



ICEHAP

NEWS International Center
for Hadron Astrophysics

Dec. 2016 no.

5 

南極の夏・帰途に着く越冬メンバー

11月～2月は南極の夏にあたり、アイスクューブ観測施設にも様々な国の研究者が集まりにぎやかになります。最高気温でもマイナス14度ほどの環境の中、研究者たちは希少な時間を使い、南極でしかできない実験を行います。そしてそれと入れ替わるように、それまで南極に滞在していた越冬メンバーらは、約8か月間にわたる南極での任務を終え、帰途に着きます。





ニュートリノ天文学部門

ニュートリノ観測からの 最高エネルギー宇宙線源に対する示唆

グローバルプロミネント研究基幹 准教授

石原安野

最高エネルギー宇宙線源の 宇宙論的進化とニュートリノ

宇宙に存在する粒子の中で、最も高いエネルギーを持つものを最高エネルギー宇宙線（UHECR）といいます。最高エネルギー宇宙線が持つエネルギーは 10^{18-20} eV（=1-100EeV）にもなり、LHC加速器^{*1}が作り出す陽子のエネルギーの1億倍ものエネルギーになります。

このような地球で検出される高エネルギーの宇宙線は主に陽子と原子核からなることが知られています。しかし、その起源はわかっていません。これらUHECRは、宇宙に広がる背景放射光や天体内外の光やガスと相互作用を起こし、超高エネルギーニュートリノを生み出します。そしてニュートリノは親UHECRの平均5%のエネルギー（つまり50PeV-5EeV）を持ち、遠方（=若い）宇宙から真っすぐに伝搬して来ます。

遠方宇宙の高エネルギー現象の光による直接観測というのは、宇宙の背景放射^{*2}の霧に遮られおり、非常に難しく、宇宙の死角となっています。また、荷電粒子である陽子や原子核からなるUHECRは、地球に到達するまでに、宇宙空間の磁場によって進路を曲げられてしまいます。

さらに、100EeVともなるとUHECRといえども背景放射に遮られ遠方宇宙からは届かなくなり、近傍宇宙で生成されたUHECRしか、地球にはたどりつけなくなります。このため、遠方高エネルギー宇宙には多くの謎が残っています。超高エネルギーニュートリノは背景放射に遮られることなく遠方宇宙から直接届く貴重なメッセンジャーなのです。

若い、遠方の天体と近傍宇宙の天体

ところで、宇宙にある様々な天体は、宇宙の初めから現在まで、同じように存在しているわけではありません。例えば原始星や原始銀河は宇宙が若い時期に多く生成され、宇宙が年を取るにつれ少なくなっていくと考えるのが自然でしょう。これまで、ガンマ線といった高いエネルギーを持つ光を放つ天体の多く、例えば活動銀河中心核（AGN）やガンマ線バースト（GRB）などは、若い

宇宙でより多く観測されてきました。

AGNは宇宙最大級のブラックホールを中心に持つ天体で、コンパクトな中心領域からの巨大なジェットや、広い波長にわたる強い光が、観測されています。GRBは宇宙最大の爆発現象で、太陽の質量エネルギーに相当するエネルギーをガンマ線としてわずか数秒から数十秒の間に放つ天体現象です。ニュートリノは遠方宇宙からも伝搬してくるので、過去により多く存在する天体の方が、より多くのニュートリノを作ることが出来ると考えられます。

観測される超高エネルギーニュートリノの流量は、遠方宇宙のUHECR起源天体の分布、つまり宇宙のどの時代に活動的な天体なのかを示唆します。ここから天体種類の同定が可能になるかもしれません。

ニュートリノと宇宙天体の宇宙論的分布

今回、IceCube実験によって取得された7年分のデータを解析し、超高エネルギーニュートリノ探査を行いました。次ページの表に2つの異なる天体進化から期待される、主に100PeV-1EeVのエネルギー領域のニュートリノ事象数を示します。星形成率を意味するSFR（Star Formation Rate）は、宇宙の各時代における若い星の分布を表し、FRII（ファナロフ・ライリィII型）は比較的遠方に存在することが知られる明るい電波銀河の各時代における分布を表します。

本解析では、これらのモデルと観測されたデータとを比較し、データを最も良く描写する進化モデルを選別することでニュートリノ流量の観測からUHECR起源天体に迫りました。

