

Search for Astronomical Neutrinos from Blazar TXS0506+056 in Super-Kamiokande

素粒子物理学研究室
萩原 開人 (51429101)

2020.Feb.18

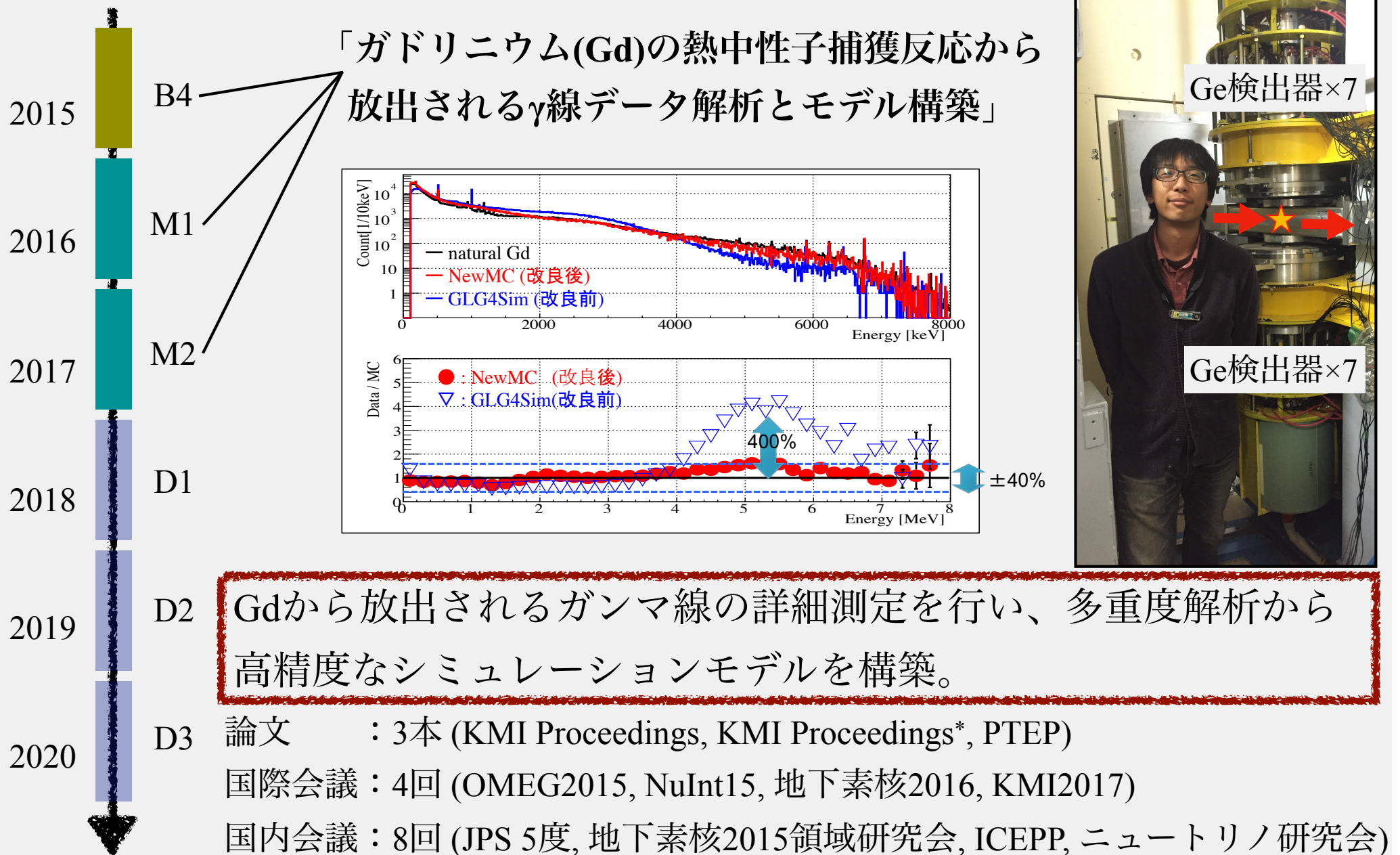
目次

目的 スーパーカミオカンデにおけるblazar TXS0506+056
から放出された天体ニュートリノの探索

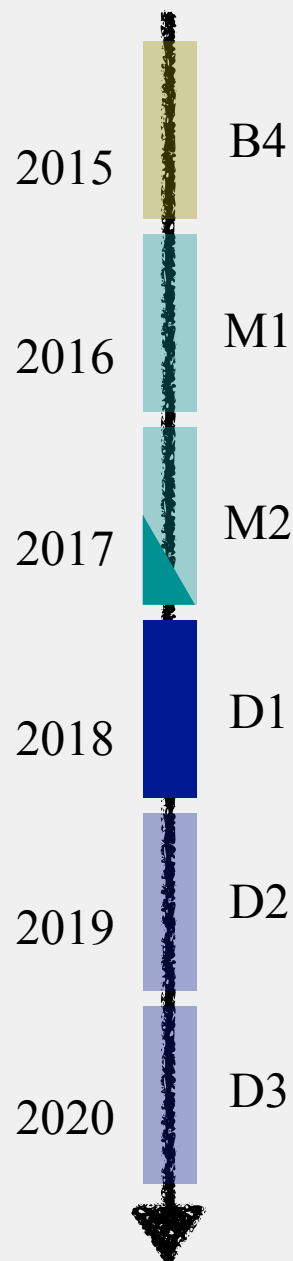
1. これまでの研究
2. 概要
3. Super-Kamiokande における天体ニュートリノ探索
4. 上限値計算・理論モデルとの比較
5. まとめ

1.これまでの研究

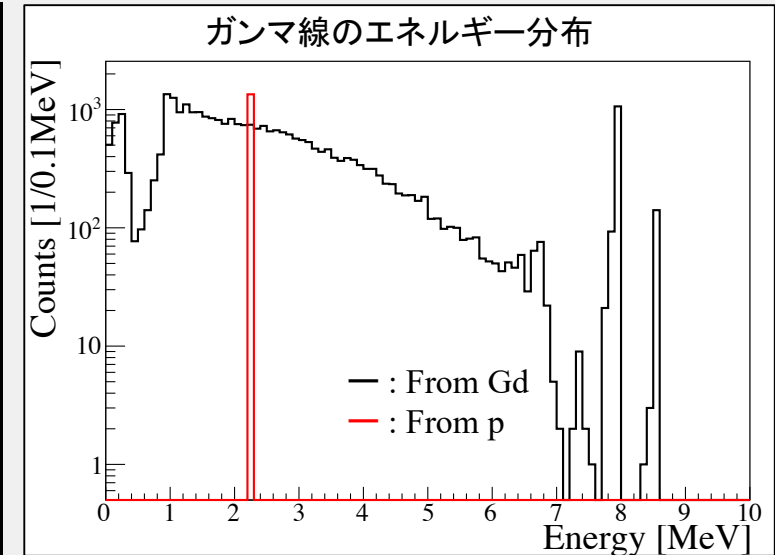
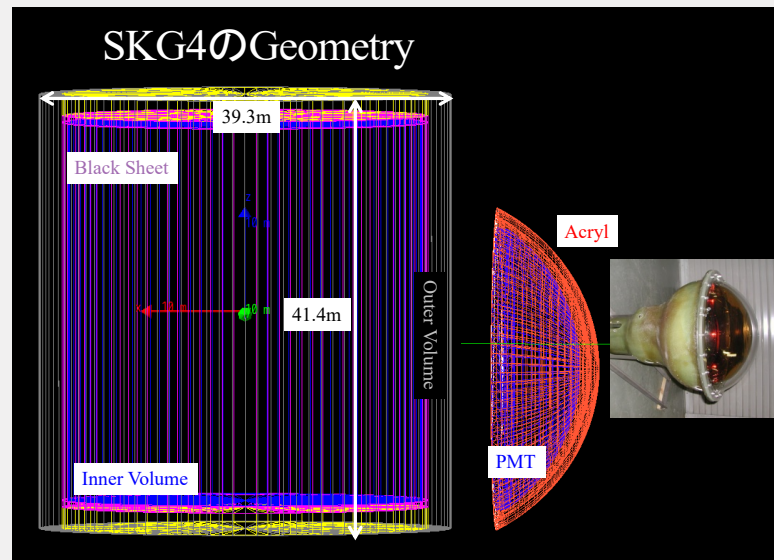
1.1 これまでの研究 (修士)



1.2 これまでの研究 (D1)



「Geant4ベースのSuper-Kamiokande 検出器シミュレーションの開発」



Geant3ベースの従来のMCからGeant4ベースに一新し、修士課程の研究によって構築したGd(n, γ)モデルを導入。2020年からの運用がCollabratorに承認され、現在も開発が続いている。

論文 : 3本 (ICRC Proceedings, ICRC Proceedings*, KMI Proceedings*)
マニュアル : 1本 (developer manual 309ページ)
国内会議 : 4回 (JPS 3度, 地下素核2018領域研究会)

1.3 これまでの研究 (D2)

「Active Target and Time Projection Chamber (ACTAR-TPC)
を用いた飛跡検出プログラム開発」

2015 B4

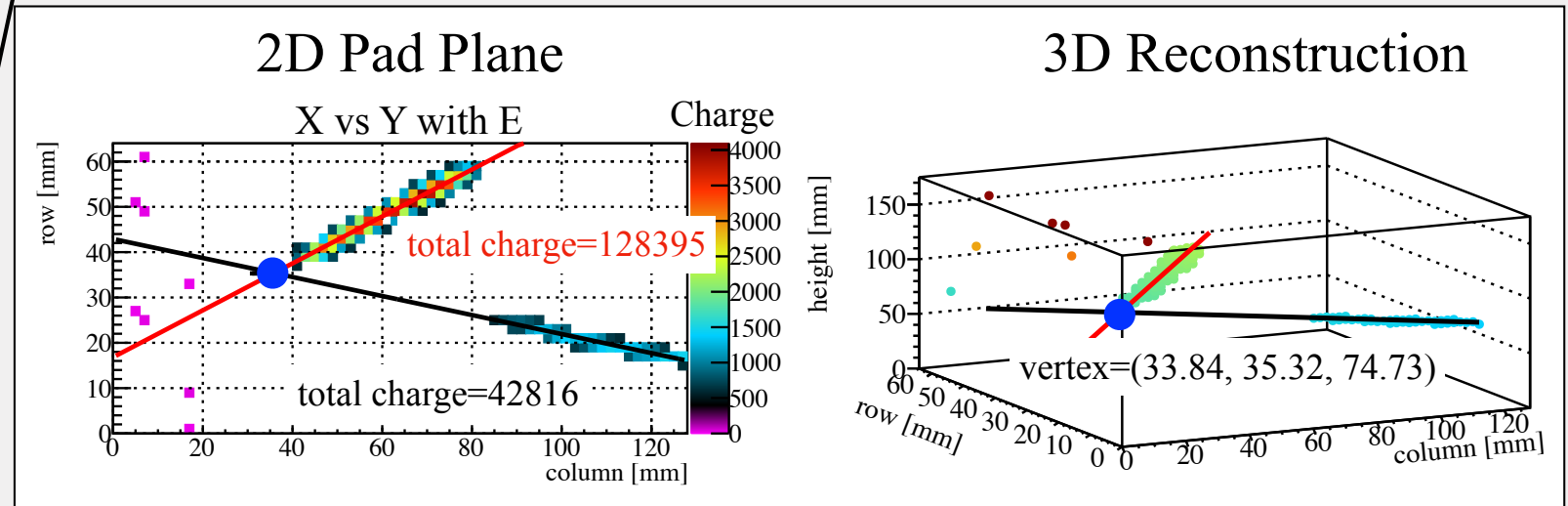
2016 M1

2017 M2

2018 D1

2019 D2

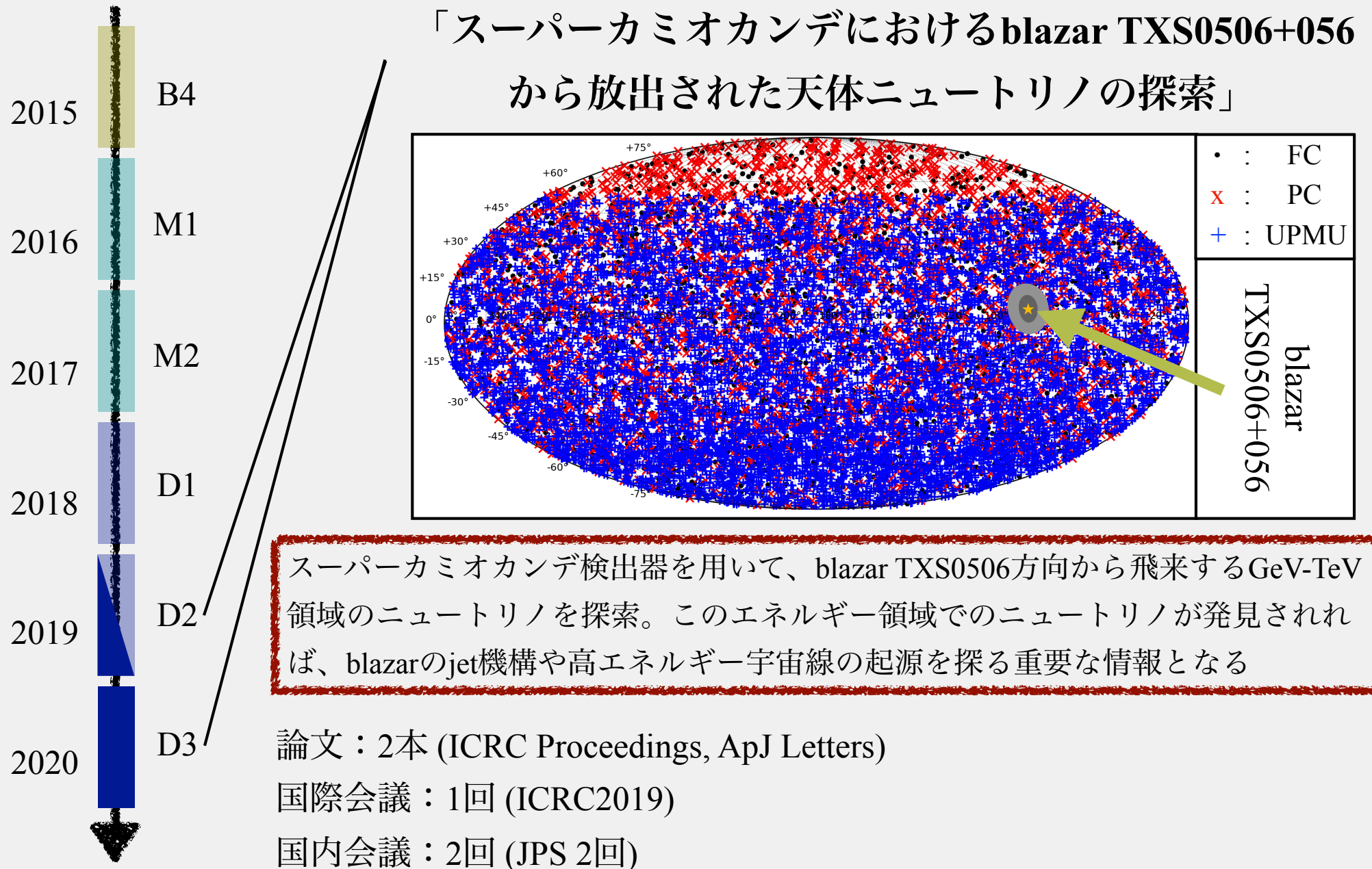
2020 D3



日本学術振興会の「平成30年度若手研究者海外挑戦プログラム」に採用されイタリアのPadova大学へ4ヶ月間留学。RANSACアルゴリズムを用いてACTAR-TPCでの粒子識別手法を確立。

国際会議：1回 (Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of APS and JPS)
Meeting：1回 (European ACTAR TPC general meeting in Italy)

1.4 これまでの研究 (D3)



2.概要

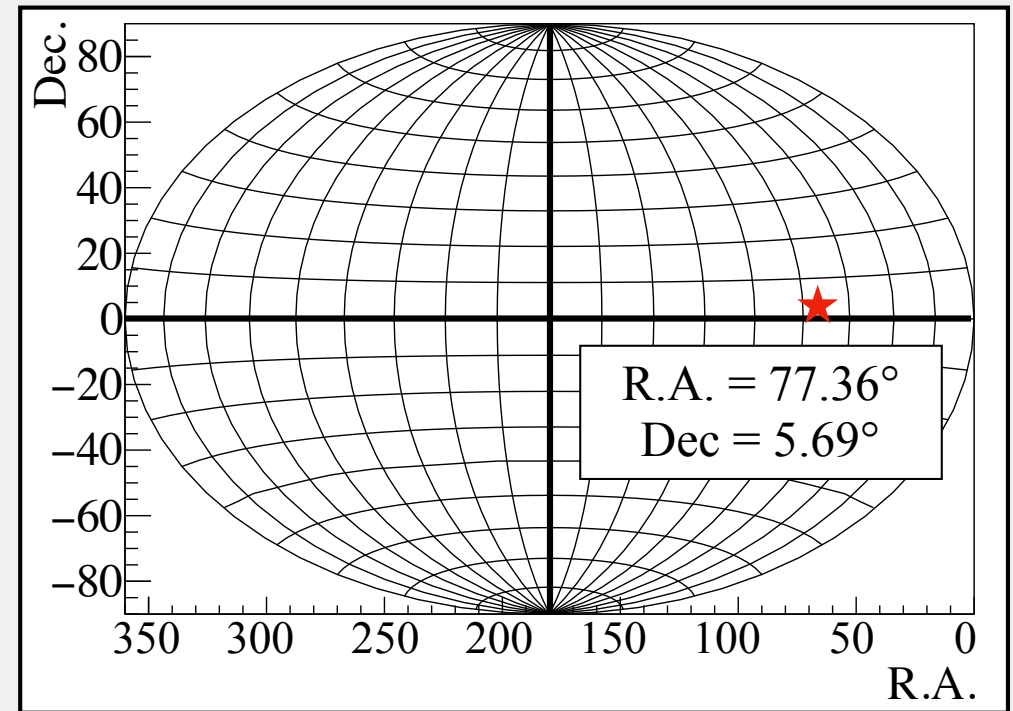
2.1 概要

2017年9月22日、南極に設置されたニュートリノ検出器
IceCubeは約290 TeVという高エネルギーニュートリノを観測した。光学望遠鏡による**追観測**の結果、**blazar** TXS0506+056からのニュートリノだと思われる



SKでもイベントを探索

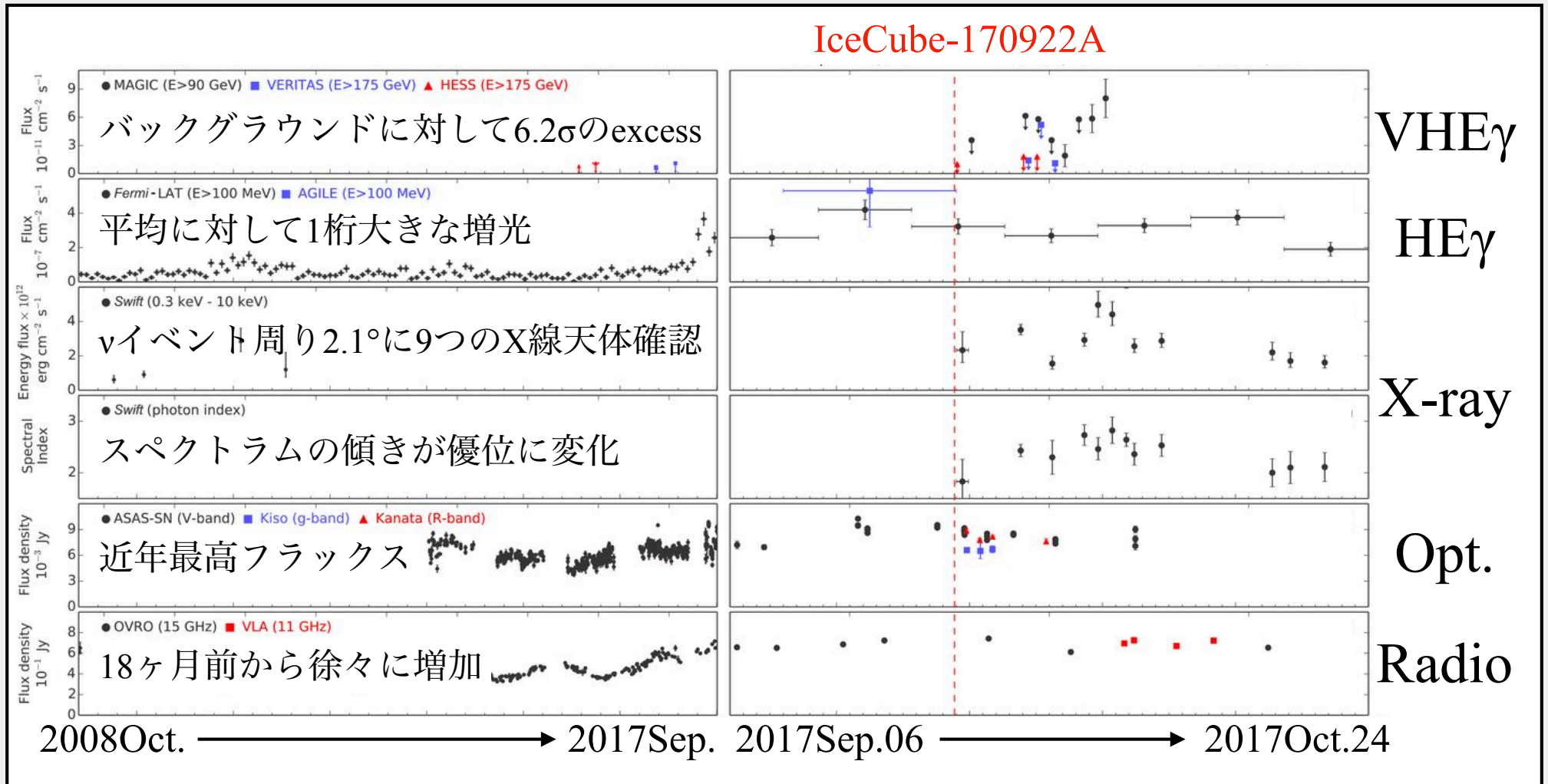
赤道座標系



TXS 0506+056	
Distance	~1.75 Gpc (5.7×10^9 ly)
Right Ascension (R.A.)	77.3582°
Declination (Dec.)	+5.69314°

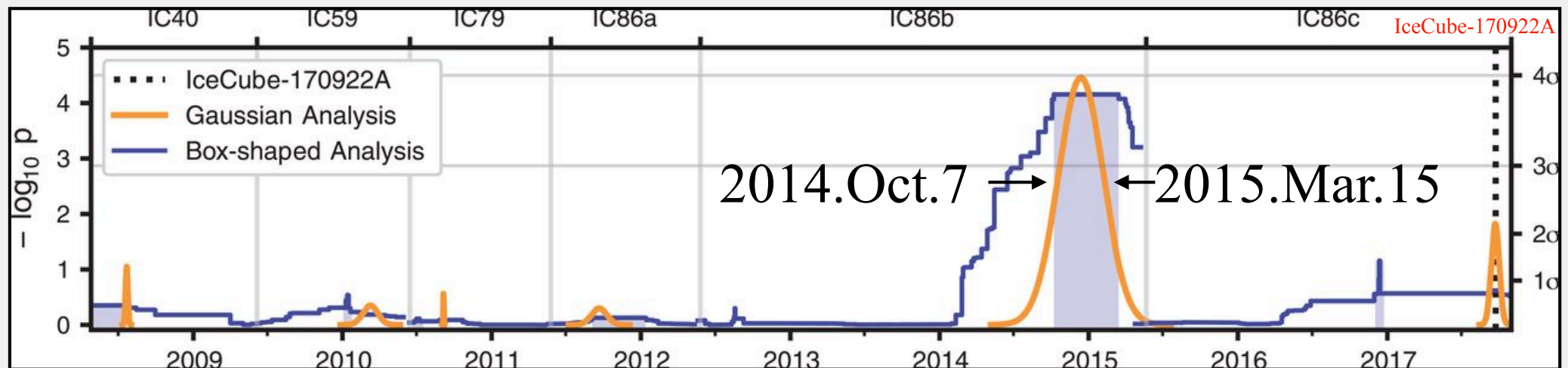
2.2 多波長観測

TXS0506+056は様々な波長領域(γ 線, X線, 可視光, ラジオ波)で追観測が行われた

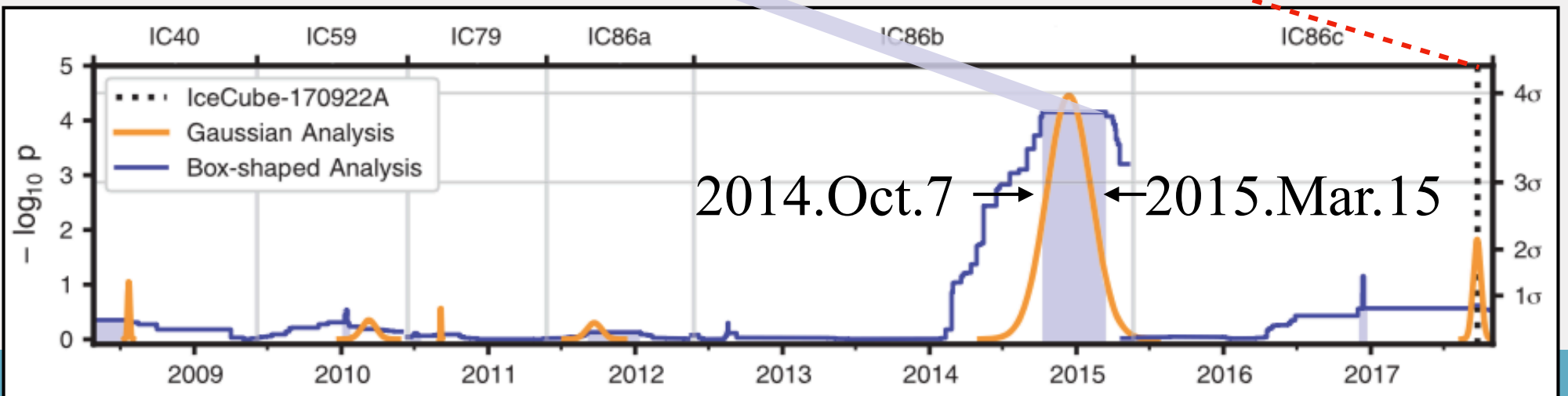
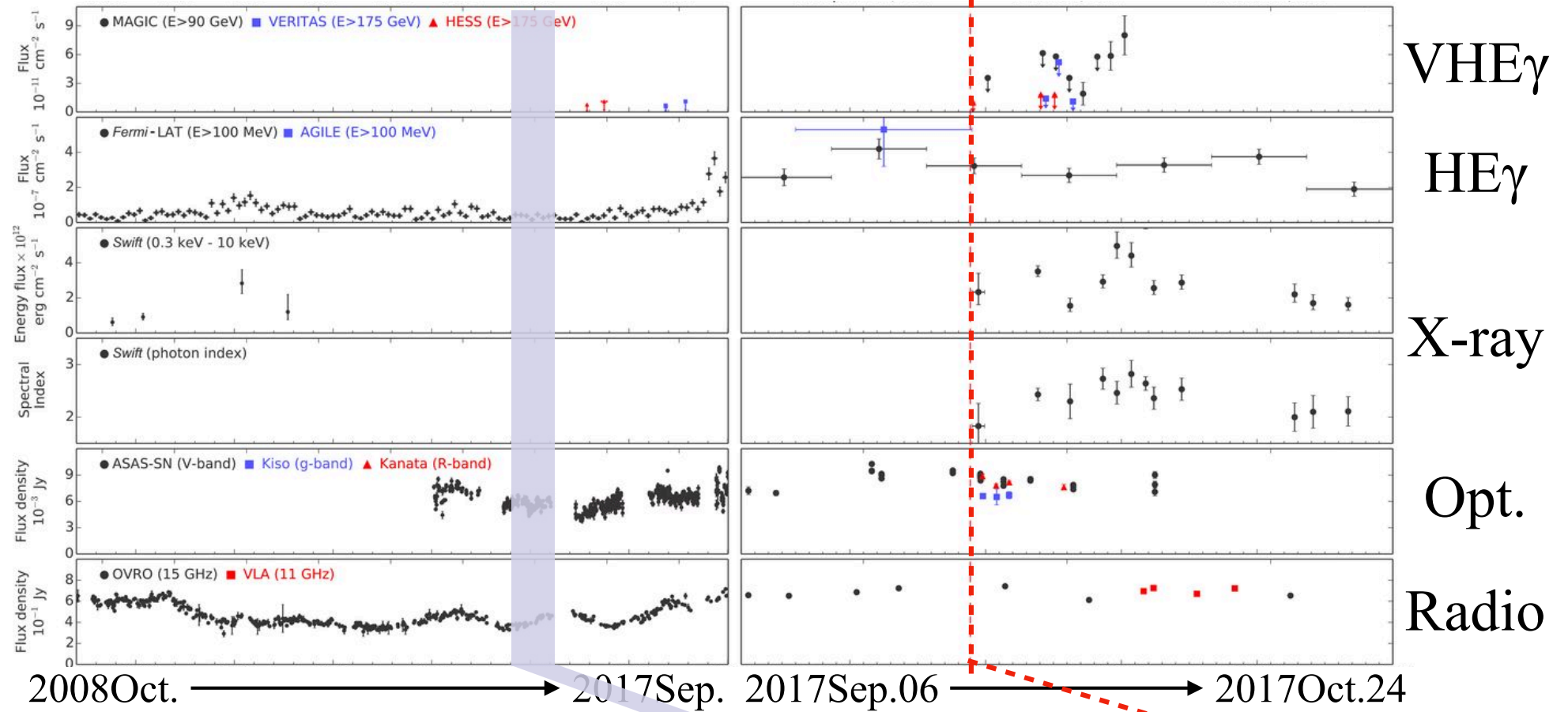


