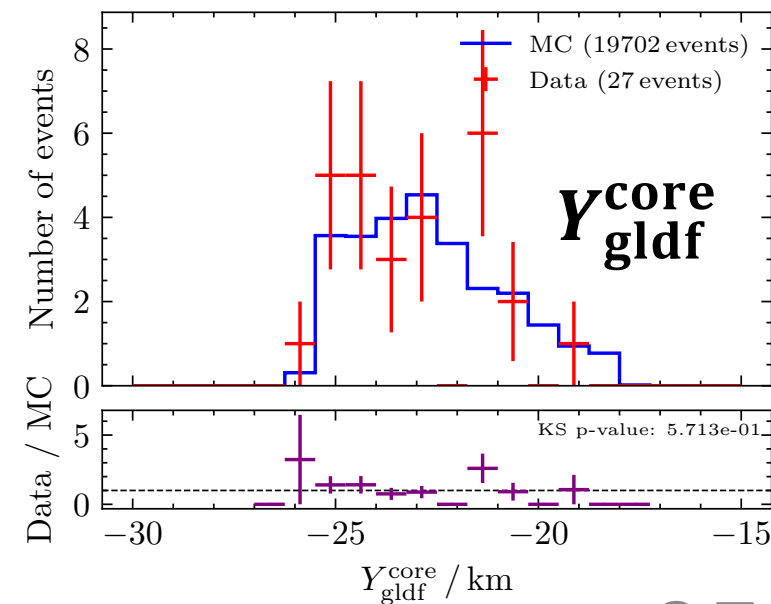
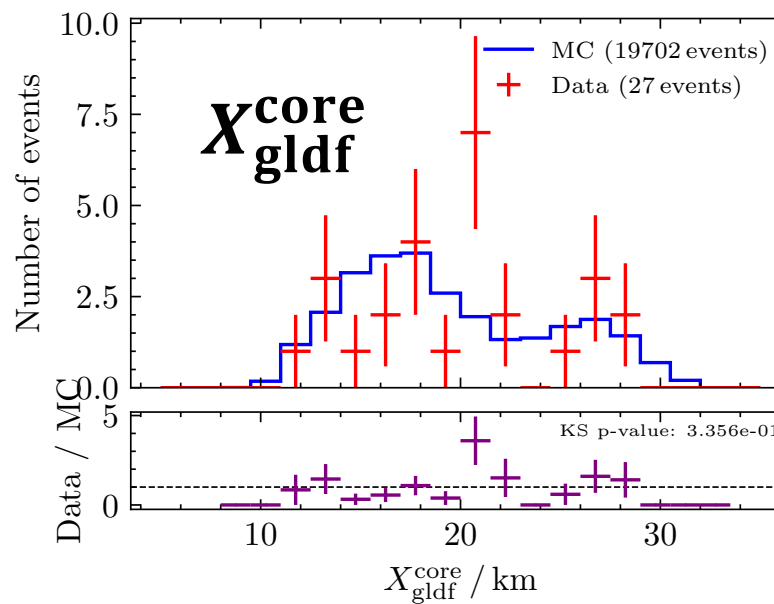
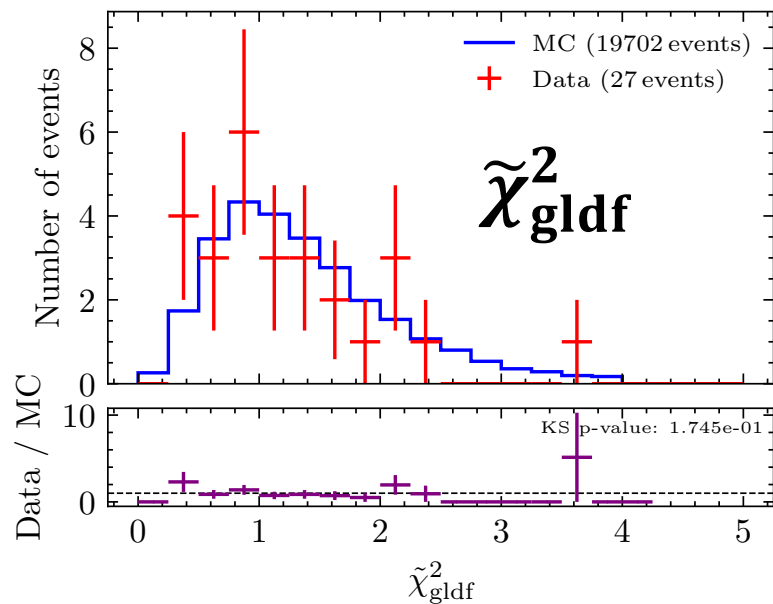
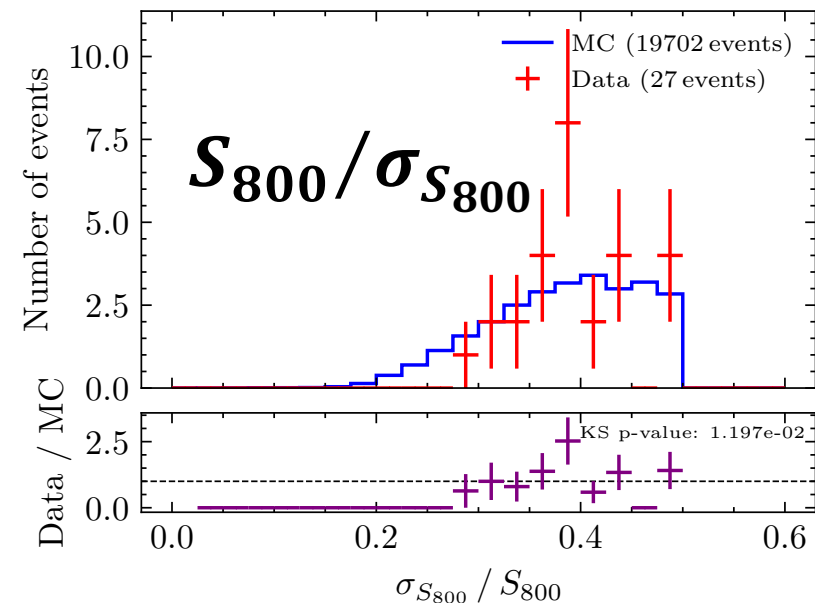
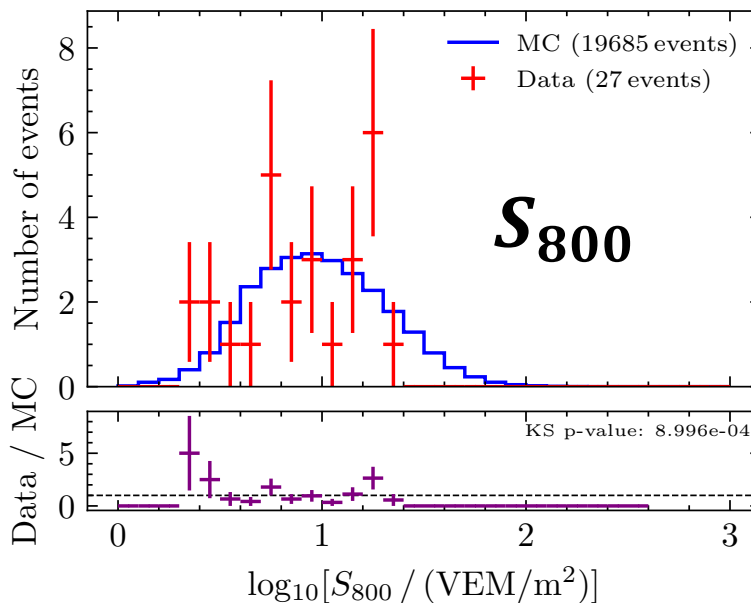
Selection criteria:

