

宇宙線研究所の今を伝える

ICRR NEWS

Explore Universe and Elementary Particles with Multi-Messengers.

No.
107
2020
WINTER & SPRING



KAGRA のコントロールルームで連続運転開始を喜ぶ研究者たち

Contents

■ Features

Press Release 2020.2.25

- 01 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA
重力波観測のための連続運転を開始
プロジェクト・マネジャーの

ICRR 重力波グループ

齊藤 芳男 特任教授に聞く

Press Release 2020.2.4

- 06 なぜ物質は完全消滅を免れたのか？
～重力波で探る物質の起源～
IPMU 村山斉主任研究員などの研究チーム

Press Release 2019.12.16

- 08 宇宙初期の巨大炭素雲の発見
～アルマ望遠鏡がとらえた宇宙最初の環境汚染～
藤本史史さん（コペンハーゲン大学）などの研究チーム

■ Reports

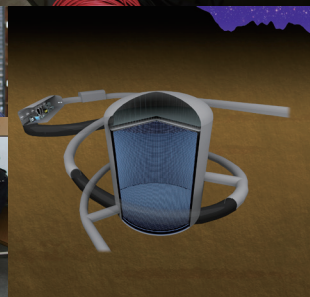
- 10 多摩六都科学館サイエンスカフェに川田和正助教
「チベットから見る宇宙、
そしてアルパカ・・・」
- 11 秋の合同一般講演会に関谷洋之准教授
「Super-Kamiokande アップグレード：
地下 1000m で宇宙を探る」

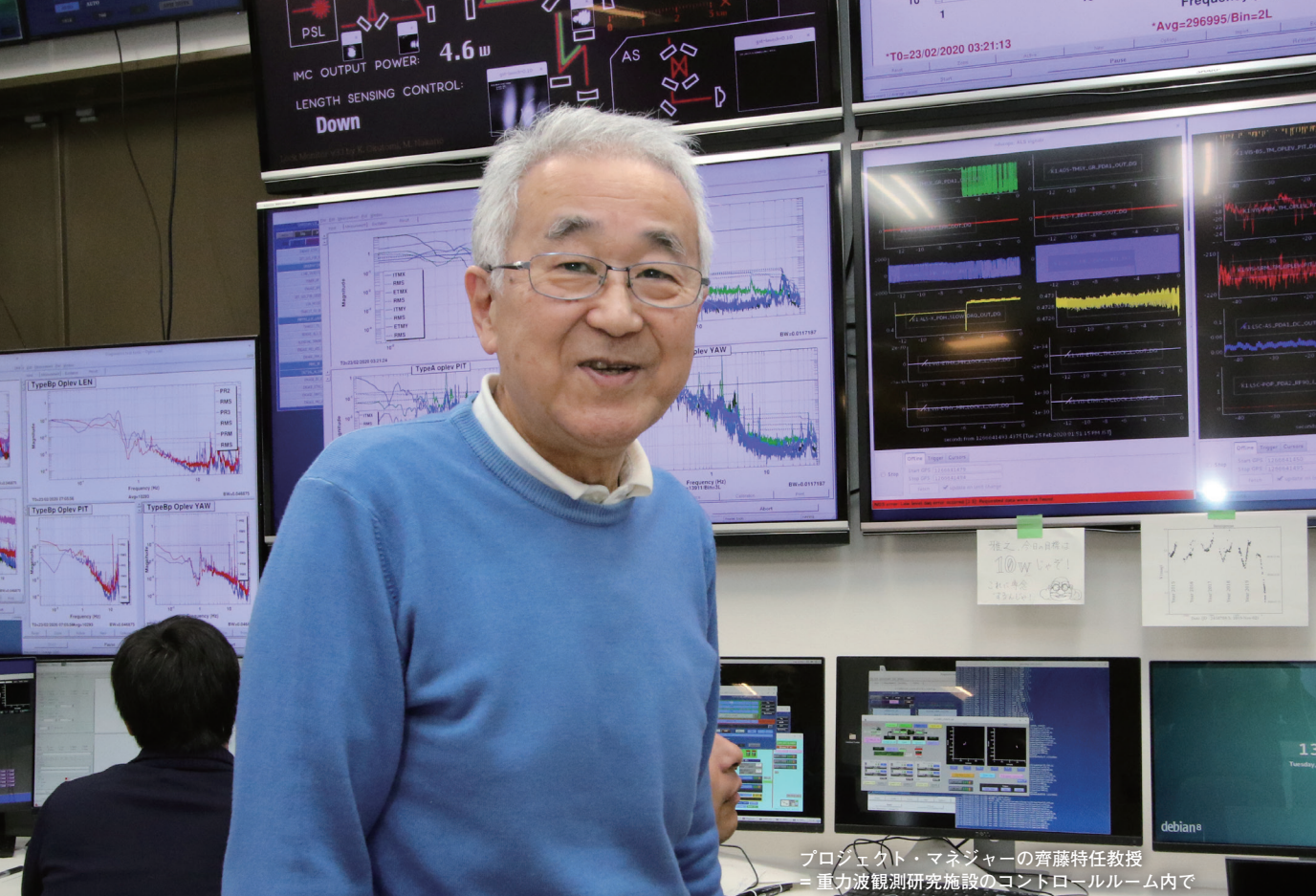
■ Topics

- 12 ハイパーカミオカンデ (HK) 計画の開始について
HK 光センサー取り付け用の試験フレームを設置
アジア、南米の高校生らが ICRR でミニ講義を受講
梶田隆章所長 日本学士院会員に選出
北村崇名誉教授がご逝去
2019 年の高被引用論文著者に大内正己教授
2020 年 修士・博士研究発表会を開催
宮原ひろ子准教授（武蔵野美術大）に第一回米沢富美子賞

■ Information

- 13 人事異動
ICRR Seminar





プロジェクト・マネジャーの齊藤特任教授
= 重力波観測研究施設のコントロールルーム内で

Features

Press Release 2020.2.25

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 重力波観測のための連続運転を開始

プロジェクト・マネジャーの

ICRR 重力波グループ ^{よしお} 齊藤 芳男 特任教授に聞く

時空のさざ波である重力波の観測を目的に、岐阜県飛騨市神岡町に完成した大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の本格運転が 2020 年 2 月 25 日午後 5 時、始まりました。完成式典が行われた 2019 年 10 月以降、感度を上げるためのチューニングを続けてきましたが、ようやく米国の LIGO、欧州の Virgo との共同観測が可能なレベルまで近づき、重力波観測のための連続運転が開始されたことになります。2011 年に建設が始まってから 9 年、2013 年 4 月からはプロジェクト・マネジャーとして、KAGRA に関わり続けてきた齊藤芳男特任教授に、これまでの苦労や今後への期待について伺いました。

齊藤特任教授

「長いようで短かった・・・」

KAGRA

建設開始から9年

— 重力波観測のための連続運転がいよいよ開始となりました。今の心境をお聞かせください。

◆齊藤教授 長いようで短かったです。建設が始まってから9年間、たくさんの苦労がありました。地元・飛騨市の皆さんの協力により、ようやくここまで来たか、という気持ちです。

日本最大の真空実験装置 KAGRA

—KAGRA はどんな装置でしょうか。

◆齊藤教授 KAGRA は、重力波の観測を目的としたレーザー干渉計という巨大真空装置です。科学実験用の真空装置には、「宇宙科学」「プラズマ核融合」「高エネルギー加速器」と三つのジャンルがあります。宇宙科学は、宇宙環境を模した巨大な試験装置を作る「ダイナミックな真空」、プラズマ核融合は熱いプラズマの閉じ込め、高エネルギー加速器は高エネルギー粒子を相手にするという、いずれも「ホットな真空」という課題がありました。

