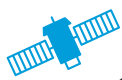


📡 ハドロン宇宙国際研究センター アイスハップ ニュース



ICEHAP

NEWS International Center for Hadron Astrophysics Mar. 2023 no. 12

\\ D-Egg320台完成記念特別号 //

千葉大学で開発されたIceCube実験の新型光検出器「D-Egg」320台がついに完成しました。全ての検出器は、現在研究室で行われている最終動作試験を経て、2025年に南極点の氷河下へ埋設される予定です。表紙のイラストの様子が現実になるまで、あともう一息です！



Illustration by Shinichiro Kinoshita



ニュートリノ天文学部門

新型光検出器開発 ことはじめ

国際研究基幹・ハドロン宇宙国際研究センター

石原安野

次はどんな研究をしようか

IceCubeを超える次世代ニュートリノ望遠鏡を作ろう！という声が高まりだしたのは、2013年のことです。2004年12月から始まり約7年に渡り続いたIceCube検出器の建設も、2010年12月に最後の光検出器モジュール(DOM)^{*1}の埋設が終了し、2011年5月から、稼働可能な全てのDOM5397個でのフル観測が始まりました。私は2006年から部分的に完成したIceCubeからのデータ解析をスタートさせ、2012年6月8日、京都で行われた国際会議Neutrino2012で世界初となる1PeVを超えるエネルギーを持つ宇宙ニュートリノの観測を報告しました。しかし、Physical Review Letters誌から論文が出版されたのは、その1年後の2013年7月。現在でも一筋縄ではいかない論文発表ですが(今回投稿したD-Eggの論文もレビューに1年以上かかっています…)、宇宙ニュートリノ初検出の論文には、言うまでもなく多くの意見や議論が巻き起こり、まとめるのに時間がかかりました。しかし、IceCube検出器で宇宙ニュートリノを見るという今となれば当たり前のことも、実際に観測してみるまでは本当にできるの？という懐疑的な空気が漂っていました。そんな中、出版に向けた議論を通じてその空気がポジティブなものに変わっていく様子は、まさに新しい分野が始まりつつあるときの熱波がIceCube実験メンバー内にじわじわと広がっていくようで、嬉しくもあったのです。

論文出版後初めての共同研究者会議が2013年10月に、ミュンヘンであり、そこで「IceCubeで使われている光検出器DOMを次世代実験に向けて改造しよう」という内容の発表がありました。実はその発表に触発されたのです。10年以上かけて準備をしてきたIceCubeの建設が終わり、本格的な成果や解析手法の開発もまだまだこれからというこの時期、すでに『新しい望遠鏡のデザインを考えている!』というのは驚きでもあり、これでひと仕事終わったと思ったら大間違いだぞといわれているようで、大いに刺激を受けました。そこから、自分ならどういうデザインにしたいかという半分妄想に取りつかれ、共同研究者会議の間中、そして、帰りの飛行機の中でと考え続け、筒の両端に半球を2つ取り付けた細長いガラス球の中に、上向きと下向きのPMTを2つ入れることで、全方向からの光に対し同等の

感度を持つ検出器デザインにたどり着き、帰りの飛行機の中で、「まずはプロトタイプを作ってみよう」と心は固まっていました。

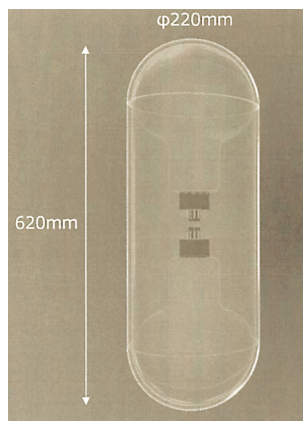
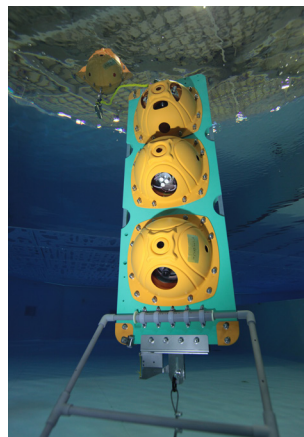


