



ICEHAP

NEWS

International Center
for Hadron Astrophysics

Feb. 2021 no. 11

熱湯が凍る「ムペンバ効果」

表紙の写真は、快晴の南極で空中に撒かれた熱湯が一瞬にして凍った様子です。特定の条件下では、低温の水より熱湯の方が先に凍ります。これは「ムペンバ効果」と呼ばれる現象で、1963年に当時タンザニアの中学生だったB.ムペンバが発見したと言われています。

太陽に照らされて凍った熱湯がきれいに円を描く様子は爽快で、心に響く1カットです。

IceCubeの本格観測開始から今年で10周年です🎉





ニュートリノ天文学部門

IceCube実験アップグレード計画に 用いる卵型光検出器D-Egg

理学研究院・特任研究員

金 賢一

IceCube-UpgradeとD-Egg

IceCube実験は宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノを観測するプロジェクトです。1立方キロメートルの深氷河中に約5000台の光検出器DOMが埋設されており、2011年からすべての検出器を用いた観測が開始されました。また現在計画の次世代プロジェクトIceCube-Gen2では検出範囲を約8倍へと拡大することで、さらなる高エネルギーニュートリノ事象の捕捉を目指しています。その第一段階として、氷河に対する校正を主な目的としたIceCube-Upgradeの建設が2022年より開始予定となっています。Upgradeプロジェクトで新たに埋設する約700台の検出器の内、約300台を千葉大学が開発を担当しているD-Egg (図1) が占めます。2018年9月には



図1:千葉大学が開発した卵型光検出器D-Egg。写真は海洋研究開発機構の高圧実験水槽装置を用いた耐圧試験時のもの。

アメリカ国立科学財団によるPreliminary Design Reviewを他の検出器に先駆けて突破し、2019年6月にはUpgrade用検出器として認定されました。

卵型の耐圧ガラス球内部に浜松ホトニクス製の光電子増倍管PMTが上下2箇所に搭載されていることがD-Eggの特徴です。これにより、下向きPMTのみ搭載されたDOMに比べて倍以上の光検出効率を達成します。PMTの他には、磁界中でPMTの出力変動を抑制するための磁気シールド、PMTへの印加^{*1}電圧を制御するデバイダ回路基板、PMTから読み出した信号を処理するメイン基板、氷河中の光伝搬特性に対する理解を深めるためのLED制御基板、再氷結した氷河を詳細に調べるカメラ制御基板、及び地上の制御室へデータを送るための通信用ケーブルが各D-Eggに実装されています。

製造現場のあれこれ

D-Eggの製造現場は千葉大学ではなく、神奈川県横浜市金沢区にある日本海洋事業株式会社 (NME) の福浦整備場です。NMEは深海用無人探査機「江戸っ子1号^{*2}」の技術面に助言していた企業であり、まさに江戸っ子1号に関する新聞記事を目にしたことがNMEへ協力を依頼するきっかけとなりました。また同探査機の外殻である耐圧ガラス球を開発した岡本硝子株式会社にもご協力いただいたことで、70MPa (水深7000m相当) の耐圧性能が要求されるD-Eggのガラス球を開発にこぎつけられたのです。

福浦の整備場では、まずD-Egg製造の第一段階として、信越シリコン製の光学ゲル^{*3}を用いてPMTをガラス半球内へ固定する「ポッティング」を行います (図2)。不純物の



図2:NME福浦整備場内のクリーンブース。写真左側に光学ゲル硬化待ちのD-Egg半球が並んでいる。作業机には静電防止シート (緑) が敷かれている。

混入を防ぐためにクリーンブース内でゲルの注入を行い、硬化待ちをする数日に渡って保管します。またゲルに水分が混入しないように、ブース内では除湿機を常に稼働させて湿度を30%前後にキープしています。ガラス球を持つ際に滑ってしまうため、ハンドクリームなどをつけるのは御法度であり、私をはじめとした乾燥肌持ちの人には過酷な作業環境です。