重力波望遠鏡はこれらのいずれにも入らない四つ目のカテゴリで、「静かな真空」が研究課題です。1995年に国立天文台三鷹キャンパス内に建設された重力波レー

ザー干渉計 TAMA300 が、日本では最初のプロジェクトです。

「静かな真空」という新たな課題に取り組む

—「静かな真空」とはどのような意味ですか。

◆齊藤教授 重力波を観測するためのレーザー干渉計は、レーザー光をXアーム、Yアームの二つの経路に分離し、重力波によって生じたわずかなアーム間の距離の差をレーザー光の干渉で測定します。

干渉計の光路上に気体分子が存在すると、レーザー光を散乱し、雑音となってしまいます。レーザーの入射から干渉信号の取り出しまでは一つの真空中に置く必要がありますが、真空といっても程度があり、レーザー光路に残った気体分子の数が、ある時は10個、ある時は10000個などとバラツキがあると、干渉計の雑音として影響してしまいます。このため、なるべく揺らぎのない、低い圧力をキープすることが必要です。これが静かな真空です。

KAGRAの目標感度を達成するには、干渉計の運転時の圧力が 2×10^{-5} Pa以下になる必要がありますが、実際には、感度に一桁の余裕をもたせるために必要な圧力としてさらに二桁小さい 2×10^{-7} Pa以下を達成目標とし



千葉県で生産される真空ダクト (2011 年)



KAGRA トンネルの掘削 (2012 年)

工場で製造、トンネル内でフランジ締結

ています。

— 2×10^{-7} Pa 以下の静かな真空を実現するのはどれくらい大変でしょうか。

◆齊藤教授　すでに周長が数キロの加速器も超高真空装置として建設されており、既存の技術を応用すれば実現は可能でした。しかし、干渉計の場合は、両端の鏡から散乱される光がダクト内壁で再び散乱され、鏡に入射して雑音となることを避けるため、ダクトの直径を加速器の数倍以上の直径 80 ～ 100 センチとする必要がありました。その結果、体積、内表面積ともに加速器より一桁大きくなり、KAGRA は日本最大の真空装置となりました。

さらに、その真空装置を、空調設備や電力供給に制限があり、滴水、漏水を完全に防ぐことができないトンネル内に設置する必要がありました。閉鎖空間のトンネル内での溶接も困難だったため、KAGRA では直径 80 センチ、長さ 12 メートルのユニットダクト 500 本を 3 年がかりで外部の工場で製造、トレーラーでトンネル内に搬入し、締結部にクリーンブースを設置して金属ガasketでフランジ締結するという方法を取りました。実際、ダクトのフランジが締結された直後の 3 キロアームの真空排気試験では、工場内の試験と同等の 1 週間程度で 1×10^{-5} Pa 台に到達し、この締結作業によるダクト内部の汚染が防止できたことが確認できました。

「きれいな真空」の課題にも対処

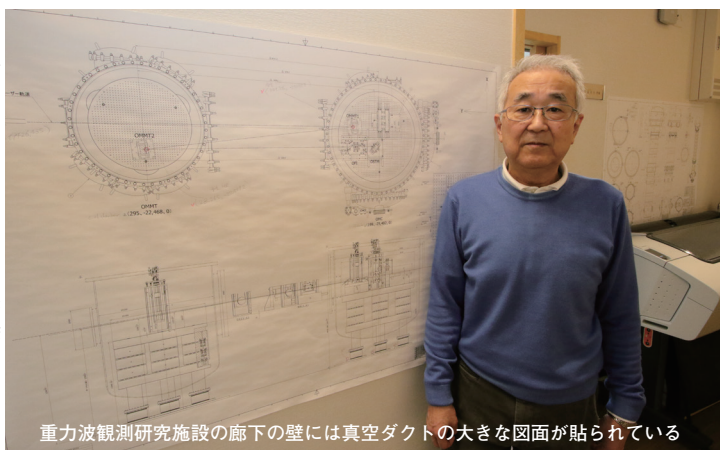
もちろん、このような真空（超高真空と呼びます）を実現するためには、配管の金属表面に吸着した汚染分子を除去し、表面を安定（不活性）な状態にしなければならないという「きれいな真空」の課題もありました。通常は、組み立てた後に真空排気しながら、装置全体を電熱ヒーターで覆って加熱するベーキング処理を行うのですが、KAGRA はトンネル内での処理が困難なため、外部の工場で 1 本ずつベーキング処理を済ませてから持ち込む方法を取りました。

— 真空ダクトの製造が始まったのは 2011 年ですね。

◆齊藤教授　そうです。真空ダクトの製造と並行し、2012 年 5 月からトンネルの掘削が始まりました。昼夜を問わない突貫工事が 2 年ほど続き、2014 年 3 月ようやく完成しました。重力波測定の雑音となる余計な振動を生まない安定な岩質のため、ここ神岡が選ばれたわけですが、砂が混ざり、岩質も一様ではないなど、掘削には大変な苦労がありました。特に水脈に当たると、噴出水の処理にサイドホールを掘らなければなりません。現在もトンネルの頭上にはおよそ 300 メートルの厚みの山が被っていますが、そこには 300 メートル分の水、つまり 30 気圧の水が貯まっていると考えてよく、今も水の染み出しがあり、装置が水を被らないようにする滴水・湧水対策が続けられています。

滴水・湧水対策 現在も

— 完成したトンネル内に真空ダクトや干渉計の鏡を正確無比に配置する作業にも苦労したと伺いました。



重力波観測研究施設の廊下の壁には真空ダクトの大きな図面が貼られている

◆齊藤教授　干渉計を行き来するレーザー光は、まず一つの平面上に置かれなければいけません。そのように設計した干渉計の座標 (X、Y) を、トンネル内の設置場所に置くため、それぞれの鏡の座標を、緯度・経度・標高に換算して国土地理院の地図の座標に落とし、測量可能な数字を得



真空ダクトの輸送 (2013 年)



トンネル内への設置 (2014 年)

Features

まず、10 桁の数字を 3 個ひと組で計算し、次々に変換していく作業です。10 桁の数字により、地球上のどここの位置も誤差 1 ミリ以内で決めることができます。このようにして、トンネル掘削と同時に測量ピンを打っていきました。

2014 年 7 月にトンネルの床に全てコンクリートが張られましたので、いよいよ 10 月から真空ダクトを設置し始めました。実は 500 本のダクトは製作が進むにつれ、それを保管する場所が問題になりまして（トンネルは掘削中でしたし）、廃線となった神岡鉄道のトンネルを飛騨市から借用して保管場所とさせてもらいました。この坑口は現在、ガッタンゴーの溪谷コースの出発点になっています。