図1: (左)筒状ガラスの上下に上向きと下向きのPMTを容れこむことでより細くすることを可能にした初期のデザイン。結局このようなデザインでは製作が難しいことがわかる。(右)実際に製造されたD-Egg

出会い

IceCube実験に参加をした2005年から毎日のようにデータを眺めては、IceCubeのDOMについて考えていたので、「こういう検出器があるといいな」というアイデアはすぐに湧いてきました。しかし、南極の氷河に埋設するという特殊性から、それが実現可能なかどうかははっきりしません。そのような思いでいた帰国後の2013年11月、どうしたら現実的に検出器開発を進められるだろうかと考えていた丁度その頃、中小企業が力を合わせて作った深



提供:JAMSTEC

図2: 2013年に出会った、深海用カメラ「江戸っ子1号」

海用カメラ「江戸っ子1号」^{*2}が深海8000mでの動画撮影に成功という記事を見かけたのです。そのカメラはIceCube実験が南極点氷河中で使っているものとよく似たガラス球の中に入っていました。半信半疑ながらIceCube向け耐圧ガラス製造の可能性について問い合わせたところ、可能性はあるという回答を得ました。その岡本硝子^{*3}とはその後、

*1 光検出器モジュール(DOM): 南極点氷河下で稼働しているIceCubeの初代光検出器。球状で、下向きにPMT 1つが搭載されている。

*2 江戸っ子1号: 2013年に東京都・千葉県の中小企業6社と支援団体からなる「江戸っ子1号プロジェクト」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。

*3 岡本硝子: 千葉県柏市に所在するガラス製造会社。江戸っ子1号の開発から販売までを手掛けている。

ニュートリノ検出器に必要な耐圧ガラス球の紫外光透過性の向上やノイズ源となる放射性物質の低減など、多くの重要な改善に成功しました。一方、耐圧性能計算など、南極点の氷河の中で壊れず稼働できるデザインであるのかの判断はさらなる専門の知識がないと難しい。そこで、出会ったのが海底地震計などを設計製作している日本海洋事業*4です。

最初に描いていた耐圧ガラスハウジングのデザインは、図1左のような筒状部分と半球2つという3つの部品に分かれているものでした。しかし、このような細長い筒を高い精度を保ちながら大量生産することは難しく、また、力学的シミュレーションの結果、極点と赤道に大きな応力差があり機械的強度が不十分であることが判明。そこで、ラグビーボールのように赤道方向に膨らませ、球面は内蔵する2つのPMTの光電面の形状に合わせてすることで光電面に近い部分のガラスは薄くし、紫外線透過率を上げる。一方、赤道領域での応力に対応するため、この領域ではガラスの厚さを増やすという現在のデザイン(図1右)にたどり着きました。

アイデアのタネ

新しい検出器を考え始めた2013年10月、江戸っ子1号の成果により、深海で活躍する日本企業を知る11月、打ち合わせが始まる2014年の1、2月。とんとん拍子に「こんなのができたらいいな〜」から「具体的に作るにはどう進めよう」に進んでいきました。

ミュンヘンの次の共同研究者会議はその5か月後、

IceCube Collaboration Meeting
March 3-8, 2014 • Banff, Alberta, Canada

Spring Collaboration Meeting 2014

2-8 March 2014
Kinnear Centre
Canada/Mountain time zone

Overview
Registration
Payment
Timetable
Call for Abstracts
Contribution List
Author index
Scientific Programme
List of registrants
Location
Lodging
Banquet
Travel

Contribution List

134. **ELLIPSOID GLASS SPHERES FOR TWO SMALLER PMTS/HPD**
▲ Aya Ishihara (o=chiba,ou=Institut...
🕒 03/03/2014, 15:45
Premeeting - HE Extensi... High-Energy Extension P...

133. **A resolution study for the EHE online alert**
▲ Aya Ishihara (o=chiba,ou=Institut...
🕒 05/03/2014, 19:00
OnLine / RealTime / Mul... OnLine / RealTime / Mul...

