

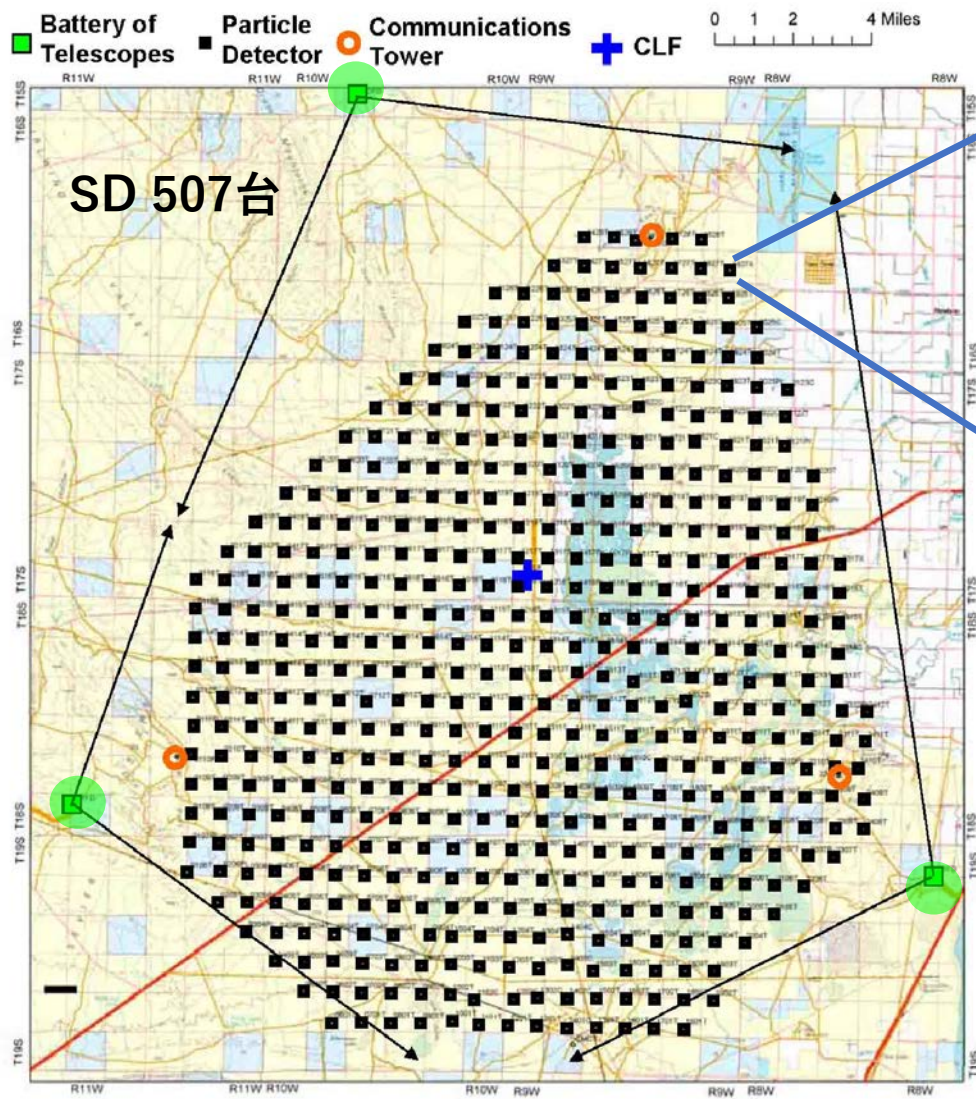
超高エネルギー宇宙線と他波長突発天体との 時間・方向一致事象の探索

東京大学 ICRR M1 高橋薫

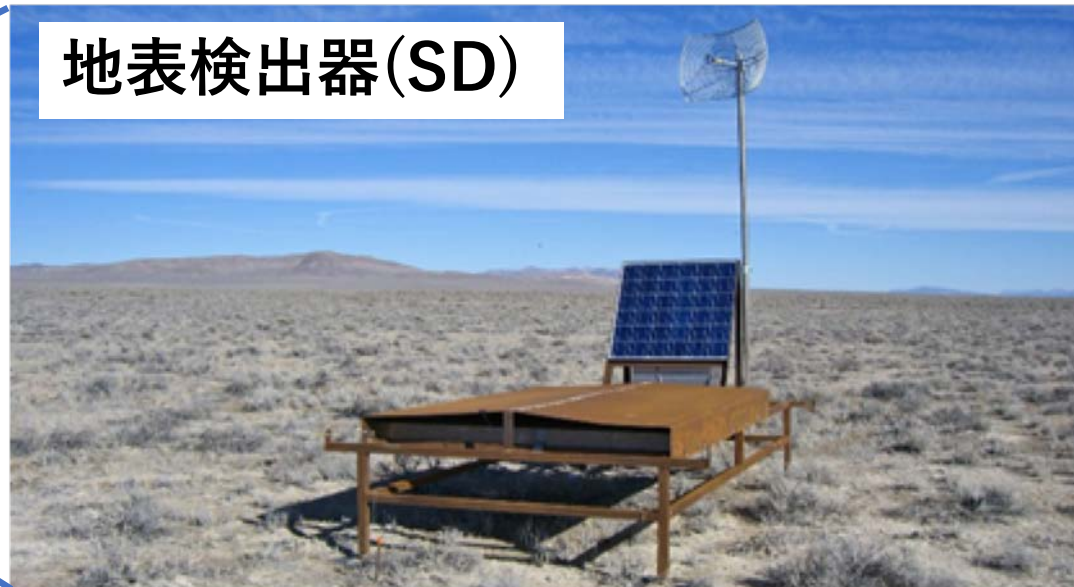
2022年 3月22日 第5回空気シャワー勉強会

テレスコープアレイ実験 (SD)

Desert of Delta, Utah, USA (西経113°, 北緯39°)



地表検出器(SD)



宇宙線空気シャワーを地表から観測

1.2km間隔で配置した507台のシンチレーション検出器アレイ (3m²) による観測

宇宙線の到来方向と到来時間がわかる

目次

- モチベーションと解析方法
- 先行研究と今回の解析
- time windowとBG推定方法
- 対象のイベントについて
- それぞれのイベントのBG期待値
- 結果
- まとめと今後

超高エネルギー宇宙線と他波長突発天体との時間・方向一致事象の探索 (TASDで中性粒子が観測されていることを期待)

モチベーション:

- 超高エネルギー宇宙線と他波長突発天体との**時間・方向の一致**を探す。
- 銀河系外由来
→ニュートリノシャワーを期待。
- 銀河系内由来
→ニュートリノ、ガンマ線、中性子シャワーを期待。

方法:

- TASDのデータと、FRBの方向と時間一致を探索。また、TXS0506、Cygnus、SGR 1935+2154方向とも電波・X線・ガンマ線・ニュートリノが観測された時間で一致を探索。

先行研究

TASDのデータから
neutrino-likeイベントを探索。
ニュートリノの有意な超過は
見られなかった。

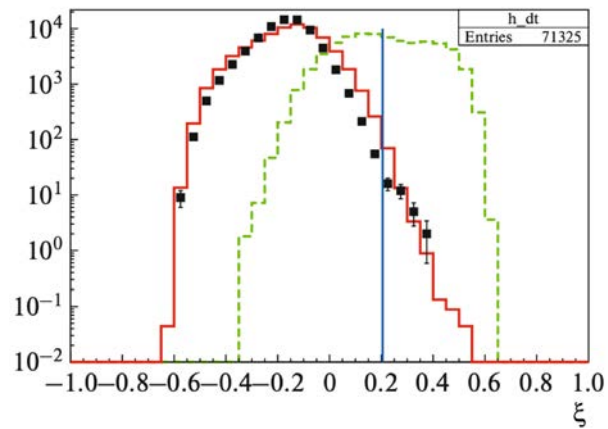


Fig. 2. The BDT ξ estimator histogram for $E > 10^{18.0}$ eV. Proton MC is shown with solid red line, neutrino MC is shown with dashed green line, while black dots represent the data. Vertical blue line indicates the median value of ξ .

R. U. Abbasi et al., "Search for **Ultra-High-Energy Neutrinos** with the Telescope Array Surface Detector"
JETP, 131, 255-264 (2020).

TASDのデータから
gamma-ray-likeイベントを探索。
ポイントソースは見つからなかった。

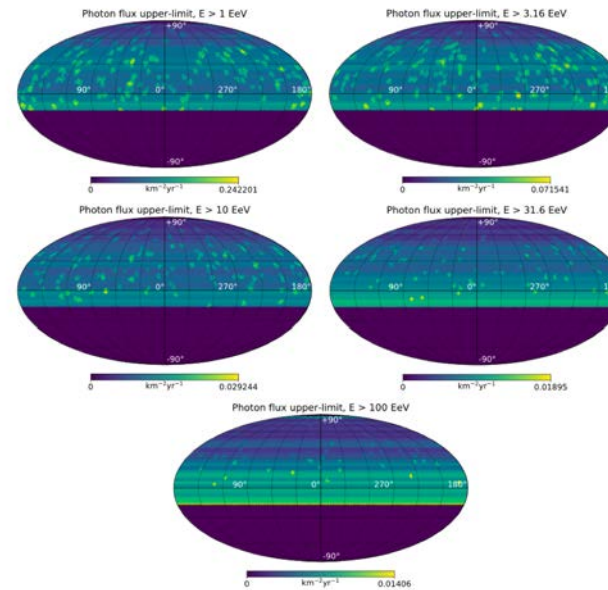


Figure 3. Maps of point-source photon-flux upper limits (95 percent CL) for various photon energies calculated with a zero background assumption and plotted in equatorial coordinates.

R. U. Abbasi et al., "Search for **point sources of ultra-high-energy photons** with the Telescope Array surface detector"
MNRAS 492, 3984-3993 (2020).

Monthly Notices of Royal Astronomical Society 492, 3984–3993 (2020)

TASDの全データの
ポイントソースを探索。
加えてTASDのデータと
フェルミの銀河系内天体との
方向一致を探索。
有意な一致は見られなかった。

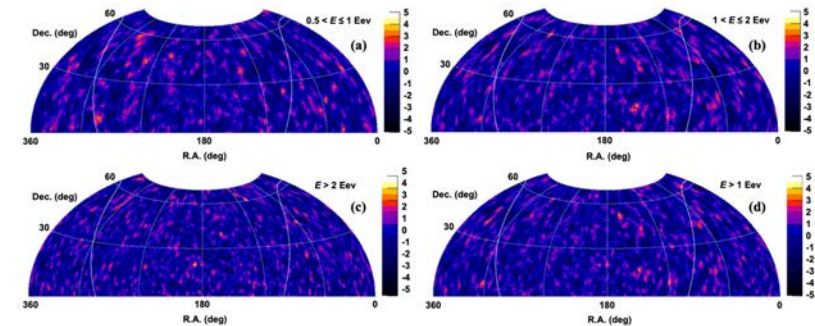


Figure 7. Significance maps of the northern sky between decl. = 0° and decl. = 70° surveyed by TA SD in four energy regions: (a) $0.5 < E \leq 1$ EeV, (b) $1.0 < E \text{ (EeV)} \leq 2.0$, (c) $E \text{ (EeV)} > 2.0$, and (d) $E \text{ (EeV)} > 1.0$. Color contours show significance levels. Solid curves indicate the Galactic plane.

