

# ICEHAP

NEWS International Center  
for Hadron Astrophysics Jan. 2019 no. 9

## 南極点でピクニック

南極点には、「Ceremonial Pole」と呼ばれる観光用の標識があり、その周りを南極条約に加盟する12カ国の国旗が囲んでいます。写真は、そのPoleの前でピクニックを楽しむ越冬メンバーたち。氷上にブランケットを敷いて、半袖でアイスクリーム。そこが南極点であることを忘れそうです。





ニュートリノ天文学部門

# 超高エネルギー宇宙ニュートリノの「微分上限」 最高エネルギー宇宙線起源は何か？

理学研究院・教授  
吉田 滋

## 最高エネルギー宇宙線とニュートリノ

IceCube 実験で観測可能なニュートリノのエネルギー域は  $10^{10}$  GeV 以上にも達します。このような極めて高いエネルギーの宇宙ニュートリノは、宇宙からの極限エネルギー放射である最高エネルギー宇宙線から生成されます。最もよく知られた機構は、宇宙線陽子が放射天体から飛行してくる間に宇宙背景輻射と衝突してニュートリノを生成するもので、このニュートリノはGZK(cosmogenic) ニュートリノと呼ばれます。このニュートリノは、遠方より活発な種類の天体が宇宙線放射天体であった場合は量が増えます。距離  $R$  にある天体からのニュートリノの数は  $1/R^2$  で減りますが、天体の数自体は  $R^3$  で増えるので、ニュートリノの様に貫通力が高く、遠くの宇宙からでもエネルギーを失わずに到達する粒子では、遠い距離にある天体由来の寄与が効くからです。

IceCube実験では、 $10^7$  GeV 以上のエネルギー領域で宇宙ニュートリノが見つかっていないことから、最高エネルギー宇宙線の主成分が陽子である限り、遠方宇宙で活発であるような天体は起源天体ではないことを2016年に明らかにしました [1]。最高エネルギー宇宙線起源天体は極めて輝度の高いパワフルな天体であるべきというのが定説であり [2]、その多くはより遠方で活発であるため、この結果は驚くべきものでした。

## 宇宙線起源理論に普遍的な制限をかける

一方で、この結果はGZK ニュートリノをはじめとする様々な理論モデルを個別にテストして導きだしたものです。IceCube実験の結論はそれらの理論の不定的な仮定に依存するとの反論も可能です。また将来に提案される新しい理論モデルには何も言うことができません。

そこでなるべく理論の詳細に依らずに実験データだけを使って超高エネルギー宇宙ニュートリノの量について、より一般的な制限をかけることは重要です。これがあれば、理論家はこの一般的な制限に抵触しないようにモデルを構築することができるからです。今回我々はこの一般的な制限を9年分の観測データから導き出しました [3]。

「微分制限」(Differential limit) というこの手法は、

あるエネルギー  $E$  を中心として  $10^{-0.5}E$  から  $10^{0.5}E$  の中に一様に分布する仮想的なニュートリノスペクトルに対する流量上限値をデータから導出します。エネルギー  $E$  を変えて同様の計算を繰り返せば、ニュートリノ流量の上限値がエネルギー  $E$  の関数として示せます。これが「一般的な」制限なのは、理論が予測するニュートリノスペクトルはこの仮想的な流量を、 $E$  を変えながら「積分」することで近似的に表現できるからです。

図1に結果を示します。黒い太線が、ニュートリノ流量微分上限値であり、この曲線より上または近接するような理論モデルは、ニュートリノ観測結果からは否定されます。この図で示された3つの理論予想も否定的とされています。流量上限値は  $10^9$  GeV で  $2 \times 10^{-8}$  GeV/cm<sup>2</sup> sec sr であり、これは最高エネルギー宇宙線の流量とほぼ同じです。最高エネルギー宇宙線の主成分が陽子であるかぎり、理論モデルの詳細によらず親宇宙線とほぼ同量のニュートリノが生成されます。今回の結果は、自然な、したがって有力な最高エネルギー宇宙線放射天体候補は主要起源ではないという2016年の結論をより普遍的に裏付け、最高エネルギー宇宙線は陽子が主成分ではないことを示唆します。

