

# NEWS



## さらなる研究推進を目指して

センター長 理学研究科・教授 吉田 滋

宇宙には、光のスピードで降り注ぐ、物理学の言葉で言うならば「エネルギーの高い」物質の束が存在しています。その大半は物質の基本構成要素である陽子で、それは宇宙線と呼ばれています。この中には、目に見える光（可視光）に比べて1,000兆倍以上もエネルギーの高いものがあります。

いわば極限宇宙の産物とも言えるこの宇宙線はどのように作り出されたのでしょうか？

ハドロン宇宙国際研究センターは、この宇宙物理学上最大の謎を解き明かすことを研究ミッションとして掲げています。その具体的手段として、素粒子の一つである「ニュートリノ」を捉えることで極限高エネルギー宇宙の現場を調べる手法を用います。「ニュートリノ天文学」と呼ばれる21世紀の新しい天文学であるこの手法は、宇宙における粒子加速機構を探る決定打として期待されています。試行錯誤のあげく、南極大陸にある氷河を検出体に使おうという野心的な発想が生まれ、10ヶ国国際共同実験「IceCube」プロジェクトがスタートしました。

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターは日本

からの唯一の参加研究機関です。私達は引き続きIceCube実験による観測研究により高エネルギー宇宙線源の同定を目指します。さらにIceCube実験の高エネルギー領域拡張実験であるARA実験の建設によって現時点での超高エネルギーニュートリノ検出効率を10倍に引き上げるという2本柱で研究活動を展開していきます。

宇宙エンジンのメカニズムの理解には観測による研究だけでなく、大規模計算機を駆使した数値実験による手法も大きな助けになります。宇宙自体を実験室に入れてコントロールすることができないからです。

ハドロン宇宙国際研究センターではこの数値実験の手法による研究を並行して推進しています。効率的に電子を加速する機構の数値計算による研究や、宇宙「エンジン」の候補である大輝度天体周辺のプラズマダイナミクスとそれに付随するハドロン粒子・X線放射を数値計算によって解き明かすというターゲットを掲げています。千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターの研究活動とその成果にご期待ください。

吉田 滋

Shigeru Yoshida

ハドロン宇宙国際研究センターの基幹プロジェクトであるアイスクューブ (IceCube) 実験は、南極点直下の深氷河内に1立方キロメートルにわたって、特殊な光検出器を5,160個埋設し、宇宙から飛来するニュートリノと呼ばれる素粒子を検出する10ヶ国共同国際実験です。6年に及び建設を終え2011年5月より完全稼働を開始しました。千葉大学グループが行った解析の結果、可視光の千兆倍 (1 PeV) という観測史上最高のエネルギーのニュートリノが2事象検出され、高エネルギー宇宙ニュートリノが実在する最初の証拠が提示されました。この成果については前号のハドロン宇宙国際研究センターニュースにおいて、解析グループのリーダーであった本学の石原安野特任助教が解説しています。本稿では、この結果をうけて展開された追加解析の結果について解説します。

PeVという超高エネルギーニュートリノの存在は、もう少し低いエネルギー領域において、より多数の宇宙ニュートリノが存在する可能性を示唆します。高エネルギー宇宙ニュートリノは陽子や原子核などから構成される宇宙線生成の副産物として放射されると考えられています。宇宙線のエネルギー分布は「非熱的」と呼ばれエネルギーのべき乗で表される形を示します。この分布ではエネルギーを一桁下げれば事象数も一桁以上多くなります。したがって宇宙ニュートリノのエネルギー分布もエネルギーのべき乗にしたがうのであれば、やはりPeV以下の領域に多数のニュートリノが存在している、と考えるのが自然です。

私達IceCube実験グループもこの事は以前から認識しており、PeVより低いエネルギー領域であるTeV (1 TeVは1 PeVの千分の一) 領域における宇宙ニュートリノ信号の探索を精力的に行っていました。しかし、信号発見には至りませんでした。TeV領域では大気ニュートリノと呼ばれる雑音宇宙ニュートリノの1,000倍以上存在します。また同様の過程で作られる大気ミュオンと呼ばれるミュオン粒子 (ミュオンは電子の兄貴分のような素粒子です) も大強度の雑音になります。これらの雑音を除去するテクニックとして用いられてきた手法は、コンピューターシミュレーションを駆使して、宇宙ニュートリノ信号とこれら雑音事象との間の性質の差異を探し、有意だと思われる幾つかの差異を利用して、統計的手法を駆使するこ

