

史上初、宇宙ニュートリノと γ 線による ニュートリノ放射源天体の同定に成功

研究成果のポイント

- 宇宙ニュートリノの到来方向に、強い γ (ガンマ)線放射天体TXS 0506+056を観測し、 γ 線天体が宇宙ニュートリノとその親粒子である宇宙線を放射していることを史上初めて明らかにしました。
- これまで謎であった宇宙ニュートリノ放射源天体同定を目指し、検出された宇宙ニュートリノの到来方向等の情報を元に、世界中の観測施設が追観測を行う「マルチメッセンジャー観測」の結果、今回の観測に初成功しました。
- さらに過去のIceCube観測データを再解析した結果、この同じ天体の方向からの多くのニュートリノ事象を確認し、この天体が高エネルギーニュートリノ放射天体であることを独立に検証しました。
- これらの成果は、論文「Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A」と「Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert」の2編にて、Science誌に掲載されます。

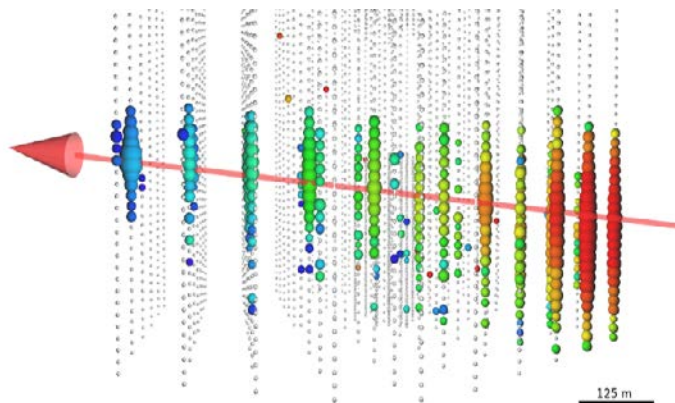
発表概要

南極点アムンゼン・スコット基地で行われているニュートリノ観測実験IceCube(アイスキューブ)*1により、昨年9月に宇宙ニュートリノ事象「IceCube-170922A」(図1)が検出され、その到来情報を元に追観測を行いました。その結果、巨大ブラックホールを持ち非常に強い γ 線を放つブレーザー天体*2 TXS 0506+056を確認し、高エネルギーニュートリノ放射天体を初めてつきとめました。

研究内容と成果

2012年の宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノの発見は、超高エネルギー宇宙線の起源という長年の謎を探る突破口となりました。しかし、今までニュートリノ放射源天体の特定には至っていませんでした。

そこで、本研究ではニュートリノ速報システムによる「マルチメッセンジャー観測」という新しい手法を開拓しました。これは、南極点のIceCube実験により検出された高エネルギー宇宙ニュートリノをユニークなアラート(速報)と見立て、その到来方向を世界中の天文施設にて追観測を行うことによって、放射起源を特定します。宇宙ニュートリノ事象をリアルタイムに同定するアルゴリズムは、**千葉大学グループを中心に開発が行われ**、このシステムは2016年の4月に運用を開始しました。



(図1)2017年9月23日(日本時間)に検出されたニュートリノ事象IceCube170922A。

水平にIceCube検出容積内を突き抜けるトラック型で、到来方向が分かりやすいなど好条件で検出された。

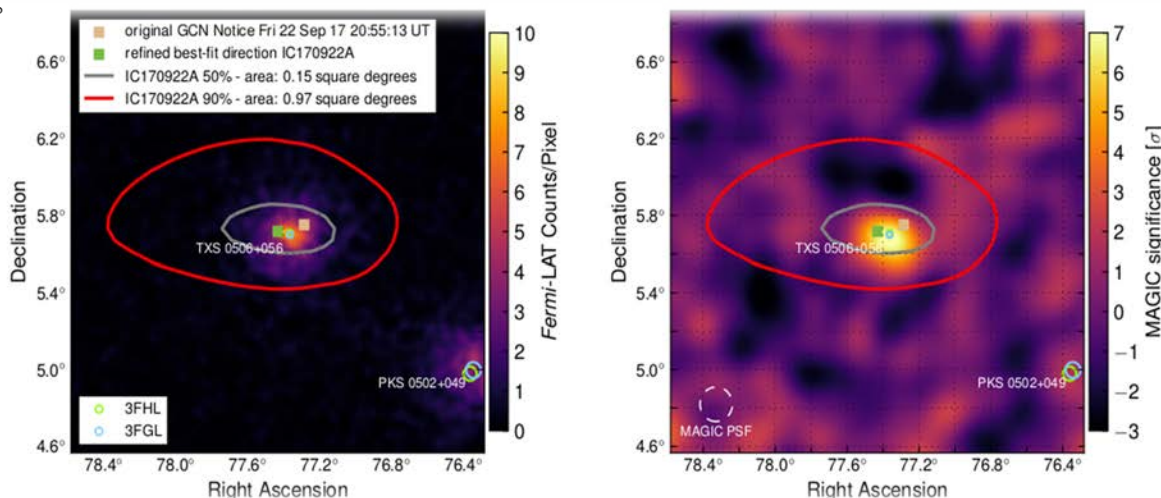
*1 IceCube(アイスキューブ) 世界最大のニュートリノ観測実験で、世界12カ国49の研究機関による国際共同プロジェクト。千葉大学グループは、日本からは唯一の正式メンバー。