132. **Diffuse neutrino searches: astrophysical and prompt**
▲ Aya Ishihara (o=chiba,ou=Institut...
🕒 06/03/2014, 14:15
Analysis II: Chaired by T... Analysis II

図3:2012年3月に、カナダのバンフでの共同研究者会議にて3つの発表をした(会議のプログラムを抜粋)。

2014年3月にカナダのバンフであり、そこで私は3つの発表をしました。1つはコンビナーを務めていた物理ワーキンググループの拡散ニュートリノ流量解析の総括と今後の計画について。2つ目は、開発してきたEHE解析*5の手法を改造し、南極点で宇宙ニュートリノをすぐに識別し速報を送るシステムの最初の感度見積もり。このテーマはその後2人のポストドクに引き継がれ2016年から南極点で稼働、2017年に論文になり、2018年のプレーザーニュートリノ放射天体の同定につながりました。そして、3つ目がまだD-Eggと名前がつく前の新型光検出器デザインについての報告です。本当にできるの? と当時思われていたとしても、まずはポジティブに受け止められ、たくさんの方の研究者の協力を得ることで5年後の2019年の2月には最終デザイン評価に合格、IceCube Upgrade計画に向けた正式製造が始まりました。

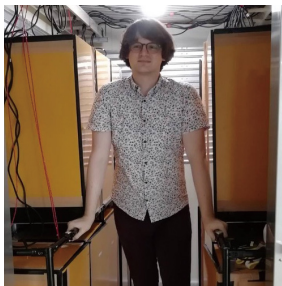
開発を通して感じたのは、研究のタネはどこに転がっているかわからないので、気が付いたらいつでも拾って大事に抱えておくことの重要性。D-EggもEHE速報も、全く異なるデータ解析をしている時に、検出器ほしいな、この手法は他にも使えそうだなと思っていたことがタネになっています。そして、そのタネは、点が線になり面になり広がるタイミングで、あれよあれよという間に、大きくなることもあります。今回の研究のタネは、江戸っ子1号の記事で線となり、企業との出会いで面となり、初期デザインが一気に進展しました。頭の片隅のアイデアのタネ、今これはちょっと無理そう、と思っても、つぶさないようにそっと抱えていることが実りにつながっているのかもしれない。

COLUMN 南極点の氷河中で受ける圧力

アイスキューブの将来計画では、検出器を2700mの深さにまで埋設します。それでは、氷河中2700mの深さにある検出器にはどのくらいの圧力がかかるのでしょうか? 南極点ではお湯を強く噴出することで穴を掘ります。ですので、掘り終わった直後の穴は水で満たされており、その中に検出器を沈めていくと、深さ相当の水圧がかかります。深さ2700mでは約270気圧です。それだけではありません。穴の中の水は時間が経つと再び凍り付きます。南極点の平均気温は真夏で、約-40°C。一方、氷河の中は地熱により深くなるほど温度が上がっていき、2700mの深さで約-10°Cになります。放っておくと穴の中の水は上からだんだん凍り付き、検出器近くの水が凍る数日間、検出器にかかる圧力は最大で500気圧を超えます。このため南極氷河の光検出器は深海7000m相当の耐圧性能が求められるのです。

*4 日本海洋事業: 海洋研究開発機構が利用する船舶の運航や観測機器の管理を専門とする会社。D-Egg光検出器の組立作業は、その福浦整備場内で行われた。

*5 EHE解析: Extremely High Energy (超高エネルギー)を持つ宇宙ニュートリノに特化して行われる解析。



ニュートリノ天文学部門

Story of Frozen Eggs ～凍った卵の物語～

ハドロン宇宙国際研究センター 特任研究員

Colton Hill コルトン・ヒル

訳：清水 信宏(理学研究院・助教)