IceCube 7年間分のデータでの 超高エネルギーニュートリノ探査

今回解析を行った2008年4月から2015年5月までの、7年分のIceCubeデータから、図1、図2に示した2つのPeV領域のエネルギーを持つニュートリノ事象が観測されました。この2事象は約0.7PeVと2.6PeVのエネルギーを検出器内に放出していますが、UHECRの相互作用によって生み出される10PeVを超えるエネル

*1 LHC加速器=スイスとフランスの国境に建設された大型ハドロン衝突型加速器。

*2 (宇宙)背景放射=およそ137億年前に宇宙が大爆発（ビッグバン）を起こしたときに残った光の名残。

ギーのニュートリノとしては、放出エネルギーが低すぎます。これらがUHECR起源であるためには、より高いエネルギーの事象も一緒に観測されていなくてはモデルと矛盾します。

つまり、これらはUHECR起源ではなく10-100PeVのエネルギーを持ついわゆる宇宙線スペクトラムのknee領域³にあたる宇宙線起源天体から来たと考えられます。ここから、今回の解析によってニュートリノ観測によるUHECR起源天体に対する強い制限をつけることが出来ました。

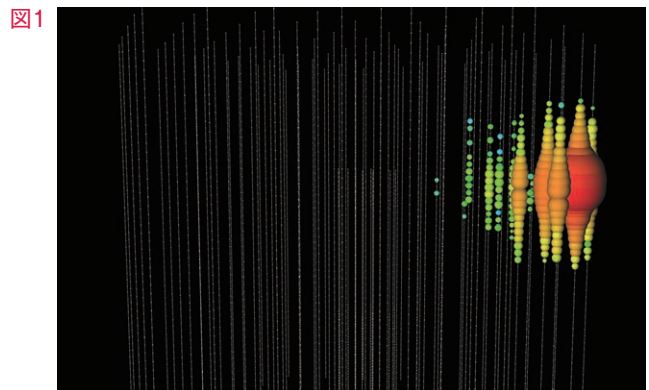


図1

本解析で検出した2事象のうちの一つで、2012年11月16日に検出器の端っこで起こった上向き粒子シャワー事象。これまでのIceCubeデータの解析によって観測された中で4番目にエネルギーの高い粒子シャワー事象で、上向きの粒子シャワー事象の中では最もエネルギーの高い事象。0.77PeVのエネルギーが粒子シャワーとして放出された。

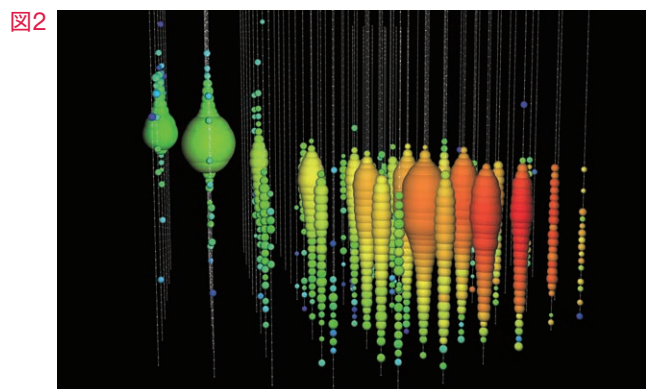


図2

本解析で検出した2事象のうちのもう1つの上向きトラック事象。これまで観測された中で最もエネルギーの高いニュートリノ事象。2.6PeVものエネルギーがIceCube検出器内に放出された。

最高エネルギー宇宙線天体は近所にあるのか？ それとも？

表に本解析から得られたモデルに対するp-value⁴を示します。FRII進化モデルは、 3σ (=有意水準 99.7%)より強いレベルで棄却されることがわかります。また、本解析で初めて、SFR進化モデルに対しても、制限が付き始めました。これまでUHECR源はUHECR到来方向の一様性や高エネルギー天体分布観測により、我々の近傍よりは、比較的遠方(若い)宇宙に多く存在し、GRBやAGNといった、多くの高エネルギー光を発する天体がそうであるように、少なくともSFRより強い宇宙論的進化をしていると考えられてきました。

しかし、本解析は、UHECRが陽子だとすると、その起源天体の宇宙論的進化は弱く、つまり、比較的年を取った我々の近傍宇宙にあることを示唆しています。しかし、我々の近傍にあるUHECR生成天体の候補は多くありません。また、UHECR起源天体は高いエネルギーの光も放っているだろうという一般的な予想とも異なる結果となったのです。ただしUHECRが重い原子核だとするとUHECR起源のニュートリノ生成率は低くなるので、本解析結果との矛盾はなくなります。これまで観測が非常に難しかったUHECR起源天体に、ニュートリノから迫る今回の結果はPhysical Review Letters誌の "PRL Editors' Suggestion" に選出され、同誌12月号に掲載されます。

