

# Icehap News

International Center for Hadron Astrophysics Apr. 2018 no.8

Astronomy  $\times$   $\nu$ (neutrino) =

# Astro $\nu$ my?

## Multi-Messenger Astronomy:

the first groundbreaking observation of  
neutrino-gamma ray  
correlation

## IceCube as a $W^-$ factory?

a new search for the missing Glashow resonance



ニュートリノ天文学部門

# 高エネルギー宇宙ニュートリノ信号が 拓いたマルチメッセンジャー天文学

— IceCube170922A による宇宙線起源天体の同定 —

理学研究院・教授

吉田 滋

## IceCube による天体 ニュートリノアラート

南極点深氷河に展開するIceCube実験は、高エネルギー宇宙ニュートリノ事象候補を即時解析し、世界の天文観測施設にアラートを送信するシステムの運用を2016年4月より開始しました。これにより、様々な天文観測チャンネルの観測データを組み合わせ、時刻と到来方向の相関をとることで、ニュートリノ放射天体の同定が可能となります。千葉大学グループは、超高エネルギー帯(100TeV から EeV)の宇宙ニュートリノ検出感度に特化したアラートである通称 "EHE"(Extremely-High Energy)セレクションの開発を担当し、これはもう少し低いエネルギー帯に感度がある "HESE" セレクションとともにIceCubeの2大アラートチャンネルです\*1。2016年7月31日に最初の EHE イベントアラートが配信されて以降、2017年8月までの約1年間に4本のアラートを配信し、 $\gamma$ 線望遠鏡などによる追観測が行われましたが、天体同定には至りませんでした。EHE セレクションでは確率的に約半分の事象が、雑音である大気ニュートリノですので、この結果は驚くには及びませんが、吉報を期待して待ち続けながら秋を迎えました。

## IceCube 170922 A

日本時間9月23日の朝5時54分に、EHE セレクションによって高エネルギー事象が同定されました。水平にIceCube検出容積内を突き切るミュオントラックで、典型的な高エネルギー事象です(図1)。総チェレンコフ光量\*2に基づく初期エネルギー推定は 120 TeV、オフライン解析による最終推定値は 290 TeV であり、約50%の確率で宇宙ニュートリノであると判定されました。事象検出後43秒後に最初のアラートが、4時間後に詳細解析情報を記載したGCN サーキュラーが配信されました。IceCube 170922A と名付けられたこのニュートリノからの放射天体が同定されれば、ニュートリノを生み出した親となる宇宙線陽子のエネルギーは

PeV(1000 TeV)を超えるため、まさに待ち望んだ高エネルギー宇宙線起源天体(PeVatronとも呼ばれます)を明らかにしたことになります。世界中の天文施設が追観測を始めました。

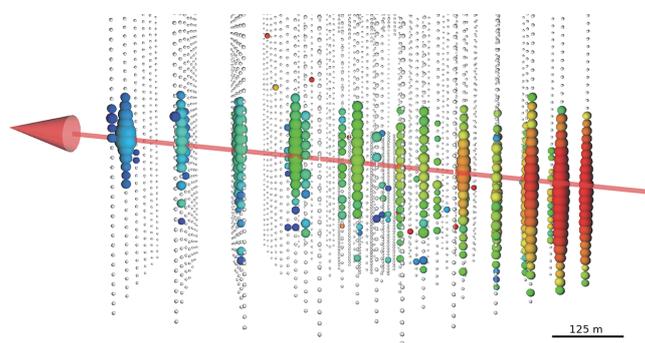


図1: 2017年9月22日に検出した宇宙ニュートリノイベント(チェレンコフ光の分布図)。各球は氷河内に埋設された検出器、球のサイズはその検出器でうけたチェレンコフ光の量を示す。色は検出したタイミングを表し、赤→青の順に信号が記録された。

## Fermi-LATと MAGIC $\gamma$ 線望遠鏡による追観測

Fermi-LAT は Fermi衛星\*3に搭載された $\gamma$ 線観測装置で、20MeV から 数100GeV 程度のエネルギー帯の $\gamma$ 線天文学研究を行っています。既知の $\gamma$ 線放射天体は Fermi-LAT Source Catalog として公開されており、その中のブレーザー天体(BL-Lac 型)TXS 0506+056がニュートリノ事象到来方向に存在していることが分かりました。さらに Fermi-LAT チームが公開しているFAVAと呼ばれる $\gamma$ 線光度変動解析チャンネルで、この天体が同年4月から活動を活発化し、通常時の最大約6倍の輝度で $\gamma$ 線を放射していることが分かりました。さらには、地上設置高エネルギー $\gamma$ 線望遠鏡 MAGIC がニュートリノ事象検出32時間後から約10日間をかけた総計13時間弱に及ぶ集中観測を行い、この天体からの100 GeVを超える高エネルギー $\gamma$ 線放射を検出しました。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 $\gamma$ 線放射が史上初めて検出され、その放射天体が同定されたのです。

