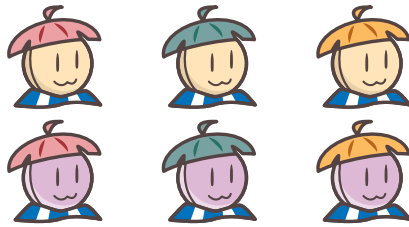


# 新学術領域研究 ニュートリノで拓く素粒子と宇宙

Exploration of Particle Physics and Cosmology with Neutrinos



ニュートリノってなに？



ニュートリノは

「ニュートラル=電気を帯びていない」「イノ=(イタリア語で)小さい」  
という意味の名前を持った素粒子のひとつです

**ニュートラル**で**イノ**な**素粒子** ➡ **ニュートリノ!**



## じゃあ素粒子ってなに？

素粒子とは物質を構成する最小の要素です！……これだけではよくわかりませんね。

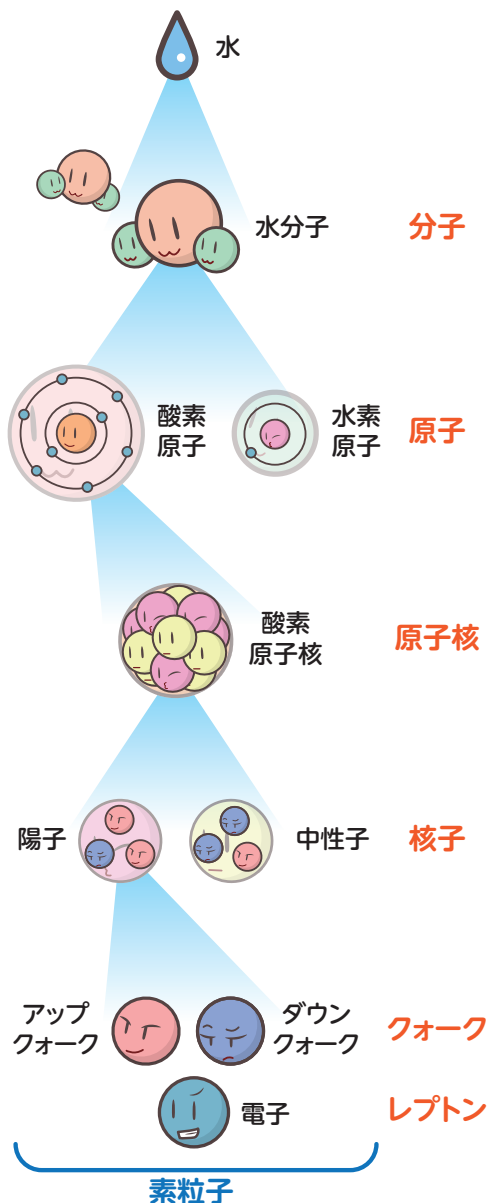
例えば、水は水分子という分子が集まってできていて、それをよく見ると水素原子2個と酸素原子1個がくっついたものになっています。

その原子はどうなっているのかというと、中心にある原子核とそのまわりを回っている電子でできています。

さらに原子核の中を見ていくと、陽子と中性子があります(水素原子核は陽子1つだけです)。この2種類の粒子を核子といいます。

では、核子の中はどうなっているのでしょうか。核子はクォークと呼ばれる粒子が3つ集まってできています。

このクォークや電子が物を構成する最小の要素、つまり素粒子です。現在のところ、これ以上小さく分けることはできないと考えられています。



## フェルミオン (物質粒子)

### クォーク



アップクォーク



チャームクォーク



トップクォーク



ダウンクォーク



ストレンジクォーク



ボトムクォーク

### レプトン



電子



ミュー粒子



タウ粒子



電子  
ニュートリノ



ミュー  
ニュートリノ



タウ  
ニュートリノ

### ボソン

#### ゲージ 粒子



光子



グルーオン



ウィークボソン

#### ヒッグス 粒子



ヒッグスボソン

素粒子には、6種類のクォークと電子が属する6種類のレプトン、これらの間で力を運ぶゲージ粒子、質量(重さ)を与えるヒッグス粒子があります。さらにそれぞれの素粒子に対して、電気の符号が反対の性質を持つ反粒子と呼ばれるパートナーが存在します。クォークは原子核を作ることからわかるように、非常に強く結びつく素粒子です。逆にレプトンは結びつきが弱く、単体で存在します。私たちのまわりにある水や花、宇宙、そして私たち自身も、これらの素粒子からできているのです。ニュートリノはこのレプトンの中の粒子です。



## ニュートリノの発見！

1930年、パウリという学者が中性子のことを調べていて、とある問題にぶつかりました。パウリは電気を帯びていないとても小さくてとても軽い粒子があれば、その問題が解決できると考えました。しかし、どんな物の中もすいすいと通り抜けてしまうようなこの小さくて軽いお化けのような粒子を見つけることはできないだろうと思っていました。3年後、このお化け粒子について研究をしていたフェルミという学者は、これをニュートリノと名づけました。

1956年、原子炉を使った実験でライネスとカワンという学者が、初めてニュートリノを見つけることに成功しました。ライネスはこの功績により、ノーベル物理学賞を受賞しています。



## どんな性質なの？

### たくさんある！

私たちの周りにはたくさんのニュートリノが飛び交っています。太陽が熱を生み出す過程や星の一生の最後に起きる超新星爆発、原子力発電所などでたくさん生み出されています。1秒間に約100兆個ものニュートリノが私たちの体を通り抜けているのですが、私たちがそれを感じることはありませんし、害もありません。



### 姿のみえないお化け粒子

ニュートリノはプラスの電気もマイナスの電気も帯びていない中性です。それは他のものとくっついたり反発したりしない、影響しないということです。また非常に小さいので原子の中も通り抜けることができます。ニュートリノは私たちの体の中も地球の中もすいすいと通り抜けてしまう、もちろん実験装置の中もさっと通り抜けてしまう、研究者泣かせのお化け粒子なのです。



### 質量があった！

長い間ニュートリノには質量がないと考えられていました。しかし、この常識を打ち破ったのが戸塚博士や梶田博士らが行っていたスーパーカミオカンデ実験と、マクドナルド博士らのSNO(スノー)実験でした。3種類のニュートリノがそれぞれに姿を変えあっているというニュートリノ振動を測定することで、ニュートリノに質量があることを発見しました。素粒子物理学の教科書のような存在である「標準理論」で質量がないとされていたニュートリノが実はそうではなかった！素粒子物理学の世界に一石を投じる衝撃的な発見でした。





## 何がわかるの？

ニュートリノは、宇宙の中で光の次に多い素粒子です。その性質を理解することで、**宇宙の誕生や物質の起源の謎を解き明かす**ことができるのではと考えられています。しかし、宇宙を知る上でとても重要な存在であるにもかかわらず、**未だ謎の多い粒子**なのです。



## 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」って？

素粒子と宇宙にはまだまだ分からないことがいっぱいあります。ニュートリノを研究することで、**宇宙の初めから現在に至るまでを理解する「新しい素粒子・宇宙像」**を創ろうとする研究者の集まりです。



大気から降り注ぐニュートリノを観測しています。スーパーカミオカンデでの観測と共に、次世代のニュートリノ検出器「ハイパーカミオカンデ」の開発研究を進めています。



世界最高性能の加速器 J-PARC を使ってニュートリノビームを生成し、岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデでニュートリノ振動を精密に測定しています。(T2K 実験)



宇宙起源の高エネルギーニュートリノを観測しています。これにより、これまで見えなかった宇宙の深部を探ります。(IceCube ニュートリノ観測所)



宇宙の化石、宇宙マイクロ波背景放射 CMB を観測することで、インフレーションを起源とする原始重力波や背景ニュートリノの存在量や質量を調べます。(Simons Array & GroundBIRD 望遠鏡)