宇宙で最高のエネルギーを持つ粒子を生み出すUHECR起源天体はわれわれの近傍に存在するのに、何らかの理由で隠れていてまだ見つからないのでしょうか。それともUHECRは鉄のような重い原子核なのでしょうか。現在開発中の次世代宇宙ニュートリノ検出器、IceCubeの5倍を超える検出感度を持つIceCube-Gen2実験や超高エネルギーニュートリノに特化した電波ニュートリノ検出器ARA⁵によるさらなる高統計解析での解明が待たれます。

表

UHECR 陽子と宇宙背景放射との相互作用によるニュートリノモデル	期待される超高エネルギーニュートリノ事象数 (2426日)	p-value (%)
Kotera モデル* SFR 進化	3.6	22.3
Kotera モデル* FRII 進化	14.7	<0.1
Aloisio モデル** SFR 進化	4.8	7.8
Aloisio モデル** FRII 進化	24.7	<0.1

*K.Kotera, et al., JCAP 10, 013 (2010), **R. Aloisio et al., JCAP 10, 006 (2015)

異なったUHECR進化モデルより期待される超高エネルギーニュートリノの事象数と観測から導かれたp-value。

UHECRが陽子だとするとSFR(星形成率)より、宇宙論的進化の弱い天体であることを示唆する。

*3 Knee領域=宇宙線スペクトラムの"ひざ"と呼ばれるUHECRに比べてエネルギーが約3桁低い領域。

*4 p-value=仮説の統計的有意性を測るもの。p値が小さければ小さいほど、仮説を棄却する統計的有意性が高いことを示す。

*5 ARAに関しては、次ページのREPORT NOW2もあわせてご覧ください。



ニュートリノ天文学部門

ARA実験のための新型スリム検出器の可能性を探る

特任研究員

Simon Archambault

訳：吉田 滋 (ICEHAPセンター長)

少なきをもって多くをとる

Askaryan Radio Array (ARA) 実験は、Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) 過程によって生成されることが予言されている 超高エネルギーニュートリノを検出することを目指しています。この過程は、超高エネルギー宇宙線が宇宙背景放射と衝突しニュートリノを生成します。したがってその検出は特に遠方にある超高エネルギー宇宙線起源天体を解き明かすことにつながると期待されています。

ARA実験場所は南極点にあり、氷に縦穴を掘って埋設されるアンテナ検出器のアレイで構成されます。この検出器はニュートリノが氷河と衝突して生成した荷電粒子から放射される電波を検出するようにデザインされています。



写真1 旧型と新型のARAアンテナ。右上の旧アンテナを改良し、約1/2の幅のスリムな形に。



写真2 高速空気流ドリルを用い氷上に穴を開けている様子。

写真1はARA実験で使うVPol型¹(縦偏光に感度がある)検出器です。元々のデザインから作られたこの検出器と同型のもが稼働しており、再来年も一部が埋設されます。埋設は氷河を切削するため、多大な時間とコストがかかります。より安価でスピーディーな切削のために高速空気流ドリル(Rapid Air Movement Drill)が開発されました(写真2)。しかし、このドリルが切削する縦穴の径はわずか10cmほどに過ぎません。そこで、幅6.5cmのスリムなアンテナ検出器を私たちのグループは開発しました。

この新型検出器の特性を現在千葉大学で測定し、オリジナルの検出器にくらべ性能の低下は許容できる範囲にあることを確かめました。これらの検出器は南極に移送され、今年冬(南極は夏!)に実験サイトで試験が実施されます。

*1 VPol型=Vertical Polarizationの略。縦偏光(縦に波打つ電波)の感度をあげ、縦型の電波をより多く検出する。

ICEHAP NEWS 次号予告

上のREPORT NOW2の中でお伝えしたARA検出器の実験サイトでの試験に参加するため、ニュートリノ天文学部門の間瀬助教が南極へ出発します。その様子を次号でたっぷりお知らせしたいと思います。

間瀬助教からのメッセージ



いって
きまーす

10²⁰eVを超える最高エネルギー宇宙線の起源は未だに分かっていない謎であり、この最高エネルギー宇宙線から10¹⁷eVを超える超高エネルギーのニュートリノが生成されることが期待されていますが、未だに観測されていません。この最高エネ

ギー宇宙線起源の超高エネルギーニュートリノの初観測を目指し、電波の干渉を利用したARA望遠鏡が南極点にて建設中です。この建設を更に早期に推し進めるために現在私たちは細型の新アンテナを開発しています。今回の南極実験ではこのアンテナを氷中に埋め、水中での実際の性能を調べるための実験を行う予定です。この南極での実験の詳細並びに結果を次号にて報告します。お楽しみに!