2.3 時間依存解析

IceCubeグループがBlazar TXS0506に着目して時間依存解析を行った結果、2014/2015年の間で大気ニュートリノバックグラウンドに対して 13 ± 5 事象を確認。

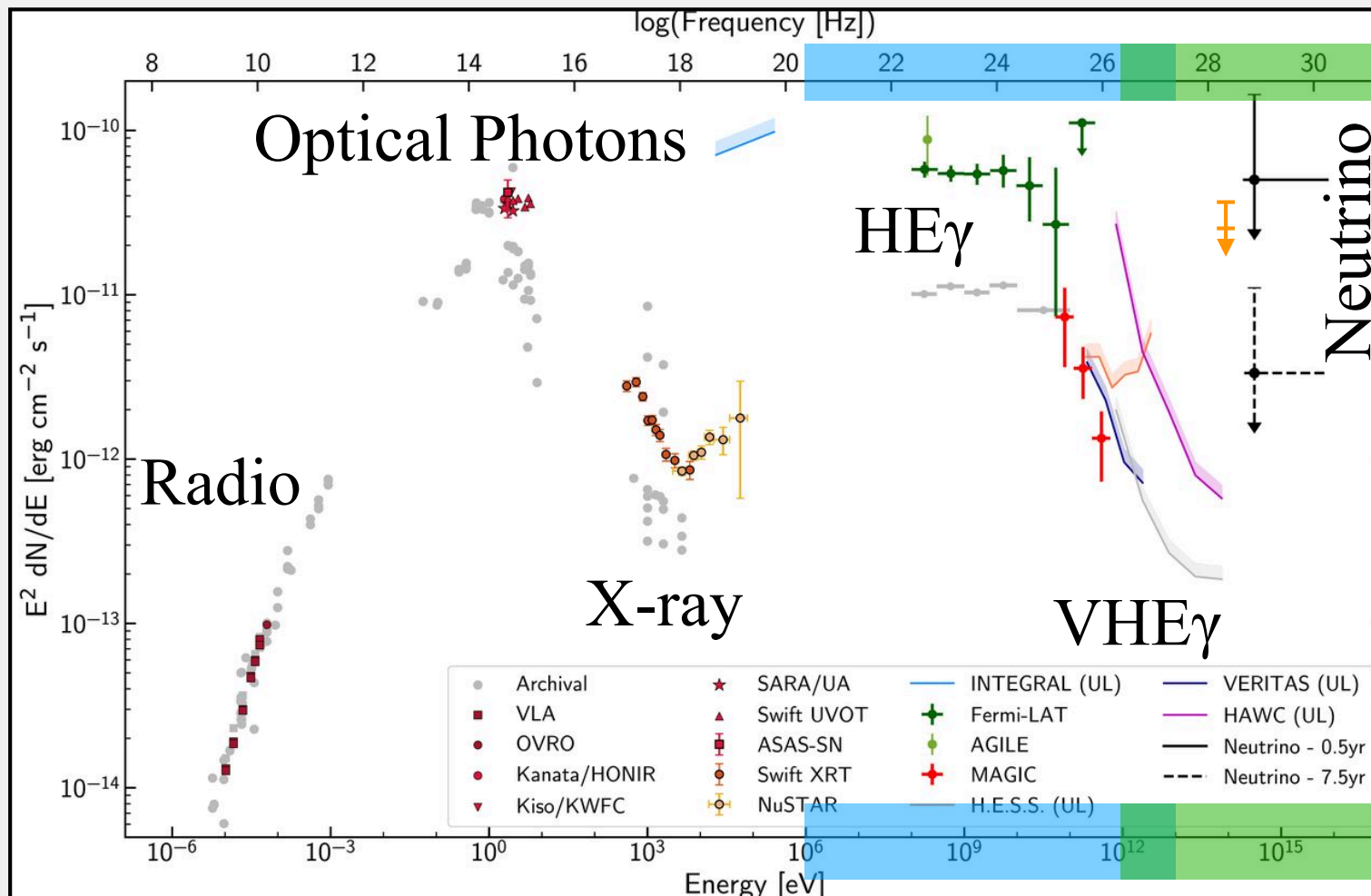


IceCube-170922A



2.4 エネルギースペクトラム

IceCube-170922A イベント検出から14日以内に得られたblazar
TXS0506+056のエネルギースペクトラム



ニュートリノが γ 線増光時
(0.5年)だけ放出される仮定

$$1.8 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

IceCube観測(7.5年)ニュー
トリノが放出される仮定

$$1.2 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

2014/2015年期間の
ニュートリノ事象

$$2.6 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

2.5 ニュートリノ生成

ニュートリノはJetで加速された陽子とガス雲やCMBとの反応によって生成される

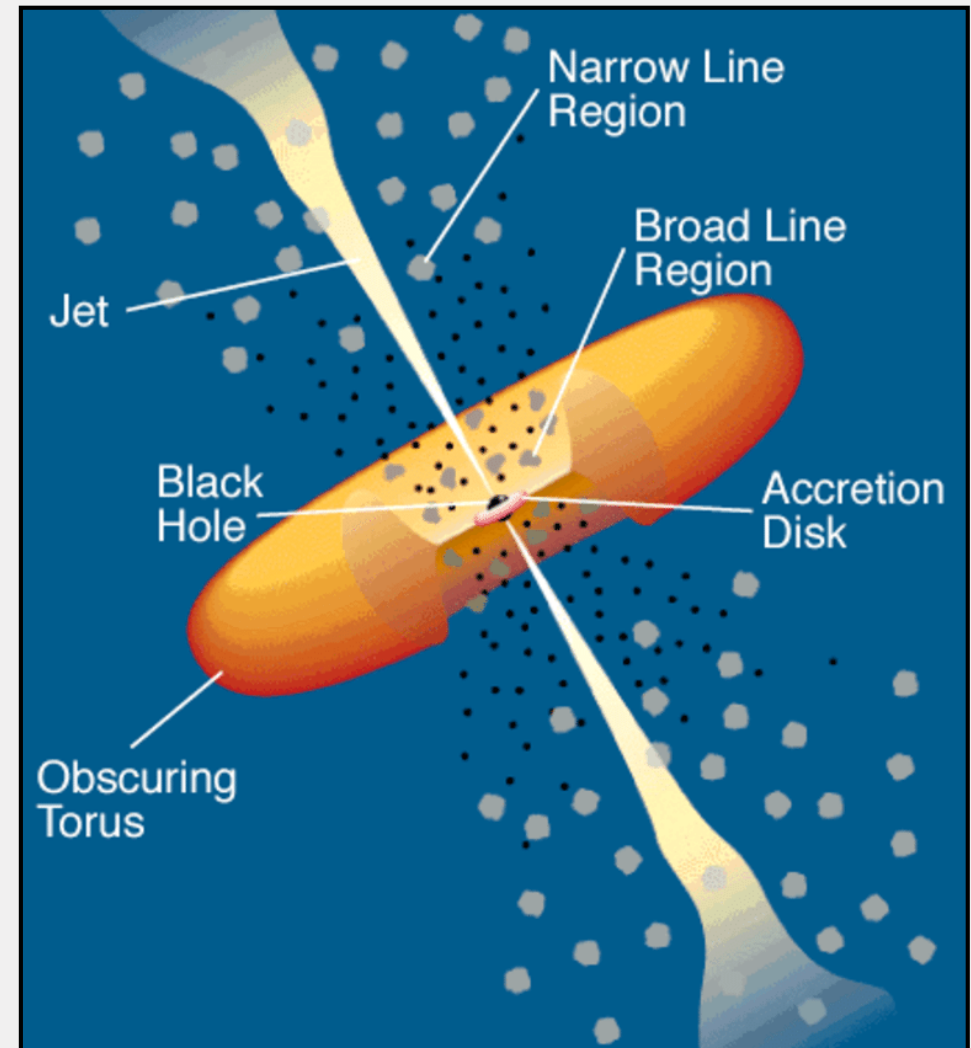
ニュートリノ生成反応

$$p + p \rightarrow \pi^{\pm}, \pi^0, p, n, \dots$$

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \begin{cases} \pi^+ + n \\ \pi^0 + p \end{cases}$$

$$\begin{cases} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu} \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_{\mu} + \nu_{\mu} \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu} \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu} \\ \pi^0 \rightarrow 2\gamma \end{cases}$$

Active Galactic Nuclei (AGN)



2.6 概要まとめ

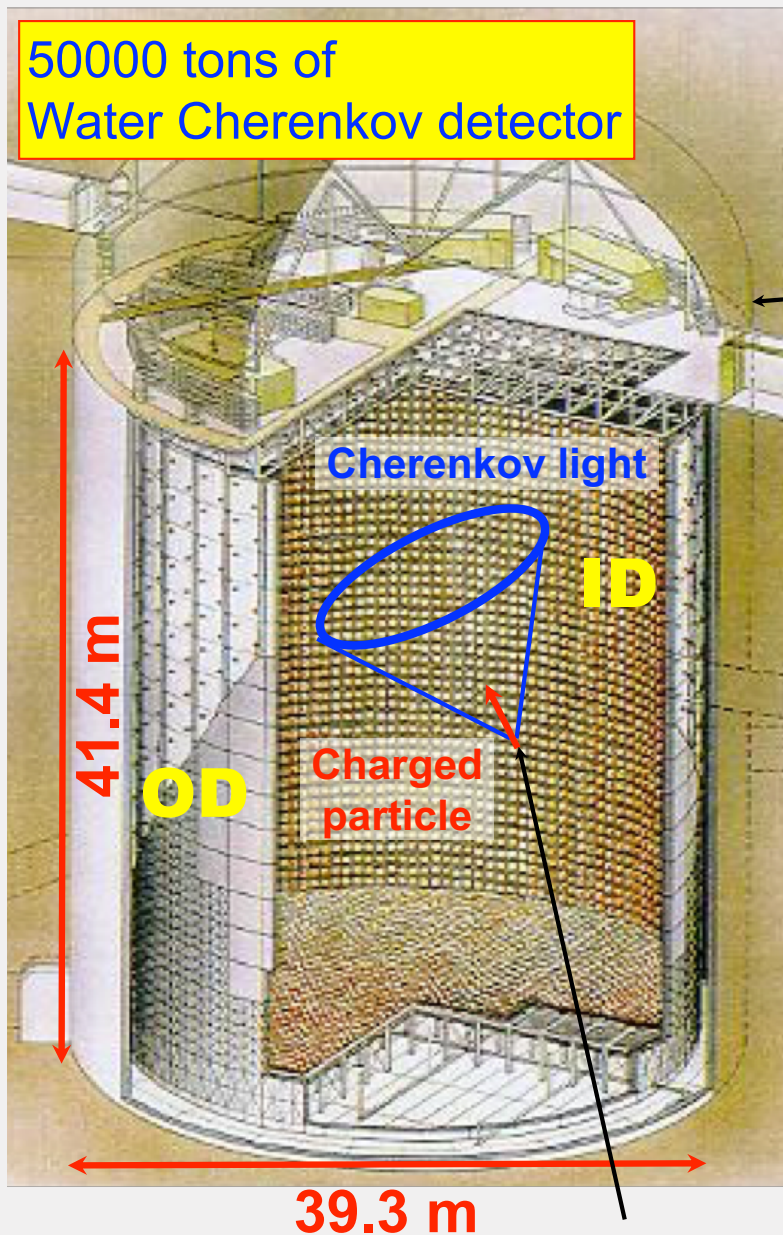
- ▶ IceCubeニュートリノ観測所はblazar TXS0506+056からの高エネルギーニュートリノ事象（290 TeV）を観測
- ▶ 多波長での追観測の結果、 γ 線増光時にニュートリノ事象が観測されていた（blazarは ν - γ のMulti-Messenger 天体？）
- ▶ IceCubeの過去のデータから2014/2015年にも有意なニュートリノ信号を発見
- ▶ 2014/2015信号期間では γ 線の増光は見られない（ ν - γ の相関関係について更なる観測が必要）



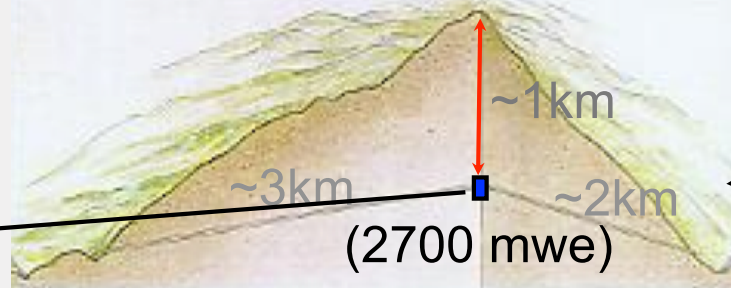
スーパーカミオカンデにおけるBlazar TXS0506+056
から放出された天体ニュートリノの探索

3.天体ニュートリノ探索

3.1 スーパーカミオカンデ (SK)



Kamioka mine



Phase	Period
SK-I	Apr.1996 - Jul.2001
SK-II	Oct.2002 - Oct.2005
SK-III	Jun.2006 - Sep.2008
SK-IV	Sep.2008 - May.2018
SK-V	Feb.2019-

データ : 1996年4月 - 2018年2月

Live Time : 5924.4日

感度領域 : GeV - TeV

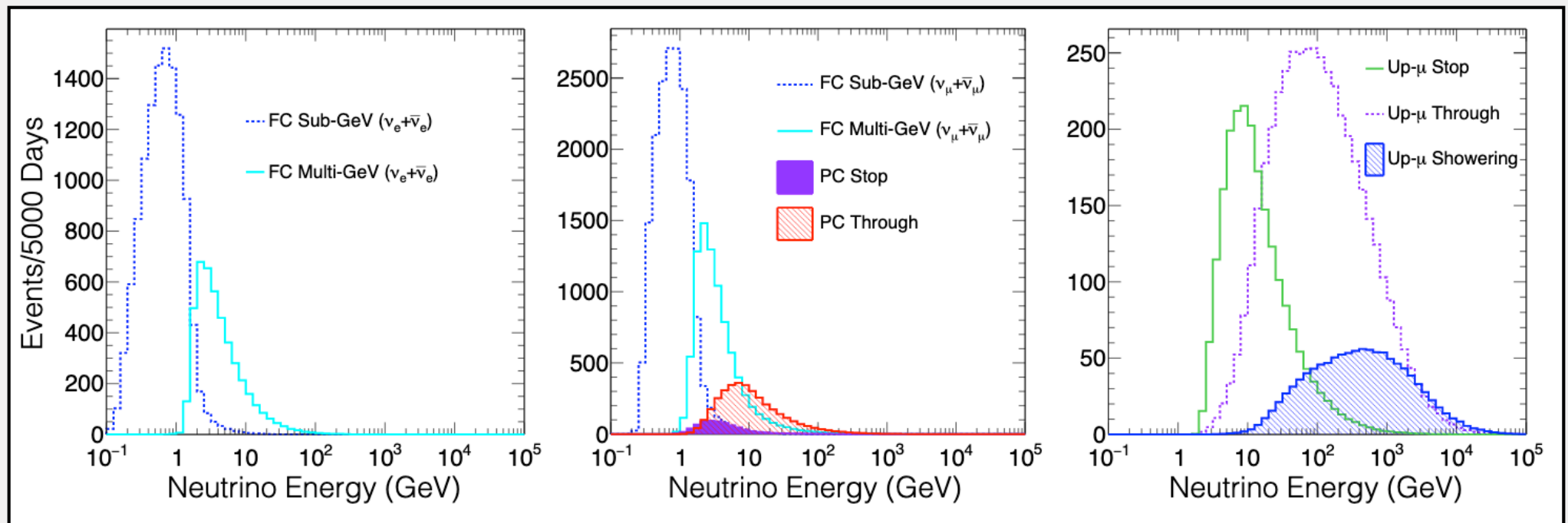
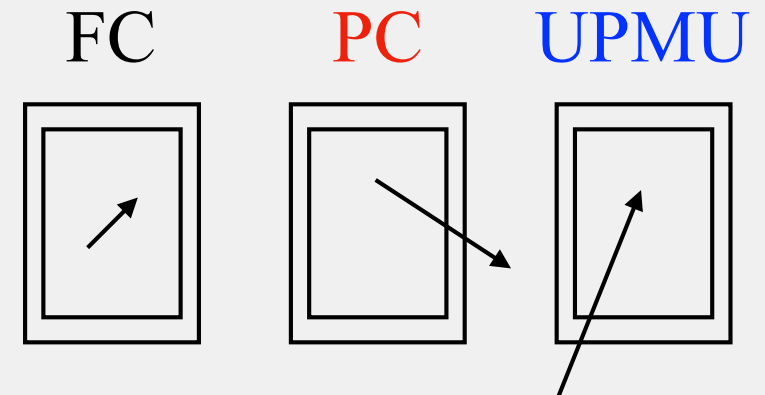
3.2 ニュートリノ事象

ニュートリノの種類やエネルギーによって事象を選別する。

Fully Contained Event (FC)

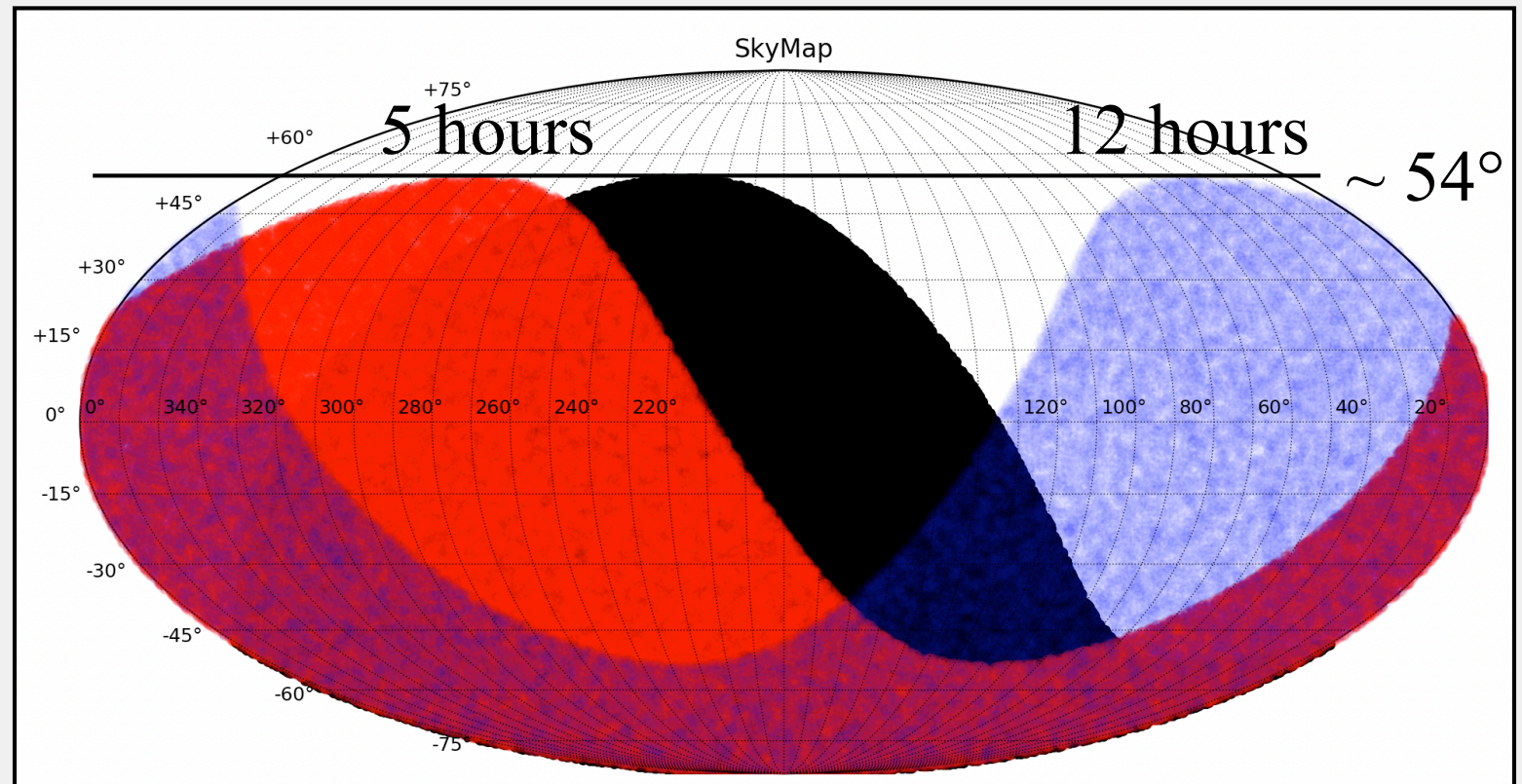
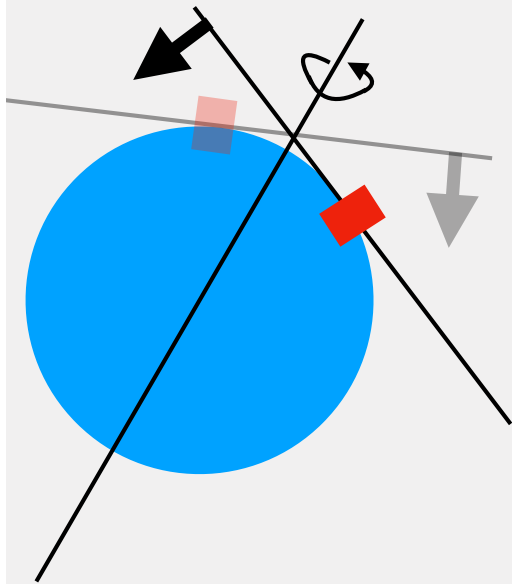
Partially Contained Event (PC)

Upward-going Muon Event (UPMU)