「2014 年というのは、大変な年だった」

— トンネルが完成した 2014 年という年は大変な年だったそうですね。

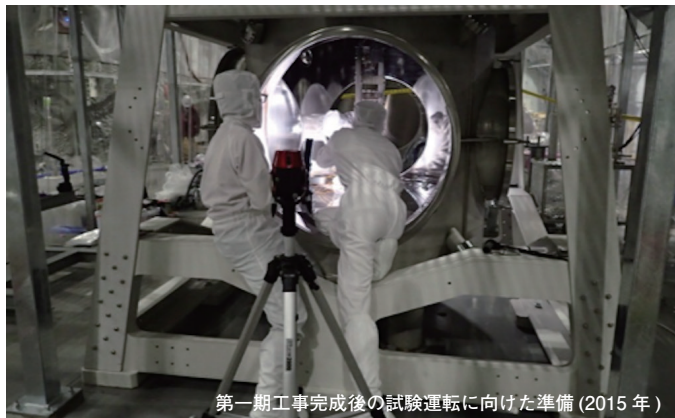
◆齊藤教授 2014 年というのは、春からマイマイガの大量発生、夏はカメムシの大量発生、秋はクマの目撃情報の多発など、大変になりそうな予感がありました。10 月からダクト設置を開始したのですが、クマの頻繁な出現だけでなく、大雪が断続的に続き、毎日数本のダクト搬送も雪かきとの競争となりました。当時、KEK から神岡に単身赴任していた私も、毎朝雪かきをして出勤しましたが、春

までに 6 キロも痩せてしまいました。

初めての試験運転 (2016 年) を実施

— そしてようやく試運転までこぎつけたのですね。

◆齊藤教授 2015 年 3 月、6 ヶ月を費やして全てのダクトが設置され、繋がれて 2 本の全長 3 km の真空ダクトが出来上がりました。それからおよそ 1 年間をかけて重要なポイントとなる鏡の設置と調整を優先的にを行い、2016 年に最初の試運転を行いました。3 キロメートル先までレーザーが届き、それが再び帰ってきて、信号が取得できることがこの時確認できたのです。



第一期工事完成後の試験運転に向けた準備 (2015 年)

■重力波研究と KAGRA をめぐるこれまでの経緯

- | | |
|-------------|---|
| 1916 年 | アインシュタインが重力波の存在を予言 |
| 1966 年 | 米国ウェーバーが重力波を検出したと発表 (のちに誤りと判明) |
| 1974 年 | 米国テイラーらが連星中性子星を発見、その軌道周期の減少率の計算から重力波の間接証拠を得る (1993 年ノーベル物理学賞) |
| 2005 年 | 米国の重力波望遠鏡 LIGO が観測を開始 |
| 2010 年 | 大型低温重力波望遠鏡 (後に KAGRA と命名) が文部科学省の「最先端研究基盤事業」の一つに選定され、建設が始まる |
| 2014 年 7 月 | KAGRA のためのトンネル掘削が完了 |
| 2015 年 9 月 | 米国の重力波望遠鏡 LIGO が感度を高めて観測を開始。ブラックホール合体によると見られる重力波を初めて観測 (2017 年ノーベル物理学賞) |
| 2015 年 11 月 | KAGRA 第一期実験施設が完成 |
| 2016 年 3 月 | KAGRA が試験運転を実施 |
| 4 月 | KAGRA 運転のための重力波観測研究施設が発足 |
| 2017 年 8 月 | LIGO、欧州の重力波検出器 Virgo が中性子連星の合体による重力波を観測 |
| 2018 年 5 月 | KAGRA が初めて鏡を冷やして行う試験運転を実施 |
| 2019 年 10 月 | KAGRA 完成記念式典を開催 |
| 2020 年 2 月 | KAGRA が重力波観測のための連続運転を開始 |

※ KAGRA 関係は黄色字

「飛驒に六年 住み住みて・・・」

— 鏡を冷やしての試運転も実施しました。

◆齊藤教授 2018年5月のゴールデンウィーク、KAGRAの特徴である低温鏡による干渉計の試運転を行いました。これにより、低温でのレーザー干渉計を運転できる見通しが立ちました。しかし、この時はキラウエア火山の噴火、八丈島の地震、そして富山湾にやってきた低気圧の影響で、地形が変動する、つまり揺れる問題が起こり、干渉計のロック（つまり安定な運転状態）がしばしば崩れ、大変な1週間だったことを思い出します。

— 現在の状況について教えてください。

◆齊藤教授 それから1年半の間に全ての鏡が懸架され、かつ調整され、いよいよフルスペックでの運転が可能になり、昨年10月4日の完成記念式典を行うことができました。しかし、まだ感度を上げるための微細の調整が終わっておらず、全ての機能を試験するエンジニアリングランを挟みながら、調整を続けてきました。その結果、ようやく米国のLIGO、欧州のVirgoと共同観測を行えるレベルに近づいたので、重力波を観測するための連続運転を開始することになりました。

今後も感度を上げるための調整続く

— 今後についても一言、お願いします。

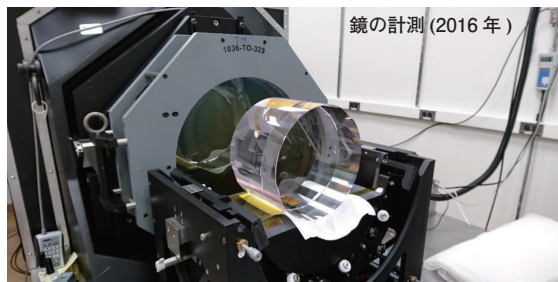
◆齊藤教授 工程に追われ、なかなか進捗しない時も、スタッフの努力でなんとか乗り切っては来ましたが、やはり、そういう時に地元・飛驒市を中心とする関係各位、さらには社会からの「目に見えない、あるいは聞こえないけどなんとなく感じる声援」が、私たちにとって最も大きな支えであり、強い後押しでもありました。

これからも、感度を向上させていく作業はさらに続きますが、引き続きご支援をよろしくお願い致します。

私事です、プロジェクト・マネジャーの仕事は3月末まで、4月からは東京大学柏キャンパスの勤務となります。今の心境はと聞かれば、ちょうど良い和歌が万葉集にあります。越中国守として赴任してきた大伴家持が詠んだものです。

しなざかる 越に五年住み住みて
立ち別れまく 惜しき夕かも

私の神岡への単身赴任は5年を過ぎ、大伴家持より1年多い6年となりましたので、「飛驒に六年」ですね。いろいろな苦労がありましたが、いざ離れるとなると同じ思いですね。



齊藤 芳男 (さいとう よしお) 特任教授

1951年山梨県の生まれ。1979年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修了(工学博士)。1979年東京大学工学部助手。1980年高エネルギー物理学研究所助手。1989年同助教授。2003年高エネルギー加速器研究機構教授。2013年4月からKAGRAプロジェクト・マネジャー。2014年4月から東京大学宇宙線研究所へ出向(神岡在住)、2015年4月から同特任教授、2015-2017年まで日本真空学会会長を務める。専門分野は真空工学、加速器科学。

Press Release 2020.2.4

なぜ物質は完全消滅を免れたのか？ ～重力波で探る物質の起源～ 日本、米国、カナダなどの国際研究チーム

カリフォルニア大学バークレー校教授を兼ねる東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) の村山 斉 むらやまひとし 主任研究者ら米国、日本、ドイツ、カナダの研究者からなる研究グループは、宇宙初期の相転移の際に出来たとされる「宇宙ひも」から生じる重力波を観測することで、相転移がニュートリノに物質と反物質の入れ替えを可能とさせたとする従来の理論を実証できることを指摘しました。この重力波は、欧州や日本で将来計画として検討されている宇宙重力波望遠鏡によって検出できる可能性があり、もし観測できればこの宇宙が物質優勢になった謎の解明につながると期待されます。