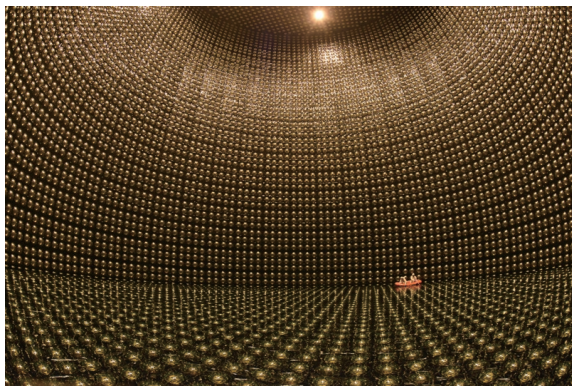


最先端のニュートリノ実験装置 (AXEL 実験の高圧キセノン TPC や原子核乾板) の開発を行っています。ニュートリノがマヨラナ粒子かを調べたり、イメージング技術を向上させてその応用を広げます。



ニュートリノを軸とした、素粒子・原子核・宇宙にまたがった分野横断的な理論研究を展開して、多様な新ニュートリノ理論の構築を行い、宇宙の成り立ちを支配する物理法則を探ります。

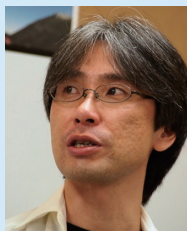
# A01 自然ニュートリノ観測と陽子崩壊探索 を通して探る新たな素粒子物理



スーパーカミオカンデ内部：  
2018年に12年ぶりに検出器を開  
けて内部に入り、改修と増強を行  
いました。

スーパーカミオカンデを用いて、ニュートリノの性質を探る研究と物質を構成している陽子が壊れるかどうかを探る研究を行っています。ニュートリノには3種類あることがわかっていますが、その重さの順番はまだわかっていません。またニュートリノには対となる反ニュートリノが存在しますが、この2つの性質には少しだけ違う兆候がみえています。この小さな性質の違いは、宇宙に反物質ではなく物質だけが残った理由を説明する鍵になると考えられています。陽子はとても安定で壊れる様子は未だ観測されていませんが、 $10^{35}$ 年程の寿命を予言する理論があります。

現在、1996年から蓄えてきた全データをさらに効率的に使えるように新たな解析技術を開発しています。また2020年からはスーパーカミオカンデの水にガドリニウムを添加して検出器の性能がさらに高まり、そのデータの解析も始まっています。さらに次世代のハイパーカミオカンデも建設が開始されました。検出器の性能をさらに高めるため、新型高性能光センサー用の電子回路の開発も進めています。実験が開始されればニュートリノや陽子崩壊の研究を新たなレベルに進めることが可能となります。

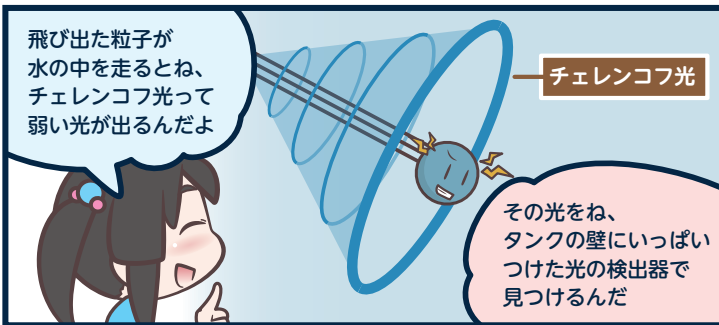
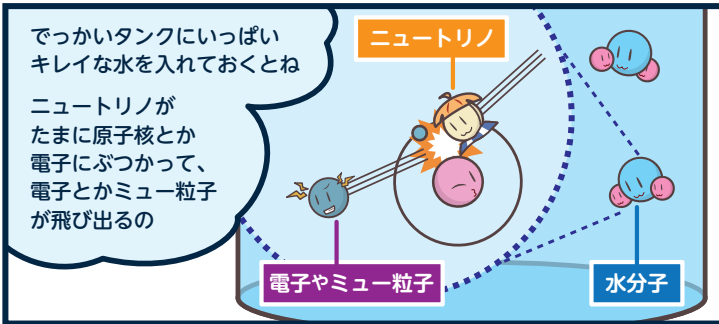


スーパーカミオカンデにガドリニウムを導入することで中性子の測定効率  
が大幅に上昇しました。中性子はニュートリノ研究においていろいろな使  
い方が考えられるため、とても面白い研究対象です。同時に、ハイパーカ  
ミオカンデを最高の検出器とするためにはどうすればよいかを日々考えな  
がら研究開発を行っています。

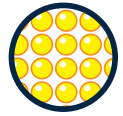
研究代表者 **早戸 良成** 東京大学宇宙線研究所 准教授



# ニュートリノの探し方



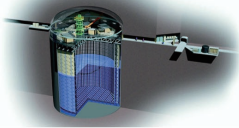
**でっかいタンク**  
5万トンの純水(ナガドリニウム)が詰まっています。でっかければでっかいほど、検出には有利。



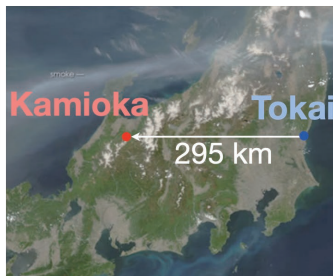
**いっぱいの検出器**  
光電子増倍管(フォトマル)と呼ばれる検出器。正確にはタンクの内側に11129個ついています。

# A02 加速器ニュートリノビームで探る 素粒子の対称性

SK



J-PARC



T2K実験の様子: 茨城県那珂郡東海村から岐阜県飛騨市神岡町に向けてニュートリノビームを発射しています。

日本が誇る世界最高強度のニュートリノビームを使って、ニュートリノ振動を調べるT2K実験を進めています。素粒子の研究では「対称性」を調べるのがとても大事で、粒子と反粒子の間にある対称性「CP対称性」が特に面白く、詳しく調べようとしています。茨城県の東海村にある大型加速器J-PARCからニュートリノビーム、又は反ニュートリノビームを打ち出し、295km離れた岐阜県の神岡町のスーパーカミオカンデで観測します。最新のデータから「CP対称性が大きく破れているかも?」という興味深い結果がでできました。CP対称性がニュートリノで破れているおかげで、物質のみでできた(反物質が存在しない)我々の宇宙が生まれたのかもしれませんが。ニュートリノ振動をより詳しく調べるために、J-PARCのビーム性能を向上させる研究をしています。またJ-PARCでさらに精度良くニュートリノ反応が見れるNINJA実験が始まりました。NINJA実験では原子核乾板(B02班)の技術を使うことで、約10ミクロンの精度でニュートリノの反応を捕らえることに成功しました。もっとデータを集めていくことで、さらにニュートリノの不思議な性質が解明できそうです。



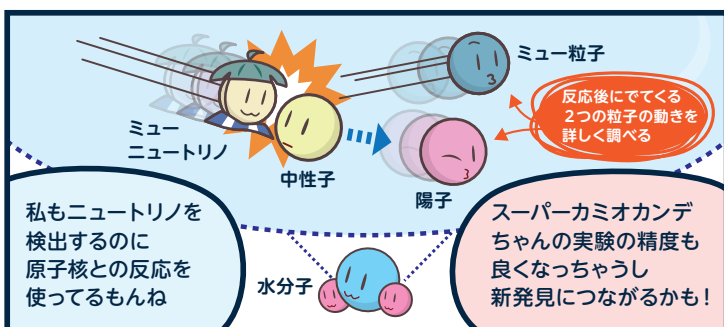
まだ見えていない世界を知りたい。研究者のアイデアと想像力、最新の計測技術を使って見えない世界を調べていくのが素粒子研究の醍醐味です。素粒子を調べると、宇宙がどうやって生まれてきたかが分かってきました。しかし、自然は深淵で、まだまだ分かっていないことがたくさんあります。一緒に、宇宙の謎を解き明かしましょう。