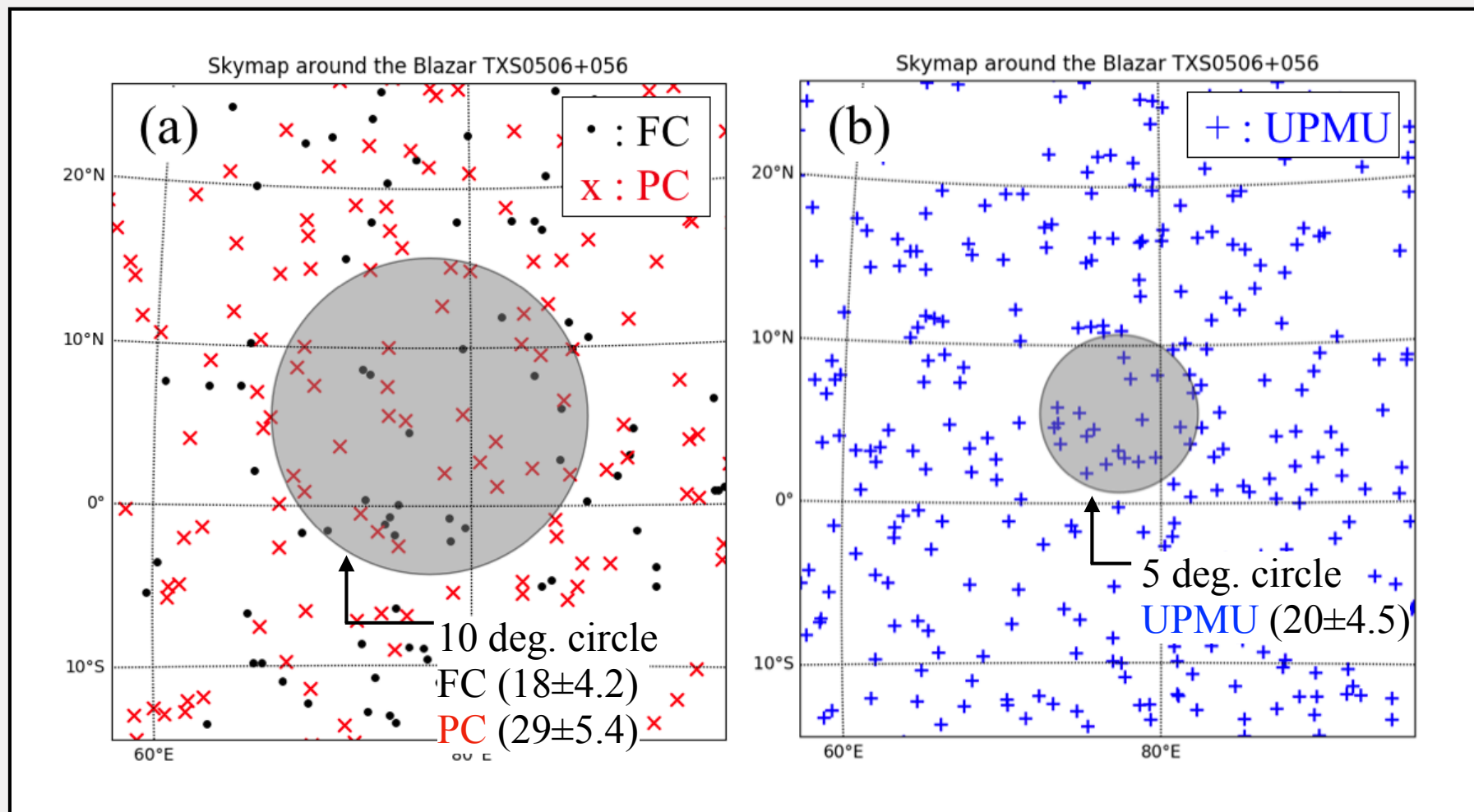
3.3 UPMU探索可能範囲

UPMUイベントに分類されるためには天頂角が 90° 以上でなければならない。そのため赤道座標系に変換した場合、最大で赤緯 54° の事象のみを探索可能である。

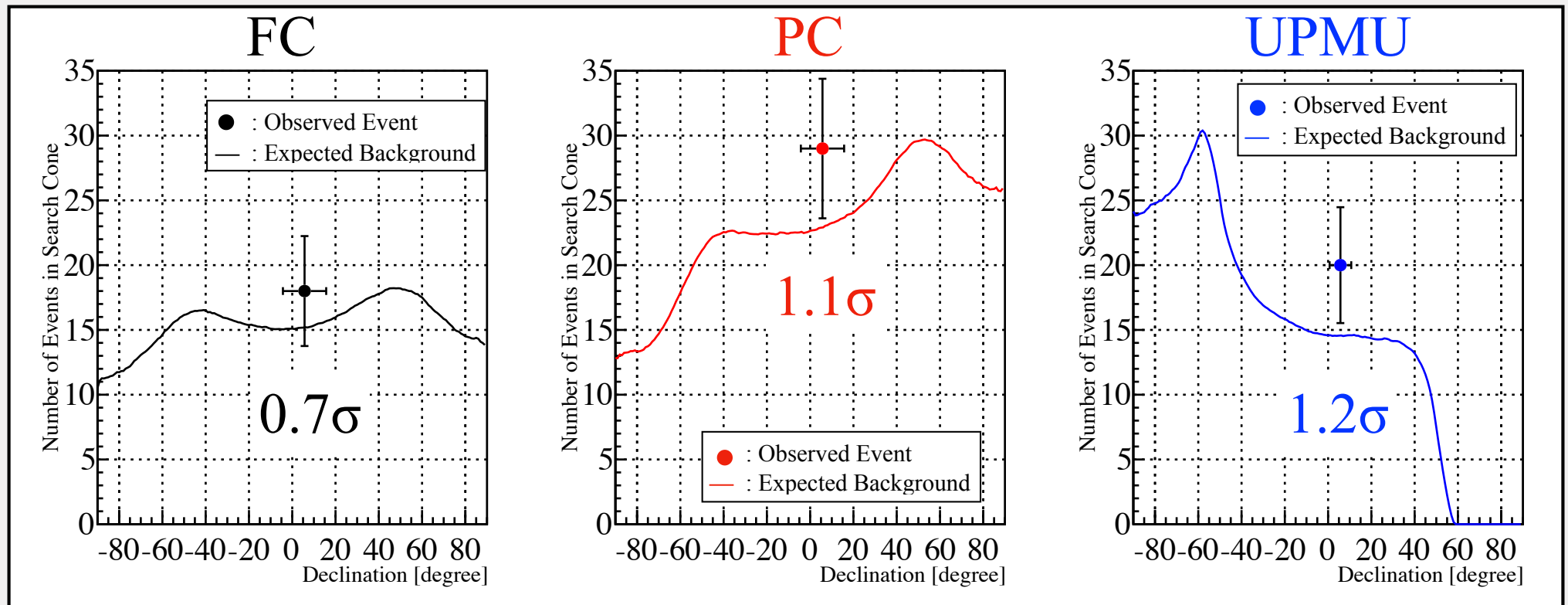


3.4 Blazar周りのν事象

再構成されたニュートリノ事象（1996年4月 - 2018年2月）
大気ニュートリノバックグラウンドからの超過を調べる

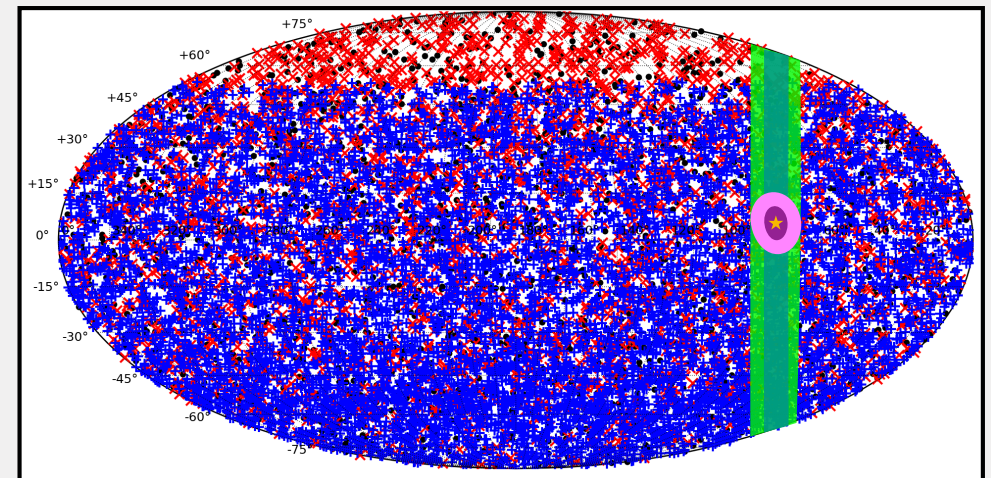


3.5 シミュレーションの比較



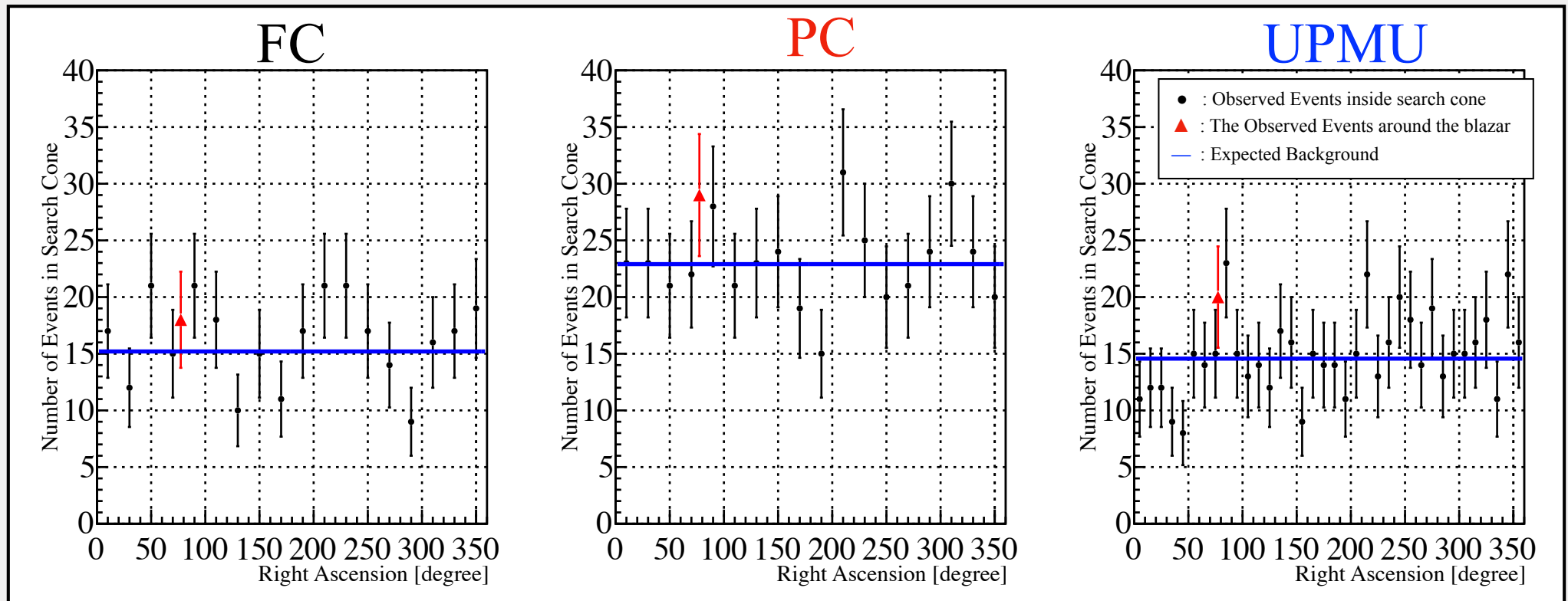
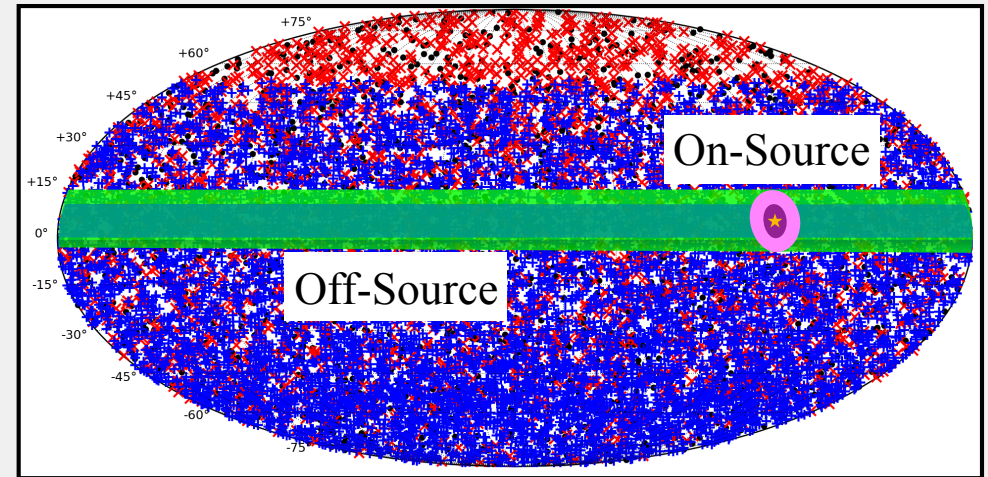
大気ニュートリノMCシミュレーションとの比較

有意な超過は見られない

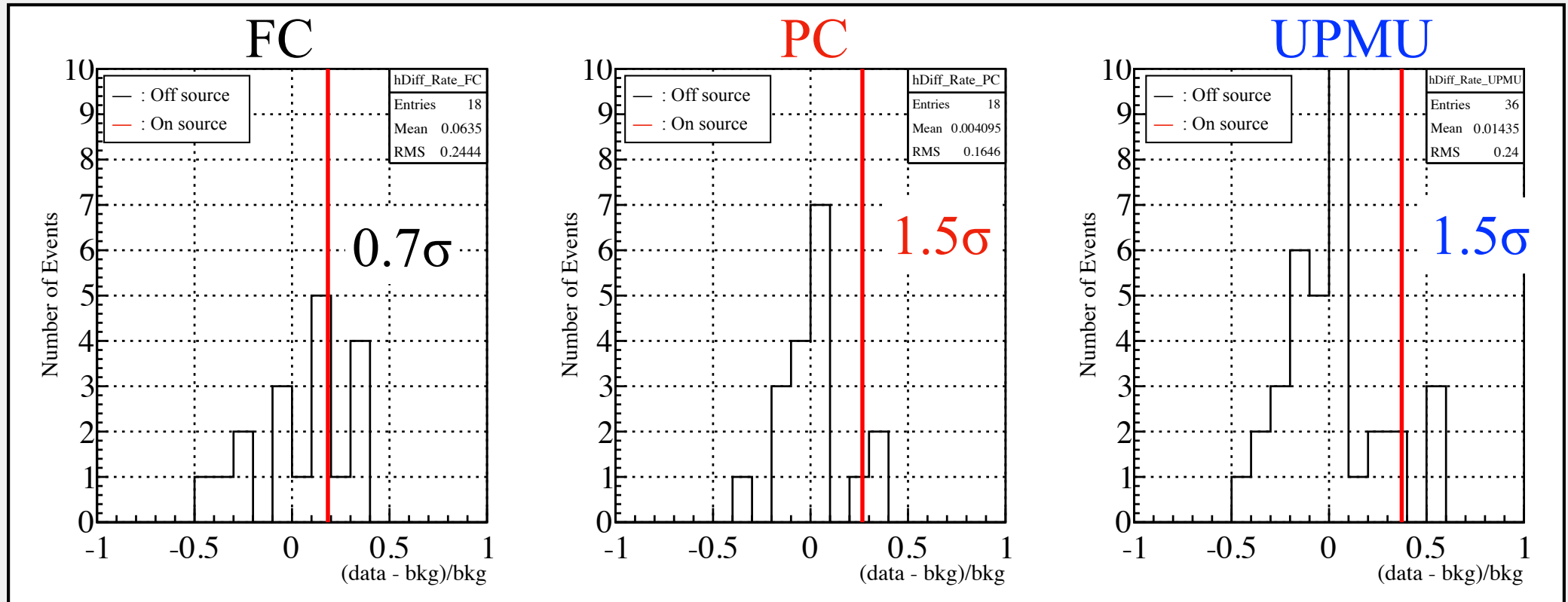


3.6 On-source vs Off-source

ニュートリノ事象が一様に分布しているならば、バックグラウンド事象数はR.A.に寄らない



3.7 On-source vs Off-source



Off-sourceでの分布の広がりから

On-sourceの σ を計算

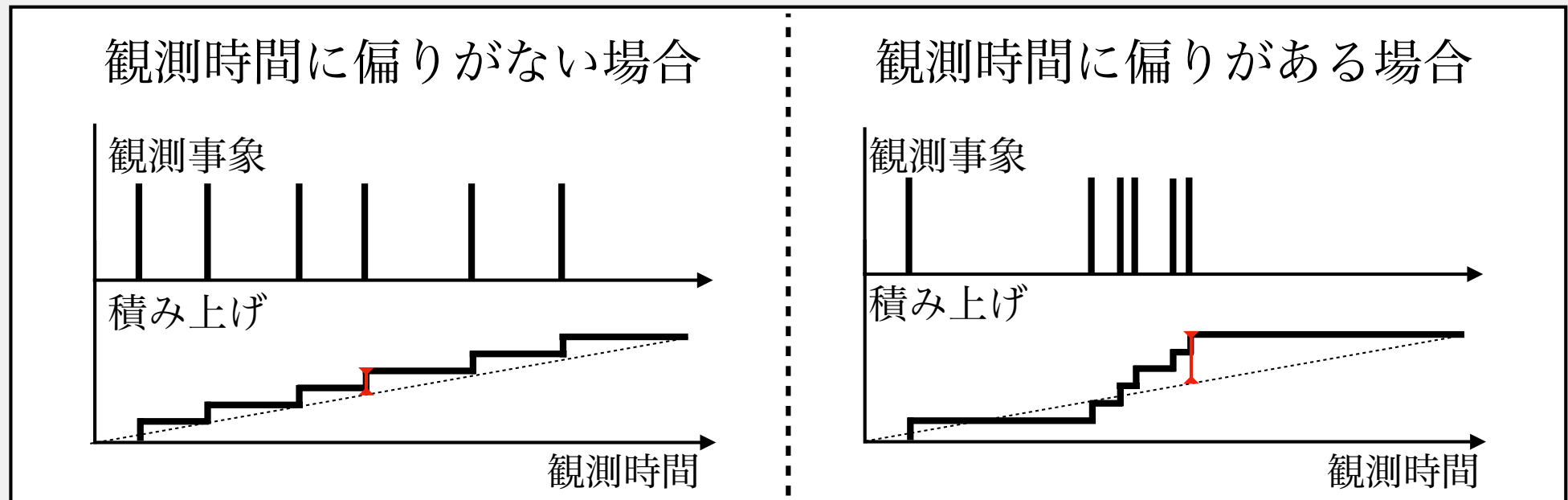
(Data - Background)

Background

有意な超過は見られない

3.8 Kolmogorov-Smirnov Test

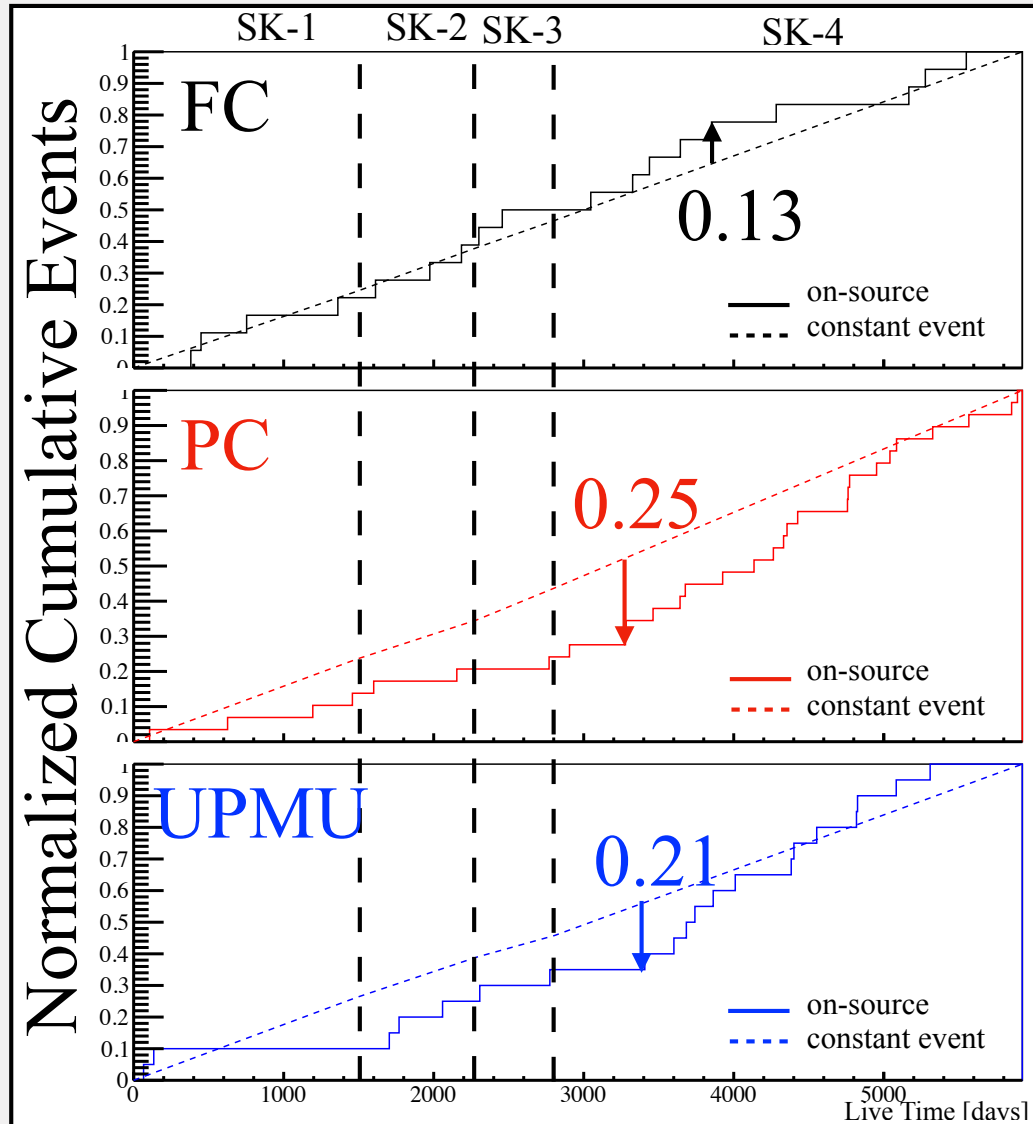
観測データに時間依存が存在するか調べるためにKS-testを用いた。積み上げヒストグラムと線形増加直線との最大のズレで評価する。



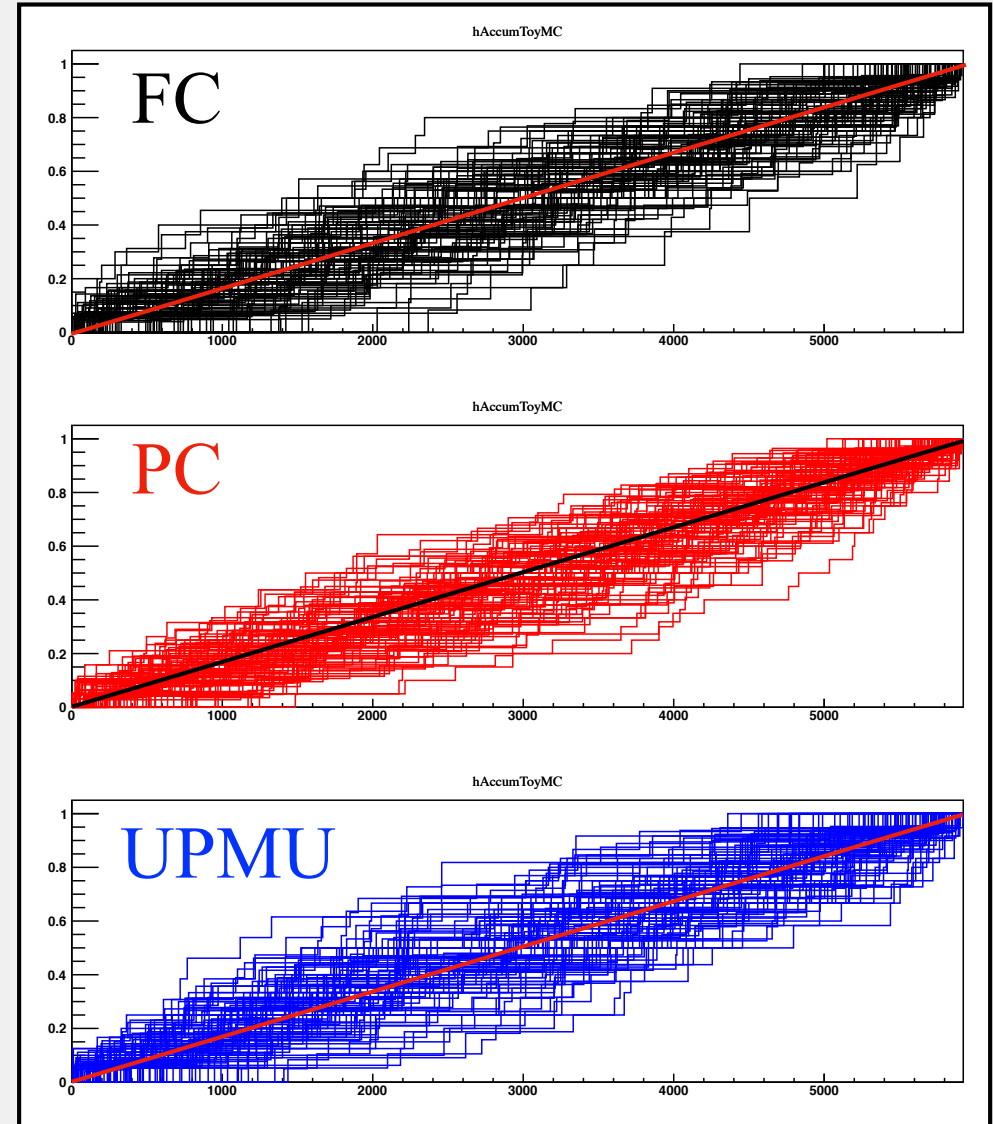
「観測データ」と「Toy MC（乱数を用いた擬似データ）」との比較を行う

3.9 KS-Test (データとToy MC)

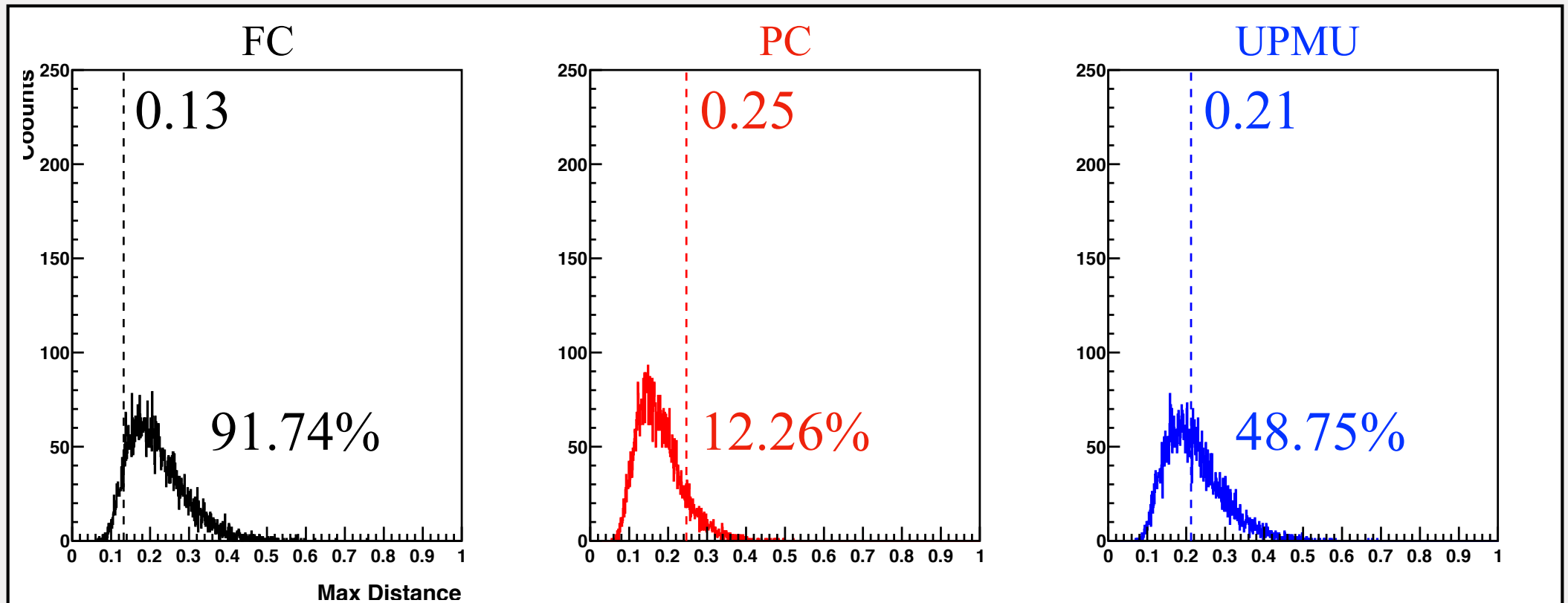
観測データ



Toy MC (10,000 set)



3.10 最大距離分布の比較



p値（実験データよりも右側のToy MC分布の割合）>5%



有意に時間依存したニュートリノ事象群は存在しない

3.11 ニュートリノ探索まとめ

	FC	PC	UPMU
Search Criteria			
Threshold Energy [GeV]	5.1	1.8	1.6
Search Range [°]	10	10	5
Number of Events			
Observed Events	18.0 ± 4.2	29.0 ± 5.4	20.0 ± 4.5
Expected Events	15.2	22.0	14.5
Agreement	0.7σ	1.1σ	1.2σ
Relative Difference of On-source and Off-source			
On-source	0.18	0.27	0.37
Off-source Mean	0.064	0.0041	0.014
Off-source RMS	0.24	0.16	0.24
Agreement	0.7σ	1.5σ	1.5σ
Event Rate [/1000 livetime day]			
On-source	3.0 ± 0.7	4.9 ± 0.9	3.4 ± 0.8
Off-source	2.7 ± 0.6	3.9 ± 0.6	2.5 ± 0.6
Agreement	not significant	not significant	not significant
Kolmogorov-Smirnov Test			
Maximum Distance	0.13	0.25	0.21
<i>p</i> -value	91.74%	12.26%	48.75%

