



ICEHAP

NEWS

International Center
for Hadron Astrophysics

Mar. 2017 no. 6

南極の夏・ARA実験 新型アンテナの現地実施試験

研究者らが集まる11月～2月の南極の夏季には、アイスキューブ観測施設でもあちこちで実験を行う姿が。写真は、次世代ニュートリノ観測実験ARAの新型細径アンテナを南極の環境下で実施実験している様子です。実験を行う前には、チームの仲間はもちろん、チーム以外の人たちにも協力を募り、何メートルもの深さの穴を用意するための雪かきをします。





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の新型アンテナの南極における試験

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粒子が宇宙から飛来してきているのが観測されています。この粒子は宇宙線と呼ばれ、特にエネルギーの高い 10^{19} eVを超える超高エネルギー宇宙線は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。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は宇宙を伝搬する間に宇宙を瀰漫するビッグバン由来の3Kの宇宙背景放射と相互作用し、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宇宙線由来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。特に、超高エネルギー宇宙線はこの反応によってエネルギーを失うため、約1億光年を超える場所からは地球に届きませんが、この反応により生成されるニュートリノは宇宙深部からも到達可能であり、超高エネルギー宇宙線の宇宙における進化の歴史を探る事ができます。

超高エネルギー宇宙線からの 超高エネルギーニュートリノの 世界初観測を目指す

超高エネルギーニュートリノのフラックス*1自体が低いと、ニュートリノは殆ど物質と反応しないため、その検出には非常に大きな検出器が必要になります。このため現在南極にて 100km^2 という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。独立に動く全37ステーション完成時には、このARA望遠鏡*2の超高エネルギーニュートリノに対する感度は現在最も感度の良いIceCube望遠鏡の約10倍に達する予定です。 10^{17} eVを超える超高エネルギーニュートリノからの電波信号は電波の干渉効果により可視光の信号よりも大きくなります。また、電波の南極氷河中での減衰長は約1kmで、可視光のものよりも約10倍長く、信号が減衰せずに遠

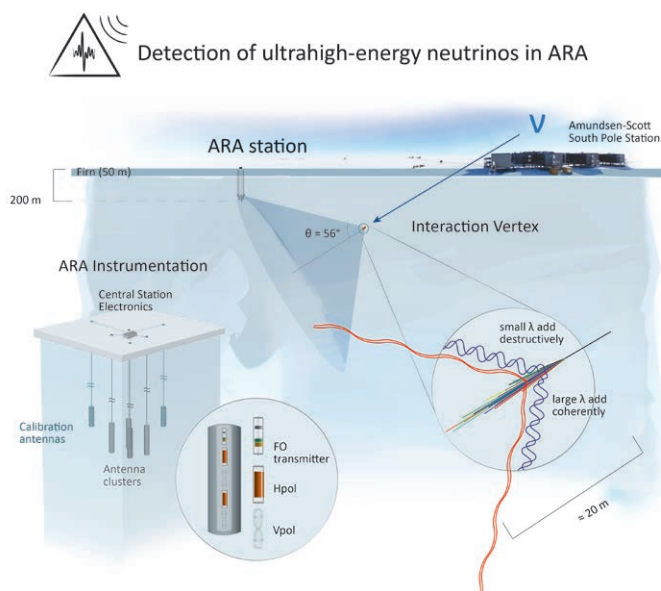


図1: ARA望遠鏡によるニュートリノ検出の概略図。ニュートリノが物質(氷)と反応した際に放出される電波領域におけるチェレンコフ光*3を南極氷河中に埋められたアンテナにより検出する。

方まで届きます。このため超高エネルギー領域では電波信号がニュートリノを検出する最適な信号となります。このためARA望遠鏡はアンテナを用いてニュートリノ由来の電波観測を行います(図1参照)。また減衰長が1kmと長いので、検出器を約1km間隔で設置する事が可能であり、非常に大きな検出器を比較的安価に作る事ができます。これにより未だに観測されていない超高エネルギー宇宙線由来の超高エネルギーニュートリノの世界初観測を目指します。