研究代表者 **中家 剛** 京都大学 理学系研究科 教授

# J-PARC に NINJA 現る



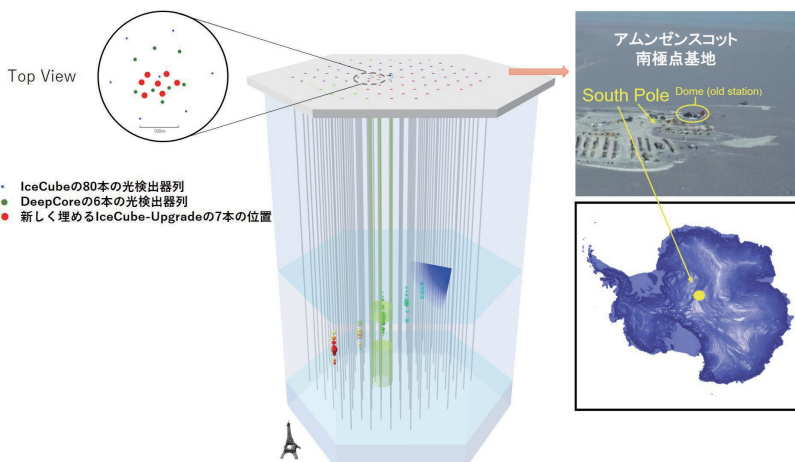
**NINJA(ニンジャ)実験**  
J-PARCさんのニュートリノと原子核乾板を使って  
ニュートリノと原子核の反応を詳しく調べる実験。



**ニュートリノと原子核との反応**  
ニュートリノの観測には原子核との反応を使うことが  
多いのだけれど、実は詳しくは調べられていません。



# A03 宇宙ニュートリノ観測の高精度化で 探る標準理論を超える粒子信号



**IceCube実験**: 南極点アムゼンスコット基地にあるニュートリノ望遠鏡。現在準備中のIceCube-Gen2実験では地下1.3kmから2.7kmの膨大な量の深氷河を宇宙からくるニュートリノの検出器として使用します。

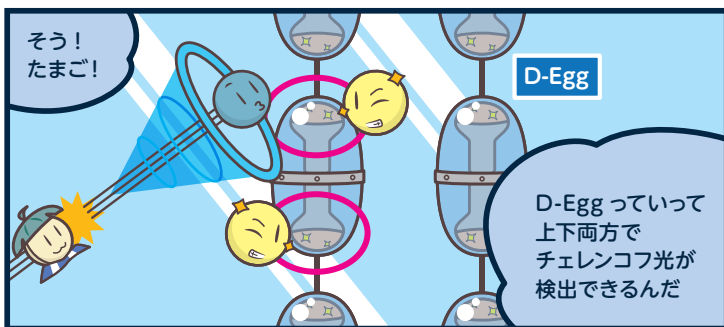
アイスクューブ実験は1立方キロメートルという南極点の巨大氷河をニュートリノ観測装置に仕立て、宇宙から飛んでくるニュートリノを観測する“宇宙ニュートリノ望遠鏡”です。宇宙からやってくるニュートリノを詳しく調べると、地球では見つけるのが難しい物理の標準理論を超える粒子、例えば暗黒物質や超対称性粒子の痕跡が見つかるかもしれません。そのためにも、南極点の深さ1.3kmから2.7kmまでの氷河の中を光がどのように伝搬するのか、より詳しく調べる必要があります。それがアイスクューブ実験のアップグレード計画です。そのために新たに700台の光検出器が埋設されます。そのうちの約300台は日本でデザイン・製造された新型光検出器“D-Egg”。日本での製造・検査試験を経て、はるばる南極大陸へと運ばれて行きます。



南極点から宇宙をみる！しかもニュートリノで。大冒険ですね！もっと広く、もっと遠くの宇宙まで、宇宙の謎がある限り、冒険は続きます。ぜひ一緒に冒険の旅へ出かけましょう。

研究代表者 **石原 安野** 千葉大学 グローバルプロミネント研究基幹 教授

# ペンギンIceCubeさん

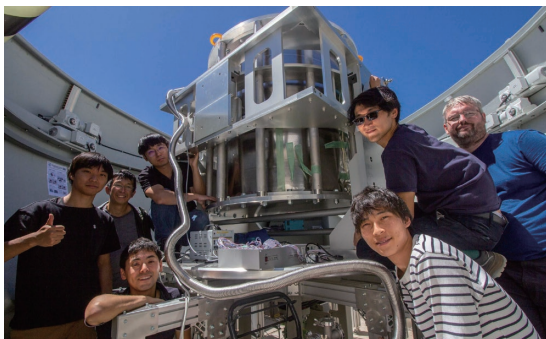


アイスキューブさんジェンツー (IceCube-Gen2)  
検出装置の性能の向上などで、ニュートリノの  
観測能力のパワーアップを目指しています。



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。

# A04 ニュートリノ質量測定・TeVを超える 物理の探索を実現する次世代 CMB 観測

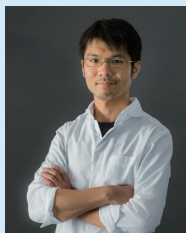


左:チリ、アタカマ高地に設置されたSimons Array望遠鏡の一台目。

右:スペイン、テネリフェ島でのGroundBIRD望遠鏡設置の様子。

宇宙進化と素粒子は互いに密接な関係があります。「宇宙」と「素粒子」は「容れ物」と「中身」のような関係にありますが、アインシュタインが考えた「一般相対性理論」によれば、この「中身」の性質によって「容れ物」である宇宙の進化の様子が変わってしまうのです。これを逆に利用すれば、宇宙を観測することでその中身、特にニュートリノや未知の素粒子の探索を行うことができます。また宇宙創成を説明するとされる「インフレーション仮説」もまた、標準理論を超える素粒子物理学との密接な関係が指摘されています。

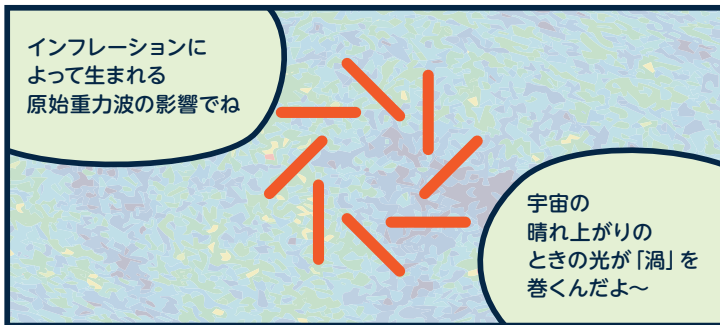
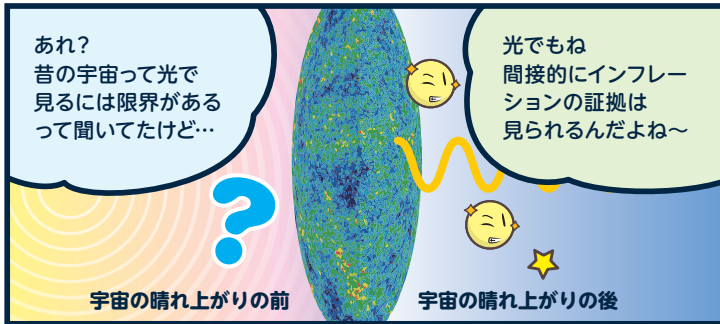
私たちは「宇宙最初の光」である宇宙マイクロ波背景放射を観測するSimons ArrayとGroundBIRDという2つの望遠鏡・宇宙観測プロジェクトを通して、この宇宙の始まりと膨張・進化を探ります。それによってニュートリノの質量測定や未発見素粒子の探索を行い、宇宙の始まりの物理に迫ります。同時にこれらの望遠鏡で用いられる超伝導検出器技術のさらなる開発を進め、将来の宇宙観測や素粒子実験へ応用するための道を拓きます。



我々の行う宇宙観測は、宇宙という巨大な実験場を用いたニュートリノ・素粒子実験と考えることもできます。宇宙という実験場を使って素粒子実験を行い、それと同時に実験場そのものの地図を作っていくような、ワクワクする探検をしています。

研究代表者 **日下 暁人** 東京大学 准教授

# ぐるぐるする光

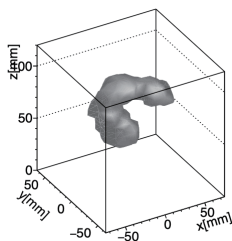
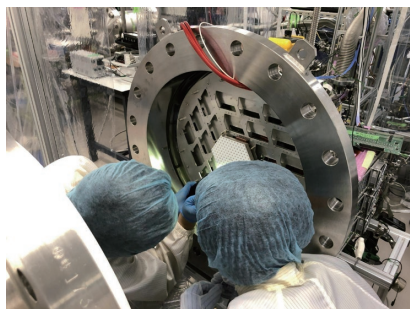


