

向かって左から 奥村暁 講師、小林雅俊 特任助教*、毛受弘彰 助教、田島宏康 教授、風間慎吾 准教授*、高橋光成 特任助教、山岡和貴 特任准教授、三宅美沙 准教授

*素粒子宇宙起源研究所 所属

宇宙線物理学は、宇宙物理、素粒子・原子核物理、地球物理の3分野にまたがる学問です。宇宙の極限環境での物理、宇宙線に影響を受ける地球環境を研究の対象とします。

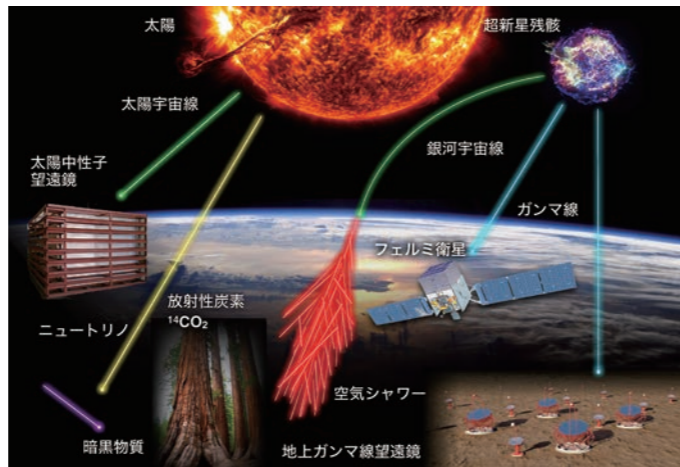
宇宙線は英語で cosmic rays と言われます。私達の研究室の略称 CR はこの頭文字をとっています。宇宙線は、宇宙から地球に降り注いでいる放射線で、Hess は 1912 年にこれを発見し、1936 年にノーベル物理学賞を受賞しました。宇宙線の主成分は陽子であり、電子や原子核などの荷電粒子や、ガンマ線などの高エネルギー光子やニュートリノも含みます。宇宙のどこかで生まれた宇宙線は、星間磁場や太陽・地球の磁場による影響を受けながら地球へ到達します。

宇宙線の起源は完全には解明されていません。太陽中性子の観測や宇宙ガンマ線の観測により宇宙線の起源を解明し、地球近傍のプラズマや太陽の表面、あるいは超新星残骸など宇宙プラズマにおける粒子加速機構を理解することが、CR 研での研究のひとつです。

宇宙線は、かつては陽電子、中間子の発見、最近ではノーベル賞を受賞したニュートリノ振動の発見など、天然の素粒子実験の場として大きな役割を果たしてきました。CR 研では、LHC 加速器での超高エネルギー宇宙線衝突の研究や、ニュートリノ・暗黒物質の研究など、宇宙と素粒子にまたがる謎にも挑んでいます。

宇宙線は地球大気に突入して電離を起こし、また原子核反応により放射性炭素 14 などの宇宙線生成核を作り出します。宇宙線を調べることで、地球周辺の磁場の様子や変動の歴史を知ることができます。CR 研では、年輪中炭素 14 の測定などを通じて、宇宙線と太陽・地球との関わりを探っています。

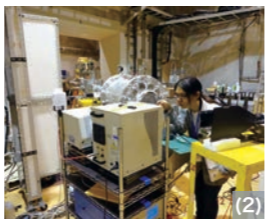
宇宙線は、ユニークな素粒子実験の場を提供し、宇宙の高エネルギー現象について情報をもたらします。また、磁場に影響される宇宙線は太陽地球環境を調べるプローブにもなります。この様に宇宙線の研究は素粒子・原子核物理、宇宙物理から地球物理まで幅の広い領域にまたがっており、我々の研究室にも様々な研究テーマがあります。



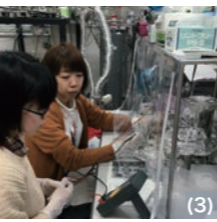
CR 研究室の仲間たち



(1)



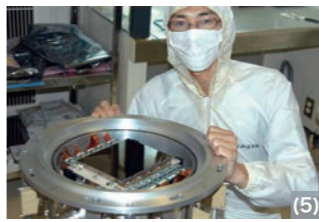
(2)



(3)



(4)



(5)

宇宙線加速機構の解明

宇宙線は、陽子・ヘリウム・鉄の原子核等が「なんらかの」加速機構で非常に高いエネルギーまで加速された荷電粒子です。その加速天体や加速機構は宇宙物理学上の大きな謎となっています。高エネルギー宇宙線やガンマ線の観測により加速天体を解明し、その加速機構を理解することが、宇宙線研究の主目的のひとつです。ガンマ線は宇宙線と星間ガスの相互作用で生成され、荷電宇宙線と異なり星間磁場で進行方向を曲げられることがありません。そのため、ガンマ線観測は宇宙線の加速現場を研究する有力な方法です。

2008 年に打ち上げられたフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による 10 億電子ボルトエネルギー帯のガンマ線観測では、得られたスペクトルの解析から W44、IC 443 などの超新星残骸での宇宙線加速の決定的な証拠をつかむことができました。CR 研では次世代のガンマ線観測装置であるチェレンコフ・テレスコプ・アレイ (CTA) の装置開発も行っています。CTA によって超新星残骸における宇宙線加速機構や、銀河系の宇宙線起源に関する研究をさらに進めていきます。