 $N_{SD} \geq 5$  $55^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ reduced  $\chi^2 \leq 4$  $\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$  $\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$  $D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$ **Area**  
normalize**NOT**  
scaled  
energy



**BF**2019/11/04~  
2022/10/31

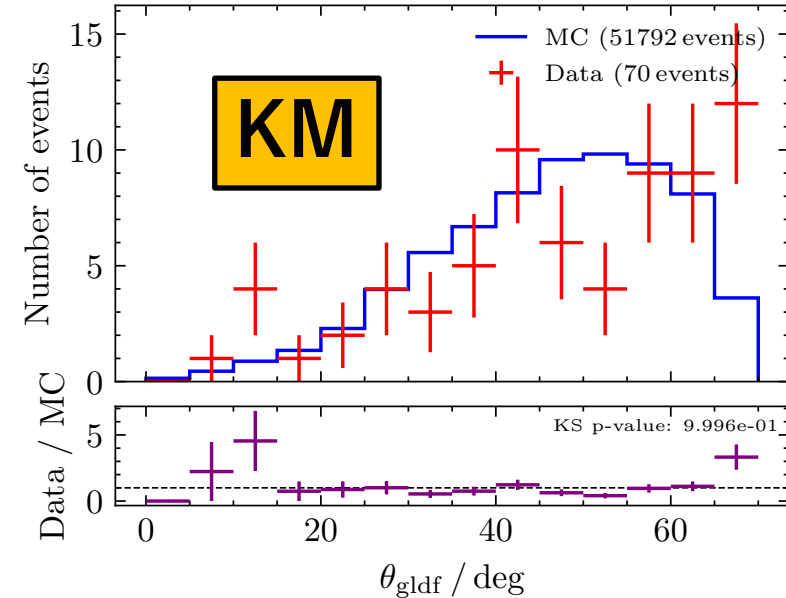
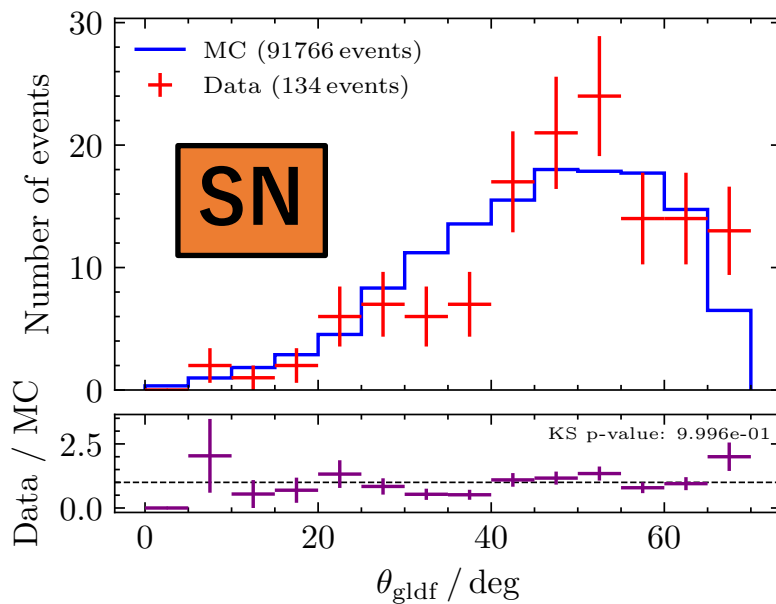
Selection criteria:

 $N_{SD} \geq 5$  $55^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ reduced  $\chi^2 \leq 4$  $\sigma_{S_{800}} / S_{800} \leq 0.5$  $\sigma_{\text{point direction}} \leq 8^\circ$  $D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$ **Area**  
normalize**NOT**  
scaled  
energy