**ユラギ・マキさん**  
インフレーションの痕跡を見るために、  
いろいろな実験をいろいろな場所で行っています。



**ぐるぐる**  
正確にはBモード偏光と呼ばれ、原始重力波で  
晴れ上がりの光に痕跡が残るはずなのです。

# B01 ニュートリノはマヨラナか？ 希ガス検出器による革新的測定法の開拓



左: AXEL180L 検出器  
組み立ての様子。  
右: AXEL180L 検出器  
でとらえた662 keVの  
電子の飛跡。

『ニュートリノレス二重ベータ崩壊』探索における現状の限界を打破することを目指して、希ガス検出器による新しい測定原理・技術の開発を行っています。

この崩壊はニュートリノがマヨラナ粒子である場合にのみ起こるため、これを探索することでニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうか、すなわちニュートリノと反ニュートリノは異なる状態にある同一の粒子であるのかどうかを知ることができるのです。ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかは、素粒子の法則や宇宙の成り立ちを理解するために重要な問題となっています。

私たちはAXEL(A Xenon ElectroLuminescence)検出器と呼ばれる高圧ガスキセノンによる検出器の開発を進めています。ガス状態の純粋希ガスを検出器媒体として用い、独自の信号読み出し方式で高いエネルギー分解能、飛跡パターンの測定、大型化が可能な検出器です。これらの技術の確立に加えて、二重ベータ崩壊の娘核のイオン1個を検出する新技術開発に挑戦しています。このイオン1個を検出するイオンタングを高エネルギー分解能を持つAXEL検出器に組み込むことができれば、背景事象は限りなくゼロとなり大幅な探索感度向上が可能となります。この他、純粋希ガス検出器に関連するさまざまな新規技術の開発を行っています。



宇宙の始まりに何が起きたのか、なぜ素粒子の種類は規則正しいパターンと桁違いな質量を持っているのか、なぜ電磁気力、強い力、弱い力、重力があるのか、素粒子の種類によってどうしてこれらの力を感じたり感じなかったりするのか、知りたいことがいっぱいあります。凄く検出器を作って、ニュートリノを通じて自然から少しでもヒントを引き出したい！

研究代表者 **市川 温子** 東北大学理学研究科 教授



# AXELさんの探しもの

キセノン136っていう  
原子の原子核がね！  
電子2つとニュートリノ2つを  
出す **ダブルベータ崩壊**って  
反応をするの！

**ダブルベータ崩壊**

でもね もしニュートリノと  
反ニュートリノが同じものっていう  
「マヨラナ粒子」だとすると  
ニュートリノが出てこない反応が  
あってもいいはずなの！

**ニュートリノレス  
ダブルベータ崩壊**

だからキセノンガスを詰めた  
TPCで電子さんの  
エネルギーと軌跡を調べて  
そういう反応を探すの！

ニュートリノは？

AXELさん

TPCくん

ニュートリノが見えなくても  
出てくる電子をしっかり見れば  
わかるはずなの！



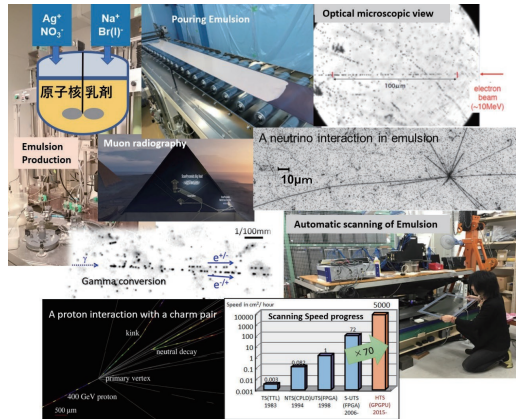
**AXEL(アクセル)さん**  
キセノン136の高圧ガスを使って、  
ニュートリノレスダブルベータ崩壊を探しています。



**ニュートリノがでてこないダブルベータ崩壊**  
ニュートリノのマヨラナ性を確認するために  
実験屋さんが探している現象。とても流行ってます。

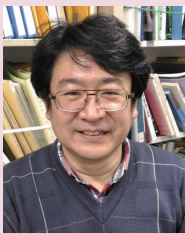
# B02 ニュートリノ精密測定にむけた 原子核乾板開発

写真フィルム的一种である原子核乾板は素粒子研究において $\pi$ 中間子の発見や、チャーム粒子(X粒子)の発見、タウニュートリノの検出などサブミクロンの位置分解能を活かし、成果を上げてきました。特に実験室系において数mm以下の飛程で崩壊する短寿命粒子であるチャーム粒子やタウ粒子等の解析において、崩壊の幾何学を精密に決定



することができるため、極めて背景事象の少ない解析が行えます。ちなみに光学顕微鏡でみる荷電粒子の飛跡はサブミクロンの銀粒の列として原子核乾板に蓄積されていて、何度でも観察・読み出すことができることも特徴です。

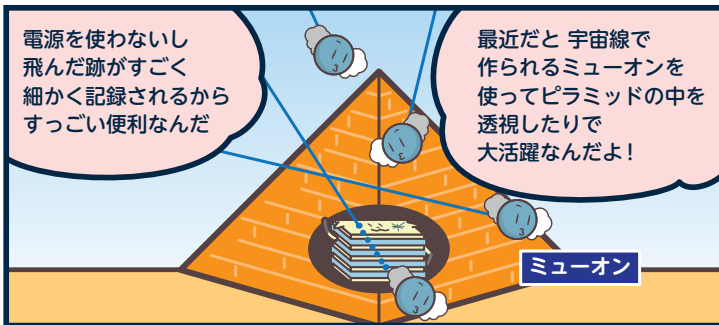
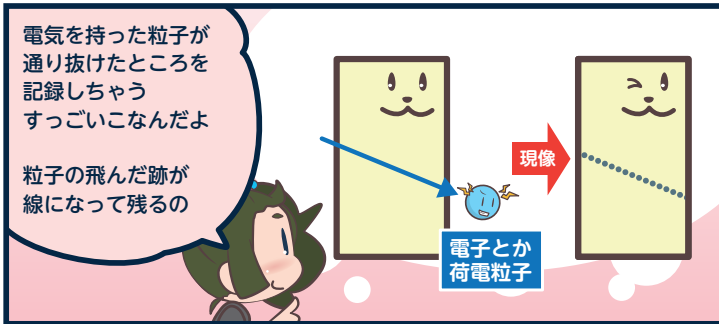
名古屋大学では、原子核乾板に保持されているサブミクロンの飛跡情報を読み出す光学顕微鏡の継続的な自動化、高速化開発がなされており、近年では1年あたり1000m<sup>2</sup>の面積の原子核乾板の飛跡を読み出すことが可能になっています。この飛跡読み取り能力を最大限活用して物理成果を出すべく、原子核乾板を用いたニュートリノ研究等の新規実験が続々と計画されてきています。本領域A02班のNINJA実験もその1つです。本研究開発では、飛跡読み出し速度に見合った量の原子核乾板を製造する装置の立ち上げおよび運用することで原子核乾板によるニュートリノ研究計画等に資することを目的としています。また、実験ごとに最適な性能の原子核乾板を供給することも考えています。



ビギナーズラックは偶然ではない。知識に邪魔されない自由な発想・試行により必然的に生み出されていると思います。つまり、予備知識がないこと、未経験であることはむしろ強みとなることがあります。自由な発想こそ成功の源、原子核乾板未経験の皆さんも大規模展開が容易な超精密3D検出器「原子核乾板」を使って実験してみませんか？