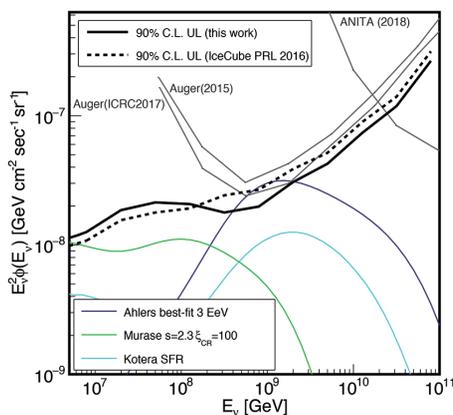


図1: 10PeV以上の超高エネルギー領域における宇宙ニュートリノ流量の微分上限値(黒の実線)。他実験(Auger, ANITA)による上限値も示しています。高エネルギー宇宙線由来のニュートリノ流量理論予想も青、緑、水色の曲線で示しました。

皮肉なことに、IceCube 実験が発見した PeV ( $10^6$  GeV) のエネルギーを持つ宇宙ニュートリノは微分制限を算出する際に雑音事象となり、本来の観測感度を十分に活かす制限をつけられませんでした。この問題を解決する手法を編み出したことで、我々自身の過去の結果(図中破線)を改善することもできたのです。

[1] "Constraints on Ultra-high-Energy Cosmic-Ray Sources from a Search for Neutrinos above 10 PeV with IceCube," IceCube Collaboration, Phys. Rev. Lett. 117, 241101 (2016).

[2] "Anisotropy vs chemical composition at ultra-high energies" M.Lemoine and E.Waxman, JCAP, 11, 09 (2009).

[3] "Differential limit on the extremely-high-energy cosmic neutrino flux in the presence of astrophysical background from nine years of IceCube data" IceCube Collaboration, Phys. Rev. D 98, 062003 (2018).

\*1 ICEHAP ニュース No.5 石原安野氏の記事もごらんください。  
[http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/ICEHAP\\_NEWS/book\\_data\\_5/index.html](http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/ICEHAP_NEWS/book_data_5/index.html)



