

IceCubeニュートリノ 対応候補天体の追観測

山中雅之
(広島大学宇宙科学センター)

共同研究者

★田中康之 (広島大学->就職), Subaru/Kanata/(Fermi)

諸隈智貴(東京大学), Subaru/Kiso

太田耕司 (京都大学), Subaru

伊藤亮介 (東京工業大学), Kanata

内海洋輔 (広島大学 -> スタンフォード), Kanata

山中雅之 (広島大学), Kanata

川端弘治 (広島大学), Kanata

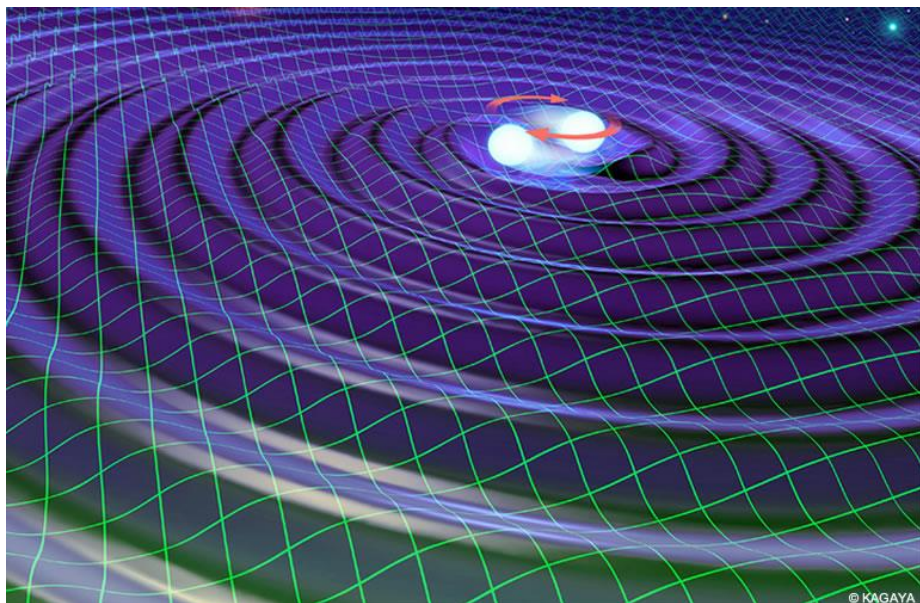
森裕樹 (広島大学->就職), Kanata

on the behalf of OISTER collaboration

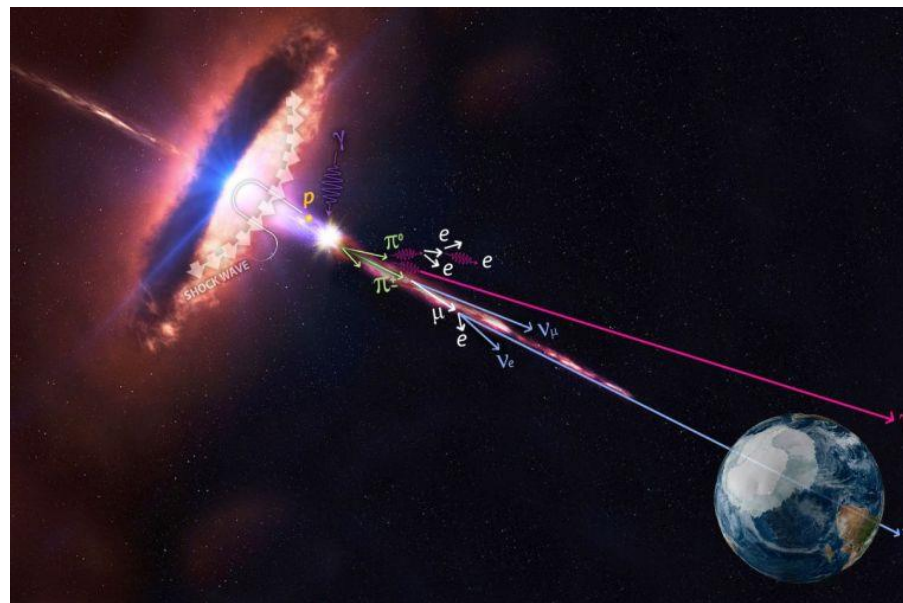
アウトライン

- かなた望遠鏡におけるフォローアップ戦略
- これまでのフォローアップの実際
- IceCube-170922A アラートにおける追観測：
 - TXS 0506+056の変動発見
 - 光赤外線大学連携・すばる望遠鏡による追観測
 - 光度曲線
 - スペクトル (赤方偏移)
 - 偏光観測 (+比較的最近の結果)
- Future prospect
 - ブレーザー・超新星
 - 最近のOISTERによる観測
 - Tomo-e Gozen サーベイ
 - 3.8m 分光フォローアップ

マルチメッセンジャー 天文学開幕



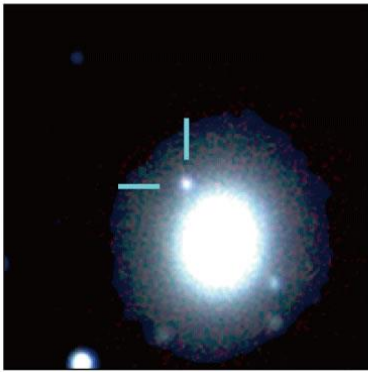
重力波



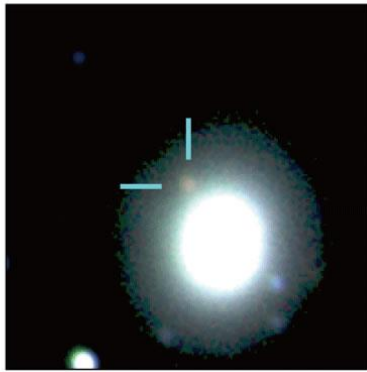
ニュートリノ

マルチメッセンジャー 天文学開幕

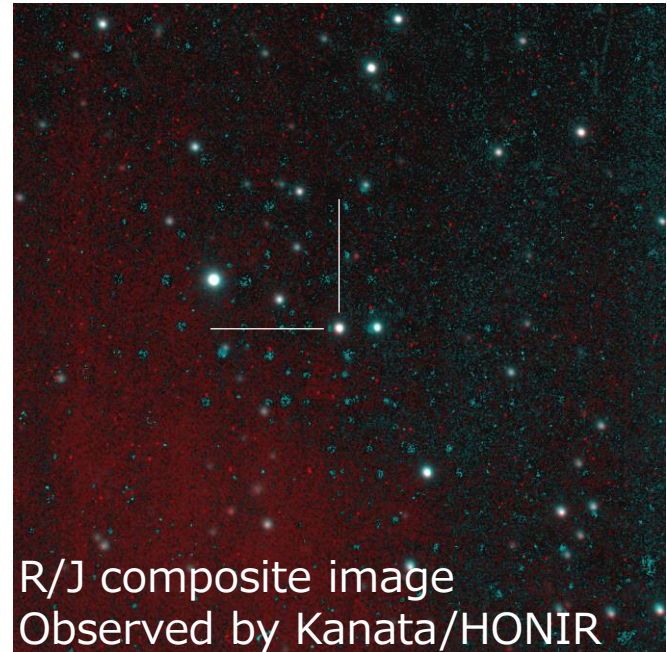
2017.08.18-19



2017.08.24-25



Utsumi et al. 2018



R/J composite image
Observed by Kanata/HONIR

GW 170817

-> キロノバ(SSS17a)

IC 170922-A

-> blazar(TXS 0506+056)

高エネルギーニュートリノ

- ・ 最高エネルギー宇宙線の由来、宇宙線の発見以来100年にわたって、起源不明
- ・ ニュートリノ、電気的中性：系外由来観測できる
- ・ 加速源（高エネルギー天体）が必要

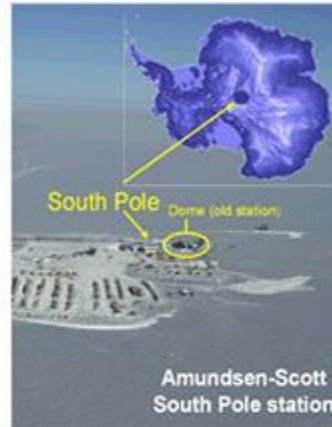
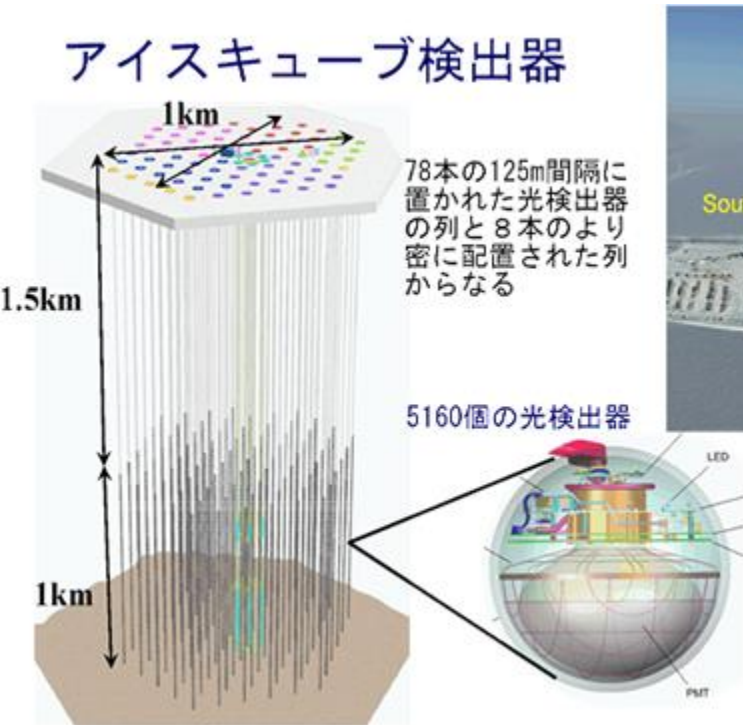