研究代表者 **佐藤 修** 名古屋大学 助教

# この頃流行りのエマルジョン



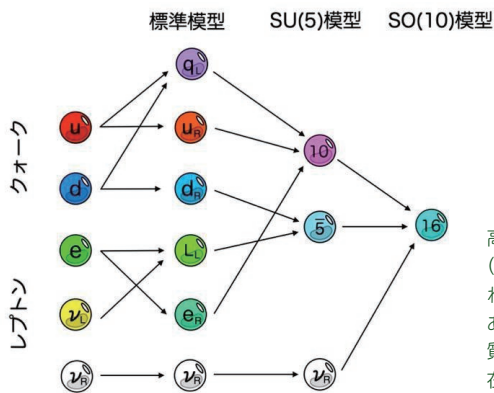
**エマルジョン(原子核乾板)**  
フィルムを使った写真と同じ仕組みを使っている、素粒子観測に昔から使われてきた検出器です。



**J-PARCちゃんとエマルジョン**  
J-PARCちゃんの作るミューニュートリノを詳しく調べる、MINJIA実験を行っています。

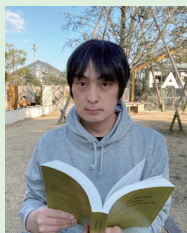
# C01 ニュートリノで探る 対称性と宇宙像

ニュートリノで拓く素粒子と宇宙



高い対称性を持つ大統一模型(SU(5)模型、SO(10)模型)ではクォークやレプトンが融合される。右巻きニュートリノ( $\nu_R$ )は未発見ではあるがニュートリノの質量や宇宙の物質・反物質非対称性の起源に関わる粒子としてその存在が強く期待されている。

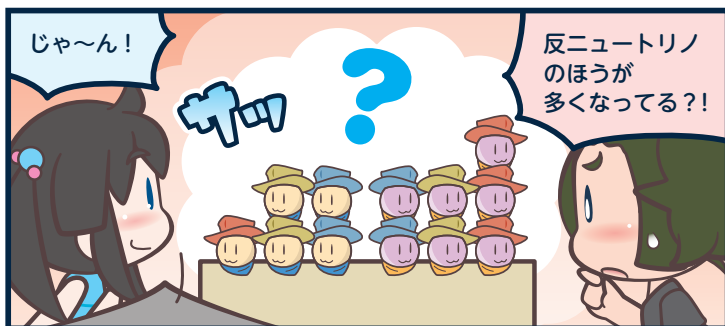
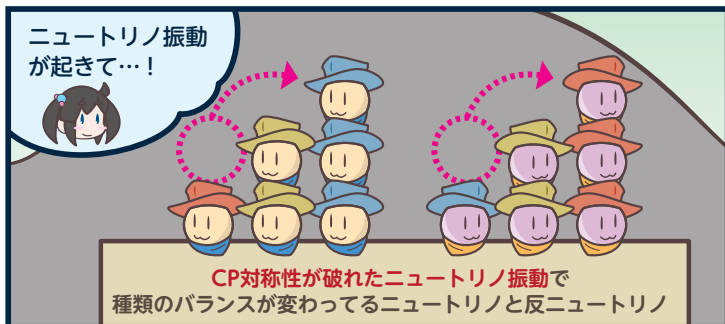
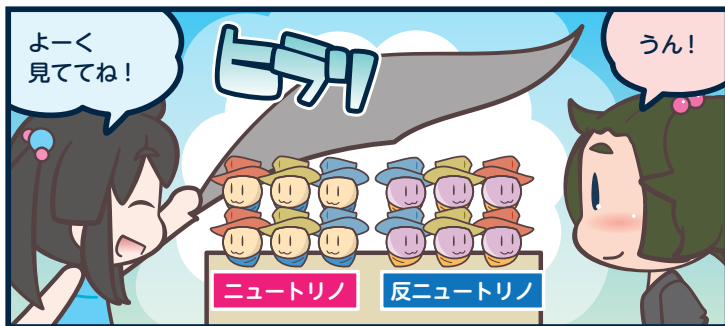
私たちC01班では、ニュートリノの研究を通して新たな対称性を探り、素粒子標準模型を超える新物理模型の可能性を追求しています。素粒子理論の研究は宇宙の設計図を考える研究です。素粒子理論では物質も力も素粒子とそのやりとりで記述されます。そして対称性はそれらの素粒子たちを特徴づける重要な性質です。素粒子たちは様々な対称性の下での振る舞いの違いによって区別され、それらの振る舞いに応じて素粒子同士のやりとりの法則が決まります。そのため対称性の理解は宇宙の設計図の理解につながります。特にニュートリノは質量が他の粒子と比べ極端に小さいという特異な性質を持っており、その質量の起源は新たな対称性、新物理模型の鍵となることが期待されています。私たちの班ではニュートリノの質量起源、暗黒物質の起源、宇宙の物質・反物質非対称性の起源を内包する様々な新物理模型の提案、およびそれらの検証法についての研究を行なっています。また高い対称性を持つ大統一模型や超弦理論から、これまでの理論の枠内では得られない情報を引き出し素粒子・宇宙の新しい統一像を探る研究も行なっています。



インフレーション宇宙論の成功から、宇宙の設計図は意外とシンプルなものであることが分かっています。そのシンプルな法則から多様性に溢れた現在の宇宙が形作られていることは驚くべきことです。一方で宇宙の進化においてまだまだ理解できていないことが沢山あります。それらの問題の答えに一歩でも近づけるように知恵を絞り、よりシンプルで美しい物理法則の発見につなげていきたいと考えています。

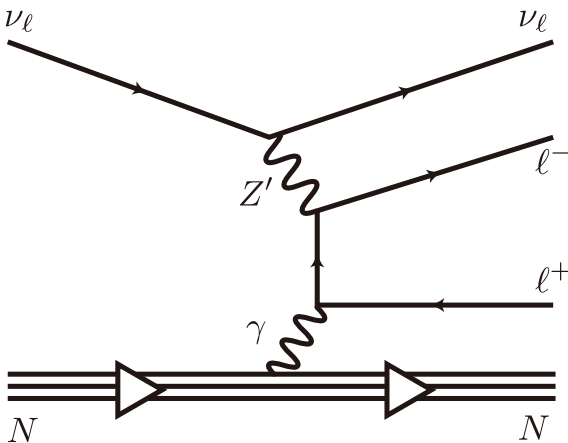
研究代表者 **伊部 昌宏** 東京大学 宇宙線研究所 准教授

# ニュートリノ・マジック!



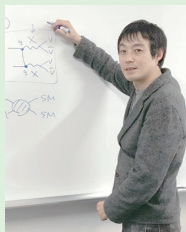
反ニュートリノのほうが多い?  
生まれたときは同じだけあったはずのニュートリノと反ニュートリノ、気がついたら反ニュートリノが多くなっていました。  
CP対称性の破れによって引き起こされるこの現象が、今の物質が多い宇宙を作ったという説があります。

# C02 標準理論を超えた新現象と ニュートリノで探る新しい素粒子像



ニュートリノの衝突反応における  
新粒子の影響の模式図

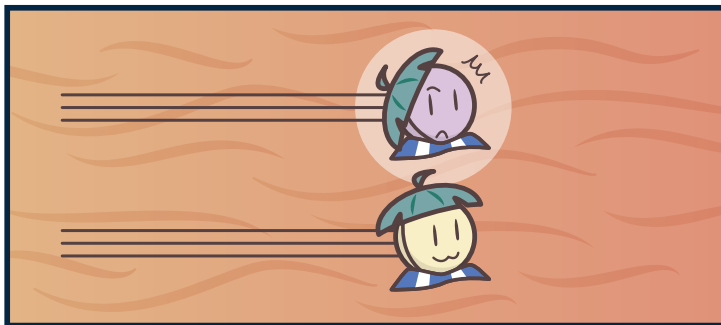
素粒子物理学において「標準理論」と呼ばれる理論は素粒子のほとんどの現象を説明できる優れた理論です。しかしながら説明できない事柄も残されており、その1つがニュートリノの質量の存在です。ニュートリノの質量は標準理論においてはゼロとされてきましたが、実はゼロではないことがニュートリノ振動観測で明らかにされました。そのためニュートリノを研究することは、標準理論を越えた新物理理論を探るための有力な手段であると考えられます。私たちC02班では、ニュートリノ振動に対する新物理の影響、ニュートリノのきょうだいである電子の仲間たちに関する新現象、ニュートリノを伴う低エネルギー反応、ニュートリノ微小質量の生成機構など、ニュートリノを軸として標準理論を越えた新現象を研究することにより、新物理理論の姿を解明することを目指しています。



