

研究会・学会スケジュール

第25回名古屋メダルセミナー
The 25th Nagoya Medal of Organic Chemistry

開催日：2022年3月3日(木)
開催場所：オンライン
主催：名古屋メダルセミナー組織委員会
共催：名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所
問い合わせ：伊丹健一郎 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授
nagoya-medal@itbm.nagoya-u.ac.jp / 052-788-6098
※参加登録URL：
https://www.msdlife-science-foundation.or.jp/symp/nagoya/nagoya_prog2022.html

第27回プラズマの数値シミュレーションに関する国際会議
27th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas

開催日：2022年8月30日(火)～9月2日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール(予定)
主催：渡邊智彦 理学研究科 教授
共催：名古屋大学大学院理学研究科
問い合わせ：渡邊智彦 理学研究科 教授
watanabe.tomohiko@nagoya-u.jp / 052-789-3934

第15回日本ショウジョウバエ研究集会
15th Japan Drosophila Research Conference

開催日：2022年9月12日(月)～9月14日(水)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール、野依記念学術交流館(予定)
主催：JDRC15 事務局
共催：名古屋大学大学院理学研究科
問い合わせ：上川内あづさ 理学研究科 教授
kamikouchi@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2982

※「新型コロナウイルス感染症 (COVID-19)における名古屋大学の活動指針」により、上記内容は変更になることがあります。

▶バックナンバーはウェブからも入手できます

理学部・大学院理学研究科のウェブページにある広報誌サイトでも、すべてのバックナンバーがPDFファイルでダウンロードできます。こちらにもぜひアクセスをお願いいたします。

https://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/backnumber.html



▶名古屋大学のコロナ対策

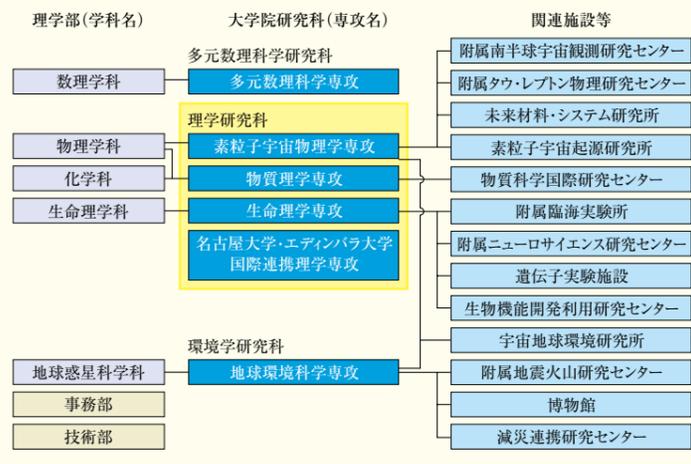
新型コロナウイルス感染症が世界的に猛威を振るい、日本国内においても感染が拡大しています。政府において、新型コロナウイルス感染症対策の基本方針が策定されたことを踏まえ、名古屋大学でもさまざまな対応策を講じています。名古屋大学の最新の活動指針については以下をご参照ください。

https://www.nagoya-u.ac.jp/



組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究所(地球環境科学専攻)



編集だより

ドラマの中の架空の研究者は、想定外の結果に出会ったとき、大抵「バカな、ありえない」と叫ぶが、実際の研究者は、「やった。これですごい研究ができる」と喜ぶものである。アノマリー、すなわち標準的な理解と異なる結果は、全研究者の夢である。偉い先生が唱える理論も、矛盾する実験結果・観測結果ひとつでゴミ箱行きであり、しかも「偉い先生」本人がそれをだれよりも喜び、かつ自分で発見できなかったことを悔しがるのである。アノマリーは人類未探査の領域にあるため、研究者は「極めて」や「初めて」が大好きである。アト秒は、光ですら原子の大きさしか進まない極短時間であるし、加速器物理は高エネルギーや高統計が大好き、そして宇宙物理学者は未探査の世界が大好きである。やっぱり研究は面白い。そしてその面白さの先にこそ、これまでの人類を支えてきた発見があったし、今後も人類に欠かせない多くの発見があると私は信じている。(中澤知洋)

表紙説明

アノマリー(anomaly)とは、通常の法則・理論では説明できない事象を指す。なぜこの事象は起こるのかを探求することで、新たな科学の世界が見えてくる。まずはアノマリーの向こう側をのぞいてみよう。



理 *philosophia* — No.41
winter-spring 2022
2022年2月18日発行

広報委員 阿波賀邦夫(研究科長)
寺崎一郎(副研究科長)
嘉村 巧(副研究科長)
松尾信一郎(数理学科)
飯嶋 徹(物理学科)※委員長
中澤知洋(物理学科)
山川洋一(物理学科)
伏谷瑞穂(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
平子善章(生命理学科)
杉谷健一郎(地球惑星科学科)
南崎 梓(素粒子宇宙起源研究所)
堂前弘樹(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
広報委員会までご連絡ください。
なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。

制作 株式会社電通
編集協力 株式会社エスケイワード
デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

TEL 052-789-2308 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

理

名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌
[理フィロソフィア]
winter-spring 2022

41

philosophia

特集

「アノマリーからのぞき見る 新しい物理世界」

- 04 — 素粒子の「香り」を使った新物理の探索◇飯嶋 徹
- 08 — 地下から探る宇宙暗黒物質◇風間慎吾
- 02 — 時を語るもの〈郷 通子博士〉◇由良 敬
- 03 — 理のエッセイ◇棚橋誠治
- 12 — 理の先端をいく◇加藤景子/田村陽一/岩見真吾
- 18 — 理学部交差点

郷通子博士 — タンパク質モジュール構造の発見

郷通子博士は、タンパク質が三次元構造から識別される「モジュール」とよばれるコンパクトな構造単位にあますところなく分割できること、さらにモジュールが遺伝子の塩基配列単位であるエクソンに対応することを見いだしたことで知られている。グロビンタンパク質の立体構造からモジュールを見いだした際に、過去のグロビン遺伝子に存在していたイントロンの位置を予測し、後にその存在が証明されることとなった。このことで、モジュール/エクソンが組み合わされることによってタンパク質が進化する機構を提唱した。

1989年に名古屋大学に着任された当時、タンパク質の立体構造を「見る」ことは容易ではなかった。そのような中で、当時発達の途上にあったコンピュータグラフィックスを駆使して、タンパク質をコンピュータ画面に三次元表示し、即座に回転させることを実現した。このとき初めて、原子が隙間なく詰まったモジュール構造を見ることができた。モジュールの研究は、タンパク質グラフィックスの研究とともに歩み続けたといえる。
(由良 敬 お茶の水女子大学教授)



郷 通子 (1939 -)
名古屋大学教授 (1989-2003)
名古屋大学名誉教授 (2003-)
中日文化賞 (2004)

◎理のエッセイ

益川敏英先生から学んだこと

棚橋 誠治 素粒子宇宙物理学専攻教授



Illustration: Junichi Kishi

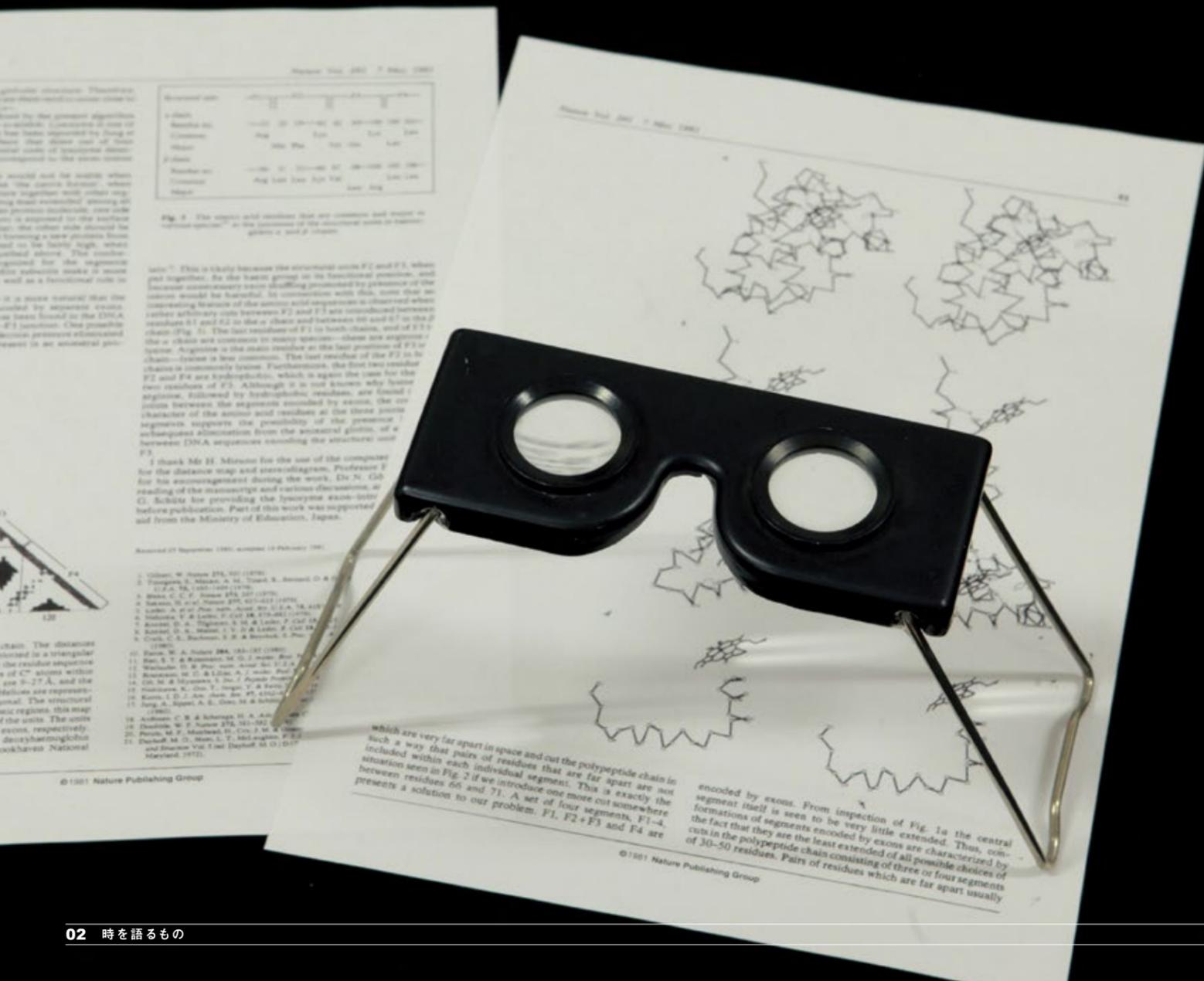
小林・益川理論の提唱により2008年にノーベル物理学賞を受賞し、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 (KMI: Kobayashi-Maskawa Institute) の初代機構長を務めた益川敏英特別教授が2021年7月23日にご逝去されたとの知らせをうけ、悲しみにたえない。心から哀悼の意を申し上げる。

