

OISTER 参画機関による IceCube ニュートリノの フォローアップ観測

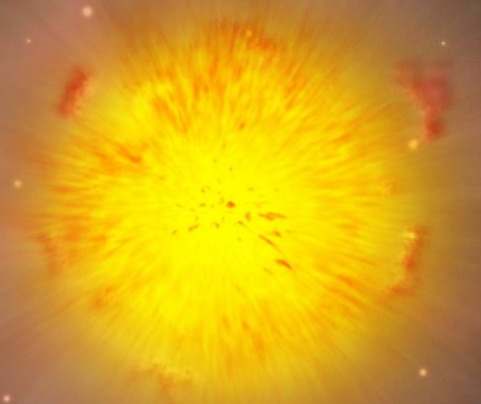
山中雅之 (京都大学)、 諸隈智貴(東京大学)、
内海洋輔 (スタンフォード大学)、 太田耕司 (京都大学)、
伊藤亮介 (美星天文台)、
笹田真人、 中岡竜也、 川端弘治 (広島大学)、
田中雅臣、 木村成生 (東北大学)、 富永望 (国立天文台)、
村田勝寛、 河合誠之 (東京工業大学)、
川端美穂、 前田啓一 (京都大学)
on the behalf of OISTER

私からの話題

1. IceCube-170922A のフォローアップ観測
2. 残された問題 (see 石原さん、木村さん)
3. 最近のIceCubeニュートリノ対応天体のフォローアップ観測

高エネルギーニュートリノ放射源候補

©U. Tokyo

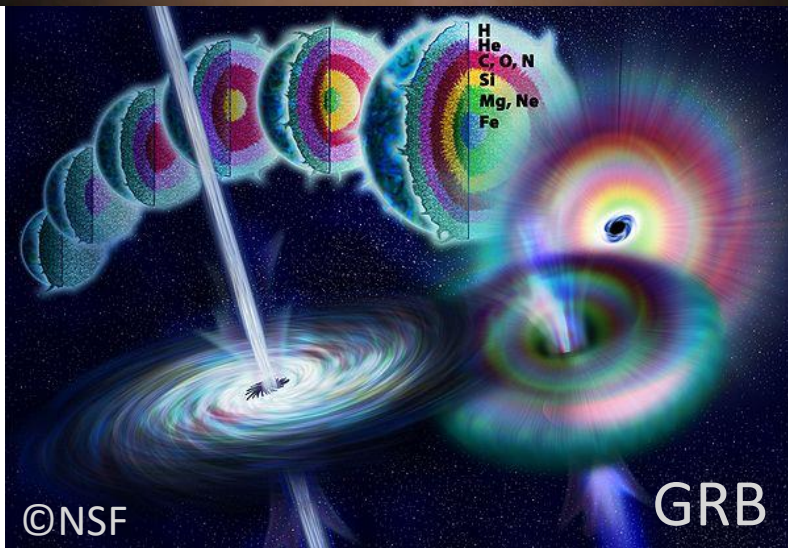


(peculiar) supernova

©NASA/Fermi



blazar: AGN relativistic jet



©NSF

GRB

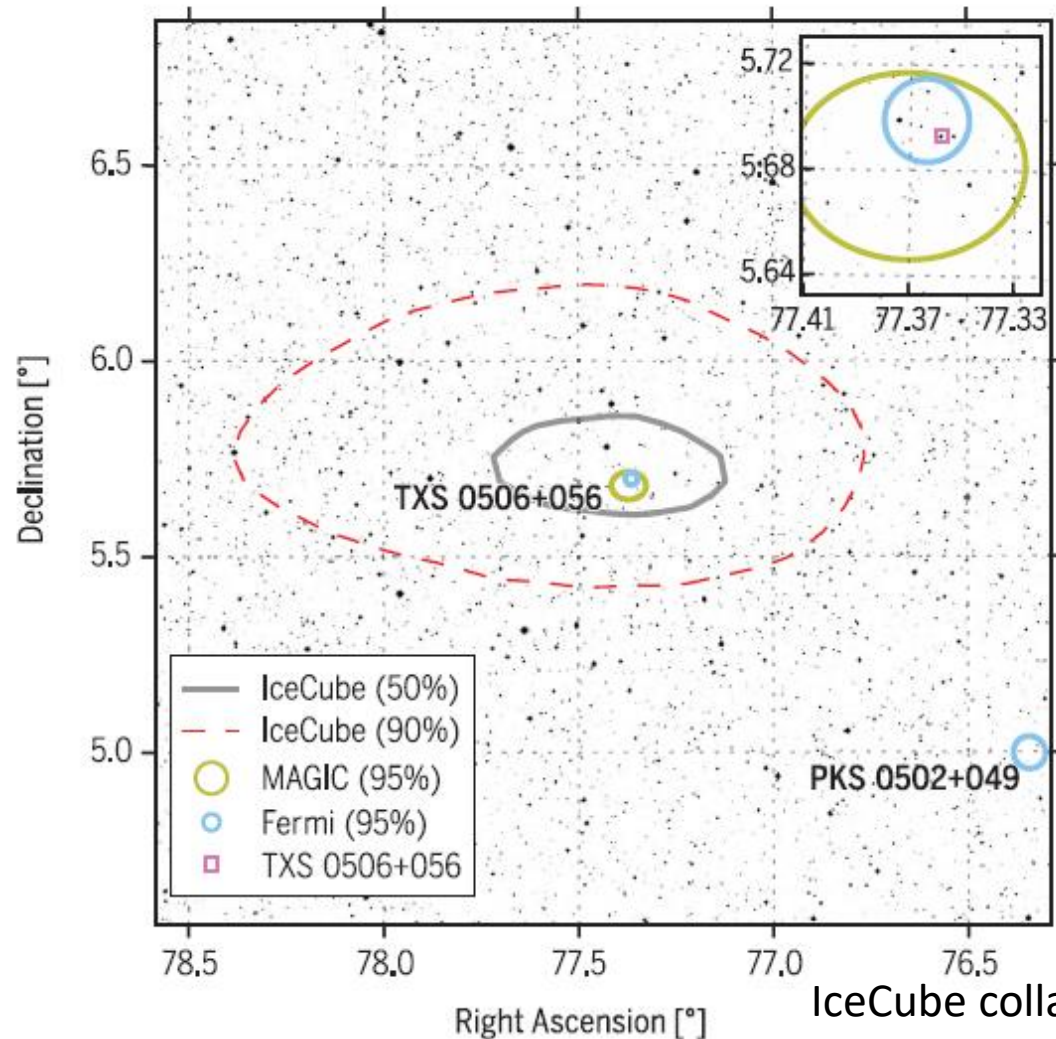
©NASA



starburst galaxy

From Morokuma san's slide

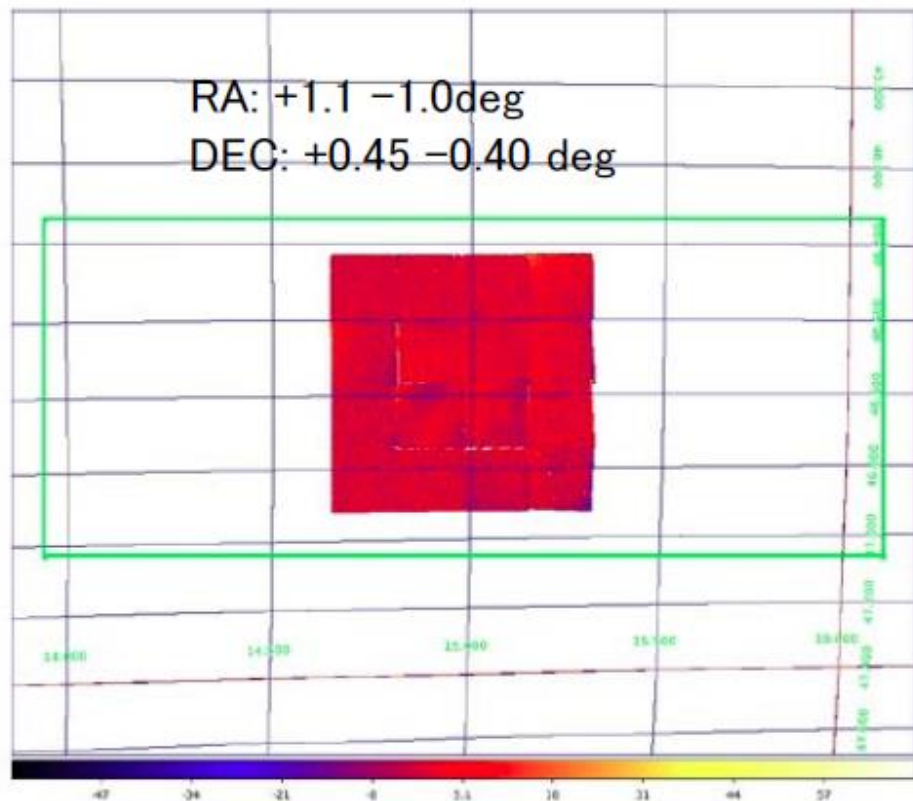
IceCube ニュートリノの位置決定精度



トラック事象～典型的には**1度**(90%エラー)の位置決定誤差

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