日本はニュートリノ実験において世界をリードし続けています。私たちもニュートリノの理論的研究において、ニュートリノや宇宙の謎の解明への最先端となるような研究を心がけています。

研究代表者 **津村 浩二** 九州大学 理学研究院 准教授

# そっくり? ちょっとちがう?



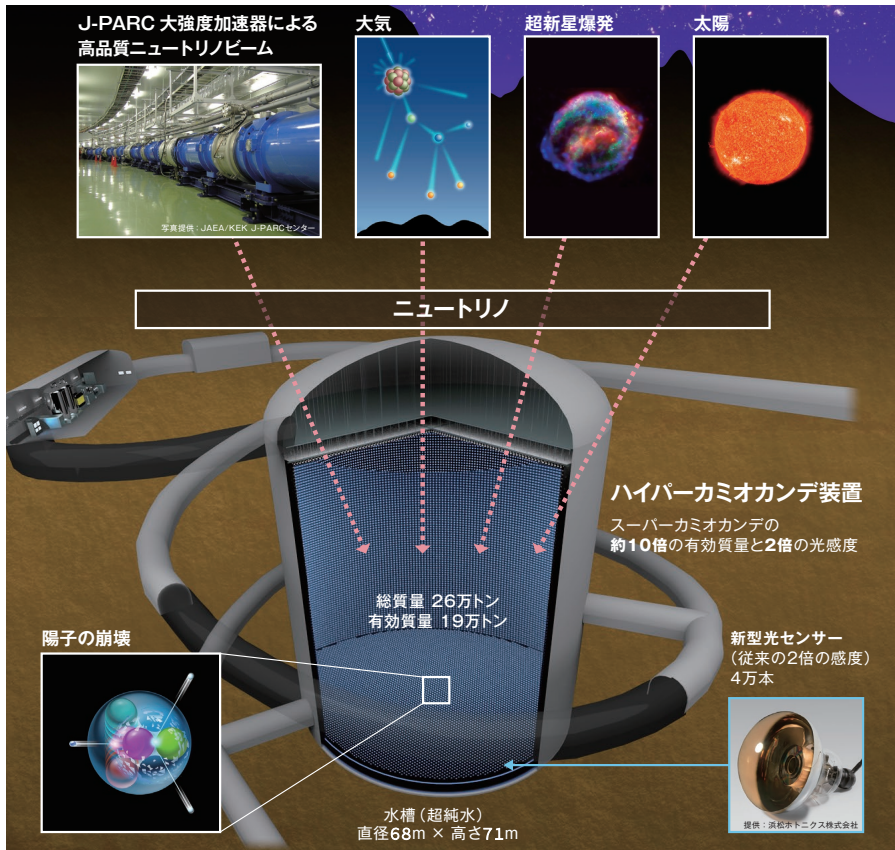
電氣的に中性なニュートリノと反ニュートリノ、反応したときに出る粒子の電氣の+を見ることで、粒子と反粒子の関係にあることがわかっています。



帽子がずれてる反ミューニュートリノちゃん T2K実験によって、反ミューニュートリノの性質の違いがちよっとだけ見えてきました。

# ハイパーカミオカンデ

ハイパーカミオカンデ計画は、スーパーカミオカンデの約10倍の有効体積と2倍の感度の新型光センサーを持つ巨大地下検出器の建設と、大強度陽子加速器J-PARCの増強の二本柱からなるプロジェクトです。



J-PARCで作られたニュートリノビームをハイパーカミオカンデ検出器で観測し、ニュートリノと反ニュートリノの振動の違いを測定することによって、宇宙の歴史の中で物質がどのように作られたかという謎に迫ります。また検出器内の膨大な水に含まれる陽子が自然に崩壊する現象を探ることで、素粒子の大統一理論の検証を行います。さらに超新星爆発ニュートリノや、大気および太陽ニュートリノなど自然由来のニュートリノの観測により、ニュートリノの性質を調べるとともにニュートリノを用いた天文学を進めます。2020年2月にハイパーカミオカンデ計画が正式にスタート、世界約20カ国から約400名の研究者が計画に参加し、2027年の観測開始を目指し協力して建設を進めています。これまで日本で培われたニュートリノ実験の知見をさらに向上させ、ニュートリノ研究の次のステージをリードしていきます。

実験代表者

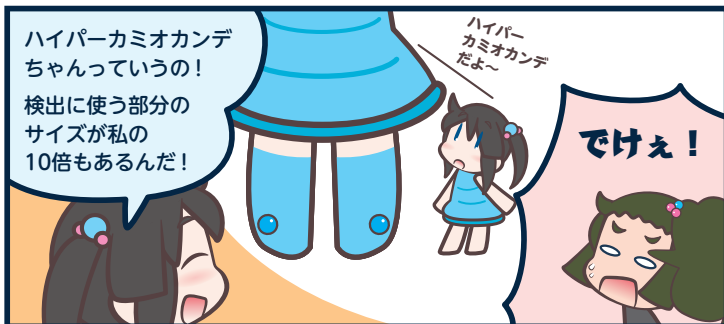
塩澤真人 教授 (日本)

Francesca Di Lodovico 教授 (イギリス)





# カミオカンデ3姉妹



カミオカンデさん  
岐阜県飛騨市神岡町在住でした。  
すでに引退済。カムランドくん  
に跡地を譲る。



ハイパーカミオカンデちゃん  
岐阜県飛騨市神岡町在住予定。  
サイズがとにかくハイパー、  
現在がんばって建設中。

# 若手研究者の育成と活躍

ニュートリノ・素粒子・宇宙には多くの謎が残されていますが、一朝一夕に解決できるものではありません。本領域研究では直面する謎に挑みつつ、将来の研究を担う若手研究者の育成にも力を入れています。



新学術領域研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」では、ポスドク研究員や大学院生を中心とした若手研究者も活躍しています。2019年には「ニュートリノ振動とフレーバー物理」と題し、若手研究者の企画による研究会が名古屋大学で開催されました。研究会では大学・研究グループ・理論実験の枠に捉われず、活発な質問や意見が飛び交い、幅広く知識を得て今後の研究に生かす良い機会となりました。また2020年にオンラインで開催された新学術領域研究会では大学院生も運営に参加し、若手セッションとしてポスター発表が行われました。オンラインでの新しい試みとして、11の部屋に分かれて参加者が自由に行き来する方式で行いましたが、参加者にも好評で無事成功に終わりました。



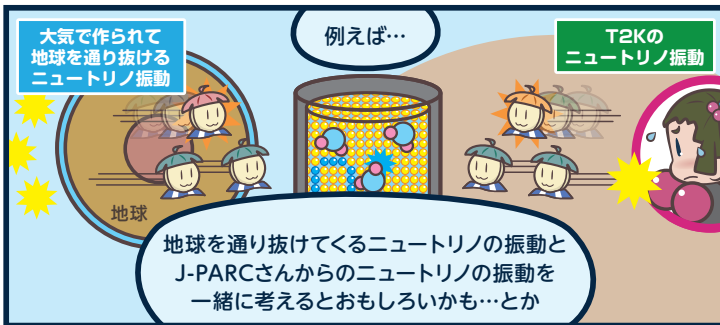
学生から最先端の研究に関わることができて、若手が実際に手を動かす部分を担っていることも多く、やりがいはもちろん、純粋に楽しいです。偉い人の言うことが通るのではなく、客観的な方法で問題点や新提案等の妥当性を示せば、若かろうと周りを動かすことができるのが科学です。各分野の先輩研究者もそのような環境で育っていますから、新しく入ろうと奮闘する僕らを応援し迎えてくれて、持ちつ持たれつの良いチームだと思っています。

素粒子物理学ではフロンティアの認識が共通しているので、競争も含め、世界中の研究者と共に自然に挑んでいる連帯感もたまりません。そうやって明かされていく自然法則の面白さを科学を愛する全ての人と共に楽しんでいきたいです。