益川先生に初めてお会いしたのは、私が修士課程の学生であった1987年から1988年だと記憶している。当時の私は、山脇幸一先生の指導のもと、対称性の力学的破れとよばれる分野の研究をスタートさせたところだったが、この分野のバイブルともよべる論文が、益川先生らの一連の研究 (益川・中島理論) であった。この理論は、物理の内容としても数学的な手法としても大変に重厚な研究であり、益川・中島理論に関連して最初の研究を始めた私は大変に幸運だった。しかし、当時の私は、この理論の数理構造の面白さだけを見ていて、その物理的意義の重要性については、それほど重視していなかった。そして、京都大学基礎物理学研究所で行われた研究会で、あこがれの益川先生から研究の動機を問われた際、なんと私は「解の構造を調べてみただけ」という、物理の研究としてはあり得ない返答をしてしまった。益川先生はその際、「正直すぎる」と一言おっしゃり、数理構造の面白さだけでなく、物理としての重要性を考えねばならないことを、学生の私にとっても柔らかく論じてくださり、以降の私は物理の大切さを肝に銘じるようになった。

この話から30年近く後、名古屋大学理学部素粒子論研究室 (E研) で益川先生が行った講義も印象深いものだった。著者のイニシャルをつなげてBKMU構成法とよばれる数学的手法についての講義であったが、益川先生の物理的直感あるいは信念ともよべるものを契機に、この構成法の研究が始まったことを知った。自分の物理センスを信じて考え抜くことによって高度に数学的な内容の研究を進めることができること、その大切さを改めて学んだように思う。

Masaharu Tanabashi

1964年生まれ。1992年、名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。博士 (理学) 取得。高エネルギー物理学研究所日本学術振興会特別研究員、客員研究員、助手、東北大学大学院理学研究科助教授を経て、2007年より現職。専門は素粒子理論。とくに素粒子現象に興味をもち、標準模型を超える物理の可能性について、理論研究を行っている。



◇写真の説明
原子の位置を「見る」ためには距離計算の結果を抽象的なグラフで表示するか、一部の化学結合のみを線図で描くしか方法はなかった。コンピュータグラフィックスにより原子を空間充填模型で表示するとともに、リアルタイムで回転させることができるようになった。このことでモジュールの全体像が明らかになったが、論文紙上で回転させることはできず、ひきつづき線図のステレオ表示が利用された。ステレオ図を裸眼で見ることは訓練が必要であり、容易に見るためのステレオスコープも利用されていた。紙面のみの当時の学術誌ではモジュールの全体像を伝えることはできず、もどかしさを感じ続けていた。

自然科学の研究では、従来の通説では説明できない「新奇現象」が見つかることがある。

新奇現象=アノマリーが見つかった時こそが、科学が躍進するチャンスだ。

たとえば惑星の軌道が逆行する現象は天道説から地動説への転換につながった。

最近では1964年に見つかった粒子と反粒子の性質の違いから、

小林-益川の研究を経て、未知の素粒子が発見された。

アノマリー。それは見たことのない物理世界への入り口なのかもしれない。

素粒子の「香り」を使った新物理の探索

飯嶋 徹 素粒子宇宙起源研究所教授



Toru Iijima

1964年生まれ。1987年 京大物理学部卒業、1994年 京大大学院理学研究科物理学第二専攻単位取得退学、1995年 博士(理学)。1994年 高エネルギー物理学研究所(現高エネルギー加速器研究機構)助手、2002年名古屋大学大学院理学研究科助教授(准教授)を経て、2010年より現職。専門は、素粒子物理学実験。加速器を使ったクォークやレプトン反応の精密測定から標準理論を超える新物理の探索に取り組んでいる。

素粒子の「香り」と「アノマリー」

素粒子物理学は、我々の宇宙を構成する最も基本的な粒子と、粒子の間に働く力(相互作用)の法則を明らかにすることを目的としている。現在のところ、物質を構成する基本粒子であるクォークとレプトン、3種類の相互作用(電磁気力、強い力、弱い力)を伝えるゲージ粒子の存在が知られ、各粒子に質量を与えるヒッグス粒子の存在も確かめられた。図1に示すように、クォークとレプトンはそれぞれ6種類あり、この粒子の種類を素粒子研究者は習慣的に「フレーバー」、日本語では「香り」とよんでいる。表題にある素粒子の「香り」とはこのことである。また6種類の粒子は大きく質量が異なる3つの「世代」に分類される。

これらの素粒子のふるまいは標準理論とよばれる理論で定量的に記述することができるが、はたして標準理論は完全なのか。これまでに測定されている素粒子現象は、ほぼ標準理論で無矛盾に説明されてきた。ところが、最近になって、我々が進める「Bファクトリー」とよばれる高エネルギー加速器実験をはじめとして、粒子の香りに着目した実験結果が標準理論からの乖離を示す例がいくつか見出された。

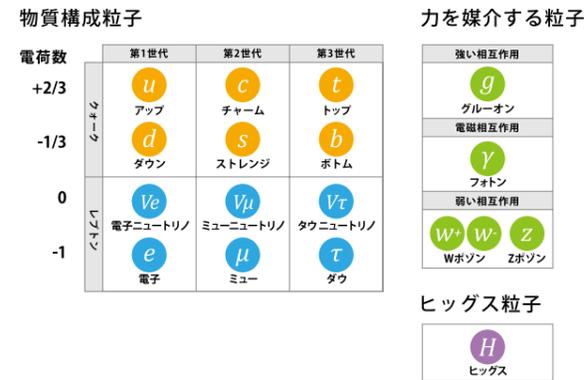


図1 標準理論を構成する素粒子
クォーク、レプトンはそれぞれ6種類あり、質量が大きく異なる3つの世代に分類される。本文に登場するB中間子は反ボトム・クォークとダウン・クォークで構成される複合粒子、反B中間子はその電荷を反転させた反粒子である。



図2 高エネルギー加速器研究機構(KEK)で進むBファクトリー実験
現在は、KEKB/Belle実験を改造したSuperKEKB/Belle II実験が進んでいる。(写真提供:KEK)

この異常(アノマリー)が標準理論を超える新物理の兆候ではないかと、世界中の研究者が注目している。本稿では、このアノマリーの話題を中心に、我々が進めている粒子の香りに注目した研究を紹介したい。

Bファクトリーと小林-益川理論の証明

まずBファクトリーについて書いておこう。Bファクトリーは、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)に設置された周長約3kmの大型加速器である。光速で周回する時計回りの電子ビームと反時計回りの陽電子(プラス電荷をもつ電子の反粒子)を高頻度で衝突させるコライダー加速器である(図2)。衝突した電子と陽電子は対消滅し、そのエネルギーから「B中間子」とその反粒子である「反B中間子」が大量に対生成される。ここで、B中間子は第3世代のボトム・クォークを構成子とする中間子で、このために「B工場=Bファクトリー」とよばれている。世界のコライダー加速器としては、ヨーロッパのCERNにある加速器LHC(Large Hadron Collider)が世界最高エネルギー(重心系で13テラ電子ボルト)を達成しているが、日本のBファク

トリーは世界最高の衝突輝度(ルミノシティ)を有する最先端加速器である。

1999年に運転を開始した初代Bファクトリー加速器(KEKB)における実験(Belle実験)の目的は、小林-益川理論(1972年発表)の証明であった。小林-益川両氏は、K中間子の崩壊で発見されていた粒子と反粒子の対称性の破れ(CP対称性の破れ)を説明可能な理論を探り、当時知られていなかった第3世代の素粒子の存在を予言した。第3世代のボトム・クォークとトップ・クォーク、タウレプトンとタウニュートリノ^{*1}の存在はその後の加速器実験で次々に確かめられた。そして、第3世代のボトム・クォークで構成されるB中間子と反B中間子の崩壊におけるCP対称性の破れが小林-益川理論と整合していることが定量的に確かめられ(図3)、これが決定打となって、両氏の2008年ノーベル物理学賞受賞につながった。

スーパーBファクトリーで小林-益川理論を超える

さらに、2012年には、標準理論で唯一未発見となっていたヒッグス粒子がLHC実験^{*2}で発見された。しかし、これで終わ

りなのだろうか。標準理論は、これまでに見つかっているほぼすべての素粒子現象を無矛盾に説明可能な優れた理論であるが、力はどうに統一されるのか、宇宙にはなぜ物質のみがあり反物質が見当たらないのか(宇宙の物質優勢)、宇宙観測から存在が明らかな暗黒物質の正体は何か、といった疑問に答えることはできない。そこで、標準理論はこれまでの加速

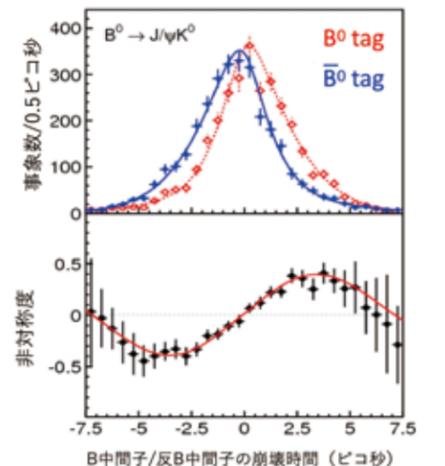


図3 KEKB/Belle実験における小林-益川理論の検証結果
B中間子がJ/ψとよばれる中間子とK中間子に壊れる頻度をB中間子(青)と反B中間子(赤)と比較したもので、粒子-反粒子の対称性の破れが明確に測定された。(図提供:KEK/Belle実験)

器で到達可能なエネルギー領域での有効理論であり、より高いエネルギー領域により包括的な新しい物理があると考えればどうか。たとえば、よく知られている超対称性理論は、これらの諸問題を説明可能な有力候補である。ただし、新物理の理論を特定する明確な理由はなく、実験によってその端緒を探る必要がある。

そこで、筆者たちはBファクトリーの50倍のデータ蓄積が可能なスーパーBファクトリー実験を提案し、現在実験を進めている。この大量のデータで、B中間子のさまざまな崩壊を高精度で測定することにより、標準理論からのずれ、標準理論では起こらないような反応を見つけるのが狙いである。たとえば、これまでのデータは、観測されたCP対称性の破れの小林-益川理論との整合性を測定誤差の範囲で示してはいるが、これを格段に高い精度で測定できれば、標準理論からのズレとして新物理の証拠が浮かび上がるかもしれない。