加速源



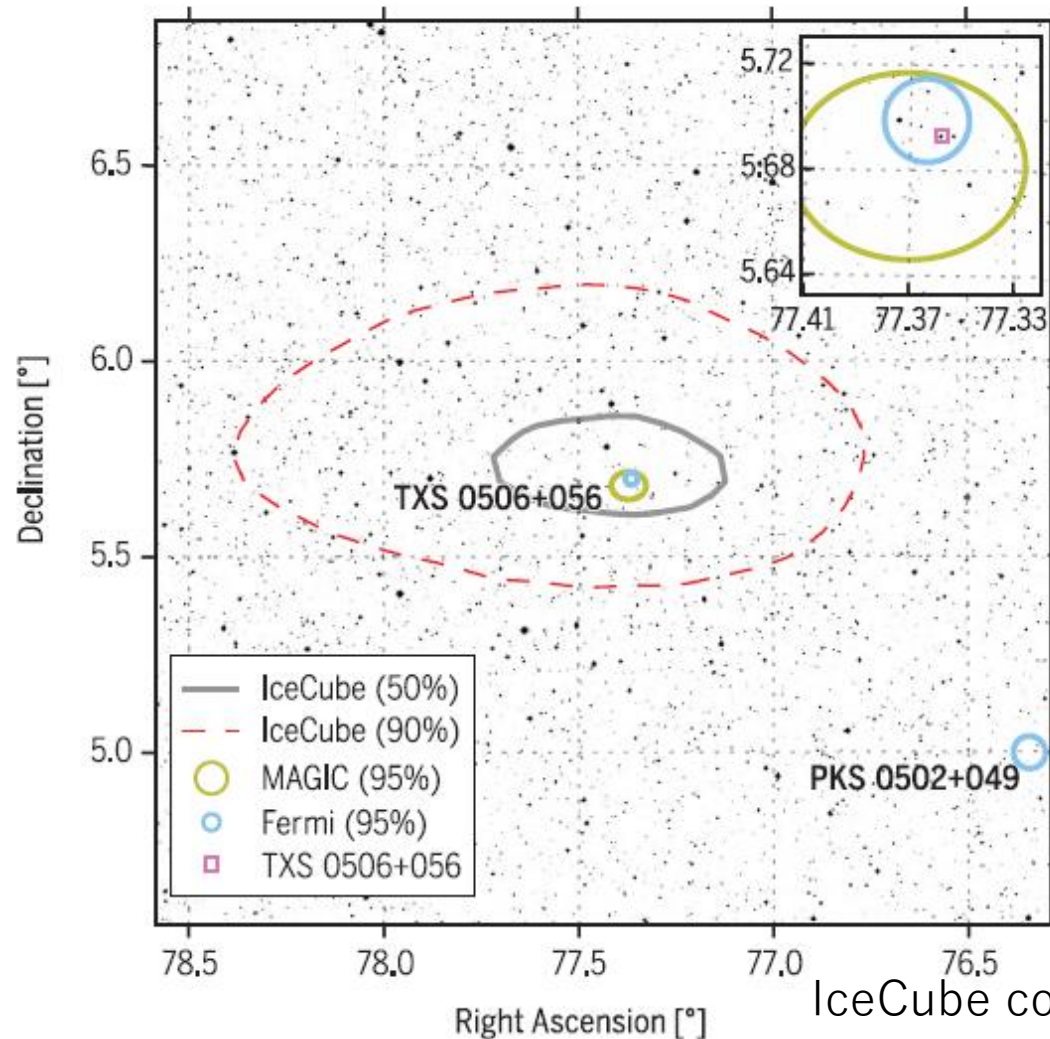
IceCube実験

アイスキューブ検出器



<http://www.icehap.chiba-u.jp> より

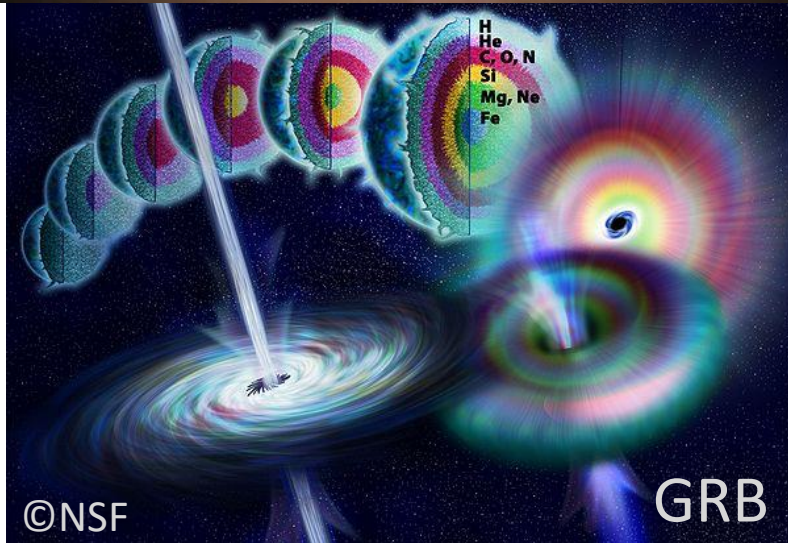
IceCube ニュートリノの位置決定精度



IceCube collaboration et al. 2018

トラック事象～典型的には**1度**(90%エラー)の位置決定誤差

高エネルギーニュートリノの起源候補となる現象



1.5m Kanata+HONIR



HONIR (Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera; Akitaya et al. 2014)

可視近赤外線 2 バンド同時観測

視野 $10' \times 10'$

限界等級 $\sim 20\text{mag}$ (可視)



かなたフォローアップの共同研究者



Y. Tanaka

Mori

Utsumi

MY



Itoh



M. Kawabata



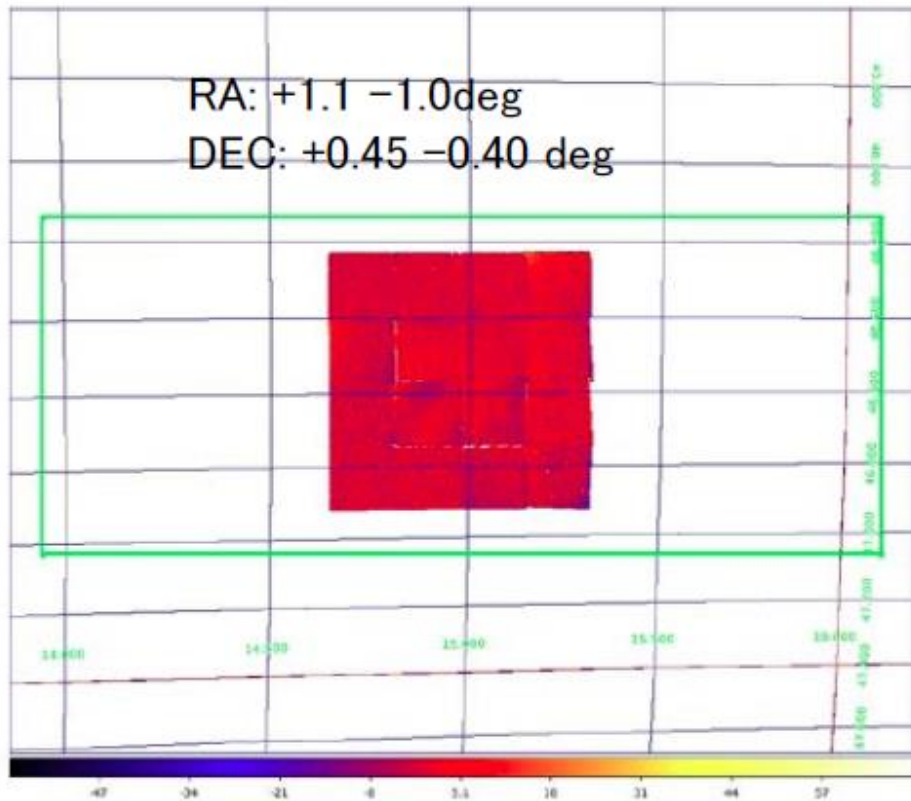
Nakaoka



K. S. Kawabata

IceCube-161210A

Alert: 2016-12-10 20:07(UT)



2016-12-11 9:30-17:30 (UT)

J-band imaging

16マスのタイル観測

とても大変

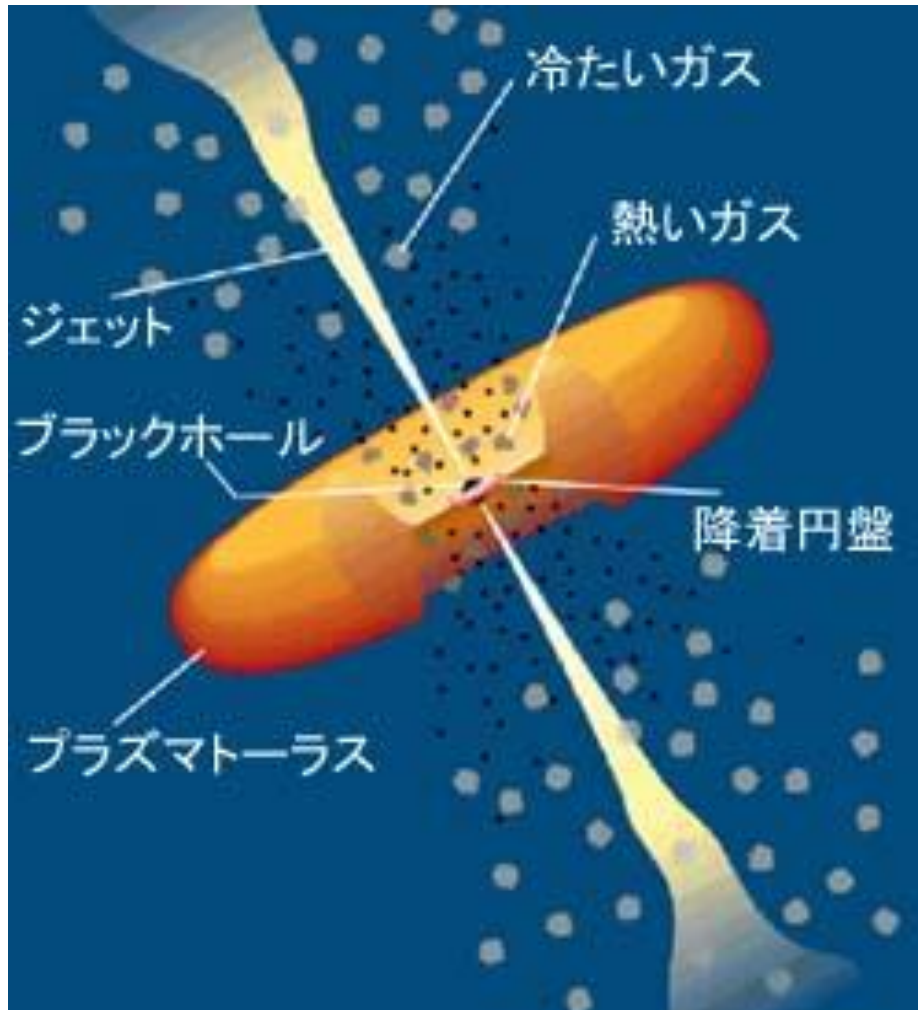
ID	1	2	3	4	5	6	7	8
積分時間 [sec]	300	300	300	300	300	900	1200	300
5sigma 限界等級 [AB mag]	19.29	19.39	19.27	18.64	18.58	18.07	18.50	18.32
変動天体 (目視)	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし

ID	9	10	11	12	13	14	15	16
積分時間 [sec]	300	900	1020	300	300	300	300	300
5sigma 限界等級 [AB mag]	18.97	19.02	18.54	19.21	19.20	18.82	18.77	19.12
変動天体 (目視)	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし

森修論(2018)

新しい戦略へ

活動銀河核 (AGN)