プラズマ宇宙研究部門

# スーパーコンピュータ「京」を使った 1兆粒子シミュレーションで強い天体 衝撃波の3次元構造を世界で初めて解明

理学研究院・特任准教授  
松本洋介

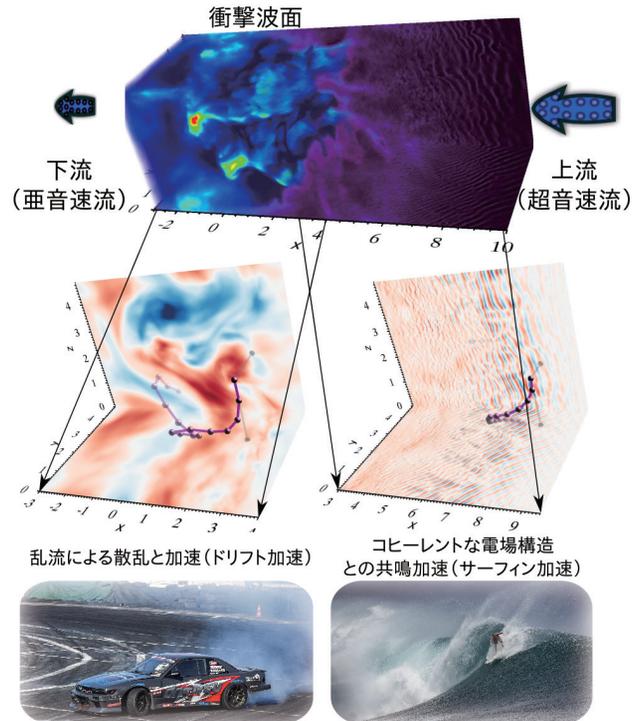
## 宇宙から飛来する 高エネルギー粒子誕生の謎

宇宙には高エネルギーの荷電粒子が飛び交っており、これを宇宙線と呼びます。その発見から100年以上たった現在においても、どのような物理メカニズムで冷たいプラズマ中の荷電粒子が10桁以上も高いエネルギーを持つ宇宙線へと変貌するかを理解することがチャレンジングな問題として残されています。とりわけ、高エネルギー天体からの電磁波は、ほぼ光速で動きまわる電子によって放射されていると考えられていますが、この相対論的なエネルギーを持つ電子がどのようにして作られたかは、宇宙物理学の謎の一つとして残されています。

## スパコン「京」を用いた1兆粒子計算

我々はスーパーコンピュータ「京」が有する計算能力の約10% (73,728計算コア、100テラバイト物理メモリ) を駆使してプラズマの第一原理計算を行い、強い天体衝撃波<sup>1)</sup>の3次元構造を世界で初めて明らかにしました<sup>[1]</sup>。ペタバイト<sup>2)</sup>に上る膨大なデータを解析することにより、冷たい電子が相対論的なエネルギー (ほぼ光速で運動するエネルギー) まで加速する様子を示すことに成功しました。冷たい電子は衝撃波と相互作用する過程で、1. コヒーレント<sup>3)</sup>な電場の波と共鳴する共鳴型加速、2. 強い乱流磁場に散乱されながら加速する統計的加速の2段階を経ることがわかりました。前者は波に捕捉されながら加速される様子からサーフィン加速と呼ばれ、後者は衝撃波面を横滑りしながら加速するドリフト加速と呼ばれます。

衝撃波面近傍で卓越する強い乱流磁場によってドリフト運動中の電子は散乱され、多くの粒子が下流へ流される間も上流側に留まり、加速し続ける粒子が存在することが明らかになりました。この強い乱流磁場によって高エネルギー粒子を衝撃波面近傍の加速領域に長時間閉じ込めることが可能であることから、本成果は冷たいプラズマと宇宙線粒子をつなげる有望な加速メカニズムとして期待されます。



(上段) 衝撃波の3次元構造。色は電子密度を表す。(中段右) 衝撃波の上流側で電場の波(色)と共鳴するサーフィン加速中の電子の軌道(球)を表す。(中段左) 衝撃波近傍の強い乱流磁場(色)によって散乱されながら波面に沿って横滑り(ドリフト)する電子の運動の様子。Matsumoto et. al. PRL 2017より改編。(下段) それぞれの加速メカニズムに対応するイメージ図。

## 今後の展望

超大規模数値実験が故、これまででは限られた条件下でしか加速メカニズムの性質を探ることができませんでした。冷たいプラズマから宇宙線に変貌する粒子の割合はどれくらいか? などの加速効率の問題が残されています。それらを明らかにするためには、今回と同様の大規模な実験を複数回繰り返す必要があります。また長時間計算を実施することで、宇宙線ができる様子まで再現できるかもしれません。

いずれにしても、解析するデータがペタバイトクラスとなるため粘り強く研究に取り組む必要がありますが、その先には宇宙線の起源を明らかにすることができるかと期待されます。

[1] "Electron surfing and drift accelerations in a Weibel-dominated high-Mach-number shock", Y. Matsumoto et al., Phys. Rev. Lett. 119, 105101 (2017)

\*1 衝撃波 = 物体が進む速さが音速を超える場合に生じる強く圧縮されたガスの構造。

\*2 ペタバイト = データやコンピュータの記憶装置の大きさを表す単位。1ペタバイト=約1125兆バイト。

\*3 コヒーレント = 波動が互いに干渉し合う性質を持つさま。

# ハドロン宇宙国際研究センターって どんなところ?

現在、ハドロン宇宙国際研究センター(ICEHAP)では、  
14名の日本人学生と3名の留学生が教員や特任研究者らと共に研究に取り組んでいます。  
研究室に所属する学生は、研究室でどのように過ごしているのでしょうか?  
今回は、当センターのニュートリノ天文学部門(吉田 滋研究室)に所属する  
修士課程2年の久留須賢太郎君に学生の視点から、当センターを紹介してもらいました!