*2 ブレーザー天体 中心にある超巨大ブラックホールをエネルギー源として強烈に輝く銀河「活動銀河核」の一種。中心核から光速で飛び出すジェットを持ち、そのジェットをほぼ正面から観測した天体。 γ 線放射天体の中でブレーザー天体が最も多くの数を占めることが確認されているが、宇宙線となる高エネルギー粒子のジェット内での加速機構などは正確に分かっておらず、その謎は多い。

日本時間の2017年9月23日の朝5時54分に、宇宙ニュートリノリアルタイム解析システムにより、高エネルギー宇宙ニュートリノ事象が検出されました。このニュートリノ事象は、IceCube170922Aと名付けられ、その到来方向が精度よく推定されるなど好条件で検出されました。ニュートリノ速報システムによりこの事象の情報は全世界に即時配信され、様々な天体観測施設が追観測を行いました。

本速報を受け、広島大学のかなた望遠鏡がニュートリノ事象検出の20時間後に観測を開始し、ニュートリノの到来方向にあるブレーザー天体TXS 0506+056が可視光域で増光していることを発見しました。その情報を元に同大学のFermi- γ 線衛星の観測チームがFermi-LAT³の観測データの解析を行い、通常をはるかに上回る輝度で γ 線を放射している事が分かりました(図2)。その中核に巨大なブラックホールを備えたブレーザー天体(BL-Lac型)であるTXS 0506+056は既知の天体で、Fermi-LAT Source Catalogにて公開されています。この天体は同年4月からその活動を活発化し、通常時の最大約6倍の輝度で γ 線を放射していました。IceCube-170922Aは、まさにこの γ 線放射の活発期に検出されたことがわかったのです。

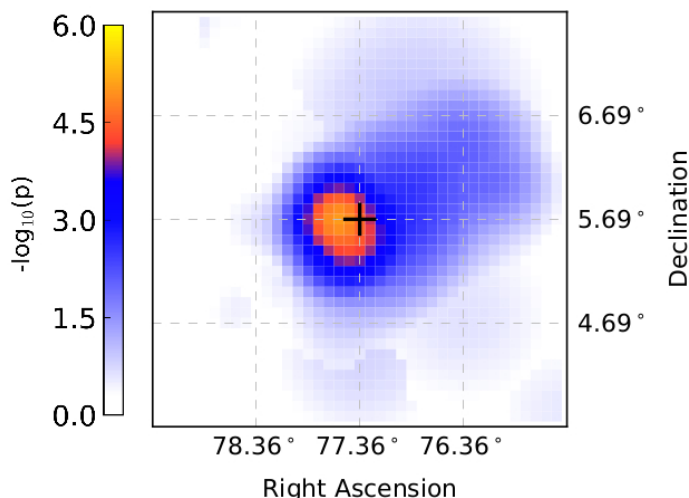
さらに、より高いエネルギーの γ 線に感度がある解像型大気チェレンコフ望遠鏡MAGIC⁴の観測により、この天体から100GeVを超える非常に高エネルギーの γ 線が検出されました。IceCubeが検出した高エネルギーニュートリノ事象と方角・時刻ともに同期した超高エネルギー γ 線放射が史上初めて同時観測されたのです。



(図2)Fermi-LATとMAGICによるIceCube-170922Aニュートリノ事象の方向の観測結果。

(A)はFermi-LATの観測によりIC170922Aの到来方向に確認されたブレーザー天体TXS0506-056。茶色の印は最初の速報が示したIC170922Aの位置で、緑色の印は、その後が発信された詳細解析を反映させた速報が示した位置。
(B)のMAGICの観測結果でも同様の結果が確認された。

今回、ニュートリノ観測と γ 線の増光が観測されたのは偶然ではないかという仮説に対し、統計的な有意性を検定した結果、 4σ (シグマ)という有意度⁵が示されました。偶然起こる確率は、0.003%程度です。さらに、過去のIceCube観測データを再調査し、この天体の方向の観測データを詳細解析したところ、2014年12月16日を中心としたおよそ160日の期間に、同天体の方向からの背景事象数を大きく超えるニュートリノ事象が確認されました(図3)。