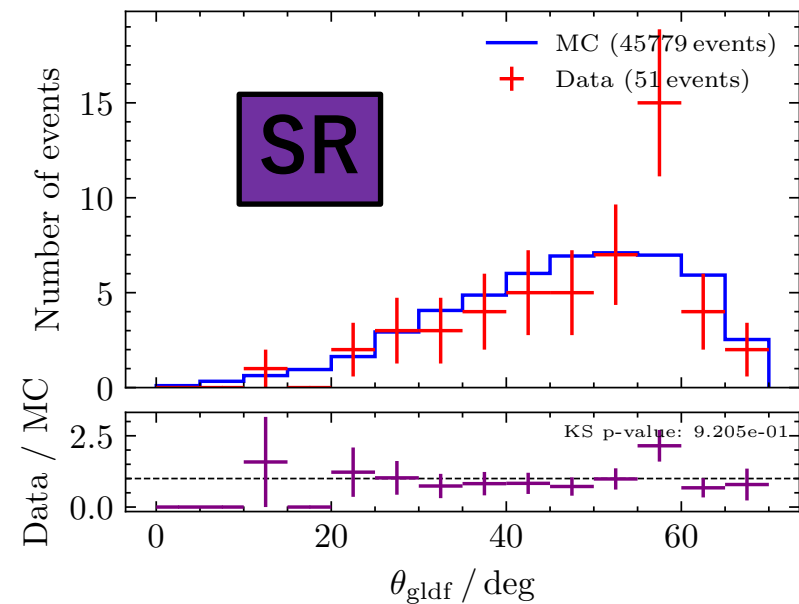
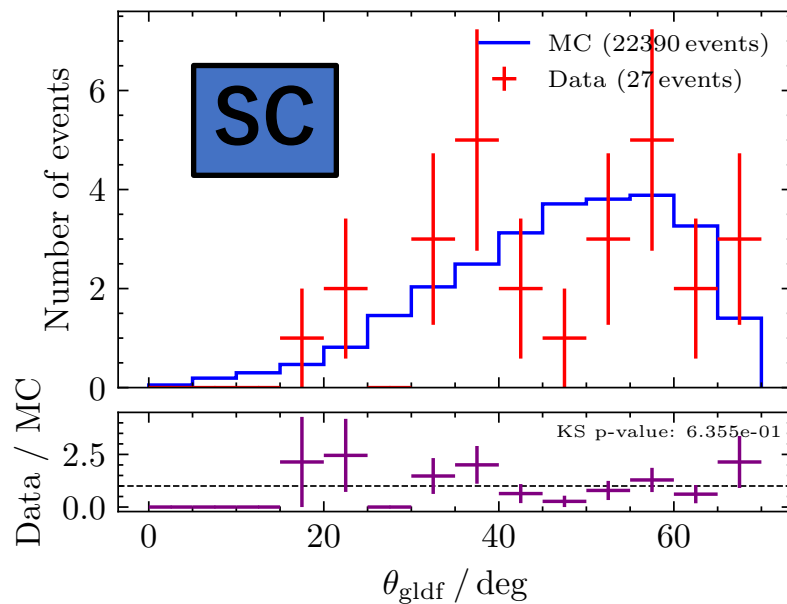
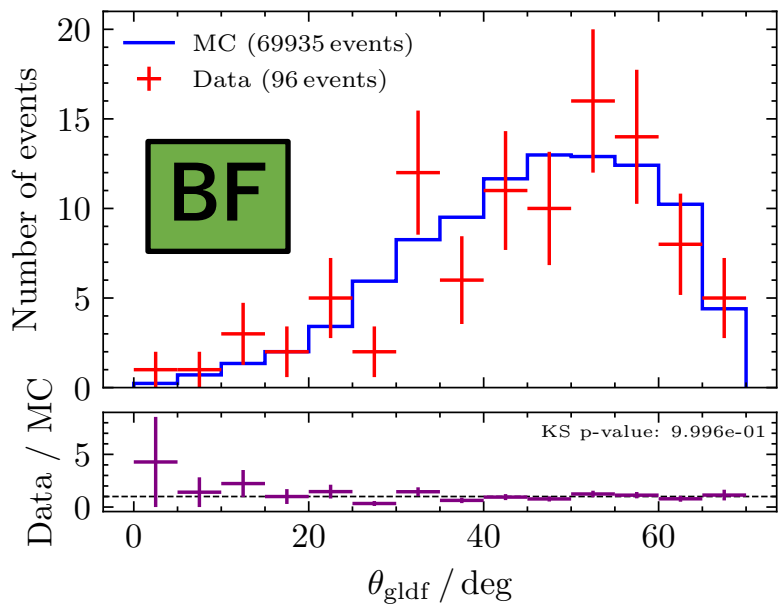
$\theta_{\text{gldf}}$

Area normalize

NOT scaled energy



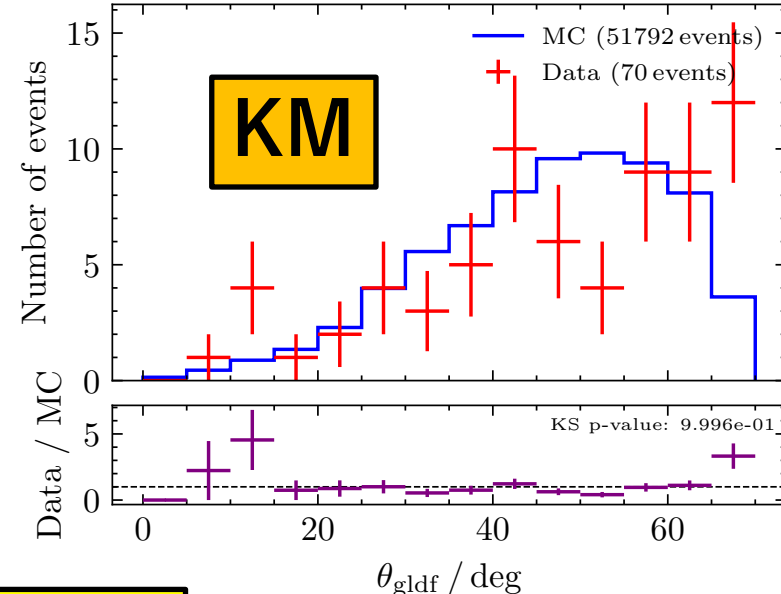
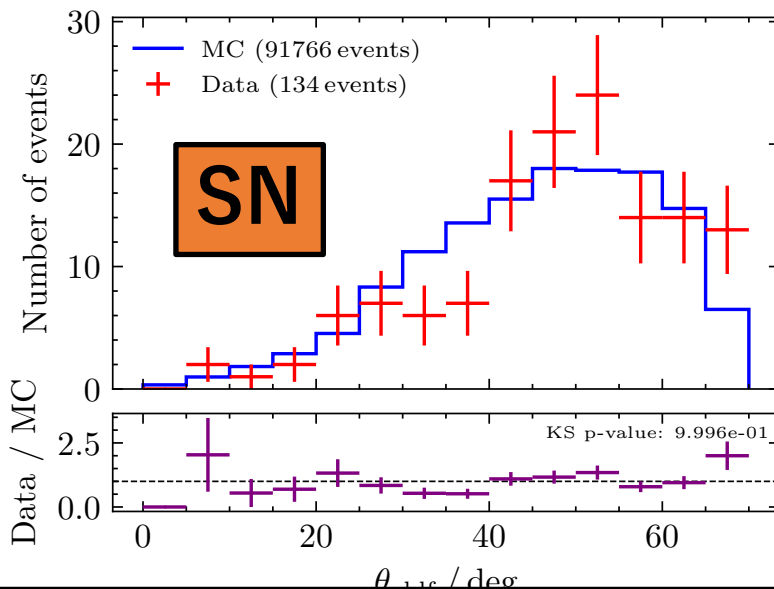
! DM has little events