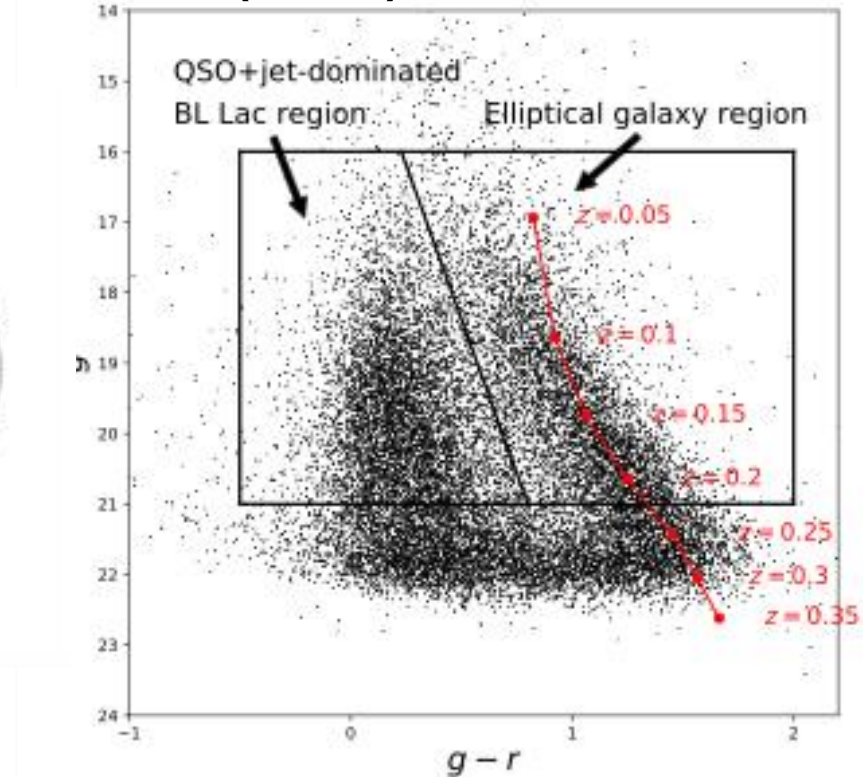
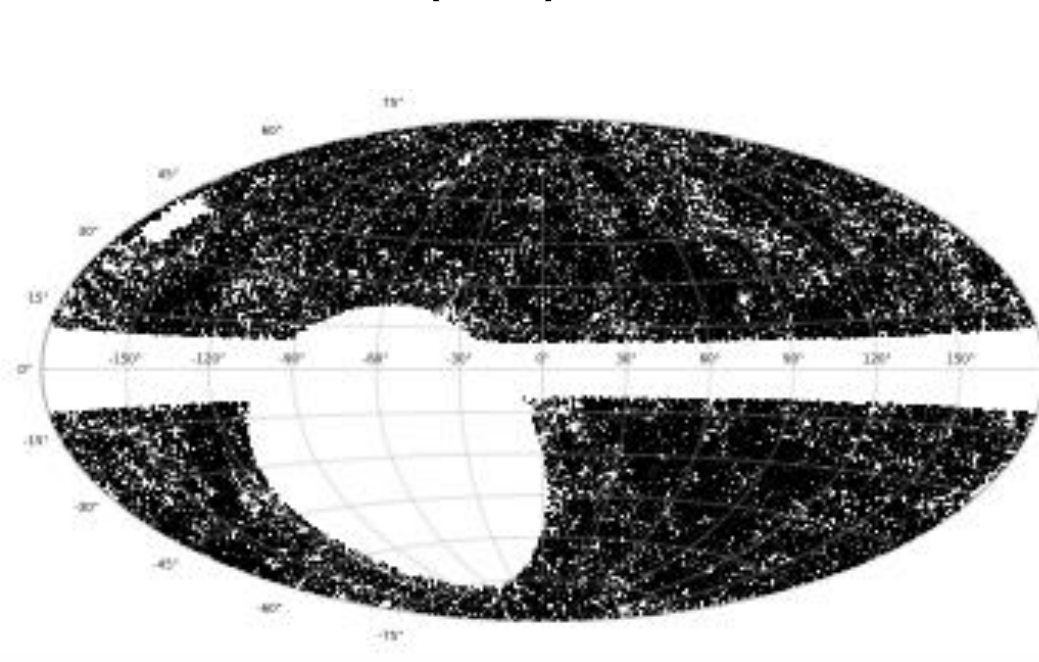
ID	1	2	3	4	5	6	7	8
積分時間 [sec]	300	300	300	300	300	900	1200	300
5sigma 限界等級 [AB mag]	19.29	19.39	19.27	18.64	18.58	18.07	18.50	18.32
変動天体 (目視)	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
ID	9	10	11	12	13	14	15	16
積分時間 [sec]	300	900	1020	300	300	300	300	300
5sigma 限界等級 [AB mag]	18.97	19.02	18.54	19.21	19.20	18.82	18.77	19.12
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

New Blazar Catalog (BROS)

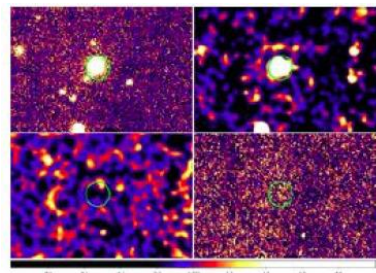
- TXS 0506+056の変動を検出できたのはBROSカタログ整備のおかげ
- Blazar Radio and Optical Survey (BROS; [Itoh et al. 2020, ApJ, 901, 3](#))
- ~80000 sources at Dec. > -40 deg
- 2種類の電波カタログからフラットなスペクトルを示す天体 (NVSS (1.4 GHz) + TGSS (151 MHz))
- パンスタースズ(PS1)では40%が検出できていない($r > 23$)