新型細径アンテナの開発

ARA望遠鏡の建設を更に推し進めるために千葉大学では新型細径アンテナを開発中です。建設の一つのボトルネックが氷の掘削です。ARA望遠鏡のアンテナは南極氷河中200mの深さに設置されています。また1つの縦穴を掘削するのに約10時間かかっています。この掘削時間を短縮するために、アメリカの共同研究者がRapid Air Movement(RAM)掘削機という空気圧を用いた新型の掘削機を開発していました。このRAM掘削機を用いると深さは50mしか掘れませんが、1つの

*1 フラックス 流束(単位時間単位面積あたりに流れる量)のこと

*2 ARA望遠鏡=Askaryan Radio Arrayの略。ニュートリノが水分子と反応した際に放射されるチェレンコフ光のうち、電波領域の電磁波を検出しニュートリノを捕える。



図2: ARAオリジナルアンテナ(右上)と千葉大学で新たに開発した細型アンテナ(左下、古河C&B製作)

穴を掘るのは僅か30分足らずですみ、これにより建設時間並びに建設コストを大幅に削減できます。しかし、従来の穴の大きさは直径15cmでしたが、このRAM掘削機により開けられる穴の直径は10cmで、この小口径の穴に合うサイズのアンテナを開発する必要がありました。千葉大学ではまずシミュレーションにより、アンテナを細くしながらできるだけオリジナルの感度を維持するようにアンテナ形状を最適化し、図2に示すような細型アンテナを製作しました。

南極での実地試験

アンテナの性能は周りの媒体によって少なからず影響を受けます。実験室においてアンテナの周囲を氷で囲うのは難しいので、氷中での新型細径アンテナの性能を測定するために実際に南極に赴きました。南極は一面の雪景色で非常に美しい場所でしたが、その一方、体感気温は -40 度を下回り、装置も思うように動かず、私が今までで体験した中でも一番に厳しい環境でした。また、6年前にRAM掘削機により開けられた穴は新しく降った雪により約1.5m程度下に埋まっており、まずはその穴を雪かきをして探し出すという事から始めなければなりません。20m程度離れた2つの穴を3日かかりで探しだし、2つのアンテナを各穴に入れ、ネットワークアナライザを用いてアンテナの性能(反射ゲイン)を測定しました(図3参照)。図4に南極で測定した新型細径アンテナのゲイン並びに千葉大学における空気中での測定結果を載せました。南極での測定結果は少し不定性が大きいように見えるものの、空気中での測定との合いも良く、貴重なデータが得られました。今後は氷中でのシミュレーションも行い、測定結果と比較し、氷中でのアンテナの性能を求めた後にシミュレーションによりニュートリノ事象に対する感度を見積もる予定です。



図3: ARA新型細径アンテナの南極での実地試験の様子。約1.5mもの雪かき後に以前に開けられたRAM掘削機による穴を発見。

今後の計画

現在3ステーションからなるARA望遠鏡ですが、今年末にさらに3ステーション建設予定です(オリジナルアンテナを用いる)。これにより超高エネルギーニュートリノに対する感度はIceCube望遠鏡を凌駕します。その建設に向けたケーブル設置作業も今回南極に行った際に行ってきました。これと平行して細径アンテナの開発もさらに推し進め、ARA建設の早期実現、超高エネルギー宇宙線由来の超高エネルギーニュートリノの世界初観測を目指します。

あまり南極に関するお話しができませんでしたが、とにかく寒いところでした。毎日雪かきをしたり、軽い凍傷になったりと色々大変でした(5キロ痩せました!)。その話はまた別の場所でお話したいと思います。