## 学生から見た研究室

吉田研究室では現在、教員が4人、研究員が3人、そして学生が5人います。研究員や学生はIceCube 光観測実験やARA 電波観測実験といった大きなプロジェクトの枠組みの中で、テーマを定め研究に取り組んでいます。学生も修士課程になるとResearch Assistant(研究助手)として採用され、学びながら毎月給与ももらうことが出来、毎日責任をもって研究をしています。

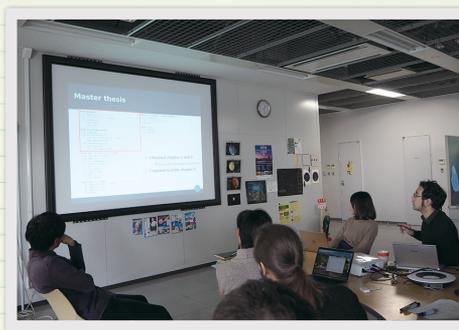
私は、“ARA実験で使用する電波アンテナ性能の最適化”をテーマに研究をおこなっています。その研究もおおた終わりが見え、現在は修士論文としてまとめているところです。そういった一介の学生の研究が大きな国際プロジェクトに組み込まれて、南極でニュートリノを待ち続ける助けになっているというのは、ロマンがありワクワクします!!



## 国際色豊かな研究室

吉田研究室は海外からの研究員や留学生がいる国際色豊かな研究室です。そのため、メンバーへの連絡や日常の会話は英語を用いています。また、作業中も英語でコミュニケーションを取り、国際電話会議などで英語のプレゼンテーションをする事もあります。研究室に入りたての頃は英語に慣れず、会話もアタフタしていてプレゼン等では原稿を用意したりと、とても苦労していました。しかし1年2年と研究室で過ごすに連れて、だんだんと英語に馴染むことができました。やはり経験は力ですね。

またICEHAPでは、世界各国から千葉大学へ研究者を招待し、セミナーを行っています。IceCubeプロジェクトには49カ国の研究機関が参加し、多くの優秀な研究者と共に未知の物理現象に向かって突き進んでいく様を感じることができ、自分もその一員として物理に貢献できている事を誇りに思います。



## 進路(就職活動)について

大学院を卒業した後は、そのまま研究の世界に飛び込む人もいれば他分野の企業への就職という道を選ぶ人もいます。就職先としては企業の研究開発職以外にも、プログラマーや金融機関等に就職した先輩たちもいました。私の場合、とある企業の研究開発職に内定をいただくことができました。

私が就職活動においてもっとも強みになったと思うことは、やはりこの国際色豊かな研究室での経験だと思います。常日頃から、英語に触れ続けていた経験はとても貴重でした。他にも最先端の国際研究プロジェクトに関われた事は、私に大きな自信を与えてくれました。このような研究室での経験は、就職活動の為だけではなく、自分自身の人生経験としても役に立つものだと思います。

## 久留須君の平均的な1日

休日はYouTubeを見たり、SNSで知り合った共通の趣味を持つ友人と会って遊んだりしています。



## ICEHAP よりお知らせ

ハドロン宇宙国際研究センターより申請した下記の文部科学省科学研究費が採択されました。

- ・「IceCube-Gen2実験で拓く高エネルギーニュートリノ天文学の新展開」(特別推進研究・研究代表 吉田滋)
- ・「宇宙ニュートリノによる標準模型を超えた物理の探索」(新学術領域 計画研究・研究代表 石原安野)