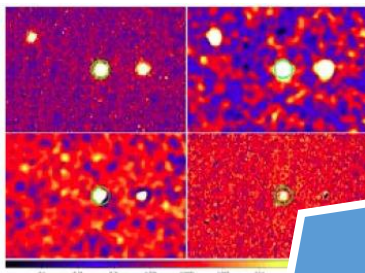
IceCube-170922A

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

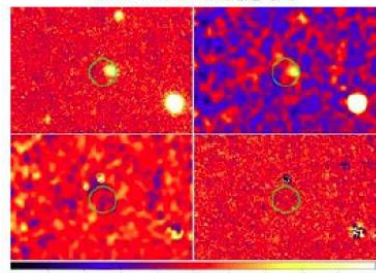
2夜の観測で7つのうち1天体のみ変動を検出



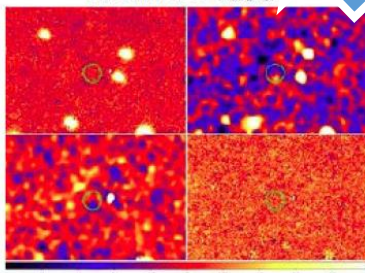
ID:1-J050912の拡大図



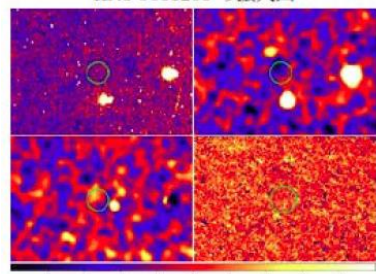
ID:2-J050926の拡大図



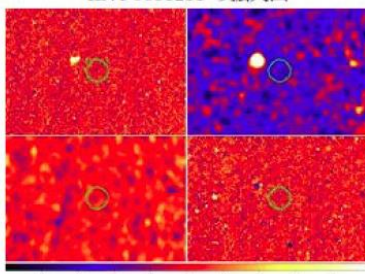
ID:3-J051205の拡大図



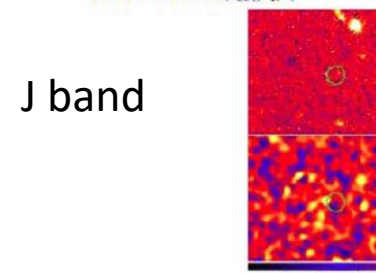
ID:4-J051211の拡大図



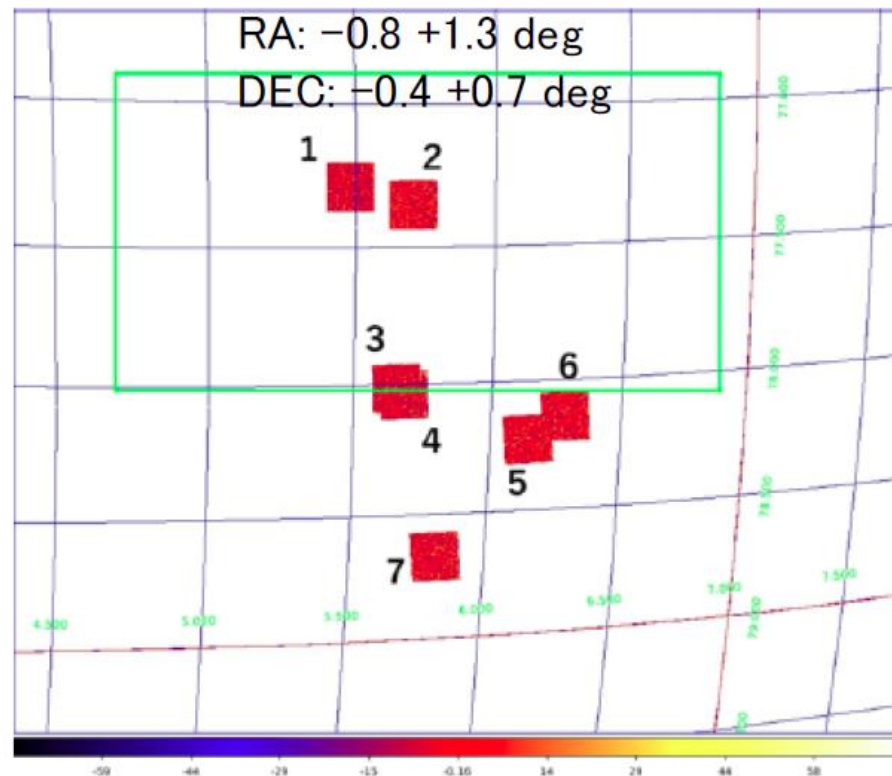
ID:5-J051256の拡大図



ID:6-J051236の拡大図



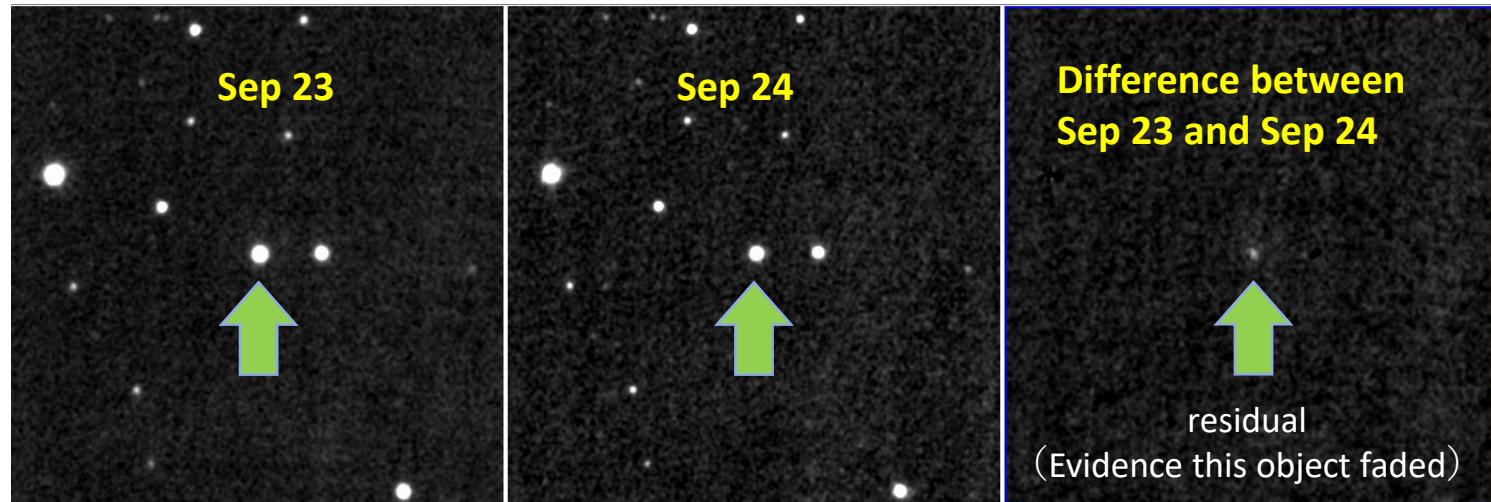
ID:7-J051440の拡大図



J band

森修論
(2018)