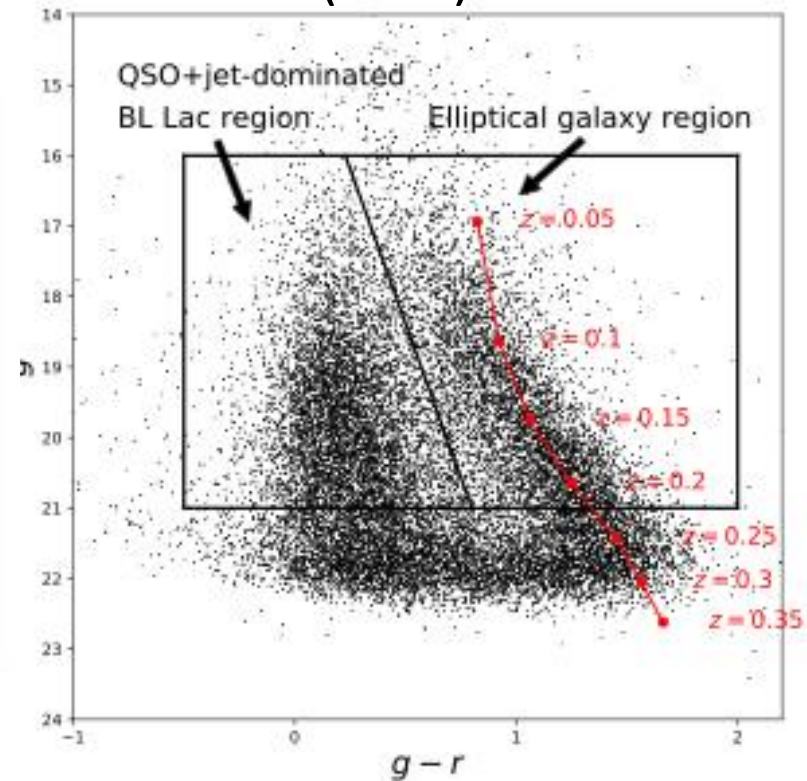
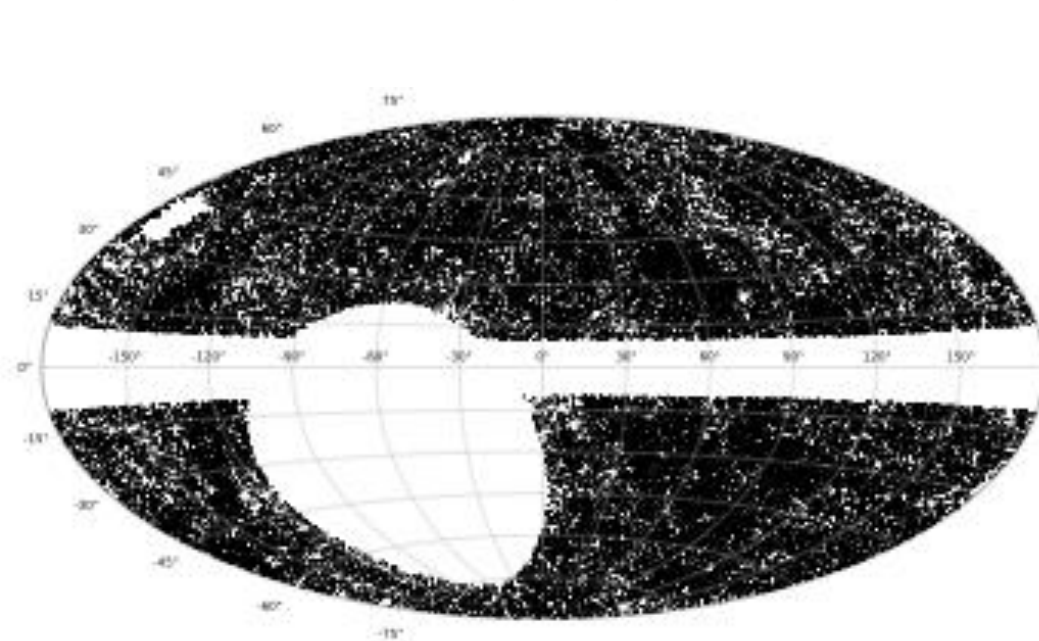


jetを真正面から見ている天体=blazar

電波-赤外-可視光-紫外
-> シンクロトロン放射が卓越

New Blazar Catalog (BROS)

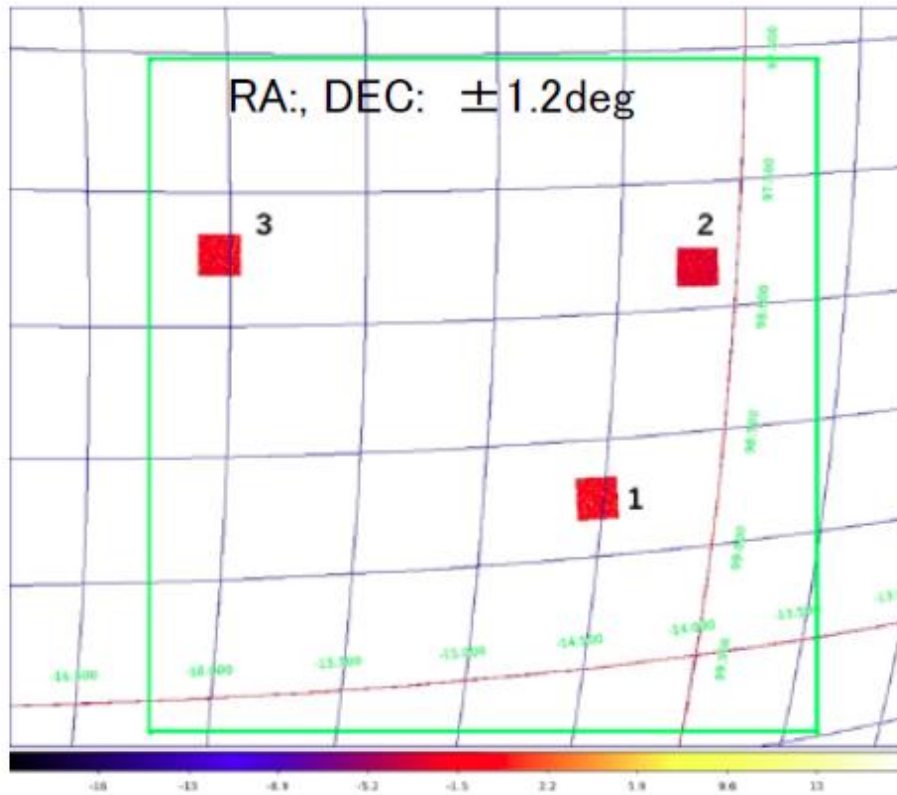
- Blazar Radio and Optical Survey (BROS; Itoh et al. in prep.)
- ~50000 sources at Dec.>-40 deg
 - BZCAT: ~4000 sources
- 2種類の電波カタログからフラットなスペクトルを示す天体
(NVSS (1.4 GHz) + TGSS (151 MHz))
- パンスタースズ(PS1)では40%が検出できていない($r > 23$)



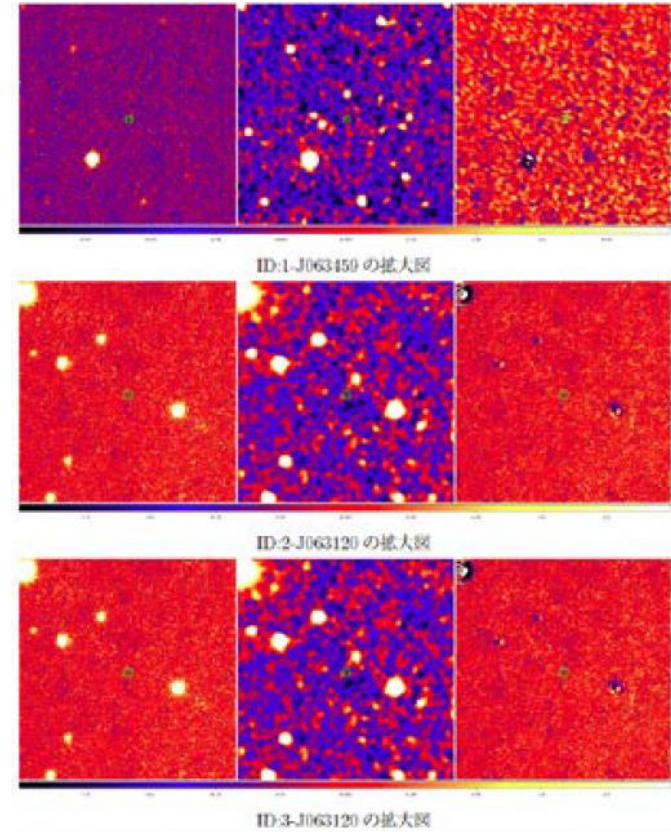
IceCube-170321A

BROS blazar を導入！

Alert: 2017-03-21 07:32(UT)



2017-03-22 10:30-11:10 (UT)
J-band imaging



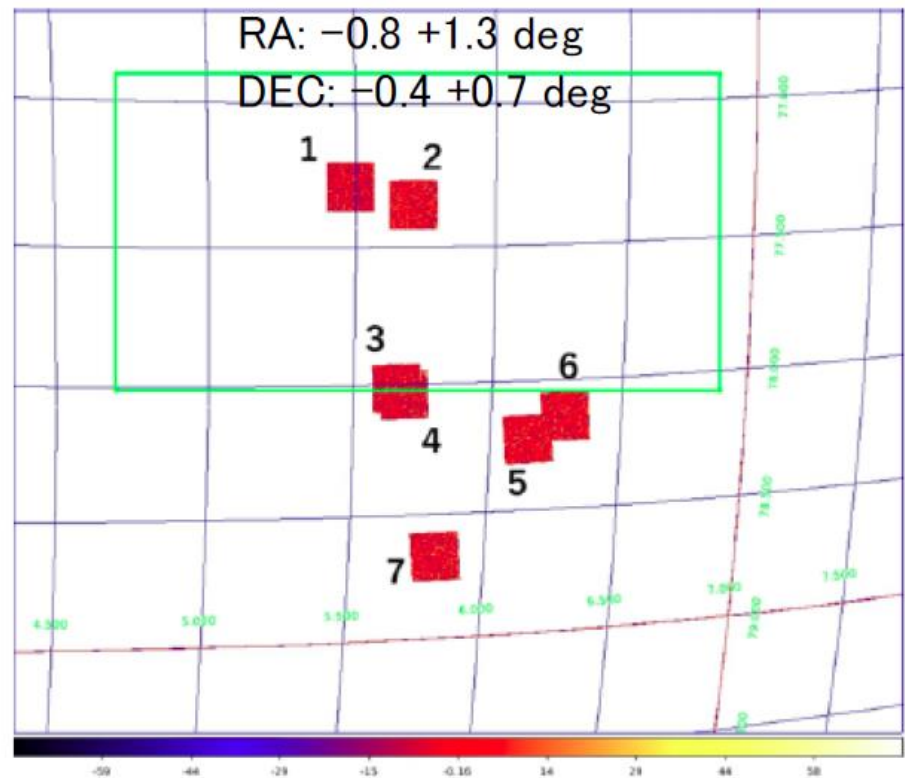
森修論(2018)

いずれの視野も光学対
応天体発見できず

IceCube-170922A

Follow-up observations of seven candidates within the error circle region were performed with Kanata

2夜の観測で7つのうち
1天体のみ変動を検出



ID:1-J050912 の拡大図

ID:2-J050926 の拡大図

ID:3-J051205 の拡大図

ID:4-J051211 の拡大図

ID:5-J051256 の拡大図

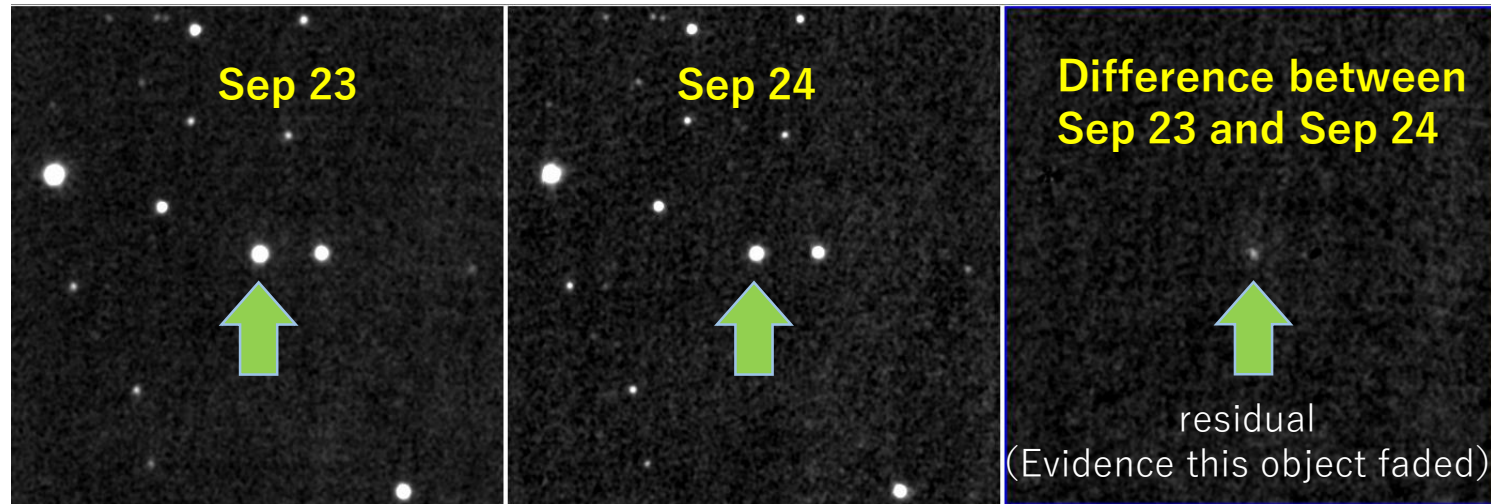
ID:6-J051236 の拡大図

ID:7-J051440 の拡大図

J band

森修論
(2018)