R. U. Abbasi et al., "A NORTHERN SKY SURVEY FOR **POINT-LIKE SOURCES** OF EeV NEUTRAL PARTICLES WITH THE TELESCOPE ARRAY EXPERIMENT " (2015)
doi:10.1088/0004-637X/804/2/133

The Astrophysical Journal, 804:133 (11pp), 2015 May 10
© 2015. The American Astronomical Society

今回の解析

TASDのデータと中性粒子の**時間・方向一致**の探索

- ・ TASDで中性粒子のシャワーを観測できていると期待
- ・ 到来方向に加えて到来時間についても一致事象を探索

使用したTASDのデータ

- ・ データセット： $E > 1 \text{ EeV}$

$\theta < 45 \text{ degrees}$

$N_{sd} \geq 5$ (number of good SDs that are part of the event)

$D_{border} > 1200\text{m}$ (standard border cut)

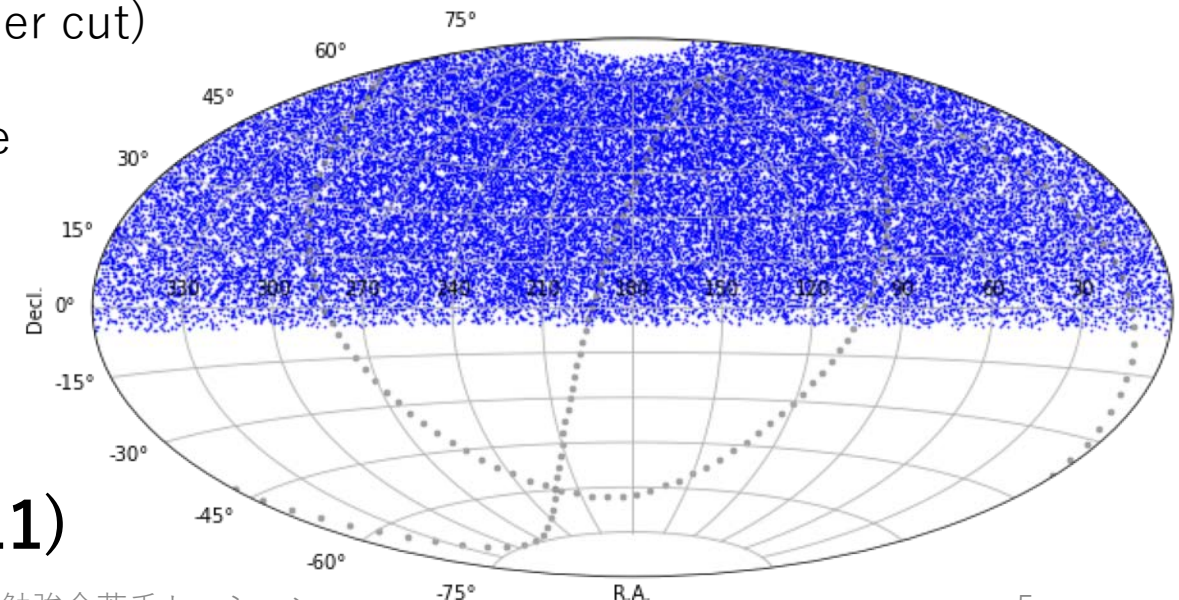
χ^2/dof of geom and ldf fits < 4

Pointing direction error $< 5 \text{ degree}$

$\text{Sigma}_{S800} / S800 < 0.25$

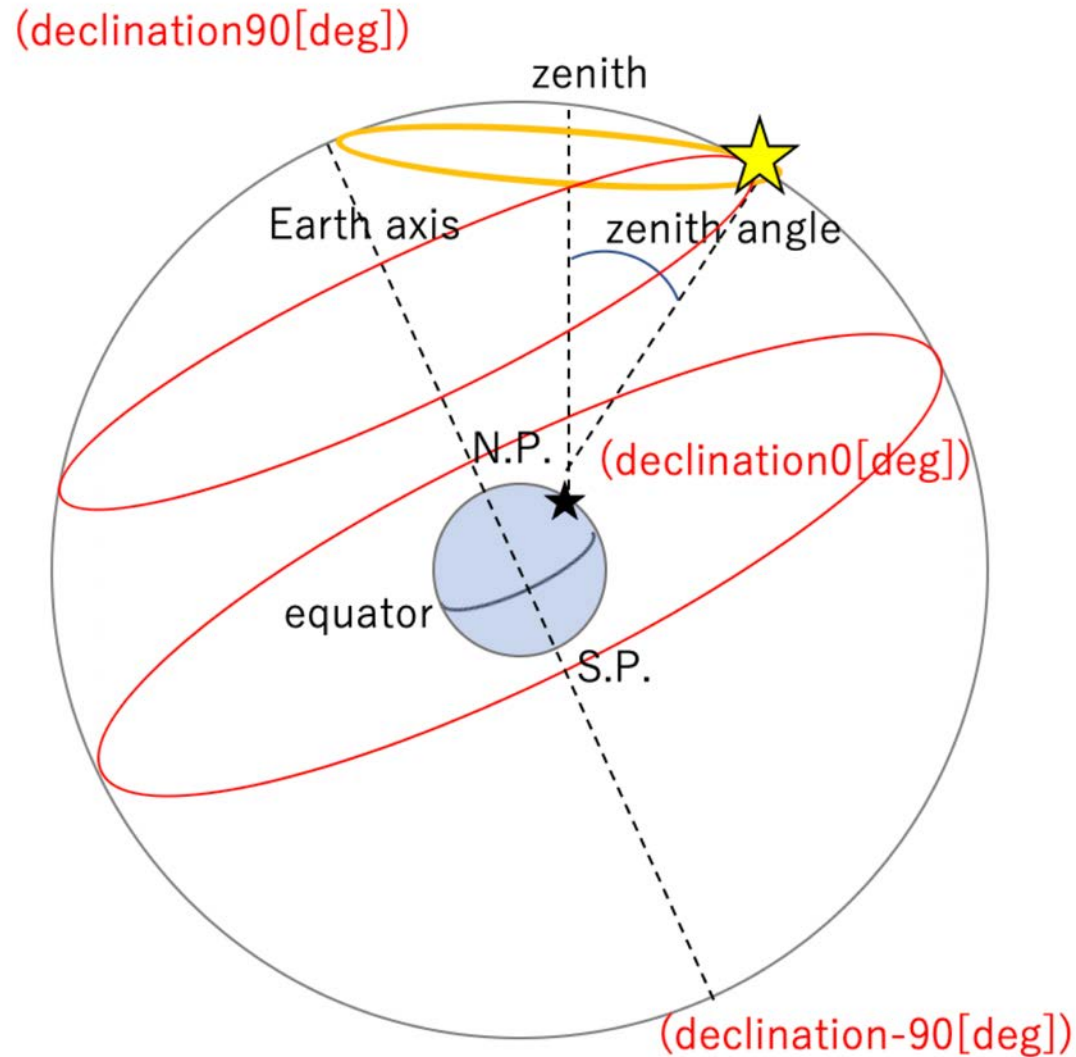
- ・ データ数：**40,260 イベント**

- ・ 期間：**13 年間 (2008/05/11 - 2021/05/11)**



time windowとBG推定方法

対象事象のタイムスケールに応じて、宇宙線BG期待値を2つの方法で推定



- **short time scale**

zenith angle分布よりBGを推定

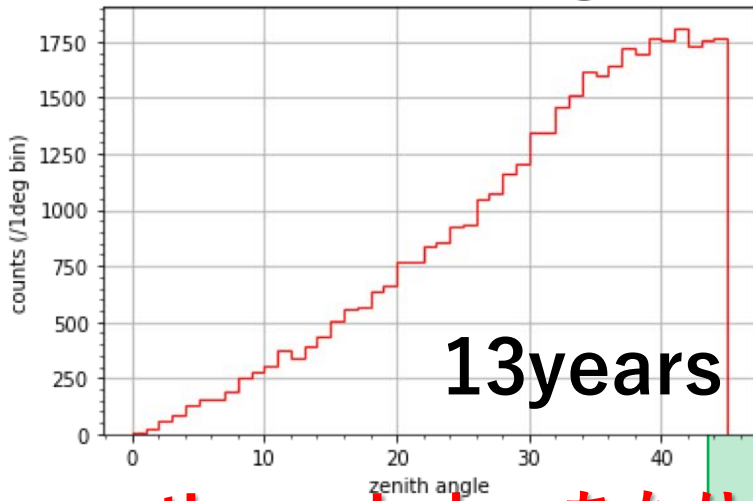
- **long time scale**

declination分布よりBGを推定

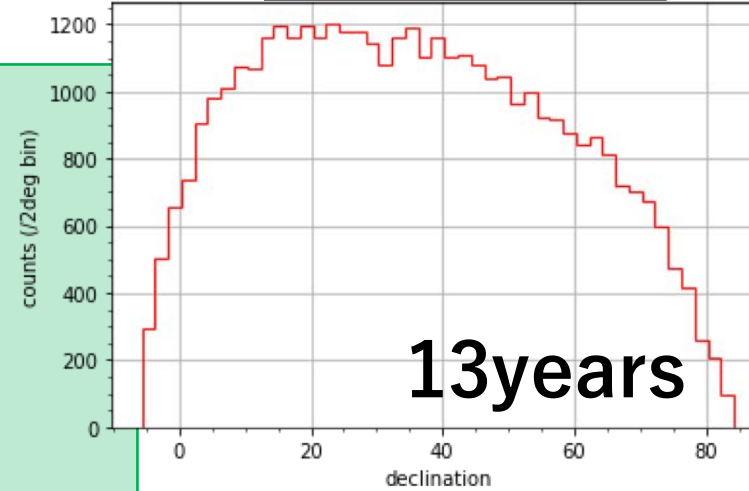
time windowとBG推定方法

対象事象のタイムスケールに応じて、宇宙線BG期待値を2つの方法で推定

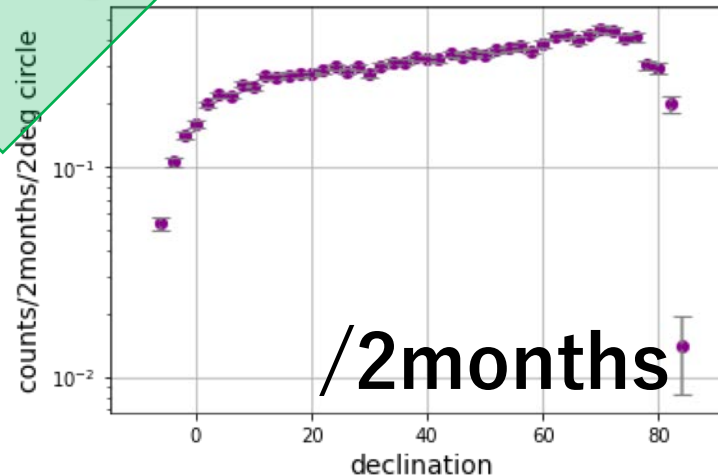
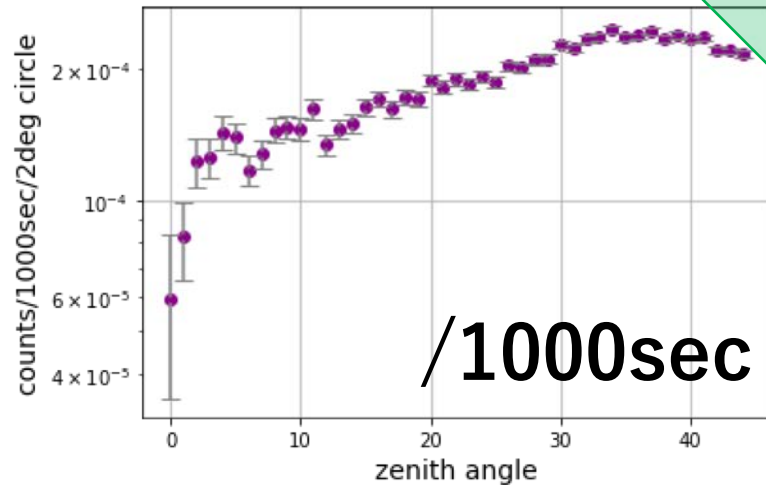