新物理の鍵はタウレプトンか

B中間子の崩壊にはさまざまな崩壊パターンがあり、そのそれぞれで標準理論

からのズレや、標準理論では禁止された反応の探索を進めることができる。どこを探るのがよいかは研究者の考えによる。そこで、筆者らが注目しているのが、荷電レプトン(電子、ミュー、タウ)の香りに着目した研究である。標準理論においては、各世代の素粒子は、世代ごとに大きく異なる質量を有する以外に第1世代のコピーであり全く同じ性質(普遍性)をもつとされ、これまでの実験結果はそれを支持してきた。しかしながら、このことは標準理論を超える新物理が存在する場合には自明ではない。たとえば、LHCで発見されたヒッグス以外の第二のヒッグスが未発見のまま潜んでいれば、粒子は質量以外にも世代間で異なる性質をもつ可能性がある(普遍性の破れ)。

実際に、B中間子の弱い相互作用による崩壊(図4)において、筆者らが中心になって進めたBelle実験データ解析の結果は、普遍性の破れの兆候を示している。この崩壊は、よく知られた中性子が陽子+電子+反ニュートリノに崩壊するベータ崩壊($n \rightarrow p e \bar{\nu}$)と本質的に同じであり、中性子をB中間子、陽子をD中間子に置き換えて

理解できる(D中間子はチャーム・クォークを構成子とする中間子)。ただし、B中間子の崩壊の場合は、終状態の荷電レプトンは電子に加えて、ミュー粒子、タウ粒子の3モードがある($B \rightarrow D e \nu, B \rightarrow D \mu \nu, B \rightarrow D \tau \nu$)。標準理論どおりであれば、この3モードは荷電レプトンの質量に依存する運動学的因子を除いては同じ強度で起こるが、新物理があればそのバランスが崩れるだろう。特に第3世代のタウレプトンは第1世代の電子、第2世代のミュー粒子に比べて際立って大きな質量をもつため、新物理の効果も受けやすい。この研究は、国外でも精力的に進められ、米国SLACのBaBar実験やCERNのLHCb実験でも $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ 崩壊における普遍性の破れの兆候が見えている。これ以外にも、B中間子がK中間子とミューオン対あるいは電子対に変化する稀崩壊過程の比較($R(K^{*}) = \text{Br}(B \rightarrow K^{*}) \mu + \mu^{-} / \text{Br}(B \rightarrow K^{*}) e + e^{-}$)においても普遍性の破れの兆候が報告されている。これらの乖離は深刻に受け止められ、「B中間子アノマリー問題」と総称される喫緊の課題として世界的に注目されることとなった。観測された標準理論から

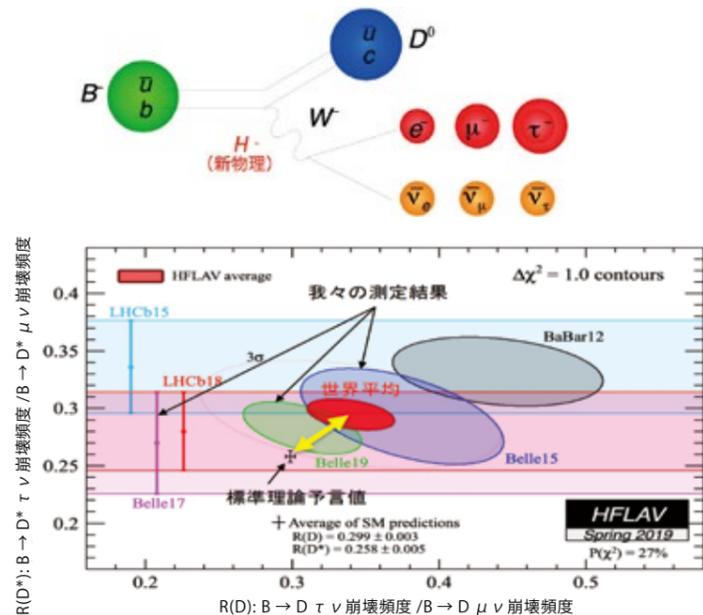


図4 B中間子の弱い相互作用による崩壊(上)における、相互作用の普遍性の検証結果(下)
下の図の横軸は、 $B \rightarrow D \tau \nu$ 崩壊と $B \rightarrow D \mu \nu$ 崩壊の頻度の比。縦軸は同じ比を崩壊の終状態D中間子が励起状態D*の場合に示したものである。Belle実験の結果とともに、BaBar実験、LHCb実験の結果が示されている。赤い楕円が世界平均の1 σ の範囲を示す。下図は、Heavy Flavor Averaging Group (HFLAV)による。

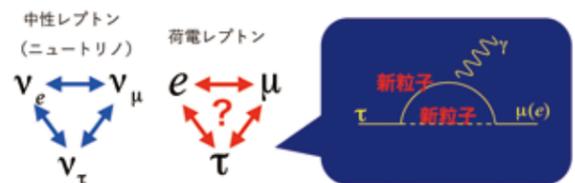


図5 レプトンの香りを破る反応
中性レプトンのニュートリノでは3世代間の変化(ニュートリノ振動)が観測されている。荷電レプトンでの同様の变化は、標準理論では起こらないとされるが、新物理があれば見つかる可能性がある。

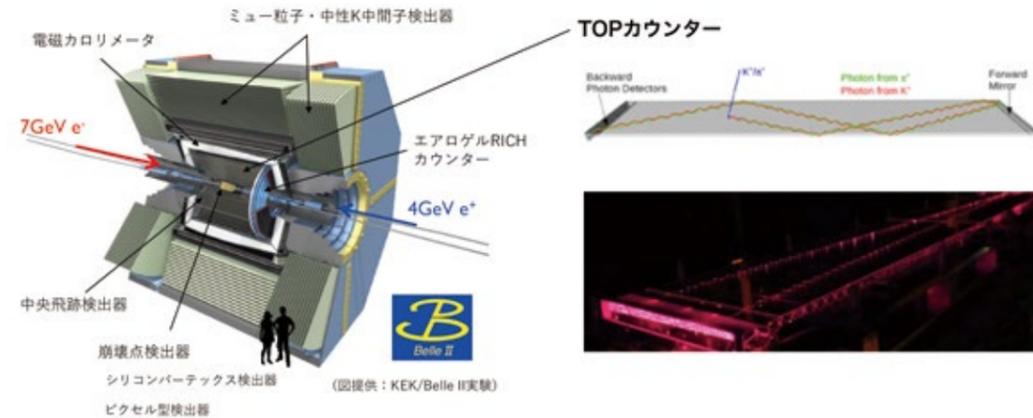


図6 Belle II測定器
粒子の崩壊位置、飛跡、エネルギーや速度を測る7種類の検出器で構成される。名古屋大グループは粒子の速度を高精度で計測可能な新型粒子識別検出器「TOPカウンター」を独自に開発し、建設を中心になって進めた。

のズレ(偏差)は世界平均をとると3 σ 以上であるが、このレベルでは統計的なふらつきの可能性も残る。これを「発見」とするには測定精度を格段にあげて5 σ (確率で99.9999%以上)のズレを確かめる必要がある。

このアノマリーが確定すれば、標準理論では起こらないような反応も見つかる可能性がある。電子と陽電子の衝突では、B中間子対だけでなく、それとほぼ同数のタウレプトン対($\tau^+ \tau^-$)も大量に生成される。そこで、筆者ら名大研究者は、スーパーBファクトリーを「スーパータウファクトリー」として捉え直し、第3世代のタウレプトンが第2、第1世代のミュー、電子に変化する崩壊の探索を進めている($\tau \rightarrow \mu \gamma, \tau \rightarrow e \gamma$ など。 γ は光子を表す。図5)。このような崩壊は、「レプトンの香りを破る崩壊」として、標準理論では禁止されている。一方、中性のレプトンであるニュートリノでは、3世代間の変化がすでに発見されており(ニュートリノ振動³⁾、荷電レプトンにおける同様の探索は重要な研究テーマと考えている。

スーパーBファクトリーの現状とこれから

スーパーBファクトリー実験でBファクトリーの50倍のデータを蓄積するために、KEKB加速器の運転は2010年に終了し、30倍のルミノシティが達成可能なSuperKEKB加速器への改造が行われた。30倍のルミノシティは、衝突点での電

子ビームと陽電子ビームを数十ナノメートルの極細ビームに絞り込むことで達成する(「ナノビーム衝突方式」とよばれる)。衝突頻度の大幅な増加に伴い測定器の改良も必要となる。「Belle II」と改名された測定器には、我々名大研究チームが独自に開発した新型粒子識別装置「TOPカウンター」がインストールされている(図6)。この検出器は高速の荷電粒子が石英輻射体を通過した時に発生するチェレンコフ光の光子一つ一つが石英中を全反射しながら端面に到達するまでの伝搬時間(Time-Of-Propagation)を約50ピコ秒の高時間分解能で計測するもので、ほぼ光速で飛来するK中間子を π 中間子などの他粒子と識別することができる。これにより、B中間子の崩壊を高い効率で測定し、新物理探索の感度も高めることができる。また、高頻度衝突により生成される大量の反応データ解析には、ネットワークでつながれたグリッド計算機網による並列処理が必要であり、名古屋大学理学研究科の高エネルギー物理学データ解析実験施設、KMIタウレプトンデータ解析室のコンピュータがそのための重要な役割を担っている。

SuperKEKB/Belle II実験は、2019年3月から本格的な衝突データの収集を開始し、2020年夏にはKEKB加速器の性能を超え、世界最高ルミノシティを達成、2021年夏までに約2億対のB-反B中間子対のデータを蓄積している。しかし、これはまだ登山にたとえれば最初の坂を登った程度で

あり、今後加速器の調整を繰り返し実際の衝突実験で初めてわかるいろいろな問題を解決しながらルミノシティを徐々に上げ、今後5年間に山の中腹(5から10倍)そして10年後ぐらいに山の頂上(50倍)を目指してゆく。

名大発・日本発の世界的発見を

本稿では、Bファクトリー加速器を舞台とする素粒子の香りに着目した新物理探索の研究を紹介した。この研究は、3世代モデルを提唱した小林-益川理論の流れを汲む名大発の研究である。近年の高エネルギー加速器実験は大規模な国際共同実験となり、Belle II実験には世界中の26の国と地域から約1100人の研究者が日本に集結して共同研究を進めている。そのような大規模研究のなかにあっても、独自のアイデアによる技術開発、データ解析で名古屋発、日本発となる新発見を目指したい。

*1 タウニュートリノ
素粒子標準模型における第三世代のニュートリノ。名古屋大学理学部基本粒子研究室独自の原子核乾板を使ったDONUT実験で確認された。
*2 LHC実験
高エネルギー物理実験を目的としてCERNが建設した世界最大の衝突型円形加速器を使った実験(本誌25号P.8参照)。
*3 ニュートリノ振動
生成時に決定されたニュートリノのフレーバーが、後に別のフレーバーとして観測される素粒子物理学での現象(本誌30号P.8参照)。