TXS 0506+056 : 活動的な時期



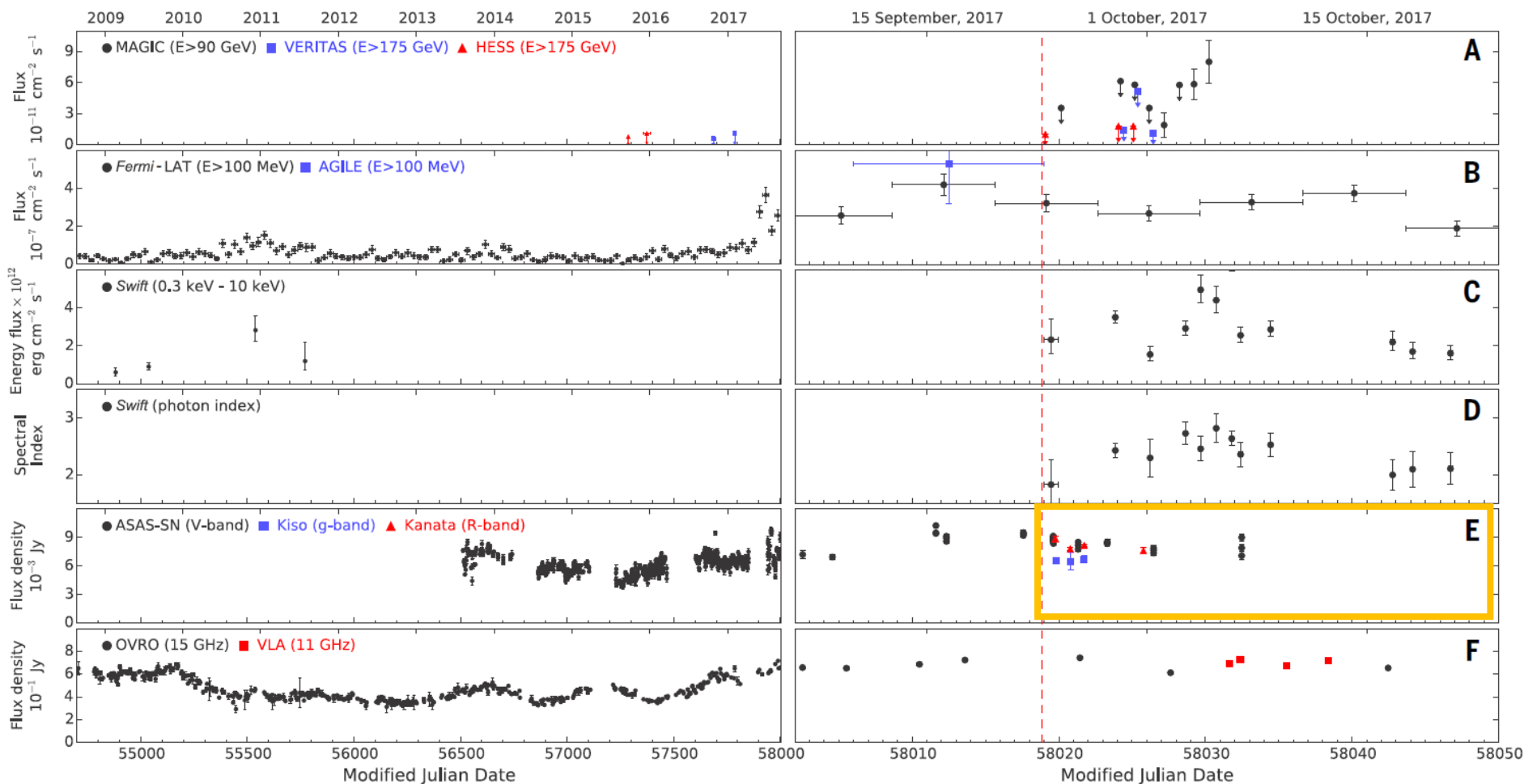
Observed in R band using Kanata/HONIR

We found that TXS 0506 was much luminous on Sep 23 comparing to the previous observations. We observed the slow decline part of the optical flux.

The brightening the gamma-ray emission is observed, and Tanaka+ reported this observational fact. (Tanaka, Y. T. et al. ATel #10791)

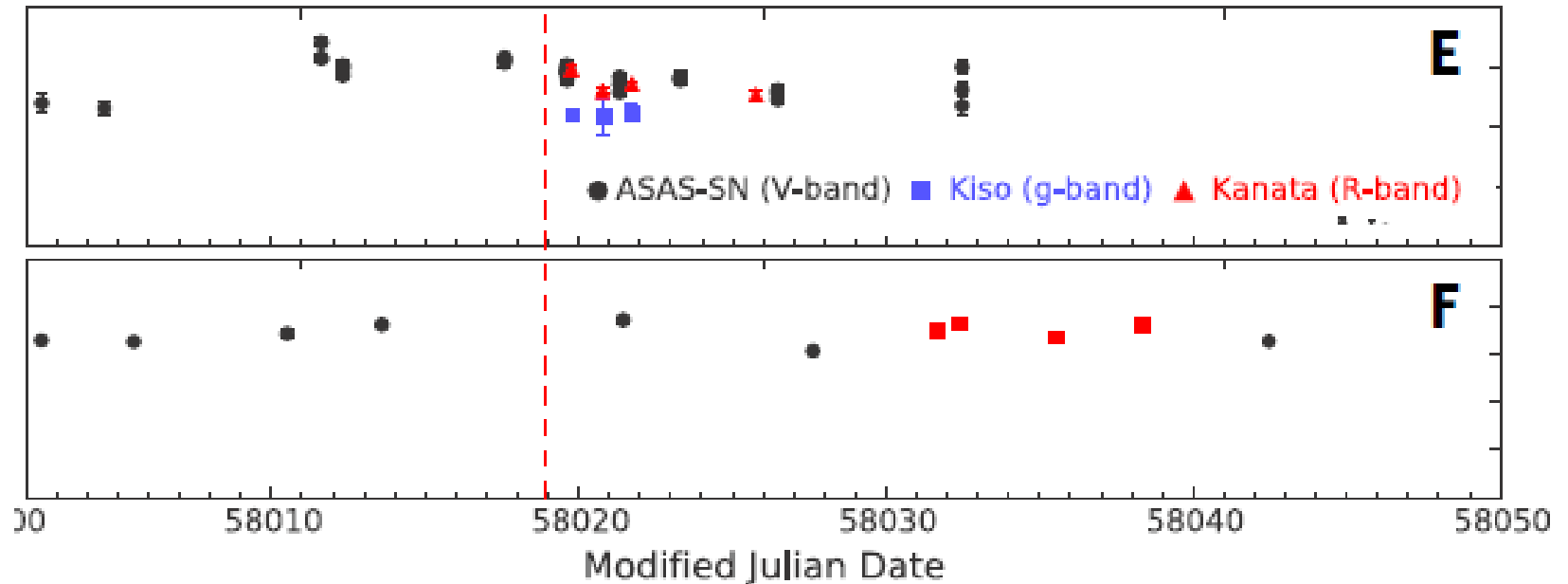
International electromagnetic observations were promoted by this report

TXS 0506+056:多波長ライトカーブ



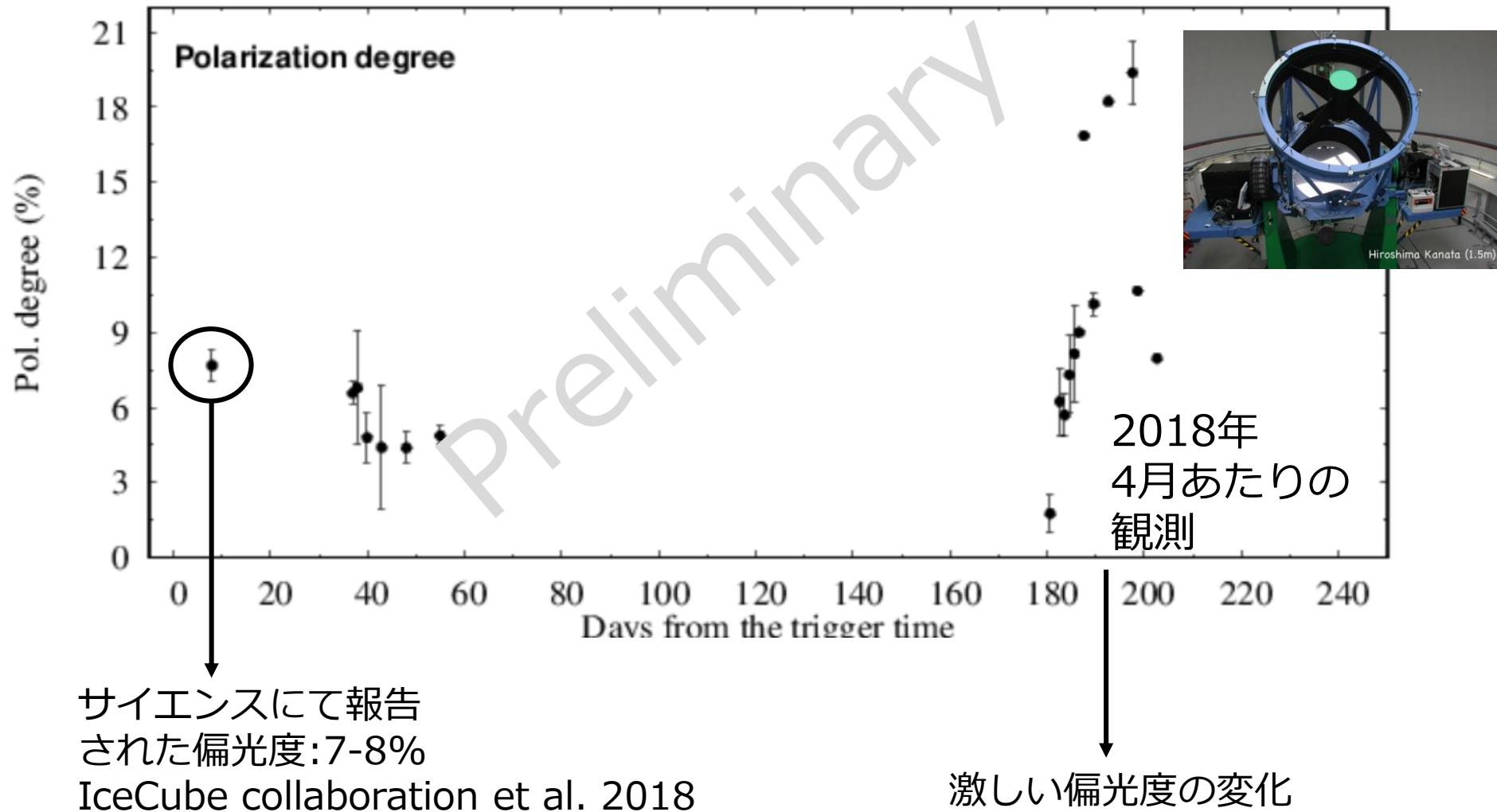
The IceCube Collaboration et al., Science 361, 146 (2018)