ICEHAPよりお知らせ

- ニュートリノ天文学部門の石原安野准教授が発表したEHEに関する論文「Constraints on Ultra-High-Energy Cosmic Ray Sources from a Search for Neutrinos Above 10PeV with IceCube」が、この度Physical Review Letters誌に掲載され、また同誌が選ぶ特に重要な論文として“PRL Editors' Suggestion”に選出されました。
- プラズマ宇宙研究部門の堀田英之特任助教の記事が「日本物理学会誌11月号」に掲載され、表紙画像「スパコン『京』で再現した太陽内部の熱対流の様子」も提供しました。



出典：日本物理学会誌

最近の主な論文

本センターから最近出版された
主要な論文です

- IceCube Collaboration: R. Gaior, A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al. ; Searches for Sterile Neutrinos with the IceCube Detector, Physical Review Letters 117, 071801; DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.071801 (2016)
- IceCube Collaboration: R. Gaior, A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al.; An All-Sky Search for Three Flavors of Neutrinos from Gamma-Ray Bursts with the IceCube Neutrino Observatory, Astrophysical Journal 824, 115; DOI:10.3847/0004-637X/824/2/115 (2016)
- IceCube Collaboration: A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al. ; Constraints on Ultra-High-Energy Cosmic Ray Sources from a Search for Neutrinos Above 10PeV with IceCube, Physical Review Letters; arXiv:1607.05886 [hep-ex], 20 July (2016)
- Y. Kuramitsu, A. Mizuta, Y. Sakawa, H. Tanji, T. Ide, T. Sano, M. Koenig, A. Ravasio, A. Pelka, H. Takabe, C. D. Gregory, N. Woolsey, T. Moritaka, S. Matsukiyo, Y. Matsumoto, and N. Ohnishi, Time Evolution of Kelvin-Helmholtz Vortices Associated with Collisionless Shocks in Laser-Produced Plasmas, The Astrophysical Journal, Volume 828, Number 2; DOI 10.3847/0004-637X/828/2/93 (2016)
- T. Ishiyama, K. Sudo, S. Yokoi, K. Hasegawa, N. Tominaga, H. Susa, Where are the Low-mass Population III Stars?, The Astrophysical Journal, Volume 826, Issue 1, article id. 9, 11 pp. DOI:10.3847/0004-637X/826/1/9 (2016)

Message from Takao

先日約3年弱にわたる任務を終えた
桑原孝夫研究員からのメッセージです

このたび千葉大ICEHAPを退職する事となりました桑原です。皆さまに支えられ、2014年の着任より、これまで3年弱に渡り特任研究員として勤めさせて頂きました事、この場を借りてお礼申し上げます。

これまでIceCube実験で観測される大気ニュートリノの解析を担当させて頂いておりました。IceCubeの観測する大気ニュートリノのエネルギーは数GeVから数100TeVまで広くに及び、統計精度の高い大気ニュートリノデータの解析は、ニュートリノ振動等のニュートリノ物理のみならず、一次宇宙線スペクトルやエアシャワー等の宇宙線物理の観点からも大変に興味深いものでした。また、大気ニュートリノ観測は、日本のグループが長きに渡り名実共に世界をリードする研究を行っており、私の参加させて頂いた新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」では、第一線で活躍される研究者の方々と活発な交流をさせて頂きました。神岡を始め、各機関のお世話になりました皆さま、ありがとうございました。

現在、千葉大ICEHAPでは、IceCube-Gen2計画とARA実験の、二つの将来計画に積極的に参加しております。IceCube-Gen2は数年以内の検出器選定を目指し、ARA実験は来季のステーション増設を予定し、重要な時期を迎えております。私もARA実験には、検出器の較正やアメリカ・ユタ州でのテスト観測等、プロジェクト開始段階の貴重な仕事に微力ながら関わらせて頂き、いち研究者としてこれ以上なく幸でございました。千葉大ICEHAPはこのたび新たに2名の特任研究員を迎え、両将来計画に向け、万全の体制となっております。今後とも千葉大ICEHAPメンバーへの変わらぬご支援をよろしくお願い致します。

私の退職後の予定はここでは割愛させて頂きましたが、千葉大ICEHAPでの貴重な経験を、今後の人生に活かしていければと考えております。また皆さまに、いつか何処かで何かの形でお会いする機会があれば、それは大変にうれしい事でございます。末筆ではございますが、皆さまのご健勝と、さらなるご活躍をお祈りし、退職の挨拶とさせて頂きます。ありがとうございました。

桑原孝夫



大学内でARA実験テスト観測用装置の仮組み。

01 ICEHAP 主催研究会

公開講演会「Cosmic Café」今年度も開催!