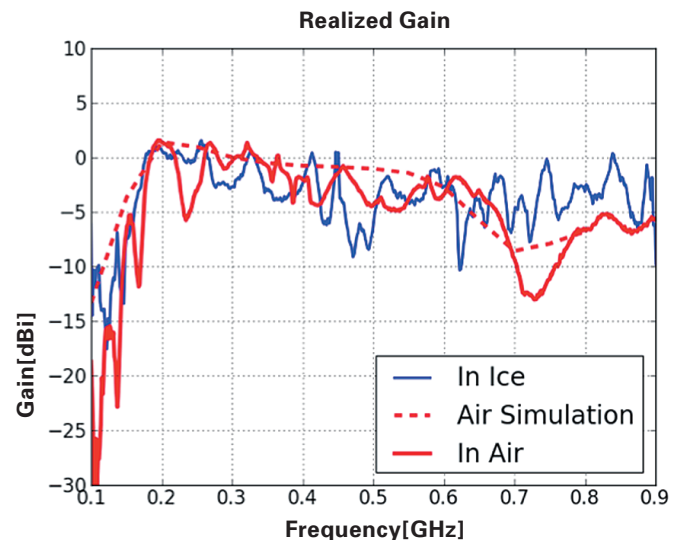


図4: 細径アンテナのゲイン。赤線は空気中、青線は氷中での値、また実線が測定値、破線がシミュレーションを表す。



プラズマ宇宙研究部門

スーパーコンピュータによる、宇宙初期から現在にいたる世界最大規模のダークマターシミュレーション

統合情報センター 准教授
石山 智明

ダークマターに満たされた宇宙

宇宙には、われわれが直接見ている原子などの物質のほかに、ダークマターと呼ばれる物質が質量で5倍程度存在するといわれています。ダークマターは重力でのみ相互作用し、宇宙の重力的な構造形成、進化の主要な役割を果たしています。そして重力によりハローとよばれる巨大な構造を形成し、その大きさは、ハロー内部に存在する、光り輝く銀河のおよそ10倍にもなると考えられています。

ハローはまず小さいものが形成し、それらが合体を繰り返すことで大きく成長していきます。このように、階層的に構造を形成しながら、ハローの中で星や銀河などの天体が形成していったと考えられています。またハロー内部の銀河が合体すると、大量のガスが銀河中心に存在するブラックホールに供給され、ブラックホールが成長するとともに、活動銀河核として光り輝いたと考えられています。

ハローの空間分布をシミュレーションから明らかにすることで、銀河や活動銀河核の空間分布も推定することができます。ところが、生まれて間もない宇宙では、まだ構造が十分に発達しておらず、銀河や活動銀河核を宿すような大きいハローは多くありません。このようなハローの進化を解明するためには、より広大な宇宙空間をシミュレーションする必要があります。しかし、これまで世界で行われてきたシミュレーションでは用いる粒子数が不足していて、ひとつのシミュレーション粒子の

質量が銀河に匹敵するほど大きく、ハローの構造を理解するには不十分でした。

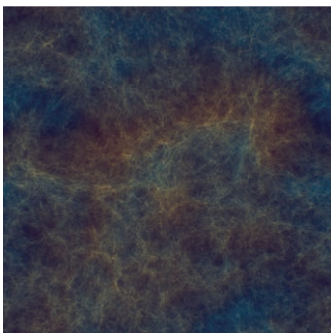
スーパーコンピュータを用いたシミュレーション

我々は理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」や、国立天文台の「アテルイ」の強力な計算パワーを活かし、宇宙初期から現在にいたる最大約5500億個ものダークマター粒子の重力進化を計算しました。計算した空間サイズは、最大で一辺がおよそ54億光年にも及ぶ広大なものです。これほど大きい空間でのシミュレーションとしては世界最高の分解能^{*1}であり、銀河スケールのハローの階層的な形成を追うシミュレーションとしては世界最大です。