ただし低湿度環境は検出器製造において諸刃の剣でもあり、検出器に実装する回路基板の大敵である静電気が滞留しがちというデメリットがあります。その対策として作業机には静電防止シートを全面に敷き、基板を扱う際には帯電を防止するリストバンドの装着が必須です。そして基板実装後には上下のガラス半球同士を合わせ (図3)、真空引きにより封止します。その際には窒素パージ (窒素置換) も行うことで残存酸素量を減らし、何十年にも渡る

*1 印加：電気回路に電源や別の回路から電圧や信号を与えること。

*2 江戸っ子1号：2013年に東京都や千葉県の中企業6社と支援団体により開発された日本の深海用小型フリーフォール型無人探査機。日本海溝、水深7800mの海底生物を3Dフルハイビジョンでビデオ撮影に成功した。

*3 光学ゲル：D-EggのガラスとPMTの間に流し込まれ固定する素材。光の屈折や反射を防ぎ、チェレンコフ光をPMTに取り込みやすくする効果も。

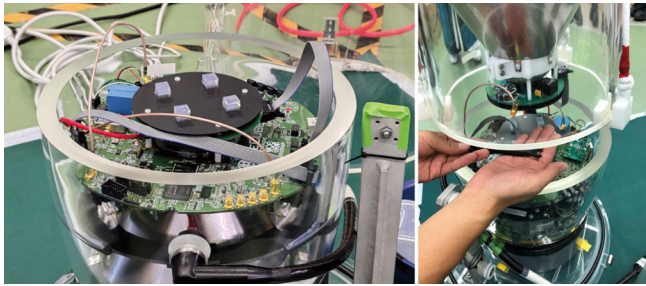


図3：(左)部品実装後のD-Egg下半球。(右)封止前に下半球から伸びるケーブルを上半球のデバイス回路基板へ接続する。

稼働でも内部部品が酸化しないように工夫しています。耐圧ガラス球の封止作業では、過去のDOM製造時に開発された技術の他に、NMEにとって本来の業務の1つである海底地震計OBSの整備で培われた技術も応用されています。NMEの方々と二人三脚をしつつ1日2台ペースで製造し、2021年度中に約300台のD-Egg製造完了を目指しています。

D-Egg第1号の完成

2019年度中に開始できると思われた検出器製造も、令和元年房総半島台風による製造現場の浸水被害やコロナ禍による自宅待機要請といった外的要因が重なり、長期的な延期を余儀なくされました。それでも基板の試験など、できることを粛々と進め、製造再開に備えること約1年。そして2020年10月5日、ついに本格的な製造が開始され、待望のD-Egg第1号が完成しました(図4)。この第1号の完成で勢いに乗っていた我々は当初の予定に比べて倍と

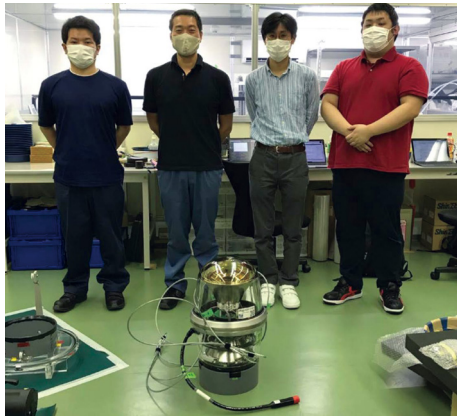


図4:D-Egg第1号(写真下段中央)と当日製造に参加していたNME及び千葉大学のメンバー。マスク越しに安堵の表情が見て取れます。写真右端が筆者。

なる、1日あたり4台ペースでの製造を敢行。その結果、1週間で製造した計16台のD-Eggを第1便として千葉大学へと送り出すことができました。

余談ですが、慣習として各検出器には愛称を付けることになっており、D-Eggの場合は南極大陸もしくはその周辺に棲息する鳥類や魚類などの名称から引用しています。例えばD-Egg第1号には「Adelie Penguin」、第2号には「Emperor Penguin」といった形です。これらは南極大陸に主な繁殖地を持つ2種のペンギンにちなんでいます。