(図3)ニュートリノ事象の有意性を表す空間分布。+の印は、ブレーザー天体TXS 0506+056の方向を表す。

本研究の意義と今後の展望

この研究成果は、未解明の大きな謎である超高エネルギー宇宙線放射機構を理解する重要な一歩です。今回のニュートリノ事象を生成した陽子のエネルギーはPeV以上にも達します。すなわちこの天体は超高エネルギー宇宙線放射天体(PeVatron) *6です。オリオン座の左肩に位置するTXS 0506+056から約40億年前に放射されたニュートリノは、超高エネルギー宇宙線加速という宇宙でもっとも激しい現象の現場を、初めて明らかにしたのです。

今回の観測結果により、ニュートリノ速報システム及びニュートリノを含むマルチメッセンジャー観測手法の有効性を示すことができました。我々はこの観測システムをさらに強化し、世界中の観測施設の連携を一層と深め、より確実に、そして最速に起源天体同定が可能となるよう構築を進めていきます。また、情報元となる宇宙ニュートリノの検出感度を高め、その事象検出数を上げることが要となります。**今年度より始動したIceCube実験のアップグレード計画により観測精度を高め、超高エネルギー放射機構の解明を目指します。**

- *3 Fermi-LAT 世界6か国による国際共同研究。γ線観測天文衛星Fermiの観測装置で、LATという大面積望遠鏡を搭載している。
- *4 解像型大気チェレンコフ望遠鏡MAGIC スペイン・カナリア諸島ラ・パルマ島の標高2,200m地点に設置されている2台の大気チェレンコフ望遠鏡を用いた観測システム。
- *5 有意度 「確率的に偶然とは考えにくく、意味があると考えられる」有意性のその度合いを表すもの。物理学では、測定値に統計誤差や系統誤差などが混じっているものという仮定を考慮に入れた上で、その真偽を検定する。今回報告された高エネルギー宇宙ニュートリノ事象の方向・時間とブレーザー天体TXS 0506+056の相関が偶然に起こる頻度は、10万回の観測で数回あるかどうかというレベルである。
- *6 高エネルギー宇宙線起源天体 (PeVatron) PeV (1000TeV) を超えるエネルギーを備える宇宙線陽子を発生する天体。1 PeV = 1000兆電子ボルト。可視光のエネルギーは約1電子ボルトである。

論文情報

- 掲載誌 : Science
論文タイトル : Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A
著者 : The IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, Kanata, Kiso teams et al.
DOI: 10.1126/science.aat1378
- 掲載誌 : Science
論文タイトル : Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert
著者 : IceCube Collaboration
DOI: 10.1126/science.aat2890

この研究は、日本学術振興会による特別推進研究・基盤研究 (S) などの科学研究費補助金の支援及び千葉大学グローバルプロミネント研究基幹の支援をいただいて推進しています。

またこの成果は、科学的に極めて重要な達成であるため、正式な公表と記者会見が米国自然科学財団 (NSF)本部にて米国東部時間7月12日(木)午前11時(日本時間:7月13日(金)午前0時)に行われます。

可視光観測についての補足

電磁波対応天体追跡チーム

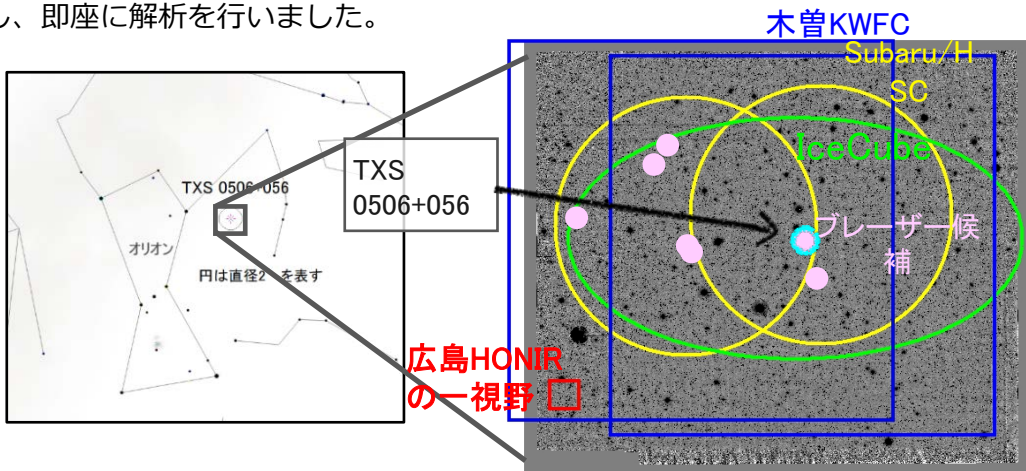
広島大学、 東京大学、 京都大学、 東京工業大学、 名古屋大学、 愛媛大学、
自然科学研究機構 国立天文台、 スタンフォード大学、 光・赤外線天文学大学間連携