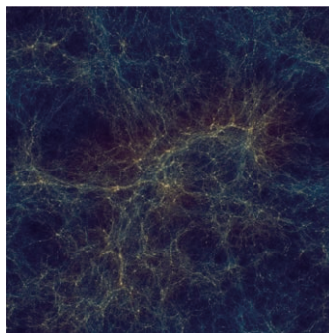
用いた重力多体シミュレーションコード、GreeMは研究グループのメンバーらが開発してきたもので、ハイパフォーマンス・コンピューティングに関する国際会議、SC12（2012年、米国・ソルトレイクシティ開催）でゴードン・ベル賞を受賞しました。

シミュレーション結果から、質量スケールに換算しておよそ8桁にもおよぶ範囲でのハローすべての階層的な形成史をモデル化し、数値カタログとしても公開しました。さらにその上で、準解析的銀河形成モデルという手法を用いて我々が目にする銀河や活動銀河核の形成を追い、大規模天体サーベイ観測^{*2}と直接比較可能な、様々な天体の疑似カタログを整備し公開しました。初期宇宙から現在にわたって、多種多様な天体の形成、進化過程、そして空間分布を探ることができるようになったのです。

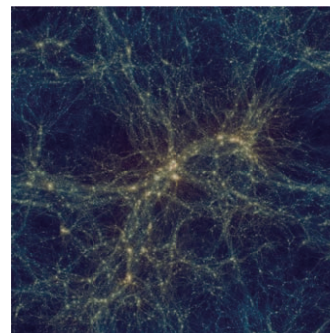
■ 131億年前



■ 117億年前



■ 80億年前



■ 現在

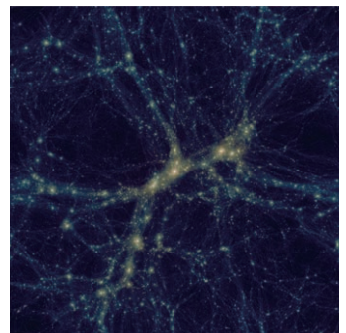


図1:ダークマターの分布の進化。明るさはダークマターの空間密度を表し、明るいところは密度が高くなっています。宇宙が生まれてすぐはほぼ一様(左)ですが、時間が経つにつれて(順番に右へ)重力により集まり、大きな構造が形成されていきます。現在時刻では一辺が約3.3億光年に対応します(PASJ, 2015, 67, 61; <http://hpc.imit.chiba-u.jp/~nngc/>)。

*1 分解能 接近した二つの点や線を分離して見分ける能力。

*2 天体サーベイ観測 統計的な議論ができるような比較的広範囲な領域に対して行われた、望遠鏡によるさまざまな天体の観測。

ICEHAPよりお知らせ

- ・ニュートリノ天文学部門の吉田教授・石原准教授出演で製作された動画「The Search for Cosmogenic Neutrinos - 宇宙ニュートリノの探索」がYouTubeにて公開されています。日本語訳もついています。ぜひご覧ください。
YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=9qNf2koekyk>
- ・堀田英之特任助教が関わっている研究グループのシミュレーションプログラムの自動生成言語開発についての研究が、高性能計算技術の国際的な賞であるゴードン・ベル賞のファイナリストに選ばれました。