TXS 0506+056 : 活動的な時期



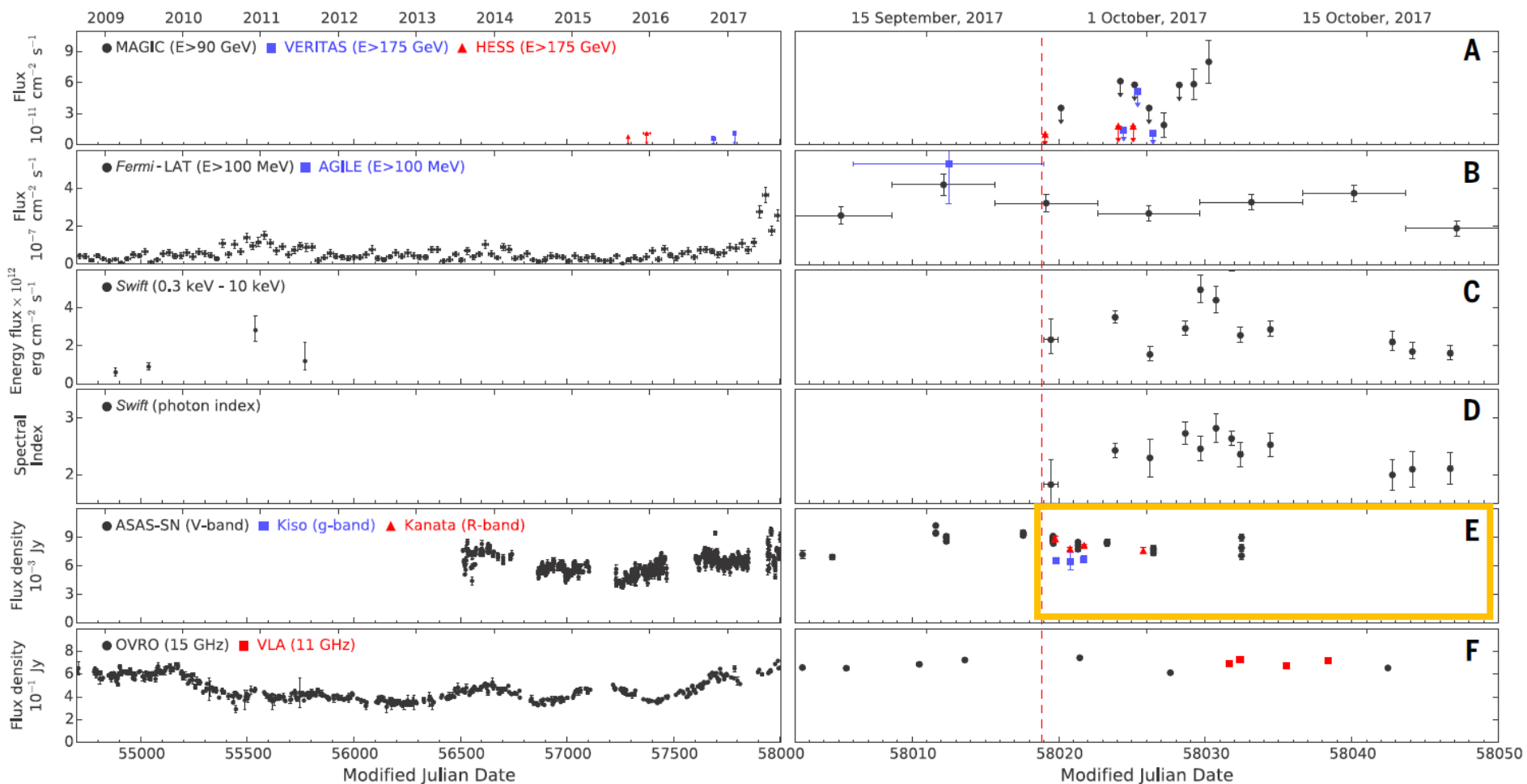
Observed in R band using Kanata/HONIR

9月23, 24日に0.2magの減光を捉えた。同時に高い偏光 (~7%) を観測した。
(Yamanaka et al. 2017, ATel, #10844)

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)

高エネルギーニュートリノイベント IceCube-170922Aにおける放射源の同定

アメリカ・サイエンス誌に論文出版 (11/23時点で 503 編に引用)

2018年9月19日読売新聞15面



ニュートリノ 放射源探せ

View

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**†

NEUTRINOS FROM A BLAZAR
Multimessenger observations of an astrophysical neutrino
source pp. 115, 146, & 147

■ 日本さらなる功績狙う

ニュートリノは電気を帯びず、物質とほとんど反応しない。観測が分析が極めて難しい分野で、日本は世界をリードする。小柴俊俊・東京大特別栄誉教授らが10月7日、素粒子国際会議「カミオカンデ」(岐阜県)で素粒子物理学の成功、押田謙一・同大宇宙線研究所長(80)は、88年に「スーパーカミオカンデ」(三重)でニュートリノに質量があることを確証し、

2人ともノーベル物理学賞を受賞した。アイスキューブが検出したニュートリノのエネルギーは、小柴氏が観測したニュートリノの1000倍以上だ。吉田教授は「アイス

40億光年先の天体から

2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。

「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。」

「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。」

「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。」

「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。」

「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。」

「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。」

「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田俊・千葉大教授(82)が早稲科の向井コトシを連れて、南極の観測施設「アイスキューブ」から自動観望された、高エネルギーのニュートリノを観測したことを示す観測データだ。」

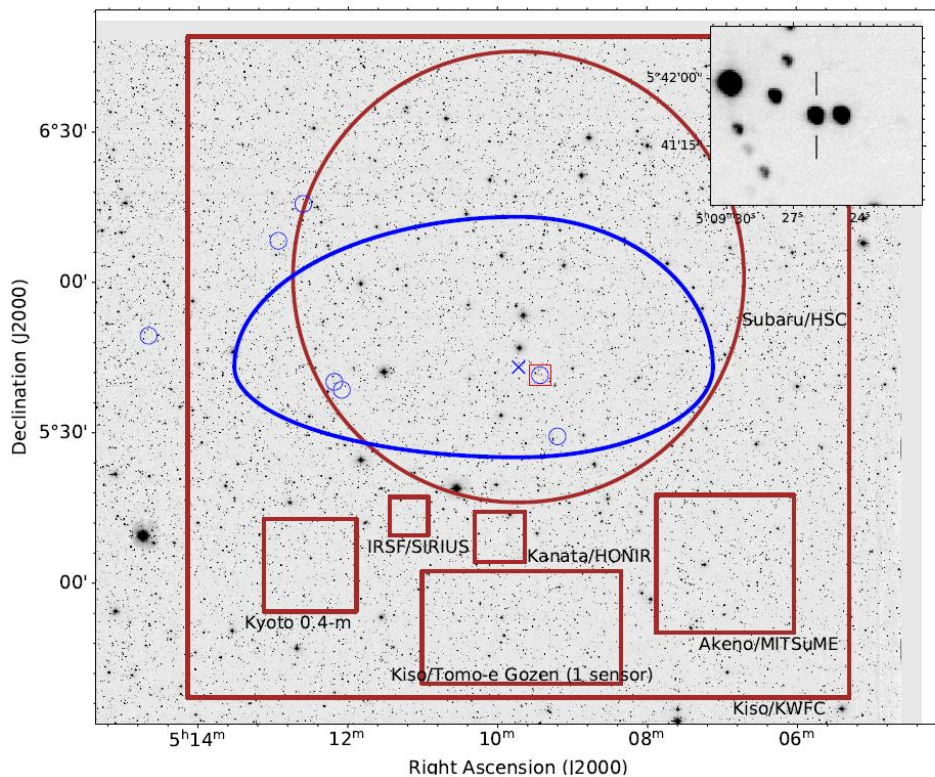
「目的のあやふやなデータは、放出源がわかるものではない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宇宙から地球に届いている。太陽の大きな磁気圏を避える確率が高い観測地点だ。大抵は北極に放出される。」

- OISTERの望遠鏡が有する高いポテンシャルを立証
- 重力波と合わせてマルチメッセンジャー天文学への重大な貢献

ブレーザー天体 陽子や電子などで作られる円錐状のガスの中心にブラックホールがあり、地球のある方向に「ジェット」と呼ばれるプラズマを噴き出している天体。ジェット内部で発生した宇宙線が光とぶつかってニュートリノが作られる。円盤状のガスがブラックホールに吸い込まれる際、エネルギーの一部をジェットとして放出していると考えられるが、詳しいメカニズムは分かっていない。