$\theta_{\text{gldf}}$

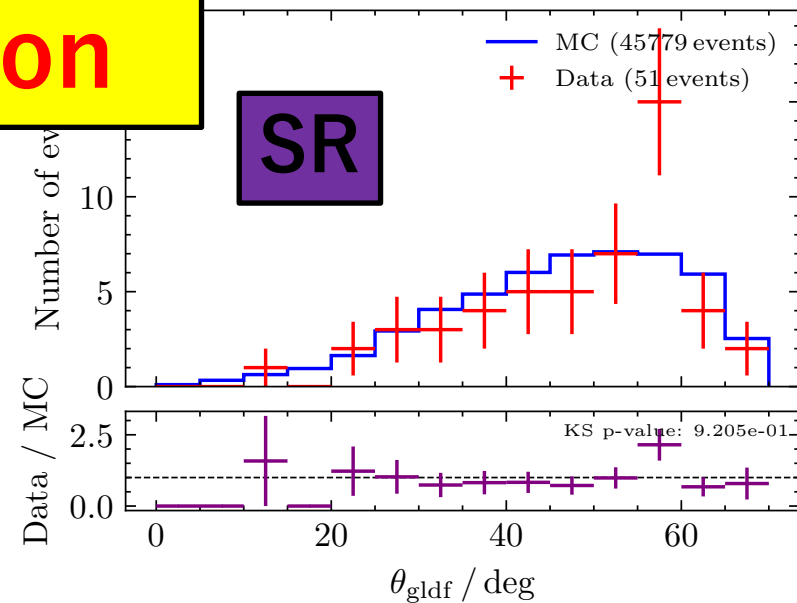
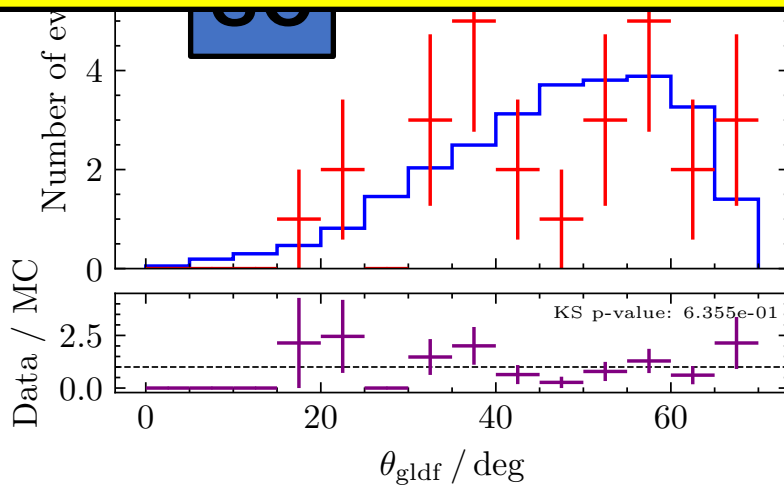
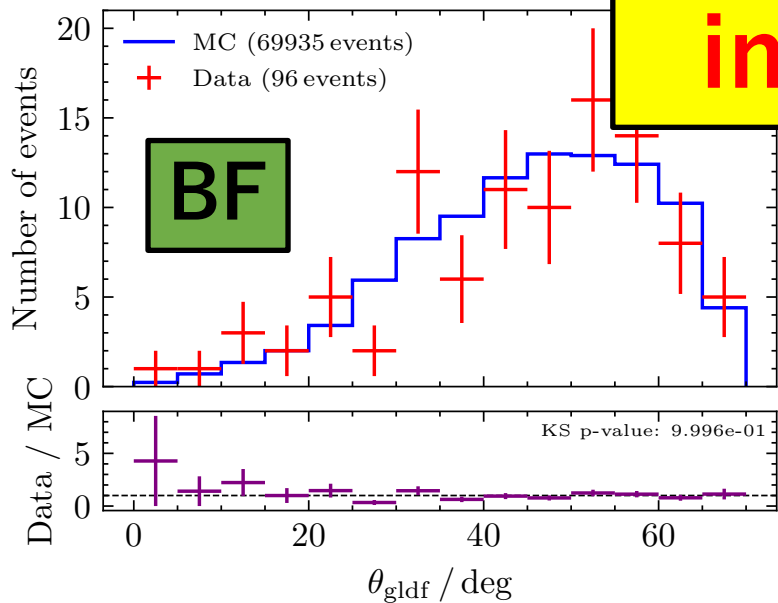
Area normalize

NOT scaled energy



**NO significant discrepancy in the large zenith region**

! DM has little events



# Energy spectrum

Flux

$$J_i = \frac{\sum_{\text{sub-arrays}} \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{Data}})_i}{\Delta E_i}}{\sum_{\text{sub-arrays}} \left[ \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{MC}})_i}{(N_{\text{gen}}^{\text{MC}})_i} A_{\text{gen}} \Omega_{\text{gen}} T \right]}$$