\*1 ICEHAP ニュース第4号に記事掲載。論文は Astropart.Phys. 92 (2017) 30-41

\*2 チェレンコフ光 荷電粒子が物質中を運動する時、荷電粒子の速度がその物質中の光速よりも速い場合に光が出る現象。IceCubeは、ニュートリノが氷河中で放出した荷電粒子が発生するチェレンコフ光を捕らえる。

## 同期観測の有意性

ニュートリノと $\gamma$ 線が、この天体 TXS 0506+056 から同時に観測されるということが偶然に起こる確率が重要です。全く偶然であるという仮説に対し 1.EHE アラートの方向が $\gamma$ 線放射天体方向にあり、2.ニュートリノ輝度と $\gamma$ 線輝度もしくは輝度の変動量が比例しているという仮説のどちらがあり得るのか検定を行いました。偶然仮説を支持する p-value は  $2.1 \times 10^{-5}$  ( $4.1\sigma$ ) となり、到来方向決定精度に関してより保守的な仮定においても、 $3.6\sigma$  という結果です。また、IceCube 170922 A 事象だけに限らず、過去に同様の事象が存在しているという自由度を勘案しても (look-elsewhere 補正と呼びます)、偶然仮説は  $3\sigma$  の有意性で支持されないという結果となりました。科学的に確固たる証拠とするにはやや有意性が足りませんが、この結果はブレーザー天体 TXS 0506+056 が PeVatron であるという強い示唆を与えます。

## 2014年12月にニュートリノフレアか？

この観測結果をうけて、我々は過去のIceCube観測データを洗い直し、この天体 TXS 0506+056 の方向のニュートリノ点源解析をおこないました。その結果、2014年12月16日を中心とした約160日間の長さにはわたる期間に、この方向からのニュートリノ事象が等方的分布から期待される数より卓越していることが分かりました。放射時期や期間の長さの自由度を勘案した統計的有意性は  $3.5\sigma$  です。図2 にニュートリノ事象卓説有意性 (p-value) の空間分布を示します。超過が見られる方向は+で示した TXS 0506+065 の方向と一致しています。この天体はニュートリノ放射天体であることを支持する、統計的に独立した検証となったのです。

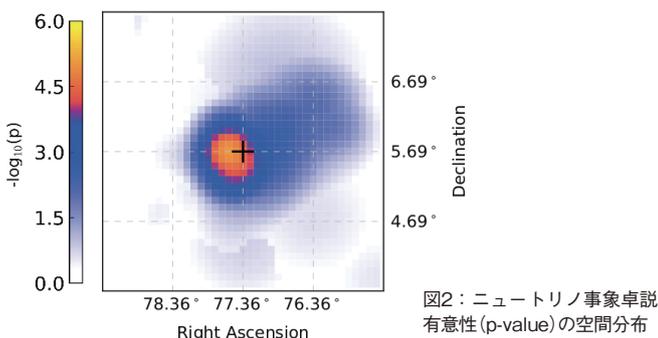


図2：ニュートリノ事象卓説有意性 (p-value) の空間分布

## 放射機構は何か？

電波から $\gamma$ 線に至る追観測で得られたTXS 0506+056のスペクトルを図3に示しました。ジェット内で加速される電子で駆動する典型的なブレーザー天体のスペクトルと言えますが、主として X 線の流量による制

限で、宇宙線陽子の寄与をうまく入れ込むには新しいアイデアが要るようです。理論家の仕事を待つべきでしょう。またジェットが視線方向を向いている AGN である $\gamma$ 線ブレーザー天体は、他の様々なIceCubeによる観測からの制限により、ニュートリノ天体の多数派ではないということが分かっています。宇宙線起源天体の多くはまた別種のものである可能性が高く、今後の観測能力の強化が待たれます。