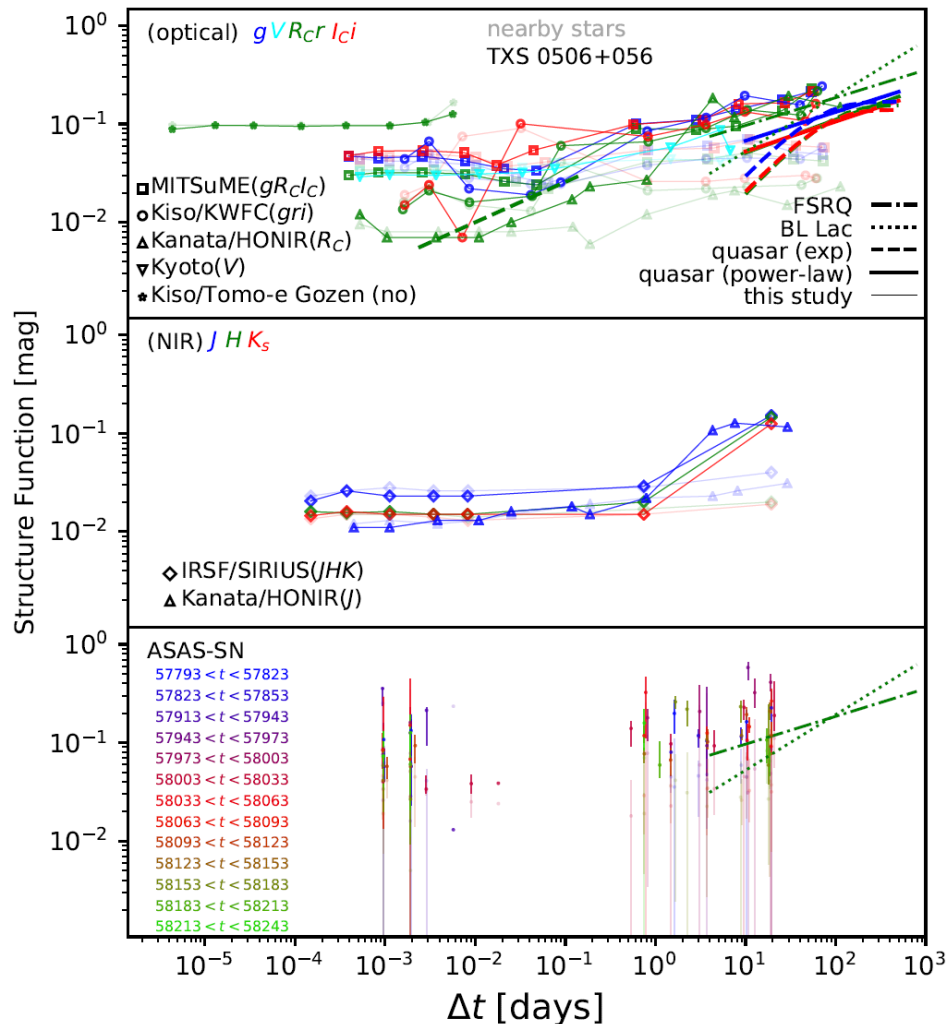
アイスキューブ 南極点近くにあるニュートリノ観測施設。厚さ約2800mの氷の層に掘った86本の管に、計5160個の光センサーを埋め込んでいる。宇宙から飛来したニュートリノと、凍った水の分子とがぶつかることで発生する微細な光を、光センサーが検出する。建設費は約260億円。2011年5月から本格的な観測が始まった。現在は日本を含め、米国やドイツ、韓国、オーストラリアなど12か国が参加している。

さらなるOISTERによる TXS 0506+056のフォローアップ



- Kanata/HONIR+HOWPol,
Kiso/KWFC, Kiso/Tomo-e Gozen,
IRSF/SIRIUS, MITSuME, Kyoto40cm,
Nayuta/MALLS, Subaru/HSC+FOCAS
による観測