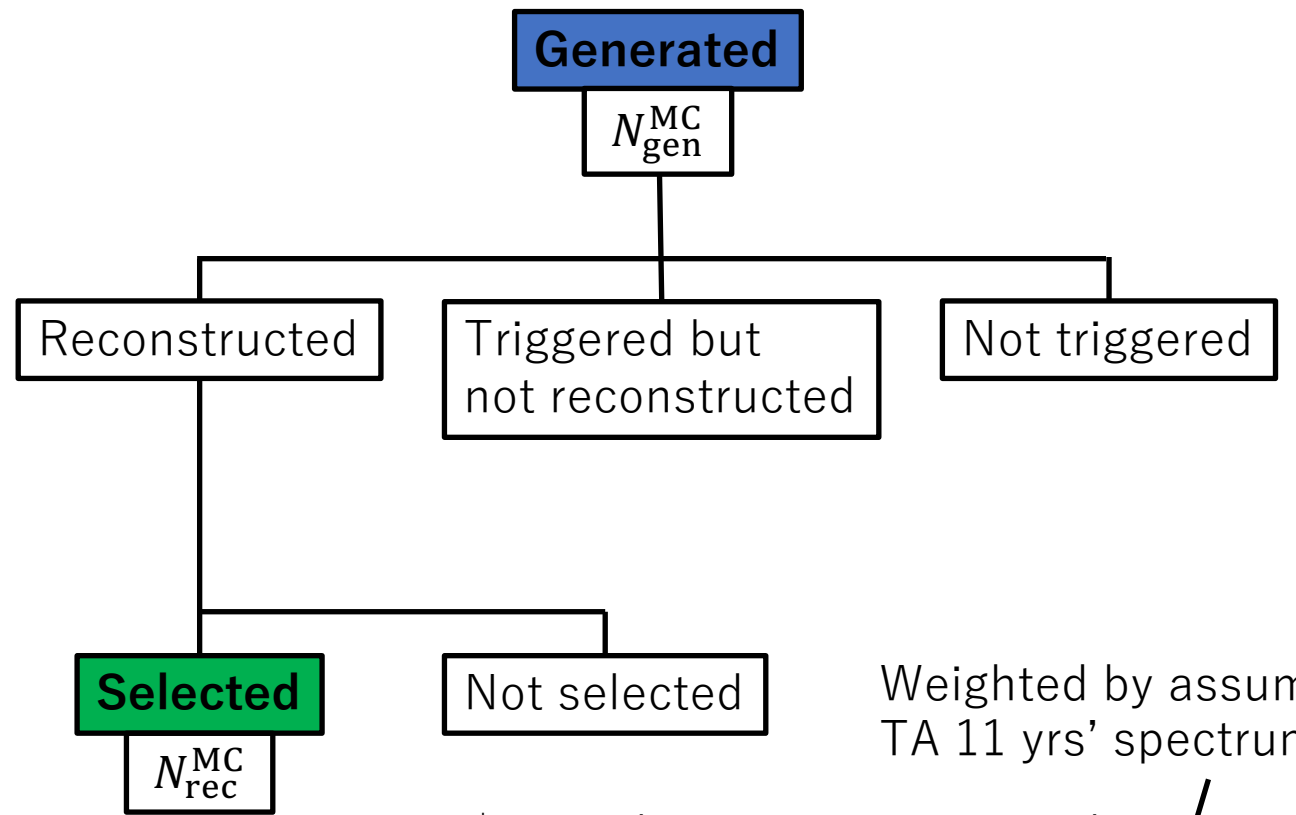
Aperture  
Effective aperture  
Exposure  
Effective exposure

$$\varepsilon_i(E_{\text{gen}}) = \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{MC}}(E_{\text{gen}}))_i}{(N_{\text{gen}}^{\text{MC}}(E_{\text{gen}}))_i}$$

Reconstruction efficiency

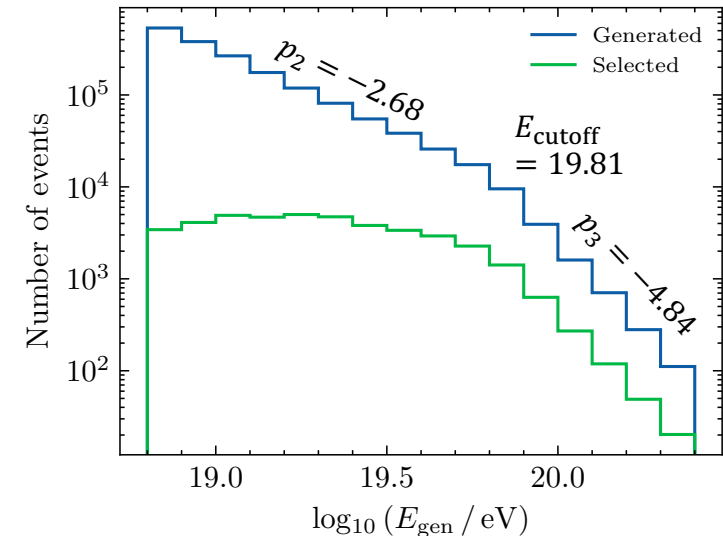
$$\varepsilon_i(E_{\text{gen}}, E_{\text{rec}}) = \frac{(N_{\text{rec}}^{\text{MC}}(E_{\text{rec}}))_i}{(N_{\text{gen}}^{\text{MC}}(E_{\text{gen}}))_i}$$

