

📡 ハドロン宇宙国際研究センター アイスハップ ニュース



# ICEHAP

NEWS International Center  
for Hadron Astrophysics Feb. 2016 no. 3

## オーロラとアイスキューブ実験制御室

極寒の南極に輝くオーロラは、太陽の昇らない漆黒の冬の灯火です。南極点アムゼン・スコット基地における長い冬には、オーロラにかすかに照らされたアイスキューブ実験制御室を見ることができます。







ニュートリノ天文学部門

## ニュートリノ観測が語る 超高エネルギー宇宙線の起源

センター長 理学研究科・教授  
吉田 滋

### 超高エネルギー宇宙線起源の定説に見直しを迫るIceCube実験

アイスクューブ (IceCube) 実験は、2012年に最初の宇宙ニュートリノ信号を捉えて以来、着々と観測結果を積み重ねてきました。その発端となった最初の宇宙ニュートリノ信号同定は、PeV (=10<sup>15</sup>eV) 以上の超高エネルギー領域での宇宙ニュートリノ探査によるものでした。

100 EeV (可視光の20桁上のエネルギー) にも達する最高エネルギー宇宙線陽子は宇宙背景輻射\*<sup>1</sup>と衝突しGZKニュートリノと呼ばれる2次ニュートリノを生成し、PeVからEeV (=1000 PeV) にかけてのエネルギー帯における宇宙ニュートリノの主要成分を構成します。超高エネルギー宇宙線の起源は、宇宙線の莫大なエネルギーを考慮すると、中心に巨大なブラックホールを持ち粒子をジェット上に吹き上げる巨大銀河 (AGN) か、短時間に多数のγ線を吐き出すγ線バースト天体 (GRB) の何れかと目されてきました。

遠方宇宙により多く存在するこの種の天体からも、貫通力に優れたニュートリノはエネルギー損失せずに地球まで飛来するため、GZKニュートリノの総量はIceCube実験の感度にかかる量に届くことが分かっています。この探査を主導する千葉大グループはこのほど2012年発表の解析をアップデートし2014年5月までの6年間のデータを用いた結果を発表しました。データ量は約2.5倍に増え、解析手法にも新たな工夫を施すことで、GZKニュートリノの検出が現実味を帯びていました。

今回の結果では新たに PeV 程度のエネルギーを持つ事象が一つ見つかりました。しかし EeV のエネルギーを持つような 明白な GZK ニュートリノの候補は無かったのです。AGN や GRB のような、遠方宇宙に多く見られるアクティブ天体は最高エネルギー宇宙線起源ではないという結論になります。

超高エネルギー宇宙線起源の定説に疑問符が付きました。一方で最高エネルギー宇宙線が陽子ではなく原子核ならば、GZK ニュートリノの量は極めて少なく IceCube 実験での観測にはかかりません。これがもう一つの有力な可能性です。この場合でも、宇宙線放射天体自身から

図1

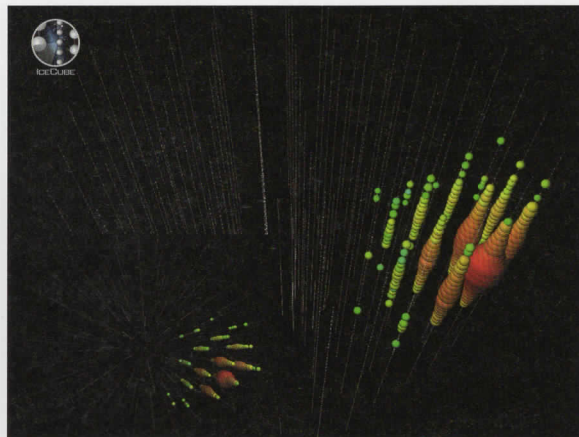


図2

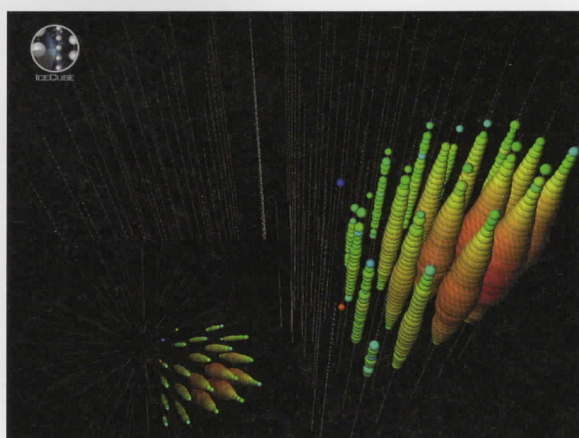


図1：2014年5月までの6年間の観測データ解析により発見されたPeVイベント事象。氷河内に埋設された検出器の位置が白点で示されている。ニュートリノ衝突によって生じたチェレンコフ放射光が氷河内を走り各検出器によって捉えられる。色のついた丸の大きさが、該当検出器で測定された光子の数を表している。赤から青への色の違いは信号検出タイミングを示し、赤が時間的に早く検出された信号群である。約150メートル立方に渡って光が到達している巨大なイベントである。