地下から探る宇宙暗黒物質

風間 慎吾 素粒子宇宙起源研究所准教授

暗黒物質の直接探索

質量の起源を担うヒッグス粒子の発見により素粒子物理学における標準理論は完成をし、その質量は約 $125\text{GeV}/c^2$ と見積もられたが、標準理論の枠組みではヒッグス質量は輻射補正を受け2次発散をするため、この発見自体がその質量を安定化させる新物理の存在を示唆している。超対称性理論など標準理論を超えるモデルはテラスケールに新物理を予言し、重心系エネルギー 13TeV で稼働を始めた陽子-陽子衝突型加速器LHCを用いてさまざまな

探索が行われてきた。しかし、新物理を示唆する確かな証拠はこれまでになく、素粒子物理学は岐路にあると言える。筆者は、この状況下において次の時代を切り開く鍵となるのは暗黒物質であると考えた。

暗黒物質とは、質量はもつが光学的には観測できない未知の物質のことで、宇宙マイクロ波背景放射の観測結果によると、宇宙全体の物質のうち暗黒物質が80%以上を占めることが判明している。暗黒物質はその正体の詳細は不明であるが、電荷をもたない・冷たい（非相対論的速度）・

安定している（宇宙年齢より長寿命）など、その性質について判明している点もある。しかし、これら性質を満たす素粒子は標準理論の枠組みには存在せず、暗黒物質は標準理論を超えた物理を探る上で大きな鍵を握っていると考えられる。

では、そんな謎に包まれた暗黒物質をどのように探索するのか。仮に暗黒物質が標準理論の弱い相互作用と同程度の相互作用をもつとすると、わずかな確率であるが原子中の原子核や電子と相互作用し、これらを反跳する。反跳された原子核や

電子は、周りの原子を励起・電離し、その際に光や電離電子が生成される。この信号を高感度な検出器でとらえることで、暗黒物質の正体解明が可能となる（図1）。ただし、話はそう単純にはいかない。なぜなら、暗黒物質と物質の反応頻度は非常に少ないためである（1トンサイズの標的を用いても年に数回あるかないか）。そのため、暗黒物質の発見には、偽の暗黒物質信号となる環境放射線や宇宙線の影響を極限まで低減する必要がある。暗黒物質の直接探索とは、言い換えれば究極の低放射能検出器の開発ともいうことができる。

著者が着目した標的は、希ガスのキセノンを -100°C まで冷却した液体キセノンである。著者は、液体キセノン3.2トンを用いた暗黒物質探索XENON1T実験に2016年より日本人としてただ1人加わり、これまで世界最高感度の探索を牽引してきた。本稿では、このXENON1T実験で見つかった電子反跳の超過事象（アノマリー）について解説したい。

XENON1T実験

XENON1T実験（図2）は、液体キセノン3.2トンを用いた検出器で構成され、山頂から1400メートルの深さにあるイタリアのグランサッソ国立研究所地下施設で2016年に運転を開始し2018年に終了した。現在、液体キセノンを用いた実験が暗黒物質探索において世界をリードしているが、これはキセノンには暗黒物質との散乱断面積が高い、シンチレーション光量が多い、外部放射線に対する阻止能が高いなど

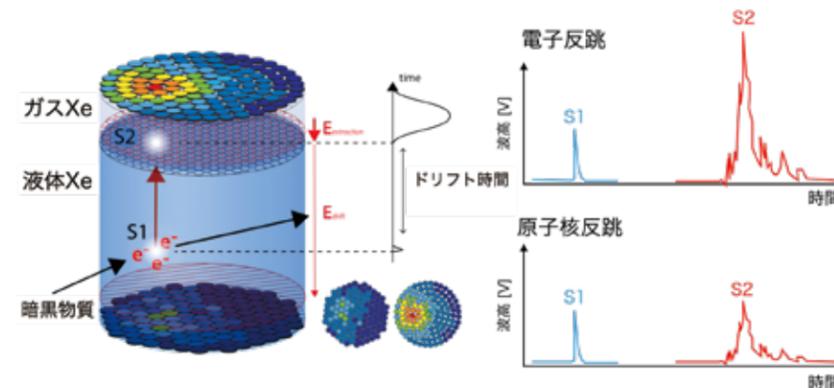


図1 液体キセノン検出器の動作原理
暗黒物質と液体キセノンが相互作用した際に生成される蛍光 (S1) と電離電子による比例蛍光 (S2) の2つの信号を検出することで、事象毎の粒子識別 (電子or原子核反跳) が可能である。



図2 イタリア・グランサッソ地下実験施設のXENON1T検出器
左側が直径10m、高さ10mの環境放射線遮蔽用の水タンク。水タンクには液体キセノン検出器の様子がわかるように検出器が描かれた垂れ幕がぶら下がっている。右側は冷凍機、キセノン純化システム、データ取得サーバーを備えた3階建ての建屋。キセノン中に微量 (ppb-ppm) に含まれるクリプトンを除去するための蒸留塔は高さ5.5mもあり、1階から3階まで突き抜けている。

さまざまな利点があるためである。

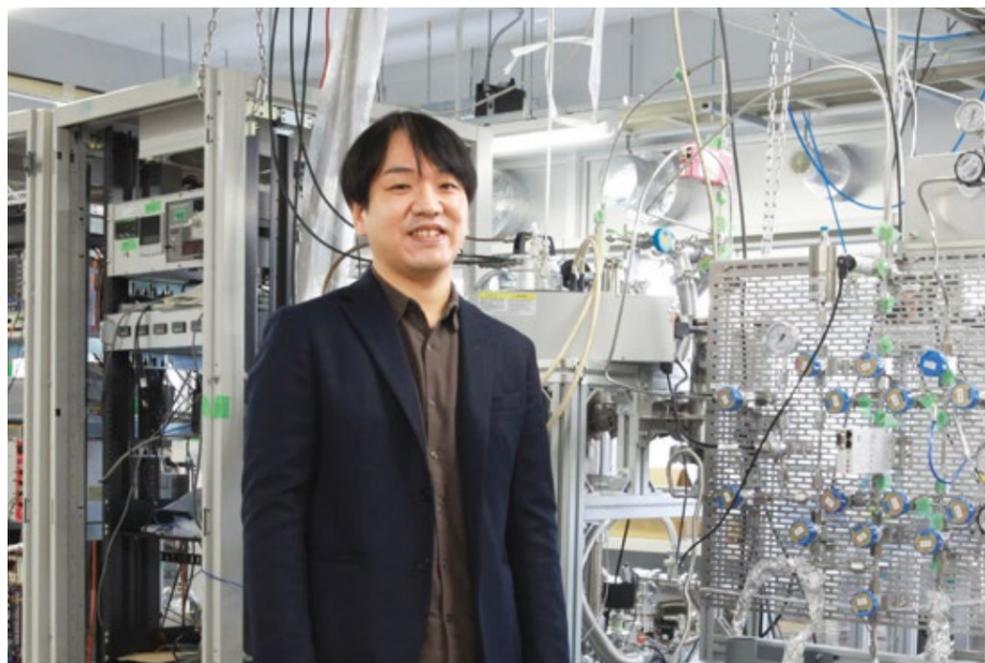
前述のように、暗黒物質がキセノンと相互作用するとシンチレーション光 (S1) と電離電子が生成される。S1信号は検出器上下に配置された光電子増倍管 (PMT) により検出され、電離電子は液中に印加された電場によって上方向にドリフトする（図1）。液体と気体の間には約 0.7eV のポテンシャルが存在するため、約 $10\text{kV}/\text{cm}$ の高電場を用いて電子を液体から気体へ引き出す必要がある。気体相では電子数に比例した蛍光 (S2) が発生し、この信号をさらにPMTで読み出す。S1とS2の時間差は電離電子のドリフト時間に相当し、これが反応点のz方向情報に相当する。また、S2信号の上部PMTアレイのヒット分布からxy平面での反応点を得ることができ、これにより反応点の3次元位置再構成が可能となる。位置再構成精度は $O(1)\text{mm}$ 程度である。

原子核反跳では、生成された電離電子がキセノンイオンと再結合する割合が多く、S2信号量は電子反跳と比べて小さくなる。そのため、S1とS2の比を見ることで、入射粒子を識別することが可能となる。この方

法による、原子核・電子反跳の識別能力は99.8%以上である。暗黒物質探索の大きな背景事象の一つに放射性ラドン (^{222}Rn) の娘核 ^{214}Pb の β 崩壊事象があるが、このS2/S1の信号比を用いることで大幅な削減が可能となる。この高い電子反跳排除能力によりXENON1T実験では、原子核を反跳する暗黒物質 (Weakly-Interacting Massive Particle, WIMP) に対して高い感度を達成してきた。従来実験ではこのWIMPに焦点が当てられ感度を向上してきたが、今回見つかったアノマリーは電子反跳事象 (電子や光子とのみ相互作用をし、原子核とは相互作用しない) であるという点を強調しておきたい。

電子反跳超過事象の発見

電子反跳事象の探索では、イベントロジックとして1つのS1・S2ペア信号が要求され、エネルギー範囲は検出効率が10%となる 1keV から放射性物質由来の背景事象 (ガンマ線) が主要な領域となる 210keV までが用いられた。標的の有効質量は検出器壁からの背景事象の寄与を減らすため、検出器の内側のみ (約1トン) が用いられ、



Shingo Kazama

1985年埼玉県生まれ。2014年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士 (理学) 取得。高エネルギー加速器研究機構博士研究員、チューリッヒ大学博士研究員、名古屋大学高等研究院YLC助教を経て、2021年11月より現職。専門は素粒子実験。暗黒物質やアクションなど、標準模型を超える物理の探索に取り組む。

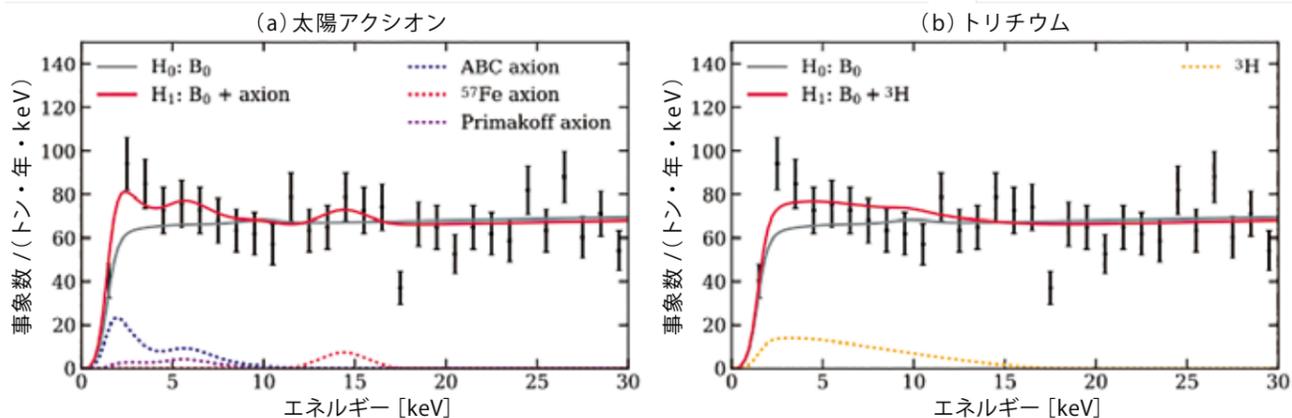


図3 電子反跳エネルギースペクトラムに対するフィット結果
(a)は B_0 に太陽アクシオンモデルを加えてフィットした結果で統計的有意性は 3.4σ 。(b)は B_0 にトリチウムを加えてフィットした結果で統計的有意性は 3.2σ 。2つでエネルギースペクトラムの形状の違いから、アクシオンの方がより超過に合う結果となっている。

