

IceCube ニュートリノ 対応天体探索及びフオー ローアップ観測の現状と 今後

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)、
笹田真人、中岡竜也 (広島大学)、
太田耕司 (京都大学)、
伊藤亮介 (美星天文台)、川端弘治 (広島大学)
On the behalf of OISTER

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 (11/10時点で376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、素子観測施設「カミオカンデ」(岐阜県)で素子観測に成功し、ニュートリノの検出に成功。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」(ニュートリノに敏感な)を構築して、

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、吉田謙一・千葉大教授(82)が早稲科のニュートリノを入れている、構造体活発な超新星の、南極の観測施設アイスキューブから自動検出された、高エネルギーのニュートリノを検出したことを示すメールが来た。

「目的のあやふやなデータは、放出されるかどうかわからない。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。ニュートリノは宙から地球に届いている。太陽の大きなエネルギーを迎え、検出する超新星爆発は、大抵は遠くで起こる。なので大抵は放出される。

「2017年9月23日早朝、吉田謙一・千葉大教授(82)が早稲科のニュートリノを入れている、構造体活発な超新星の、南極の観測施設アイスキューブから自動検出された、高エネルギーのニュートリノを検出したことを示すメールが来た。」

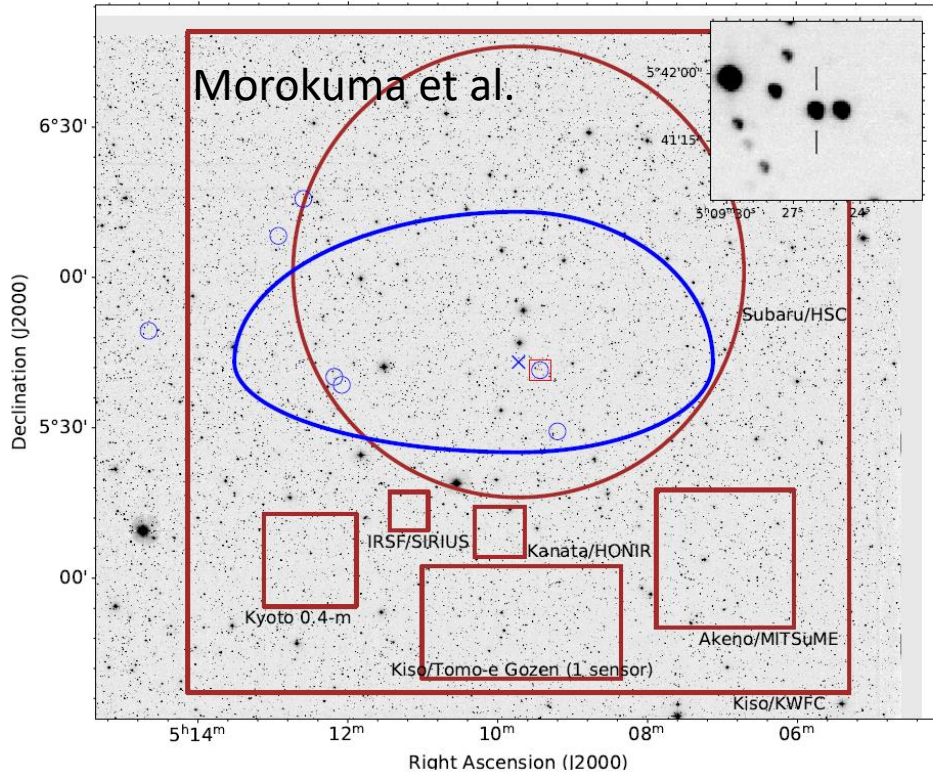
「目的のあやふやなデータは、放出されるかどうかわからない。すぐパロノ」に向かい、世界の天文学者に追加観測を呼びかけた。ニュートリノは宙から地球に届いている。太陽の大きなエネルギーを迎え、検出する超新星爆発は、大抵は遠くで起こる。なので大抵は放出される。」

ただ、ほかに高いエネルギーを持つニュートリノの放出源を探る。ニュートリノから来たか分らない超新星爆発の方向は、超新星爆発の方向と一致するはずだ。田中らは「半信半疑」で観測を始めた。田中らは「半信半疑」で観測を始めた。田中らは「半信半疑」で観測を始めた。