図2：もしGZKニュートリノのようなPeVをはるかに越えるエネルギーの事象であれば、この図のようにさらに多くの放射光がニュートリノ衝突により観測される。このイベントはコンピュータシミュレーションにより生成された。実際に発見された事象は、これほどまでの巨大発光を伴っていないため、GZKニュートリノ起源仮説は否定された。実際の判定確率計算は、もう少し複雑なステップを踏むが、こうしたチェレンコフ光量の違いが仮説検定において大きな役割を果たしている。

放射される宇宙ニュートリノは存在するはず (遠方のAGNであるクエーサー天体\*<sup>2</sup>はその有力候補です)。このニュートリノは超高エネルギー帯でのこれからの探査で検出される可能性があります。この信号を検出し放射天体を他の望遠鏡との連動観測で同定しようと考えています。この話題は次号のICEHAPニュースに掲載します。

\*1 宇宙背景輻射=別名をマイクロ波背景放射といい、ビッグバン(大爆誕)から出た光のなごりで、2.725Kの黒体放射の電磁波。

\*2 クエーサー天体=非常に離れた距離に存在し極めて明るく輝いているために光学望遠鏡では内部構造が見えず、恒星のような点光源に見える天体のこと。





ニュートリノ天文学部門

# 超高エネルギーニュートリノ望遠鏡 ARAの氷中電子ビームによる較正

理学研究科・助教  
間瀬 圭一

## 謎に満ちた

## 超高エネルギー宇宙線の起源を求めて

今までに $10^{20}$ eVを超える非常にエネルギーの高い宇宙から飛来する粒子（宇宙線）が観測されています。この超高エネルギー宇宙線はガンマ線バーストや活動銀河核等の宇宙の中で起こる高エネルギー天体現象の中で加速されていると考えられていますが、その起源や組成等は良く分かっていません。このような超高エネルギーの宇宙線が宇宙を伝搬する際に宇宙を<sup>びまん</sup>瀰漫する3 Kの宇宙背景放射\*1と必ず相互作用し、超高エネルギーのニュートリノが作られることが分かっています。ですから、この超高エネルギーのニュートリノを検出することで、謎に満ちた超高エネルギー宇宙線の起源に迫ることができます。しかしながら、ニュートリノは殆ど物質と反応しないので、その検出には巨大な大きさの検出器が必要になります。このため現在南極にて100kmという非常に巨大な超高エネルギーニュートリノ望遠鏡ARAを建設中です。



アメリカ、ユタ州で行われたARA望遠鏡較正実験の様子。中央にあるコンクリートブロックに覆われているのがTA実験の電子加速器。40 MeVの電子が上方に放出される。そのブロックの上に小さく見えているのが水標的。電子が水中を通ると電波が放出される。この電波をARA望遠鏡のアンテナで観測した。



実験終了後、共同実験者（一部）と記念撮影。

## ユタ砂漠でARA望遠鏡を較正

ARA望遠鏡はニュートリノが南極の氷河と反応した際に発せられる電波信号を検出します。この電波信号は発生時に干渉効果により信号が増幅され、また南極氷河中では1kmも伝搬するので、ニュートリノを観測するのに最適です。ニュートリノ事象から発せられる電波信号強度は電磁気学の知識を基に理論的に計算可能ですが、観測結果を確固たるものとするためには実験を行い検証する必要があります。南極氷河中でニュートリノ事象を擬似的に作り出すことはできないために、アメリカ、ユタ州にあるTelescope Array (TA)\*2実験が持つ40 MeVの電子ビームを氷に照射し、擬似的にニュートリノ事象を再現しました。実際に電子が氷を通ると電波が発生することが確認されました。現在、取得したデータを詳細に鋭意解析中です。

\*1 宇宙背景放射＝およそ138億年前の宇宙の大爆発（ビッグバン）から出た光のなごりで、電磁波として宇宙のあらゆる方向から地球に飛んできている。

\*2 Telescope Array (TA) 実験＝実験＝日米露韓・ベルギーの国際共同実験で、米国ユタ州の荒れ地に観測装置を設置し、最高エネルギーの宇宙線を観測している。