Final Acceptance Test

千葉大学へと送られてきたD-Eggたちには、南極へ送るに相応しいかを判別するためにFinal Acceptance Test (FAT) が課されます。室温とマイナス40度の間を行ったり来たりして温度ストレスをかける約20日間の長期的な試験を経ることで、南極深氷河中という過酷な環境下においても安定した稼働が保証できるのです。我々が所有する大型フリーザー内には1度に16台の各D-Eggが遮光用の暗箱へ収納されます(図5)。この暗箱にはフリーザー



図5:(左)本研究室所有の大型フリーザー及びD-Egg収納用の暗箱。(右)暗箱内へ収納された状態のD-Egg。

外から32本の光ファイバーが伸びており、レーザーからの光を伝搬。検出器の上下に搭載されたPMTへと照射します。南極における実際の実験環境ではニュートリノ反応由来の荷電粒子により生じるチェレンコフ光を検出しますが、試験用のセットアップではこのレーザー光を用いて模擬的に光検出器の性能を評価します。FATの肝とも言える暗箱の完成は、本学工学部デザイン学科の意匠形態学研究室の方々からの多大なるご協力あってのもの。例えば、低温時に降りた霜が温度低下に従って溶けて板が吸水し反ってしまうという問題に対しては、ウレタンで塗装されたパネコートを用いるという解決策をいただきました。

またFAT用のソフトウェア開発は基本的に自前で行っていますが、IceCubeグループ所属のソフトウェアエンジニアの方々からも、時には海外からテレビ会議を繋いでのリアルタイムデバッグなど、数え切れないほどのご助言をいただいたことは忘れてはなりません。この場を借りて御礼申し上げます。

現在はNMEでのD-Egg製造と千葉大学でのFATを並行して進め、南極へ検出器を送り出す準備を着々と進めています。学会や研究会において、それぞれの最新状況について報告をしていますので、興味のある方はそれらにぜひ足を運んでみてください。



プラズマ宇宙研究部門

活動銀河中心核における 短時間変動する軟X線放射領域の形成

理学研究院・教授
松元亮治

活動銀河核のふたつの顔

活動銀河中心核（Active Galactic Nuclei: AGN）には、ブラックホールシャドーが初めて撮像されたM87のように中心核が可視光では暗い電波銀河と可視光・紫外線で明るいセIFAート銀河やクエーサーがあります。最近、この2種類の活動銀河間を遷移するChanging Look AGNが注目されています。ひとつの銀河が、あるときは暗い電波銀河、あるときはセIFAート銀河になるわけです。これらのAGNの増光時には激しく時間変動する強い軟X線放射が観測されています。この軟X線がどこから放射されているか、これまで謎でした。なぜなら、活動銀河中心核の巨大ブラックホールの周りに形成される高光度の回転円盤（降着円盤）の温度は 10^5 K程度しかなく、軟X線を放射するには低すぎるからです。

千葉大学大学院生の五十嵐太一君を中心とする私たちのグループは、国立天文台のスーパーコンピュータXC50等を用いて、巨大ブラックホール降着流の3次元シミュレーションを実施し、状態遷移中の時間発展を明らかにしました^[1]。従来、ブラックホール降着流の大局的3次元計算は高温低密度で放射が無視できる場合と放射エネルギーが熱エネルギーを凌駕する場合しか行われていませんでした。これは、その中間状態では円盤の厚みが薄くなり、解像できなくなってしまうためです。

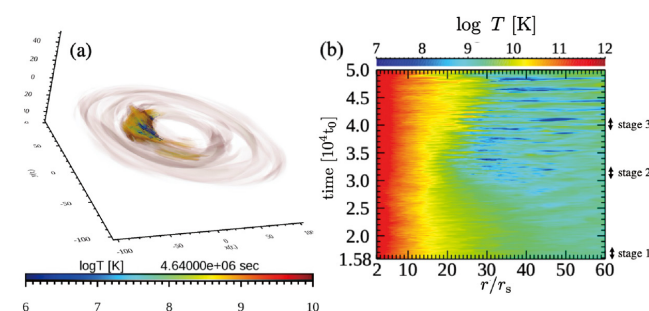


図1：3次元放射磁気流体シミュレーションから得られた(a)温度分布。青色が軟X線放射領域。(b)温度分布の時間発展。横軸はシュバルツシルト半径を単位とした径座標、縦軸は $t_0=100$ sを単位とした時間(Igarashi et al. 2020^[1]より抜粋)。