zenith angle



declination



time windowあたり2 deg circleあたりに変換



BG期待値の値は**1000sec**と
2monthsのtime windowで
それぞれ2degの円あたり
 10^{-4} 、**0.3** イベント

対象のイベント

① FRB

タイムスケール：ns~ms
突発的電波パルス 150MHz~8GHz (10^{37} ~ 10^{46} erg/s)
CHIMEによって観測された536イベント (2018 7/25~2019 7/1)
うち479イベントがTASDの視野内

② TXS0506

IceCubeがニュートリノイベントを観測した (2017 9/22)
MAGIC, Fermi-LATなどによってガンマ線も観測された(2017 9~10)

③ Cygnus

IceCubeが**154TeV neutrino event**を観測した (Nov. 20th, 2020)
300 TeVの**ガンマ線**もCarpet-2によって観測された

④ SGR1935+2154 (inner galactic magnetar)

複数の**X線、ガンマ線バースト**が観測された(Apr. 27th, 2020)
FRBも**CHIME、STARE2**によって観測された(Apr. 28th, 2020)

① FRB

Fast Radio Burst

- **データセット** : CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment) catalog1

Dominion Radio Astrophysical Observatory, Canada
(West longitude 199.624° , North latitude 49.321°)

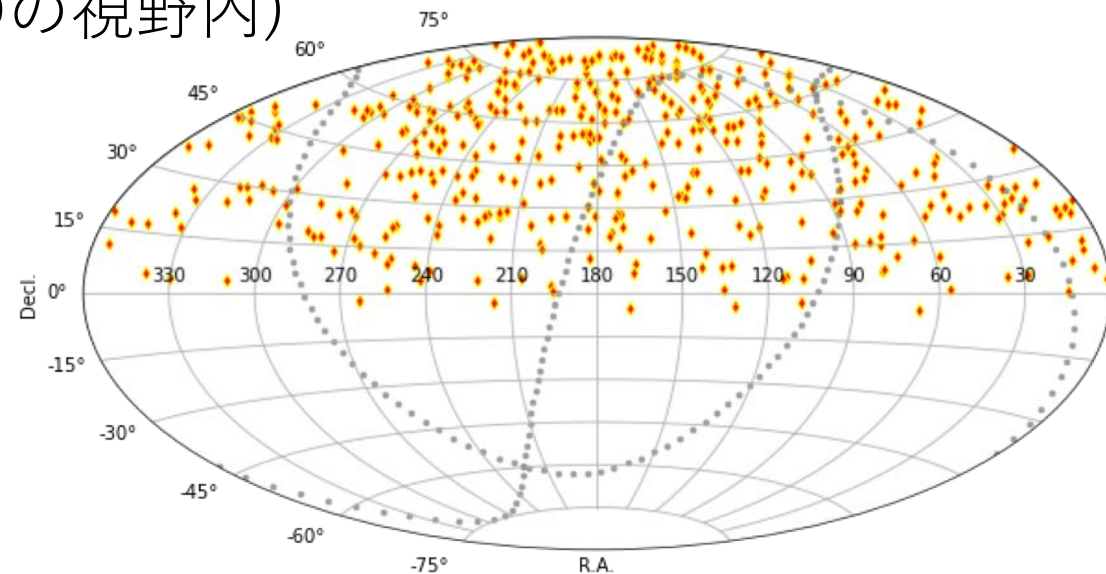
<https://chime-experiment.ca/en>

<https://www.chime-frb.ca/analysis>

- **データ数** : **536** イベント (うち479がTASDの視野内)

- **期間** : 2018 7/25 ~ 2019 7/1

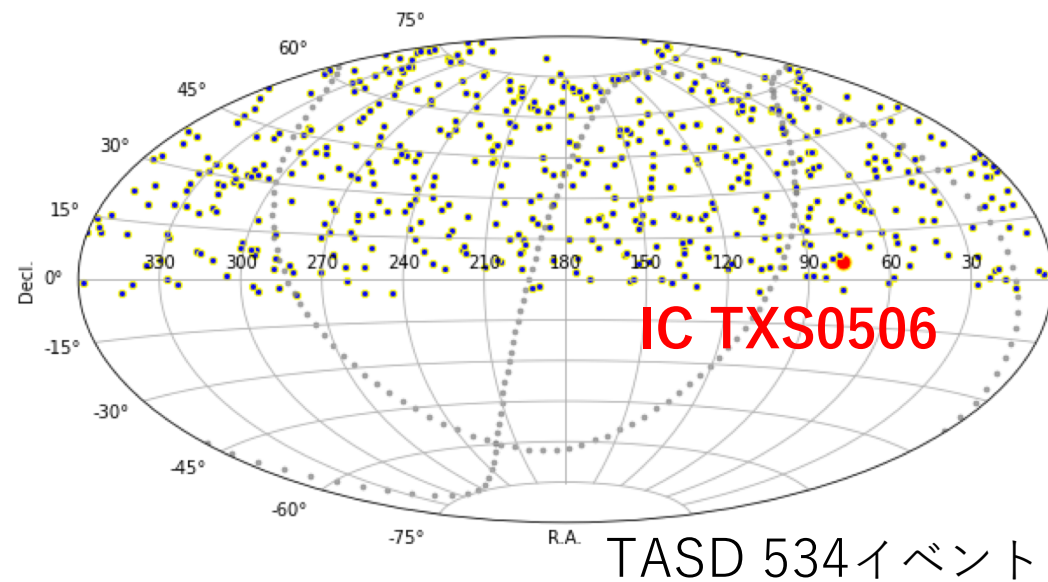
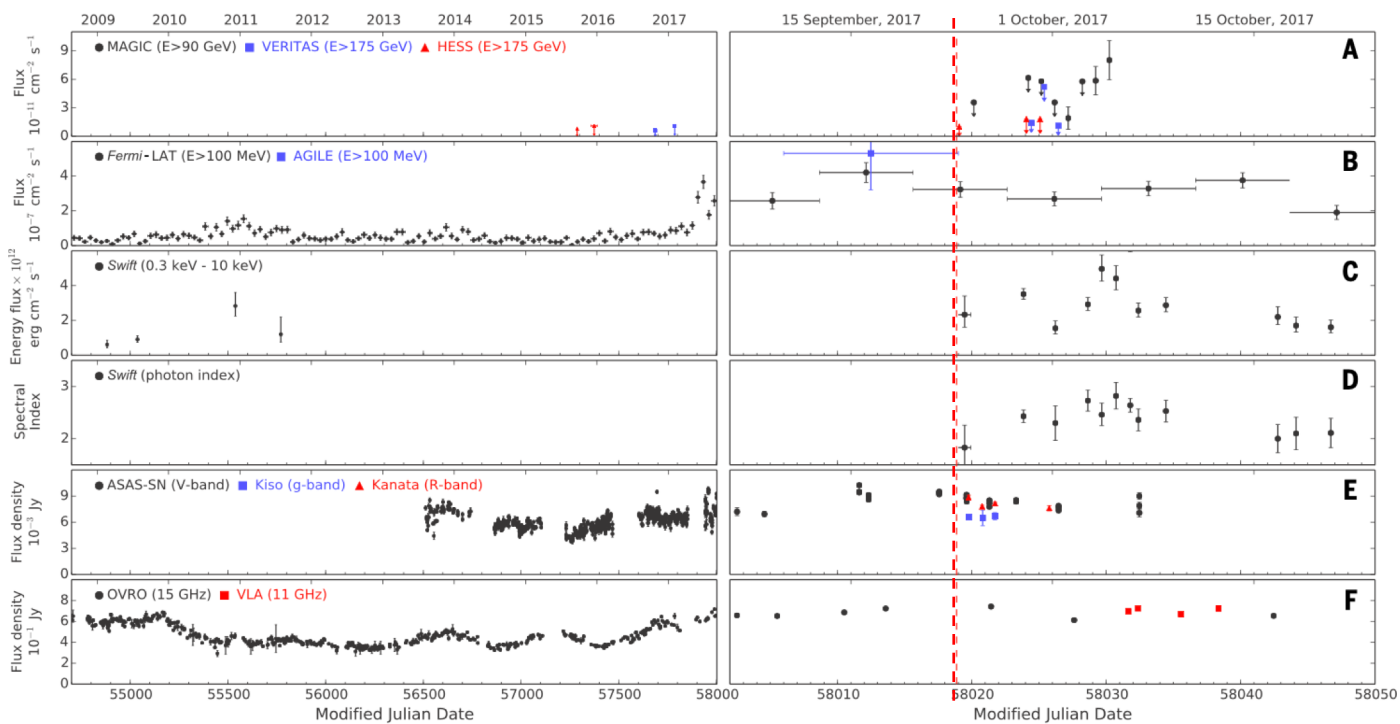
Frequency : 400 ~ 800 MHz



② IC TXS0506

RA : 77.3542 (deg)/Dec : 5.7025 (deg)