有意な
ニュートリノ
事象なし

4. 上限値計算

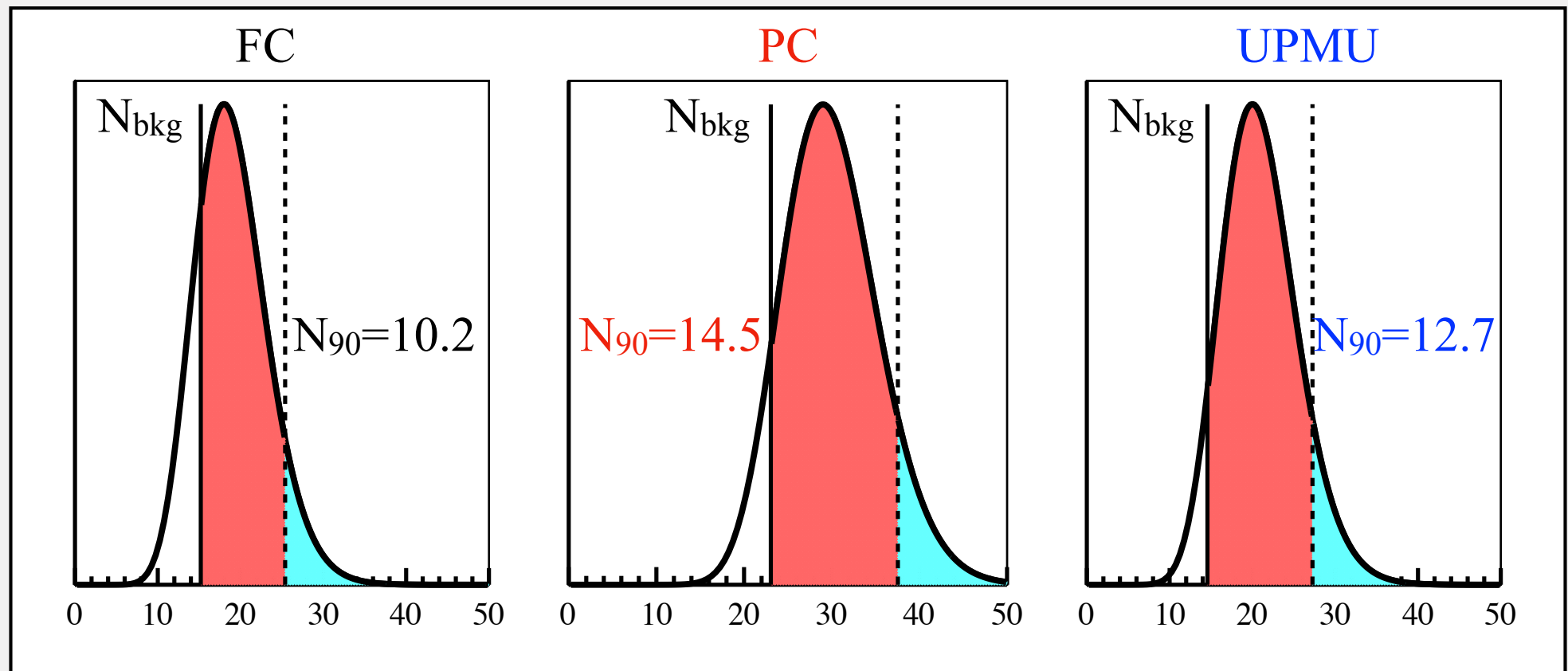
理論モデルとの比較

4.1 90% Confidence Level

ポアソン分布を用いてBlazarから飛来する

ニュートリノ事象の90% C.L. Upper Limit (N_{90}) を計算する

$$\int_{N_{\text{bkg}}}^{N_{90}} dx \text{Poisson}(N_{\text{obs}}, x) = 0.9 \int_{N_{\text{bkg}}}^{\infty} dx \text{Poisson}(N_{\text{obs}}, x)$$



4.2 Fluence Limit

1996年4月から2018年2月までのLive Time (5924.35日)の期間にBlazar方向から飛来したニュートリノの1 cm²当たりの個数を求める

$$\Phi_{\text{FC}}^{\nu_x + \bar{\nu}_x} = \frac{N_{90}^{\text{FC}}}{N_T \int_{5.1 \text{ GeV}}^{10 \text{ GeV}} dE_\nu \left(\sigma^{\nu_x}(E_\nu) \varepsilon^{\nu_x}(E_\nu) + \sigma^{\bar{\nu}_x}(E_\nu) \varepsilon^{\bar{\nu}_x}(E_\nu) \right) \lambda(E_\nu^{-\gamma})} \quad (\text{x=e, } \mu)$$

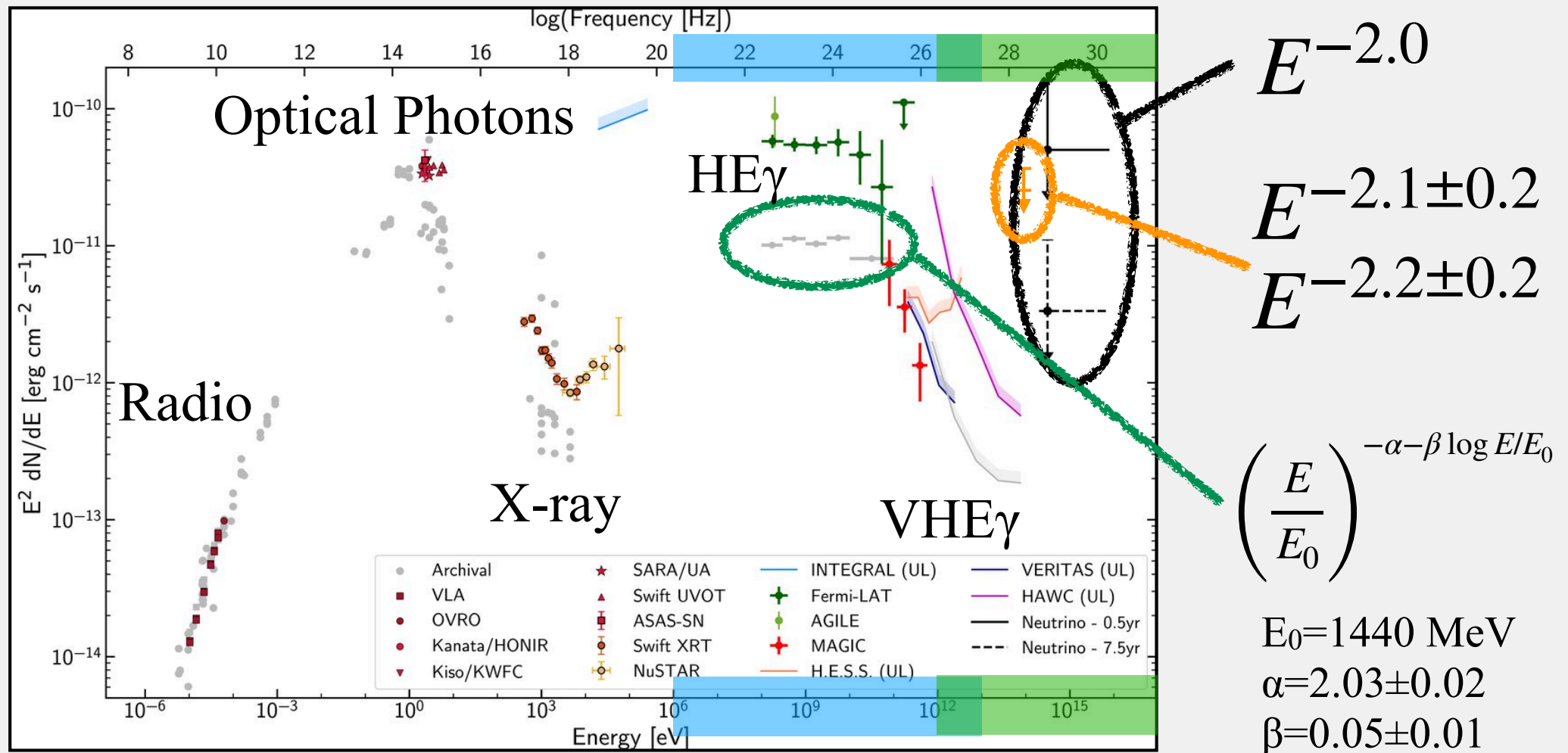
$$\Phi_{\text{PC}}^{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu} = \frac{N_{90}^{\text{PC}}}{N_T \int_{1.8 \text{ GeV}}^{100 \text{ GeV}} dE_\nu \left(\sigma^{\nu_\mu}(E_\nu) \varepsilon^{\nu_\mu}(E_\nu) + \sigma^{\bar{\nu}_\mu}(E_\nu) \varepsilon^{\bar{\nu}_\mu}(E_\nu) \right) \lambda(E_\nu^{-\gamma})}$$

$$\Phi_{\text{UPMU}}^{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu} = \frac{N_{90}^{\text{UPMU}}}{A_{\text{eff}}(z) \int_{1.6 \text{ GeV}}^{10 \text{ TeV}} dE_\nu \left(P^{\nu_\mu}(E_\nu) S^{\nu_\mu}(z, E_\nu) + P^{\bar{\nu}_\mu}(E_\nu) S^{\bar{\nu}_\mu}(z, E_\nu) \right) \lambda(E_\nu^{-\gamma})}$$

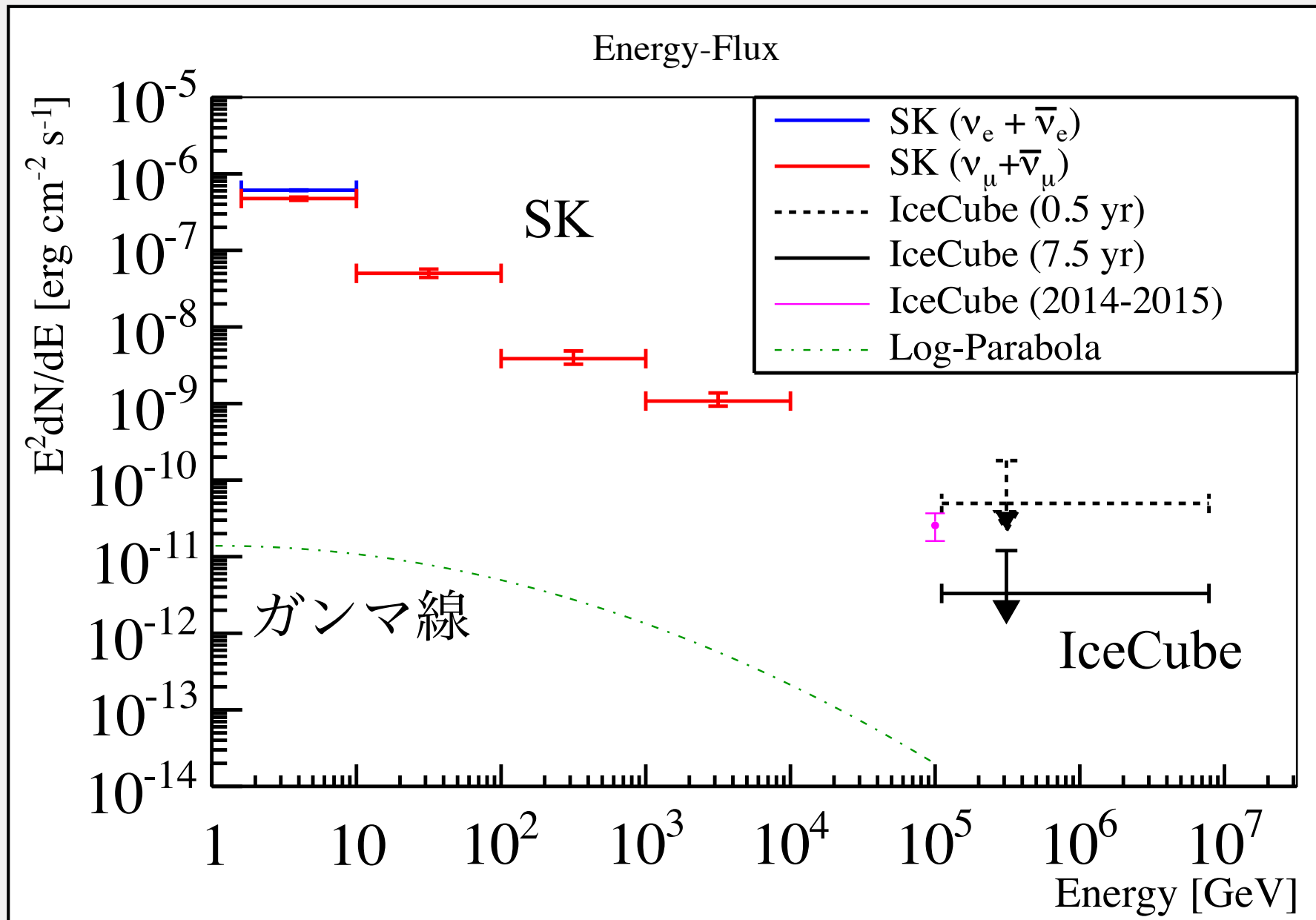
N_T : Number of target nuclei ($\sim 3 \times 10^{34}$)	A_{eff} : Zenith-dependent effective area [cm ²]
σ : Combined cross-section in all interactions [cm ²]	P : Probability for a neutrino to create a muon [%]
ε : Detection efficiency [%]	S : Shadowing neutrinos due to interactions in the Earth [%]
λ : Number density of neutrinos [/MeV]	λ : Number density of neutrinos [/MeV]

4.3 エネルギースペクトラム

blazarからのニュートリノが観測されたのは2017年のIceCubeが初めてであり、ニュートリノのエネルギースペクトラムの明確な理論予測がない

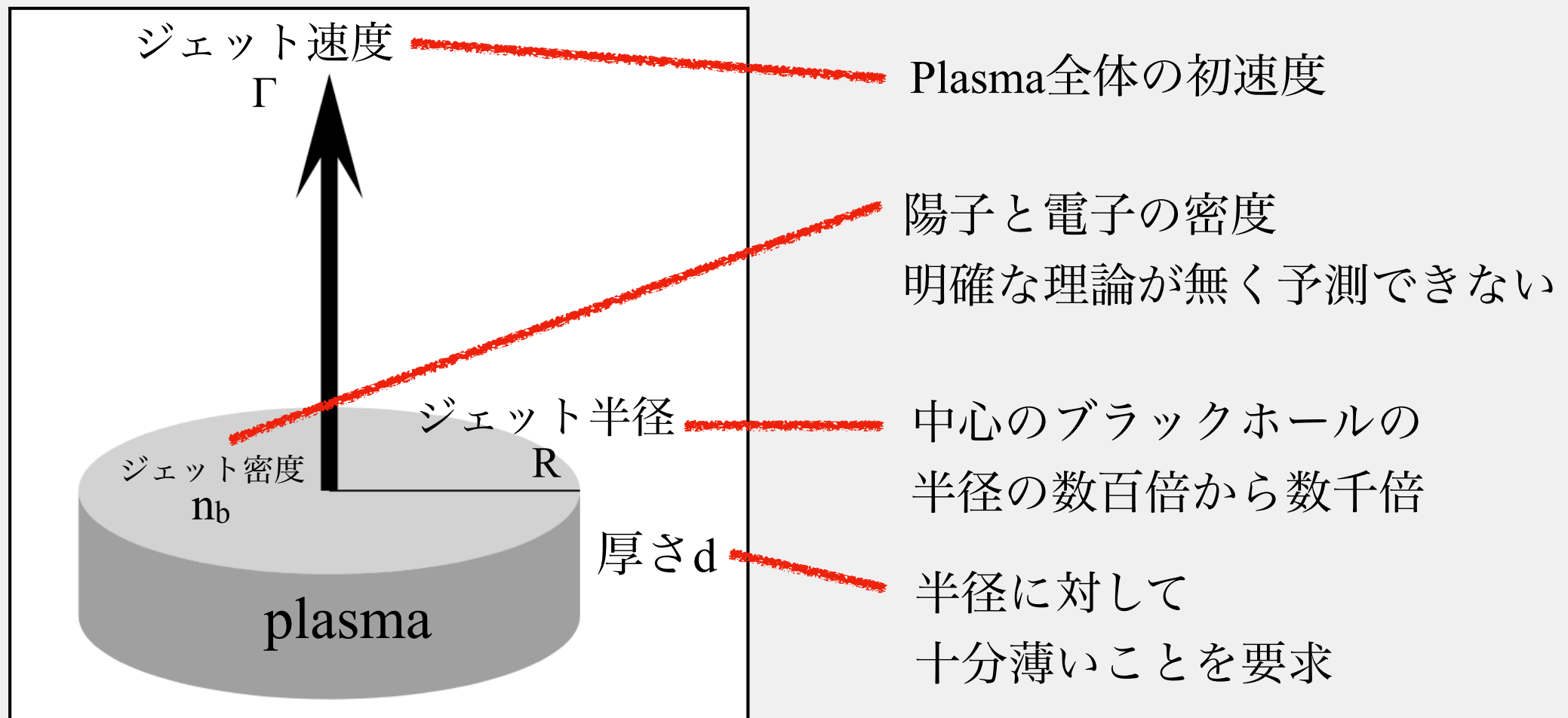


4.4 IceCube との比較



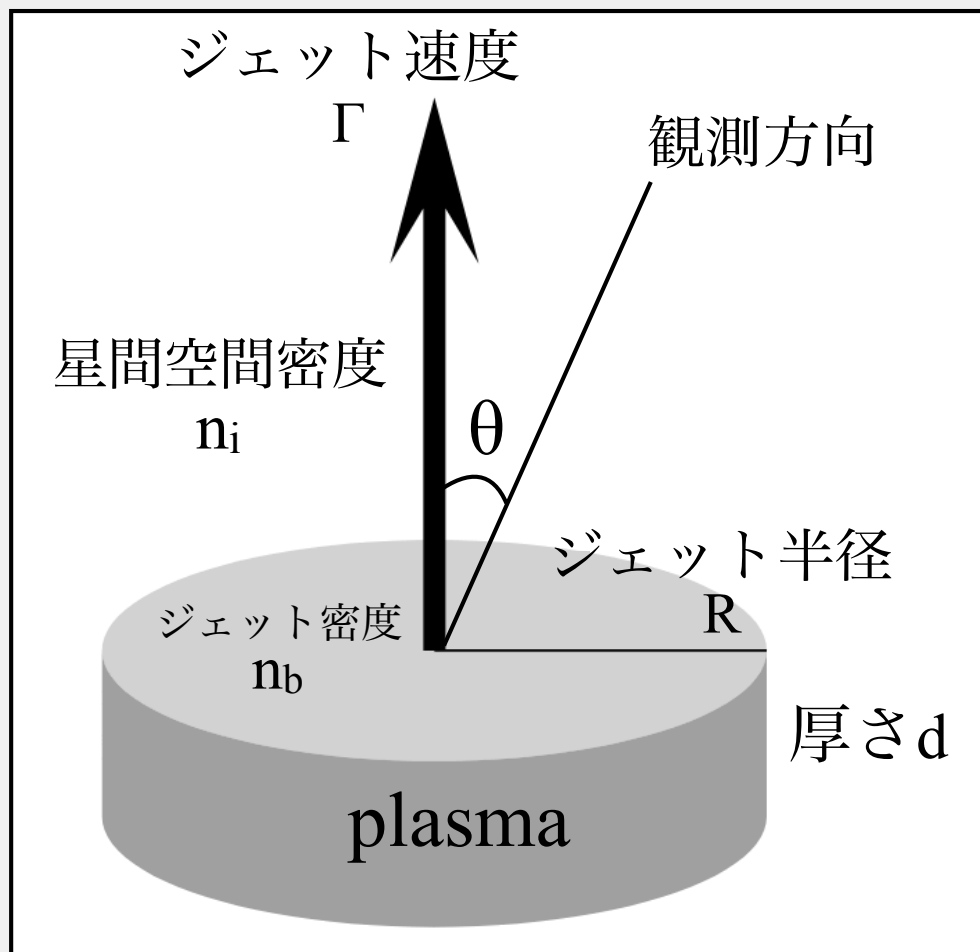
4.5 理論モデルのうちの1つ

blazarのジェットの生成機構や加速機構は未だ明確な理論が存在しない。Schusterらはblazarのジェットを4変数（半径、厚さ、速度、密度）でモデル化した。



4.6 理論モデルからのニュートリノ

ジェット内の陽子は星間空間の陽子と相互作用し、ニュートリノとガンマ線を放出する。観測方向 θ でのフラックスの時間変動が数値計算された。

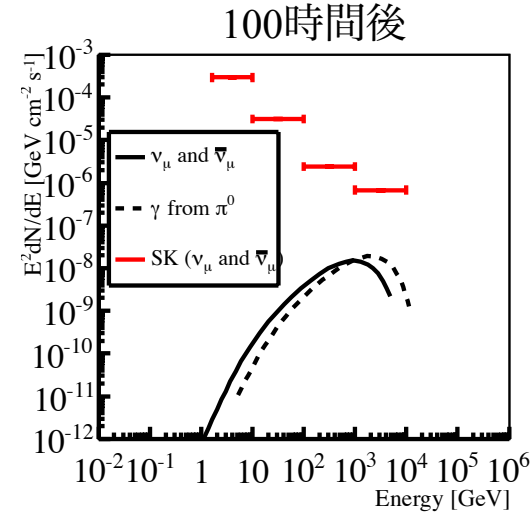
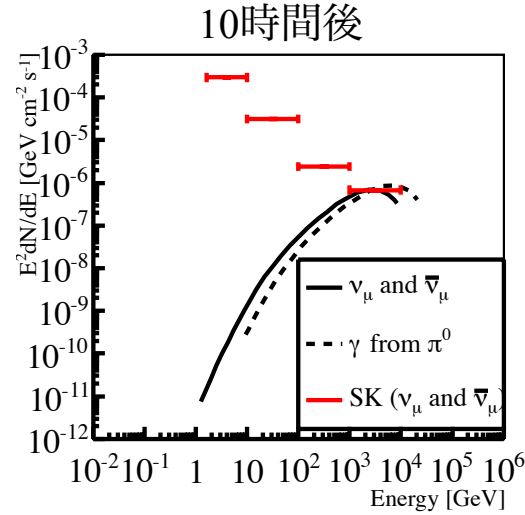
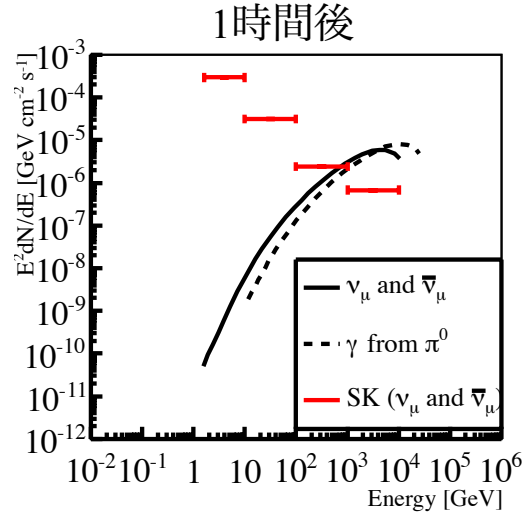


$$p + p \rightarrow \pi^{\pm}, \pi^0, \dots$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \\ \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu}) + \nu_e(\bar{\nu}_e) \\ \pi^0 \rightarrow 2\gamma \end{array} \right.$$

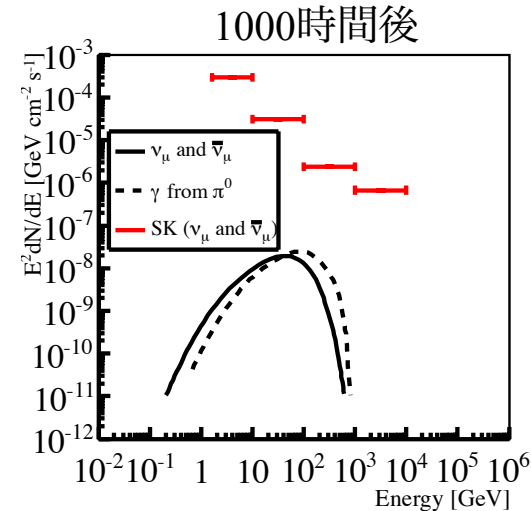
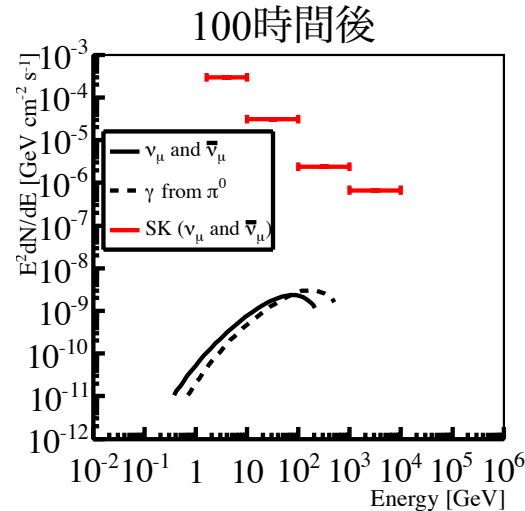
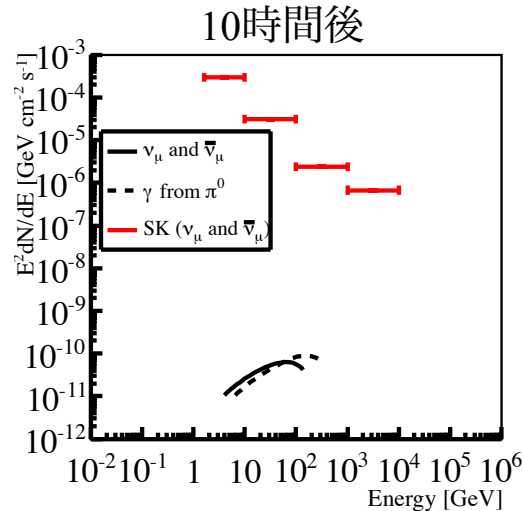
4.7 理論モデルとの比較

ジェットの減速が早い場合



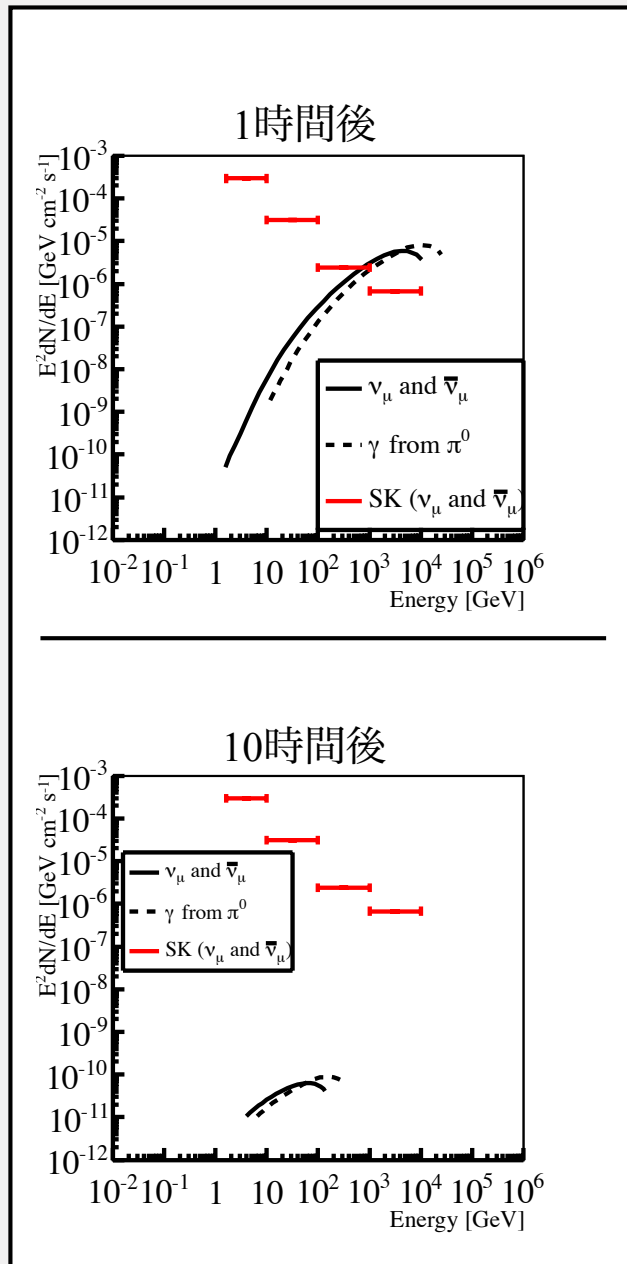
初期速度 $\Gamma = 300$
 半径 $R = 10^{14}$ cm
 厚さ $d = 3 \times 10^{13}$ cm
 密度 $n_b = 5 \times 10^8$ cm $^{-3}$
 星間密度 $n_i = 0.2$ cm $^{-3}$
観測角度 $\theta = 0.1^\circ$

ジェットの減速が遅い場合



初期速度 $\Gamma = 300$
 半径 $R = 2 \times 10^{15}$ cm
 厚さ $d = 10^{14}$ cm
 密度 $n_b = 10^8$ cm $^{-3}$
 星間密度 $n_i = 1.5$ cm $^{-3}$
観測角度 $\theta = 2^\circ$