光学・近赤外線ライトカーブ

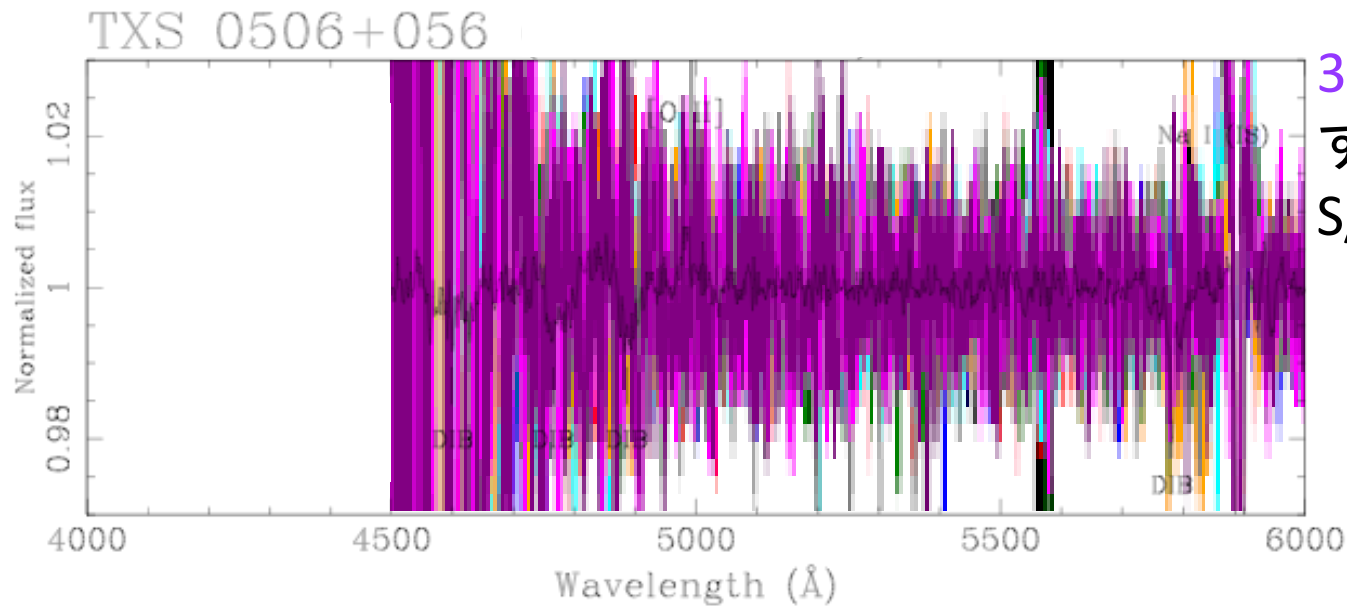


- ニュートリノアラートを受けた20時間後にかなた/HONIRで観測を開始
- 過去の報告より、3倍くらい明るい状態。翌9月24日0.2等の減光
- ニュートリノが放出された時, このブレーザーはより明るかったと見られる：アクティブなフェーズにあった。