物質優勢の宇宙が生まれた謎に迫る

ビッグバン理論によると、宇宙の初期において物質と反物質は同じ量作られたと考えられていますが、現在の宇宙では物質だけが残し、私たち人間をはじめ、星や銀河などあらゆるものが物質から構成されています。物質と反物質が同量であれば対消滅でいずれも消えてしまったはずですが、反物質のみが無くなり物質だけが残ったという状況はビッグバン理論と矛盾しています。宇宙の初期に、少量の反物質が物質に変わり物質と反物質の間に 10 億分の 1 程度の不均衡が生じたことで、物質優勢の今の宇宙になったと考えられています。しかし、いつどのようにして物質と反物質の間の不均衡が生じたのかは謎のままです。

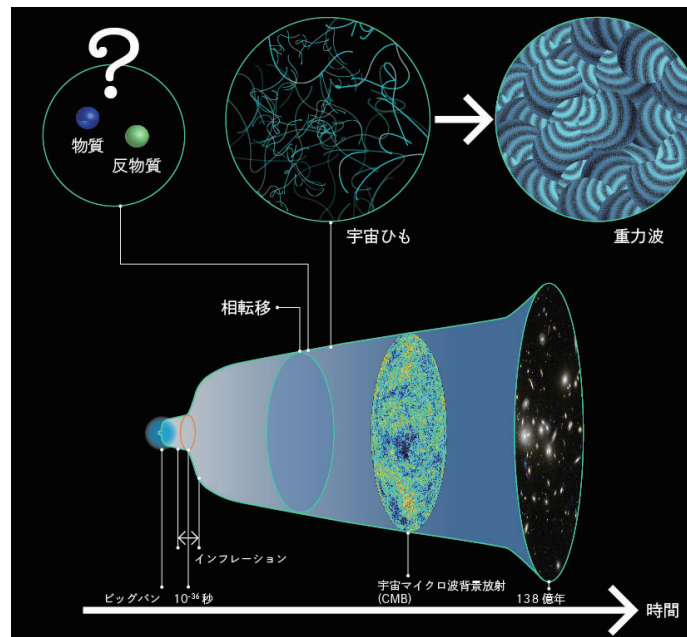
「誕生から約 40 万年間の宇宙は光を通さず不透明です。そのため通常の望遠鏡では観測が難しく、我々がなぜ存在するのか？という根源的な疑問に答えるのは困難です」とカリフォルニア大学バークレー校の Jeff Dror 研究員は述べます。

宇宙初期の相転移が反ニュートリノをニュートリノに変える ～レプトジェネシス機構～

物質と反物質は反対の電荷を持っているため、入れ替わることができません。しかし、ニュートリノは電氣的に中性な粒子であり、反物質から物質への入れ替えが可能な最も有力な候補とされています。多くの研究者が支持する理論は、宇宙初期の相転移が、ニュートリノに物質と反物質

の入れ替えを可能とさせたとする理論で、Kavli IPMU の柳田勉客員上級科学研究員（現 上海交通大学特別招聘教授）や福来正孝上級科学研究員等が提唱したレプトジェネシス機構と呼ばれるものです。

「相転移は、水で言うと沸騰した水の水蒸気への変化や、冷たい水が氷へ変わるといった状態の変化のようなものです。物質の振る舞いは、臨界温度と呼ばれる特定の温度で変化します。他の例としては、リニアモーターカーの磁気浮上技術やガン診断に用いられる核磁気共鳴画像法 (MRI) に利用される金属の超伝導体への変化です。ある特定の金属を低温に冷却していくと、相転移が起き電気抵抗が完全に失われて超伝導体になります。超伝導体のように、初期



図：インフレーションは、初期のマイクロな宇宙をマクロな大きさに引き延ばし、宇宙のエネルギーを物質に変化させた。しかし、その際には物質と反物質は同量作られたと考えられていて、いずれ完全に対消滅する運命だった。著者たちは、インフレーション後の相転移が物質と反物質の量のわずかな不均衡を生じさせる可能性について議論している。そのような相転移が、「宇宙ひも」と呼ばれるゴム紐のような網状構造を作り出したとし、宇宙ひもからの重力波は相転移後 138 億年を経て、初期の高温高密度の宇宙を通り抜け今日の我々のもとに到達していると考えられる。そのため、現在稼働中もしくは将来の重力波観測実験で発見される可能性が高い。(Original credit: R. Hurt/Caltech-JPL, NASA, and ESA Credit: Kavli IPMU - Kavli IPMU modified this figure based on the image credited by R. Hurt/Caltech-JPL, NASA, and ESA)

宇宙の相転移では、『宇宙ひも』と呼ばれる磁場の非常に細いチューブが作り出された可能性があります」とカリフォルニア大学バークレー校教授を兼ねる村山 斉 Kavli IPMU 主任研究者は述べます。研究グループは、宇宙初期の相転移で出来た「宇宙ひも」が、自ら小さくなろうとする際に重力波が生じると考えました。そして、この重力波は、欧州で計画されている LISA や BBO、日本で計画されている DECIGO といった、将来の宇宙重力波望遠鏡によって検出できる可能性がある」と指摘しました。

宇宙ひもによって生じた重力波観測の可能性

「重力波による近年の発見は、宇宙の歴史を更に遡る新たな機会をもたらしました。重力は宇宙初めから隔々まで伝播しているからです。初期宇宙が、現在の宇宙で最も熱い場所より 1 兆倍から 1000 兆倍も熱かった場合には、ニュートリノは物質を生き残らせるのに十分な振る舞いをした可能性があります」とカナダの国立粒子加速器センター (TRIUMF) Graham White 研究員は述べます。

さらに、Kavli IPMU 客員科学的研究員を兼ねる高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の郡和範准教授は下記のように述べています。

「『宇宙ひも』からの重力波は、ブラックホールの合体といった天体物理学的に生じる重力波とは明らかに異なるスペクトルを持ちます。そのため、重力波源が確かに宇宙ひもであるとはっきり確信することは十分可能です」

研究グループが示すように、相転移で生じた「宇宙ひも」からの重力波が検出されれば、相転移がニュートリノに物質と反物質の入れ替えを可能とさせたとするレプトジェネシス機構の実証に繋がり、この宇宙が物質優勢になった謎の解明の一步になると期待されます。更には、レプトジェネシス機構の実証に加えて、ニュートリノが他の素粒子と比較して非常に小さな質量を持つ謎の解明にもつながると研究グループは指摘します。村山 斉 Kavli IPMU 主任研究者は、「科学の究極の問いである『なぜ私たちが存在するのか?』について知ることができたら本当に面白いと思います」と述べています。

ICRR の平松研究員も成果に貢献 「宇宙ひもに当てられた新しい光」

宇宙初期の「宇宙ひも」から暗黒物質候補のアクシオンが生成される過程についての理論的研究を行った経験がある宇宙線研究所の平松尚志特任研究員 (ICRR フェロー) は、今回の成果に「宇宙研究」のサイドから貢献しました。

平松研究員によると、「宇宙ひも」は、宇宙の時空が相転移する際、その位相的欠陥に沿って形成される特殊な領域のことで、宇宙の大規模構造の原因となった可能性やダークマターの候補と考えられるなど、1960 年代から多くの研究がされて来ましたが、しかし、NASA の宇宙探査機 WMAP などによる宇宙背景放射の観測で、温度揺らぎについての詳しい解析結果が得られ、宇宙初期の量子ゆらぎの関与が決定的となってからは、「宇宙ひも」は存在するとしても影響は少ないと見積もられるようになり、あまり光が当たることはなかったといいます。