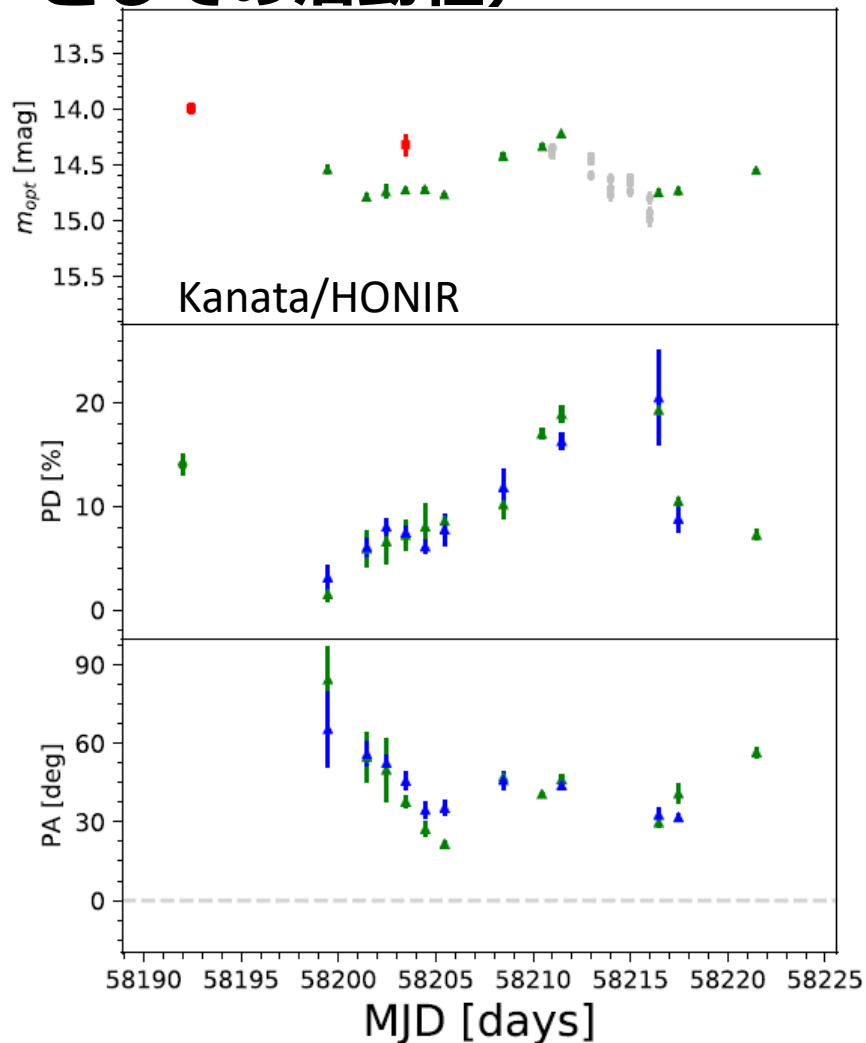
- 数日スケールで ~ 1.0 magの変動



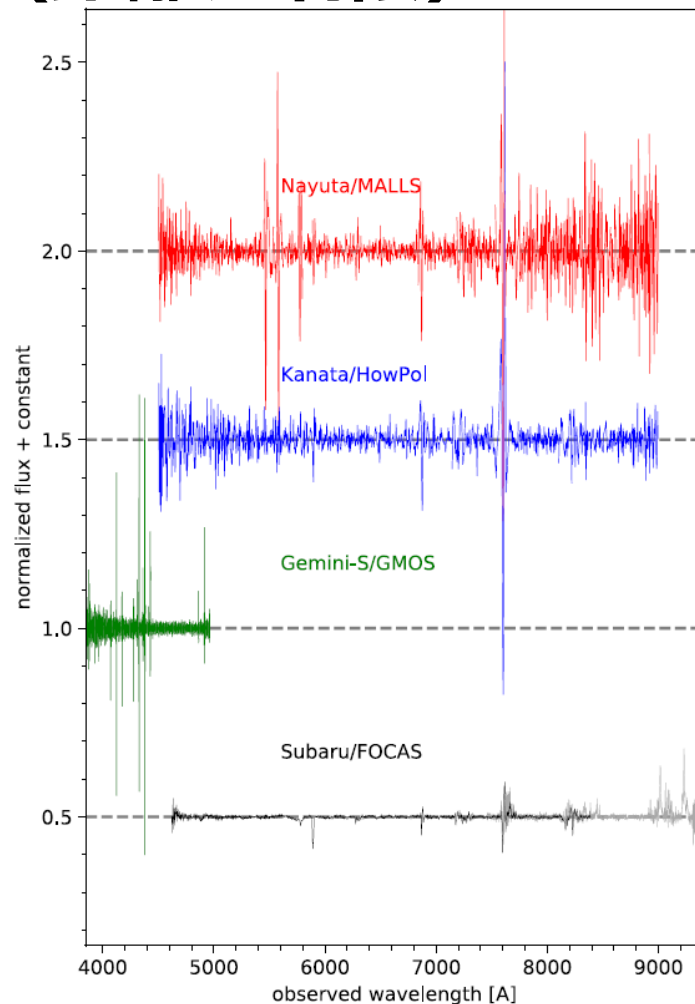
See Morokuma et al. 2021, PASJ, 73, 25 !

さらなるOISTERによる TXS 0506+056のフォローアップ

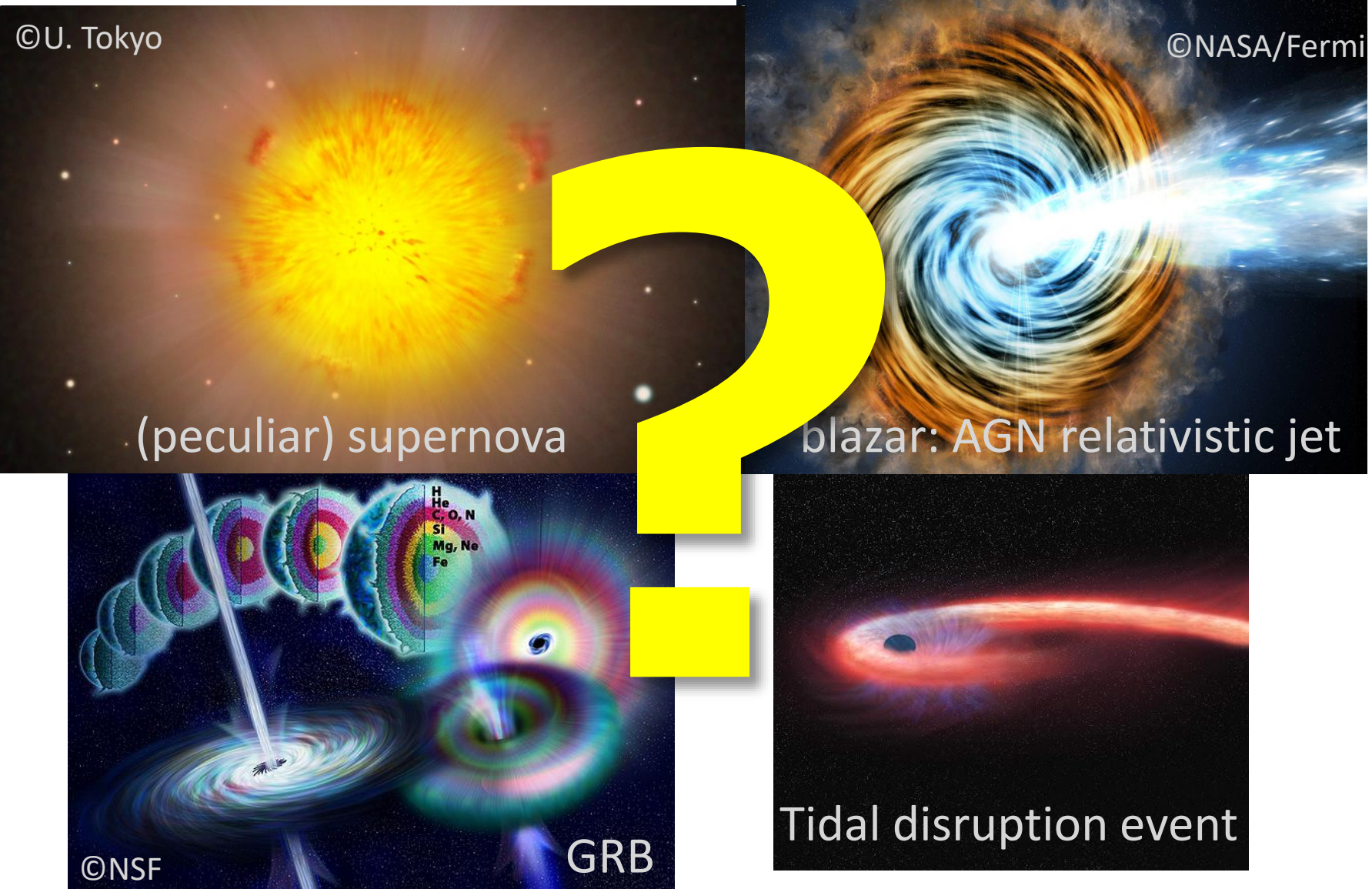
偏光観測 (blazar
としての活動性)



分光観測
(距離に制限)

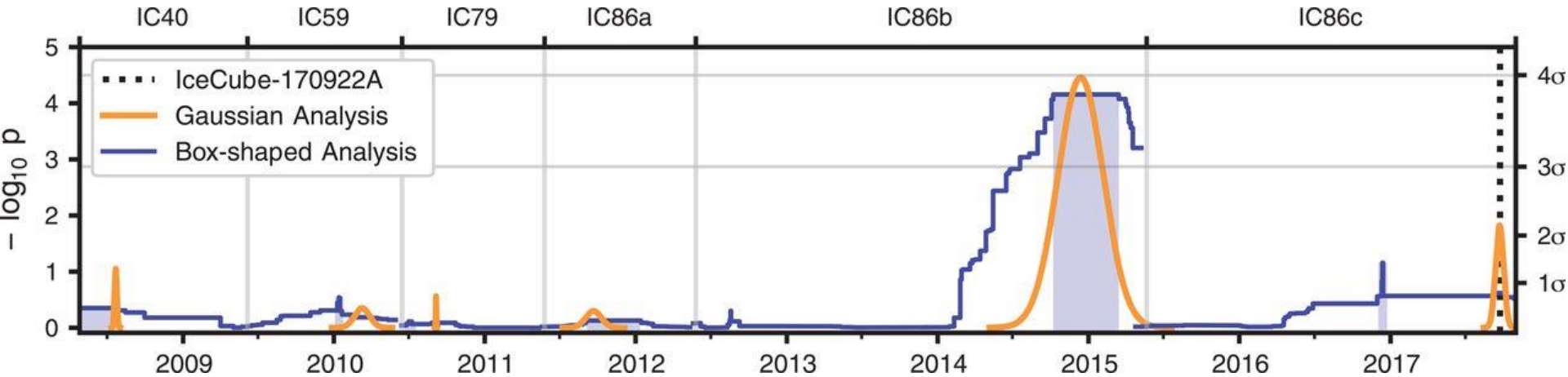


果たしてブレイザーのみか？



電磁波増光に同期しないケースも？ (see 石原さん's talk)

TXS 0506+056 2017年バーストの2年前にバーストIceCubeで検出。
IceCube collaboration et al. 2018, Sci と同じ号に掲載されたもう1編の論文