4.7 理論モデルとの比較



☑ ニュートリノとガンマ線のフラックスが同程度
→High Energy ガンマ線の観測領域に感度を持つ
SKの情報から有用な情報を得られる

☑ パラメータと時間によってはSKの上限値を超える
→今後のblazar解析によってニュートリノ信号を
捉える可能性を示唆（カタログには約600の
blazar）

5. まとめ

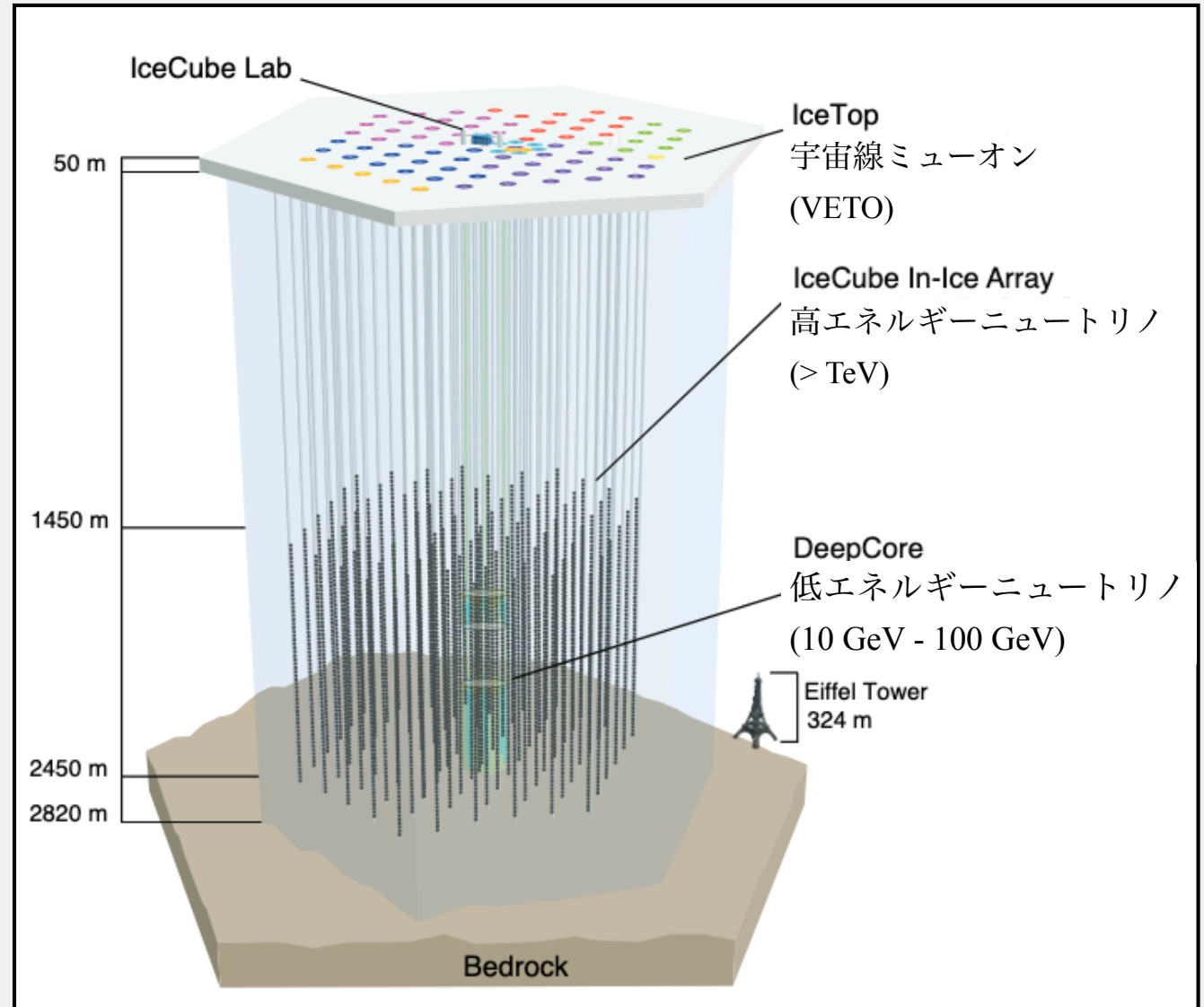
- 高エネルギーニュートリノ事象がIceCubeで観測され、blazar TXS0506+056起源であることが追観測で推測された
- ☑ 大気ニュートリノMCを使用したバックグラウンドとの比較、On-sourceとOff-sourceとの比較、KS-testでのToy MCとの比較、これらの解析結果からは有意な信号は発見されなかった
- ☑ blazarからのニュートリノ信号の上限値をGeV-TeV領域で $10^{-6} - 10^{-9} [\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$ に制限した
- ☑ GeV-TeVエネルギー領域ではガンマ線とニュートリノが同程度のフラックスで放出されていることが予測される。SKでのブレーザーニュートリノ解析がジェット機構の解明に繋がる

Backup

2.2 IceCubeニュートリノ観測所

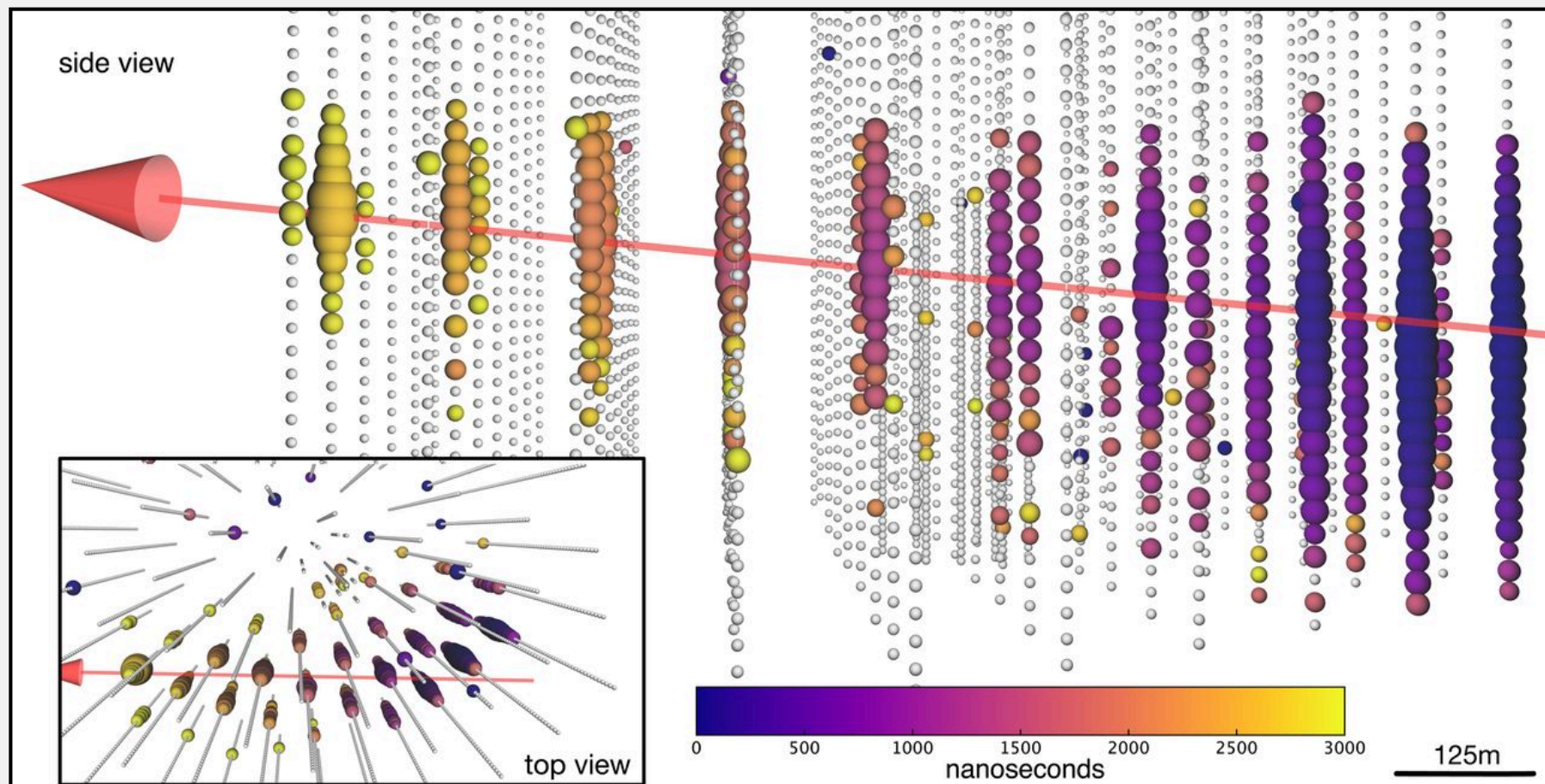
南極に設置された世界最大のニュートリノ検出器で、宇宙からの高エネルギーニュートリノ探索を目的とする

Detector Design	
データ取得	2011年3月-
体積	10^9 ton
光センサー	5160個
時間分解能	2 nsec



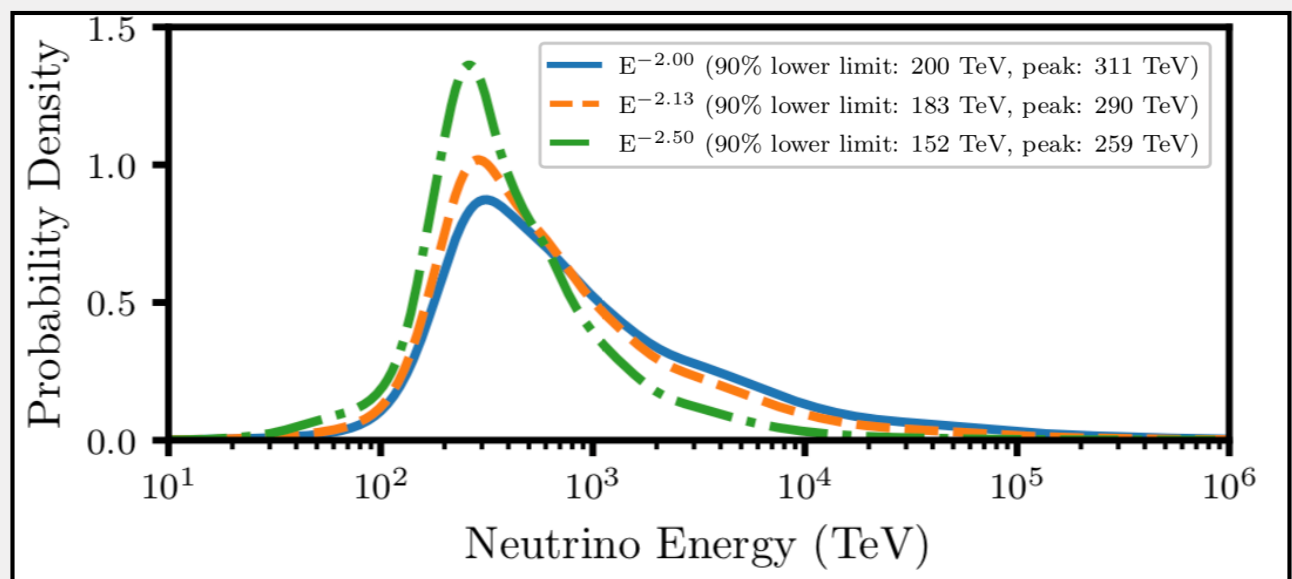
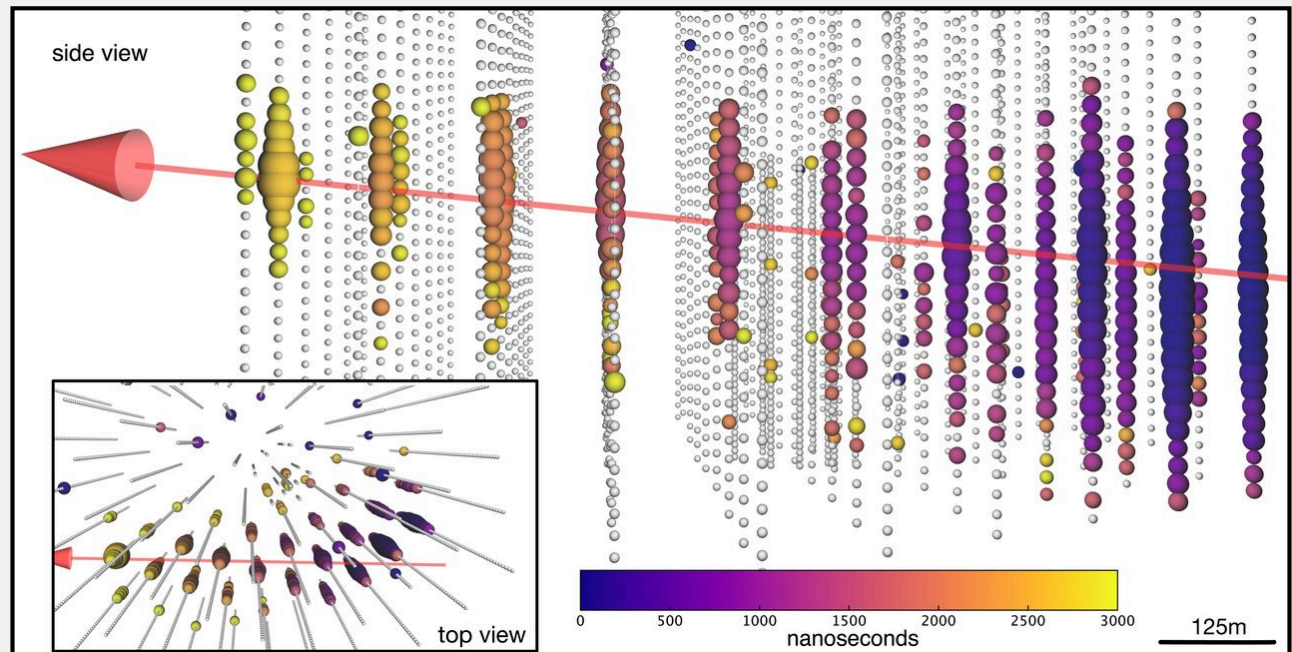
2.3 IceCube-170922A

2017年9月22日20:54:30.43 UTCにIceCubeのリアルアラートシステムにより超高エネルギーニュートリノ事象 ($\sim 290\text{TeV}$) が観測された。この情報は43秒後には世界中に向けて発信された



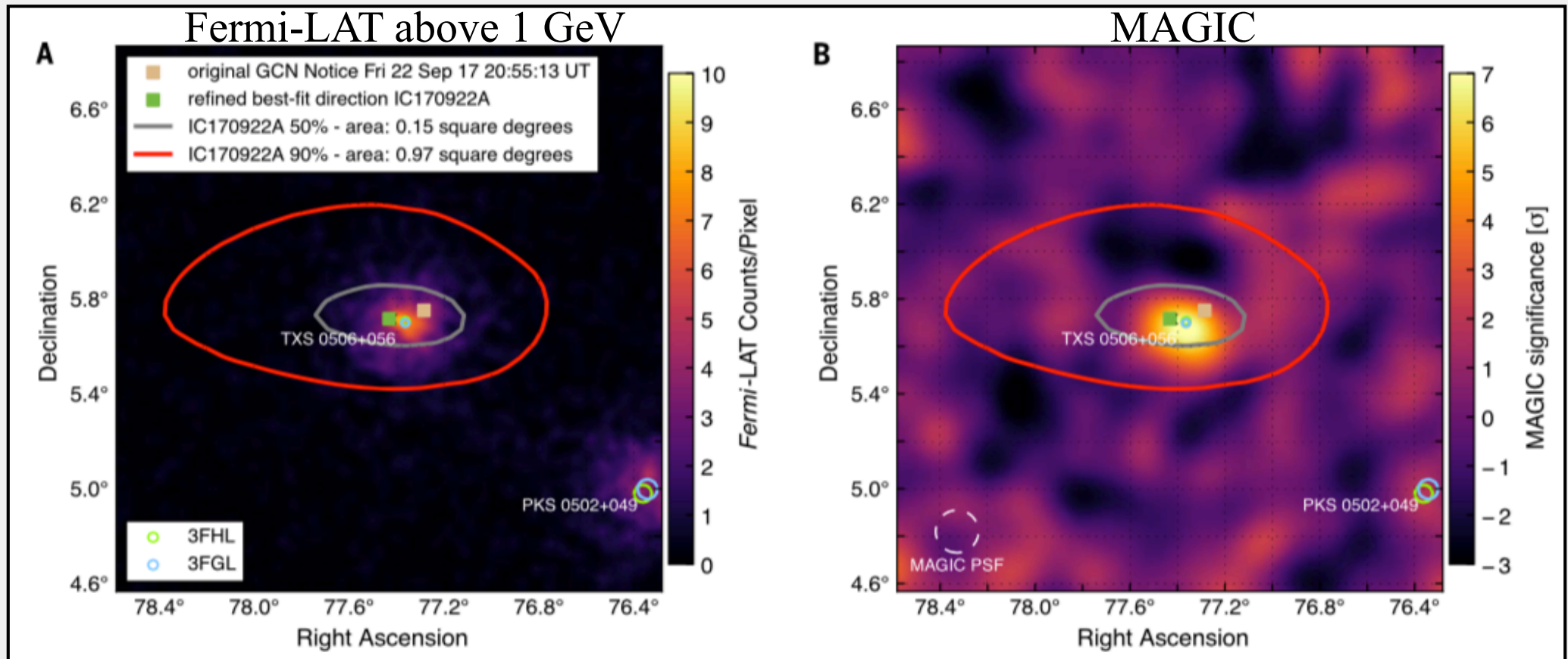
2.3 IceCube-170922A

2017年9月22日20:54:30.43
UTCにIceCubeのリアルアラートシステムにより超高エネルギーニュートリノ事象 ($\sim 290\text{TeV}$) が観測された。この情報は43秒後には世界中に向けて発信された



2.4 天体望遠鏡による追観測

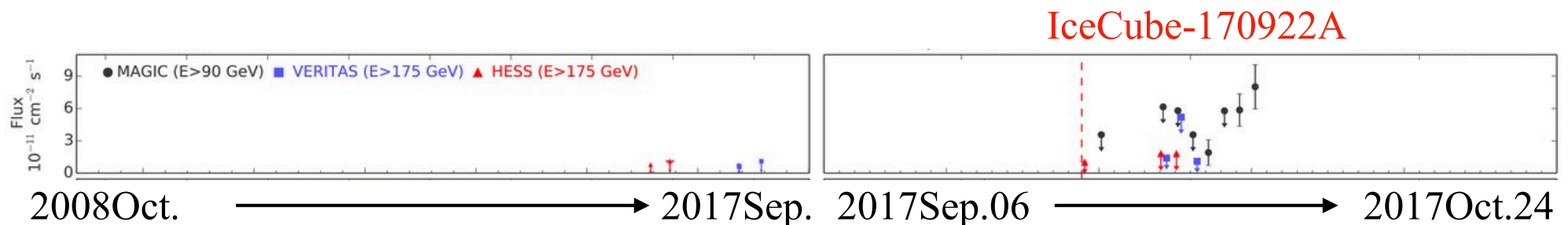
Fermi-LAT (γ 線天文衛星) とMAGIC (チェレンコフ望遠鏡) による追観測の結果、ニュートリノは(R.A., Dec.)= $(77.43^{+0.95}_{-0.65}, +5.72^{+0.50}_{-0.30})$ に位置する天体Blazar TXS0506+056起源だと推測された



2.6 Very-High-Energy γ -ray

- ▶ 最初のMAGIC観測では信号なし。28日からの観測では予測されるバックグラウンドよりも 6.2σ 高い信号を検出。10月4日以降は満月のため観測できず。
- ▶ 24日以降のVERITASとHESSでは γ 線信号なし。 γ 線信号の上限値として $7.5 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (HESS)、 $1.2 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (VERITAS)。
- ▶ 上限値計算はMAGIC観測の結果と一致。

Gamma Imaging Cherenkov Telescopes MAGIC (Spain)	: 9月24日(2時間)、9月28日-10月4日(13時間)	E>90 GeV
Telescope Array System VERITAS (Arizona USA)	: アラートから12時間後(1時間)、9月24日-	E>175 GeV
High-Energy Stereoscopic System H.E.S.S. (Namibia)	: アラートから4時間後(1.3時間)、9月24日-	E>175 GeV



2.7 High-Energy γ -ray

- ▶ Fermi-LAT (γ 線天文衛星) は2.4 steradianの広い視野を持ち、3時間ごとに全天をスキャン。
- ▶ 2017年4月からGeVバンドで増光を確認。
- ▶ AGILE (γ 線天文衛星) は13日間の観測でFermi-LATとConsistentな結果を取得
($(5.3 \pm 2.1) \times 10^{-7} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$)

平均 γ 線フラックス : $(7.6 \pm 0.2) \times 10^{-8} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$

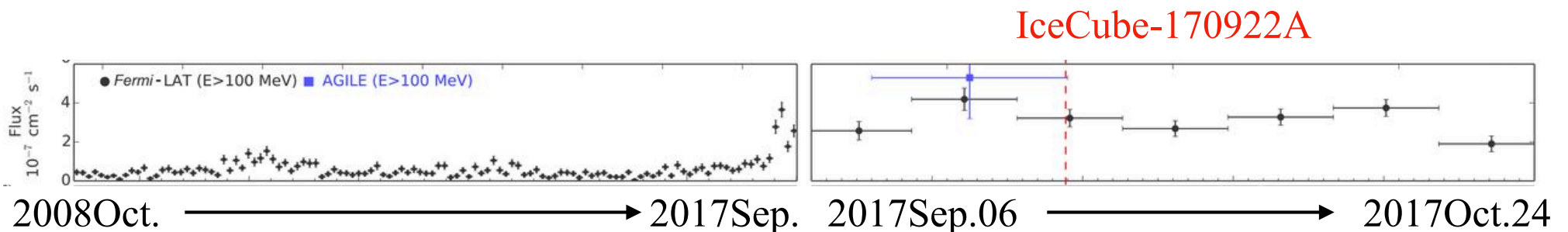
2008年8月 - 2017年10月

最大 γ 線フラックス : $(5.3 \pm 0.6) \times 10^{-7} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$

2017年7月4日 - 7月11日

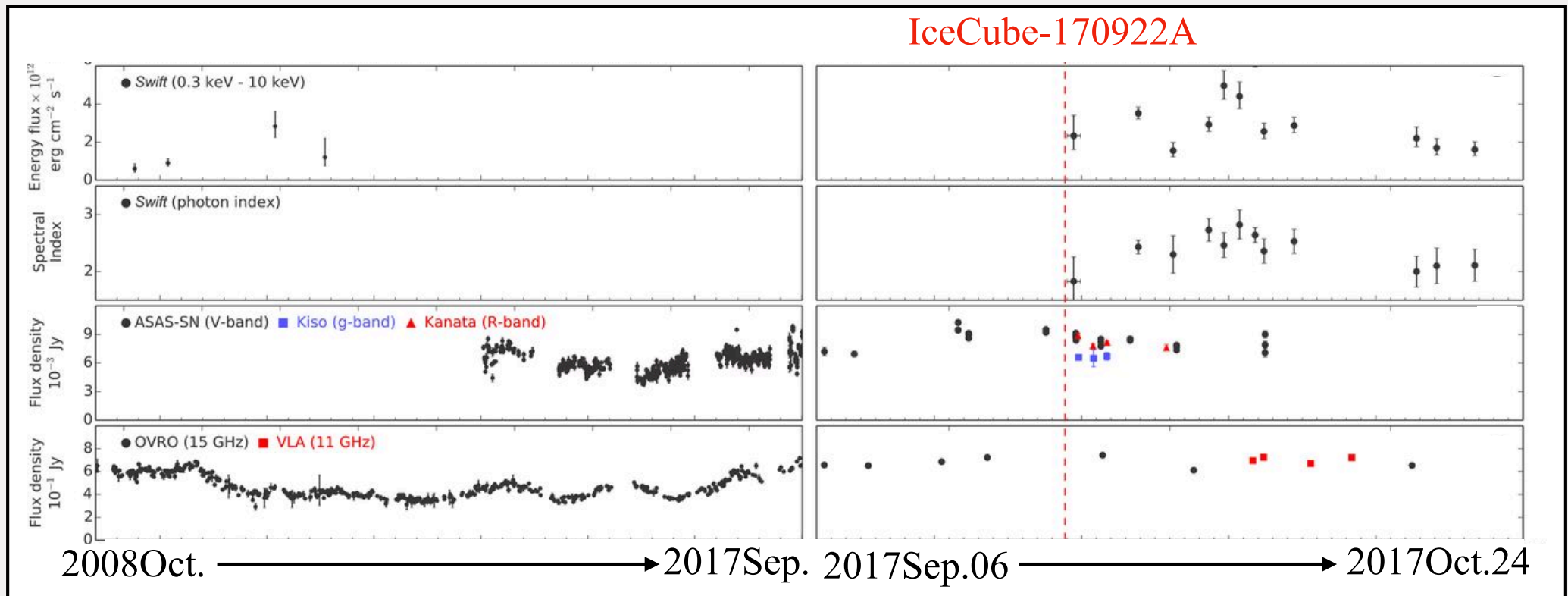
最大増加 : $(7.9 \pm 2.9) \times 10^{-8} \rightarrow (4.0 \pm 0.5) \times 10^{-7} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$

2017年8月8-15日 - 8月15-22日



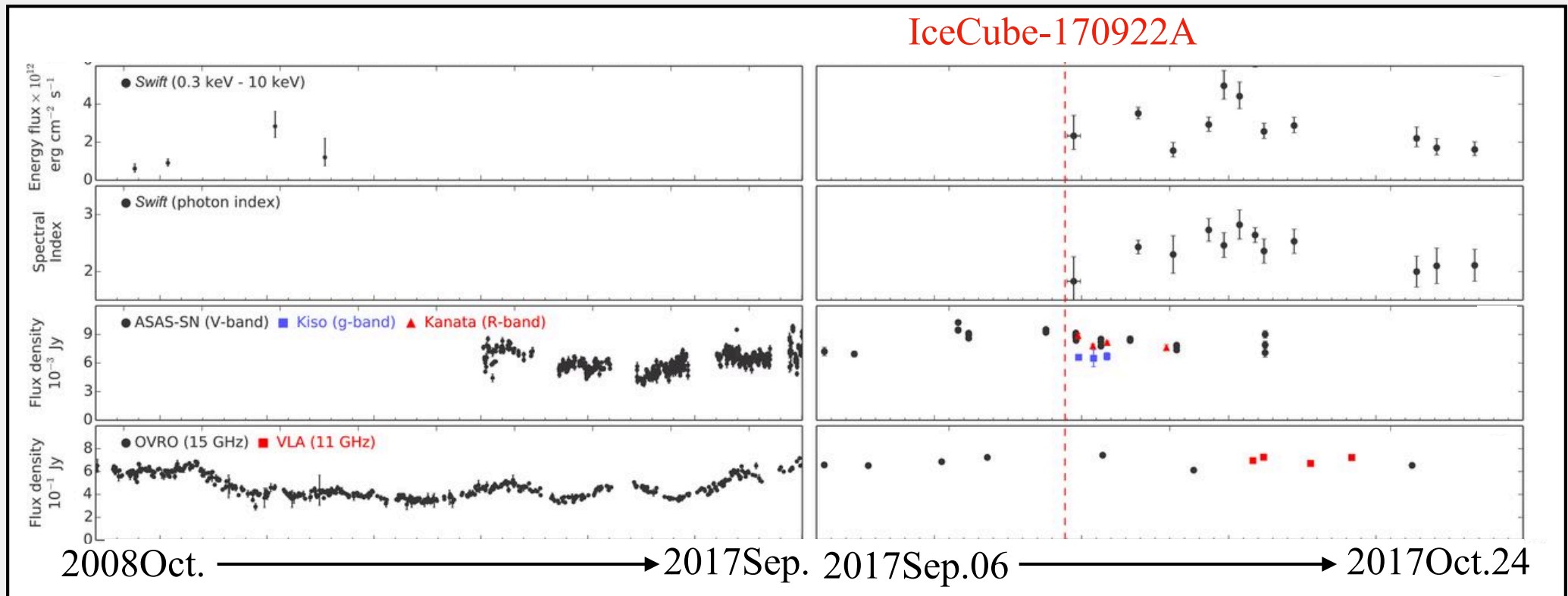
2.8 X-ray, Optical, and Radio

X-ray	the X-ray Telescope (XRT) on the swift , MAXI Gas Slit Camera (GSC), Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR), and the INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL).
Optical	the All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN), the Liverpool Telescope, the Kanata Telescope, the Kiso Schmidt Telescope, the high-resolution spectrograph (HRS) on the Southern African Large Telescope (SALT), the Subaru telescope Faint Object Camera and Spectrograph (FOCAS), and the X-SHOOTER instrument on the VLA.
Radio	Karl G.Jansky Ver Large Array (VLA), and Owens Valley Radio Observatory (OVRO)