とで雑音を除去するやり方でした。これらの「伝統的な」探索手法は理論的には非常に強力な性能を持つことが分かっていますが、その反面、雑音・信号事象に対する検出器応答を高精度で理解し、その上で大量のシミュレーションデータを生成することが要求されます。前者の問題は解析結果に対する系統誤差の不定性という形で、後者の問題は解析に要する時間が極めて長くなるという形で、迅速なデータ解析の進展と雑音事象の有効な駆除を妨げてきたのでした。

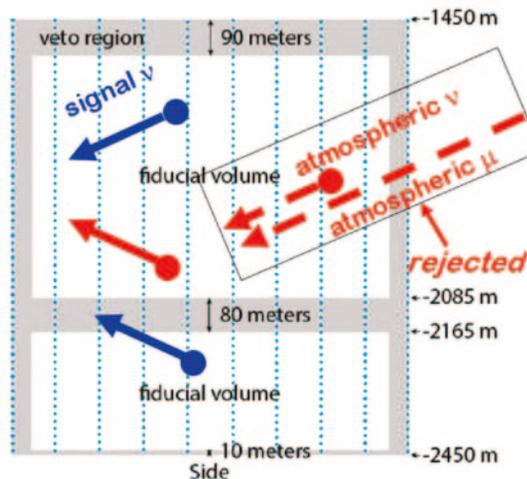


図1：追加解析で採用された雑音事象排除の手法。氷河に埋設された検出器群を横から見た図で氷河表層から深度1,450mから2,450mの領域を切り出して模式的に図示した。水色の丸一つ一つが検出器を示す。赤が雑音事象、青が宇宙ニュートリノ事象。グレーで塗られた「排除検出器 (veto region)」に痕跡を残す雑音事象は排除される。

PeVのエネルギーを持つ2事象は、いずれも「カスケード型」と呼ばれるタイプで、検出器が埋設されている深氷河内にニュートリノが到達したのちに氷河の原子核と衝突し、電磁・ハドロンシャワーを引き起こしたものです (ニュートリノが検出器に到達する前に物質と衝突してミュオン粒子を生成し、そのミュオンが検出器に到達して検出されるタイプはトラック型と呼ばれます)。カスケード型、すなわちニュートリノが検出器埋設容積内で直接反応を起こす事象を、シミュレーション計算に過度に依存せず比較的単純なロジックで弁別し、雑音事象を駆除できないか。追加解析の思想はこうした動機から生まれました。

その仕組みを図1に模式的に示しました。大気ミュオン事象は地表から入射するため、配置検出器の中でも一番外側の層に属する検出器群に最初に痕跡を残す確率が高くなります。もう一つの雑音事象である大気ニュートリノも大気ミュオンを必ず伴うため、事情は同じです。それについて、宇宙ニュートリノ信号はニュートリノ単独で飛来しますからカスケード型に代表される検出器埋設容積内で直接衝突する事象では、外側の層にある検出器群を痕跡を残さず通り抜けます。そこでこれらの検出器群に痕跡を残しながら入射してくる事象を排除すれば多くの雑音を取り除かれます。論理は単純明快であり、雑音事象がこの排除機構をすり抜けて生き残る確率は計算機シミュレーションに全面的に依らずに実験データから決めることができるため、上述の「伝統的な」探索手法の欠点を克服できることとなります。

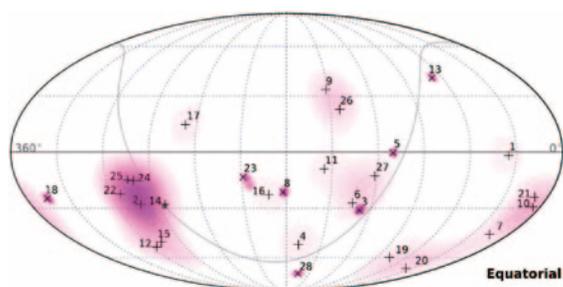


図2：検出された28事象の天球分布。それぞれの事象の到来方向が+またはxで表されている。紫の色は、それぞれの事象の角度決定誤差を考慮して、完全に一様な到来方向分布からの偏差がある領域を示している。統計的に有意な偏差は無かった。