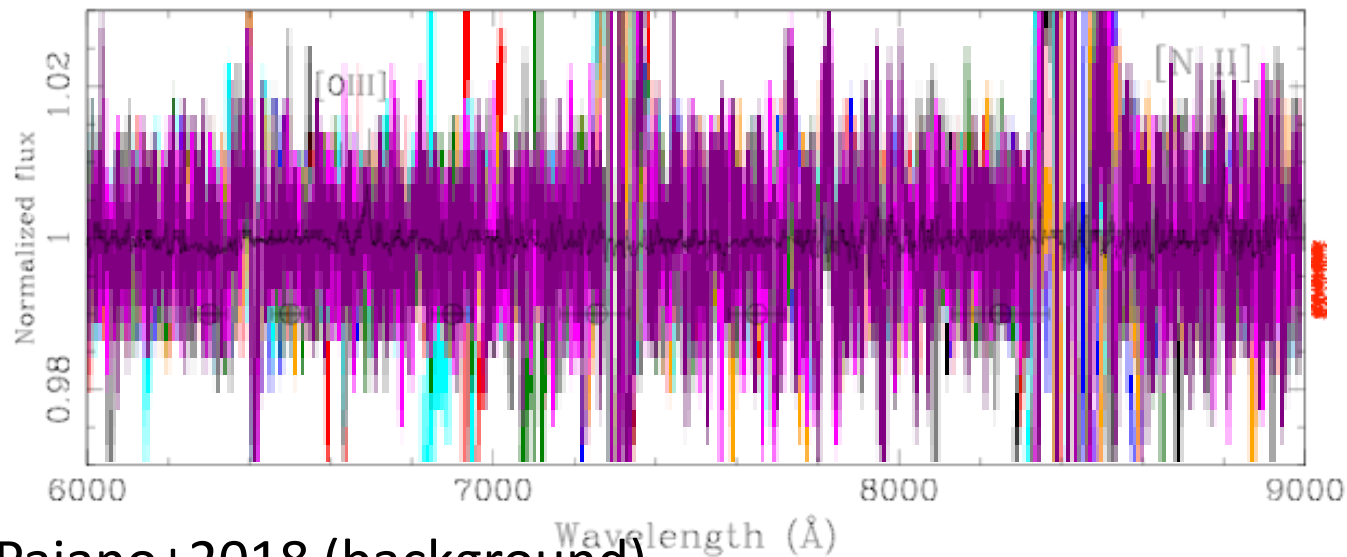
偏光観測



光学分光観測：赤方偏移の決定



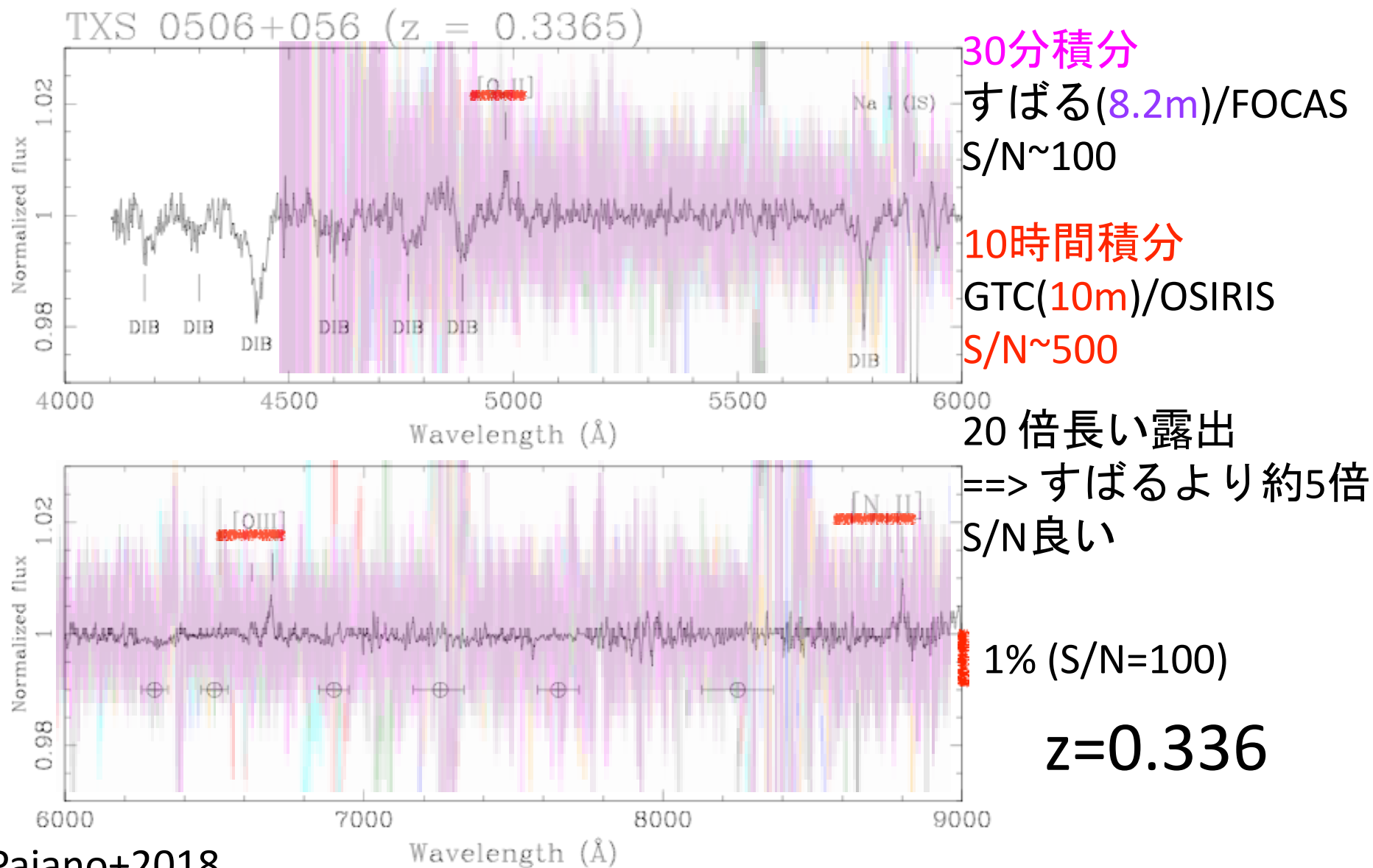
30分積分
すばる(8.2m)/FOCAS
S/N~100



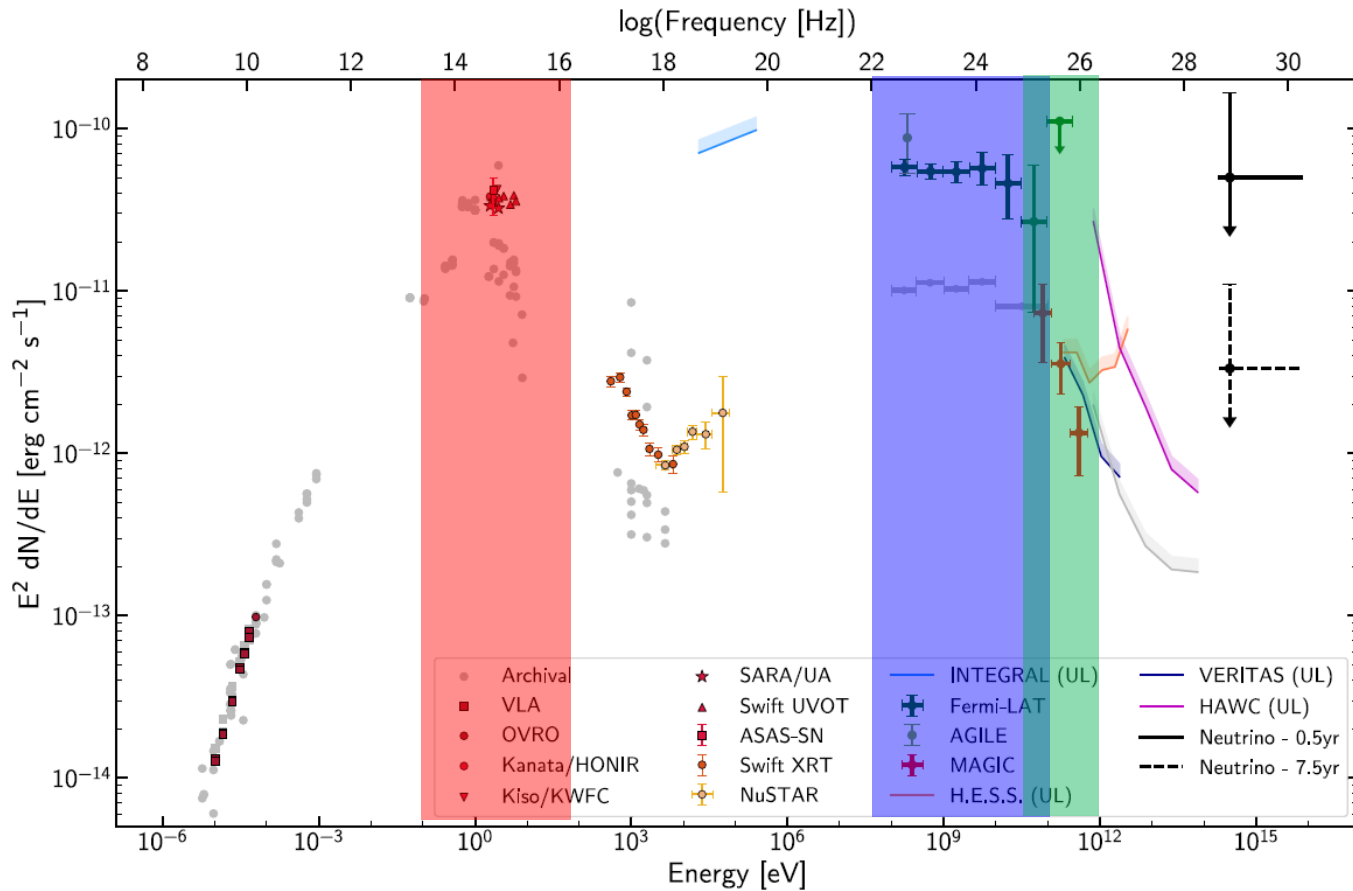
1% (S/N=100)

Paiano+2018 (background)

光学分光観測：赤方偏移の決定



スペクトルエネルギー分布



かなた・木曾

Fermi MAGIC

米サイエンス誌で出版



RESEARCH ARTICLE SUMMARY

NEUTRINO ASTROPHYSICS

Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A

The IceCube Collaboration, *Fermi*-LAT, MAGIC, *AGILE*, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., *INTEGRAL*, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, *Swift*/*NuSTAR*, VERITAS, and VLA/17B-403 teams*†

The IceCube Collaboration et al.,
Science 361, 146 (2018) 2018年7月13日

7月20日 文科省記者会見



9月16日付 読売新聞

15 <サイエンス> 3版

2018年(平成30年)9月16日(日曜日)

科学

宇宙

天体

宇宙

(第3種郵便物認可)

観測に参加した望遠鏡

すばる望遠鏡(米ハワイ島)



人工衛星「フェルミ宇宙望遠鏡」



世界の「目」で一斉観測

1 南極のアイスキューブが特殊な光を検知。千葉大が開発したシステムで高エネルギーのニュートリノと判断

2 世界各地の望遠鏡に追加観測を呼びかける

ブレーザー天体

- 中心のブラックホールをガスが取り囲み、プラズマを噴き出す
- プラズマ内で宇宙線が光とぶつかり、ニュートリノが発生



3 40億光年先の「ブレーザー天体」が放出源と特定



アイスキューブや東京大、広島大、国立天文台、米航空宇宙局などの資料を基に作成

日本のニュートリノ研究の歴史

1987年	小柴昌俊・東京大特別栄誉教授が岐阜県の観測装置「カミオカンデ」で、超新星爆発によって放出されたニュートリノを観測する
1998年	梶田隆章・東京大宇宙線研究所長が「スーパーカミオカンデ」によって、ニュートリノに質量があることを証明する
2012年	千葉大などの国際チームが、アイスキューブを使って高エネルギーのニュートリノを観測する
2018年	千葉大などの国際チームが、高エネルギーのニュートリノの放出源を特定する



ニュートリノ 放出源探せ

IceCube-170922A その後

かなた・木曾による継続観測

すばるHSC, IRSF JHKs,

MITSuME (明野/岡山) g'RI, Nayuta 分光

京都40cm V によるフォローアップ観測

-> Morokuma et al. in prepとして準備中

さらなる観測に向けて

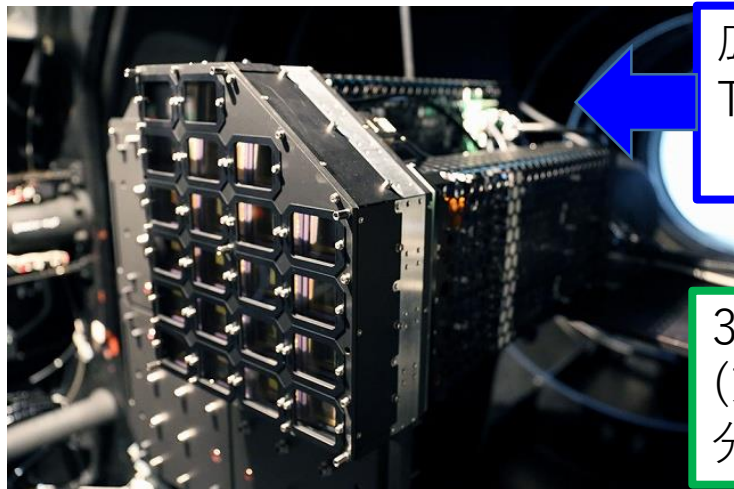
➤ blazar (AGN) ?

Kanata/OISTERを用いたカタログを用いたブレーザーの追観測
(2匹目のドジョウ) .

多モード多バンド観測によって多様な性質を引き抜く

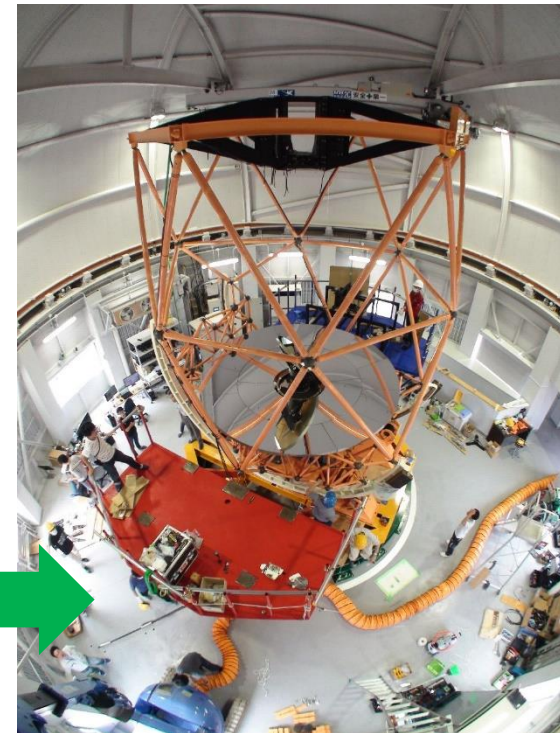
➤ (IIn/Ibc) supernova? **–依然として強い候補**

広視野カメラを使って誤差視野内の新天体の発見
即応分光観測によるタイプ同定



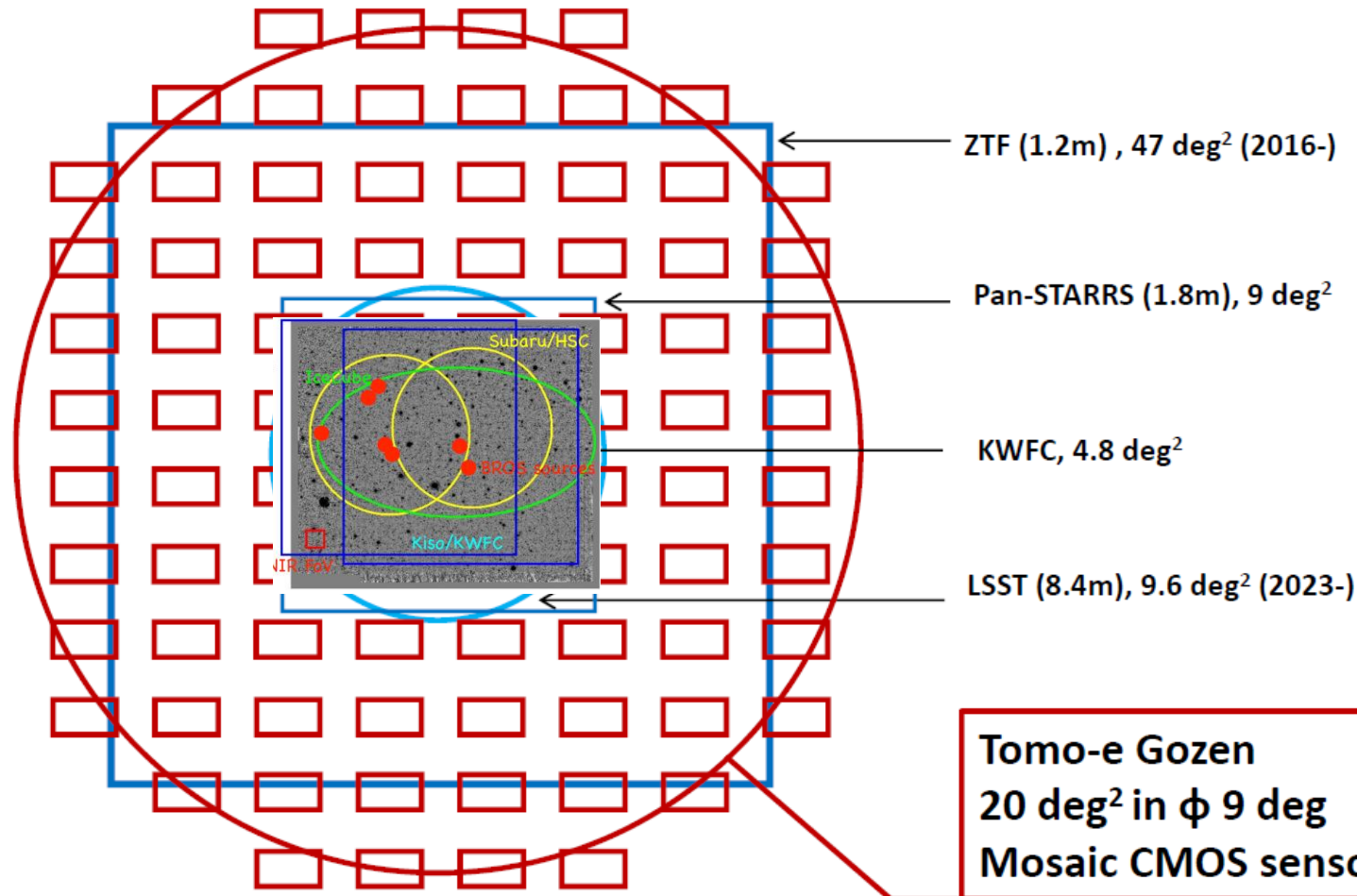
広視野カメラ
Tomo-e Gozen
(東大木曽観測所)