「それが物質優勢の宇宙を実証するモデルの中で重要な役割を果たし、『宇宙ひも』による重力波で将来実証できるかも知れない、という形で再び光が当たるとは、とても感慨深い気持ちです。今回は妥当性の議論だけだったので、半解析的な手法による検証しか行っていないですが、スーパーコンピュータによる 3 次元の場の理論のシミュレーションが実現すれば、観測すべき重力波のスペクトルがさらに絞り込まれることでしょう」

また、宇宙誕生から現在に至るまで、複数回の相転移を経ていると考えられ、その度に「宇宙ひも」が出現していた可能性もあるといい、「一度は廃れたと言ってもいい『宇宙ひも』の研究も、粒子加速器では到達し得ない超高エネルギーの物理を探索するという新たな役割が与えられたということかもしれません」と将来的な研究の可能性についても言及しました。

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)

東京大学宇宙線研究所 (ICRR)

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

【論文情報】

雑誌名: Physical Review Letters

論文タイトル: Testing Seesaw and Leptogenesis with Gravitational Waves

著者: Jeff A. Dror (1, 2), Takashi Hiramatsu (3), Kazunori Kohri (4, 5, 6), Hitoshi Murayama (1, 6, 2, 7), and Graham White (8)

著者所属:

1. Department of Physics, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

2. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

3. Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa 277-8582, Japan

4. Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

5. The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

6. Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), University of Tokyo, Kashiwa 277-8583, Japan

7. Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Notkestrasse 85, 22607 Hamburg, Germany

8. TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, BC V6T 2A3, Canada

DOI 番号: (2020 年 1 月 28 日掲載)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.041804>

プレプリント: <https://arxiv.org/abs/1908.03227>



Press Release 2019.12.16

宇宙初期の巨大炭素ガス雲の発見 ～アルマ望遠鏡で捉えた宇宙最初の環境汚染～ 東京大学宇宙線研究所などの研究チーム



図 1: 観測結果をもとに描いた、銀河を大きく取り囲む炭素ガスの想像図。中心部分に青白く見える星の分布に比べておよそ 5 倍の広さに炭素ガスが分布しています。Credit: 国立天文台

デンマーク・コペンハーゲン大学の藤本征史ドーン・フェロー（2019 年 3 月まで東京大学宇宙線研究所の博士課程に在学）を中心とする国際研究チーム（注 1）は、アルマ望遠鏡を使った観測によって、宇宙初期にある銀河の周囲に半径約 3 万光年におよぶ巨大な炭素ガス雲があることを世界で初めて発見しました（図 2）。炭素ガスは、宇宙が誕生した時には存在していなかったと考えられています。この発見から、宇宙初期に生まれた星が核融合反応で炭素を作り、これが銀河周辺にばらまかれて巨大な炭素ガス雲を形成していたことが分かりました。これまで、国内外の研究グループによって作られた理論モデルでは、このように巨大な炭素ガス雲の存在は予言されていないことから、従来の宇宙進化の考え方に一石を投じる発見になりました。本研究成果は、米国の天体物理学専門誌『アストロフィジカル・ジャーナル』電子版に 12 月 16 日付けで掲載されました。

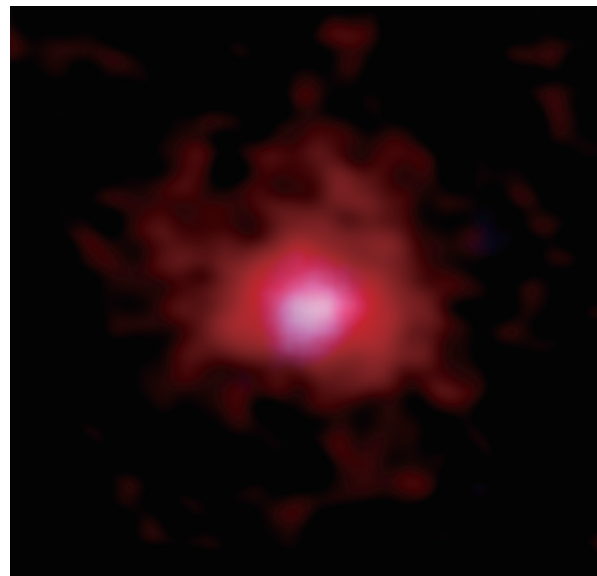
ビッグバン直後の宇宙には水素とわずかなヘリウムしか存在していませんでした。一方で現在の宇宙には、地球の大気や生命の材料にもなっている、炭素や酸素などの重元素（注 2）が広く存在していることが知られています。宇宙で星が生まれると、星の内部で核融合反応がおこ

り、水素などから重元素が生み出されたと考えられています。しかし、このような重元素がいつどのように宇宙に広がっていったのか、まだ分かっていません。

こうした重元素のガスには、特定の波長の電波を強く放つものが多く存在します。そこで天文学者たちは、電波の波長帯で高い感度を誇るアルマ望遠鏡を用いて、宇宙初期に生まれた銀河に対して、重元素ガスの観測をこれまで続けてきました。その結果、宇宙誕生から数億年後の銀河内部に、すでに炭素や酸素といった重元素が存在していることをつぎとめていました（注 3）。しかし従来の観測では、感度の限界のために、宇宙初期の銀河の外にどれほど重元素が広がっているのかを調べることはできませんでした。

炭素ガスを捉えたデータの重ね合わせで 20 倍の観測時間に相当する高感度データ取得

そこで研究チームは、電波の波長帯で最も明るい輝線を放つ炭素ガスの光に注目しました。国際研究チームをリードした藤本征史ドーン・フェローは次のように話します。「データアーカイブで公開されていたアルマ望遠鏡のデータをくまなく調べ、宇宙誕生後、約 7-11 億年ごろに存在する初期銀河の炭素ガスをとらえたデータを全て集めてきました。その結果、複数のデータを重ね合わせる処理を応用することで、従来の約 20 倍の観測時間に匹敵する極めて高感度のデータを得ました。これは、人類がこれまでに手にした炭素輝線に対するデータの中で、最も感度が高いものです」



世界最高感度のデータによって研究チームは、従来の観測ではとてとらえることのできなかった微弱な炭素ガスのシグナルを検出することに成功しました。「初期銀河の周りの漆黒の空間に、約3万光年にわたってうっすらと広がった炭素ガス雲が見えてきました。ハッブル望遠鏡なども駆使して注意深く解析を続けたところ、この炭素ガス雲は、銀河中の星の分布よりも約5倍も広がっている巨大な構造であることがわかってきました」と語るのは、研究チームメンバーの東京大学宇宙線研究所／国立天文台、大内正己教授です。

宇宙初期の理論モデルと不一致 新しい物理機構の存在を要請

どうして巨大な炭素ガス雲が形成されるのでしょうか。研究チームメンバーのドイツ・欧州南天天文台 ロブ・アイビソン科学部門長も熱を込めて語ります。「星が死を迎えると、星内部で形成された炭素が、超新星爆発によって周囲にばらまかれていきます。さらに爆発時のエネルギー、銀河の中心に位置する巨大ブラックホールがもたらす高速のガス流や強力な光によって、星の周囲にとどまらず、銀河の外、やがては宇宙全体に炭素が広がっていったのだと考えられます。まさに宇宙最初の環境汚染(注4)の現場をとらえたのです」さらに研究チームはこのような環境汚染について、国内外の最新の理論モデルを用いて検証しました。研究チームのメンバーであるイタリア・ピサ国立大学 アンドレア・フェラーラ教授は次のように語ります。「複数のモデルと比較しましたが、いずれも観測結果が示す、巨大な炭素ガス雲のような十分な広がりには再現されませんでした。宇宙初期における巨大な炭素ガス雲の発見は、これまで理論モデルで欠けていた新しい物理機構を要請する結果となりました」

同じく研究チームの大阪大学 長峯健太郎教授も続けて語ります。「宇宙初期にできた銀河では、我々が予想していたよりもはるかに多くのガスが、超新星爆発やブラック

図2: 今回発見された巨大炭素ガス雲の擬似カラー画像。アルマ望遠鏡とハッブル望遠鏡による2色の観測データを合成することで、画像に色をつけています。青色の部分が星からの光、赤色が炭素ガスの光で、それぞれ複数のデータを重ね合わせて得られた平均的な描像を見えています。画像全体の視野は 3.8 秒角 x 3.8 秒角 (128 億光年かなたの宇宙における実スケールで 7 万光年 x 7 万光年) に相当します。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope, Fujimoto et al.