- 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

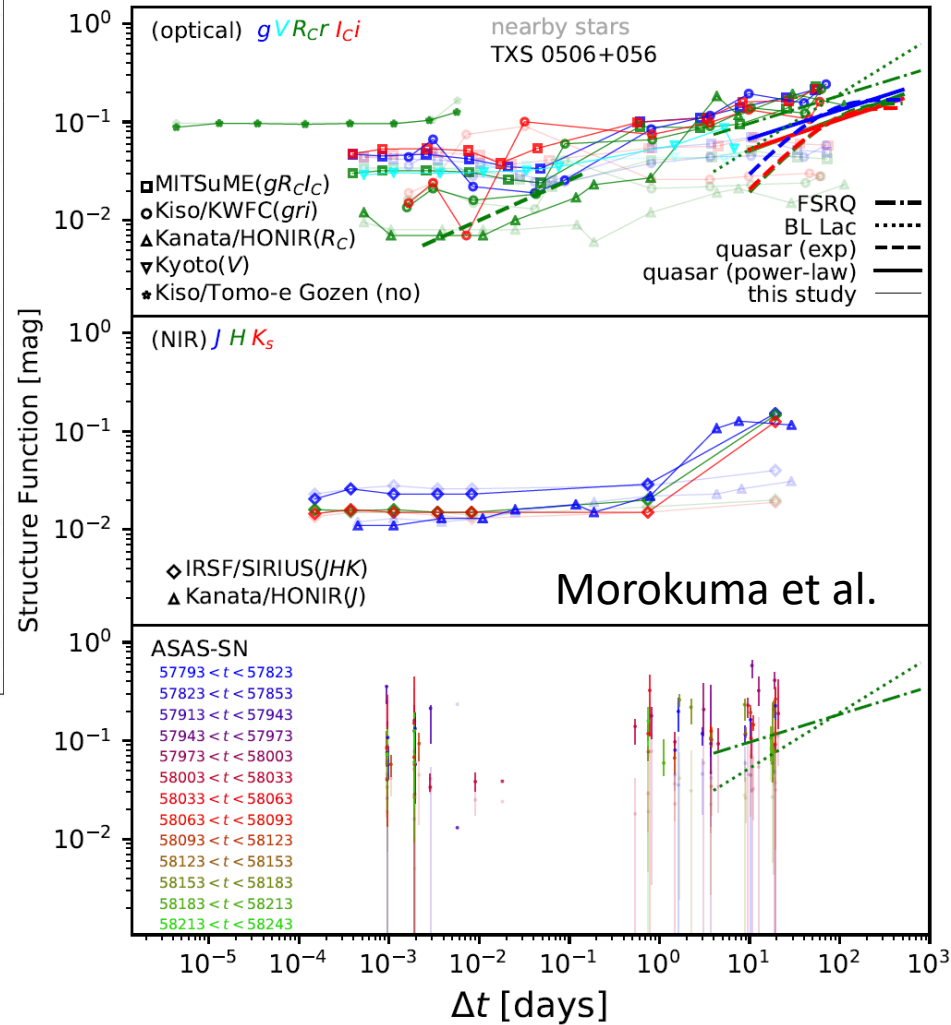
アイスキューブ 南極点近くにあるニュートリノ観測施設。厚さ約2800mの氷の層に掘った86本の管に、計5160個の光センサーを埋め込んでいる。宇宙から飛来したニュートリノと、凍った水の分子とがくまなく反応して発生する微細な光を、光センサーが検出する。建設費は約260億円だ。2011年5月から本格的な観測が始まった。現在は日本を含め、米国やドイツ、韓国、オーストラリアなど12か国が参加している。