プラズマ宇宙研究部門

# 天体衝撃波における 高エネルギー電子生成機構の新理論

理学研究科・特任助教  
松本洋介

## 宇宙線がどうやってできるのか？

超新星爆発の名残である超新星残骸やブラックホールから飛び出すジェットなどの天体における爆発現象は、電波からX線・ガンマ線にわたる様々な波長の電磁波で明るく輝いています。これらの電磁波は、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。超新星残骸の場合もジェットの場合も、中心天体から宇宙空間に超音速で放出されたガスが星間ガスと相互作用して衝撃波を作るため、相対論的電子は衝撃波において生成されていると考えられていますが、その具体的なメカニズムは解明されていません。

我々は、超新星残骸衝撃波を始めとする天体衝撃波の波面で磁気リコネクションと呼ばれるプラズマ過程が起きることで、電子が効率的に加速されることを発見しました。スーパーコンピュータ「京」が有する高い計算能力を使って、これまでにない高解像度のシミュレーションを行ったところ、衝撃波面で一部のプラズマが上流に向かって反射されることで、長く伸びた磁場の反転構造が作られ、その構造の中で磁気リコネクションが発生して磁場の塊が噴出することが明らかになりました(図1上段)。衝撃波に埋め込まれた小さなスケールで磁気リコネクション\*1があちこちから起きることで、ランダムに運動する磁場の塊がたくさん現れます。この磁場

の塊と電子が繰り返し衝突することで、高エネルギーの電子が作られることが明らかになりました。

## スーパーコンピュータで答えを探す

このような、粒子が散乱体と衝突を繰り返しながらエネルギーを獲得するメカニズムは、1949年にイタリアの物理学者エンリコ・フェルミによって提唱され、現在ではフェルミ加速\*2として知られています。今回の研究ではこのフェルミ加速のメカニズムが、衝撃波では磁気リコネクションを介して極めて有効に働くことを、大規模シミュレーションによって初めて見出しました。

この新しい加速メカニズムを含め、高エネルギー電子がどのような状況で最も効率良く生成されるかを明らかにすることは、今後の課題です。スーパーコンピュータ「京」の計算資源をさらにフル活用して、現在その解明を目指した研究に取り組んでいます。

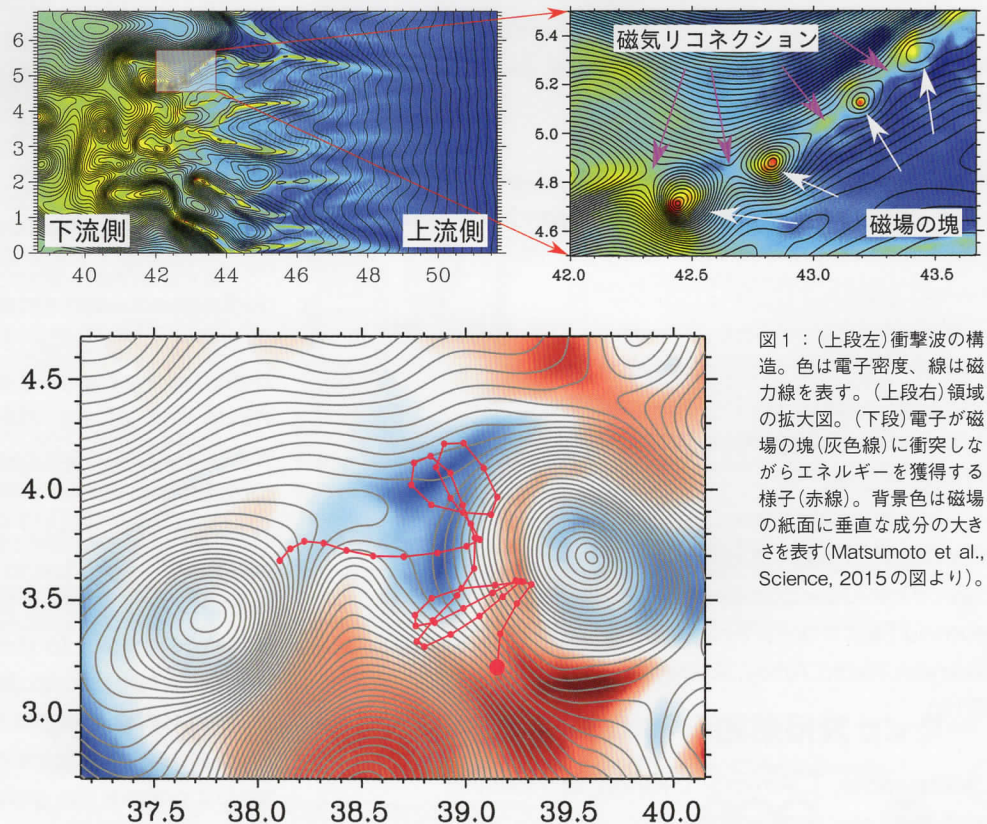


図1：(上段左)衝撃波の構造。色は電子密度、線は磁力線を表す。(上段右)領域の拡大図。(下段)電子が磁場の塊(灰色線)に衝突しながらエネルギーを獲得する様子(赤線)。背景色は磁場の紙面に垂直な成分の大きさを表す(Matsumoto et al., Science, 2015の図より)。