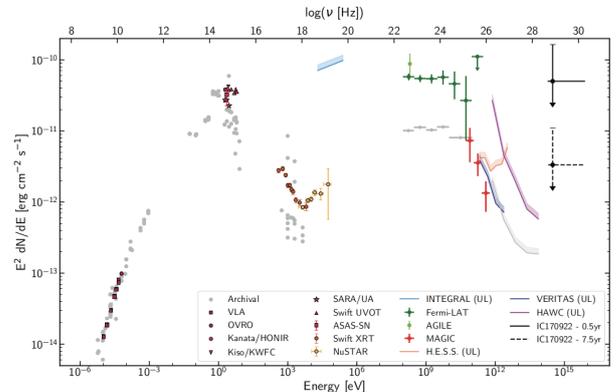


図3：マルチメッセンジャー観測によって得られた、ブレーザー天体 TXS 0506+056 からの放射エネルギー分布。電波から $\gamma$ 線まで約17桁に及ぶエネルギー領域で測定された。対応するニュートリノ流量の上限値を黒線で示している。ニュートリノとして放射されたエネルギー輝度と $\gamma$ 線として放射されたエネルギー輝度がほぼ同程度であることがわかる。グレーで示した点は、今回のフレア以前の過去の測定記録から計算された分布である。

## 日本の寄与

今回の大きな進展は世界の研究者・観測実験によって達成されたことはもちろんですが、その中でも日本の貢献が際立っていたことは述べておくべきでしょう。この事象の同定そのものがIceCube千葉大グループで開発された解析で実現しただけでなく、同期観測の有意性解析は千葉大グループの筆者とLu Luが先導して取り組みました。またそもそもの発端は、9月23日早朝にアラート情報を受け取った筆者が当時広島大学にいた田中康之氏にすぐに連絡し、追観測をお願いしたことにあります。東広島天文台かなた望遠鏡による観測でこの天体の可視光域での増光を確認した氏は自身がメンバーでもある Fermi-LAT の観測データを最初に解析し、 $\gamma$ 線フレアが起きていることを発見しました。Fermi-LAT からの最初の ATel配信の筆頭著者は田中さんです。林田将明氏(千葉大)とともに Fermi-LAT 側での解析に大きな貢献をし、さらには諸隈智貴氏(東大)らによる木曾観測所のスペクトル観測や、すばる望遠鏡による赤方偏移同定の試みに繋がっていきました。

ニュートリノが拓くマルチメッセンジャー観測は、最初の大きな果実を得ました。この手法を強化し、宇宙線起源天体を確実に最速で同定していく努力を続けます。多くの天文観測研究者のご協力なしには、この研究手法は成り立ちません。ここで名前を挙げられなかった方々を含め、多くの皆さんの共同研究に感謝します。

\* 3 Fermi衛星 = フェルミ $\gamma$  (ガンマ)線望遠鏡は、 $\gamma$ 線観測用の天文衛星で、LATという大面積望遠鏡と $\gamma$ 線バーストモニター (GBM) を搭載している。アメリカ、フランス、ドイツ、イタリア、日本、スウェーデンの政府機関・研究組織による共同研究として、2008年8月より運用が開始された。



ニュートリノ天文学部門

# 深宇宙からのハドロン相互作用

特任研究員

Lu Lu 訳: 吉田 滋 (ICEHAPセンター長)

## グラシヨウ共鳴

素粒子物理に対する人類の理解は、検出技術の近代化に伴って大きく進展しました。地球圏外に起源をもつ荷電粒子である宇宙線は、ミュオンやパイ中間子などの発見につながり、素粒子標準模型は加速器実験によってテストされ実証され続けています。ところで、標準模型で予測されつつもまだ発見されていない現象に、反電子ニュートリノと電子が衝突することで、Wボソンを共鳴生成する反応があります。この反応がおこるニュートリノのエネルギーしきい値は、電子の静止系で6.3 PeV (1PeVは $10^{15}$  eV) であり、人工加速器で到達するには高すぎるのです。図1に、ニュートリノまたは反ニュートリノの高エネルギー領域における反応断面積を示しました。6.3 PeVのピークが、グラシヨウ共鳴と呼ばれるこのWボソン共鳴反応に相当します(提唱者のシェルドングラシヨウ\*1は85才でまだ現役です!)