Reconstruction efficiency corrected for bin-bin migration

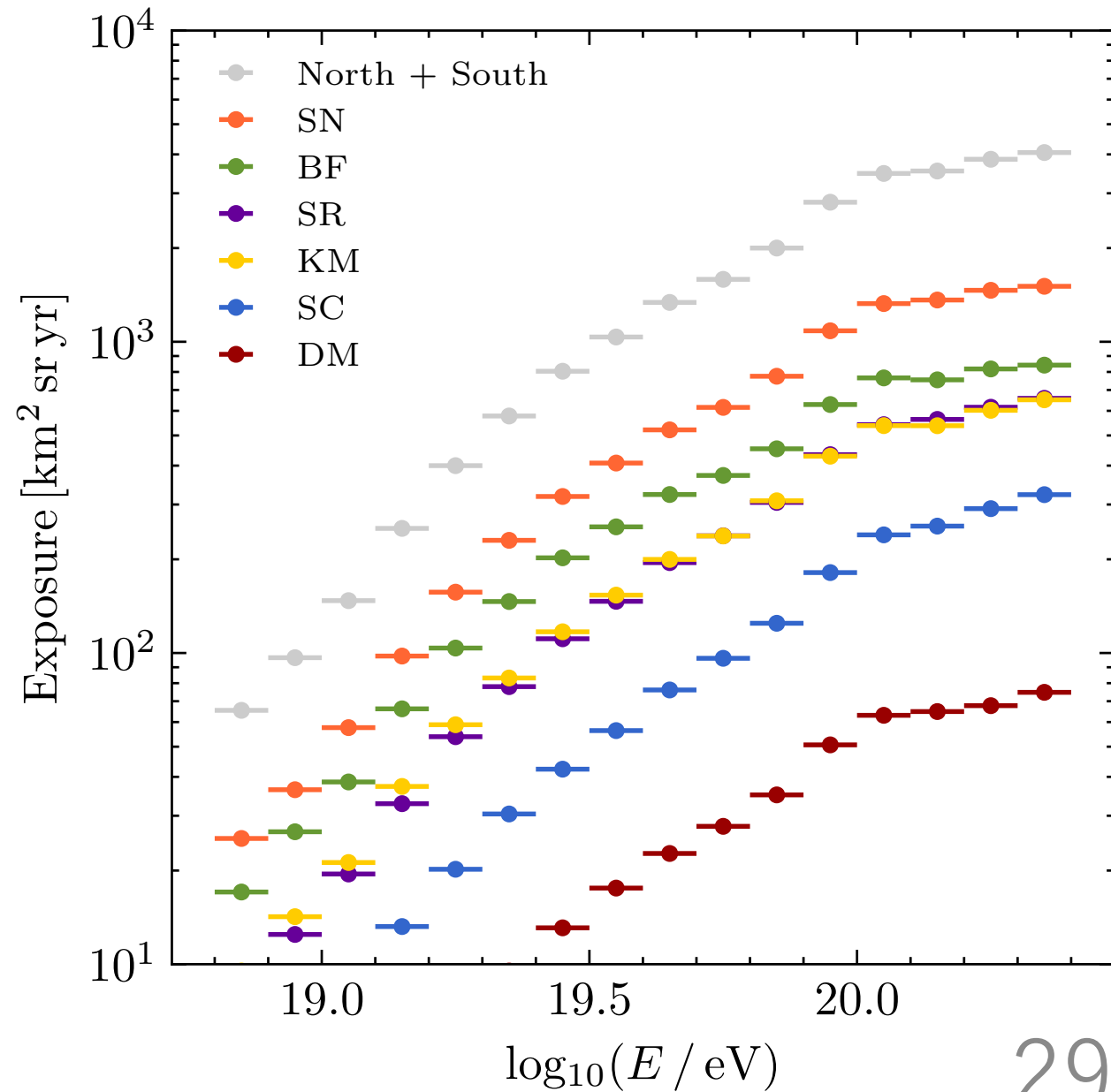
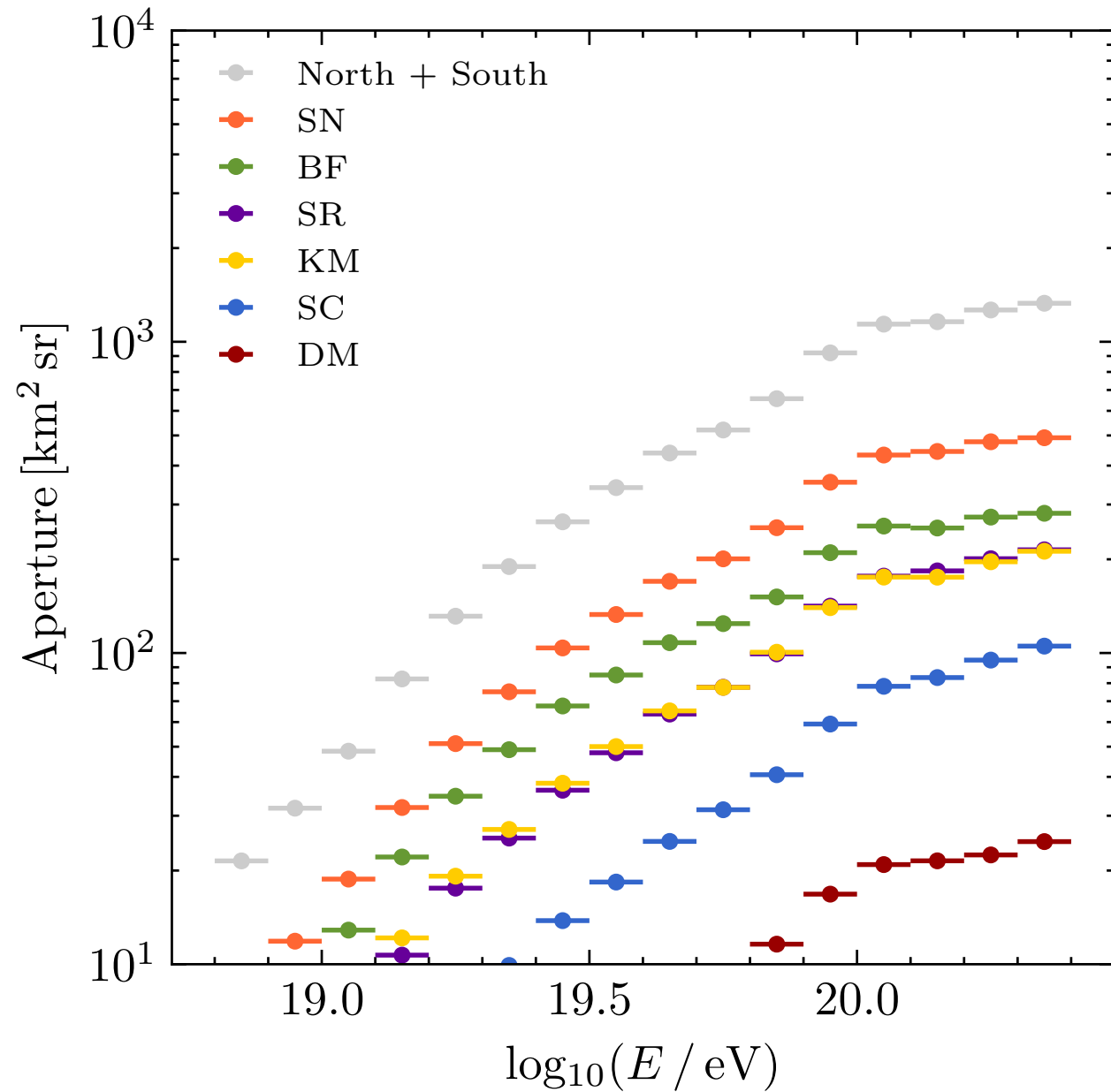