参加無料(事前申込不要)

日時: 2017年3月26日(日) 13:00開場 13:20開演

会場: 千葉大学 人文社会科学系総合研究棟2階 マルチメディア会議室

対象: どなたでも

第1部 【研究者から皆さんへ】最新の宇宙研究報告

今回は
南極特集です。

理学研究科の間瀬助教がこの冬南極(南極では夏)に出発します。南極での生活や最新実験の様子などをたっぷりお伝えしたいと思います。また、ハドロン宇宙国際研究センター長の吉田教授より楽しいお話があります。ぜひご参加ください。

第2部 【カフェタイム】

今回も
やります!!

研究者と宇宙や
南極トークで盛り上がる!

ICEHAPオフィスにて、研究者と一緒にお茶やお菓子はいかがですか? 第1部の講義でわからなかったこと、不思議に思ったこと、なんでも聞いちゃおう!

02 SUMMER SCHOOL

2016年8月22日~26日に、宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクール[SS2016]が開催されました。



03 NEW MEMBER! 新しい仲間が加わりました!

Achim Stoessl



Hello, my name is Achim Stoessl and I joined the IceCube group in August 2016. After finishing my PhD thesis at Humboldt University in Berlin, Germany where I studied the capabilities of the IceCube neutrino observatory at the South Pole to detect electron neutrino interactions slightly outside its instrumented volume, I now embrace the opportunity to take this research a step further and join the efforts of ICEHAP in helping to develop a new sensor module for the next generation of IceCube (IceCube Gen2).

Dedicated for high energies, this module is developed to improve the sensitivity of a possible high energy extension of IceCube e.g. for the discovery of a neutrino point source and cosmogenic neutrinos. Besides focusing on testing and participating in developing this new sensor, I will also join efforts to improve and adapt current event reconstruction techniques for IceCube Gen2.

Besides my research goals, I am very happy about the possibility to get in touch with Japanese culture and I am looking forward to the new challenges ahead.

04 LEAFLETS

私たちの研究するニュートリノについて2種類の楽しいリーフレットをICEHAPのHPに掲載しています。ぜひご覧ください。



「宇宙から降り注ぐ謎の粒子 ニュートリノの秘密を探る」



「「にゅー」と「リノ」のニュートリノなある日の午前1時」



最近のARA



2017年末から更なる2~3ステーションの建設が始まります。これにより最高エネルギー宇宙線由来のニュートリノに対するARAの感度はIceCubeの感度と同程度以上となります。この建設に向けて現在、世界中の共同実験者が各担当分の製作、試験、性能評価を行っています。千葉大学では光ファイバーを使った信号伝送システムが担当になっており、製作、試験、性能評価を終え、問題ないことを確認しました。

2016年11月中にアメリカのウィスコンシン大学に送り、南極と同じ低温下にて全ての検出器を合わせた統合試験を行う予定になっています。

最近の南極



越冬隊の任務がついに終了し、自分たちの旅支度や新たに南極へ来る研究員を迎えるための準備に大忙しです。飛行機到着に備え発着場の整備が必要です。すぐに雪や氷で埋もれてしまうので、除雪機で整備しますが、せっかくなにも悪天候が続く、飛行機が何日も来れないことも。帰国を楽しみにしている研究員たちは、飛行機の到着を心待ちにしていることでしょう。

冬季は閉じていた郵便局も夏に向けて再オープンしました。これを機に、317枚もの絵葉書を出した研究員もいました。南極から届く絵葉書に、受け取る人は感激しちゃいますね。

最近のセンター長



××年ぶりに中学校の同窓会に出席しました。



Facebook
やっています!

ICEHAPで起こった出来事や、研究に関するニュースなどを随時UPしています。ぜひ「いいね!」してくださいね!



<http://www.facebook.com/ICEHAP.Chiba.Univ>