2.9 X-ray, Optical, and Radio

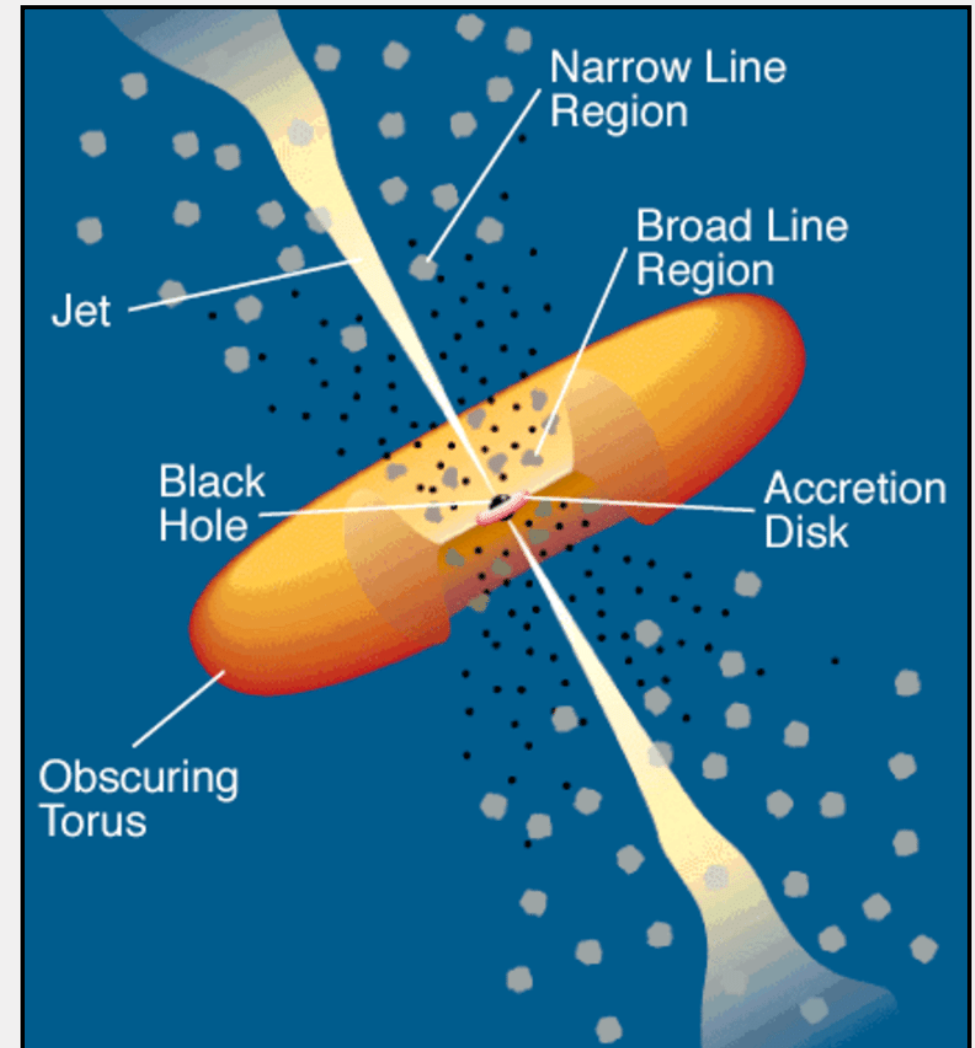
- ▶ Swift (X線天文衛星) はニュートリノアラートの3時間後からX線フラックスを監視。エネルギースペクトルの傾きが優位に変化している。



2.8 Blazar

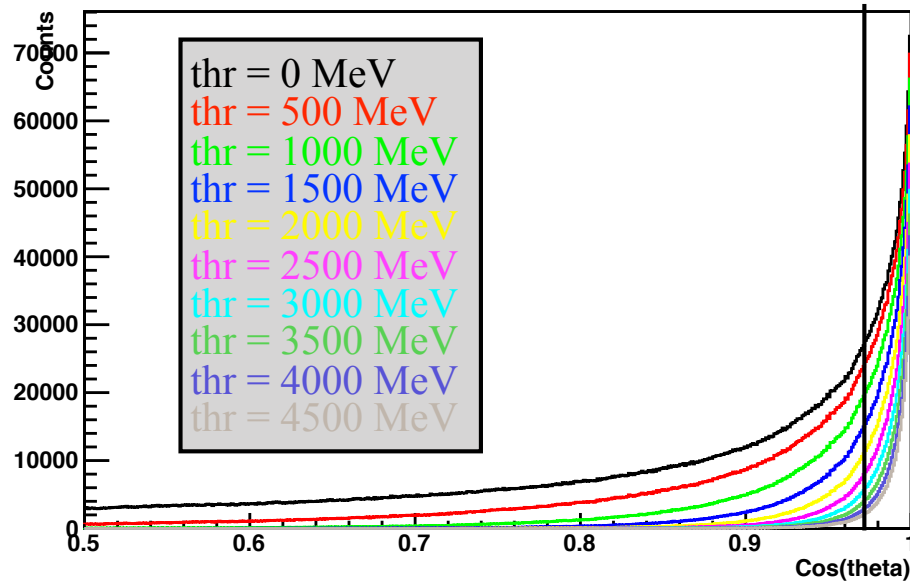
BlazarとはActive Galactic Nuclei (AGN)をJet方向から観測した天体の総称である

For a $10^8 M_{\text{sun}}$ Black Hole		
	[cm]	[pc]
Radius of Black hole	$\sim 3 \times 10^{13}$	$\sim 1 \times 10^{-5}$
Accretion disk	$\sim 1 - 30 \times 10^{14}$	$\sim 3 - 10 \times 10^{-5}$
Broad-Line clouds	$\sim 2 - 20 \times 10^{16}$	$\sim 6 - 60 \times 10^{-3}$
Inner radius of Torus	$\sim 10^{17}$	~ 0.03
Narrow-Line clouds	$10^{18} - 10^{20}$	$0.3 - 30$
Jet	$10^{17} - 10^{24}$	$0.03 - 3 \times 10^5$

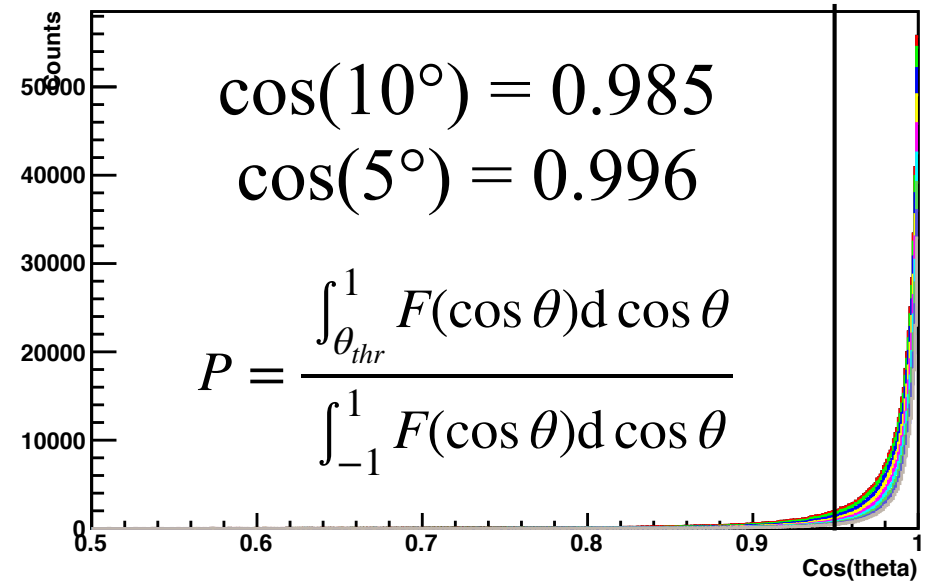


3.3

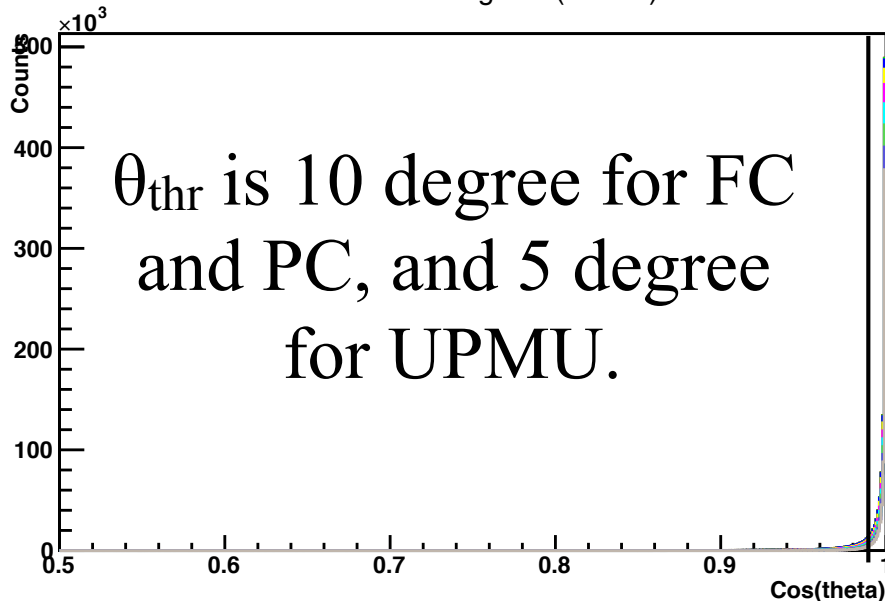
Cos Theta using MC (FC)



Cos Theta using MC (PC)



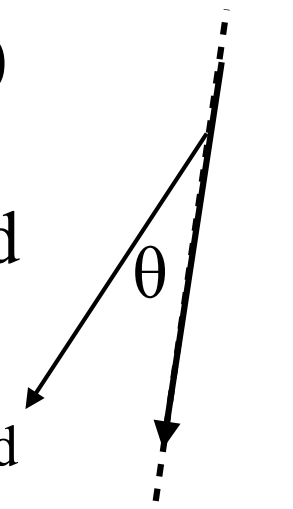
Cos Theta using MC (UPMU)



From MC data, the angle θ between the true neutrino direction and reconstructed direction was calculated.

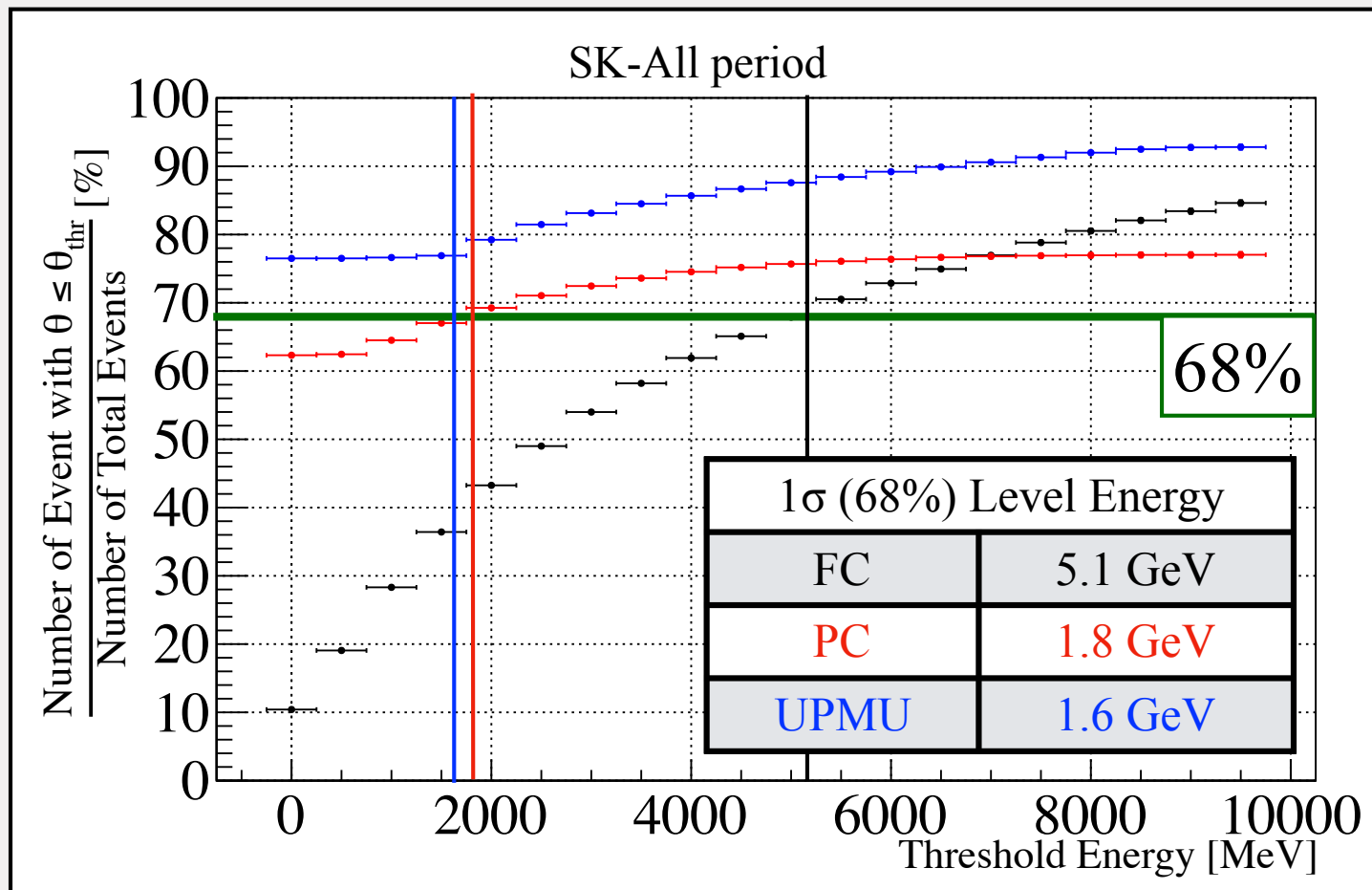
Reconstructed
Direction

Neutrino
Direction

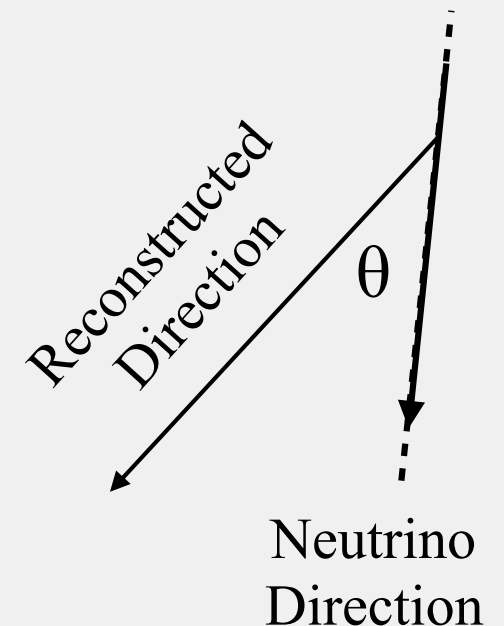


3.4 角度分解能

大気ニュートリノシミュレーションデータから真のニュートリノ飛来方向と再構成された飛来方向の成す角度が $10^\circ(5^\circ)$ 以内となるエネルギー閾値を決定する。

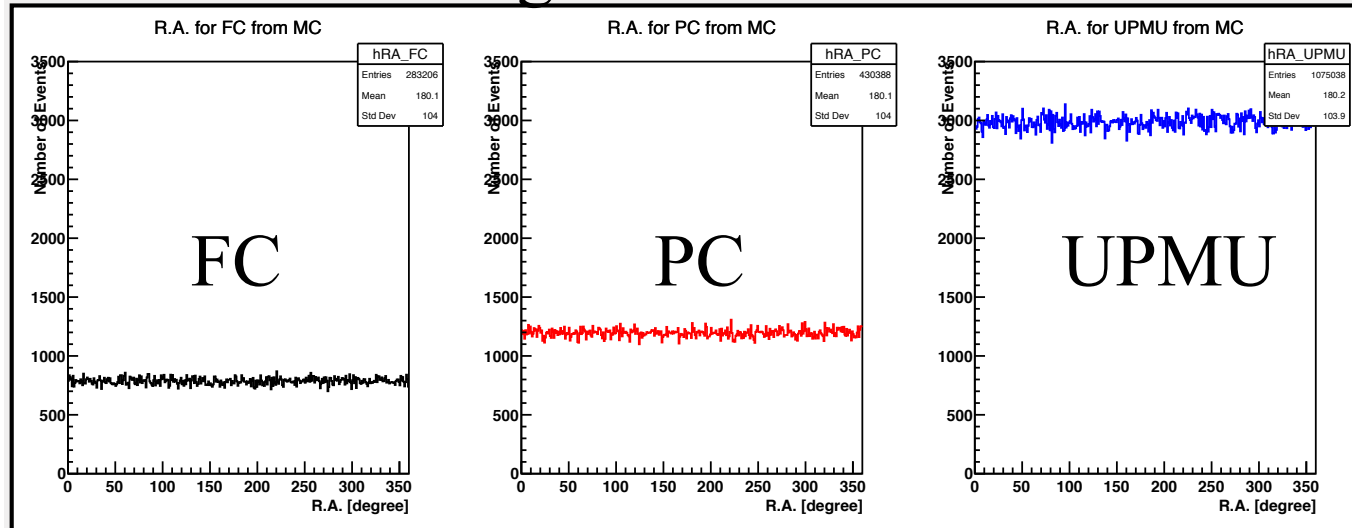


FC, PC UPMU		
θ_{thr}	10°	5°



To Check the Dependence of Direction

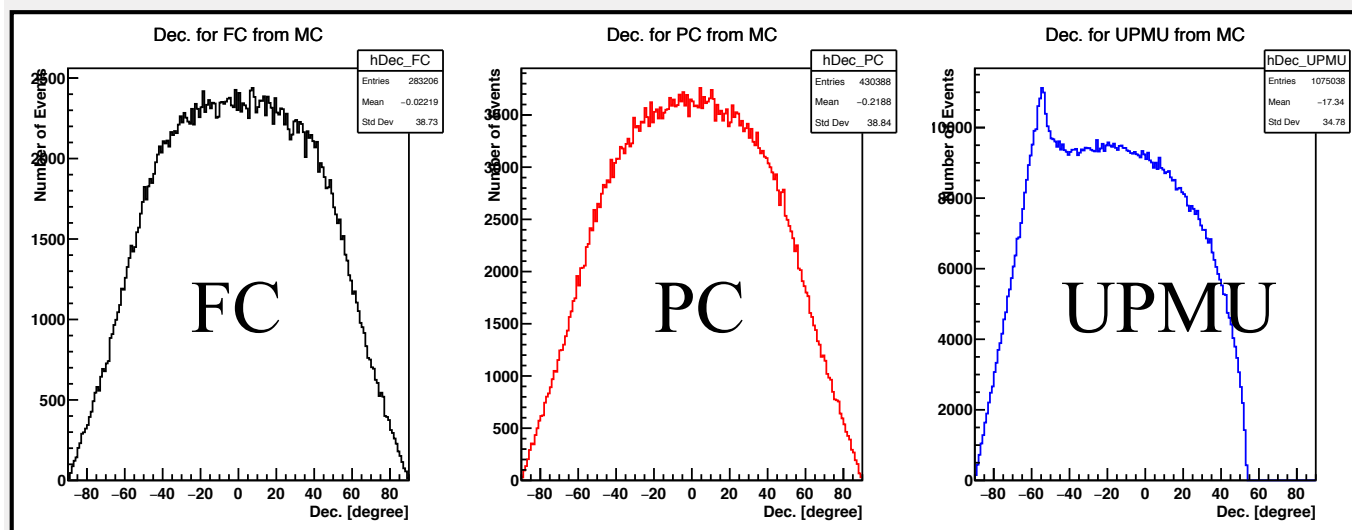
Right Ascension



The direction of atmospheric neutrino is plotted using MC samples.

Events were assigned right ascensions assuming a flat local sidereal time. So the number of background was assumed to depend only on declination.

Declination

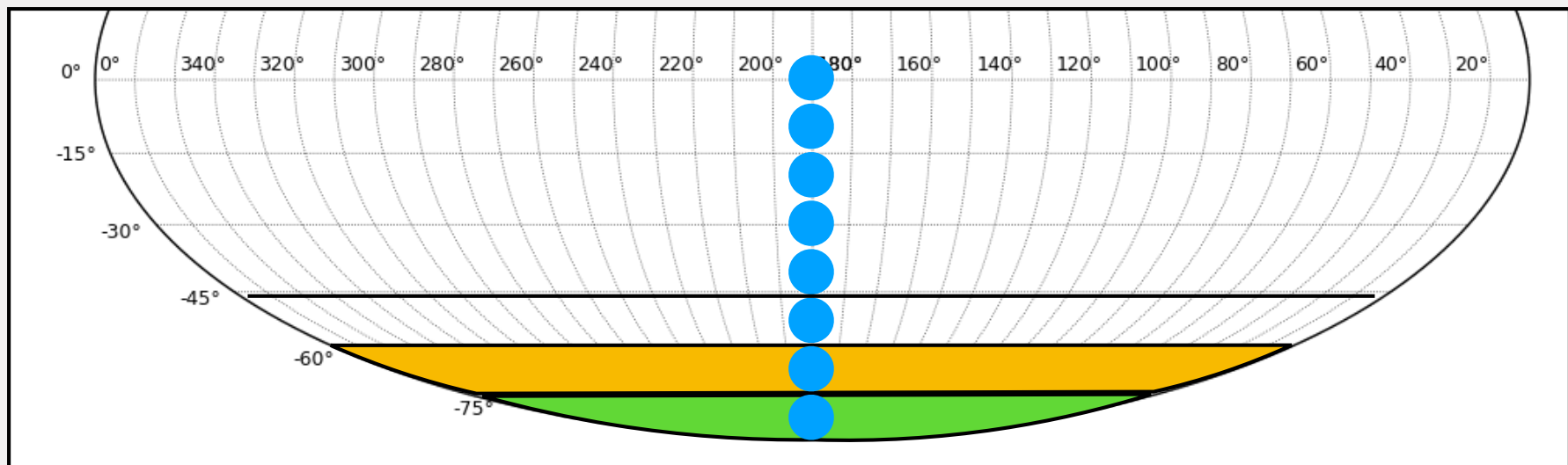


3.6 バックグラウンド見積もり

500年分の統計を持った大気ニュートリノシミュレーションデータを用いて、バックグラウンドを見積もる。

1. ニュートリノ振動はニュートリノの飛行距離(天頂角)に依存する
2. 実際の観測時間に規格化して比較する
3. 同じ探索範囲であっても Area RatioはDec.に依存する

$$N_B = \sum_i^{\text{in search cone}} \text{weight}_i \times \frac{\text{lifetime}}{500 \text{ yr}} \times R_{\text{area}} \quad \left(\because R_{\text{area}} = \frac{\text{Search Cone Size}}{\text{Total Area of Band}} \right)$$



3.7 実験データとシミュレーションの比較

▶FC/PCで右肩上がりになっている

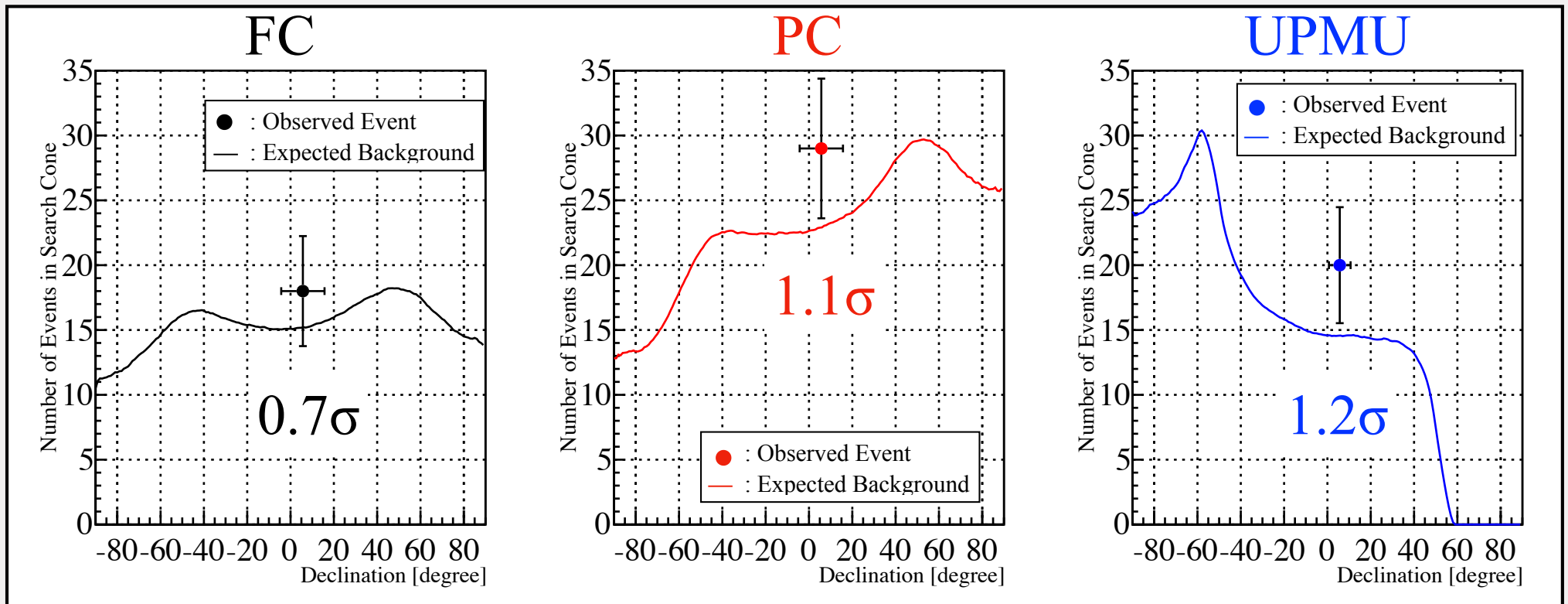
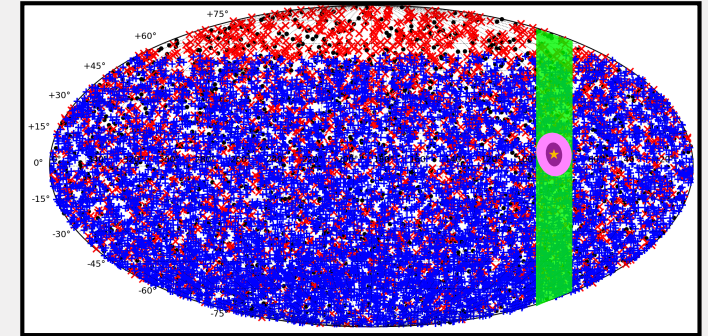
→地球の遮蔽効果でSKの下から飛来するニュートリノが少ない