追加解析の結果、28事象が30TeV以上の領域で同定されました。期待される雑音事象数は $10.6+5.0-3.6$ で4.1シグマの有意性で、宇宙ニュートリノ事象が同定されました。エネルギー分布は予想通り非熱的でエネルギーのマイナス2乗程度の冪で表せます。ただし統計的誤差はまだ大きく、定量的な議論を正確に行うにはもう少し事象数が必要です。図2に28事象の到来方向の天球分布を示します。特に顕著な異質性はありませぬ。最も率直な解釈は銀河系

外起源であると考えますが、やはり統計精度をもう少し上げることが確実な議論を展開するためには必要です。観測データを更に追加しより多くの事象を捉える努力がグループ内で進行中です。

追加解析により高エネルギー宇宙ニュートリノの様相が徐々に明らかになりはじめました。しかしこの手法には欠点もあります。「カスケード型」の事象は到来方向の分解能が悪く（10度から20度程度）、天体の同定には不向きです。角度分解能が1度以内の「トラック型」の事象同定が必要です。また30TeV以下の領域では追加解析の手法による雑音排除能力は十分ではなく、未開拓の領域です。このいずれの欠点も「伝統的な」解析手法を洗練させることで克服できる見込みが立ってきました。実験データを評価するために必要な理解が進んできたことが背景にあります。伝統的な「カスケード型」および「トラック型」事象探索の解析も進行中です。

ここで紹介した解析手法のもう一つの重要な問題点は、PeVを超える超高エネルギー領域では感度が上がらないことです。PeVを超える宇宙ニュートリノ事象は、宇宙物理学の長年の謎である超高エネルギー宇宙線起源を理解する切り札です。最初の発端であったPeVニュートリノ2事象の発見は、1,000PeV（1 EeV）以上にも達する可能性もある超高エネルギー宇宙ニュートリノの探索解析によるものです。しかしPeVをはるかに超える事象はまだ発見されていません。超高エネルギーニュートリノ解析は我々日本グループの旗印です。最新のデータを追加し、探索手法に改善を加えることで、約2倍の感度でニュートリノを探索できる見込みが立ちました。この解析も現在進行中であり、今年中に結果を報告する予定です。

IceCube実験により高エネルギー宇宙ニュートリノの存在が明らかになりました。最も興味深いエネルギー領域であるPeV, EeV領域の感度を格段に上げるためにIceCube実験を超える将来計画も議論され、その一部はARA実験として開始されました。本学ハドロン宇宙国際研究センターでは、これら新しい実験のためのハードウェアの開発にも従事しています。今後の展開にご注目ください。

松本 洋介 *Yosuke Matsumoto*

地球大気には常に宇宙から高エネルギーの粒子が飛び込んできています。このような高エネルギー粒子を宇宙線と呼び、いまから100年ほど前にV. F. Hess（ヘス）によって発見されました。その起源や加速メカニズムは、未だ解決されない宇宙物理学に残された大きな問題の一つであると言えます。人工衛星による観測などによって、その起源はある程度絞られてきており、超新星爆発の成れの果てである超新星残骸衝撃波や、AGNジェットやガンマ線バーストなど、相対論的な速度を持つジェットに付随する衝撃波、などにおいて荷電粒子（陽子、電子）が加速されていると考えられ、衝撃波が重要な役割を果たしていると考えられています。

衝撃波における荷電粒子の加速機構として衝撃波統計加速（一次フェルミ加速）が標準理論として知られています。この理論は、荷電粒子が衝撃波の上・下流に存在する電磁場によって散乱されることにより、何度も衝撃波面を横切りながらエネルギーを獲得するというものです。しかし、特に、磁場に強く巻き付く電子を散乱させるのは難しく、また、高エネルギー粒子を散乱できるような大振幅の電磁場擾乱が衝撃波上・下流に存在しうるのか、といった理論的問題が残されており、我々はこの問題に対して数値シミュレーションによる手法で取り組んでいます。

熱的な粒子群から非熱的な高エネルギー粒子が生成されるといった過程を明らかにするためには、多数のプラズマ粒子の運動を追跡しながら電磁場の時間発展を計算する大規模な数値計算が要求されます。そこで我々は、超並列スーパーコンピュータ上で効率的に実行できる数値コードを開発し、無衝突プラズマ衝撃波の構造とそれに伴った粒子の加速メカニズムを明らかにしてきています。図1に示すのは、これまで探ることができなかった、超高マッハ数衝撃波の2次元構造で（図上段、イオン密度空間分布）、100億個のプラズマ粒子の運動を解くことで明らかにすることができました。