IceCubeがニュートリノイベントを観測した方向(2017 9/22)
MAGIC, Fermi-LATなどによってガンマ線も観測された(2017 9~10)



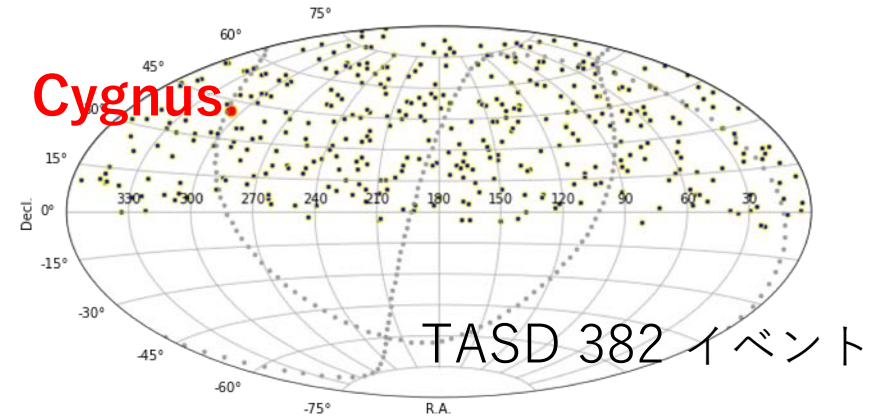
2017 8/22 ~ 2017 10/22

The IceCube Collaboration et al., Science 361, 146
(2018) 13 July 2018

③ Cygnus : RA: 307.1708/DEC: 41.1700

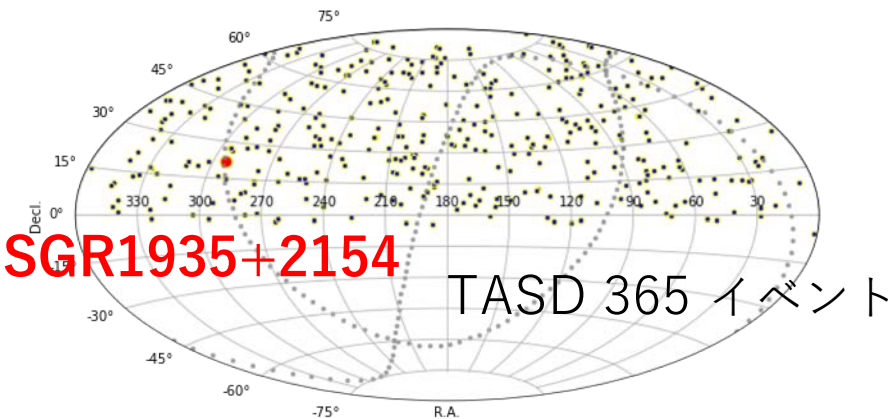
IceCubeが**154 TeV neutrino event**を観測した方向
(Nov. 20th, 2020)

300 TeVの**ガンマ線**も**Carpet-2**によって観測された



2020 10/20 ~ 2020 12/20

④ SGR1935+2154 (系内マグネター) : SGR 1935+2154 (RA: 293.7500/DEC: 21.9000)



複数の**X線**、**ガンマ線バースト**が観測されている方向
(Apr. 27th, 2020)

FRBも**CHIME**、**STARE2**によって観測された
(Apr. 28th, 2020)

Mar. 28th, 2020 ~ May. 28th, 2020

time window

<p>① FRB</p>	<p>各イベント+-500秒 2018 7/25 ~ 2019 7/1</p>
<p>② TXS0506</p>	<p>2ヶ月 2017 8/22 ~ 2017 10/22 IceCubeがニュートリノを観測した日+-1month</p>
<p>③ Cygnus</p>	<p>2ヶ月 2020 10/20 ~ 2020 12/20 IceCubeがニュートリノを観測した日+-1month</p>
<p>④ SGR1935+2154 (inner galactic magnetar)</p>	<p>2ヶ月 2020 3/28 ~ 2020 5/28 FRBが観測された日+-1month</p>

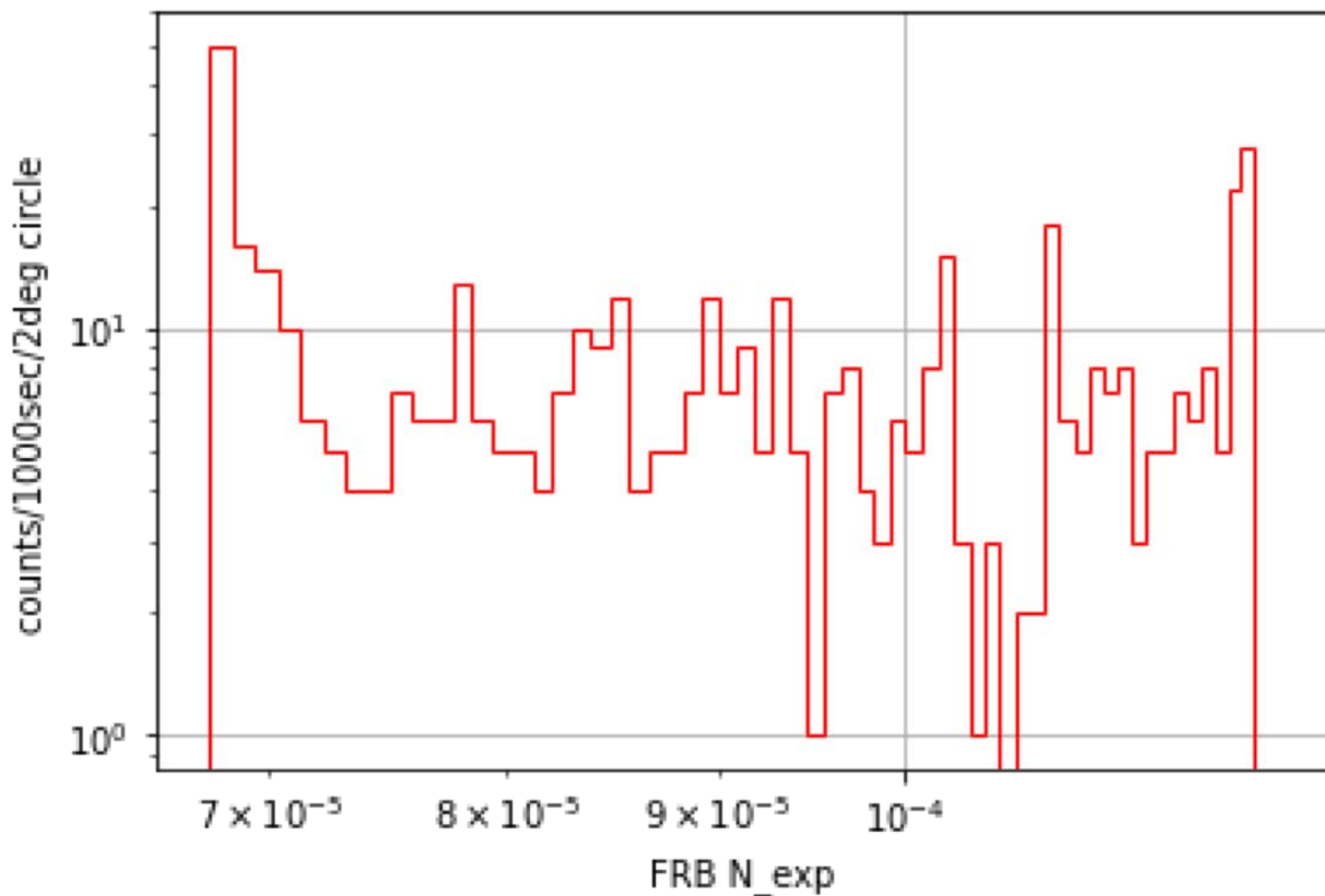
バックグラウンド期待値(N_{exp})

① FRB	time window 1000sec, open angle < 2deg $\sum^{479} N_{exp} = \mathbf{0.044}$
② TXS0506	time window 2months, open angle < 2deg $N_{exp} = \mathbf{0.20}$
③ Cygnus	time window 2months, open angle < 2deg $N_{exp} = \mathbf{0.29}$
④ SGR1935+2154 (inner galactic magnetar)	time window 2months, open angle < 2deg $N_{exp} = \mathbf{0.26}$

バックグラウンド期待値(N_{exp})と観測数(N_{obs})

① FRB	time window 1000sec, open angle < 2deg $\sum_{479} N_{exp} = \mathbf{0.044} \quad N_{obs} = \mathbf{0}$
② TXS0506	time window 2months, open angle < 2deg $N_{exp} = \mathbf{0.20} \quad N_{obs} = \mathbf{0}$
③ Cygnus	time window 2months, open angle < 2deg $N_{exp} = \mathbf{0.29} \quad N_{obs} = \mathbf{0}$
④ SGR1935+2154 (inner galactic magnetar)	time window 2months, open angle < 2deg $N_{exp} = \mathbf{0.26} \quad N_{obs} = \mathbf{0}$

FRBのBG期待値分布



time window 1000sec
open angle < 2deg
一致事象 **0**

$$\sum_{479} N_{exp} = \mathbf{0.044}$$

$$N_{obs} = \mathbf{0}$$

まとめ

	到来方向	観測時間	time window	BG期待値	N_{exp}	N_{obs}
① FRB	—————	—————	各イベント+-500sec 2018 July, 25 th 17:59UT ~2019 July, 1 st 22:32UT	Zenith angle 分布より推定	0.044 (SUM)	0
② TXS0506	RA:77.4 Dec:5.7 [deg]	2017 Sep. 22th	2ヶ月 2017 Aug, 22th 0:00UT ~Oct, 22th 24:00UT	Declination 分布より推定	0.20	0
③ Cygnus	RA: 307.2 DEC: 41.2 [deg]	2020 Nov. 20th	2ヶ月 2020 Oct, 20th 0:00UT ~Dec, 20th 24:00UT	Declination 分布より推定	0.29	0
④ SGR1935+2154	RA: 293.8 DEC: 21.9 [deg]	2020 Apr. 28th	2ヶ月 2020 Mar, 28th 0:00UT ~May, 28th 24:00UT	Declination 分布より推定	0.26	0

まとめ

- T ASDのデータと他波長突発天体との時間・方向一致事象を探索した。
→ N_{obs} は全てのターゲットイベントに対して0。
- 今回は観測数が全て0イベントだったので、flux upper limitを求める。
(→ ニュートリノ、ガンマ線シャワーのMonte Carloシミュレーションが必要)

Reference

- R. U. Abbasi et al., "Search for point sources of ultra-high-energy photons with the Telescope Array surface detector", MNRAS 492, 3984-3993 (2020).
- R. U. Abbasi et al., "Search for Ultra-High-Energy Neutrinos with the Telescope Array Surface Detector", JETP, 131, 255-264 (2020).
- The Ice Cube Collaboration et al., Science 361, 146 (2018)
- Neutrino emission from FRB-emitting magnetars
arXiv:2111.04121v2 [astro-ph.HE] 6 Jan 2022 (<https://arxiv.org/pdf/2111.04121.pdf>)
- Observation of photons above 300 TeV associated with a high-energy neutrino from the Cygnus region
arXiv:2105.07242v3 [astro-ph.HE] 16 Aug 2021 (<https://arxiv.org/pdf/2105.07242.pdf>)
- I. Tkachev, et al., in: Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference in Beijing ID, 2011, p. 1311.