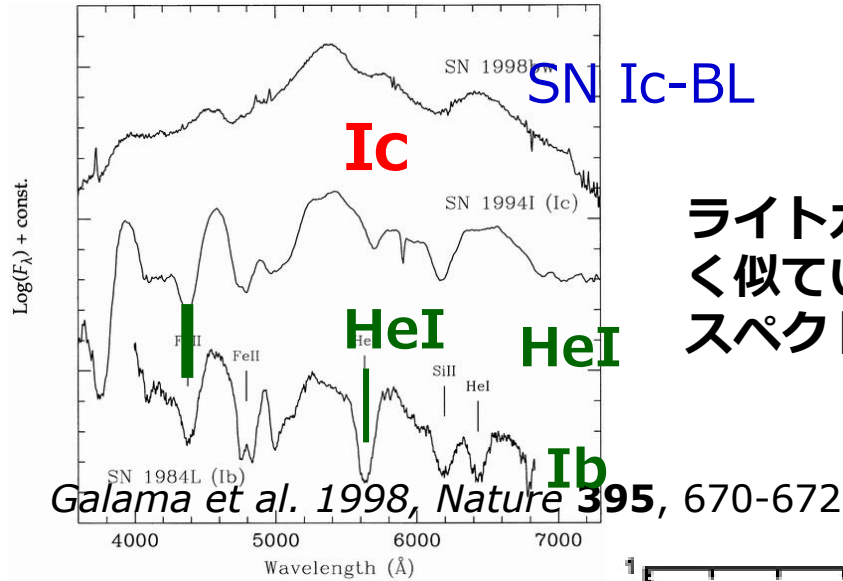
IceCube collaboration et al. 2018b
"Neutrino emission from the direction of the blazar TXS
0506+056 prior to the IceCube-170922A alert"

Fermi/LATによる観測：ガンマ線では暗かった

さらなる科学的動機： 超新星（Ic-BL）シナリオ



Ic-BL: WR星の爆発？
直接検出の例は無い
Long-GRBに付随して発見される例もある



ライトカーブは非常によく似ているが
スペクトルが全く異なる

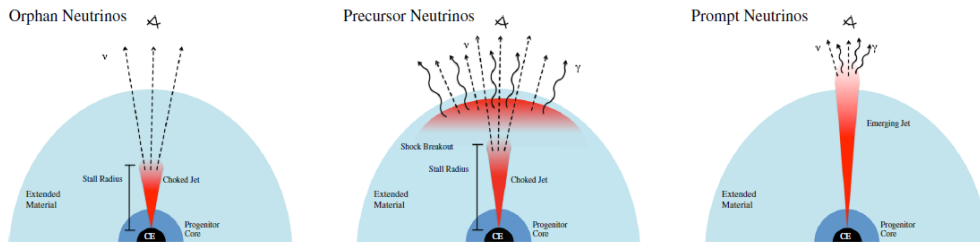
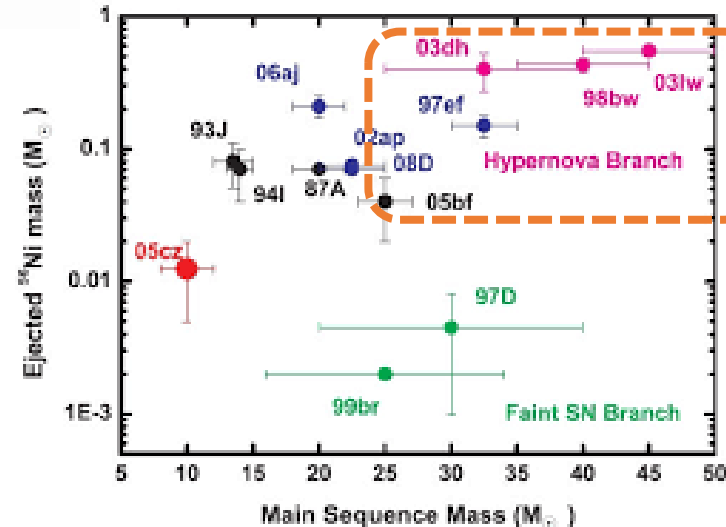


FIG. 1. Left panel: The choked jet model for jet-driven SNe. Orphan neutrinos are expected since electromagnetic emission from the jet is hidden, and such objects may be observed as hypervolae. Middle panel: The shock breakout model for LL GRBs, where transrelativistic shocks are driven by choked jets. 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.



Kawabata et al. 2010, Nature

ICECUBE GOLD & BRONZE Event

- IceCubeが2019年6月からsignalnessで報告する eventをGOLD/BROZEに分類
- “筋が良い”イベントがGOLD
- 113 eventsがGCN/AMONに報告。66 events が BRONZE、47 events が GOLD。

最近の観測戦略

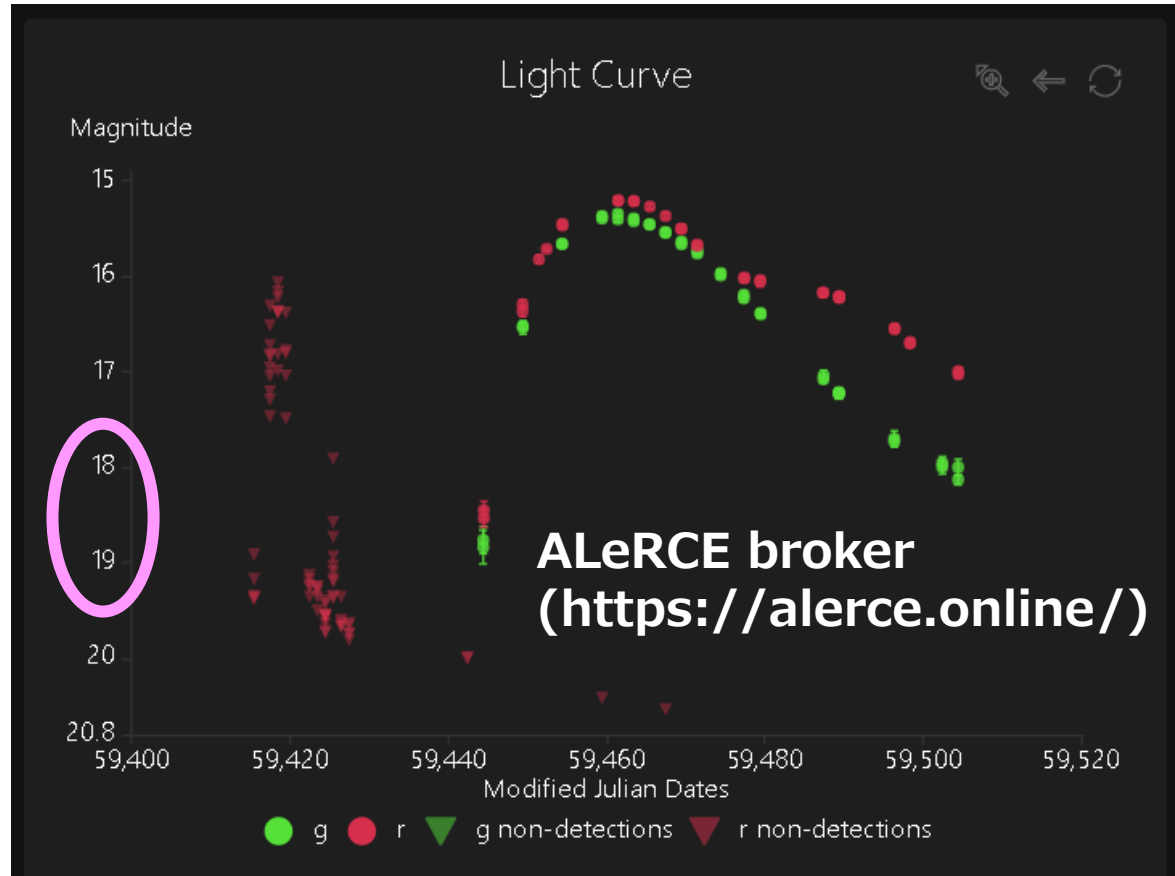
- IceCubeアラートの誤差円の大きさ
- 新たに加わるガンマ線衛星Fermi/LATなどの情報と合わせてターゲットを適宜判断。
- ターゲットの撮像追観測はまず、かなたHONIR・木曾シュミットTomo-e Gozenで即応的に実施。
- BROSに光学対応天体がある場合、CRTSやZTFなどの過去情報と比較して変動が無いか確認（Tomo-e Gozenは自前でライトカーブを出せる）
- かなた撮像データは即時解析、SDSS, 2MASSと差分
- BROSカタログのうちopticalで見えているもので、SDSSスペクトルが無いものもある。AGNであれば面白い。せいめい/KOOLS-IFUで分光を実施。