観測合計時間は約227日(2017年2月-2018年2月)であった。

低エネルギー領域での主要な背景事象は放射性ラドンの娘核(^{214}Pb)の β 崩壊事象であり、検出器部材からのラドンの湧き出しのため検出器中に一様に存在する。 ^{214}Pb の放射能は、 $^{214}\text{BiPo}$ の遅延同時計測や ^{218}Po の α 崩壊事象から推定が可能であり、約 $10\mu\text{Bq/kg}$ と評価された。これは非常に僅かなラドン量であるが、使用する検出器部材を徹底的にスクリーニングし(小さなネジ一本まで)、高純度な部材のみを用いた検出器を実現したおかげである。次に主要な背景事象はクリプトンの放射性同位体(^{85}Kr)の β 崩壊事象である。市販のキセノンガス中には1ppm程度のクリプトンが含まれているが、XENON1T実験ではこれを除去するため蒸留塔の開発を行った。これにより選択的なクリプトン除去が可能となり、最終的に1ppt以下まで削減可能となった。1-30keVでの背景事象量は約76事象/(トン・年・keV)と見積もられ、世界で最も背景事象が少ない検出器の実現に成功した。

得られた電子反跳エネルギースペクトラムの低エネルギー領域でのふるまいを図3に示す。 B_0 (灰色線)は背景事象の予測

を表し、黒点は観測データを表すが、1-7 keVの範囲でデータが B_0 を有意に超過している様子がわかる。この領域での背景事象の予測は 232 ± 15 事象であるのに対して、観測された事象数は285事象であり、これは 3.3σ の超過に相当する。

新物理の発見か未知の背景事象か

超過事象はどのように解釈できるのだろうか。まず考えたのが、予想せぬ背景事象の寄与である。その一つとして水素の放射性同位体であるトリチウム(半減期12.3年でQ値18.6keVの β 崩壊)が考えられる。トリチウムは、その量が推定できない放射性不純物で、これまで考慮されてこなかった背景事象である。超過がトリチウムに起因していると仮定しフィットを行うと、図3(b)に示されるように、トリチウムの β 崩壊分布は良くデータと合っており(3.2σ)、159事象/(トン・年・keV)のトリチウム量を示唆する。これはキセノン1kg中に約3個トリチウムが含まれており、 10^{25} 程度の濃度比に相当するが、残念ながら既存の技術ではこの微量の定量は不可能である。次に考えたのが、極微量トリチウムが一体どの様に検出器中に混入したかである。特に、宇宙線によるキセノン原子核破碎、

空気の混入、ステンレス真空容器に吸蔵された水素の放出といった可能性を検討した。その結果、化学形態として水での混入はないが、水素の形で混入は否定も肯定もできないことが判明した。これは、水がわずかにppb程度でも検出器中に混入してしまうと暗黒物質との相互作用で生成されたS1光が吸収され、その検出効率が著しく低下してしまうが、水素であればその影響を受けないためである。

トリチウム混入の可能性は完全には否定できないが、本研究ではもう一つの可能性として標準理論を超えた物理(太陽アクシオン、Axion-Like Particles (ALPs)、ニュートリノの異常磁気能率)の検討も行った。

アクシオンは標準理論の粒子に対して3つの結合($g_{ae}, g_{an}, g_{a\gamma}$)をもつことが知られている。太陽中でも、この結合に対応して異なる生成過程があり、本解析では原子の脱励起・電子の制動輻射・光子のコンプトン散乱(ABC)、 ^{57}Fe のM1核遷移、プリマコフ効果を取り入れた解釈を行った。図3(a)は、太陽アクシオンモデルを考慮したフィット結果を示しており、超過を良く説明できていることがわかる(3.4σ)。図4は $g_{ae}-g_{a\gamma}$ 平面で超過を説明可能な領域を

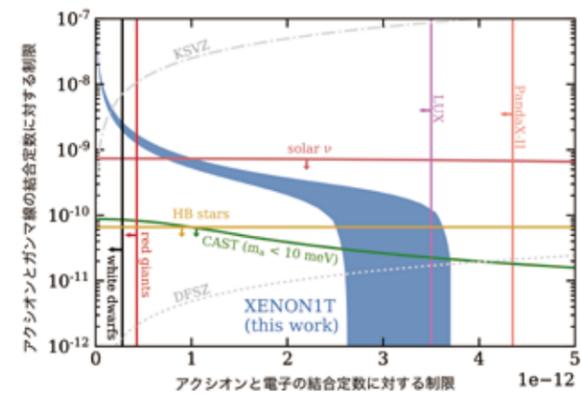


図4 $g_{ae}-g_{a\gamma}$ 平面内でのフィット結果
青い領域が超過を説明可能なパラメータ領域であり、他の実験(LUX, PandaX-II)や天体観測に基づく制限(red giant, white dwarfs, HB stars)も示す

示し、 $g_{a\gamma} \rightarrow 0$ の極限で g_{ae} の期待される値は 3×10^{-12} となっていることがわかる。ただし、この領域は天体観測による制限(赤色巨星や白色矮星など)により既に否定されており、矛盾した結果となっている。ただし、逆プリマコフ効果の寄与やこの制限を回避する理論的な解釈も進行中であり、確実な決着は未だついていない。

また解析では、太陽アクシオンモデルとトリチウム仮説を両方考慮したフィットを行い、どちらがより超過に合うのか検証を行った。その結果、アクシオンとトリチウムで分布の形状が異なるため、トリチウムの寄与はほぼゼロとなることが判明した。この事実は、さらに統計を貯め主要な背景事象である ^{214}Pb を排除することで、分布の形状の違いからトリチウム仮説を棄却できることを示唆している。

ニュートリノ異常磁気能率やALPsの場合の解釈も行った。ニュートリノ異常磁気能率を仮定した場合、 $\mu \nu \in (1.4, 2.9) \times 10^{-11} \mu\text{B}$ (μB :ボア磁子)が超過を説明する範囲となるが(図5)、こちらも天体観測の制限(球状星団や白色矮星など)と矛盾が見られる。一方でALPsの解釈は、天体観測からの制限とは矛盾がなく、約2.3 keVの質量をもった信号が 4.0σ (local

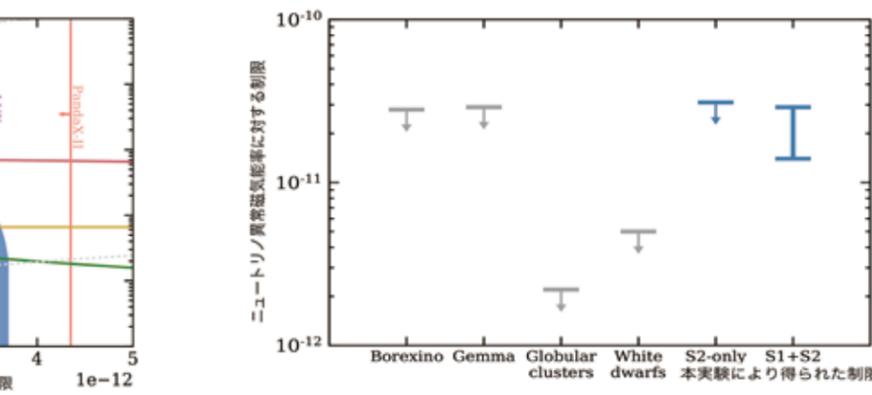


図5 ニュートリノ異常磁気能率に対する制限
超過を説明する範囲は、天体観測の制限(球状星団や白色矮星など)と矛盾が見られる。

significance)の統計的有意性で好まれる結果となっている(図6)。

電子反跳事象探索の今後

発見されたアノマリーは太陽アクシオン、ニュートリノ異常磁気能率、ALPsからの信号を仮定すると説明が可能であるが、極微量トリチウムの可能性も否定できず、その決着は未だはっきりとしない状況となっている。

XENONnT実験は、XENON1T実験を4倍大型化した後継実験であり、今まさに電子反跳事象の観測を行っている最中である。XENONnT実験では、電子反跳事象の統計精度が1桁上がり、新たに開発したラドン除去のための蒸留塔を用いるこ

とで放射性不純物由来の背景事象をXENON1Tの約20%に低減することが可能である。これにより、XENON1T実験の1/3の約3カ月の観測でエネルギースペクトルの形状の違いから太陽アクシオンとトリチウムを区別でき、2022年度初旬にはXENON1Tで見つかったアノマリーが新物理に由来するかどうか決着がつくものと期待している。著者は解析グループの責任者としてこの解析を主導しており、楽しくも忙しい時期を送っている。仮に再び超過が現れた場合には、信号量の時間変動を測定することで、その起源(太陽・銀河中心)など背後に潜む物理を解明していきたいと考えている。

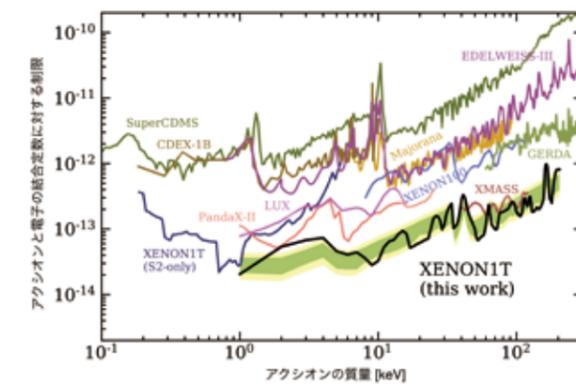
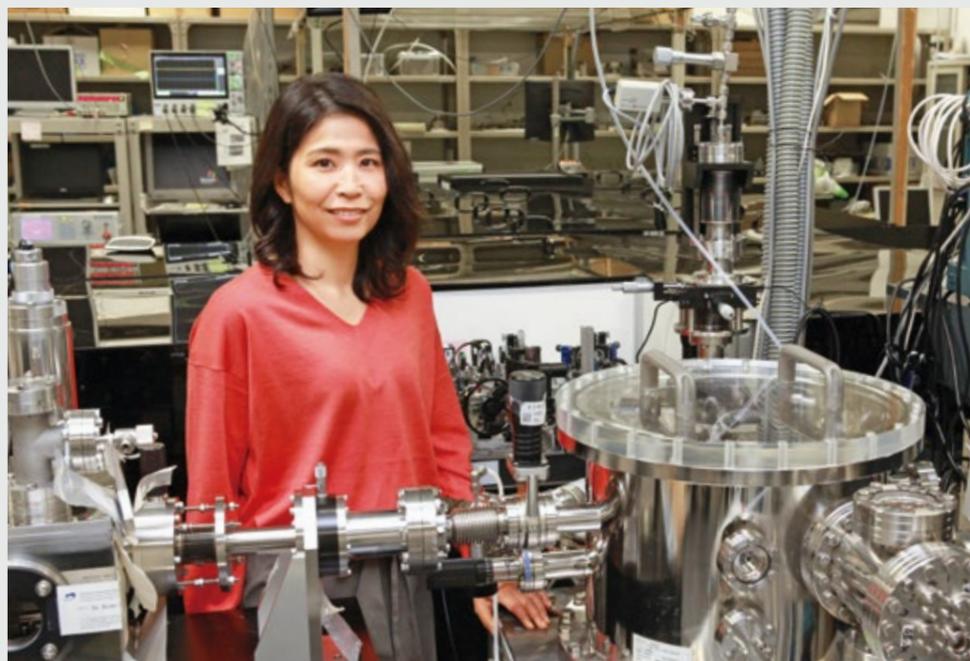