Weighted by assuming TA 11 yrs' spectrum

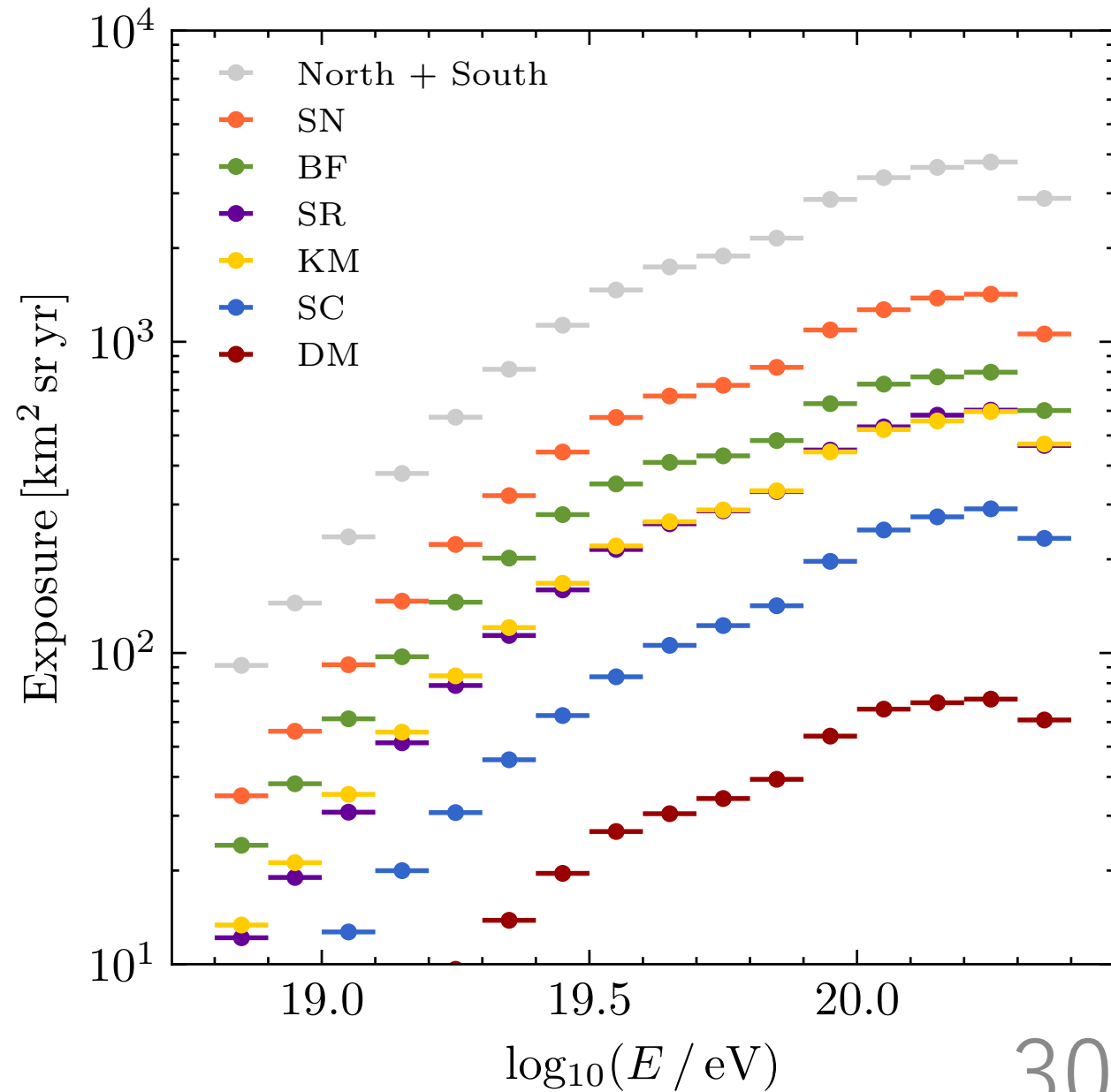
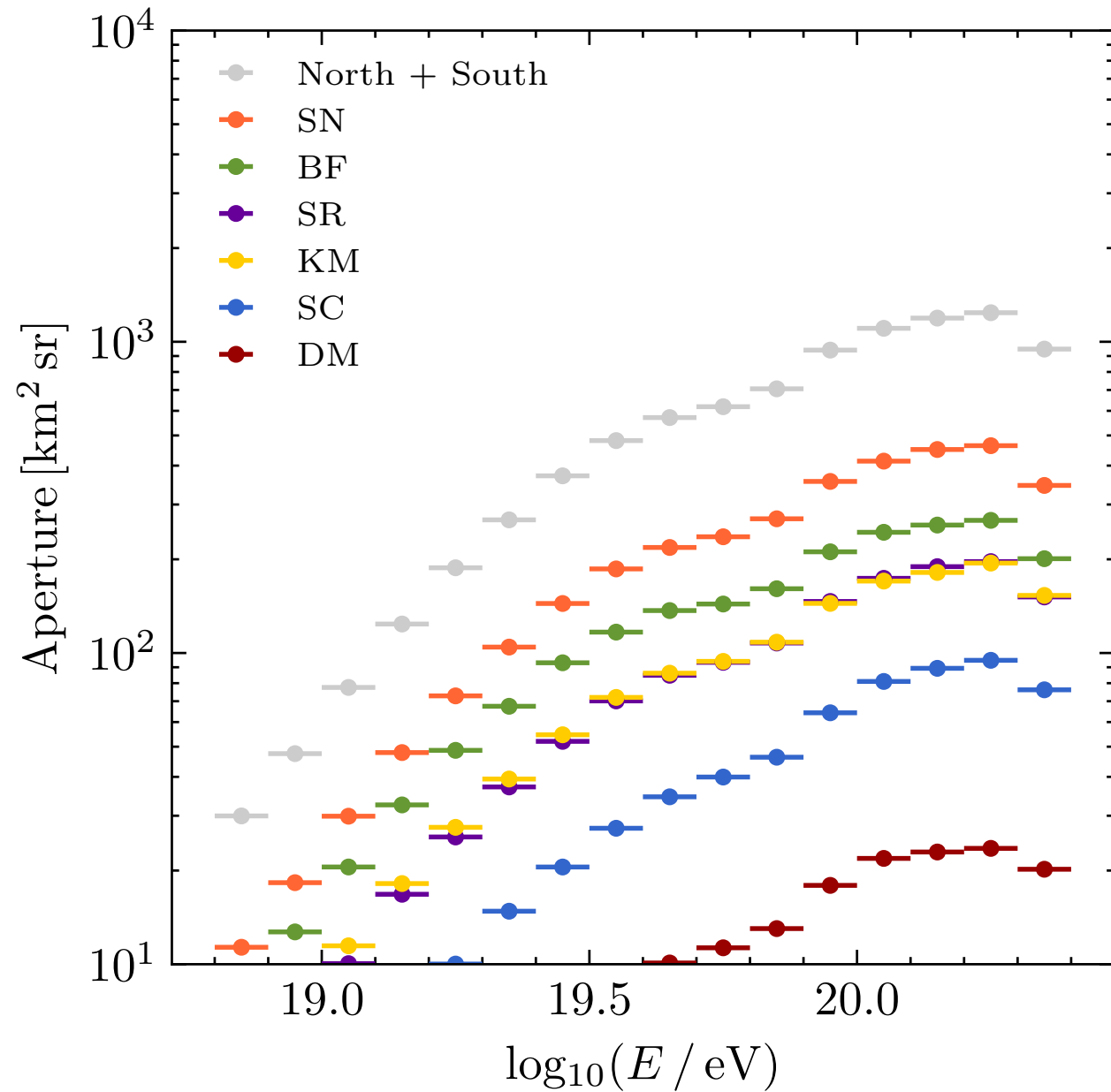
↓ BF sub-array as an example