[1] "Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Sub-Eddington Accretion Flows in AGNs: Origin of Soft X-Ray Excess and Rapid Time Variabilities", Igarashi et al. Astrophysical Journal 902, 103, DOI:10.3847/1538-4357/abb592 (2020)

私たちは、高精度の磁気流体コードCANS+^[2]を、放射輸送、及び放射と物質の相互作用を近似的に解くように拡張し、この放射磁気流体コードを適用することによって、状態遷移中の時間発展計算に成功しました。

明滅する活動銀河中心核

図1 (a) に温度の3次元分布、(b) に時間発展を示します。赤が高温、青が低温領域です。ブラックホールの質量は 10^7 太陽質量としました。ブラックホール近傍の高温領域の外に 10^6 - 10^7 Kの軟X線放射領域が形成され、この領域が数日程度の周期で振動することがわかりました。放射エネルギーは軟X線が卓越します。これを示したのが図2 (a) です。カラーは放射エネルギー密度、実線が放射の流線です。軟X線放射領域の放射エネルギー密度が最大になっています。遠方から観測したときの光度変化を図2 (b) に黒い実線で示します。縦軸の単位は球対称降着の場合の上限光度であるエディントン光度です。上限光度の0.5%程度の光度で、準周期的な光度変化が生じることがわかりました。この光度と周期は、Changing Look AGNの光度、短時間変動の時間スケールとよく一致しています。

活動銀河中心核エンジンの研究は長く停滞していましたが、Changing Look AGNの多波長同時観測とシミュレーション結果の比較を突破口として、統一的な理解が急速に進展しつつあります。

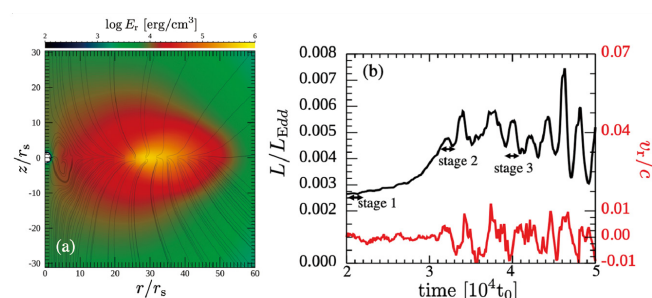


図2：(a)のカラーは放射エネルギー密度の分布。実線は放射の流線。(b)の黒線は鉛直方向遠方から観測した光度変化。単位はエディントン光度。赤線は径速度(Igarashi et al. 2020^[1]より抜粋)。

[2] "Magnetohydrodynamic simulation code CANS+: Assessments and applications", Matsumoto, Y. et al. Publ. Astron. Soc. Japan 71, DOI: 10.1093/pasj/psz064 (2019)

ICEHAPは 千葉大学全学センターになりました

2020年10月1日付で、ハドロ宇宙国際研究センター(ICEHAP)は理学研究院附属センターから独立した全学センターとして改組いたしました。千葉大学を代表する研究センターとして研究・教育活動を推進するとともに、世界の研究者のコミュニティーに開かれた研究組織として運営を行います。