\*1 磁気リコネクション=磁力線がつなぎ換わる現象。太陽のフレアや地球の磁気圏の尾部などで、この磁力線リコネクションが起こると、磁場エネルギーが解放され、プラズマの熱や運動エネルギーに変換されると考えられている。

\*2 フェルミ加速実験=宇宙線に含まれる高エネルギー粒子の加速機構としてエンリコ・フェルミが提案した機構。2種類あるがいずれも磁場を伴っている星間空間によって加速が行われる。



### ICEHAP ニュースが リニューアルしました

3号をむかえるにあたって、新たな紙面にリニューアルしました。これまでより一層充実した内容で、皆様に親しまれるニュースレターにしていきたいと思いをします。

### ICEHAP よりお知らせ

このたび、本センターは「千葉大学戦略的重点研究強化プログラム」の一つに採択されました。

大学として重点的に研究活動を支援する6大研究分野の一つとして、アイスキューブ実験等による高エネルギーニュートリノ天文学とスーパーコンピュータによる宇宙プラズマ研究を推進していくこととなります。今後ともよろしくお願いたします。

### 2015年の主な論文

#### 本センターから昨年出版された主要な論文です

- IceCube Collaboration: A.Ishihara, K.Mase, S.Yoshida et al.; A Combined Maximum-Likelihood Analysis of the High-Energy Astrophysical Neutrino Flux Measured with IceCube, *Astrophysical Journal*, 809, 98 (2015)
- IceCube Collaboration: A.Ishihara, K.Mase, S.Yoshida et al.; Evidence for Astrophysical Muon Neutrinos from the Northern Sky with IceCube, *Physical Review Letters*, 115, 081102 (2015)
- IceCube Collaboration: A.Ishihara, K.Mase, S.Yoshida et al.; Flavor Ratio of Astrophysical Neutrinos above 35 TeV in IceCube, *Physical Review Letters*, 114, 171102 (2015)
- ARA Collaboration: A.Ishihara, K.Mase, S.Yoshida et al. ; First Constraints on the Ultra-High Energy Neutrino Flux from a Prototype Station of the Askaryan Radio Array, *Astropart.Phys.*, 70, 62-80 (2015)
- Y. Matsumoto, T. Amano, T. Katoh, M. Hoshino; Stochastic electron acceleration during spontaneous turbulent reconnection in a strong shock wave, *Science*, 347, DOI: 10.1126/science.1260168, (2015)

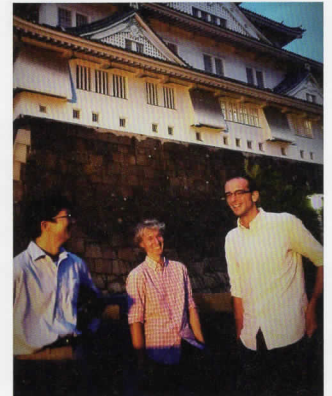
### Message from Romain

#### 先日フランスへ帰国したRomain研究員が 2年間の日本での思い出を語ってくれました

I spent the last two years in the IceCube/ARA group at Chiba University. I arrived as a French student, freshly graduated from Paris University, landing in Japan for the first time. Here are my tentative words to expose my work experience there, but of course these words will be also tinted with my life experience.

First of all, working in Japan is an incredibly interesting experience I would advise anyone to live. I discovered a lot about another culture and consequently a lot about myself and my own culture. More specifically, the high energy neutrino study is a bridge connecting two strong fields in Japan: the high energy cosmic ray and the neutrino activities. However, the group in Chiba is the only one in Japan working on this topic on the experimental side but has managed to be more than reckoned in the Japanese astroparticle community. Similarly, this group is known in the international collaborations it belongs to, even if it can be a little lonely in Japan. Thus, working in this group required a strong involvement. As a postdoctorate, this commitment was made natural on one side by leadership of the seniors and the impressive dedication of the students and on the other side by the cutting edge research conducted. More importantly, the very close relationship maintained inside the group, thanks to dinners and 飲み会 so specific to Japanese culture, helped in the most difficult moments.