# TAx4 SD Aperture & Exposure (original)

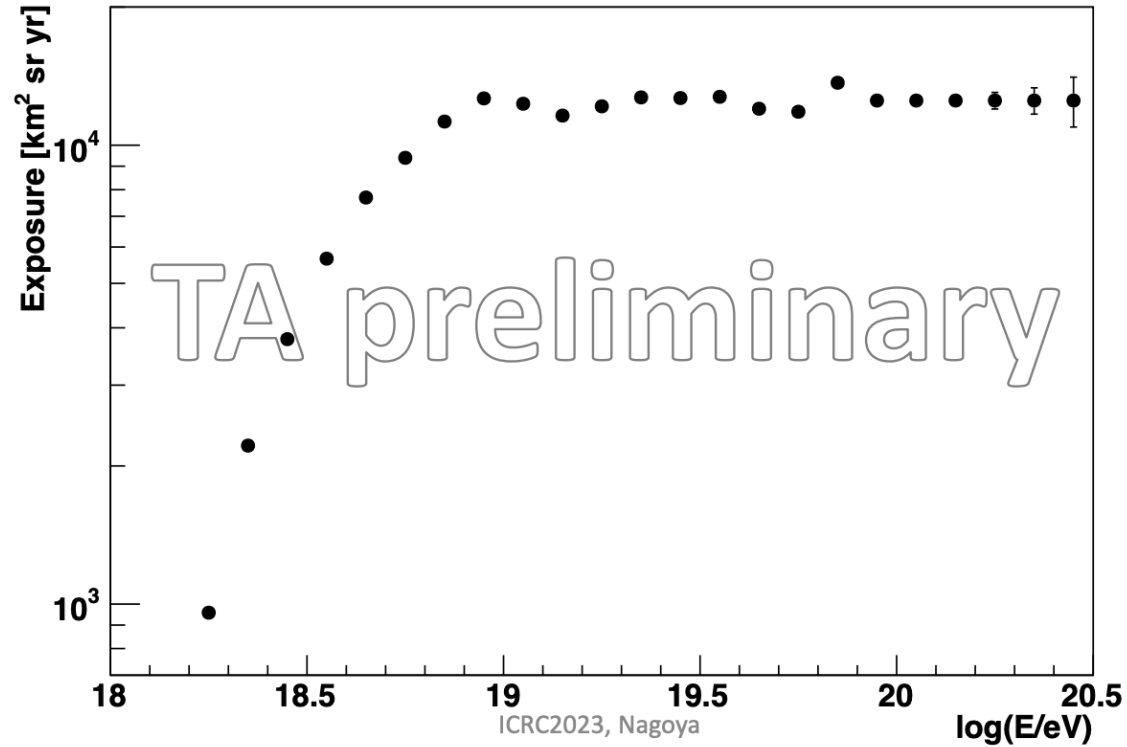


# TAx4 SD Aperture & Exposure (this work)



# TA SD Exposure & Spectra

14 years TA SD Exposure



TA SD Spectra