自分たちの手で組み立てたD-Egg

IceCube実験の更なる可能性を拓く切り札の一つとして、千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター (ICEHAP) では、D-Eggという光検出器の開発を主導してきました。このD-Eggは光センサである光電子増倍管(PMT)*1を2台搭載しています。私がICEHAPに博士研究員として着任した2019年の時点では、数個のモックアップ(模型)が存在しただけで、作動するものはまだ作られていませんでした。それから4年後の今、300台以上のD-Eggが完成し、南極への出荷が認められようとしています。

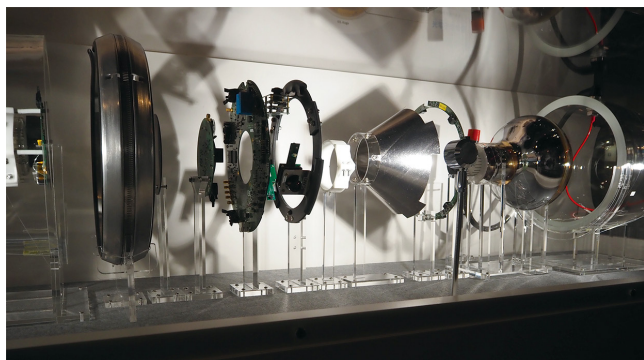


図1: D-Eggの内部(千葉市科学館の展示より)。

物の仕組みを理解するための最もよい方法の一つは、それを自分で創りあげることです。私の場合、それはD-Eggの動作試験のためのソフトウェアを書くこと、そして何より、実際に自分の手で検出器を組み立てることでした。例えば、D-Eggのガラス容器の洗浄や、シリコンのゲルをガラスに注いだり、ケーブルを繋ぐなど地道な作業も含まれます。なかでも最も困難を極めたのは、PMTとガラス容器を「接着」するためのシリコンゲルを、如何にコントロールするかという課題でした。硬化したシリコンゲルが泡や空隙を含んでしまう問題が生じ、その解決に、膨大な議論や実験を必要としたのです。最終的には、安定した製造ができるようになっただけでなく、この過程で多くの教訓を得ることができました。

南極へ送り出すまえに

生産が軌道に乗り始めたころ、D-Eggの品質検査の計画が始動しました。D-Eggは、南極への長い(そして永遠の*2)旅路につく前に、別個に検査を行う必要があります。

この検査を私たちは、Final Acceptance Test (FAT)と呼んでいます。そこでは、南極の環境を模した状況で試験することが求められます。 -40°C の温度に保った冷凍庫の中で数週間もの間、キャリブレーション*3を行います。ハードウェアの健全性だけでなく、物理解析に求められる要求性能を満たしているかも同時に調べられ、南極に送ってよいかを判断するのです。



図2: -40°C の温度を保った冷凍庫。内部にはD-Eggを入れる箱が設置してある。

研究においてはよくあることですが、特殊な課題には、それに特化した解決方法が要求されます。FATでは、D-Eggを超低温&暗室という特別な状況下で試験を行うことでした。ハードウェアとソフトウェアにまたがるこのシステム構築は、白紙からはじめ、結果的に3年の月日を要するものとなりました。その間私たちは、4万行にも及ぶソースコードを書き上げ、何百ものキャリブレーションを行いました。実効日数120日以上でのデータ取得を行い、そのデータ量は数テラバイトを超えました。そして今もなお、増え続けています。D-Eggが南極の氷河に埋められた時、私の貢献が意義あるものとなり、エキサイティングな大発見(ニュートリノか、あるいは何か別のもの!?)につながることを願って止みません。

このプロジェクトは常に挑戦の連続で、やりがいのあるものでしたが、D-Eggがニュートリノの持つ性質や宇宙線の加速機構への洞察を与え続けるものであってほしいと思っています。IceCubeのような実験は、多くの人に支えられています。「巨大な」科学には、「巨大」な協力体制で挑む必要があるからです。異なった個性が混ざり合い、多種多様な価値を与えあうことで新しい発見へとつながるのです。切磋琢磨しあえる仲間がいたからこそ、D-Eggは実現できたと思っています。