**Lukas Berns ルカス ベルンス** 東京工業大学

ルカスさんはどんなニュートリノを研究している？

# どれが好き？



いろいろなニュートリノを見るスーパーカミオカンデちゃん  
ニュートリノ大好きスーパーカミオカンデちゃん、大気で作られたニュートリノに「カミオ」さんが作ったニュートリノ、  
超新星爆発で生まれるニュートリノに昔の超新星爆発のなごりのニュートリノ、他にもたくさん見えています。

# 研究者に聞いてみる！

ニュートリノ研究の最前線で活躍している石原安野さんが仁科記念賞と猿橋賞を、市川温子さんが猿橋賞を受賞されました。石原さん、市川さんはどんな研究者か紹介します。



「まだ誰も知らないことを、もっと知りたいという気持ちです」

**石原安野** いしはら あや 千葉大学 教授

IceCube実験による超高エネルギー宇宙ニュートリノの発見とニュートリノ放射天体の同定への本質的な貢献が評価され、第37回（2017）猿橋賞と第65回（2019）仁科記念賞を受賞しました。猿橋賞は顕著な業績を上げた自然科学の分野の女性研究者に贈られる賞、仁科記念賞は物理学分野において66年の長い歴史を持つ日本で最も歴史と権威のある賞です。石原さんは1955年の仁科記念賞創設以来、女性研究者としては二人目の受賞者となりました。世界12ヶ国から約300人が参加する大型国際プロジェクトで圧倒的な業績を上げた日本人女性研究者の存在は、後に続く若手研究者の目標となります。

## —子どものころに好きだった本や感銘を受けた本は何でしたか？

**石原**：佐藤さとるさんのコロボックル物語やトールキンの指輪物語、上橋菜穂子さんの「守り人」シリーズなどの冒険ファンタジーが好きです。

## —物理のどんなところが好きですか？

**石原**：頭の中で、そして現実の世界でも冒険ができる場所です。遥か遠くの宇宙について考えている時、私は宇宙を探検しているなど実感できます。南極点に検出器を埋設しに行くのも大冒険で、これも実験物理学者の醍醐味です。

## —ニュートリノの魅力とは？

**石原**：ニュートリノは素粒子で、その素粒子の中でも特に軽くて他と相互作用しにくい、言ってみればとてもシンプルな存在です。物理学では自然の中にある物事をどんどんシンプルにしていって、その中から一見関係なさそうな物事の共通の関係性を探るということを目指しています。つまりシンプルな存在であるってことはとても重要なことで、そんなシンプルな存在が、これまで隠されてきた宇宙のことや我々の世界について教えてくれるっていうのが、私にとってのニュートリノの魅力です。

## —研究への原動力は何ですか？

**石原**：まだ誰も知らないことを、もっと知りたいという気持ちです。

## —苦しかった時期をどうやって乗り越えましたか？

**石原**：海外留学中の研究所での生活など大変だと思うことはこれまでに沢山ありましたが、新しい環境にいと目の前のことで精いっぱい、苦しいと思うことはあまりなかったような気がしています。確かに失敗や研究の苦しみもあるけど、次こそはもっとうまくいくっていうわくわくする気持ちの方が強くて、苦しかったことは忘れさせてくれます。

## —学生さんに向けてメッセージをお願いします。

**石原**：興味は人それぞれ違って当たり前。他の人が面白いっていったるものに興味を持てなかったり、これ面白いっていうのが自分だけだったりしても全然問題ないです。自分はこういうものごとに興味があるのか、真剣に自分と向き合って、見つけてください。



「自分でもどうして、こんなに一生懸命熱中しているのかわからないです」

## 市川温子

いちかわ あつこ 京都大学 准教授 (2020年10月から東北大学 教授)

T2K実験のニュートリノビームを設計・製作し、そのビームを使った新しいタイプのニュートリノ振動の発見に多大な貢献が評価されて、自然科学の分野で顕著な研究業績を収めた女性科学者に贈られる第40回(2020)猿橋賞を受賞しました。市川さんは、現在世界12ヶ国から約400人が参加する大型国際共同研究T2Kの代表者として、世界の加速器ニュートリノ研究を牽引しています。猿橋賞は「女性科学者に明るい未来をの会」から贈られますが、市川さんの活躍は科学の未来に大きな明かりを灯しています。

### —子どものころに好きだった本や感銘を受けた本は何でしたか？

市川：魔法だったり、ちょっと不思議なことがあったりする児童書が好きでした。

### —物理のどんなところが好きですか？

市川：ちゃんと仕組みがあって、それに従っているんなものが動いていることがわかると、すごく楽しくないですか？また、相対性理論、量子力学、そして素粒子のことを学べば学ぶほどびっくりすることだからで、世界がどんどん違って見えて感動します。

### —ニュートリノの魅力とは？

市川：身の周りに溢れているのに、中々捕まえられない所に惹かれます。あと、変ですよ？

### —研究への原動力は何ですか？

市川：自分でもどうして、こんなに一生懸命熱中しているのかわからないです。

### —苦しかった時期をどうやって乗り越えましたか？

市川：大学に入って、一年くらい落ち込んだ時が一番苦しかったです。バイトで生活のリズムをкаろうじて保って、少しずつ少しずつ活力が戻ってきたように思います。他にも大変なことはいろいろありましたが、大学時代のどん底から這い出たからは頑張ると楽しいこともいっぱいあるということを知っているので、頑張れるように思います。

### —学生さんに向けてメッセージをお願いします。

市川：若いからって、調子に乗……っっているいろいろ経験してください！

【左】仁科記念賞授賞式での石原安野さんとニュートリノ仲間の小林隆さん(左)、吉田滋さん(右から2人目)、中家剛さん(右)。

【右】ハワイで行われた会議の合間の市川温子さん。



# 本研究領域 年表

- 2018.01** 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」が採択
- 2018.08** 日本科学未来館において、一般向け講演会「みんなにわかるニュートリノのお話 一素粒子と宇宙について」を開催
- 2018.09** 北海道大学 山津直樹氏が素粒子奨学会 第13回中村誠太郎賞を受賞
- 2019.02** 書籍「キャラクターでよくわかる 宇宙の歴史と宇宙観測 (秋本祐希 著)」出版
- 2019.03** 千葉大学 石原安野教授が読売テクノ・フォーラム 第25回ゴールド・メダル賞を受賞
- 2019.03** 大阪市立科学館発行の月刊「うちゅう」にコラム「ニュートリノで挑む宇宙誕生の謎 (中家剛 著)」が掲載
- 2019.03** 日本物理学会との共催シンポジウム「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」を開催
- 2019.04** Long-Baseline Neutrino Oscillation Newslettersにニュートリノ紹介パンフレットが掲載
- 2019.05** 読売テクノ・フォーラム ゴールドメダル賞受賞記念講演会において千葉大学 石原安野教授が講演
- 2019.06** 第1回ニュートリノ若手研究会「ニュートリノ振動とフレーバー物理」を開催
- 2019.07** Vietnam School on Neutrinos 2019 を開催
- 2019.08** 日本物理学会科学セミナー「宇宙を観る、聴く、計算する 一マルチメッセンジャー天文学の幕開け」において千葉大学 石原安野教授が講演
- 2019.11** 千葉大学 吉田滋教授、石原安野教授が2019年度仁科記念賞を受賞
- 2019.11** 書籍「スッキリ!がってん!ニュートリノの本 (関谷洋之 共著)」出版
- 2019.11** 京都大学 仲村佳悟さんが第14回(2020年)日本物理学会若手奨励賞を受賞
- 2019.12** Nature Reviews Physics「Neutrino physics: past, present and future」において京都大学 市川温子准教授が講演
- 2020.02** ハイパーカミオカンデ計画の開始
- 2020.02** 書籍「宇宙物理学ハンドブック (安田修 共著)」出版
- 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」と物理学会の共催シンポジウム「宇宙と素粒子の残された謎の解明に向けた、次世代ニュートリノ観測・陽子崩壊実験(ハイパーカミオカンデ)」を新型コロナウイルス感染症拡大の影響によりオンライン(テレビ会議)形式で開催
- 2020.04** T2K実験の新しい結果が雑誌「nature」他に掲載
- 2020.04** 書籍「深宇宙ニュートリノの発見 宇宙の巨大なエンジンからの使者 (吉田滋 著)」出版
- 2020.05** 京都大学 市川温子准教授が一般財団法人 女性科学者に明るい未来をの会 第40回猿橋賞を受賞
- 2020.05** スーパーカミオカンデのシミュレーションデータを一般用に公開開始
- 2020.07** 日本物理学会誌7月号に、A02班が進めているNINJA実験・WAGASCI実験開始の記事「J-PARCで新しく始まったニュートリノ反応測定実験」(福田努・木河達也 著)が掲載
- 2020.08** 新生スーパーカミオカンデがスタート、ガドリニウムを加え新たに観測開始
- 2020.10** 精密測定により素粒子ニュートリノの謎の解明を目指すNINJA実験の物理解析が開始
- 2020.11** 京都大学 市川温子准教授が令和二年度京都府あけぼの賞を受賞
- 2020.11** 京都大学 芦田洋輔さんが第15回(2021年)日本物理学会若手奨励賞を受賞
- 2020.11** 小柴昌俊先生ご逝去
- 2020.12** T2K実験のニュートリノ振動に関する論文が、nature誌の「10 remarkable discoveries from 2020」に選出
- 2021.01** IceCube コラボレーションが2021年ブルーノ・ロッシ賞を受賞
- 2021.02** 名古屋大学 丹羽公雄名誉教授が2020年ブルーノ・ポンテコルボ賞を受賞