広視野探査の発展

Zwicky Transient Facility (ZTF)



パロマー48インチ
シュミット望遠鏡



Tomo-e Gozenによるhigh cadence survey

増光初期の段階で新天体が発見される

OISTERで観測しているアラート

ID	GCN/AMON NOTICE	Class?	RA	DEC	Error90(')	天体数	TOO
181023A	53411354_13 1653	--	270.18	-8.57	17.50 (50%)		OISTER
190503A	42419327_13 2508	--	120.3040	+6.3568	14.99 (50%)		OISTER
190730a	132910_5714 5925	GOLD	226.8302	+10.5078	45.31		OISTER
200911A	134482_2775 4576	BRONZE	51.1099	38.1099	296.4	1	Seimei
200929A	134552_686157 10	GOLD	29.5199	3.47	31.8	12	Seimei
201007A	134577_316382 33	GOLD	265.17	5.3399	24	5	OISTER

天体数 = IceCubeニュートリノアラート内のBROS天体数ないしFermiなどの追観測でガンマ線解析による範囲がかかった天体数

GOLD event IceCube 201007Aと OISTER TOOトリガーの経緯

- この1年で最もsignalnessが大きなevent
- 吉田滋氏いわく、「筋の良いイベント」
- BROSカタログで5天体。いわゆる「楕円シーケンス」が多そう。
- アラートを受けた直後、10/8以降は本州はしばらく悪天候予報
- 北海道と石垣島が辛うじて天候が良いという予報。
- 「随時募集」の枠で観測企画運営委員会にプロポーザルを提出し、TOO観測（2005-T-03）：OISTER ToO follow-up for IceCube neutrino eventとして認められる。
- Prika/MSI、Murikabushi、に観測を依頼
- + Malte Schramm が個人的にアクセスできる望遠鏡
- その後、天候が良くなり、Kanata/HONIRでもR+Jバンドで撮像
- OISTER serverでデータを回収した
- ※ ただし、Fermi/LATなど他の電磁波観測による有意な報告なし

OISTER を通じてIceCube 201007Aで 実施した観測

Date	Telescope	Instruments	Target	Mode (filter)	Contact person
2020-10-08	Skynet		J1740+0628	Imaging (r)	Schramm
2020-10-09	Skynet		J1742+0525	Imaging (r)	Schramm
2020-10-09	Skynet		J1741+0436	Imaging (r)	Schramm
2020-10-09	Skynet		J1741+0625	Imaging (r)	Schramm
2020-10-10	Skynet		J1742+0525	Imaging (r)	Schramm
2020-10-10	Murikabushi	MITSuME CCD	J1742.7+0525	Imaging (g+R+I)	Horiuchi
2020-10-10	Murikabushi	MITSuME CCD	J1741.5+0625	Imaging (g+R+I)	Horiuchi
2020-10-10	Murikabushi	MITSuME CCD	J1740.8+0430	Imaging (g+R+I)	Horiuchi
2010-10-10	Kanata	HONIR	J1742.7+0525	Imaging (R+J)	Nakaoka
2010-10-10	Kanata	HONIR	J1740.8+0430	Imaging (R+J)	Nakaoka
2010-10-10	Kanata	HONIR	J1741.5+0625	Imaging (R+J)	Nakaoka
2010-10-10	Kanata	HONIR	J1741+0436	Imaging (R+J)	Nakaoka
2010-10-10	Kanata	HONIR	J1740+0628	Imaging (R+J)	Nakaoka
2020-10-26	Seimei	KOOLS-IFU	J1742.7+0525	Spectroscopy(VPH-blue)	Kawabata

Quick look には大きな増光を示す天体は無かった
これ以降は 緩いcadenceで観測を継続 (visibilityが悪くすぐ観測期間終了)

IceCube-210811A

The alert is circulated on 2021-08-11 UT.

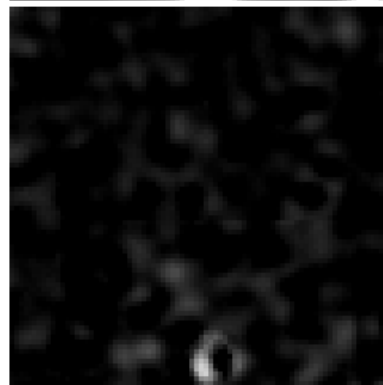
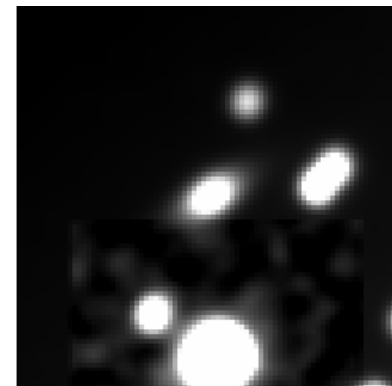
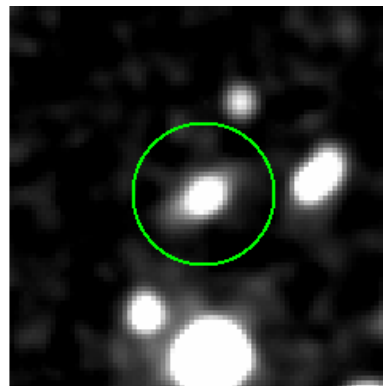
There is no possible counterpart of this neutrino event in the BROSS catalog within the error.

A SN candidate (AT 2021ung) was discovered at ~ 20 mag on Aug 1 by ZTF within 1 deg.

We triggered the ToO in the OISTER framework on Aug 12.

Takagi-san observed this SN using the Pirka telescope on Aug 11.

Malte-san also observed this one using the network telescope on Aug 12, 13, 17, 18.



Malte quickly analyzed data obtained on Aug 17. The object was not significantly detected. -> We cannot identify the SN type though the spectroscopic observations. We stopped ToO observations.

Follow-up Observations of Multiplet neutrino event

- ある時間内に複数回ニュートリノを受ける (multiplet) アラート (see 石原さん)
- より近傍で明るい超新星/blazar による放射が期待される? (see 木村さん)
- こと超新星においては、SN Ic-BL や interaction の兆候を示した SN II

Summary

- IceCube 170922A のマルチメッセンジャー観測に
参画
- かなた望遠鏡がTXS 0506+056の高い活動性を捉
えた
- 2019年からIceCubeアラートがGOLD/BRONZEに
分類
- 筋の良い幾つかのイベント (201007A; 210811A
など) 誤差円内BROS天体や超新星候補 について
OISTER TOOをトリガー。受かったといえる天体な
し
- 今後もIceCubeアラートに合わせたBROS天体/近傍
超新星のフォローアップは継続する