*1 光電子増倍管 (PMT) : 浜松トホクニクス製。微弱なチェレンコフ光を検出し、増幅した電流に変換する。

*2 永遠の(旅路) : D-Eggが南極点の氷河内に埋設されると、問題が発生しても2度と取り出すことができない。そのため、出荷前に入念な最終確認が行われる。

*3 キャリブレーション : 正しい値を計測できるように計測器が示す値を補正する作業のこと。較正ともいう。

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, C.Hill, K. Kin, L. Lu, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, S. Yoshida, et al.; Evidence for Neutrino Emission from the Nearby Active Galaxy NGC 1068, *Science* 378, 538-543, DOI: 10.1126/science.abg3395 (2022)
- S.Yoshida, K.Murase, M.Tanaka, N.Shimizu, and A.Ishihara; Identifying High-energy Neutrino Transients by Neutrino Multiplet-triggered Follow-ups, *The Astrophysical Journal*, Volume 937, Number2, DOI: 10.3847/1538-4357/ac8dfd (2022)
- IceCube Collaboration: A. Ishihara, C.Hill, K. Kin, L. Lu, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, N. Shimizu, S. Yoshida, et al. ; IceCube-Gen2: The Window to the Extreme Universe, *Journal of Physics G*48, 060501, DOI 10.1088/1361-6471/abbd48 (2021)
- IceCube Collaboration: A. Ishihara, C.Hill, K. Kin, L. Lu, K. Mase, M. Meier, R. Nagai, S. Yoshida, et al.; Detection of a Particle Shower at the Glashow Resonance with IceCube, *Nature* 591, 220-224, DOI: 10.1038/s41586-021-03256-1 (2021)
- Masanori Iwamoto, Takanobu Amano, Yosuke Matsumoto, Shuichi Matsukiyo, and Masahiro Hoshino; Particle Acceleration by Pickup Process Upstream of Relativistic Shocks, *The Astrophysical Journal*, 924, 108, DOI: 10.3847/1538-4357/ac38aa (2022)
- H. Hotta, K. Kusano, R. Shimada, Generation mechanism of solar-like differential rotation in high-resolution simulations; *The Astrophysical Journal*, 933, 199, DOI: 10.3847/1538-4357/ac7395 (2022)
- Han Aung, Daisuke Nagai, Anatoly Klypin, Peter Behroozi, Mohamed H. Abdullah, Tomoaki Ishiyama, Francisco Prada, Enrique Perez, Javier Lopez Cacheiro, Jose Ruedas; The Uchuu-Universe Machine dataset: Galaxies in and around Clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519, Issue 2, 1648-1656, DOI: 10.1093/mnras/stac3514 (2023)
- Takanobu Amano, Yosuke Matsumoto, Artem Bohdan, Oleh Kobzar, Shuichi Matsukiyo, Mitsuo Oka, Jacek Niemiec, Martin Pohl, Masahiro Hoshino; Nonthermal electron acceleration at collisionless quasi-perpendicular shocks, *Reviews of Modern Plasma Physics*, Volume 6, id.29, DOI:10.1007/s41614-022-00093-1 (2022)
- Tomoyuki Hanawa, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto; Cloudlet Capture Model for Asymmetric Molecular Emission Lines Observed in TMC1A with ALMA, *The Astrophysical Journal*, 932, 122, 14pp, DOI:10.3847/1538-4357/ac6e6a (2022)