イベントのタイムスケールによって 探索時間幅とバックグラウンド推定方法を設定する

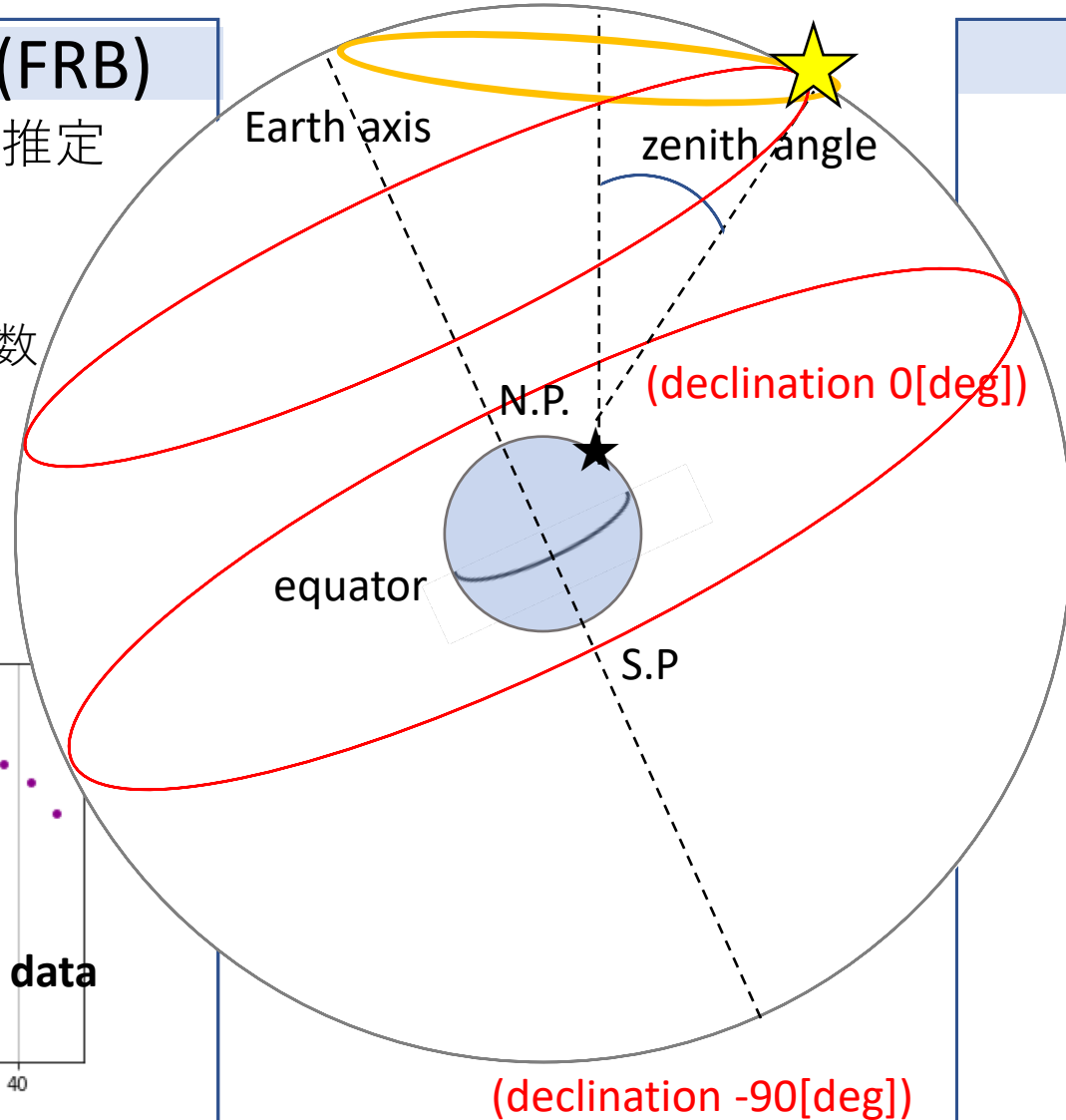
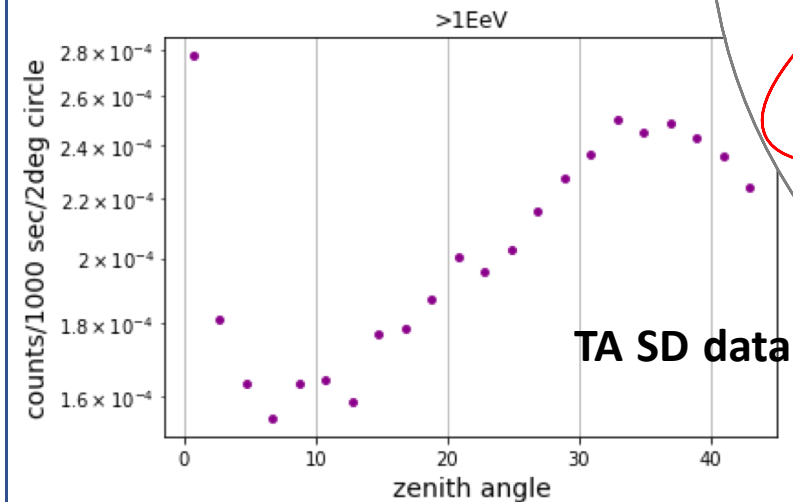
(declination 90[deg]) zenith

短タイムスケール(FRB)