## 総括班

研究代表者：中家 剛 (京都大学)

研究分担者：早戸 良成 (東京大学)、石原 安野 (千葉大学)、日下 暁人 (東京大学)、市川 温子 (東北大学)、  
佐藤 修 (名古屋大学)、伊部 昌宏 (東京大学)、津村 浩二 (九州大学)、伊藤 好孝 (名古屋大学)、  
石塚 正基 (東京理科大学)、清水 格 (東北大学)

連携研究者：横山 広美 (東京大学)、塩澤 真人 (東京大学)、Roger Wendell (京都大学)

## A01：自然ニュートリノ観測と陽子崩壊探索を通して探る新たな素粒子物理

研究代表者：早戸 良成 (東京大学)

研究分担者：Roger Wendell (京都大学)、西村 康宏 (慶応大学)、久世 正弘 (東京工業大学)、  
石塚 正基 (東京理科大学)、清水 格 (東北大学)、鈴木 州 (神戸大学)

連携研究者：竹内 康雄 (神戸大学)、小汐 由介 (岡山大学)

## A02：加速器ニュートリノビームで探る素粒子の対称性

研究代表者：中家 剛 (京都大学)

研究分担者：小関 忠 (高エネルギー加速器研究機構)、中平 武 (高エネルギー加速器研究機構)、  
清矢 良浩 (大阪市立大学)、福田 努 (名古屋大学)

連携研究者：Bronner Christophe (東京大学)、Hartz Mark (東京大学)、  
Friend Megan (高エネルギー加速器研究機構)

## A03：宇宙ニュートリノ観測の高精度化で探る標準理論を超える粒子信号

研究代表者：石原 安野 (千葉大学)

研究分担者：伊藤 好孝 (名古屋大学)、吉田 滋 (千葉大学)、清水 信宏 (千葉大学)、永井 遼 (千葉大学)

連携研究者：毛受 弘彰 (名古屋大学)、奥村 公宏 (東京大学)

## A04：ニュートリノ質量と測定・TeVを超える物理の探索を実現する次世代

研究代表者：日下 暁人 (東京大学)

研究分担者：田島 治 (京都大学)、服部 誠 (東北大学)、木内 健司 (東京大学)、小栗 秀悟 (理化学研究所)

連携研究者：宮武 広直 (名古屋大学)、茅根 裕司 (東京大学)、大谷 知行 (理化学研究所)、成瀬 雅人 (埼玉大学)

## B01：ニュートリノはマヨラナか？希ガス検出器による革新的測定法の開拓

研究代表者：市川 温子 (東北大学)

研究分担者：中島 康博 (東京大学)、坂下 健 (高エネルギー加速器研究機構)

連携研究者：関谷 洋之 (東京大学)、南野 彰宏 (横浜国立大学)、身内 賢太郎 (神戸大学)

## B02：ニュートリノ精密測定にむけた原子核乾板開発

研究代表者：佐藤 修 (名古屋大学)

研究分担者：小松 雅宏 (名古屋大学)、森島 邦博 (名古屋大学)、渋谷 寛 (東邦大学)、青木 茂樹 (神戸大学)、  
有賀 智子 (九州大学)

連携研究者：中村 光廣 (名古屋大学)、中野 敏行 (名古屋大学)、中 竜大 (東邦大学)、福田 努 (名古屋大学)、  
長縄 直嵩 (名古屋大学)、三角 尚治 (日本大学)

## C01：ニュートリノで探る対称性と宇宙像

研究代表者：伊部 昌宏 (東京大学)

研究分担者：北野 龍一郎 (高エネルギー加速器研究機構)、渡利 泰山 (東京大学)、石渡 弘治 (金沢大学)、  
永田 夏海 (東京大学)

連携研究者：川崎 雅裕 (東京大学)、松本 重貴 (東京大学)、檜垣 徹太郎 (慶応大学)、久徳 浩太郎 (京都大学)

## C02：標準理論を超えた新現象とニュートリノで探る新しい素粒子像

研究代表者：津村 浩二 (九州大学)

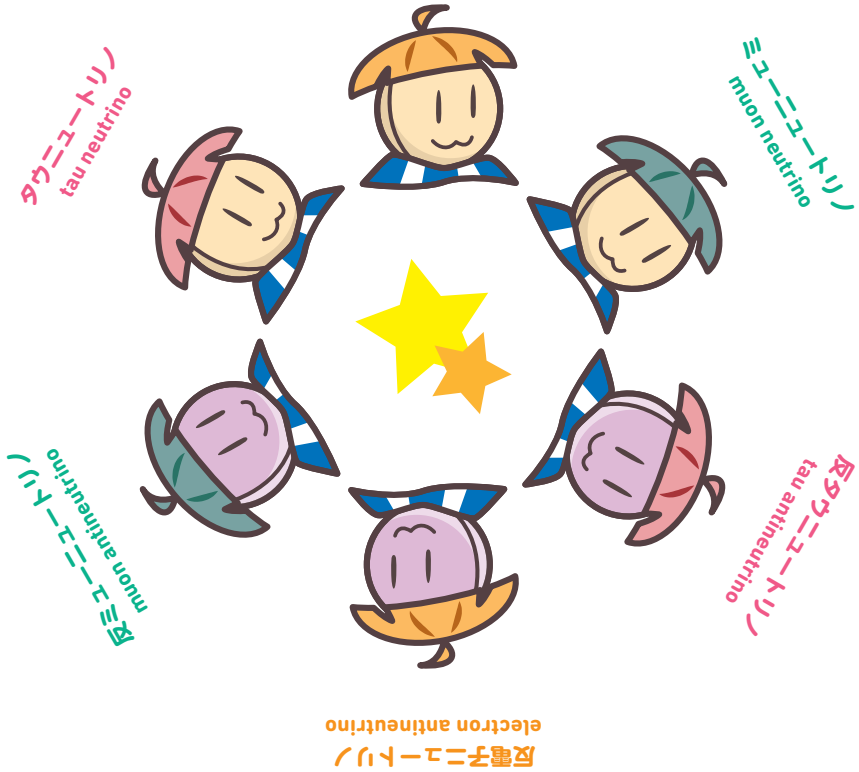
研究分担者：安田 修 (東京都立大学)、佐藤 文 (埼玉大学)、下村 崇 (宮崎大学)、杉山 弘晃 (富山県立大学)

連携研究者：佐藤 透 (大阪大学)、久野 純治 (名古屋大学)、田中 実 (大阪大学)、大村 雄司 (名古屋大学)

HP担当：関谷 絢子 新学術領域秘書：関口 晴美

冊子編集・デザイン・イラストレーション：秋本 祐希(ひつぐすたん、higgstan.com)

電子ニュートリノ  
electron neutrino



2021年3月 発行

文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究 (領域番号6003) 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」

<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nucosmos/>