\\ センター長の //

研究のはなし

2番めとなる高エネルギーニュートリノ放射天体発見される - NGC 1068

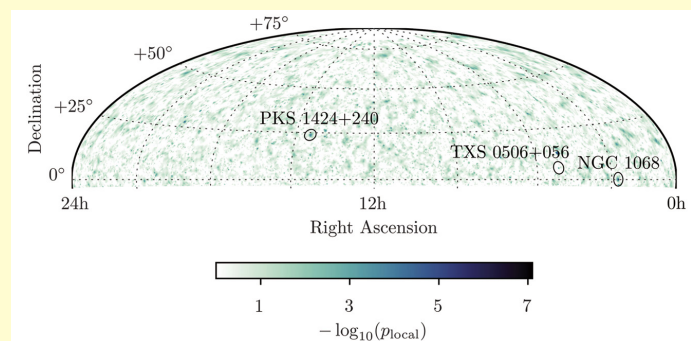
ハドロン宇宙国際研究センター
センター長・教授 吉田 滋

IceCube Collaboration は、建設を完了しフル観測を開始した2011年からの9年間のデータを解析し、セイファートII型銀河である NGC 1068がニュートリノ放射天体であることを突き止めました。統計的有意性は4.2シグマです。2022年11月に、サイエンス誌に論文を発表しました。これはブレーザー銀河である TXS0506+056 について2番目となる銀河系外ニュートリノ放射天体の同定です。しかし両天体からの放射の様相はかなり違います。

NGC 1068 からのニュートリノ放射は1.5TeVから15TeVの領域に分布する非熱的なエネルギースペクトルです。TeVがメインの放射です。また、ニュートリノ放射は定常的に放射されています。それに対して、TXS 0506+056は 100TeVから1PeVの、より超高エネルギー帯での放射です。また数ヶ月程度の時間的スケールで変動する放射である兆候もあります。こうしたことから、放射機構、あるいはニュートリノ生成環境はかなり異なると考えられます。NGC 1068 は GeV-TeVエネルギーのガンマ線では極めて暗く、電磁波信号が抜け出せないような、銀河中心部の超大型ブラックホール近傍で宇宙線加速とそれに伴うニュートリノ放射が起きていることを示唆しています。電磁波では探査が難しい領域を観測できるというニュートリノ天文学の特徴が活かした成果と言えるでしょう。

余談ですが、論文に掲載されたエネルギースペクトルデータの図に合わせて描かれた理論予想は、全て日本の研究者によるものです(大阪大学の井上芳幸さん達のチームとペンシルベニア州立大学の村瀬孔大さんたちのチーム)。実験研究だけでなく理論研究においても日本の寄与が大きいことは誇って良いと思います。

論文情報:

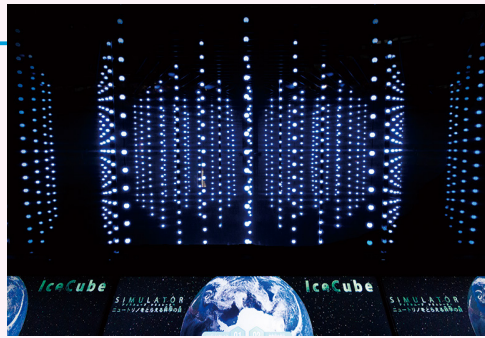
IceCube Collaboration, *Science* 378, 583-584, DOI:10.1126/science.abg3395 (2022)

2011年から2020年までの3186日間の観測データを用いた北天からのTeV エネルギーニュートリノのスカイマップ。大気ニュートリノ雑音からの超過(local p-value)を色で示している。NGC 1068 が最も有意な超過を示している。ついで有意なのは、PKS 1424+240 と TXS 0506+056 であり、どちらもブレーザー銀河である。

01 千葉市科学館にアイスクューブ実験の常設展示がオープン

2022年9月17日、千葉市科学館にてIceCube実験の常設展示がついにオープンしました。お話をいただいた2019年から、千葉市教育員会と(株)乃村工藝社の方々とコロナ禍の中たくさんの打ち合わせを重ね、とても素敵な展示が完成しました。南極点の氷河下に埋まる検出器をイメージしたライティングや、研究についての映像、放射線が目に見える霧箱など、楽しい展示で最新のニュートリノ研究を紹介しています。ぜひ、お立ち寄りください。

千葉市科学館
千葉県千葉市中央区中央4丁目5-1 複合施設さきぼーる 7~10F



02 AAPPS-DPP2022 国際会議開催

2022年10月9日~14日に、国際会議「AAPPS-DPP2022, 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics」が開催されました。プラズマ宇宙研究部門の松元亮治教授と松本洋介准教授が、会議運営を担いました。