→ zenith angle 分布から推定

各zenith angleにおける
半径2度の円内にあるイベント数

1000 秒あたり

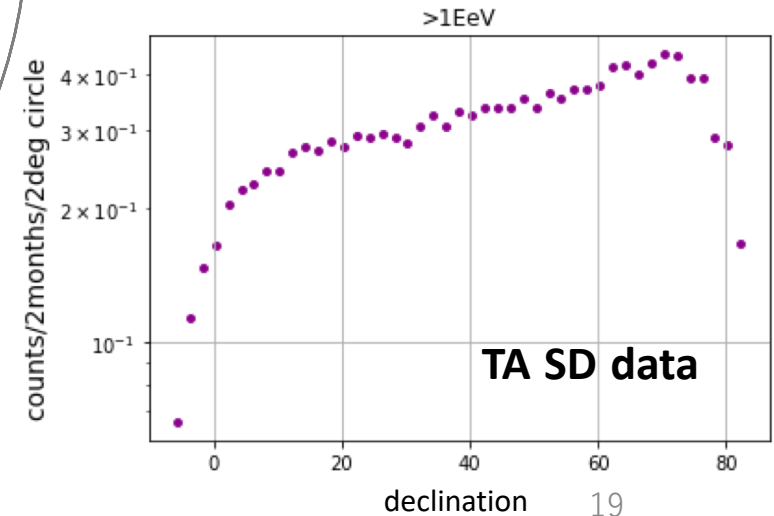


長タイムスケール

→ declination 分布から推定

各declinationにおける
半径2度の円内にあるイベント数

2ヶ月あたり



Step1 : 全てのTASDのデータを積算しただけの図を用意する

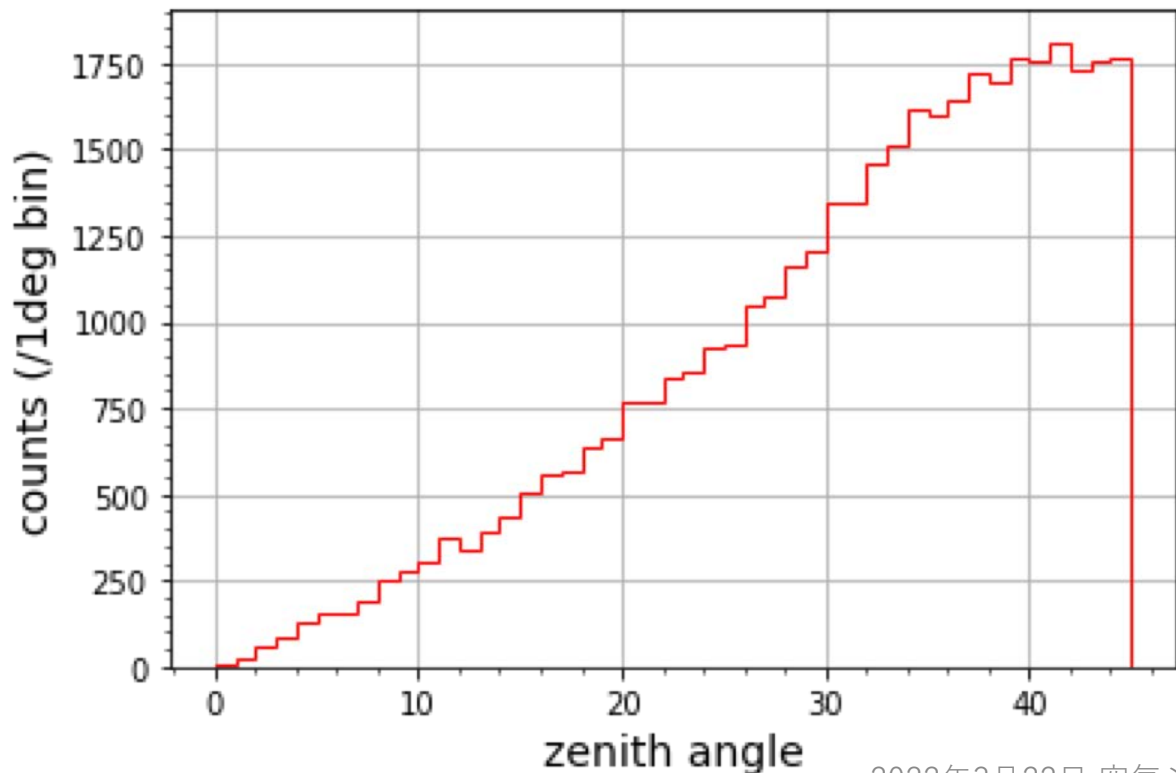
Step2 : Step1/各ビンの立体角 → 立体角あたりのデータを得る

Step3 : Step2*半径2度の立体角 → 各ビンの半径2度以内あたりのデータを得る

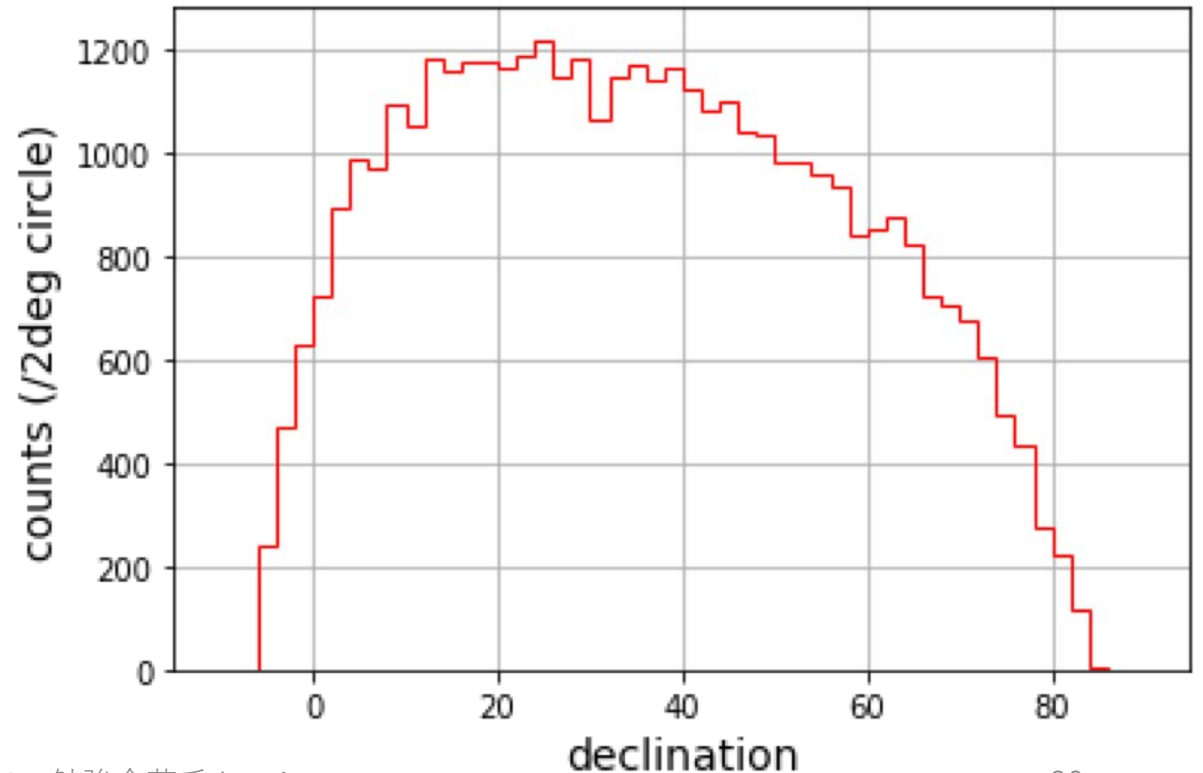
Step4 : Step3 → それぞれの探索時間幅あたりに換算する

★ Step1 : 全てのTASDのデータを積算しただけの図

zenith angle



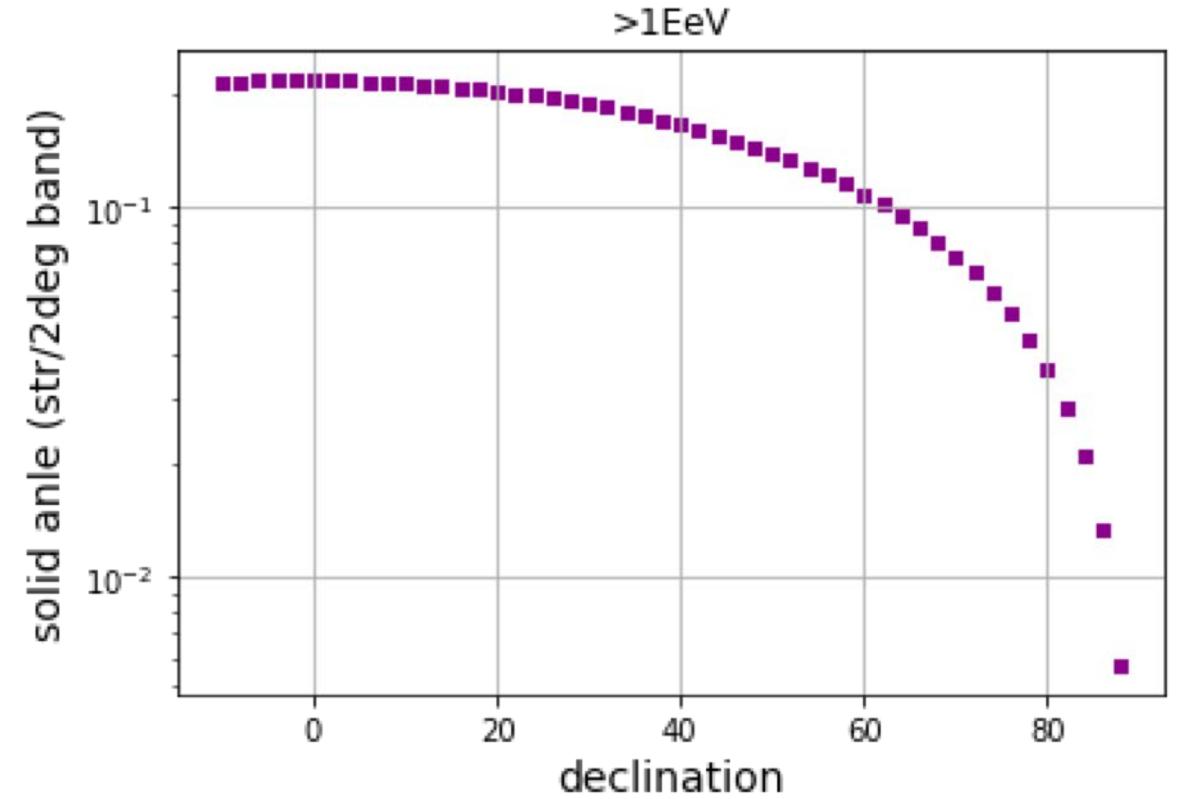
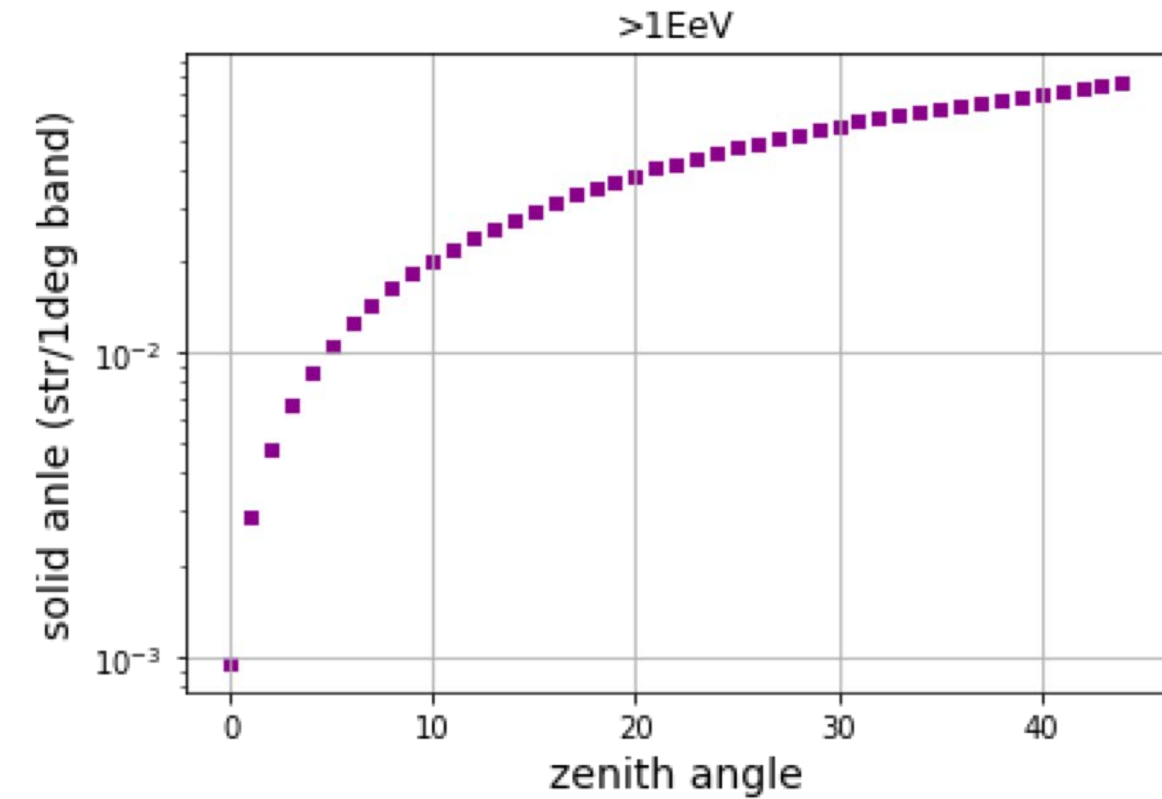
declination