図6 Axion-Like Particles (ALPs)に対する制限
黒線が実験結果を表し、2keV付近に超過があることがわかる。

100京分の1秒の超高速に迫る

加藤景子 物質理学専攻准教授



Keiko Kato

2006年3月東京大学理学系研究科化学専攻にて博士(理学)取得。物質・材料研究機構博士研究員、NTT物性科学基礎研究所リサーチアソシエイト、同研究所にて研究員、研究主任、主任研究員を経て2021年1月より現職。専門は固体の超高速分光。

超高速の世界

「超高速」という言葉から皆さんはどれくらいの時間を想像されるでしょうか。たとえば、スマートフォンのカメラのシャッターは1000分の1秒程度まで短くできる。つまり我々が目にする日常生活は、1000分の1秒程度の時間で起きる動きでおさまっているといえる。一方、スマートフォンの中で使われている電子デバイスを構成する半導体中では、「アト秒」(100京分の1秒)や「フェムト秒」(1000兆分の1秒)という時間で電子や原子が動いている。100京分の1秒の間に光は0.3nm、1000兆分の1秒で

は0.3 μ mだけ進む(図1)。秒速30万kmの光でさえもこの程度の距離しか進むことのできない時間、それがアト秒、フェムト秒という時間である。

では、アト秒～フェムト秒の超高速の世界ではどのような現象が起きているのだろうか。たとえば太陽電池に光が当たり電子と正孔が生成するのにかかる時間、DNAの中の電子の動き、化学反応中の原子の動きが挙げられる。これらの超高速過程は我々の目で認識できない。しかし、これらの過程が起源となってさまざまな物理・化学・生命の現象が我々の目の前に現れる。

電子や原子の動きを捉える

では、このような「超高速」の世界を調べるには、何をすればよいのだろうか。その一つの答えがパルス光を用いたポンプ・プローブ法である(図2)。ポンプ・プローブ法では、1つ目のパルス光で試料を励起(ポンプ)した後、遅延時間(Δt)をおいて2つ目のパルス光をプローブ光として照射し、その反射率や透過率を Δt の関数として測定する手法である。これにより、物質内の状態の時間変化をストロボ写真のようにとらえることができる。ポンプ・プローブ法の時間分解能は、パルス光の時間幅に

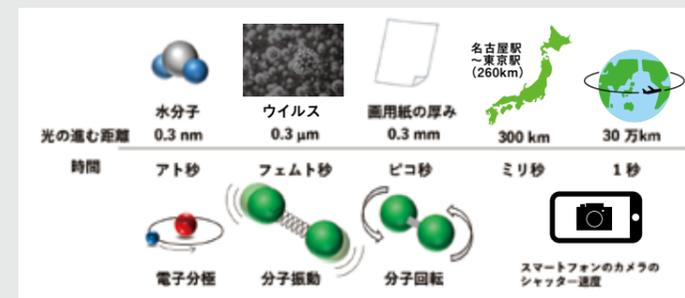


図1 異なる時間領域における動的現象と光の進む距離との関係

それぞれの時間領域における動的現象を観測するためには、その現象が起きる時間より短い時間幅の時間分解能を有する計測手段が必要となる。

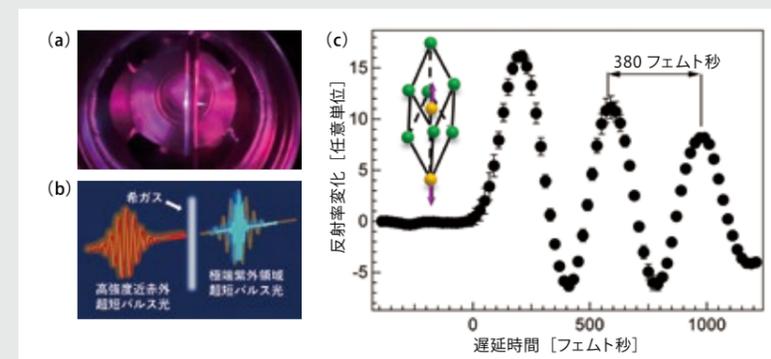


図3 極端紫外領域超短パルス光発生装置と同光による時間分解反射率計測結果

(a) 極端紫外領域超短パルス光発生装置の写真。(b) 極端紫外領域超短パルス光発生手順。高強度近赤外超短パルス光を、希ガス(写真中央の管)へ集光すると、高次高調波発生過程を通じて極端紫外領域超短パルス光を得ることができる。さらに入射パルス光の時間幅や位相、偏光を工夫することでアト秒の時間幅の極端紫外光が得られる。(c) ビスマス薄膜の極端紫外領域時間分解反射率。実験では膜厚200nmのビスマス単結晶薄膜に近赤外ポンプ光(時間幅20fs、中心波長780nm)を照射し、電子およびフォノンを励起する。続いて極端紫外プローブ光(波長35-60nm)を照射し、プローブ光の反射率を遅延時間の関数として計測した。380フェムト秒の周期で振動する信号はビスマスのフォノンに由来する信号。挿入図は原子の動きを表した図。(Kato *et al.*, Opt. Express vol.28,1595 (2020))

よって決まる。現在、市販のレーザーのパルス光の最短の時間幅は10フェムト秒程度である。さらに、高次高調波発生過程という非線形現象を使って極端紫外領域へ波長変換をすれば数10～数100アト秒まで時間幅を短くできる。我々は、アト秒やフェムト秒の超短パルス光を使い、固体のキャリア(電子や正孔)やフォノン^{*1}のダイナミクスを観測することに挑戦している。そしてアト秒・フェムト秒の時間領域の超高速過程を理解することは、我々の目の前の世界を変える可能性があることが最新の研究によって明らかになりつつある。

極端紫外領域パルス光による時間分解反射率計測

アト秒時間分解ポンプ・プローブ計測に向けた取り組みとして、極端紫外領域パルス光による時間分解反射率計測の結果を紹介する。21世紀に入り実現されたアト秒パルス光は極端紫外領域に波長を有す

るために取り扱いが困難であり、市販の計測器を用いた研究が大半であった。よってこれまでは、数100nm程度の薄膜試料のみを対象とした吸収計測か、試料表面浄化のための高温加熱処理が必要な光電子計測に限られていた。

そこで私は、アト秒時間分解計測法の汎用性を高めるために、極端紫外領域における高感度時間分解反射率計測の開発を行った(図3)。実験では、反射配置を取ることによって試料形状を問わず、前処理不要で計測可能とした。一方、極端紫外領域では試料表面の凹凸の影響を受けやすいため、反射光強度が低かった。そこで低い信号強度を克服するために、パルス状で得られる信号を積分し、暗電流の寄与を減らした。さらに、ロックイン検出^{*2}によって、ノイズを除去した。結果、検出された信号は既出報告と比較すると100倍程度の感度向上を達成、さらに計測時間も数日から数分へと短縮できた。本装置を用いれば、

さまざまな試料のアト秒時間領域の超高速ダイナミクスを明らかにすることができ、今後は時間分解能をアト秒へと高め、光照射によってできる電子や正孔ダイナミクスの観測を通じて光電過程の発生機構の解明に取り組む。そして、光電変換デバイスの機能改善や新機能の開拓につなげたい。

アト秒時間領域の超高速過程はさまざまな系において最初期過程を担い、その後続く過程を支配する。アト秒の超高速の世界から物理・化学・生命現象の起源を理解し、我々が享受する世界をより豊かなものとした。

*1 フォノン
固体を構成する原子の振動である格子振動を、量子化した(とびとびの値をもつ)エネルギーをもつ粒子と考えたもの。フォノンは熱伝導や電気抵抗の原因になっている。

*2 ロックイン検出
ノイズの多い環境から微小信号を検出するための計測法の1つ。今回の実験では、まずポンプ光を周波数 ω で周期的に遮断し強度変調を施して試料へ照射する。次に試料から得られる反射光の信号のうち、ポンプ光の変調周波数 ω に同期した成分のみを検出した。

光物理化学研究室ウェブページ <http://photon.chem.nagoya-u.ac.jp/>

銀河の誕生と「出島」

田村陽 — 素粒子宇宙物理学専攻准教授

広大な宇宙の「発見」

大航海時代、人々は夜空に輝く星々を手がかりに海を渡った。彼らは星々を目印として使っただけでなく、その起源に思いを馳せたに違いない。私たち天文学者が宇宙を探索するときに使う目印は銀河であり、現代の天文学はその起源を探求している。

今をさかのぼることわずか100年、じつはこうした銀河が、天の川銀河の中にある星雲なのか、外にある別の銀河系なのかわかっていなかった。これを解決したのが、

E・ハッブルだ。彼は、銀河がもつ特別な変光星を使って距離を測り、銀河が天の川のはるか外にあることを示した。1923年のことであった。その後ハッブルは、距離が遠い銀河ほど、速い速度で地球から遠ざかっていることを突き止めた。現在ハッブル・ルメートルの法則として知られるこの関係は、宇宙が膨張する証拠として、あるいは宇宙が極小の火の玉・ビッグバンから始まった証拠として、人類の宇宙観の基礎をなしている。

銀河の誕生

宇宙は、誕生後38万年までにいったん冷えて電的に中性なガス（水素とヘリウム）で満たされる。しかし、星のような光る天体がないため、しばらくは暗黒の宇宙がひろがっている。宇宙が1億歳のころ、ようやくこの「暗黒時代」が終焉する。初代星と初代銀河の誕生だ。これらは、強烈な紫外線を放射して周囲の中性ガスをみよめる電離し、10億歳までには宇宙全体を電離し尽くしてしまったらしい。

こうした銀河誕生の時代は「宇宙再電

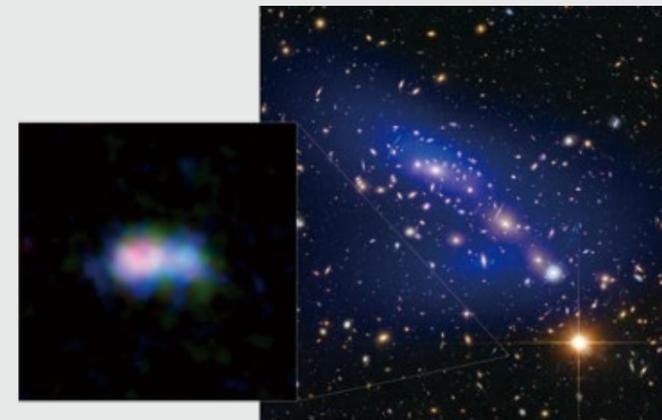


図1 宇宙誕生後6億年頃に発見された銀河

この銀河はハッブル宇宙望遠鏡の深宇宙探索領域(右)で見つかった。拡大図(左)で、赤と緑はそれぞれサブミリ波干渉計ALMAがとらえたダストと酸素原子の放射を示す。青は、ハッブル宇宙望遠鏡がとらえた若い大質量星の光。星々の生死を経てつくられるはずのダストや酸素が、このような若い銀河に大量に見つかったことは驚きである。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA, Y. Tamura; NASA, ESA, D. Harvey, R. Massey, T. Kitching, A. Taylor, E. Tittley/Chemical Society.