ホールのエネルギーによって、宇宙空間に吹き飛ばされていたのかもしれません」

都内で開かれた記者会見で説明する藤本さん =2019 年 12 月



研究チームは今後、アルマ望遠鏡を含む世界各国の望遠鏡を用いた詳細観測によって、宇宙初期において巨大な炭素ガス雲が形成される物理機構の解明を目指しています。

【用語解説】

(注1) 研究チーム

本研究を行ったチームのメンバーは以下の通りです。藤本征史(東京大学／国立天文台／早稲田大学、現在の所属はコペンハーゲン大学)、大内正己(東京大学宇宙線研究所教授／国立天文台科学研究部教授)、Andrea Ferrara (ピサ国立大学)、Andrea Pallottini (ピサ国立大学)、Rob. J. Ivison (欧州南天天文台)、Christopher Behrens (ピサ国立大学)、Simona Gallerani (ピサ国立大学)、荒田翔平(大阪大学大学院理学研究科博士後期課程)、矢島秀伸(筑波大学計算科学研究センター准教授)、長峯健太郎(大阪大学大学院理学研究科教授／東京大学客員上級科学研究員、Kavli-IPMU／ネバダ大学客員教授)

(注2) 重元素

天文学では、水素とヘリウムよりも重い元素を、すべてまとめて重元素と呼びます。

(注3) アルマ望遠鏡の成果

例えば、2019 年 6 月 18 日付アルマ望遠鏡プレスリリース「アルマ望遠鏡、観測史上最遠の合体銀河の証拠をとらえた」では、宇宙誕生後約 7 億年後の銀河に炭素や酸素が検出されました。

(注4) 汚染

天文学では、重元素の拡散によってガス中の重元素比率が上昇することを、汚染と呼びます。

【論文情報】

雑誌名: *Astrophysical Journal* (12 月 16 日に電子版掲載)

論文タイトル: "First Identification of 10 kpc [CII] Halo around Star-Forming Galaxies at $z=5-7$ "

著者: Seiji Fujimoto, Masami Ouchi, Andrea Ferrara, Andrea Pallottini, R. J. Ivison, Christoph Behrens, Simona Gallerani, Shohei Arata, Hidenobu Yajima, Kentaro Nagamine

DOI 番号: 10.3847/1538-4357/ab480f

アブストラクト URL: <https://arxiv.org/abs/1902.06760>



※ 本研究は、文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム、科学研究補助金(番号 15H02064, 16J02344, 17H01110, 17H01111, 17H01114)、国立天文台 ALMA 共同科学研究事業(2017-06B)、日本天文学会早川幸男基金によるサポートを受けています。

Reports

高エネルギー宇宙線研究部門 川田和正助教 「チベットから見る宇宙、そしてアルパカ・・・」

チベット実験、ALPACA 実験、テレスコープアレイ実験という、宇宙線研究所高エネルギー宇宙線研究部門の三つのグループに所属する川田和正助教のサイエンスカフェ「チベットから見る宇宙、そしてアルパカ・・・」が2月11日、西東京市の多摩六都科学館の科学学習室で開かれ、応募して当選した40人の一般市民が参加しました。

多摩六都科学館でのサイエンスカフェは、同館と宇宙線研究所が2015年に締結した広報・啓発活動に関する相互協定に基づくもので、研究現場で得た知見を広く市民に提供し、科学文化の発展に寄与することなどを目的としており、1年に2回ほど開催されています。

川田助教は、宇宙線について、「宇宙からやってくる素粒子のことで、陽子、電子/陽電子、ガンマ線、ニュートリノなどがあります。1912年にオーストリア出身の科学者ヘスが初めて見つけ、ノーベル賞を獲得しました」と解説し、霧箱という道具を使っ

て宇宙線を観察する方法について説明しました。その中で、ドライアイスで冷やして過飽和になったエタノール中を荷電粒子が通過すると、エタノールの分子が電離し、周りの分子を引きつけ、通り道に白い筋が見えると説明し、「見える太さや長さ、曲がり具合によって、宇宙線の種類を判別できます」と述べました。

ここで、研究仲間でもある日本大学の塩見昌司准教授が説明の助っ人役として登場。

自らの大学で所有する大型の霧箱(40センチ四方)を使い、宇宙線のほか、小さな鉱石から出る β 線、ランタンの芯に塗布されたトリウムが崩壊して生じた α 線などを可視化する実験を行い、「鉱石の中にはウランとか重い元素が入っていますが、これらが、不安定な状態から安定な状態になろうとして放射線を出し、それがこんな形で見えています」などと解説しました。

川田助教は、標高4300メートルのチベット高原に、シンチレーション検出器を等間隔に敷き詰めたチベット実験で、宇宙線が

エネルギー領域のガンマ線天文学を開拓する

ものです」。さらに、南米のポリビアにも、チベットとほぼ同規模のALPACA実験を準備中であるとし、「南半球にあって有利なことは、超巨大ブラックホールがあるとされる天の川銀河の中心を視野に含められることです。ここにも高いエネルギーの宇宙線の発生源が存在する可能性があり、観測の結果が得られるのが大変楽しみです」と述べました。

加えて、アルパカと聞いて動物のアルパカを思い浮かべた小学生などに配慮し、「実験装置のあるチャカルタヤ山頂には、アルパカもたくさんいますが、リヤマというアルパカとよく似た動物もいます。両者の見分け方はアルパカが可愛くフサフサな顔をしているのに対し、リヤマは耳が大きくてちょっとブサイクなことですね」などと語り、会場に集まった小中学生たちを笑わせていました。

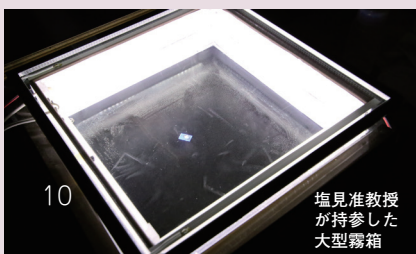
大気と衝突して作る空気シャワーを捉え、そのエネルギー量や到来方向を読み取る方法について説明。さらに、太陽が作る強い磁場の様子を知るために、宇宙線が太陽に遮られて作る影を利用する研究についても紹介し、「地球圏にも影響を与えるコロナ質量放出(CME)は4日で地球に到着しますが、宇宙線なら8分で届きます。太陽の影をモニターしていれば、太陽から地球に向かうCME現象を事前知ることができ、将来は宇宙天気予報にも使えるかも知れません」と語りました。

また、かに星雲方向から24個の100兆電子ボルト(TeV)以上のガンマ線とみられる信号を観測したという最近のニュースにも触れ、「最大450TeVというエネルギーは、可視光のエネルギーのおよそ100兆倍で、他の天体も含め史上最大です。新しい