IceCube実験をアップグレードし、ニュートリノ科学のフロンティアを更に広げていく5年計画プロジェクトとして、本年度から研究活動を展開します。

## 最近の主な論文

本センターのメンバーが発表した主要な論文です

- ・IceCube Collaboration; A. Ishihara, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, A. Stöfl, S. Yoshida, et al. ; Differential Limit on the Extremely-High-Energy Cosmic Neutrino Flux in the Presence of Astrophysical Background from Nine Years of IceCube Data, *Physical Review*, D98, 062003, DOI: 10.1103/PhysRevD.98.062003 (2018)
- ・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 ,IceCube Collaboration; A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, A. Stöfl, S. Yoshida, et al. ; Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A, *Science*, Vol.361, eaat1378; DOI: 10.1126/science.aat1378 (2018)
- ・IceCube Collaboration; A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, A. Stöfl, S. Yoshida, et al. ; Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert, *Science*, Vol.361, 147-151; DOI: 10.1126/science.aat2890 (2018)
- ・Makoto Takamoto, Yosuke Matsumoto, Tsunehiko N. Kato, Magnetic Field Saturation of the Ion Weibel Instability in Interpenetrating Relativistic Plasmas, *Astrophys. J. Lett.*, 860; DOI: 10.3847/2041-8213/aac6d6 (2018)
- ・O. Benomar, M. Bazot, M. B. Nielsen, L. Gizon, T. Sekii, M. Takata, H. Hotta, S. Hanasoge, K. R. Sreenivasan, J. Christensen-Dalsgaard, Asteroseismic detection of latitudinal differential rotation in 13 Sun-like stars, *Science*, Vol. 361, Issue 6408, 1231-1234; DOI: 10.1126/science.aao6571 (2018)
- ・Nagisa Hiroshima, Shin'ichiro Ando, Tomoaki Ishiyama, Modeling evolution of dark matter substructure and annihilation boost, *Physical Review D*, Volume 97, Issue 12, id.123002, DOI: 10.1103/PhysRevD.97.123002 (2018)

## アイスクューブ4コマ漫画『ひっぐすたん』連載開始決定!!

素粒子やアイスクューブ実験を含む素粒子観測実験を可愛いイラストで紹介している、『HiggsTan (ひっぐすたん)』というWebサイトをご存じですか? そのサイトの管理人である秋本祐希さんの4コマ漫画の連載が、このICEHAPニュースにて次号より開始されます。連載開始を記念して、秋本さんとマンガに登場するキャラクターをご紹介します。



管理人  
秋本祐希

東京大学理学研究科で博士号(専門は素粒子実験)を取得後、その知識を生かして素粒子関係の講演や、執筆、そしてイラストのデザインなどを行っている。著書には、『4コマでまるわかり!素粒子実験の世界』や、『宇宙でまるわかり!素粒子の世界』がある。サイトHiggsTan(ひっぐすたん higgstan.com)では、素粒子にまつわるかわいいイラストの4コマ漫画を公開。

### ひっぐすたんのキャラクター

#### アイスクューブさん



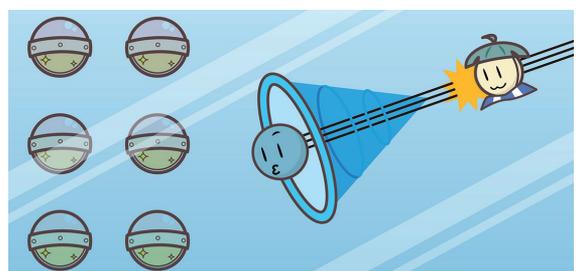
アイスクューブ観測実験施設をかわいく擬人化。南極点ならではのあったかファッションもお似合い。

#### ニュートリノ(電子、ミュー、タウ)



遠いかなたから宇宙を旅して飛んでくるニュートリノたち。旅人風に笠とマントをまとっています。

#### チェレンコフ光



ニュートリノが氷を通過するときに原子核や電子とぶつかり発生するチェレンコフ光。アイスクューブは、検出器でこの光を捕えます。

次回からの連載をお楽しみに!