ICEHAPの主な論文

本センターから発行された主要な論文です

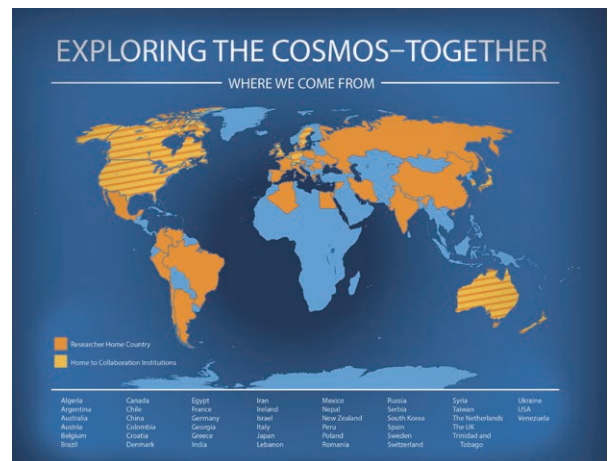
- ・ IceCube Collaboration; A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al.; All-Sky Search for Time-Integrated Neutrino Emission from Astrophysical Sources with 7 Years of IceCube Data, *Astrophysical Journal* 835, 151; DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/151 (2017)
- ・ IceCube Collaboration: R. Gaior, A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al.; The Contribution of Fermi-2LAC Blazars to the Diffuse TeV-PeV Neutrino Flux, *Astrophysical Journal* 835, 45; DOI:10.3847/1538-4357/835/1/45 (2017)
- ・ IceCube Collaboration; A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al.; Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere using six years of IceCube data, *Astrophysical Journal* 833, 3; DOI: 10.3847/0004-637X/833/1/3 (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 10 PeV with IceCube, *Physical Review Letters* 117, 241101; DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.241101 (2016)
- ・ Chih-Han Peng and Ryoji Matsumoto, Formation of Galactic Prominence in the Galactic Central Region, *Astrophysical Journal*, Volume 836, Number 2, 149 (8pp), DOI:10.3847/1538-4357/aa5be8 (2017)
- ・ Yuta Asahina, Tomohisa Kawashima, Naoko Furukawa, Rei Enokiya, Hiroaki Yamamoto, Yasuo Fukui, and Ryoji Matsumoto, Magnetohydrodynamic Simulations of the Formation of Molecular Clouds toward the Stellar Cluster Westerlund 2: Interaction of a Jet with a Clumpy Interstellar Medium, *Astrophysical Journal* 836, 213, DOI:10.3847/1538-4357/aa5c86 (2017)

国際色豊かな「アイスキューブ・コラボレーション」

ニュートリノ観測実験観測施設の建設には、多くの人々の貢献がありました。南極へ必要な人材と資材を送り、氷に穴を開けてそこに検出器を降ろすという建設過程だけでなく、ニュートリノ検出のための高度な機能と南極点の厳しい環境と氷中の圧力に耐えうる強度を備えた検出器等の開発に多くの機関や研究員が参加しています。これらの協力機関と研究員らは「アイスキューブ・コラボレーション」と呼ばれ、現在12か国48機関が所属しています。私たち千葉大学チームは、日本から参加する唯一の機関です。

コラボレーションの活動は1999年に始まり、その時からの初代メンバーも多数います。現在300名にもものぼるメンバーには、経験豊かな研究者もいれば大学院生もいて、他にも技術者、ソフトウェア・エキスパート、採掘のプロや設計者等が世界最大のニュートリノ観測施設建設のため共に協力してきたのです。建設が完了しフル稼働となった今でも、データの分析やその結果について討議し、次の開発を計画するなど、共同作業は続いています。共通語は英語となり、世界へ向けて発表する論文はもちろん、定期的に行なわれる打ち合わせもすべて英語で行われます。

各国に散らばる研究員らは、年に2度の「アイスキューブ・コラボレーション・ミーティング」に参加し、新たな研究内容や結果を報告・発表し、情報や意見の交換を行います。前は昨年秋にドイツで、今回は5月に米国ウィスコンシン州マディソンで開催される予定であり、毎回200人近い研究者たちが世界中から集まります。



アイスキューブ・コラボレーションのメンバーの出身地や参加機関を表す国旗(上)と世界地図(下)

01 ICEHAP 主催研究会

公開講演会「Cosmic Café」3月26日(日)開催!