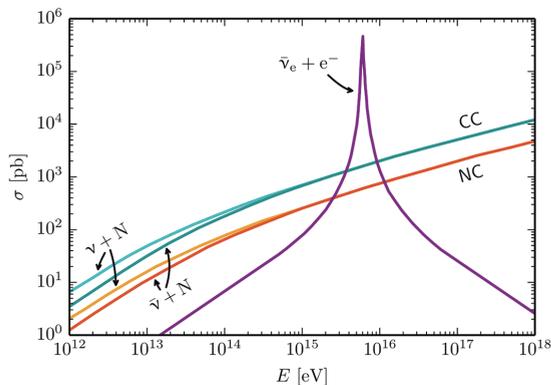


図1: 荷電相互作用(CC)、中性相互作用(NC)、グラシヨウ共鳴の反応断面積。6.3 PeVでは共鳴反応断面積は約300倍も大きい。

## PeV ニュートリノをハントする

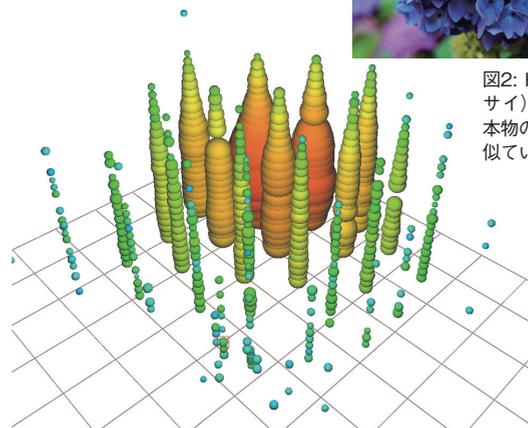
IceCube実験はGeV ( $10^9$  eV) から EeV ( $10^{18}$  eV) のエネルギーをもつニュートリノを検出するようにデザインされています。宇宙ニュートリノ事象は、検出容積内に反応点を持つシャワーイベントと、地球を貫通して検出容積内を走るミュオントラックイベントによって測定されています。これまでの最高エネルギーニュートリノ事象は約2PeVのシャワーイベントと、約2.6PeVのエネルギーを落としたミュオントラック事象です。宇

宙ニュートリノの流量はエネルギーのべき乗で記述でき、高いエネルギーになるほど事象数が減少します。マルチPeV領域での統計をあげるために、今回新しい解析フローを開発しました。我々のグループが開発したこの新チャンネルでは、反応点が検出器埋設容量の外側にあるシャワー事象を同定しつつ大気ミュオンの雑音事象を除去することで、グラシヨウ共鳴の起こるエネルギー領域における検出効率を従来の2倍に引き上げることに成功しました。

この解析を2012年から2016年にかけての約4.6年分の観測データに適用したところ、まさに約6 PeVのエネルギーをもつシャワー事象が同定されました。図2にこのイベントを示します。ニュートリノ衝突点からチェレンコフ光が氷河内を500mにもわたって伝播している巨大なシャワー事象で、検出された総チェレンコフ光子数はこれまでのどのイベントよりも多いものです。このイベントは、独立に解析が行われた超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索(これも千葉グループが開発された、最高エネルギー宇宙線由来のGZKニュートリノ同定に最適化した解析\*2)でも同定されました。Hydrangea(アジサイ)と名付けられたこのイベントは、GZKニュートリノとするにはエネルギーが低すぎますが、天体起源宇宙ニュートリノとして過去最高クラスのエネルギーを持つと考えてよいものです。



図2: Hydrangea(アジサイ) イベント(左)と本物のアジサイ(右)。似ていませんか?



\*1 シェルドン グラシヨウ(Sheldon Lee Glashow)は、アメリカ合衆国の物理学者。専門は数学と物理学。ボストン大学教授。

\*2 ICEHAP News 第5号に石原安野氏による記事が掲載。論文はPhysical Review Letters, 117, 241101, (2016)

## ハドロンシャワー事象の可能性

6 PeVというエネルギーから、反電子ニュートリノからのグラシヨウ共鳴衝突で生成されたと考えてよい「アジサイ」イベントですが、他にも注目すべき特色があります。検出器で捉えられた最初の光信号は、シャワー事象の特徴である、ニュートリノ衝突点から球状に広がるチェレンコフ光波面から期待されるよりも早いタイミングで記録されています。むしろ、ニュートリノ衝突点で生成されたミュオンジェットからの信号と考えると説明がつかず。この事実は、アジサイイベントが電磁シャワーではなく、多くの中間子生成を伴うハドロンシャワーであることを示唆します。ハドロンシャワーでは、20 GeV 程度のミュオンを数十個放出するからです。Wボゾン崩壊分岐比にして68%がハドロンシャワーを生成するチャンネルであるため、この早い光信号はまさにグラシヨウ共鳴事象で期待すべきものなのです。