3.8m せいめい望遠鏡
(京都大学岡山天文台)
分光観測



Tomo-e Gozen を使った 広視野突発現象サーベイ

From Sako-san's slide



Tomo-e Gozen を使った 広視野突発現象サーベイ

全天サーベイ ($\sim 10000 \text{ deg}^2$) 1日以内の頻度

IceCubeアラート直後の観測だけでなく、
BROSカタログ記載ブレーザー候補天体の
ライトカーブを得ることができる

超新星シナリオ

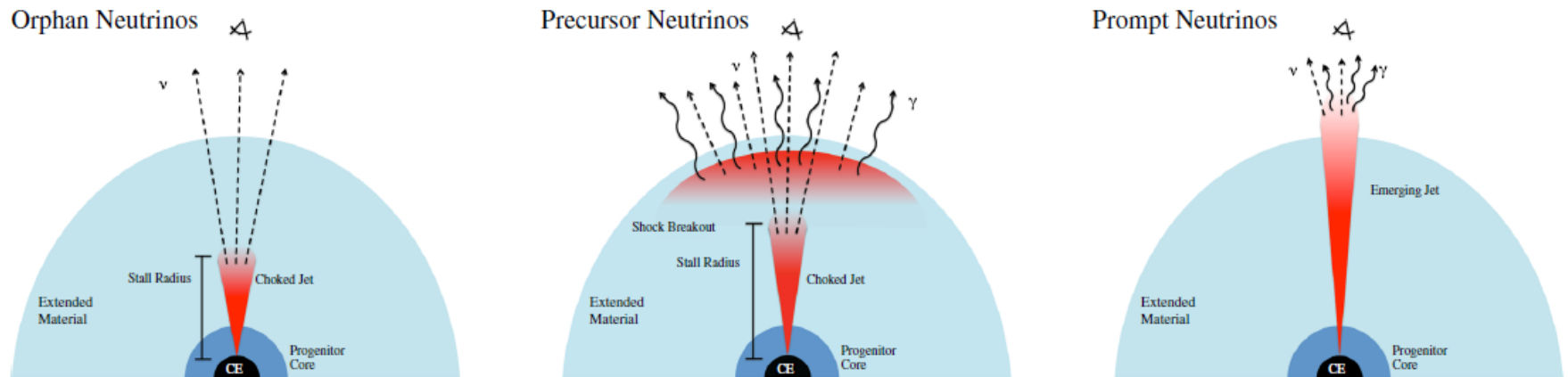


FIG. 1. Left panel: The choked jet model for jet-driven SNe. Orphan neutrinos are expected since electromagnetic emission from the jet is hidden, and such objects may be observed as hypernovae. Middle panel: The shock breakout model for LL GRBs, where transrelativistic shocks are driven by choked jets. A precursor neutrino signal is expected since the gamma-ray emission from the shock breakout occurs significantly after the jet stalls (e.g., Ref. [26]). Right panel: The emerging jet model for GRBs and LL GRBs. Both neutrinos and gamma rays are produced by the successful jet, and both messengers can be observed as prompt emission.

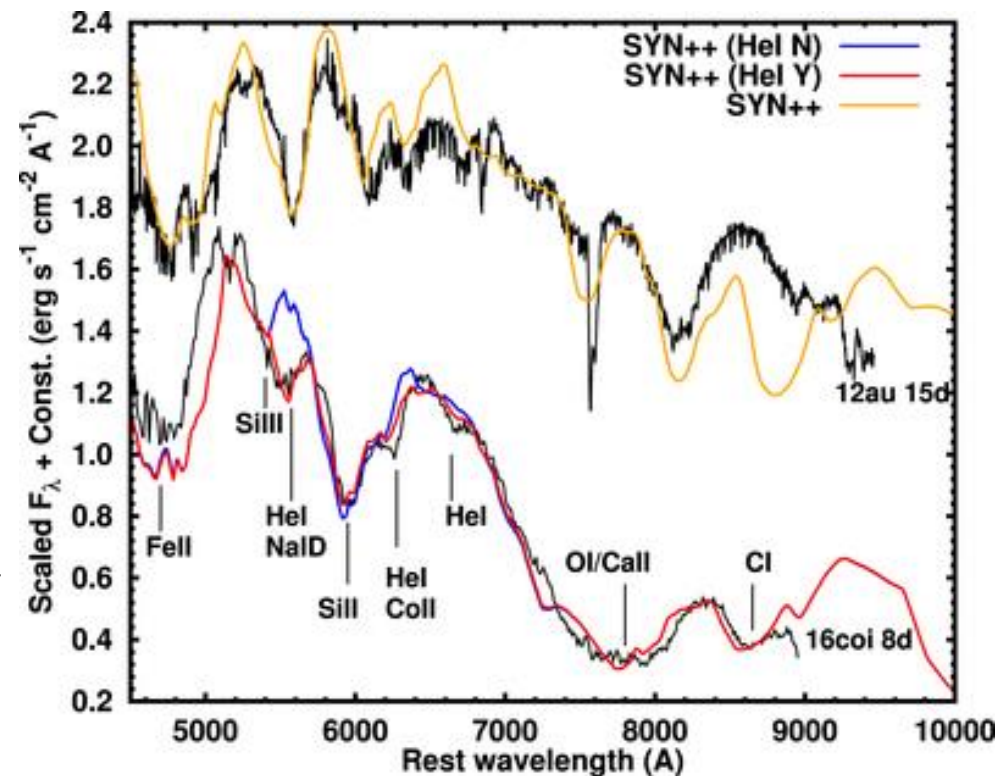
極超新星として観測される？



- ・ **近傍であれば**超新星の性質を詳細に研究可能

- ・ 3.8m KOOLS-IFU **$z \sim 0.07$ 程度までの** BL SNe分光可能？

Broad-lined `Type Ib' SN 2016coi



Yamanaka et al. 2017, ApJ

IceCube 181023-A

GCN 131653

メールアラート： 世界時2018年10月23日 16h38m11s

EHE (Extremely High Energy) event

-> IceCubeでトラック事象として観測されるニュートリノ (>10 Pev)

-> HESEに比べて位置決定精度が高い

位置： RA +17h 59m 21s, DEC -08d 53' 10" (J2000),

位置決定誤差： 17.50 arcmin (~50% radius)

-> 銀河面をかすめている... (18.9887° 7.3363°)

-> 微妙なGalactic extinction ($A_v=3.0$; Schlafly et al. 2011)

-> しかし、そもそもBROSカタログにこのエラー範囲内に天体無い

3FGL J1804.5-0850

GCN 23375 (2018年10月23日 19時38分 サーキュレート)

位置が再計算された RA: 270.18, Dec: -8.57

-> この位置を中心にしても(勿論)BROSカタログに対応天体は無し

-> Fermiガンマ線2FGL, 3FGLカタログのうち最も近いsourceが

3FGL J1804.5-0850 (ただし、1.3d離れている)

PS1イメージで、このソース位置から6秒離れた位置に～21magの天体？

ちなみに, 3FGL J1804.5-0850のFermi位置誤差は $12.84' \times 10.8'$ (95%)

-> OISTERに属する望遠鏡での観測を考えると現実的な視野の大きさ

→この位置を**3FGL天体の活動性に制限を与えるために**、OISTERでのフォローアップを決断！

OISTERでのフォローアップ

依頼天体(視野) 3FGL J1804.5-0850

座標：18h04m31.2s -08d50m31s

中小程度の視野を持つ望遠鏡

->extinctionが大きく、感度が良くかつ長波長側のIバンドをメインに
北海道MSI Iバンド、名古屋大 SIRIUS JHKsバンド、京都大屋上 Iバンド
西はりま JHKsバンド、広島大学 R+Ksバンド、鹿児島大学 Ksバンド
石垣島天文台 g'RIバンド

大きな視野を持つ望遠鏡

中心座標：18 00 43.2 -08 34 12 (GCN 23375) を中心に、掃天観測
東工大 明野・岡山MITSuME g'RI
東京大 Tomo-e Gozen

かなたHONIRによって取得された3FGL視野のPS1・セルフでの差分
->有意な増光天体無し
この視野を観測した望遠鏡で限界等級を求め、ATELに投稿

結果まとめ(ATEL投稿内容)

	Filter	観測時間	視野	限界等級
Kanata	R+Ks	09:09:51-10:25:58 (Oct 24), 09:14:19-11:04:35 (Oct 25)	10'	R=19.6 and Ks=15.5 mag (Oct 24); R=19.8 and Ks=15.5 mag (Oct 25).
Nayuta	J+H+Ks	09:11:57-10:14:49 (Oct 24), 08:45:42-10:24:05 (Oct 25)	2'.7	J=18.1, H=17.6 and Ks=16.6 mag (Oct 24), J=19.3, H = 19.0, and Ks = 17.9 mag (Oct 25).
IRSF	J+H+Ks	18:06:57-18:43:08 (Oct 24), 18:06:20-18:31:12 (Oct 25)	7'.7	J=19.4 and H=18.9 mag (Oct 24), J=19.1, H=18.6, and Ks=18.1 mag (Oct 25)
40cm	I	09:17:19-11:26:42 (Oct 24) 09:08:37-11:27:23 (Oct 25)	10'	Ic=18.2 mag

IceCube 181023-A その後

超新星シナリオへの制限を与えるべくフォローアップを継続

-> SN Ib/cであれば爆発後10-20日程度で極大光度に到達

-> 2-3日おきのフォローアップでOK

戦略

$z < 2$ (IceCubeニュートリノが到達しうる距離)までだと超新星があまりに多く発見される(e.g., HSCサーベイ)

-> しかし、 $z < 2$ でも $t < 20d$ で1つ未満の発見が期待されるような珍しい超新星(e.g., Ic-BL, いわゆる極超新星)が、ニュートリノに同期して1つでも(距離に依らず)発見されれば、有意性を言えるかもしれない

平均的なIc-BL、ピークで $M_v = -18\text{mag}$ 、 $A_v = 3$ を加味して1-2クラスの限界等級($\sim 20\text{mag}$)で見つけることのできる距離 $z < 0.01$ に限られる

-> 重力波対応天体フォローアップで用いられるGLADEカタログを用いて、 $z < 0.01$ までの銀河をリスト化、2-3日に1点cadenceのフォローアップを実施