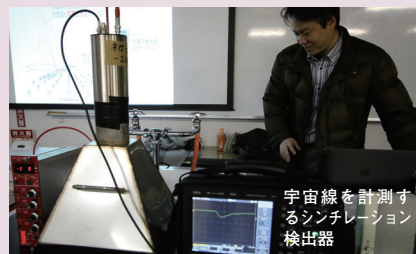


質問に答える川田助教

宇宙からやってくる宇宙線を捉える



塩見昌司准教授が持参した大型霧箱



宇宙線を計測するシンチレーション検出器



ニュートリノ実験について講演する関谷准教授

秋の合同一般講演会 関谷洋之准教授らの 講演に約 420 人

宇宙線研究所 (ICRR) がカブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) と合同で開催する秋の一般講演会「宇宙探索最前線～ニュートリノ実験×ダークマター探索理論」が12月8日、東京大学本郷キャンパスの安田講堂で開かれ、出席した約420人が登壇した2人の講演や対談などを楽しみました。

宇宙線研究所から登壇したのは、同附属神岡宇宙素粒子研究施設でスーパーカミオカンデなど地下実験に関わる研

究の一環として、陽子と反応して中性子を出す反電子ニュートリノに注目したことに触れ、「Gdは中性子の吸収しやすさが水の100万倍もあり、しかも中性子を吸うとガンマ線を出し、4倍近く明るいチェレンコフ光を出すので、反電子ニュートリノからは陽電子とガンマ線がそれぞれ出すチェレンコフ光を捉えることができ、超新星背景ニュートリノを検出することができるのです」と語りました。

関谷准教授はこの後、IPMU側の講演者である Thomas Melia 特任助教と対談。さらに、会場から付箋に書かれて寄せられた「Gdを均一に混ぜる仕組みは?」「超新星背景

Super-Kamiokande アップグレード 超新星からのニュートリノの観測を目指す

究を行っている関谷洋之准教授です。

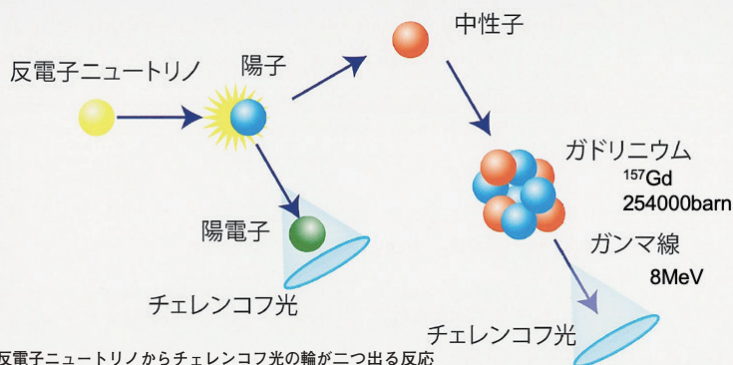
関谷准教授は「Super-Kamiokande アップグレード：地下1000mで宇宙を探る」と題した講演の中で、スーパーカミオカンデについて「もしも今、銀河系内で超新星爆発が起きれば、星が光輝く前に出されるニュートリノを観測し、世界中の望遠鏡にアラートを出して観測を呼びかけることができる世界で唯一無二の検出器です」と紹介。さらに、過去に起きた超新星爆発によって出され、宇宙に蓄積されていると理論で予測される“超新星背景ニュートリノ”について、「これを検出できれば、①超新星爆発の頻度、②星が生まれる割合、③生まれる星の大きさの分布—などが分かり、元素の周期表に出てくるたくさんの物質がどのようにできたのかを検証するのに役立ちます」と語り、現在計画中のスーパーカミオカンデ—ガドリニウム (Gd) プロジェクトについて言及しました。

超新星背景ニュートリノは現在も手のひらを1秒間に数千個通り抜けていると予測されていますが、同じエネルギー

のニュートリノの年間検出数の予測は?」「神岡の大学院生はどんな風に過ごしているのか?」「ニュートリノが通り抜けれられないものは?」などの質問に、一つひとつ丁寧に回答していました。



Kavli IPMU のトム・メリア特任助教との対談



ホワイトボードに貼られた付箋にたくさんの質問が書き込まれる

Topics

2019年12月3日

アジア、南米の高校生らにミニ講義

中国、ウズベキスタン、ペルー、チリからの高校生ら60人が、宇宙線研究所を訪れ、チュレンコフ宇宙ガンマ線グループのミニ講義を受講しました。

高校生らは、科学技術振興機構(JST)のさくらサイエンスプラン(日本・アジア青少年サイエンス交流事業)の一端で来日しました。

一行は宇宙線研6階の大セミナー室で、同グループのDaniela Hadasch 特任助教から、宇宙からやってくるガンマ線がどのようなものが、地上の望遠鏡でどのように観測するのか、また、完成したばかりのCTA 大口径望遠鏡の機能について講義を受けました。その後、大セミナー室に用意されたCTA の高精度分割鏡や望遠鏡のカメラにあたるクラスターモジュール、宇宙線が地球の大気にぶつかって発生するチェレンコフ光の様子をプロジェクターの光を使って再現した見学の装置などを見学。参加者たちは、Marcel Strzys 研究員や大学院生から丁寧な説明を受け、とても興味を持った様子で、熱心に質問していました。

2019年12月12日

梶田所長 日本学士院会員に選出

日本学士院は、第1134回総会を開催し、梶田隆章所長ら新たに7人を日本学士院会員として選定しました。

日本学士院は、学術上功績顕著な科学者を優遇するための機関として文部科学省が設置し、学術の発展に寄与するために必要な事業を行うことを目的としています。明治12年に福沢諭吉を初代会長として創設された「東京学士会院」が



前身で、140年の歴史を持ち、学術的な業績をもとに選定された定員150名の会員により組織されています。

2020年1月9日

2019年高被引用論文著者に大内教授

論文検索サイトのWeb of Scienceなどを展開するクラリベイト・アナリティクス社が発表した「Highly Cited Researchers 2019 (2019年の高被引用論文著者)」に、宇宙線研究所から観測的宇宙論グループの大内正己教授が初



めて選ばれ、その表彰式が行われました。

授賞式は国立天文台で行われ、同社の渡辺麻子・学術情報事業部長が大内教授に表彰状を授与しました＝写真。

表彰を受けた大内教授は「引用数が世界のトップ1%に入る論文を見ると、一

つ、二つを除き、すべて、すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡を使った研究です。国立天文台や宇宙線研の皆さんの支えがあってこそこの成果であり、大変感謝しています。今後も引き続き研究に精進していくとともに、次世代の研究者を支えて、来年度以降は私ばかりではなく、新たな研究者の表彰者が出るよう努力していきたいと思っています」と抱負を述べました。

2020年1月27日

北村崇名誉教授が逝去

北村崇名誉教授(94歳)が2019年12月2日、ご逝去されました。

2020年2月21日

修士・博士研究発表会を開催

宇宙線研究所の大学院生が、相互に研究内容を知り、交流を深めるための修士・博士研究発表会が、東京大学柏キャンパスの宇宙線研究所で開催されました。

発表会の冒頭、梶田所長が「お互いの研究について知るよい機会ですので、ぜひこの機会を利用して交流ください」とあいさつ。続いて、指導教員らが見守る中、修士・博士課程の学生23人が、日本語と英語を選択して口頭発表(16人が英語)を行い、5人がポスターセッションに挑みました。それぞれの発表ごとに質問が出され、学生、教員も含めて議論が行われました。終了後には、審査が行われ、修士、修士、ポスターの部門ごとに一人ずつ、梶田所長から所長賞が贈られました。