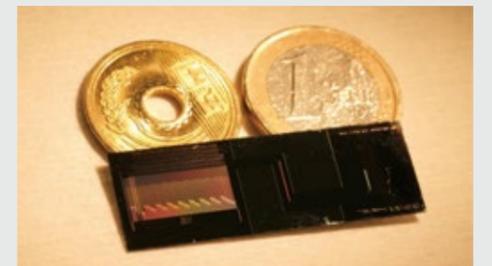


図2 DESHIMAの集積超伝導分光器チップ

左側の虹色に光っている部分が超伝導共振器からなるフィルターバンク回路。比較のため5円硬貨と1ユーロ硬貨を置いた。Credit: J. Baselmans



図3 サブミリ波望遠鏡ASTE

南米チリ北部・アタカマ砂漠の平原(標高4860m)にボツと置かれたASTE(アステ)望遠鏡は、日本の国立天文台と大学連合が建設・運用してきた口径10mのサブミリ波望遠鏡である。左手奥に本学のNANTEN2望遠鏡のドームも見える。Credit: S. Peetoom



Yoichi Tamura

1980年、福岡県生まれ。2004年、早稲田大学理工学部物理学科卒業。2009年、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了、博士(理学)。2009年国立天文台研究員、2011年東京大学天文学教育センター助教を経て、2017年4月より現職。専門は電波天文学、遠方銀河の観測的研究。

離」の時代とよばれていて、最先端の研究が行われているフロンティアだ。この時代、急激に天体の進化が進むとともに、私たちが普段目にする物質、たとえば炭素や酸素や窒素といった重い元素が恒星の内部で合成され、宇宙空間に供給されたと考えられている。

この時代の研究は面白い。なぜなら、宇宙で最初の天体が生まれ、ゆたかな物質世界が築かれていくまさにその過程が、望遠鏡というタイムマシンを使って詳細に観察ができるからだ。この頃、太陽のようなふつうの星はまだ一生を終えず、したがって重い元素は宇宙空間になかなか供給されない。一方、最近のサブミリ波干渉計ALMAやハッブル宇宙望遠鏡の観測から、宇宙誕生後5~6億年後の宇宙では酸素や炭素、さらにはケイ素等からなる固形微粒子(ダスト)をもつ銀河も見つかっている(図1)。いつ、どのように銀河の内部で

星が生と死を繰り返す、星やガスの元素組成が変容していったのか。このことを理解することは、私たちがふだん目にする多様な宇宙を理解するうえで欠かせない。

出島から漕ぎ出す銀河宇宙の新航路

人類は、いよいよ銀河の誕生をとらえ始めた。にもかかわらず、私たちは宇宙のすべての歴史を明らかにすることができていない。それもそのはず、形成期の銀河に多数存在するはずの誕生直後の恒星は、分子雲とよばれる分子ガスとダストの「繭」に包まれているからだ。

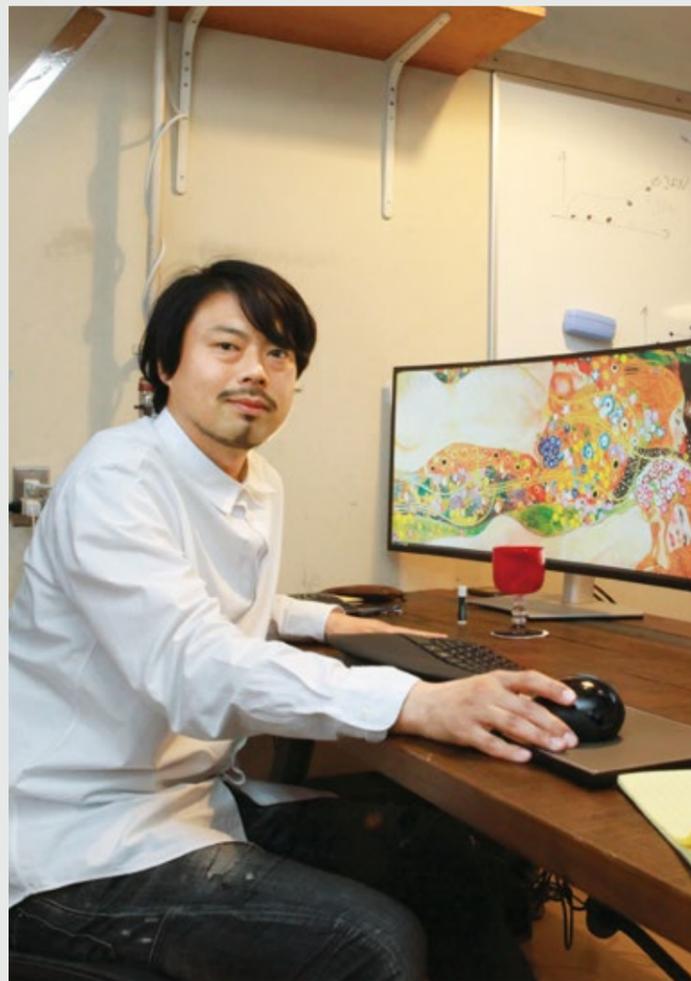
サブミリ波(波長0.1~1mmの電波)は、この銀河の繭の検出に優れている。恒星によって温められたガスやダストは、遠赤外線や莫大なエネルギーを放出し始める。これが宇宙膨張にともなってより波長の長いサブミリ波となり、地球に届くのだ。

もしサブミリ波の広帯域分光が可能になれば、ガスやダストのスペクトルを観測し、銀河の年代測定やその詳細な性質を知ることができる。私たちは、オランダの研究チームと共同で集積超伝導分光器DESHIMA(デシマ、図2)を開発し、2017年に南米チリのアステ望遠鏡に搭載して(図3)、世界初の技術実証観測に成功した。2022年には後継機を携え、本格的な銀河探索を予定している。日・欧が2030年頃の実現をめざす大型サブミリ波望遠鏡と組み合わせれば、広大な宇宙空間に位置する銀河の3次元地図をえがく、いわば宇宙の測量の効率を飛躍的に向上させるだろう。江戸時代に出島(オランダではDeshimaとして伝承されている)を通じて友好を結んだ日本とオランダが、時を経ていま銀河宇宙への新たな航路に漕ぎ出そうとしている。

天体物理学研究室ウェブサイト <http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/>

異分野融合生物学時代

岩見真吾 生命理学専攻教授



Shingo Iwami

2005年大阪府立大学工学部数理工学科卒業、2007年同大学院工学研究科電子・数物系専攻博士前期課程修了。その後、静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部環境・エネルギーシステム専攻に編入し、1年間短縮して2009年博士(理学)を取得。2009年以降、日本学術振興会・特別研究員PD、科学技術振興機構さきかけ研究者を経て、2011年九州大学理学研究科生命科学部門准教授に就任。2015年には仏国のINSERMにVisiting Professorとして滞在。2020年より現職。

定量的なデータ解析の必要性

異分野融合生物学研究室 (iBLab) は、数理モデルとコンピュータシミュレーションを駆使し、異分野にまたがる生物学研究を進める、国内ではじめての異分野融合生物学の研究拠点である。近年、最先端計測機器の登場により、生命を構成する最小単位である個々の細胞レベルで生命現象を理解する試みが始まっている。これらのアプローチには多種多様かつ膨大なデータを伴うが、巨大データがもつ情報を100%抽出し、利用することはきわめて困難である。従来の手法で取得される臨床・実験データでさえ、内包する情報を不完全にしか利用できていない場合もある。しかし生命現象は本質的に高次元で非線形であることを考えれば、数理学、情報学、物理学など、異なる分野で開発されてきた理論や蓄積されてきた知見を活用することで、データを制することが期待できる。つまり、生命現象の理解のために適切な分野を融合することで、定量的な観点からメカニズムを追求する次世代の生命科学分野を創出できる。今回は、私たちが取り組んでいる新型コロナウイルス感染症の研究について少しだけ紹介しようと思う。

まだ見ぬ新興感染症と戦うための研究

新型コロナウイルスによる感染症 (COVID-19) が世界を震撼させている。臨床の現場では、重症化を防ぐためサイトカインストームの兆候があればステロイドや抗IL6などが適用になるが、いったん重症化してしまうと人工呼吸器やECMOを用いた対症療法しか選択の余地がない。一方で、免疫を抑制してしまうとタイミングによってはウイルスの増殖を許し病状の悪化を招くことが報告されている。従って、根本的な原因であるウイルス量を減少させ、ウイルス排出期間を短縮する抗ウイルス治療の確立が希求されている。そこで、私たちのグループでは、今後も未知の感染症が流行する可能性が高いことを踏まえて、COVID-19を含む新興感染症発生時に即時対応可能な「ウイルス非特異的」な感染動態定量化アプローチを駆使した汎用的な最適治療法提案に資するプラットフォーム

開発を進めている。

新型コロナウイルス感染症の治療が困難な理由の1つ

数理モデルを駆使した定量的なデータ解析によりCOVID-19に対する抗ウイルス薬剤治療が他のウイルス感染症と比較して困難である理由の1つを解明した。インフルエンザなどの臨床試験からも知られている通り、一般的にウイルス排出量がピークを迎える前にウイルス複製阻害薬剤の投与を開始することが、排出量を減少させるために重要である。COVID-19に加えて過去に流行した中東呼吸器症候群 (MERS) および重症急性呼吸器症候群 (SARS) の臨床試験データを収集・分析すると、COVID-19では過去のコロナウイルス感染症であるMERSやSARSと比較