研究概要

- 宇宙ニュートリノIceCube-170922Aの電磁波対応天体候補を世界で最初に同定しました。
- 国内外の望遠鏡群を駆使して可視光・近赤外域の追跡観測を行い、候補天体が活動的な状態にあったことを捉えました。

候補天体の同定：観測の手法

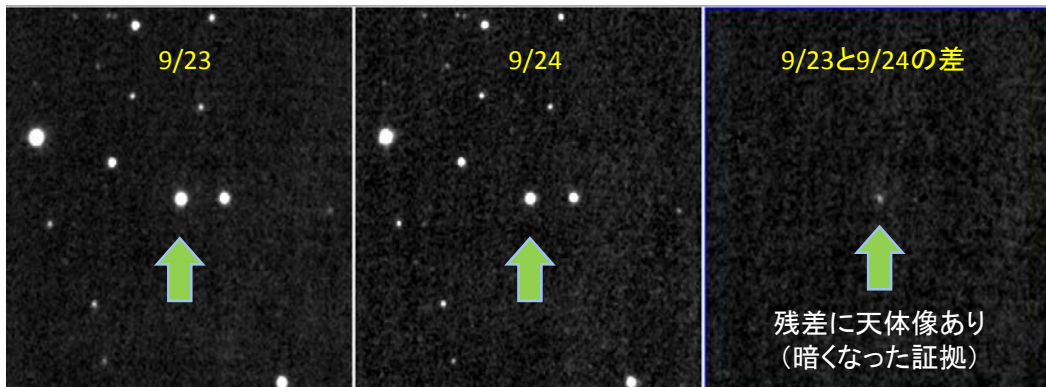
ニュートリノ観測アラート受信から20時間後に、広島大学の口径1.5mかなた望遠鏡で観測を開始し、続いて東京大学木曾観測所、国立天文台すばる望遠鏡で広視野追観測を実施しました。IceCubeニュートリノの位置誤差範囲は1-2°と広がったため、広視野型望遠鏡で見つかり得る変動天体は数千個にもなり、全ての天体を即座に調べることは大変困難です。しかし、ニュートリノ放射源候補の一つであったブレーザー天体に的を絞り予め作成していた独自のカタログを用いて、位置誤差範囲内の7個のブレーザー候補を重点観測（図1）し、即座に解析を行いました。



(図1) オリオン座方向の空(左図)に位置するIceCube-170922Aの到来方向近辺の領域を複数の望遠鏡で調査した(右図)

研究成果

詳細調査を行った7つのブレーザー候補のうち1つ、TXS0506+056が9月23-24日の間に減光していることを確認（図2）し、宇宙ニュートリノ放射時は過去の観測より3倍以上増光し、かつ毎晩明るさが変化しており、この天体が活動的であった証拠となりました。また、 γ 線でも増光したことを突き止め、世界に先駆けて報告を行いました。（Tanaka, Y.T. 他 Atel#10791）この発見は、世界中のほかの電磁波追跡観測を促す結果となりました。その後、すばる望遠鏡で分光観測を行い、ブレーザー天体の種類を確認しました。



(図2) 広島大学かなた望遠鏡HONIR 可視Rバンド

使用した望遠鏡

広島大
1.5mかなた



東大・木曾
1mシュミット



東工大・明野
0.5m MITSuME



京大・理
0.4m



名大・南ア
1.5m IRSF



すばる 8.2m
ジェミニ 8m
米国・ハワイ

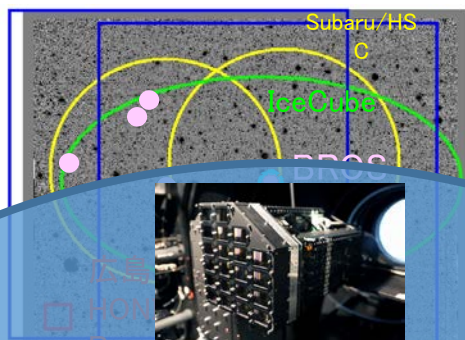


光・赤外線天文学大学間連携のHP: <http://oister.kwasan.kyoto-u.ac.jp/>

今後の展望

今後も引き続きブレーザー（活動銀河核）に特化した同じ手法を用い、より早期の検出を目指します。多バンド測光、スペクトル、偏光観測など、多角的に観測し、現象の発生機構の解明を進めます。

また、他のニュートリノ放射源天体の有力候補である超新星も同様に、広視野型の望遠鏡を駆使した搜索観測や様々な望遠鏡による多角的な追跡観測により誤差範囲内をくまなく探索していきます。



広視野カメラ Tomo-e Gozen 視野9°円
～coming soon～

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所



新口径3.8m望遠鏡「せいめい」
面分光装置、多色撮像装置
京都大学大学院理学研究科附属天文台岡山天文台 ～2018年開所～