OISTERにおけるTXS 0506+056 のフォローアップ



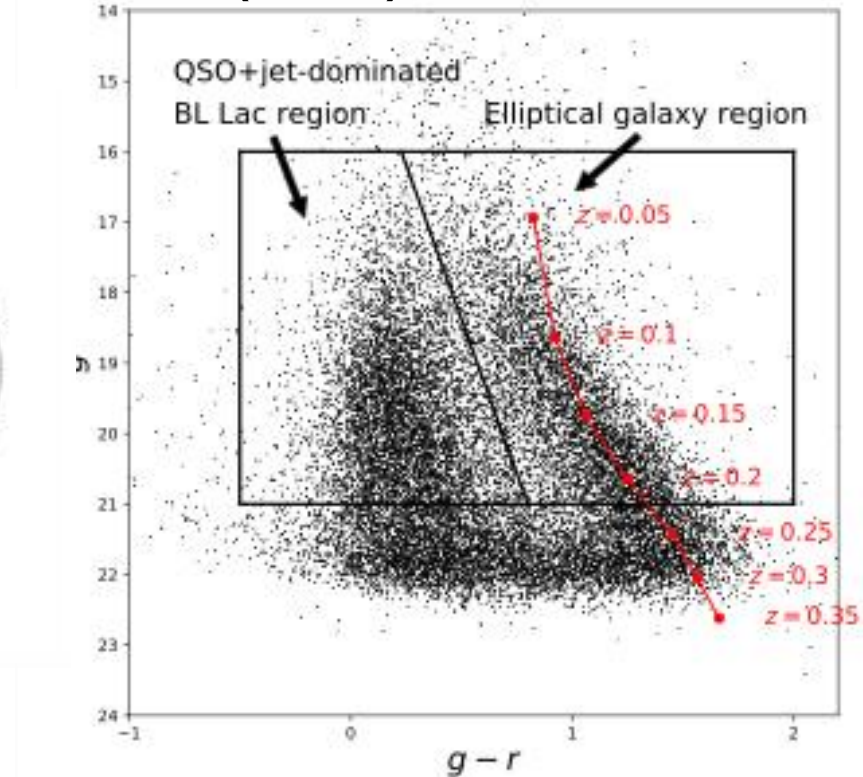
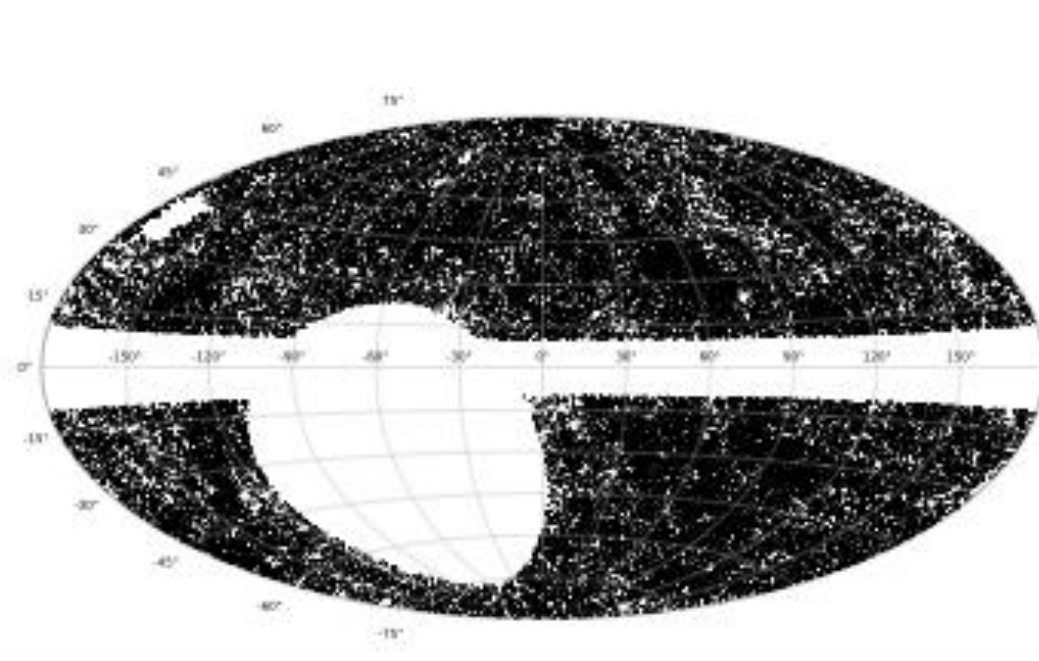
- Kanata/HONIR+HOWPol,
Kiso/KWFC, Kiso/Tomo-e Gozen,
IRSF/SIRIUS, MITSuME, Kyoto40cm,
Nayuta/MALLS, Subaru/HSC+FOCAS
による観測