In conclusion, even if sometimes communication can be difficult due to language or cultural subtleties, problems are resolved and work is achieved thanks to the irreplaceable patience and kindness specific to Japanese people. I would like to thank the people I met at Chiba University who have always welcome me, and of course the group where I tied truthful friendship, that will hopefully continue through research and beyond. I will miss Japan.



研究員の仲間と (右: Romain 研究員)

*Romain Gaior*



# 01 ICEHAP 主催研究会

## 公開講演会「Cosmic Café」開催!

参加無料 (事前申込は不要です)

日時: 2016年3月27日(日)  
13:00開場 13:30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: 中学生以上の一般の方

第1部 13:30 ~ 15:40

【研究者から皆さんへ】最新の宇宙研究報告



南極からニュートリノで  
宇宙を覗く  
理学研究科・助教  
間瀬 圭一(千葉大学)

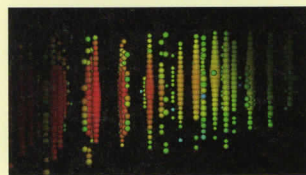
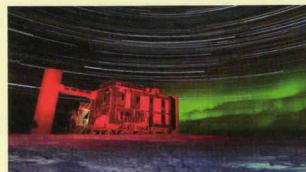


スーパーコンピュータの  
中の太陽  
理学研究科・特任助教  
堀田 英之(千葉大学)

第2部 16:00 ~ 17:30

【カフェタイム】研究者と宇宙トークで盛り上がりましょう!

千葉大フードコートにて、お茶やお菓子をお供に宇宙に  
想いを馳せるひと時はいかがですか。



# 02 Magazine

## ニュートン別冊に 吉田センター長の記事が掲載されました

2月5日発売のニュートン別冊「物理学をゆるがすニュートリノ」に、  
吉田センター長のテキストが掲載されました。ぜひご覧ください。



# 03 NEW MEMBERS!

新しい仲間が加わりました!

堀田英之 HIDEYUKI HOTTA



デニュアトラック特任助教  
として2015年7月より新し  
くICEHAPのメンバーとな  
った堀田英之です。私は主  
に大規模計算機を用いた太陽  
熱対流と磁場に関する研究  
をおこなっています。

千葉大学に来る以前は日  
本学術振興会海外特別研  
究員としてアメリカにある  
NCARのHigh Altitude

Observatoryで働いていました。そこで共同研究者と共に音速抑制法  
という新しい研究法を開発しました。音速抑制法ではこれまで太陽内部  
研究で使われていた方法と違い多量のCPUを効率的に使うことができま  
す。この方法を用いて我々はすでに世界で最も解像度の高い数値計算を  
いくつか実行しています。

ICEHAPの一員として、さらに太陽内部研究を発展させ長らく太陽  
物理最大の謎となっている黒点数11年の謎の解決に挑みたいと考えて  
います。

Lu Lu



IceCube experiment (Gen2).

This new module will help to achieve the unique and fruitful physics  
goals of Gen2 such as the search for the electron neutrinos at the  
energy of the Glashow resonance. Chiba University is playing the  
leading role of research and development and I will continue the work  
for Gen2 in the coming year and also hope to study hadronic  
interactions using IceCube data.

Hello, my name is Lu Lu and joined  
the Chiba IceCube group in January  
2015.

I was working in the UK and Germany  
during my PhD and was looking for  
the highest energy photons in the  
universe using data from the world's  
largest cosmic-ray experiment  
(Pierre Auger Observatory in  
Argentina). After I arrived in Japan I  
focused on developing a new optical  
module for the future upgrade of

## 最近の アイスキューブ



IceCube

2010年12月18日アイスキューブ  
検出器の最後の光検出器が南  
極の氷河に埋まりました。この7  
年かけた建設から、アイスキュー  
ブ検出器は、この12月で完成5  
周年を迎えました!現在も99%  
以上の稼働率で南極の氷のなか  
で元気に動いています。

## 最近の南極



冬季の南極点は静かです。冬の  
間は2人の越冬メンバーが南極  
点の基地でアイスキューブ実験  
のメンテナンスを行っています。  
しかし南極の夏である11月にな  
ると、2月までの短い夏の間で  
できる限りの研究をするため研究  
者が押し寄せ、一気ににぎやかに  
。今シーズンも無事に新たな越冬  
メンバーが南極点に到着しまし  
た。彼らが次に氷河の上から離  
れられるのは今度の11月!

## 最近の センター長



近頃、運動不足です。また、大学  
の周りを走ります。