▶FC/PCの $\pm 50^\circ$ 付近にコブが存在する

→水平方向付近は大気層が厚くニュートリノのフラックスが大きい

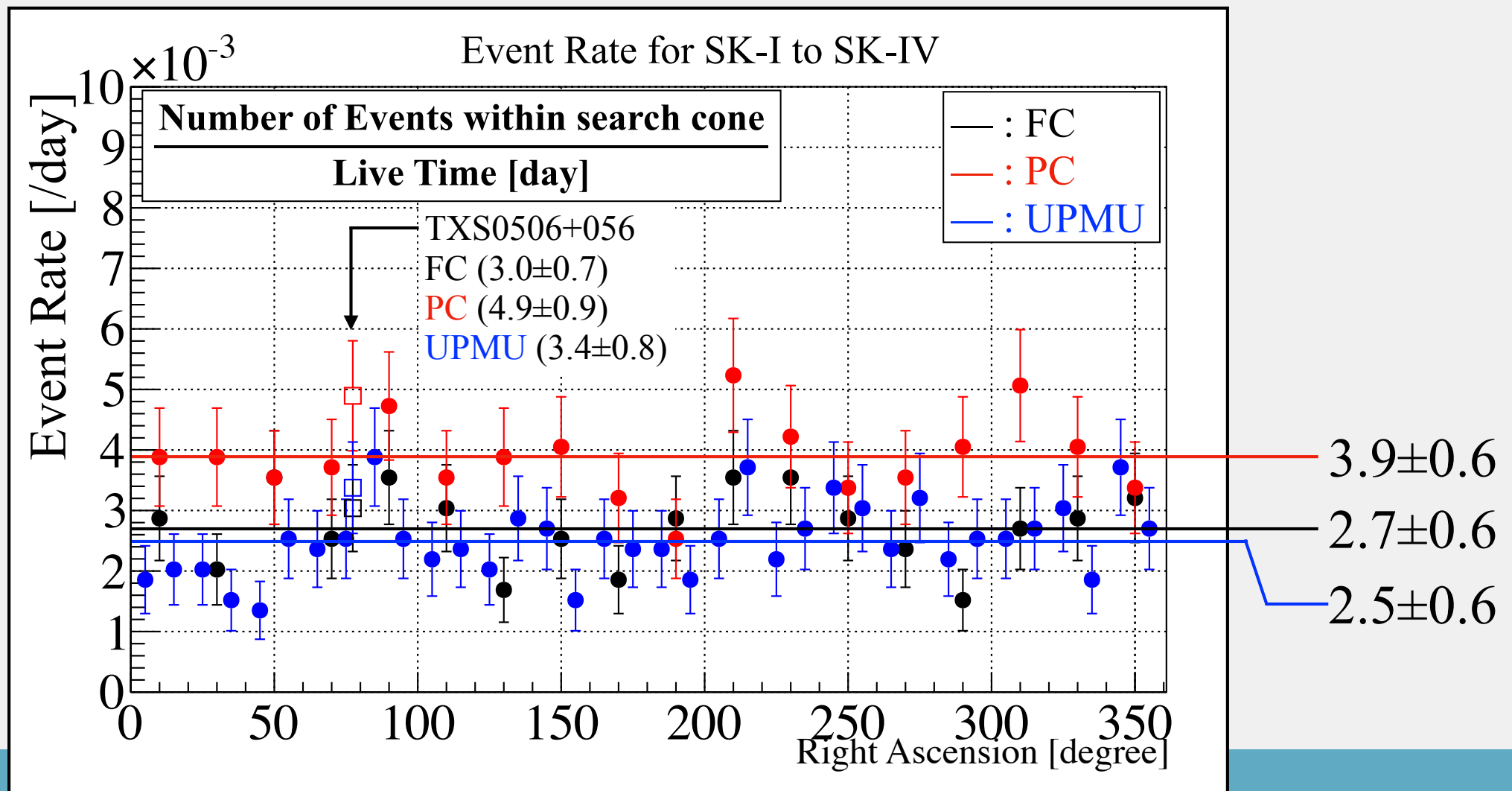
▶UPMUの最大値が 60° 付近

→水平線よりも下から飛来したニュートリノのみがUPMUにカテゴライズされる

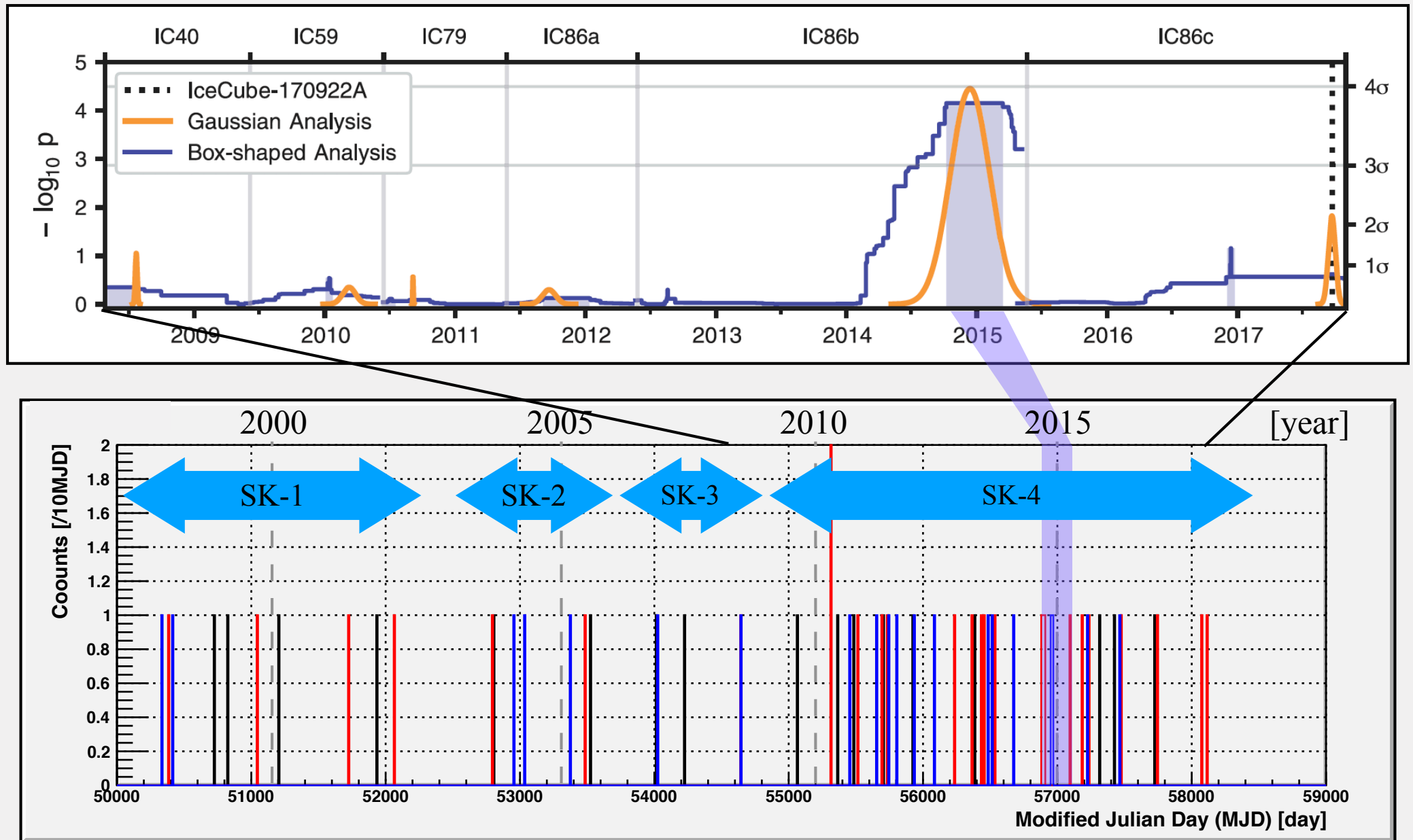


3.10 イベントレート

On-source と Off-source でのイベントレートを計算・比較
→ On-source と Off-source で有意な差は見られない



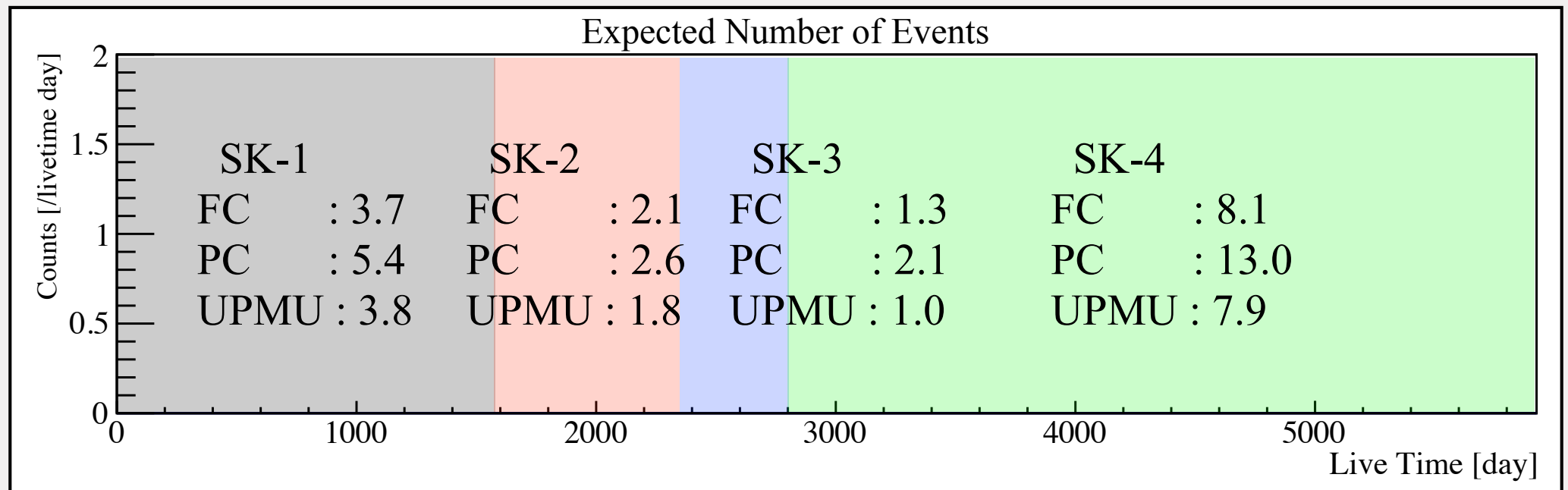
MJD



3.12 KS-Test (ToY MC)

実験データの時間依存性の確認のためにToy MCを作成

1. 各SK-phaseの全イベント数 (Poisson分布)
2. 各SK-phaseの期間で一様ランダムにプロット
3. SK-1からSK-4までを1セットにする (10,000セット作成)

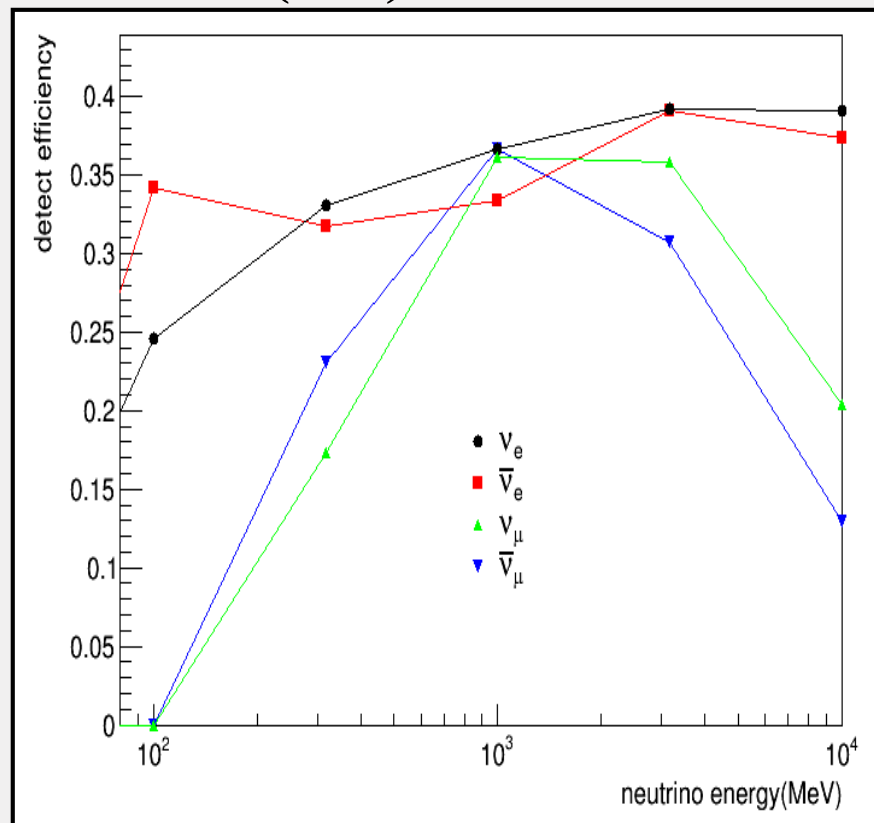


SKの検出効率 ε

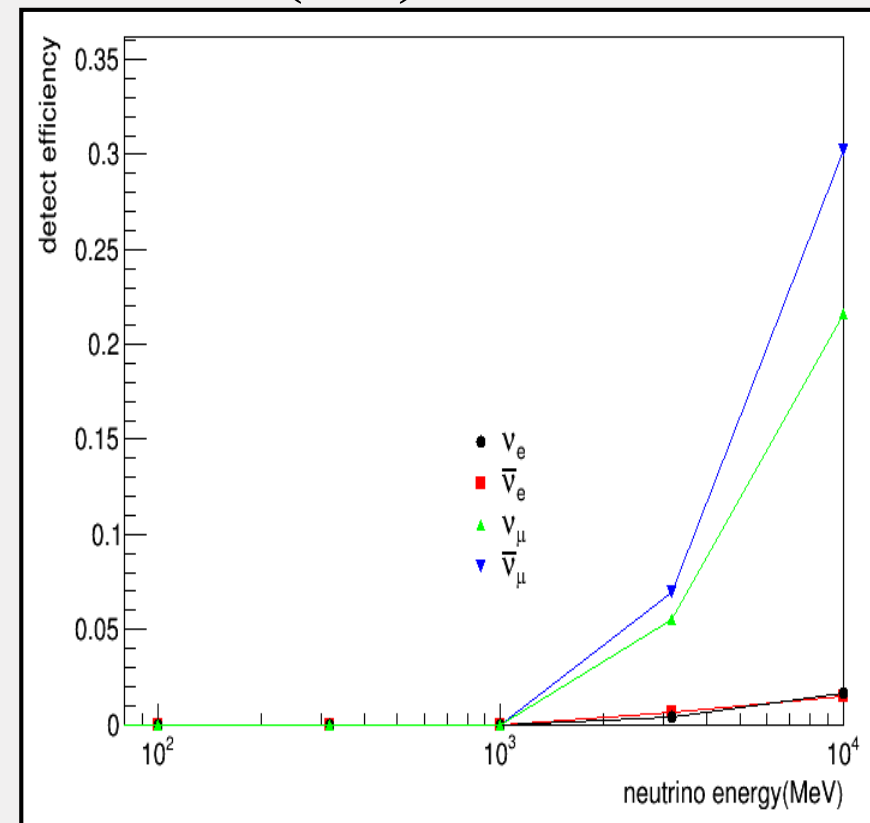
MCシミュレーションを用いて、SK
タンク内で生成したニュートリノ反
応事象が有効体積内でFCもしくはPC
と識別される割合を示す。

$$\varepsilon = \frac{\text{有効体積内 (22.5 kton) で識別されるFCPC事象}}{\text{全領域 (50 kton) 内で発生したニュートリノ事象}}$$

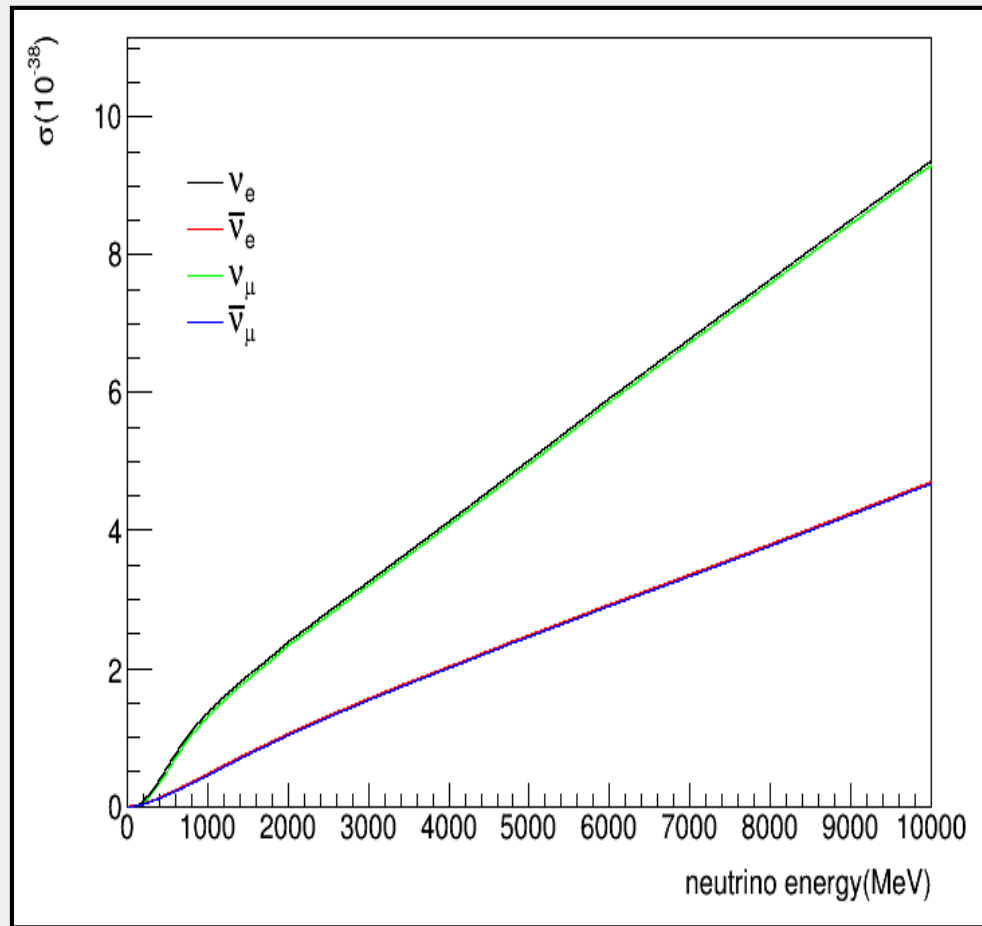
$\varepsilon(E_\nu)$ of FC



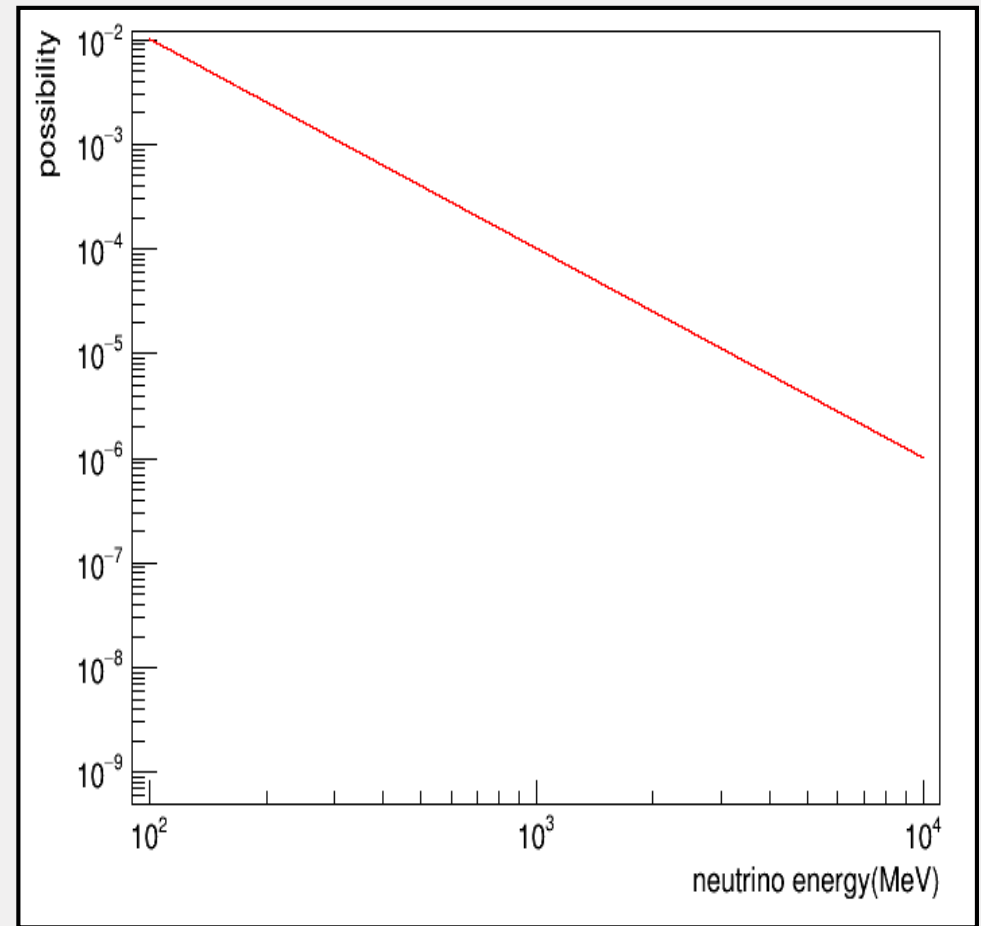
$\varepsilon(E_\nu)$ of PC

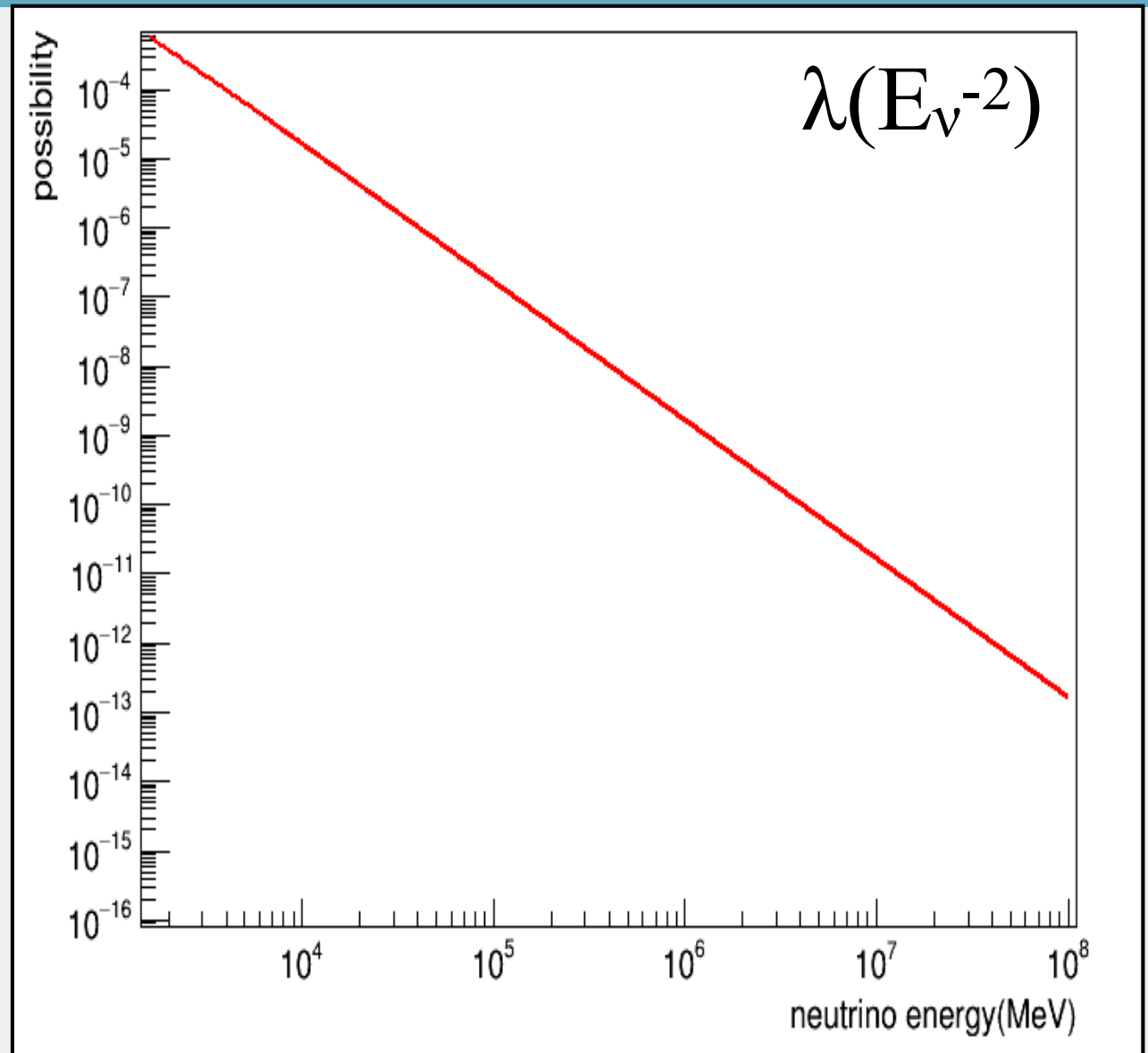
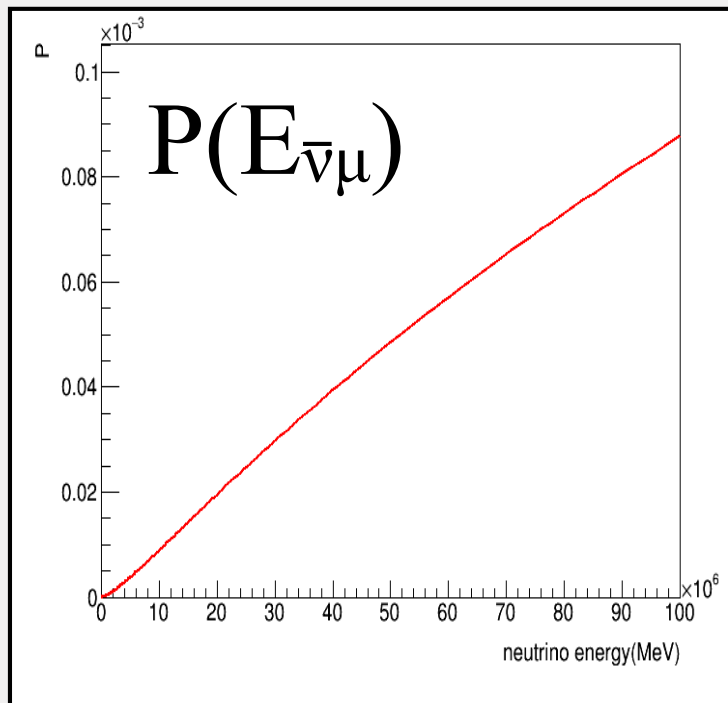
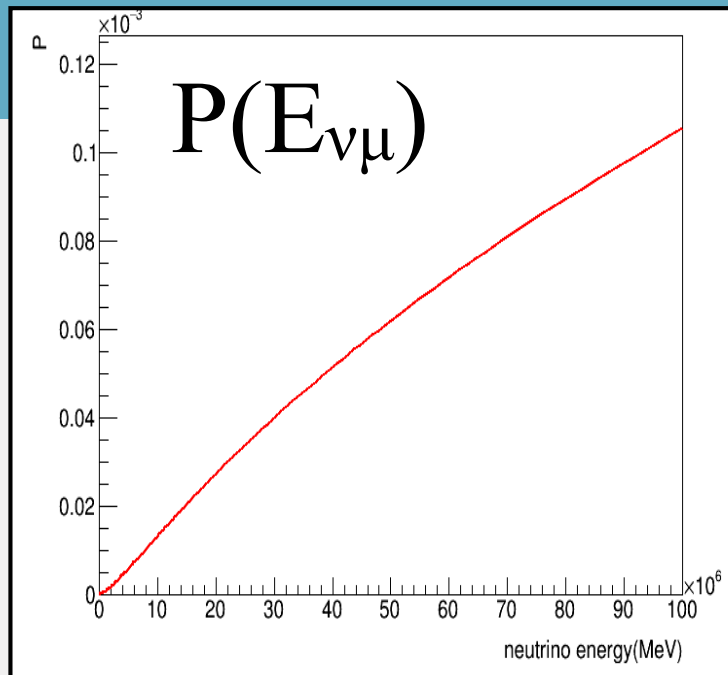