★ 各zenith angle, declinationにおける立体角

zenith angle

declination



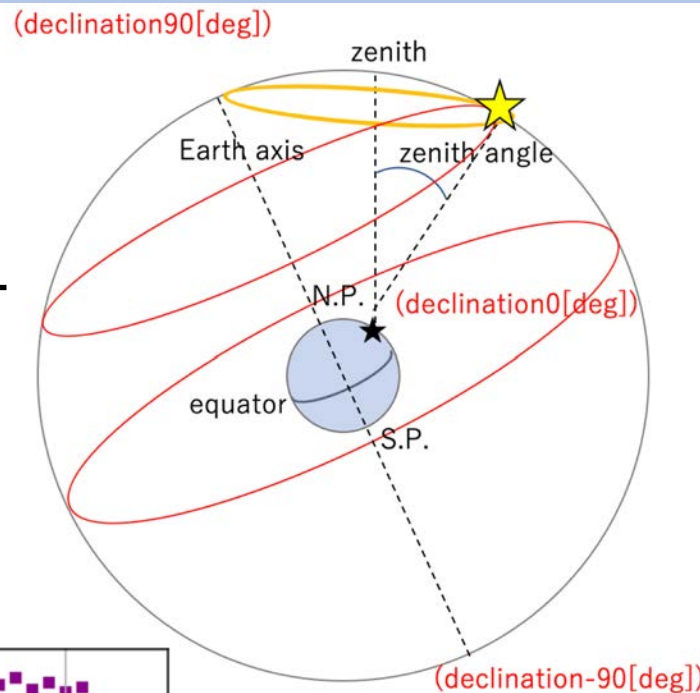
★ Step2 : Step1/各ビンの立体角 → 立体角あたりのイベント数

zenith angle

Solid angle at each bins

$$2\pi \sin(\delta) \times 2[\text{deg}] \times \frac{\pi}{180[\text{deg}]}$$

$$\delta = \text{zenith angle} \times \frac{\pi}{180}$$

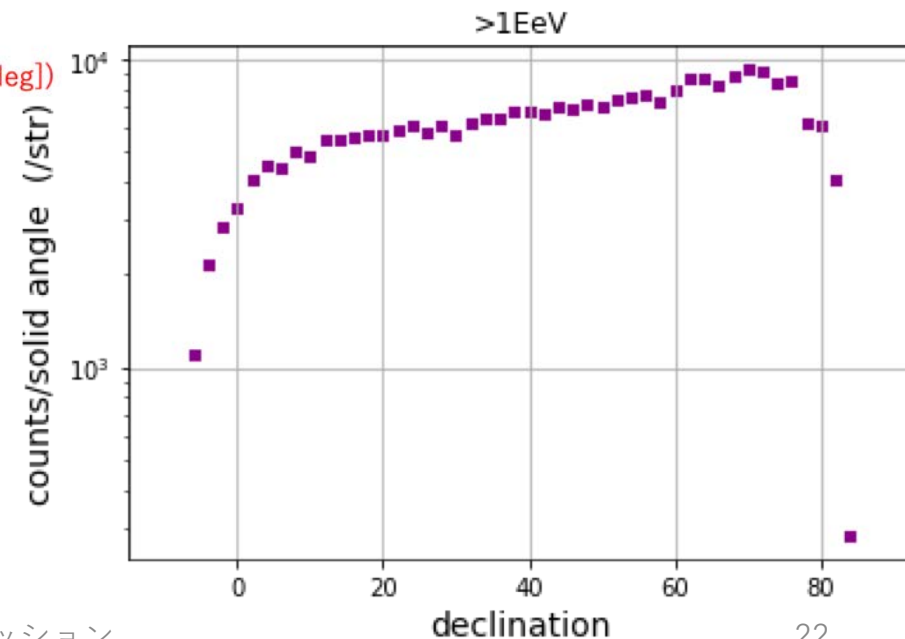
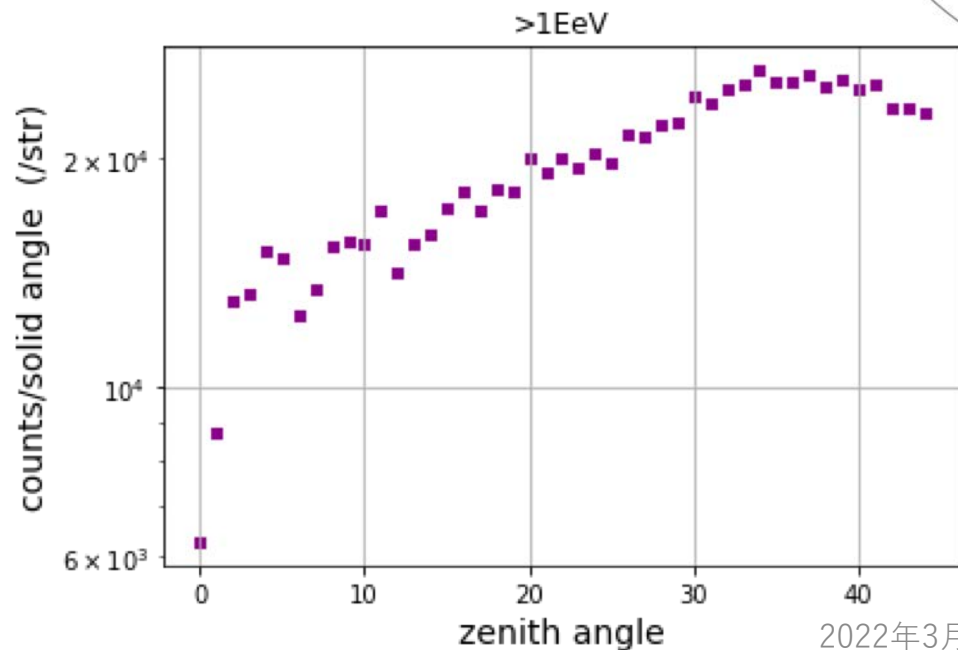


declination

Solid angle at each bins

$$2\pi \sin(\delta) \times 2[\text{deg}] \times \frac{\pi}{180[\text{deg}]}$$

$$\delta = (90 - \text{declination}) \times \frac{\pi}{180}$$



★ Step3 : → 各ビンにおける半径2度の円内あたりのイベント数

zenith angle

半径2度の立体角

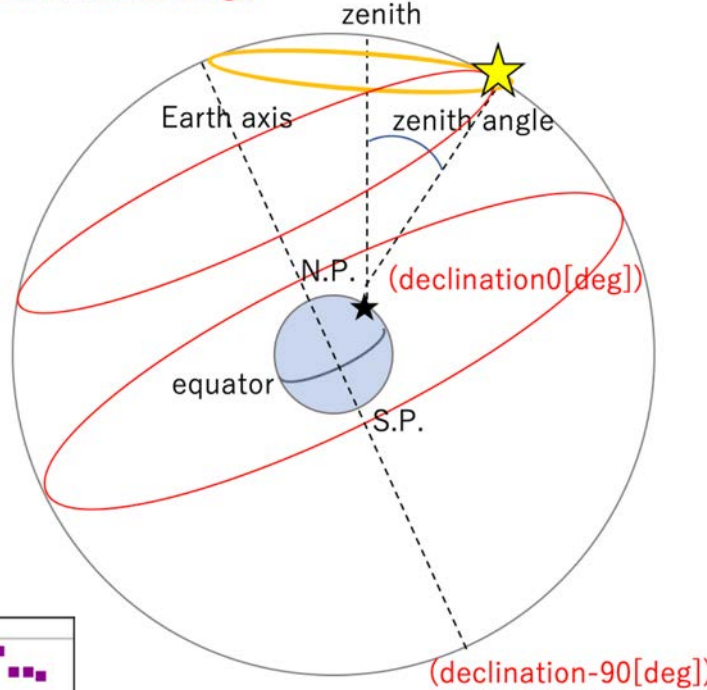
$$S = \int_0^\theta 2\pi \sin\theta \cdot d\theta$$

$$\sim 2\pi(1 - \cos\theta)$$

$$\sim \pi\theta^2$$

$$\rightarrow \times \pi \left(\frac{2 * \pi}{180} \right)^2$$

(declination 90[deg])



declination

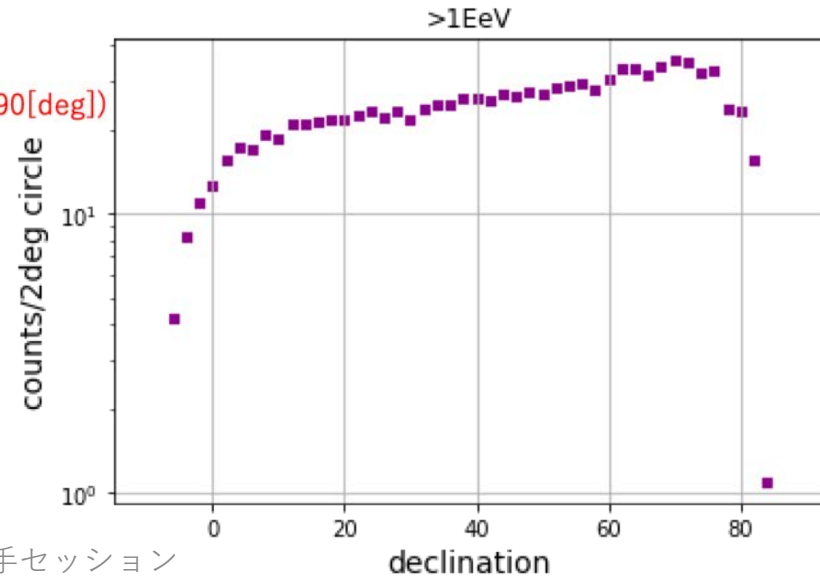
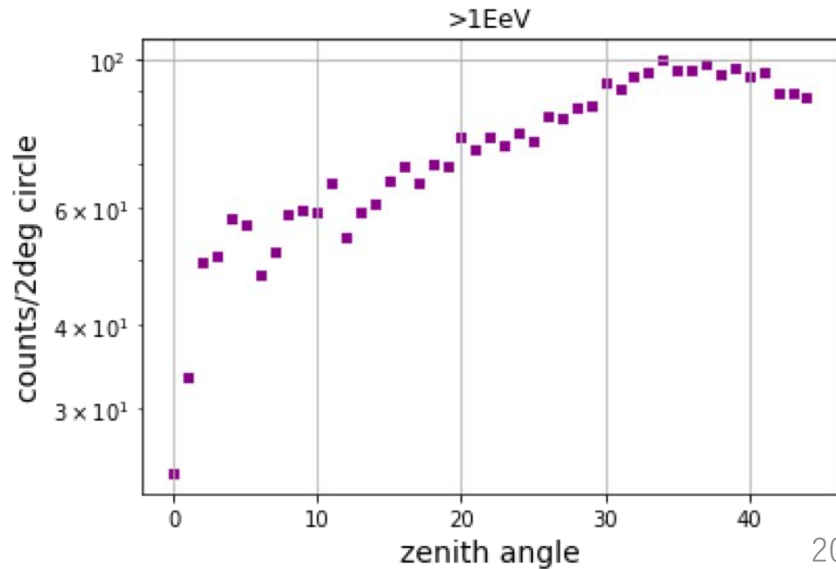
半径2度の立体角