## 01 文科省での共同説明会

2018年7月13日に発表されたニュートリノ放射源天体同定について、7月22日に文部科学省記者会見室にてMAGIC、可視観測、Fermi、そしてアイスキューブの4つの観測チームによる共同説明会を行いました。史上初のこの発見に、多くの注目が集まりました。会見の様子は、YouTubeにてご覧いただけます。▶▶▶



## 最近の南極



アイスキューブ観測施設では、今年度のWinter Over（越冬）メンバーの交代がありました。昨年度の越冬メンバーのRaffaellaとJohannesに代わり、KathrinとBenjaminが約1年南極点にとどまり、観測施設や機械などのメンテナンス作業を行います。写真は、新旧メンバーの4人が観測施設前の雪山で遊ぶ様子です。



南極点  
なう

ただ今、当センター所属のLu特任研究員が南極点に出向中。滞在の様子は、次回のニュースレターでお知らせします。お楽しみに！

## 最近のセンター長



泳いでも、泳いでも、  
G変わらざるごとし山の  
ごとし(字余り)

Twitterも  
はじめました

@ICEHAP1

詳しくは  
こちらから▶▶▶



ICEHAP ニュース・  
バックナンバー

ICEHAP  
NEWS

これまでに発行された  
ニュースレターは、  
当センター HPにてご  
覧いただけます。▶▶▶



## 02 春の天文学会開催

2018年3月14日～17日に、日本天文学会2018年春季年会を開催しました。プラズマ部門メンバーが開催地組織委員会として、年会の運営を担当しました。また、3月18日には千葉市科学館の協力により、プラネタリウムを会場とする公開講演会を行いました。



ポスター発表会場



プラネタリウムにて講演を行う吉田 滋教授



## 03 SUMMER SEMINAR

2018年8月20日～24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 [SS2018] が千葉大学内にて開催されました。



## 04 NEW MEMBERS!

番外編 留学生紹介

ICEHAPのメンバーに加わった留学生の2人をご紹介します

Kosovo 出身

Arbër Lladrovci  
(松元 研)

日本を好きになったきっかけは、村上春樹の小説。電磁流体力学シミュレーションの研究に興味があり、千葉大学へ来たそうです。

I feel like to the Universe I'm the same kid who looked up to the sky and wanted to figure out the mesmerizing puzzle in front of him.

Now I'm focused in understanding the astrophysics of supermassive black holes, which, I believe points out to the exciting possibility of explaining the origin of galaxies.

Japan is building bridges, bringing together people of different cultures, while sharing its own cultural identity and by doing so, it sets up an example so much needed for the modern world we live in.

Arbër Lladrovci

Kosovo



Ecuador 出身

Stephany Vargas  
(吉田 研)

千葉大学の質の高い教育を学び、将来エクアドルの科学的発展に貢献するのが夢だそうです。

After pursuing a degree in physics at the National Polytechnic School,

I became extremely interested in expanding my knowledge in the fascinating fields of astronomy and particle physics.

My inclusion in this project marks a milestone never seen before, as I will be the first female Ecuadorian scientist to participate in this collaboration. After starting this adventure, the feeling is indescribable, a mixture of pride, fear, charm and joy, to start with the resolution to give my best effort to leave the name of both countries and meet the expectations of all participants.

Stephany Vargas

Ecuador



ICEHAP  
NEWS International Center  
for Hadron Astrophysics Jan. 2019 no. 9

Facebook やってます!  
詳しくはこちら ▶▶▶  
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

発行：2019年1月15日 / 発行人：吉田 滋・石原 安野 / 編集：高橋 恵(ICEHAP)・石川 順一  
デザイン：荒木 未来 / 校正：片岡 聡(Haruniresha, Inc)

©ICEHAP. All Rights Reserved. 本誌掲載の写真・図版・記事等の無断複写・転載を禁じます