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, R. Nagai, A. Stöbl, S. Yoshida, et al. ; Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data, Physical Review Letters 124, 051103, DOI:10.1103/PhysRevLett.124.051103 (2019)
- IceCube Collaboration: A. Ishihara, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, R. Nagai, A. Stöbl, S. Yoshida, et al. ; Characteristics of the Diffuse Astrophysical Electron and Tau Neutrino Flux with Six Years of IceCube High Energy Cascade Data, Physical Review Letters 125, 121104, DOI:10.1103/PhysRevLett.125.121104 (2020)
- Shigeru Yoshida and Kohta Murase ; Constraining photohadronic scenarios for the unified origin of IceCube neutrinos and ultrahigh-energy cosmic rays, Physical Review D 102, 083023, DOI:10.1103/PhysRevD.102.083023 (2020)
- L. Gu, K. Makishima, R. Matsumoto, K. Nakazawa, K. Shimasaku, N. Inada, T. Kodama, H. Xu, M. Kawaharada, Implications of the mild gas motion found with Hitomi in the core of the Perseus cluster, Astronomy & Astrophysics, Volume 638, id.A138, 15 pp., DOI:10.1051/0004-6361/201936437 (2020)
- T. Igarashi, Y. Kato, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y. Matsumoto, R. Matsumoto, Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Sub-Eddington Accretion Flows in AGN: Origin of Soft X-ray Excess and Rapid Time Variabilities, Astrophys. J., 902, 103, DOI:10.3847/1538-4357/abb592 (2020)
- H. Hotta, H. Iijima, On rising magnetic flux tube and formation of sunspots in a deep domain, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 494, p.2523, DOI:10.1093/mnras/staa844 (2020)
- Y. Morinaga, T. Ishiyama, The impact of filamentary accretion of subhaloes on the shape and orientation of haloes, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 495, p.502, DOI:10.1093/mnras/staa1180 (2020)
- T. Ohmura, M. Machida, K. E. Nakamura, Y. Kudoh, R. Matsumoto, Two-temperature magnetohydrodynamic simulations for sub-relativistic active galactic nucleus jets: dependence on the fraction of the electron heating, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 493, p.5761, DOI:10.1093/mnras/staa632 (2020)

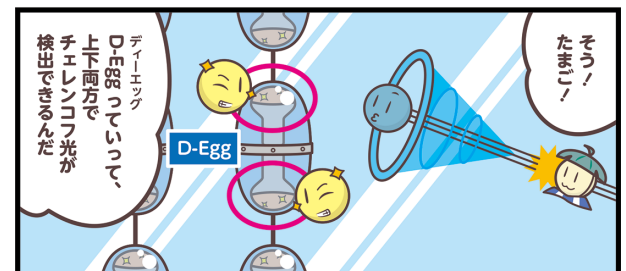
アイスキューブさん

今回は、ペンギンのコスプレがかわいい IceCubeさんと研究室内でも製造が進んでいるディーエッグ(D-Egg)のおはなし。



さく 秋本祐希(ひっぐずたん) #002

ペンギンIceCubeさん



©higgstan.com



アイスキューブさん ジェンツー(IceCube-Gen2)

検出装置の性能の向上などで、ニュートリノの観測能力のパワーアップを目指しています。



ディーエッグ(D-Egg)

現在使われているDOMに代わる新しい検出装置のひとつで、上下で光が検出できるスグレモノ。

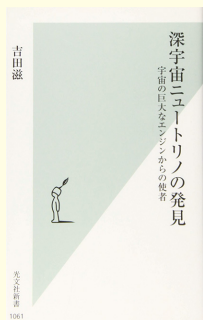


作者 秋本祐希(ひっぐずたん)

アイスキューブさんなど素粒子にまつわるかわいいイラストの4コマ漫画は、サイト「Higgstan(ひっぐずたん)」で公開されています。



01 吉田滋教授の著書「深宇宙ニュートリノの発見」が 光文社新書より発売されました。



ICEHAP センター長・吉田滋教授の著書「深宇宙ニュートリノの発見」が光文社新書より発売されました。IceCubeニュートリノ大型検出器が2017年9月に南極で捉えたニュートリノにより、その放射源天体が初めて特定され、40億光年の彼方にある巨大なブラックホールをもつブレーザー天体がニュートリノとガンマ線を放出していることが研究の結果わかりました。その大発見の中心にいた一人である吉田教授が、世界初の超高エネルギー放射源天体という功績に至るまでの研究者としての半生をまとめたのがこの1冊です。山梨の観測施設に始まり、米国ユタ州の砂漠での実験、そして南極点のアイスキューブ実験。

厳しい環境を渡り歩きながら、宇宙線研究に打ち込んできたこれまでの研究者人生は苦勞と挫折の連続で、研究者としての信用を失うという危機にも直面します。大きな科学的発見の裏にある研究現場の実情と研究者らの努力と苦勞を垣間見ることができ、ノンフィクションでありながら、まるでドラマのような内容です。それでいて、数多くの観測データも掲載され、実際の研究についても詳しく言及されており、物理学や実験に興味のある方には読み応えのある内容となっています。物理学を志す学生やニュートリノ研究に興味ある方にぜひ読んでいただきたい1冊です。