- 数日スケールで $\sim 1.0\text{mag}$ の変動
- Morokuma et al. 2021, PASJ



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](#); 今年出版)
- ~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 GOLD & BRONZE Event

- IceCubeが2019年6月からsignalnessで報告するeventをGOLD/BRONZEに分類
- 2019年12月以降、24 eventsがGCNに報告
- GOLDが6 events、BRONZEが18 events。
- GOLDは誤差範囲が小さい傾向にある（BRONZEでも小さいものもある）
- いくつかのeventsは太陽方向に近くfeasibilityが悪い。

これまでの観測戦略（ブレイザー）

- 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。**

我々が実施したフォローアップ

ID	NT	RA	DEC	Error90 (')	天体数	観測開始	OISTER TOO	せいめい TOO
IceCube-200120A	BRONZE	67.4599	-14.63	20.4	1	2020/01/24	--	--
IceCube-200911A	BRONZE	51.1099	38.1099	296.4	1	2020/09/15	--	YES
IceCube-200929A	GOLD	29.5199	3.47	31.8	12	2020/10/01	--	---
IceCube-201007A	GOLD	265.17	5.3399	24	5	2020/10/08	YES	YES

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でデータを回収中
- (ただし、Fermi/LATなど他の電磁波観測による有意な報告なし)

IceCube 201007A における BROS targets

BROS ID	RA	DEC
BROS_J1742.7+0525	265.686604	5.425644
BROS_J1741.0+0436	265.26825	4.608952
BROS_J1740.8+0430	265.204536	4.51538
BROS_J1741.5+0625	265.388849	6.42457
BROS_J1740.3+0628	265.090275	6.475927

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

Quick look 的には大きな増光を示す天体は無かったと思われる
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)

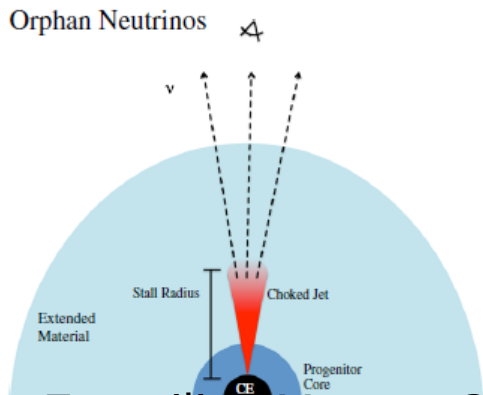
せいめい+KOOLS-IFUによる分光

Obs-date	Event	Target	Grism	Observer
2020-10-26	IC201007A	BROS_J1742.7+0525	VPH-blue	Kawabata
2020-10-26	IC200911A	WISEA J033002.97+374342.4	VPH-blue	Kawabata
2020-10-27	IC200911A	WISEA J033002.97+374342.4	VPH-blue	Yamanaka