高マッハ数衝撃波では、イオン（陽子）の一部が衝撃波面で反射され上流に遡るといった、粒子的な振る舞いをすることが知られていました。極限的に強い衝撃波では、この「反射イオン」が、様々なプラズマ不安定性を励起して、衝撃波におけるエネルギーの再分配（散逸）過程において重要な役割を果たします。反射イオンは、衝撃波遷移領域先端で電子スケールの非常に強い電場を励起し（図中段

右）、また同時に衝撃波遷移領域ではイオンスケールの強い磁場の擾乱を生成することがわかりました（図中段中央）。さらに、衝撃波面では、波面に沿った電子スケールの電場が励起されていることがわかりました（図中段左）。その中で、電子は、特に衝撃波上流の電子スケールの強い電場と相互作用することで、衝撃波面に到達する前に一気にエネルギーを獲得していることが明らかになりました。結果として、高エネルギー粒子で形成される非熱的成分を持った電子の統計的エネルギー分布がすでに衝撃波上流で形成され（図下段右）、さらに衝撃波下流では非熱的粒子の最高エネルギーがローレンツ因子で10以上となる相対論的エネルギーに到達していることがわかりました（図下段左）。

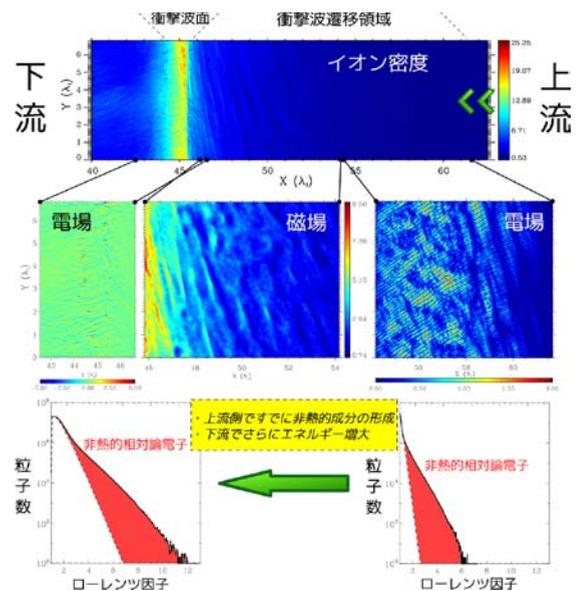


図1：2次元衝撃波構造中の電磁場擾乱と非熱的相対論電子生成

このように、電子が“ある程度”加速されることがわかりましたが、それ以上のエネルギーに達する加速メカニズムの解明は依然、課題として残されています。宇宙線エネルギーまでたどり着くためには、冒頭で紹介した衝撃波統計加速機構が働く必要があると考えられますが、そこまで示すことができていません。現在、ある程度加速された電子が更に大きなエネルギーを獲得する様子を明らかにすることを目指して、スーパーコンピュータ「京」を用いた3次元プラズマ粒子シミュレーションによる研究が始まっています。

## 文部科学省特別経費（プロジェクト分）採択

ハドロン宇宙国際研究センターから申請していた文部科学省特別経費（プロジェクト分）「極高エネルギーニュートリノ観測の国際展開」が採択されました。検出器開発費等に加えて特任教員、事務補佐員等の経費がサポートされます。

## ニュートリノ天文学部門よりお知らせ

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターニュートリノ天文学部門は、日本学術振興会科学研究費（基盤研究S）助成により、2013年度より新たに6年計画として研究活動を展開することになりました。装置建設が終了し、全検出器が稼働を始めたIceCube実験による超高エネルギー宇宙ニュートリノの測定及び、IceCube実験の高エネルギー領域拡張実験であるARA実験の建設によって現時点での超高エネルギーニュートリノ検出効率を10倍に引き上げるという2本の柱で研究活動を展開していきます。