## 宇宙ニュートリノ起源への示唆

グラシヨウ共鳴事象の検出は素粒子標準模型を確認するばかりではなく、天体・宇宙物理の観点からも重要です。なぜなら反電子ニュートリノにのみ関わる反応であるため、PeV 領域における反電子宇宙ニュートリノの量を測定することになるからです。例えば、強い磁場の環境下でニュートリノを生成する場合、シンクトロン冷却によって、ミュオン崩壊からのニュートリノ生成が抑制されます。したがって電子ニュートリノが全体に占める割合は低くなります。ニュートリノ生成機構として陽子・陽子衝突を考えるか、陽子・光子衝突を考えるかで、反電子ニュートリノの割合も変わります。アジサイ事象

検出は、(反)ニュートリノフレーバー比から宇宙ニュートリノ起源に迫る第一歩なのです。

アジサイイベントが意味するもうひとつの重要な点は、宇宙ニュートリノのスペクトルが少なくとも 6 PeV までは高エネルギー領域に伸びているということです。また図3に示すように宇宙ニュートリノが運ぶエネルギーの総量は、超高エネルギー宇宙線や拡散 $\gamma$ 線とほぼ同じです。これは不思議なことです。なぜ全く違う種類の粒子がほぼ同じエネルギー運搬を担っているのでしょうか。ニュートリノ、 $\gamma$ 線、超高エネルギー宇宙線は類似した起源を共有しているのかもしれませんが。PeV 領域以上に伸びる宇宙ニュートリノスペクトル観測は、この3者をつなぐ鍵になるでしょう。アジサイイベントをより多数検出するとともに、さらに高エネルギー領域に探索の手を伸ばすことがニュートリノ放射天体を研究するために必要です。次世代実験 IceCube-Gen2 が1つの大きなチャンスを提供するでしょう。

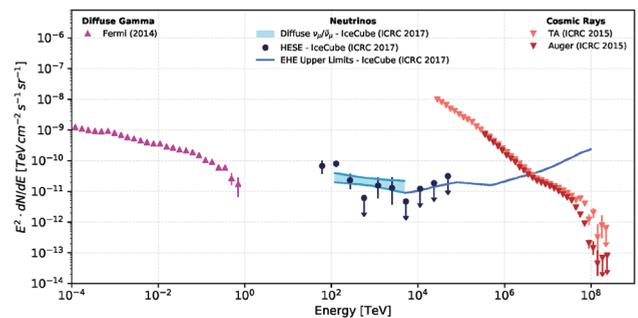


図3: Fermi衛星で観測された宇宙 $\gamma$ 線、IceCubeで観測された宇宙ニュートリノ、Auger及びTA実験で測定された宇宙線のエネルギーフラックスをまとめた。超高エネルギー宇宙ニュートリノ量の上限値も青実線で示している。エネルギー流量は3者でいたい同じであるが、超高エネルギー宇宙線が陽子だとすると、ニュートリノと $\gamma$ 線の測定結果を説明できる自明な天体候補はないことが知られている。

## WHAT'S NEW

### 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

- ASAS-SN, The Astrophysical Multimessenger Observatory Network, Fermi, HAWC, LCO, MASTER, Swift, VERITAS, IceCube Collaboration; A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, A. Stöbl, S. Yoshida, et al. ; Multiwavelength Follow-up of a Rare IceCube Neutrino Multiplet, *Astronomy and Astrophysics*, 607, A115, DOI: 10.1051/0004-6361/201730620, (2017)
- IceCube Collaboration; A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al. ; Extending the Search for Muon Neutrinos Coincident with Gamma-Ray Bursts in IceCube Data, *Astrophysical Journal*, 843, 112; DOI: 10.3847/1538-4357/aa7569, (2017)
- IceCube Collaboration; A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al. ; Search for Sterile Neutrino Mixing Using Three Years of IceCube DeepCore Data, *Physical Review*, D95, 112002; DOI: 10.1103/PhysRevD.95.112002, (2017)