- これらは顕著な増光は確かめられておらず暗い天体が多い
- 解析は困難と判断してpending

今後：ブレーザーに加えて超新星シナリオの検証

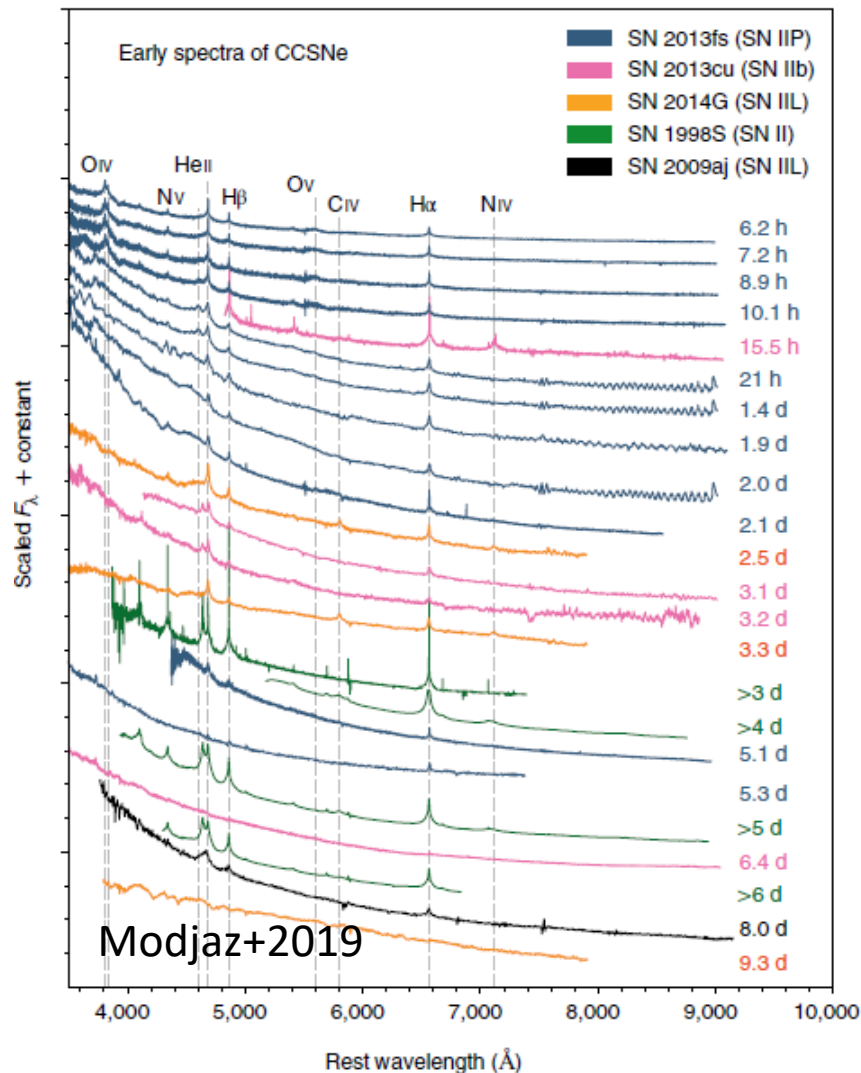
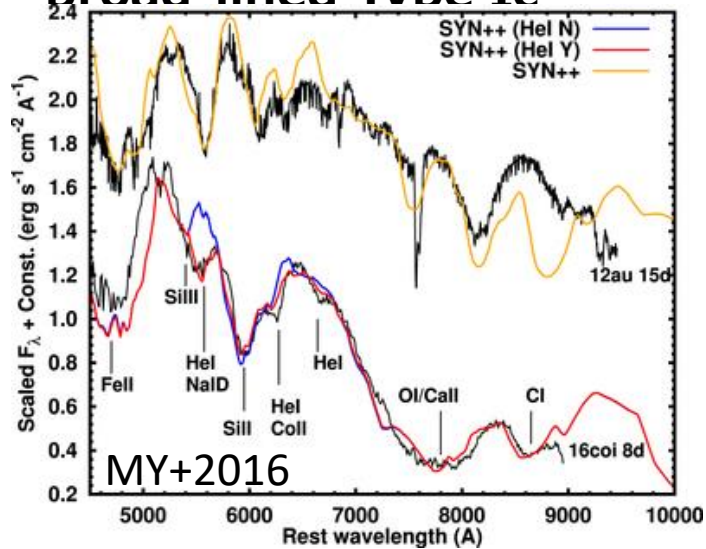
Choked jet scenario



Esmaili & Murase 2018

Interacting supernovae (Type IIIn/Ibn と一部のType Ib/c, IIP)

Observed as a broad-lined Type Ic



Summary

- 昨年からIceCubeアラートがGOLD/BRONZEに分類
- 誤差円内の小さな4イベントについて、かなた・木曾シュミットでBROS天体のフォローアップを実施
- 筋の良い1イベント (IceCube-201007A; GOLD event) 誤差円内BROS5天体についてOISTER TOOをトリガー
- Skynet, Murikabushi, Kanataで最初の3日間に密に観測
- QLでは明瞭な増光天体はおらず
- 最近のIceCubeイベントの誤差範囲円内のいくつかの天体についてせいめい望遠鏡で分光を実施：QLでは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天体のフォローアップは継続する