02 松本特任准教授が 本学先進学術賞に



2020年11月26日、プラズマ宇宙研究部門の松本洋介特任准教授が、独創的・萌芽的研究など高い研究能力を有する研究者を表彰する2020年度「千葉大学先進学術賞」を受賞しました。研究テーマ「プラズマ第一原理シミュレーションによる高エネルギー宇宙線加速の研究」

03 堀田准教授、 優秀成果賞受賞



2020年10月30日、プラズマ宇宙研究部門の堀田英之准教授が、「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題第7回成果報告会において、物理・素粒子・宇宙分野の課題「低質量星の熱対流と磁場活動の探査（課題番号：hp190070）」で、「HPCI利用研究課題優秀成果賞」を受賞しました。

04 NEW MEMBERS!

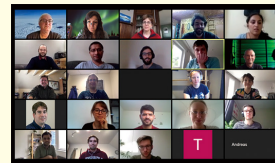


清水 信宏 Nobuhiro Shimizu

こんにちは。2020年11月から助教として着任しました清水信宏です。東京大学を卒業した後は、そのまま同大学の大学院に進学しBelle/Belle2実験に参加しました。修士課程ではBelle2検出器の最内部に設置されている崩壊点検出器の開発を、博士課程では電子・陽電子ビームによって大量につくられるタウ粒子の崩壊を精密測定して、弱い力のダイナミクスを研究しました。博士の学位を取得後は、大阪大学に移り、日本学術振興会博士研究員として3年、特任研究員として半年、J-PARC KOTO実験に参加しました。中性K中間子という粒子の稀な崩壊を通じて、新物理の探索をすることを目的としています。本当にものすごく稀な現象を相手にしているので、実際はバックグラウンドの理解が主なテーマとなります。特に、最近明らかになった（中性でなく）荷電K中間子が引き起こす、バックグラウンド事象の理解をするためのデータ取得やその解析を主導したり、（こちらはKOTO実験のメインテーマではないですが）ローレンツ不変性を破る別の崩壊の探索などを行ったりしてきました。

そしてこの秋、新たな世界を探索するチャンスがやってきました。IceCube実験のターゲットとしている物理は、私がこれまで研究で取り扱ってきた粒子よりも、はるかに大きなエネルギーに関わるものです。ICEHAPへは、このエネルギーの高さが持つシステムの可能性に惹かれてやってきました。広大な宇宙のどこかに存在する、超高エネルギーニュートリノを作る起源の探索や、高エネルギーでしか現れない新物理現象の検証など、やりたいことがたくさん転がっています。新しい環境で精一杯の貢献を、そして何より、物理を楽しんでいきたいと思います。

最近のIceCube



©IceCube Collaboration

世界各国で活動しているIceCubeのメンバーが一同に集まり、毎年春と秋に行われているIceCubeコラボレーションミーティング。2019年の秋に千葉大学で行われたのを最後に、世界的な新型コロナウイルスの影響を受け、2020年の通常開催は取りやめになり、オンラインミーティングに移行して開催されています。約300名のメンバーがバーチャルに集まり、研究報告やワークショップなどを行いました。国内外での学会も、今年度は全て中止またはオンラインでの開催になっていました。早くこの状況が終息し、安全に国内外で研究活動ができるようになることを心待ちにしています。

最近のセンター長



「三密」は銭湯に当てはまるのか、誰か教えてください（銭湯でぼーとするのが好きだったんですが）。

ICEHAPの ホームページが 新しくなりました



©IceCube Collaboration

デザインも一新され、研究関連はもちろん、学生の方向けのページも多数追加されました。ICEHAPメンバーのプロフィールにも質問コーナーを設け、教授や研究員の興味深い一面も。詳しくはコチラから。▶▶▶



ICEHAP ニュース・ バックナンバー

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。▶▶▶