2020年2月12日

ハイパーカミオカンデ計画の開始について

ハイパーカミオカンデ計画は、日本をホスト国とする国際協力科学事業であり、スーパーカミオカンデの8.4倍の有効体積を持つ水槽と超高感度光センサーからなる超大型地下実験装置とJ-PARCの高度化により、宇宙の物質の起源と素粒子の統一理論の解明を目指すものです。

この度、ハイパーカミオカンデ計画の初年

度予算35億円を含む2019年度補正予算が成立し、ハイパーカミオカンデ計画を正式に開始する運びとなりました。

日本の分担は、ハイパーカミオカンデ検出器の地下空洞掘削、水槽と構造体、内水槽光センサーの半数、水循環システムの主要部分、初段データ解析システム、J-PARC 加速器およびビームラインのアップグレード、前置検出器のための施設整備になります。一方海外参加国の分担は、光センサーの防爆カバーと集光システム、内水槽光センサーの残り半分、外水槽光センサー、データ読み出し回路、検出器校正システム、前置検出器等となります。今後建設を着実に進め、2027年の実験開始を目指します。海外パートナーと協力し、ニュートリノ物理学とニュートリノ天文学の発展に資したいと存じます。

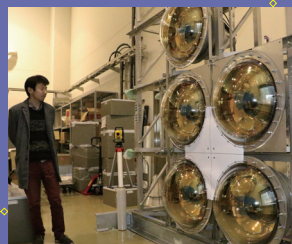
東京大学
高エネルギー加速器研究機構
J-PARC センター

ハイパーカミオカンデの実物大フレームを用いた試験が1月中旬から、東京大学柏キャンパスの宇宙線研究所で始まりました。

北棟1階の共同利用実験室では、ハイパーカミオカンデに用いられる20インチの光電子増倍管(PMT)を最大12個、取り付け可能なフレーム(ステンレス製:縦280センチ、横210センチ、奥行き60センチ)が組み立てられ、天井クレーンを使って鋼材製の架台に設置。実際にPMT 5つが取り付けられました。

柏キャンパス PMT 取り付け用の試験フレーム設置

ハイパーカミオカンデは17カ国に及ぶ国際共同研究で、PMTや防爆ケースなど一部の実験機材を日本以外の国から調達する計画があり、フレームを用いた試験は、様々な実験機材をどのようにに取り付けるのか、また安定的に設置可能かどうか、などを事前に確認するために行われます。



Information

【所長賞・博士部門】 深見哲志さん

"Study of the very-high-energy gamma ray emission from the gamma ray bursts"

【所長賞・修士部門】 加藤勢さん

"Evaluation of sensitivity of the ALPAQUITA experiment to southern γ -ray sources"

【所長賞・ポスター部門】 山田智宏さん

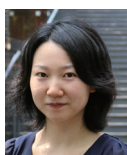
"Reduction of suspension control noise for main optics in KAGRA"

2020年2月25日

武蔵野美術大の宮原ひろ子准教授 第一回米沢富美子記念賞を受賞

日本物理学会が女性科学者・米沢富美

子氏の業績を記念し、物理学分野における女性会員の活動を讃え、奨励するために創設した「米沢富美子記念賞」の第一回受賞者に、武蔵野美術大の宮原ひろ子准教授ら5人が選ばれました。



宮原准教授は、名古屋大学大学院理学研究科・博士課程（後期課程）を修了後、学振研究員などを経て、2008年から4年半、宇宙線研究所の特任助教を務め、2013年に武蔵野美術大学造形学部教養文化・学芸員課程研究室の教員に着任。専門の太陽物理学、宇宙線物理学、宇宙気候学の研究を続ける一方、宇宙線研究所の共同利用研究課題選択委員を務めています。

日本物理学会が、宮原准教授の受賞理由に掲げた業績は、「太陽活動極小期における宇宙線強度変動の研究および過去の宇宙線変動復元のための新手法開拓」です。具体的には、樹木年輪や氷床コアに含まれる宇宙線生成核種を高精度かつ高時間分解能で分析することにより、宇宙線の変動特性やそれを決定付ける太陽活動の研究を行ってきたこと。また、宇宙線が地球環境に及ぼす影響について重要な手掛かりを得たこと。さらに、一般向けの著書「地球の変動はどこまで宇宙で解明できるか：太陽活動から読み解く地球の過去・現在・未来」（講談社科学出版賞）を執筆するなど、アウトリーチ活動に取り組んできたことも挙げています。

宮原准教授は今回の受賞について、「この度は、このような身に余る賞を頂き、大変光栄に存じております。受賞対象となった研究成果の1つは、宇宙線研究所にいたときのものです。研究をサポートしてくださった梶田所長はじめ、所の先生方に、心より御礼申し上げます」とコメントを寄せました。

人事異動

発令日	氏名	異動内容	職
2019.11.10	長井 遼	退職	特任研究員（700 ¹ 外研究員）
2019.11.14	PANEQUE, David	任期満了	特任教授（外国人客員）
2019.11.29	PLAYFER, Stephen Michael	任期満了	特任教授（外国人客員）
2019.11.30	山本 尚弘	退職	特任研究員（700 ¹ 外研究員）
2019.12. 1	山本 尚弘	採用	特任助教
2019.12. 1	MARQUEZ, Paniagua Patricia	受入開始	協力研究員
2019.12.20	高嶋 紀子	退職	用務補佐員
2020. 1. 1	衣川 智弥	採用	助教
2020. 1.28	MORALEJO, Abelardo	採用	特任准教授（客員Ⅲ種）
2020. 1.31	市村 晃一	退職	特任助教
2020. 1.31	牛場 崇文	退職	特任助教
2020. 1.31	山下 陽子	退職	用務補佐員
2020. 2. 1	竹田 敦	昇任	准教授
2020. 2. 1	牛場 崇文	採用	助教
2020. 2. 1	大林 英子	採用	用務補佐員
2020. 2. 1	大平 三千子	採用	用務補佐員
2020. 2.19	Yuma Suraphong	受入開始	協力研究員

(R1.11.10 ~ R2.2.19)

ICRR Seminar

2019.12.6

Dr. Andrii Neronov (University of Geneva)
"Galactic diffuse gamma-ray and neutrino emission in multi-TeV energy range"

2019.12.26

Dr. Romain Gaior (LPNHE, Sorbonne Université)
"Dark matter searches with the DAMIC detector"

2020.2.10

Dr. Guillermo D. Megias (ICRR)
"The relevance of neutrino-nucleus interaction models in T2K and Super-Kamiokande" (ICRR-IPMU joint seminar)

2020.2.12

Dr. Ellis Owen (National Tsing Hua University)
"Star-forming galaxies through cosmic time: the impacts and signatures of cosmic rays"

2020.2.17

Dr. Sunil Gupta (Tata Institute of Fundamental Research)
"A study of geomagnetic storms and thunderstorms by GRAPES-3 muon telescope"

ICRR NEWS No.107 2020 WINTER & SPRING

編集・発行：東京大学宇宙線研究所広報室

📍 住所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

☎ TEL 04-7136-3102（代表）

✉ E-mail icrr-pr@icrr.u-tokyo.ac.jp

🌐 URL www.icrr.u-tokyo.ac.jp



東京大学
宇宙線研究所
Institute for Cosmic Ray Research

ICRR NEWS No.107 2020 WINTER & SPRING

編集・発行：2020年3月13日 東京大学宇宙線研究所広報室