$$\sigma(E_\nu)$$



$$\lambda(E_\nu^{-2})$$



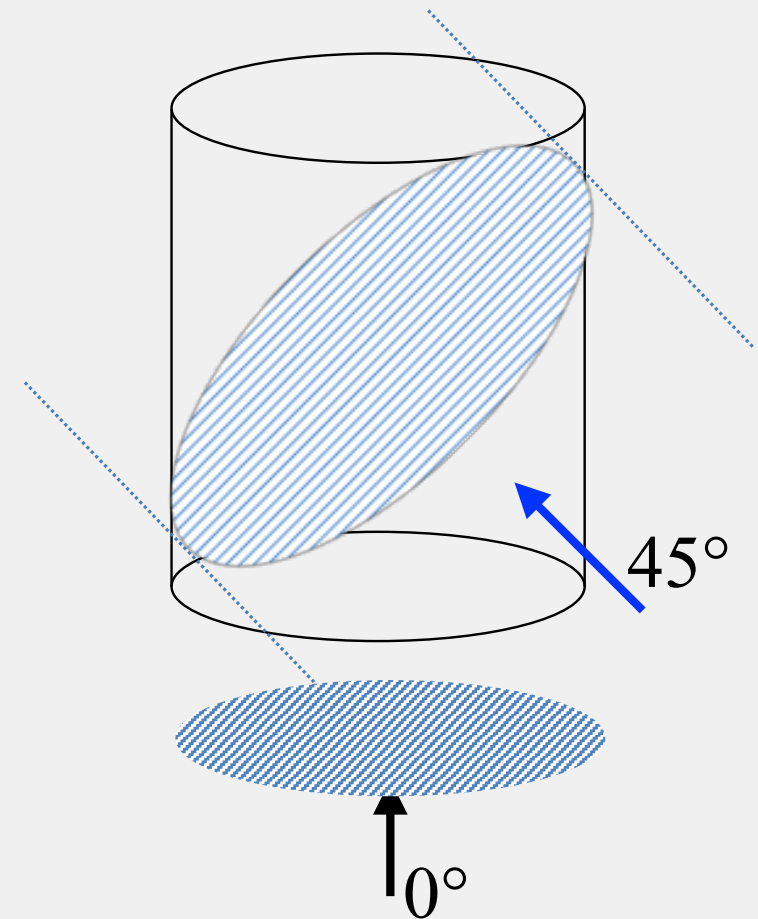
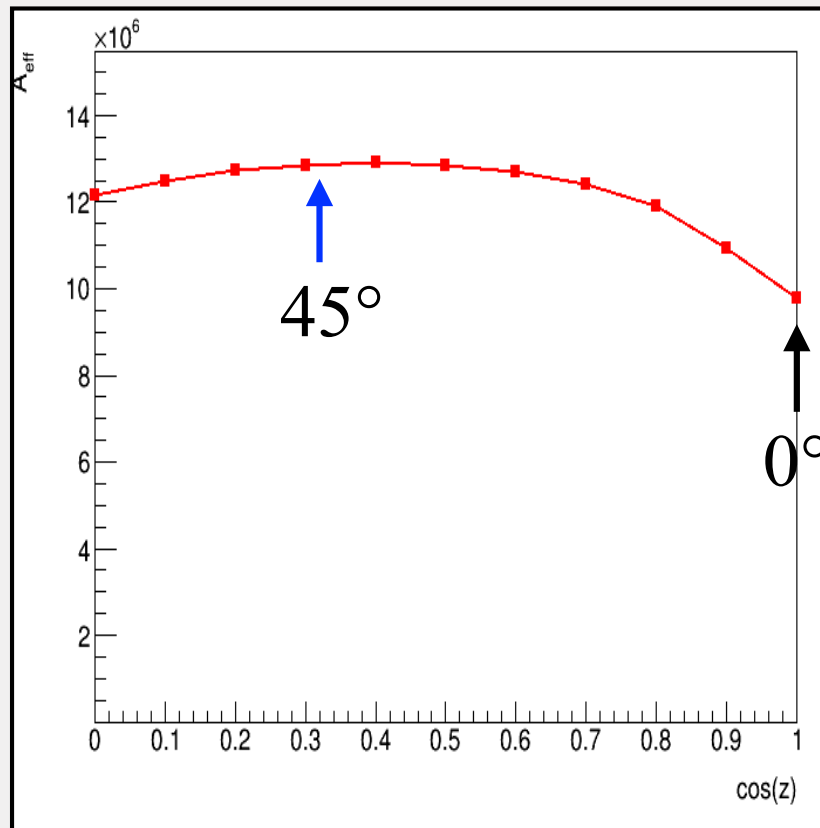


有効面積 A_{eff}

ニュートリノの飛来方向によってSKの有効面積が異なる。

MCシミュレーションを使って、ニュートリノの発生させた面積に検出効率を掛け合わせた値。

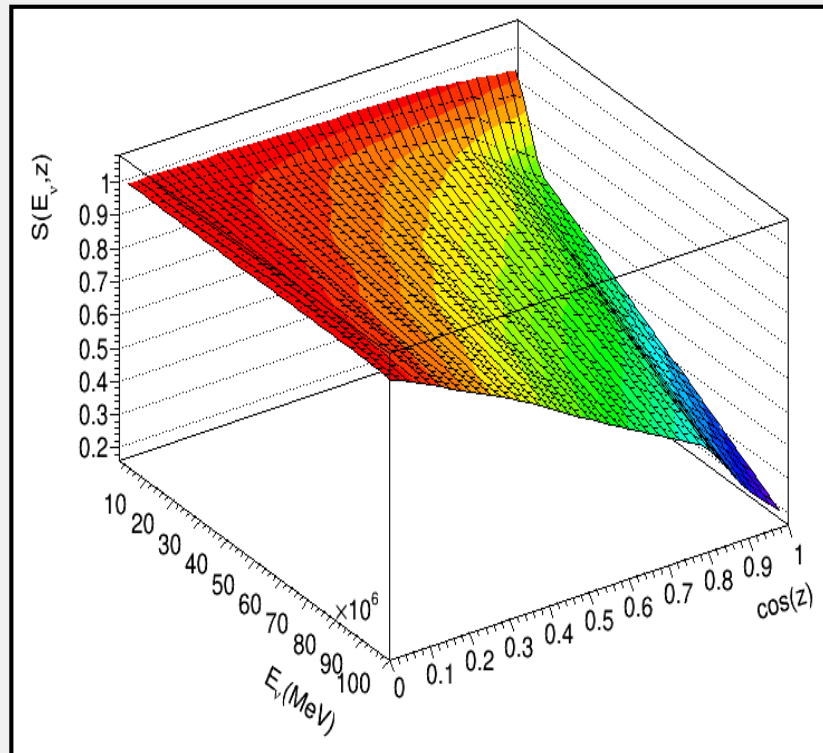
$A_{\text{eff}}(z)$



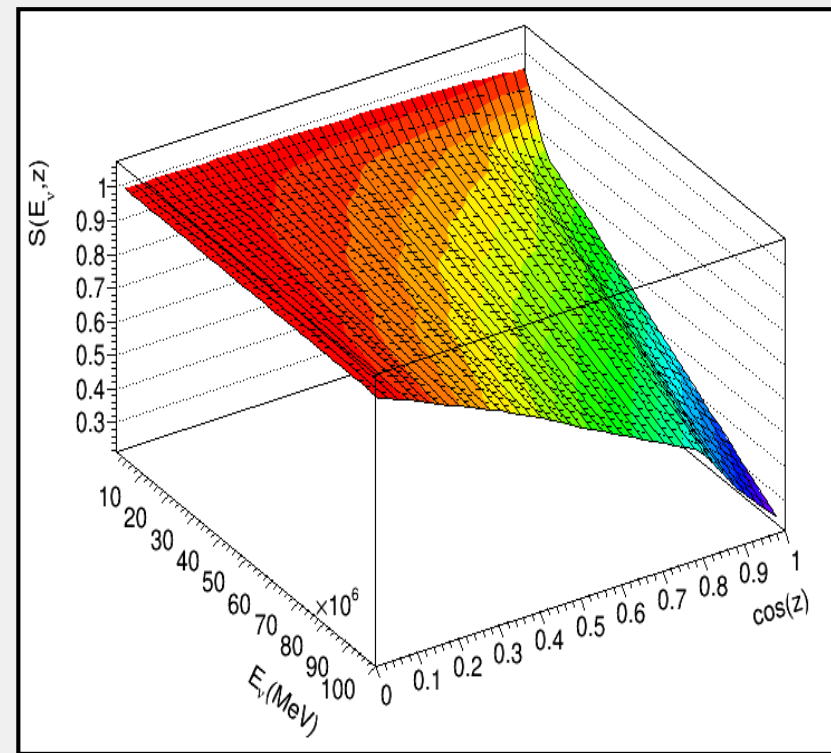
ニュートリノ遮蔽効果 S

ニュートリノが地球をすり抜ける際、地球内部の物質と相互作用を起こしニュートリノが消滅する確率を表す。

$S(z, E_\nu)$ of ν_μ



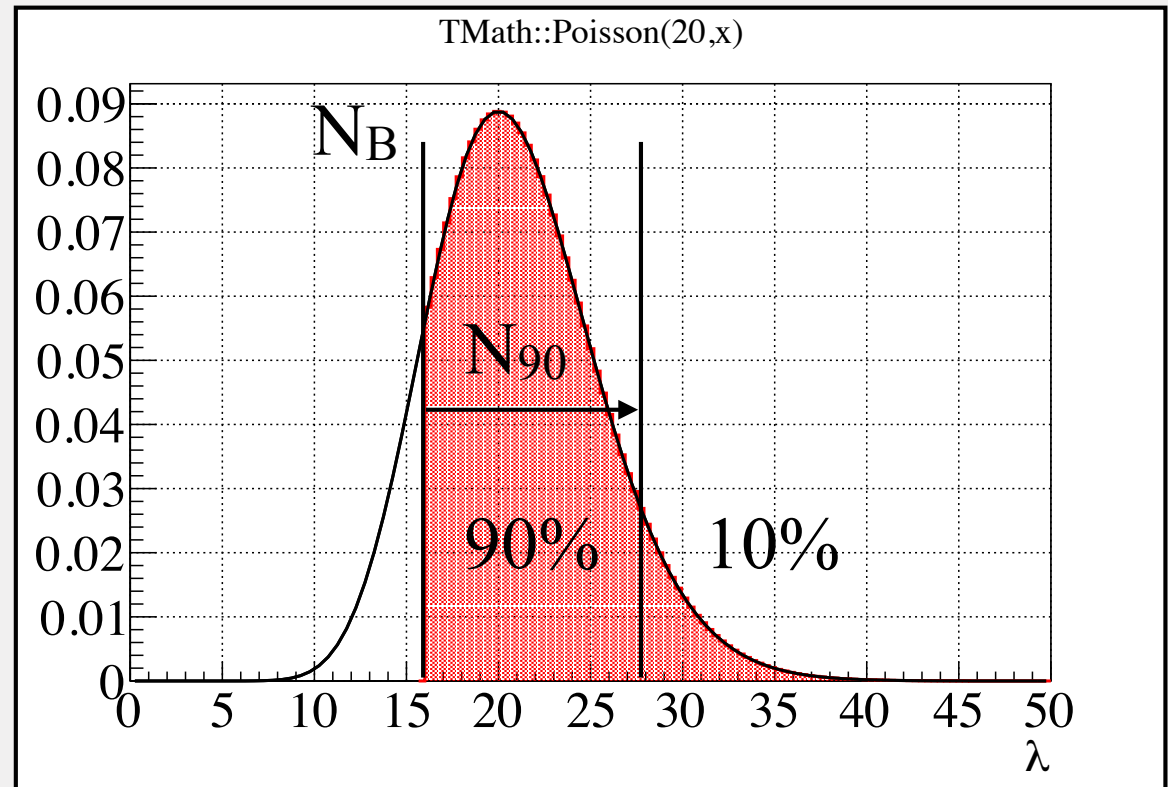
$S(z, E_\nu)$ of $\bar{\nu}_\mu$



A. Vincent et.al., arXiv:1706.09895v2

90% Confidence Level

Using Poisson distribution, I calculated the number of events of 90% confidence level. The fluence limit which Blazar emit the neutrino can be estimated from these informations.



	Observed events in search area	Expected background	Relative difference	Event rate (on-source) [/1000 day]	Event rate (off-source) [/1000 day]	KS-test (on-source) [%]	KS-test (all sky) [%]	<i>N₉₀</i>
FC	18±4.2	15.20	0.18	3.0±0.7	2.7±0.6	61.1	12.3	10.2
PC	29±5.4	22.91	0.27	4.9±0.9	3.9±0.6	41.2	51.1	14.6
UPMU	20±4.5	14.57	0.37	3.4±0.8	2.5±0.6	98.3	91.9	12.7

Fluence Calculation ①

The fluence limit was calculated in the same method as Gravitational Wave Analysis (ApJL., 830, 1(2016)). It was used the same procedure laid out in “Swanson et al. 2006, ApJ., 652, 206” and “Thrane et al. 2009, ApJ. 704, 503”.

$$\Phi_{FC,PC} = \frac{N_{90}}{N_T \int dE_\nu \sigma(E_\nu) \epsilon(E_\nu) \lambda(E_\nu^{-2})}$$

N_T : Number of target nuclei ($\sim 1.35 \times 10^{34}$)
 σ : Combined cross-section in all interactions [cm^2]
 ϵ : Detection efficiency [%]
 λ : Number density of neutrinos []

$$\Phi_{UPMU} = \frac{N_{90}}{A_{eff}(z) \int dE_\nu P(E_\nu) S(z, E_\nu) \lambda(E_\nu^{-2})}$$

A_{eff} : Zenith-dependent effective area [cm^2]
 P : Probability for a neutrino to create a muon [%]
 S : Shadowing neutrinos due to interactions in the Earth [%]
 λ : Number density of neutrinos []

Live Time : 5924 [day]	FC	PC	UPMU
N90	10.168	14.623	12.688
Integral Range	5.1 - 10 GeV	1.8 - 10 GeV	1.6 GeV - 10 TeV

Fluence Calculation ②

For each flavor, the upper limit of fluence was calculated. The neutrino number density assumed an energy spectrum with index of -2. The average values calculated at various zenith angles are shown as results of UPMU events, and the errors were determined from the maximum value and the minimum value.

$$\Phi_{FC,PC} = \frac{N_{90}}{N_T \int dE_\nu \sigma(E_\nu) \epsilon(E_\nu) E_\nu^{-2} / \int E_\nu^{-2} dE_\nu}$$

$$\Phi_{UPMU} = \frac{N_{90}}{A_{eff}(z) \int dE_\nu P(E_\nu) S(z, E_\nu) E_\nu^{-2} / \int E_\nu^{-2} dE_\nu}$$

Live Time : 5924 [day]	FC [/cm ²]	PC [/cm ²]	UPMU [/cm ²]
ν_μ	8.0×10^4	1.8×10^5	$2.3^{+0.7}_{-0.2} \times 10^2$
$\bar{\nu}_\mu$	4.9×10^5	2.5×10^6	$3.5^{+0.9}_{-0.2} \times 10^2$
ν_e	2.9×10^4	-	-
$\bar{\nu}_e$	5.2×10^4	-	-

Fluence Calculation ③

Since this analysis cannot distinguish between neutrino events and anti-neutrino events, the fluence of muon-type neutrino ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) and electron-type neutrino ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) were calculated.

$$\Phi_{FC,PC} = \frac{N_{90}}{N_T \int dE_\nu (\sigma_\nu(E_\nu) \epsilon_\nu(E_\nu) + \sigma_{\bar{\nu}}(E_\nu) \epsilon_{\bar{\nu}}(E_\nu)) E_\nu^{-2} / \int E_\nu^{-2} dE_\nu}$$

$$\Phi_{UPMU} = \frac{N_{90}}{A_{eff}(z) \int dE_\nu (P_\nu(E_\nu) S_\nu(z, E_\nu) + P_{\bar{\nu}}(E_\nu) S_{\bar{\nu}}(z, E_\nu)) E_\nu^{-2} / \int E_\nu^{-2} dE_\nu}$$

Live Time : 5924 [day]	FC [/cm ²]	PC [/cm ²]	UPMU [/cm ²]
$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$	6.9×10^4	1.1×10^5	$1.3_{-0.1}^{+0.4} \times 10^2$
$\nu_e + \bar{\nu}_e$	1.9×10^4	-	-

Fluence Calculation ④

For UPMU, the fluence calculation was performed for each energy bins. The integral ranges are 1.6GeV to 10GeV, 10GeV to 100GeV, 100GeV to 1TeV, and 1TeV to 10TeV. N90 was used as same value (N90 = 12.688).

$$\Phi_{UPMU} = \frac{N_{90}}{A_{eff}(z) \int_{min}^{max} dE_{\nu} (P_{\nu}(E_{\nu})S_{\nu}(z, E_{\nu}) + P_{\bar{\nu}}(E_{\nu})S_{\bar{\nu}}(z, E_{\nu})) E_{\nu}^{-2} / \int_{min}^{max} E_{\nu}^{-2} dE_{\nu}}$$

Live Time : 5924 [day]	UPMU [/cm ²]
1.6 GeV - 10 GeV	6.06×10 ⁴
10 GeV - 100 GeV	6.82×10 ²
100 GeV - 1TeV	9.39
1 TeV - 10 TeV	2.66×10 ⁻¹

Energy-Flux Calculation ①

The energy-flux was calculated from the fluence. For the flux, the live-time (SK-I to SK-IV : 5924.35 days ~ 16 years) was used. The flux per MeV was calculated by the dividing by the integral range (max-min). Finally, the energy flux was calculated by multiplying the bin center energy by the square. (1MeV = 1.60218e-6 erg)

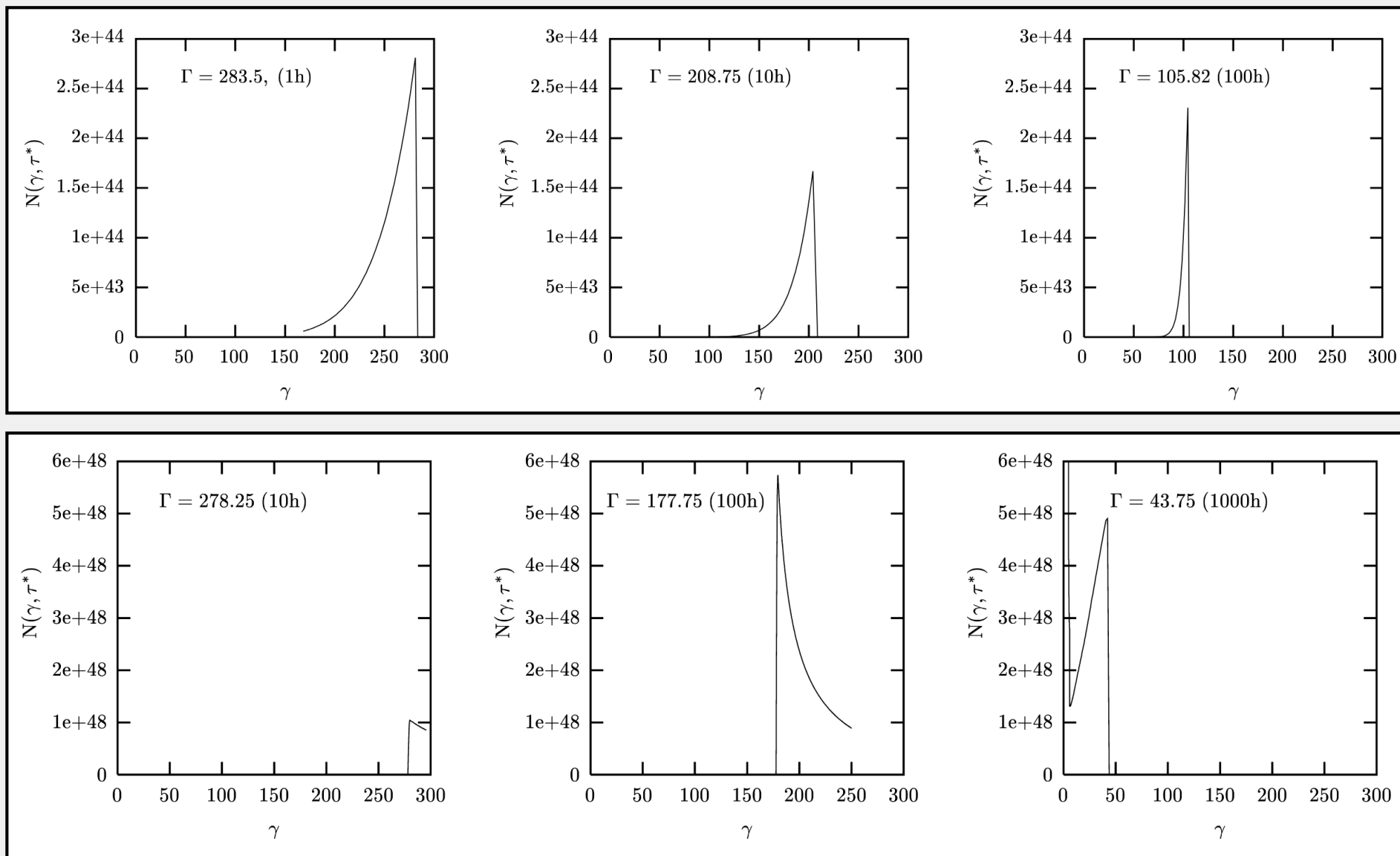
$$\log E_{center} = \frac{\log(max) + \log(min)}{2}$$

$\lambda = E^{-2}$		Fluence [$/\text{cm}^2$]	Flux [$/\text{cm}^2/\text{s}$]	dFlux/dE [$/\text{cm}^2/\text{s}/\text{MeV}$]	$E^2\text{dFlux}/\text{dE}$ [$\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$]
FC	5.1GeV - 10 GeV	$\mu:6.9 \times 10^4$ $e:1.9 \times 10^4$	$\mu:1.4 \times 10^{-4}$ $e:3.7 \times 10^{-5}$	$\mu:2.7 \times 10^{-8}$ $e:7.4 \times 10^{-9}$	$\mu:2.2 \times 10^{-6}$ $e:6.0 \times 10^{-7}$
PC	1.8 GeV - 10 GeV	1.1×10^5	2.1×10^{-4}	2.5×10^{-8}	7.1×10^{-7}
	10 GeV - 100 GeV	5.4×10^3	1.1×10^{-5}	1.2×10^{-10}	1.9×10^{-7}
UPMU	1.6 GeV - 10 GeV	6.1×10^4	1.2×10^{-4}	1.4×10^{-8}	3.6×10^{-7}
	10 GeV - 100 GeV	6.8×10^2	1.3×10^{-6}	1.5×10^{-11}	2.4×10^{-8}
	100 GeV - 1TeV	9.4	1.8×10^{-8}	2.0×10^{-14}	3.3×10^{-9}
	1 TeV - 10 TeV	2.7×10^{-1}	5.2×10^{-10}	5.8×10^{-17}	9.3×10^{-10}

4.4 Energy-Flux

Fluence (1 cm²当たりのニュートリノ数) からIceCube等のデータと比較するためにEnergy-Fluxに変換する

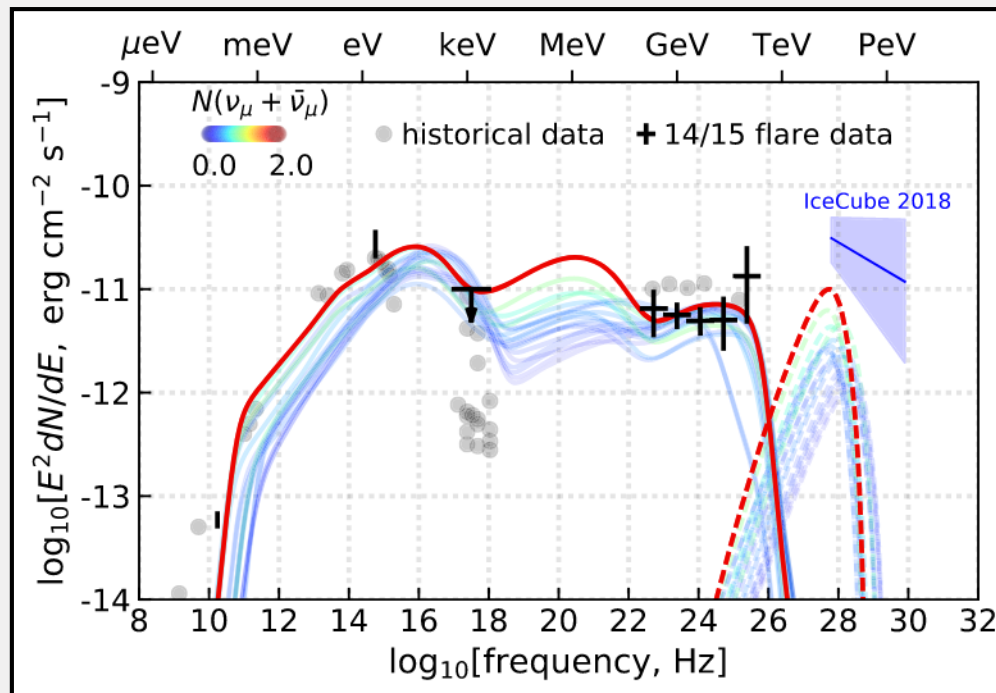
$\lambda = E^{-2}$		Fluence [cm^{-2}]	Flux [cm^{-2}/s]	dFlux/dE [$\text{cm}^{-2}/\text{s}/\text{MeV}$]	$E^2 \text{dFlux}/\text{dE}$ [$\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$]
FC	5.1 GeV - 10 GeV	$\mu: 6.9 \times 10^4$ $e: 1.9 \times 10^4$	$\mu: 1.4 \times 10^{-4}$ $e: 3.7 \times 10^{-5}$	$\mu: 2.7 \times 10^{-8}$ $e: 7.4 \times 10^{-9}$	$\mu: 2.2 \times 10^{-6}$ $e: 6.0 \times 10^{-7}$
PC	1.8 GeV - 10 GeV	1.1×10^5	2.1×10^{-4}	2.5×10^{-8}	7.1×10^{-7}
	10 GeV - 100 GeV	5.4×10^3	1.1×10^{-5}	1.2×10^{-10}	1.9×10^{-7}
UPMU	1.6 GeV - 10 GeV	6.1×10^4	1.2×10^{-4}	1.4×10^{-8}	3.6×10^{-7}
	10 GeV - 100 GeV	6.8×10^2	1.3×10^{-6}	1.5×10^{-11}	2.4×10^{-8}
	100 GeV - 1 TeV	9.4	1.8×10^{-8}	2.0×10^{-14}	3.3×10^{-9}
	1 TeV - 10 TeV	2.7×10^{-1}	5.2×10^{-10}	5.8×10^{-17}	9.3×10^{-10}



4.6 理論モデルとの比較

Blazar TXS0506+056の光学観測の結果とIceCube-14/15のニュートリノイベントに対してのシミュレーション結果。

光学観測結果を再現するパラメータ



ν 観測結果を再現するパラメータ