参加無料(事前申込不要)

前回の号でもお伝えしましたが、今年もハドロン宇宙国際研究センター主催の「Cosmic Café(コズミックカフェ)」が開催されます!講演会の後には、「カフェタイム」。今回は趣向を変え、当ハドロン宇宙国際研究センターのニュートリノ天文学部門オフィスにご招待します。お茶を飲みながら研究者とおしゃべりしたり、楽しみながらニュートリノや物理学について学べる展示やイベントも行います。

日時:2017年3月26日(日) 会場:千葉大学 対象:どなたでも

※開演時間やカフェタイムの会場が変更されました。ご注意ください。

第1部

講演会:13:00開場 13:20開演

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にて

【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。

今年1月に新たな実験のため南極を訪れた当センター所属の間瀬助教が、その報告をします。また、センター長の吉田教授より物理学者にまつわる楽しい小断も。

第2部

カフェタイム:15:00スタート

千葉大学 工学系総合研究棟1 6階
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オフィスにて

【カフェタイム】

研究者と宇宙や
南極トークで盛り上がる!

今回は、千葉大の地元「西千葉」に縁のある方々にご協力をお願いし、美味しいお菓子とイベントをご用意して、皆様をお待ちしています。大人から子どもまで、皆様お誘いあわせの上、ハドロン宇宙国際研究センターの研究室へ遊びに来てね。



最近の アイスキューブ



7月に韓国で開催される宇宙線国際会議(ICRC)に向けた、講演・ポスター発表の骨格作りで、てんやわんやの季節がやってきました。数えたらIceCube全体で58編もの論文発表の提案があります。うち千葉大グループからは4編です。

これを整理し、中身を精査して、ICRC組織委員会にアブストラクトを提出するという気の遠くなる作業の真っ只中。2年に一度のICRCラプソディーを迎える度に時間の流れの早さを実感します。

最近の南極



11月~2月は南極では夏にあたり、この時期をねらって世界中の研究者たちが実験のために南極を訪れます。当センター所属の間瀬助教もその1人。1月初旬から2月の初めまで滞在し、ARAという実験で新型アンテナの現地テストをしてきました。夏季とは言え、南極点は氷や雪だらけの世界。毎日毎日アンテナを埋めるための穴掘りの日々だったそうです。

今回間瀬助教は、ニュージーランドへ行き、そこから南極の海岸沿いにあるマクマード基地へ飛び、そして最終目的地である南極点のアムンゼン・スコット基地に向かいました。ニュージーランドでは、もちろん出入国の手続きがあり税関を通りますが、南極はどの国にも属していないためパスポートにスタンプを押されることもなく、意外にあっさりした到着となるそうです。

最近のセンター長

年始早々イスラエルにて学会。研究者には益も正月も関係ありません。

Facebook やってます!

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>

02 NEW MEMBER! 新しい仲間が加わりました!

永井 遼 Ryo Nagai



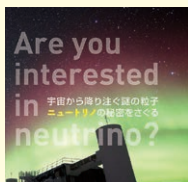
2017年2月より特任助教としてICEHAPのメンバーになりました永井遼です。素粒子物理学の実験的研究がテーマで、これまでは加速器実験に参加していましたが、この度IceCube実験に参加することになりました。

以前はお茶の水女子大学のポスドクとしてLHC-ATLAS実験に参加していました。LHC加速器は世界最高エネルギーの陽子ビームを人工的に作り出す加速器で、ATLAS実験はビーム同士の衝突事象をくまなく観測することにより新物理事象を探索する実験です。かなり大規模な実験グループですが(共同著者約3000人)、そのなかで私は暗黒物質の有力な候補である超対称性粒子の探索の解析グループに所属し、背景事象評価法の改善や、次世代実験で使用される検出器の、FPGAを用いた読み出し試験システムのファームウェア開発に取り組んできました。加速器実験からニュートリノ観測実験へと畑違いの分野ではありますが、宇宙の謎の解明という物理的な目的とともに、実際のデータを収集する実験的方法に多くの共通点があります。

今までの経験を生かして、今後はIceCube実験で予定されている次世代実験(Gen2)に使用される新型検出器の開発を中心に取り組んでいきたいと考えています。

03 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」



Mar. 2017 no. 6

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>

icehap@ml.chiba-u.jp メールアドレスが変わりました!