03 NEW MEMBERS!



岩切 渉 Wataru Iwakiri

2022年11月より、国際高等研究基幹兼任の助教として着任いたしました。専門はX線天文学で、人工衛星や国際宇宙ステーションに搭載する検出器の開発、運用、天体のデータ解析を行ってきました。ニュートリノとあまり関連の無い人生を送ってきましたが、2017年当時、TXS 0506+056のマルチメッセンジャー観測の結果をとて楽しそうだなあと横から眺めていたので、今回ICEHAPの一員となれてうれしいです。これまでの経験を活かし、マルチメッセンジャー天文学の推進に貢献していきたいと思ひます。



野田 浩司 Koji Noda

2023年1月に国際高等研究基幹兼任の准教授として着任しました。地上の大気チェレンコフ望遠鏡を使ったガンマ線天文観測を10年ほど行っており、2019年にはこのエネルギー帯でのガンマ線バースト (GRB) の検出に貢献しました。千葉大ではIceCubeの高エネルギーニュートリノの情報を組み合わせることで突発天体の理解を深め、マルチメッセンジャー天文学を推進したいと思っています。実は博士論文はチェレンコフ望遠鏡を使ったGRBからのニュートリノ放射への制限でしたので、なんだかんだで古巣に戻ったような感覚があります。よろしくお願ひします。



アンナ・ポールマン Anna Pollmann

Hi, I am Anna Pollmann and I have joined the ICEHAP group in mid 2022. Ever since I started in research, my aim has been to work both in particle physics and astrophysics. When I learned about the unresolved questions in the Standard Model, I got intrigued to work on them. So, in my PhD thesis at the University of Wuppertal in Germany, I searched for new physics, i.e.

magnetic monopoles, in the data recorded by the IceCube detector. Afterwards I worked on the development on new sensors for IceCube as well as the measurement of light emission characteristics in ice in order to improve the sensitivity of IceCube for new physics. At Chiba U, I will continue my search for elusive particles and extend my research to neutrino physics at highest energies. In addition, I look forward to spread my fascination for physics to the students in class and laboratory. Guten Tag!

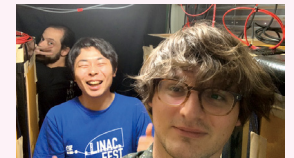
最近のD-Egg 関連

Colton特任研究員のReportNow 2にもありましたが、現在FATというD-Eggの最終動作確認試験が行われています。

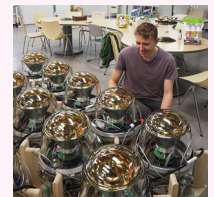


冷凍庫内で作業するメンバーたち

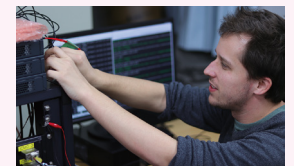
数週間ごとに、約15個のD-Eggを大型冷凍庫内の箱に入れ替えます。研究室のメンバーだけでは人手が足りないので、IceCubeグループの他研究機関の大学院生などに手伝いに来てもらっています。これまで何人もの助っ人が交代で来てくれていて、その度に研究室にもぎやかになります。



今思うと、初代助っ人はポストドクの芦田さん (アメリカ)



助っ人第2号のJohannesは、ドイツから



助っ人第3号はアメリカから来たBen

30kgもするD-Eggの移動を伴う作業は大変ですが、皆日本やICEHAPを好きになって帰って行ってくれるので、うれしいです。FATは2025年まで続くため助っ人の来日はもう少し続きそうです。

最近のセンター長

👓 コロナ下で海外出張するために、ついにガラケーをあきらめスマホに。再入国ルールに敗北しました。



千葉大学 ハドロン宇宙国際研究センター

International Center for Hadron Astrophysics, Chiba University

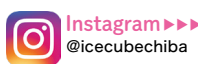
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

URL <http://www.icehap.chiba-u.jp>

icehap@ml.chiba-u.jp



SNSやっています



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。▶▶