して、早期にウイルス排出量がピークに達することが明らかになった (図1)。また、開発したコンピュータシミュレーションによる網羅的な分析によると、たとえ使用するウイルス複製阻害薬剤やウイルス侵入阻害薬剤が強力であったとしても、ピーク後に治療を開始した場合、ウイルス排出量を減少させる効果はきわめて限定的であることを見出した。

新型コロナウイルス感染症の治療薬に対する臨床試験のデザイン

COVID-19に感染した場合、ウイルス排出期間が発症7日、発症14日、発症28日程度の3グループに層別化できることを明らかにした。また、すべてのグループにおいて、ウイルス複製阻害薬剤やウイルス侵入阻害薬剤による治療開始時期が、ウイルス排出

量のピークの前か後かで、ウイルス排出量を減少させる効果が大きく異なることを示した。つまり、COVID-19症例では、個人個人でウイルス排出量がばらばらで、また、治療開始時期に応じてそれら排出量への効果が異なる。そして、このような極めて不均一な特徴をもつ症例に対して、抗ウイルス薬剤の効果を臨床試験において正しく評価するためのシミュレータ (in silico randomized clinical trial: isRCT) の開発を行い、一部isRCTを用いてデザインされた医師主導治験が日本で行われている (図2)。

このように、私たちの研究の「心臓」となっている武器は「数理モデルとコンピュータシミュレーション」である。これらの武器をもって、今後も異分野のクロスオーバーを前提とした生物学研究を進めていく。

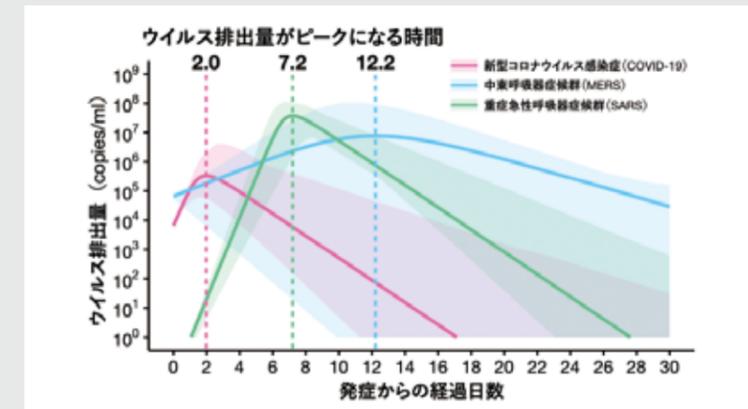


図1 コロナウイルス感染症の違いの定量的理解
COVID-19、MERS、SARSにおけるウイルス排出量の時系列変化を再構築したグラフ。COVID-19は、発症後2日程度で排出量がピークに達しており、他のコロナウイルス感染症よりも効果的な治療が容易でないことが明らかとなった。

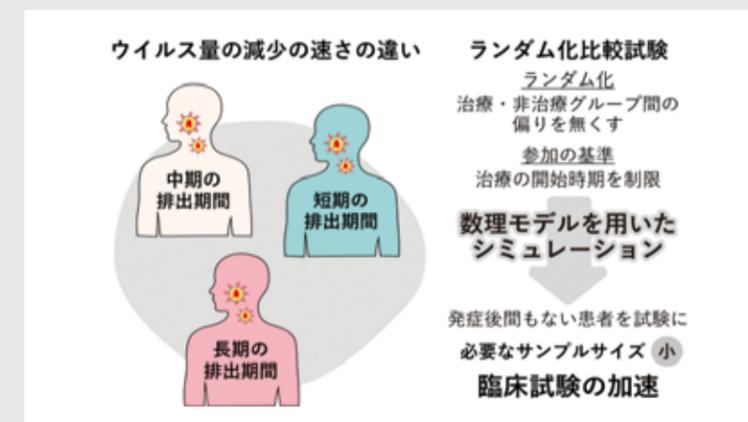


図2 デジタルツイン時代の新型コロナウイルス研究
COVID-19患者の体内でのウイルス (SARS-CoV-2) 量の変化にはばらつきがあり、ウイルス量の減少の速さが異なる。加えて、治療開始時期が遅くなると投薬の効果が小さくなるなど、臨床試験の結果に影響するさまざまな交絡因子が考えられる。数理モデルをベースとして、患者間のばらつきを再現したCOVID-19患者のウイルス量のシミュレーションを行うことで、さまざまな治療候補薬の投与スケジュールを考え、臨床試験を加速するin silico randomized clinical trial (isRCT) とよばれるプラットフォームを構築した。

異分野融合生物学研究室ウェブページ <https://iblab.bio.nagoya-u.ac.jp>

同窓生から

自分の人生をどう生きるのか

ハーバード大学 経営大学院修士課程

高塚 景(旧姓:服部) (Kei Takatsuka)

「なぜ理学研究科広報誌の同窓生欄に経営大学院の学生が載っているのか」と思われた方もいらっしゃるかも知れない。私が理学部を経て現在に至るまでの経緯を知り「へー、こんな人もいたら何でもありだな」と少しでも皆さまの元気の源となれば本望である。

長野県で生まれ育ち、2016年に生命理学専攻の修士課程を修了した私は、4年半、経営戦略コンサルタントとして東京と米国で勤務した後、現在の大学院に入学した。コンサルタントとして働いていた際、研究で得た知識は直接的には用いずとも、身についた仮説思考や、論理的思考力は大いに役立った。あらゆる業界や企業との仕事に充実感を得ながらも、もっと世界を見て多様な人々と働いてみたいと感じ、転職や留学を考えるようになった。その際、米国トップのビジネススクール数校に足を運び授業やキャンパスを見学した。一歩足を踏み入れた瞬間、ハーバード大学経営大学院に進学したいと、強く願うようになった。同校の授業は、93人の学生が教授と黒板を取り囲むよう設計された、窓のない教室の中で行われる。とてつもない緊張感の中、ケースメソッドとよばれる実際の出来事をもとにした教材をベースに、一進一退の議論の攻防が繰り返される。この授業を見たとき、この環境で、喧々諤々の議論を繰り返すことが自身の成長につながると確信した。また、経営を題材に「どう生きるか」を考える授業にひきつけられ、この地に来た。

現在、まさにCrafting Your Lifeという授業の中で、



人生の時間配分や選択の優先順位をどうつけるか、クラスメイトたちと週に4時間ほどかけて議論しているのがよい例だ。世界中から来た多様な学生、百戦錬磨の教授と日々交わす議論や会話の一つ一つにかけがえのない価値を実感している。とはいえ学費と生活費で約2000万円がかかるビジネススクール。我が家は夫も同校に進学しているため、家庭としての経済負担は2倍である。奨学金や借金で賄っているが、負担は半端ではない。なぜそんな馬鹿げた選択を、と思われても仕方がないが、お金に代えがたい一生モノの出会いや気づき、学びがあると日々感じる。また、理学出身の私はクラス内で全く珍しい存在ではなく、現役医師や元軍人、音楽家、政治家、プログラマーやAIエンジニアなど、多種多様な学生が集っている。まさに皆、Life Long Learning。人生を通じて学び続け、自身を更新し、実践することが当然のように受容される社会は、最も過酷な環境を求めてきたはずの私にとって、むしろ大変心地よい居場所となっている。この文章を書きながら気づいた。これからも、理学部で得た学びのように自分の中に息づく過去を糧に、世界を舞台に社会に還元していきたいと強く願っている。

(生命理学専攻、2016年修士(理学)名古屋大学)



キャンパス通信

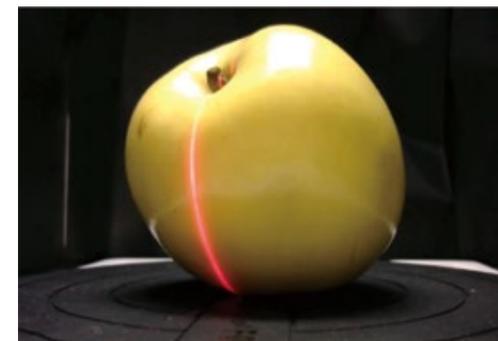
ニュートンのリンゴの木の3Dリング

全学技術センター技術職員

山口隆正 (Ryusei Yamaguchi)

物理学者ニュートンが「万有引力の法則」を発見するきっかけになったとされるニュートンのリンゴの木は、接ぎ木により増えて世界中に広がっている。これには名古屋帝国大学初代理学部長も務めた柴田雄次博士の働きがけもあり英国から日本にやって来たとも言われている。名古屋大学にも益川敏英博士・小林誠博士のノーベル賞受賞を記念して東京大学理学部附属小石川植物園からやって来た。両博士により2011年に植樹され、人工授粉により2018年にはじめて結実した。

理学部第一装置開発室(全学技術センター)は研究用装置の開発をしている技術室であり、室内には3Dプリンタ群を含むものづくりエリア「Creative Factory」がある。2018年はCreative Factory強化のため3Dスキャナを導入したタイミングであった。この3Dスキャナによりはじめてのリンゴの形状を3Dデータ化して3Dプリンタでの出力を計画した。現在、世界中で活躍している3Dプリンタだが、名古屋大学の卒業生である小玉秀男氏が発明した。3Dスキャナはレーザーを用いて形状を読み取るため苦手の条件がある。また、リンゴはなまものであることから時間的制約もあったが、忠実に再現することを目指して360度1回スキャンで取得した3Dデータにより3Dプリントした。現在は一般向けイベント等で3Dリングを展示して名古屋大学関係者の歴史的な活躍とともに紹介している。



キャンパス通信

理学部オープンキャンパス報告

理学部教育委員長

嘉村 巧 (Takumi Kamura)

2021年8月12日に理学部オープンキャンパスを新型コロナウイルス感染防止の観点から、昨年に引き続きオンラインで開催した。理学部企画は、オンデマンドで事前配信した学部紹介と当日の全体および各学科企画からなる。全体企画では、午前中に学部説明会Q&A、午後に保護者説明会を行った。学部説明会Q&Aは2部構成で、第1部では阿波賀邦夫理学部長の挨拶、私からの理学部・学科紹介、そして南崎梓研究員よりストリートビューを用いた理学部施設紹介を行った。第2部では5学科より教員と学生それぞれ1人ずつ計10人がパネリストとして参加し、南崎研究員の司会で高校生からの事前および当日の質問に答えた。質問は、名大理学部の魅力、理学部と工学部・農学部の違い、学生生活、研究室・ゼミ、高校時代の勉強、卒業後の進路など多岐にわたったが、パネリストの皆さんより熱のこもった答えがなされた。

午後の保護者説明会では、上川内あづき教授の挨拶、私から理学部・名大生の生活を紹介した後、質問に答えた。最後に阿波賀理学部長の挨拶があり閉会とした。各学科企画では、学科・研究室紹介、ライブ講義や懇談会などが行われた。オンライン開催も2年目ということで昨年よりはスムーズにオープンキャンパスを開くことができた。

理学部オープンキャンパス:
<https://nuoc.adm.nagoya-u.ac.jp/2021/rigaku/>