- Y. Matsumoto, T. Amano, N. Kato, M. Hoshino, Electron Surfing and Drift Accelerations in a Weibel-dominated High-Mach-number Shock, *Physical Review Letters*, 119, 105101, DOI:10.1103/PhysRevLett.119.105101, (2017)
- H. Hotta, Solar Overshoot Region and Small-scale Dynamo with Realistic Energy Flux, *The Astrophysical Journal*, 843, article id. 52, 12 pp, DOI:10.3847/1538-4357/aa784b, (2017)
- T. Hanawa, T. Kudoh, K. Tomisaka, Fragmentation of a Filamentary Cloud Permeated by a Perpendicular Magnetic Field, *The Astrophysical Journal*, 848, Issue 1, article id. 2, 12 pp, DOI:10.3847/1538-4357/aa8b6d, (2017)

## 01 ICEHAP 主催公開講演会

### 第4回「Cosmic Café」のご報告



2017年10月22日(日)、あいにくの台風による悪天候でしたが、第4回「Cosmic Café」が開催されました。ひどい雨の中にも関わらず、講演には多くの人に来てくださり、カフェタイムでは、子供たちも一緒に実験をしたり、ショーを楽しんだり、スプレーアートの体験もしました。足元の悪い中、来てくださった皆様、本当にありがとうございました。

## 02 SUMMER SEMINAR

2017年8月21日～25日に、宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマーセミナー[SS2017]が開催されました。



## 03 Message from Achim

### 先日任務を終えたアヒム研究員からのメッセージです

Since I arrived at Chiba one and a half year ago and I joined the group I could gain lots of valuable experience: I was lucky to join the group at a time where we were establishing a new lab and I am happy that I could help with the instrumentation and at the same time learn a lot about detector components, data readout and how to set up experiments. During my time in Chiba I was working for IceCube-Gen2, which is a proposed extension of the ICEHAP experiment, a cubic kilometer sized neutrino detector at the South Pole. Helping to investigate and test new detector components was a fun work, and a big part of the good experience was also the work as a team where we often found solutions together. Besides my work, I was lucky to enjoy a bit of travel around Japan, and I will never forget the breathtaking view from the top of Mount Fuji or the thousands of red torii I was walking through at the Fushimi Inari shrine in Kyoto.

Definitely worth mentioning and in my opinion one of the most enjoyable things about Japanese culture are rich opportunities to enjoy food and drinks together at some nice Izakaya in the evening. And luckily - at least in my humble opinion - Japanese food is among the most delicious cuisines in the world, so it was always a pleasure. Also, Izakaya outings are a very nice opportunity to bond with your working group over inspiring

conversations, and sometimes you even find an unexpected solution to a problem which was bothering you all week.

Of course, working in Japan means also to be aware of cultural differences for somebody coming from Europe, and sometimes misunderstandings can occur however by trying to understand each other this helps to learn about each other and about oneself.

I wish all the best success for the further work of the ICEHAP team and hope that there are many more discoveries and interesting new sensor developments. I also want to use the opportunity to thank everybody in the group very much for giving me the opportunity to have an exciting time in Japan, their kindness and the good working atmosphere. I certainly will find my way back to Japan and hope very much to see you all again!

*Achim Stoessl*



研究室で作業中の1枚。

## 最近のARA



1月に約1か月間南極に滞在したシモン特任研究員からARA実験の近況報告です



先日南極を訪れ、新しいARAステーションを設置し、データを収集するための準備を行いました。下の写真は、作業するための配備小屋の1つで、私たちは「クリスタル・パレス」と呼んでいます。この小屋は新しいARAステーションの近くにあり、南極点にあるステーションからは約7キロ離れた場所にあります。私たちは、校正アンテナをこの小屋の下に開けられた穴に降ろす作業をしました。小屋の中は寒いと思うのですが、天気の良い日はグリーンハウスのように暖かくなり、コートを脱ぎたくなるほどです。小屋から伸びたケーブルが雪の中に見えているのを見えるのでしょうか。穴から175メートル下まで降ろすために、ケーブルを雪の中から掘り出す必要があります。これがまた重労働なんです！



「クリスタル・パレス」と呼ばれる小屋

## 最近のセンター長

久々のスキーで筋肉痛になりましたが、1日で治った点に光明が見えました。



## Icehap News

International Center for Hadron Astrophysics  
Apr. 2018 no.8

Facebook やってます！  
詳しくはコチラから▶▶▶

www.facebook.com/ICEHAP.Chiba.Univ



## 千葉大学大学院理学研究院附属 ハドロン宇宙国際研究センター

International Center for Hadron Astrophysics, Graduate School of Science, Chiba University

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

URL <http://www.icehap.chiba-u.jp>

icehap@ml.chiba-u.jp