-> Kanata/HONIR, Tomo-e Gozen, MITSuMEで撮像フォロー観測

もし、SN候補が見つかったら

IC 181023-A、現在解析を進めているが、少なくとも明瞭に新天体と言えるもの見つかっていない
->発見できても検証は難しいかもしれない

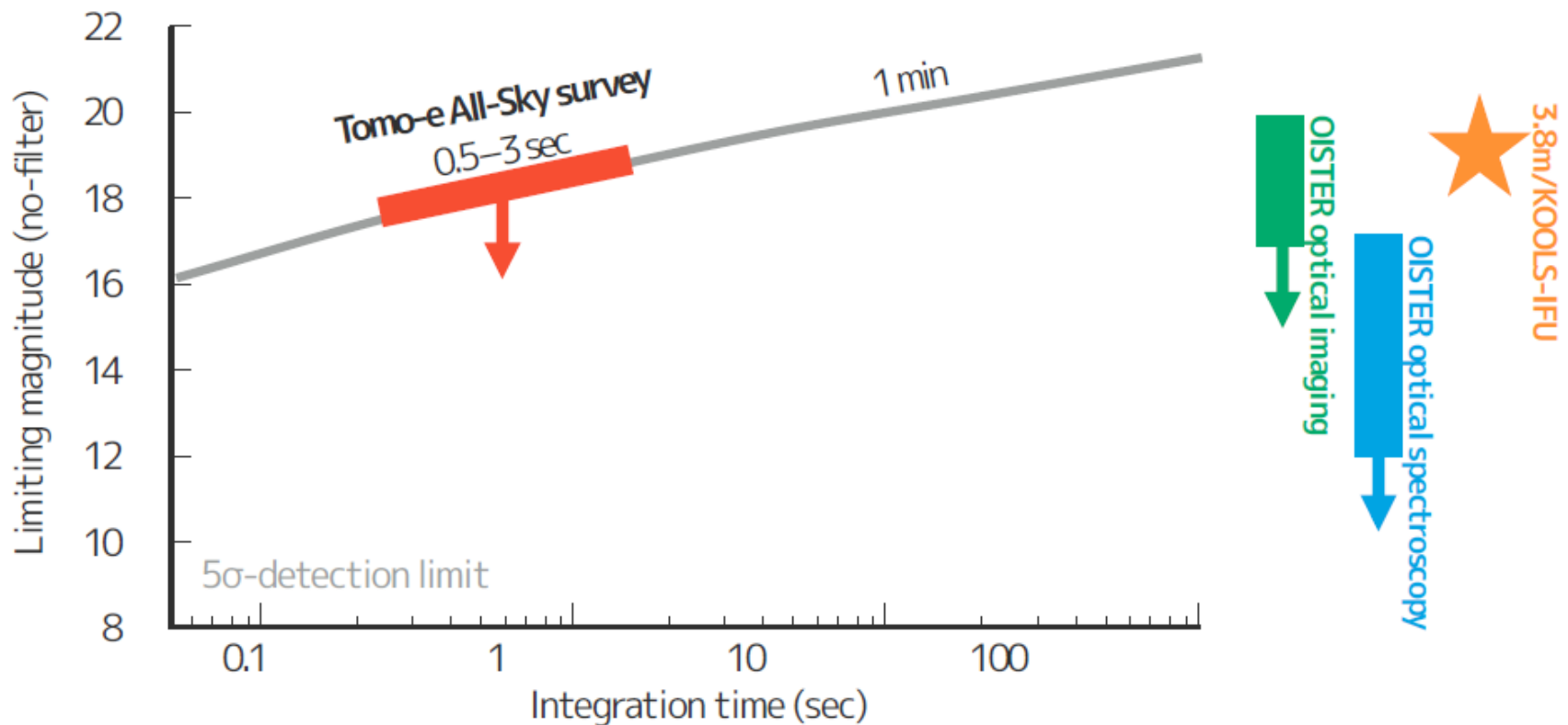
今後のIceCubeアラートフォローアップで
18-20magで超新星が発見されても現状では
即応的な分光は難しい…

(※Kanata/HOWPolでは17等台が限界)

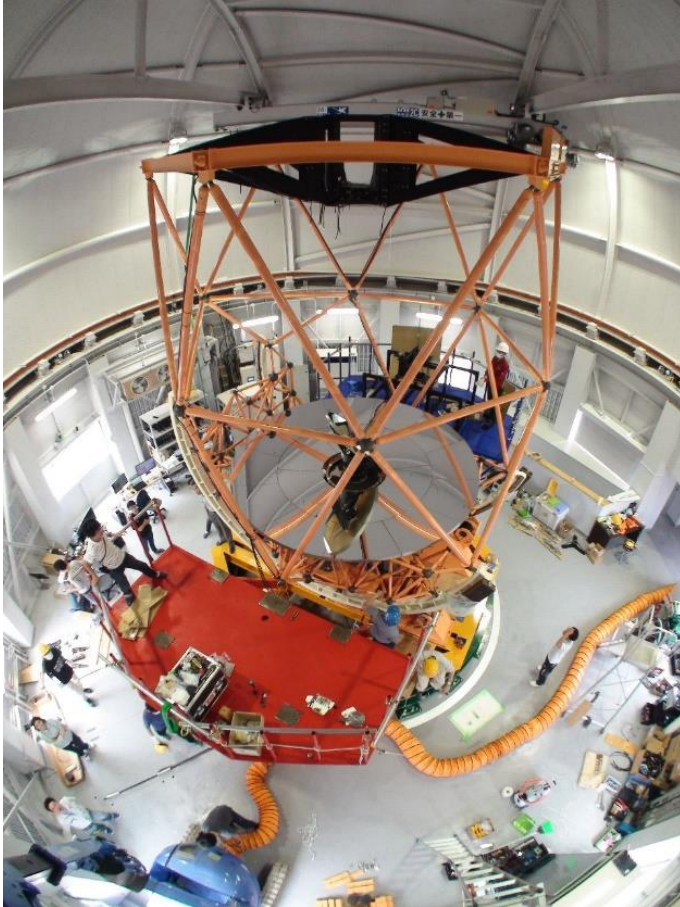
3.8mせいめい望遠鏡に期待

OISTER 検出限界

from Osawa-san's slide



3.8m Seimei + KOOLS/IFU



KOOLS-IFU (PI:松林)
ファイバー分光器
限界等級 **~20mag**

Summary

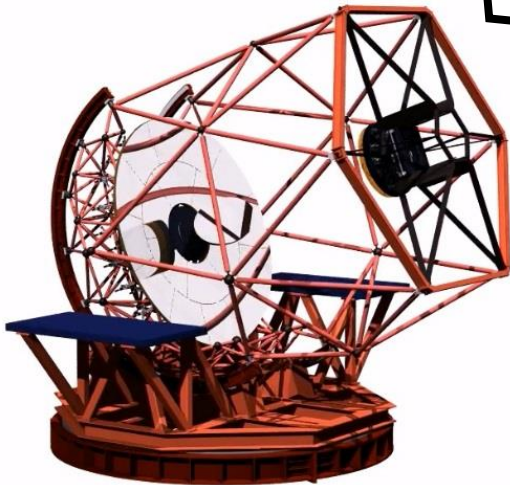
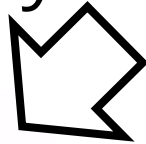
- 我々は、これまでIceCubeアラートに対して3度の即応的追観測を実施してきた。その結果、IceCube 170922Aにおいて、TXS 0506+056が明るい時期にあり、アラート後1日で減光過程にあることを見出した。
- Fermiの解析につながり(Tanaka 2017, ATEL)、国際的なマルチメッセンジャー追観測につながった
- TXS 0506+056はアラート直後 ~7%程度の偏光度、featurelessなスペクトル、BL Lacに一致
- 超新星シナリオを含めて観測的制限を与えるべく、さらなるフォローアップ観測の計画を練っている

Follow-up of transients discovered by “Tomo-e Gozen”

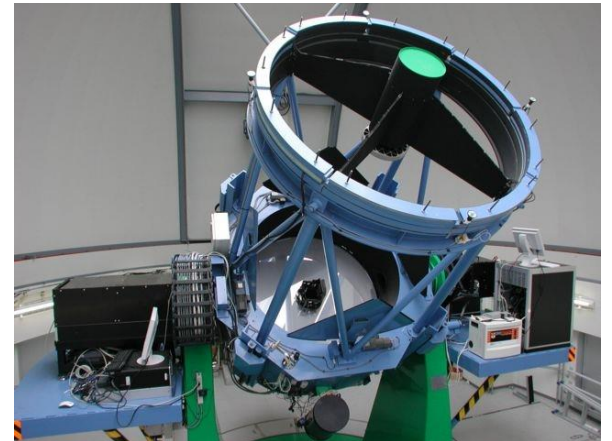
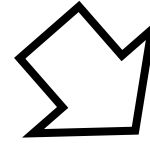
Discovery



spectroscopy



Photometry
(polarization)



ATELS

The first source of high-energy neutrinos



Follow-up detections of IC170922 based on public telegrams



IceCube

September 22



Swift

September 26



Fermi, ASAS-SN

September 28



SALT, Kapteyn

October 7



MAGIC

October 4



Liverpool, AGILE

September 29



Kanata, NuSTAR

October 12



VLA

October 17



Subaru

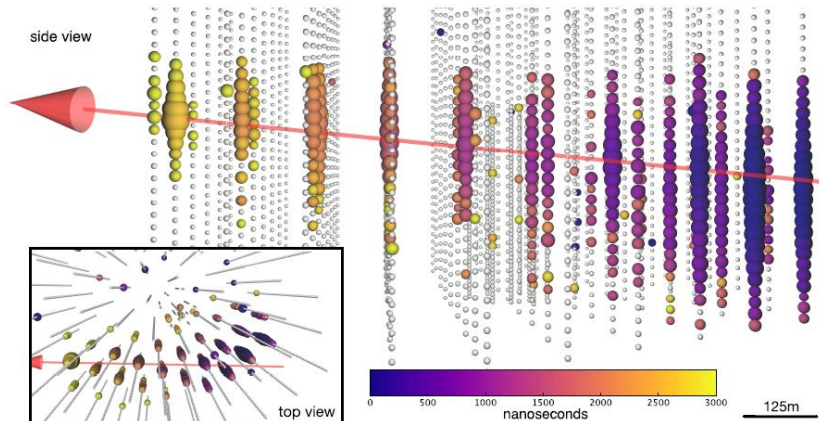
October 25

▶ 🔊 3:50 / 6:18

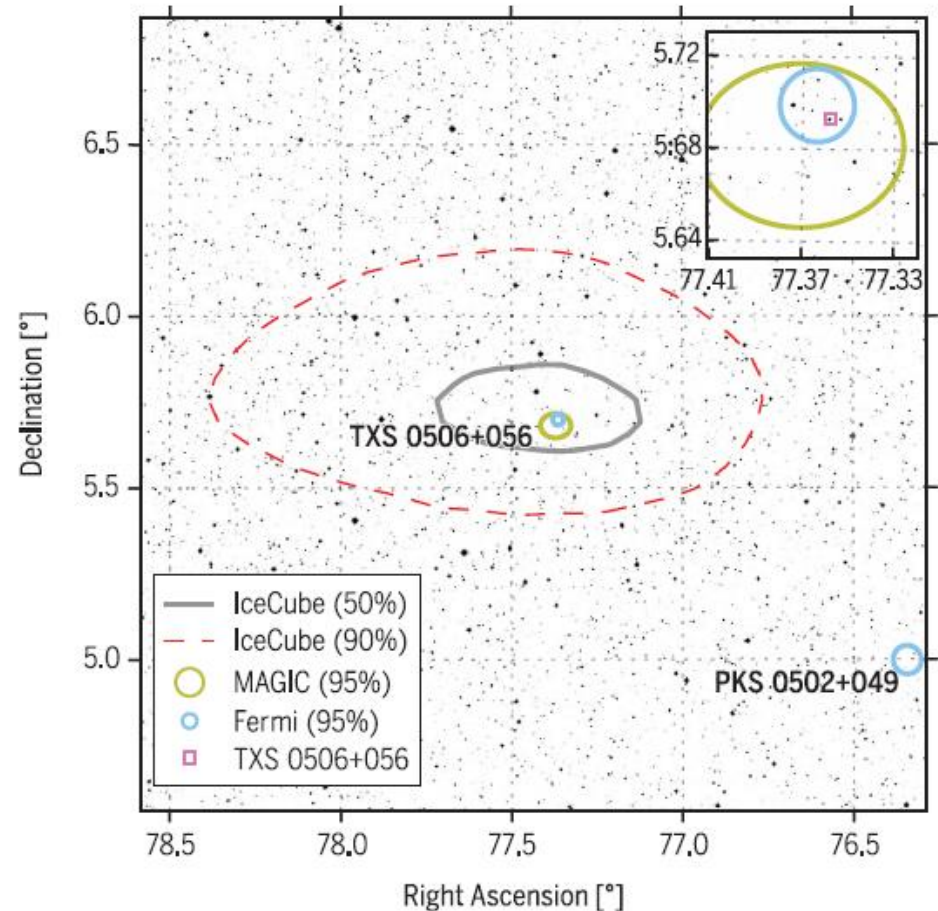


<https://www.youtube.com/channel/UCqhYPTo6SWmi5bbVBmUf9NA>

IceCube ニュートリノの位置決定精度



IceCube collaboration et al. 2018



トラック事象～典型的には**1度**(90%エラー)の位置決定誤差