$$S = \int_0^\theta 2\pi \sin\theta \cdot d\theta$$

$$\sim 2\pi(1 - \cos\theta)$$

$$\sim \pi\theta^2$$

$$\rightarrow \times \pi \left(\frac{2 * \pi}{180} \right)^2$$



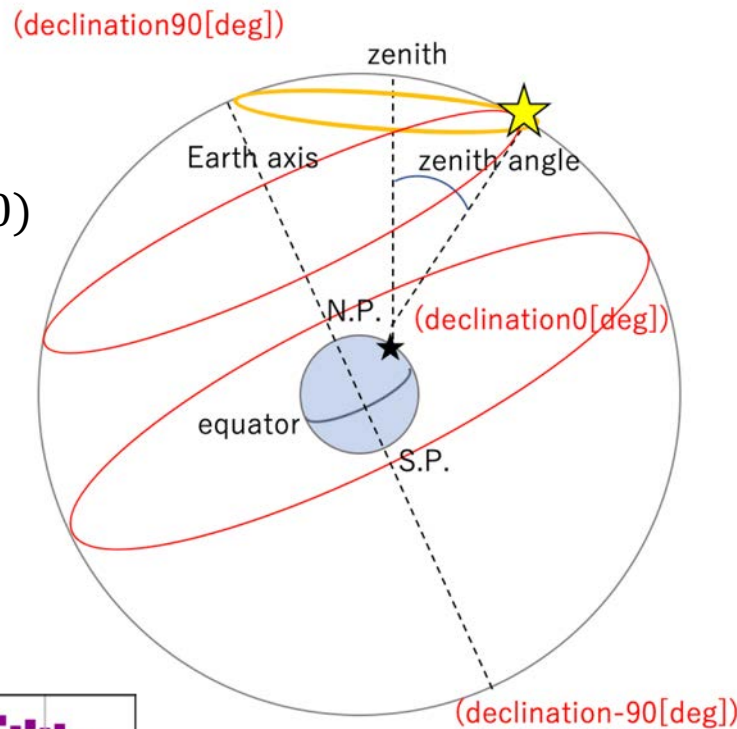
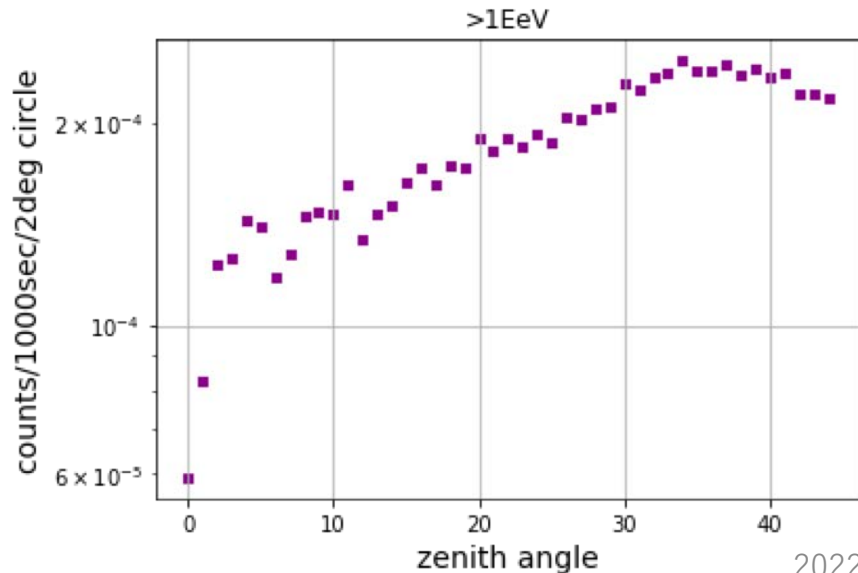
★ Step4 : →それぞれの探索時間幅あたりのイベント数

zenith angle

$$\text{Step3} \times 1000 / (13 \times 12 \times 30 \times 24 \times 60 \times 60)$$

→ 1000秒あたりのイベント数

1000秒 (短タイムスケール)

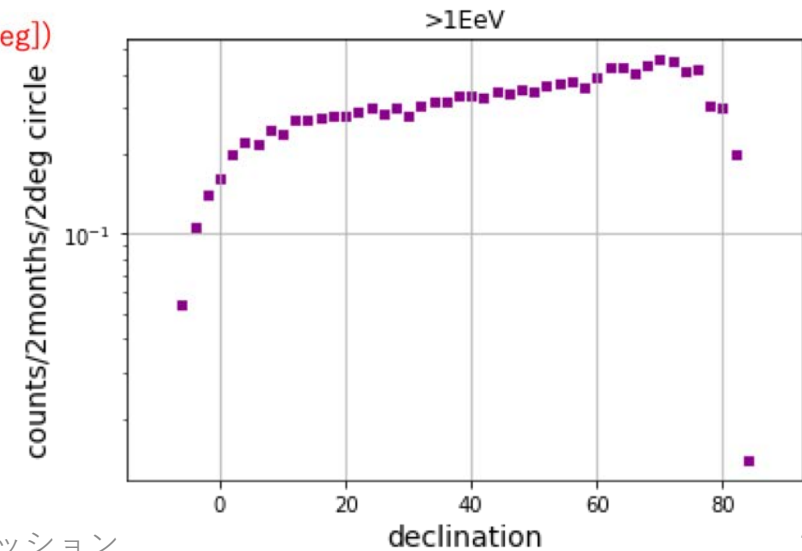


declination

$$\text{Step3} \times 2 / (13 \times 12)$$

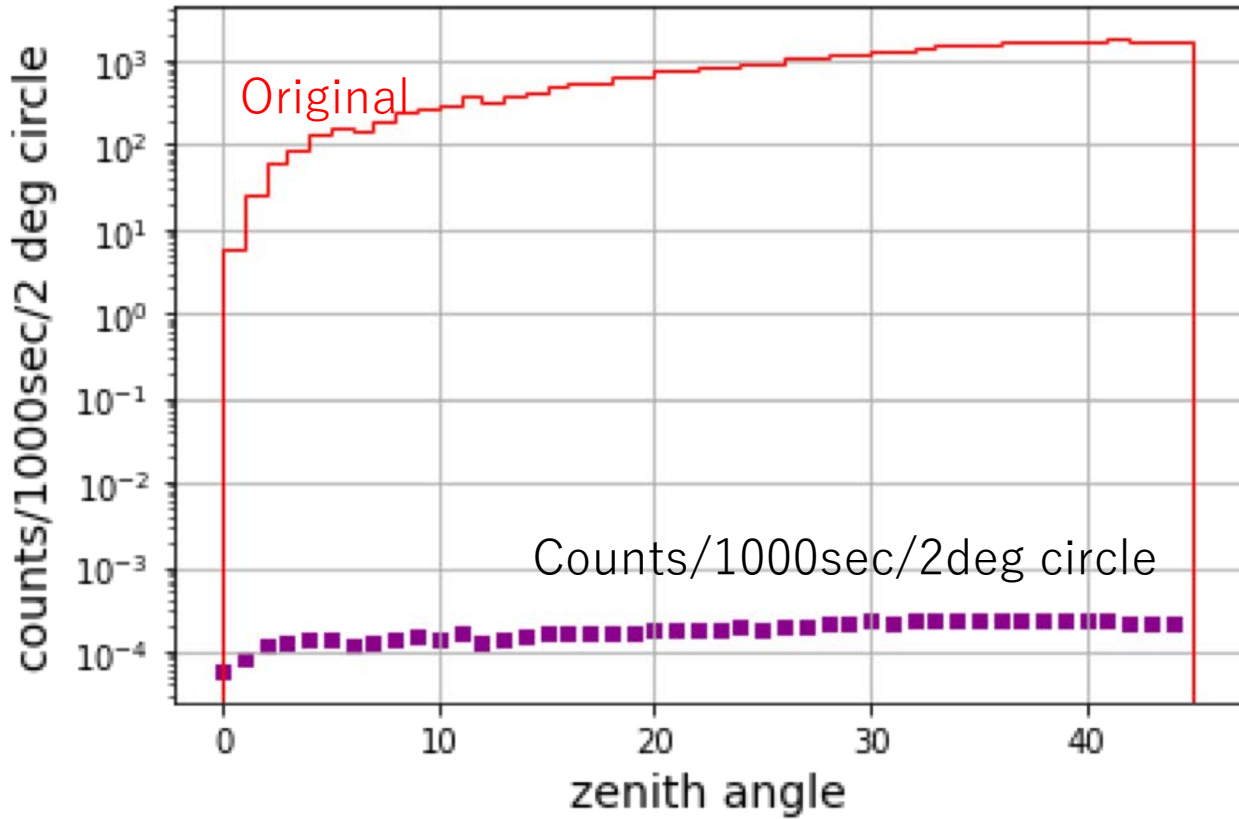
→ 2ヶ月あたりのイベント数

2ヶ月 (長タイムスケール)



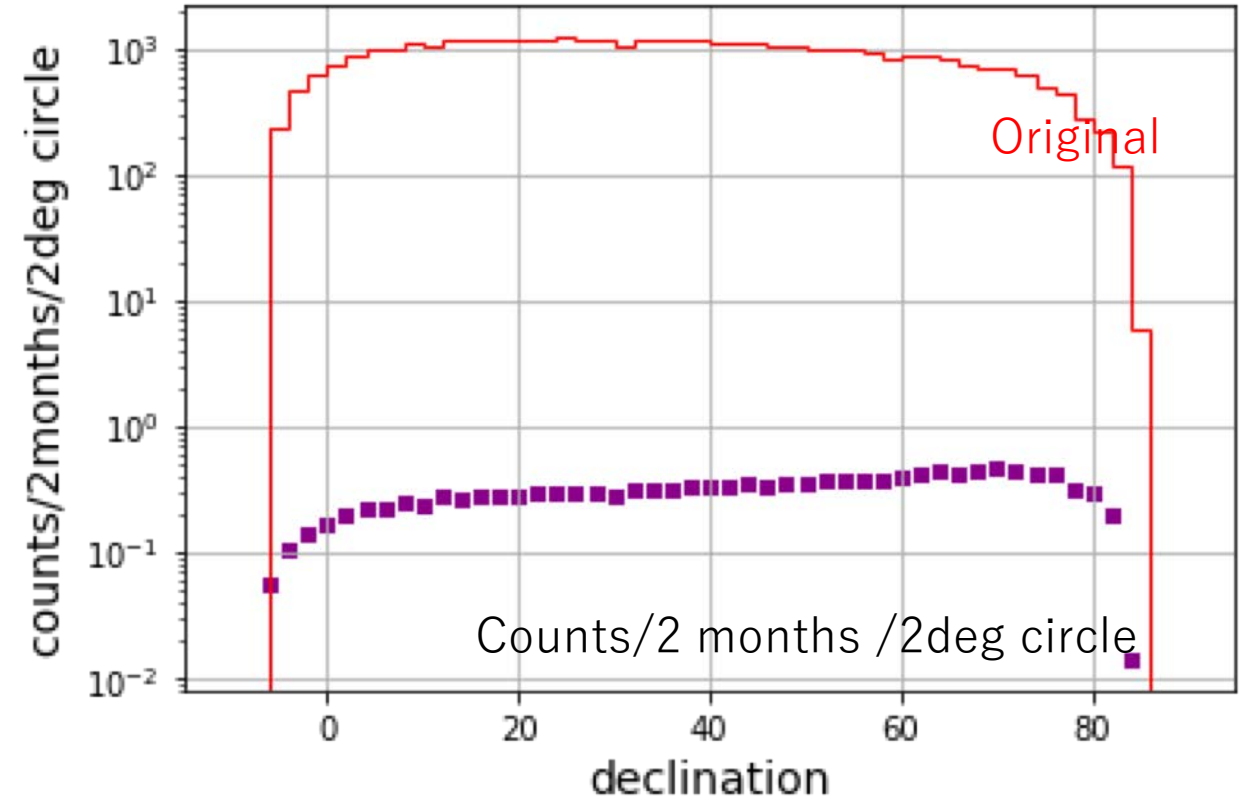
zenith angle

>1EeV



declination

>1EeV



TASD data 観測数の季節変動