2本の柱ではありますが、それぞれは独立ではなく相互に密接しています。ARA実験は南極点にあるIceCube実験サイトに隣接した場所に建設されます。検出原理がIceCube実験と異なるため、IceCube実験による観測・測定結果と比較しながら進めていくことが重要です。両者を的確に組み合わせることで、我々日本グループはPeV(可視光の10億倍のそのまた100万倍)からEeV (=1,000 PeV) という極限高エネルギー領域における宇宙ニュートリノを観測し、宇宙物理学における最重要課題の一つである「粒子を光速に加速する宇宙エンジンの起源」を理解することを目指していきます。このために極限高エネルギー領域にある宇宙ニュートリノの量を決定し、ニュートリノ到来方向分布を描画します。ニュートリノの量は、宇宙開闢以来、宇宙エンジンがどのような歴史を辿ったのかを探る指標になります。その歴史が分かればエンジンのメカニズムについて重要な示唆を得ることができます。遠方の宇宙探査に力を発揮するニュートリノの真価が発揮されます。到来方向からは放射天体の同定が可能となります。より角度分解能の良い伝統的な電磁波観測との同期観測が天体同定には有利ですので、世界のγ線望遠鏡と連携するための準備も始めています。

この目標に向かって、検出装置製作から観測データ解析に至る様々な活動を行っていく予定です。その進捗状況についても随時、ICEHAPニュースでご紹介していきたいと思えます。

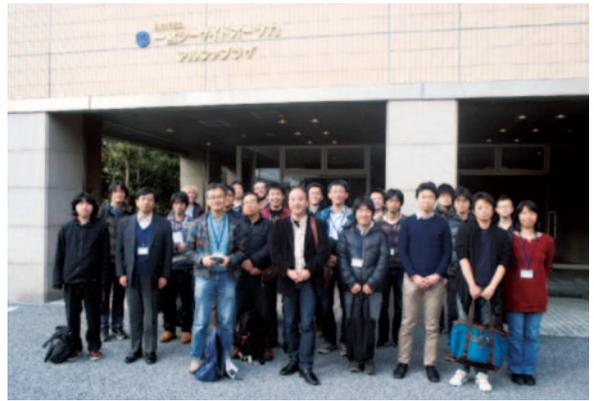
IceCube/ARA 実験日本グループ代表 吉田 滋

## 2013年の主な出版論文リスト

- ・ IceCube Collaboration: [A.Ishihara](#), [K.Mase](#), [S.Yoshida](#), et al. ; First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube, Physical Review Letters, 111,021103 (2013)
- ・ IceCube Collaboration: [A.Ishihara](#), [K.Mase](#), [S.Yoshida](#), et al. ; Probing the origin of cosmic-rays with extremely high energy neutrinos using the IceCube Observatory, Physical Review D88, 112008, 15 pages (2013)
- ・ IceCube Collaboration: [A.Ishihara](#), [K.Mase](#), [S.Yoshida](#), et al. ; Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector, Science 342, 1242856 (2013)
- ・ [Y.Matsumoto](#), [T.Amano](#), [M.Hoshino](#); Electron acceleration in a nonrelativistic shock with very high Alfvén Mach number, Physical Review Letters, 111, 215003 (2013)



宇宙磁気流体・プラズマシミュレーション  
サマースクールを開催しました。  
2013年8月5日～8月9日  
会場：千葉大学統合情報センター



ICEHAPワークショップ  
Cosmic Neutrino PeVatron (NuPeV 2014) を開催しました。  
2014年2月17日～2月19日  
会場：ホテルシーサイドオーツカ

## ICEHAP New Members



**Romain Gaior**

I am Romain Gaior, I work on IceCube and ARA experiments, both of them focused on high energy neutrino search.

I was formerly working for the Pierre Auger Observatory, on a cosmic ray radio detection experiment called EASIER.

The main topic of my research is the understanding of the very end of the cosmic ray spectrum.



**桑原 孝夫**  
Takao Kuwabara

I am a new member of ICEHAP from January of this year.

I have worked with various cosmic ray detectors since I was a student. I joined the IceCube collaboration during my former career as a researcher at University of Delaware, USA.

My research topic there was solar heliospheric physics. Now I'm jumping to neutrino physics and spending quite a lot of exciting time with great members here.



**Matthew Relich**

My name is Matthew Relich and I am a new postdoctoral researcher working on the IceCube and ARA experiments.

Before arriving in Chiba, I was a part of the ATLAS collaboration at CERN, primarily searching for exotic particles pertaining to very heavy neutrinos and Dark Matter.

I am very excited by the prospects of studying the most energetic particles created in nature, and in particular seeing if the most elusive particle, the neutrino, has any more secrets to reveal to us.

# ICEHAP NEWS

June, 2014 No. 2

千葉大学大学院理学研究科附属 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/>  
[問い合わせ先] [icehap@astro.s.chiba-u.ac.jp](mailto:icehap@astro.s.chiba-u.ac.jp)



**CHIBA**  
UNIVERSITY