上述のような粒子加速は、宇宙のいたるところに存在するプラズマが起こす普遍的な現象で、様々な高エネルギー天体に加え、地球近傍や太陽の表面でもスケールこそ違え同様の現象が起っています。CR 研では太陽中性子を観測できる機器を搭載した超小型衛星の開発も進めています。太陽表面は我々に最も近い宇宙線源であり、太陽フレアと呼ばれる爆発現象に伴い粒子加速が起るため、この時放出される太陽中性子を測定することで、粒子加速の現場を捕らえることができます。また高エネルギーニュートリノや重力波観測とも連携した宇宙観測を発展させるため、人工衛星による低エネルギーガンマ線の観測技術の開発も進めています。



CTA 小口径望遠鏡の除幕式。
CR 研で開発した信号処理回路を採用している。

宇宙線と太陽活動との関連の研究

太陽の磁場活動は、11 年の周期変動や数十年にわたる低調期の存在など、長期的には様々な変化が知られています。また、太陽は時に超巨大な太陽面爆発を引き起こすこともあります。このような太陽の活動は、地球に到来する宇宙線強度に影響します。私達は樹齢 2000 年の屋久杉の年輪に含まれる放射性炭素 14 や、南極の氷床コアに含まれるベリリウム 10 など宇宙線生成核の濃度変化を測定し、宇宙線強度の履歴から過去の太陽活動を復元する研究を行っています。

超高エネルギー宇宙線の謎を解明する LHCf 実験

これまで最も高いエネルギーを持つ 10 の 20 乗電子ボルトの宇宙線が空気シャワーの観測から発見され、大きな謎を呼んでいます。これは人類が加速器で生成可能なエネルギーの何桁も上です。いったい宇宙のどこでこのような粒子が生まれているのでしょうか？

超高エネルギー宇宙線の観測では、宇宙線が大気中で反応して生成する 2 次粒子のシャワーを測定しています。しかし、超高エネルギーでの宇宙線の反応は実験データが無くよく分かっていません。私達は 2009 年から稼働続ける世界最高エネルギーの陽子衝突型加速器、ラージハドロンコライダー (LHC) に小さな検出器を組み込み、超高エネルギー宇宙線の反応を実験的に調べる「LHCf 実験」を推進しています。ここで得られる素粒子実験データは、宇宙線観測の精度を上げ、加速器では実現不可能なもっと高いエネルギーの現象を宇宙線によって探る糸口となるでしょう。

ニュートリノによる物質の起源の理解

「ニュートリノはなぜこんなにも軽く、またニュートリノ振動を起こすのか？」ニュートリノの持つ不思議な性質は、宇宙と物質の起源の謎に関わっていると考えられています。

ニュートリノは、ほとんど物質と反応しないため地下深くまで届きます。ニュートリノで宇宙を見れば、例えば太陽の中心で起っている核融合や銀河の中心を見通す事ができます。私達は神岡鉱山にある巨大ニュートリノ実験スーパーカミオカンデで、ニュートリノの不思議な性質を探ると共に、さらに 10 倍の大きさを持つハイパーカミオカンデ計画の実現に向けて開発研究を行っています。

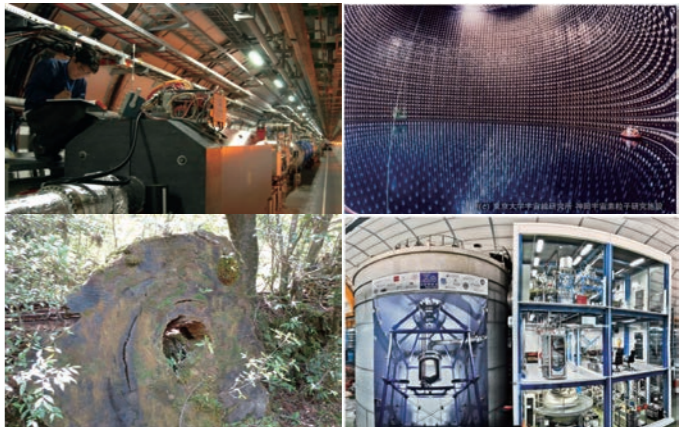
宇宙暗黒物質の探索

宇宙の全質量の大部分は素粒子標準理論では説明のつかない物質「暗黒物質」で構成されていることがわかっています。我々は、暗黒物質の正体やその背後に潜む物理の解明に向けて、宇宙観測や地下実験など様々なアプローチで暗黒物質を探索しています。

宇宙観測においては、銀河中心などで暗黒物質が対消滅した際に生成されるガンマ線やニュートリノを検出することで、暗黒物質の証拠を捉えようとしています。ガンマ線衛星・フェルミでは、通常の物質に対する暗黒物質の存在比が非常に高いと考えられている矮小楕円体銀河と呼ばれる銀河系近傍の天体からのガンマ線を探索しましたが、暗黒物質の証拠は見つけられませんでした。この結果は、陽子の 100 倍程度までの質量を持つ暗黒物質が存在しないことを示唆しています。さらに、陽子の 1 万倍程度までの質量の暗黒物質を検出する能力をもつ地上チェレンコフ望遠鏡の次世代装置 CTA の開発・建設に取り組んでいます。またスーパーカミオカンデでは、太陽や銀河中心で暗黒物質が対消滅した際に生成される高エネルギーニュートリノを探索しています。

地下実験では、液体キセノンと相互作用した際に発生する極僅かな光・電子を検出することで暗黒物質の証拠を捉えようとしています。私達は、約 9 トンの液体キセノンを用いて極低放射能検出器 XENONnT を開発し、イタリア・グランサッソー地下研究所で探索を行っています。約 3 ヶ月間の観測では、暗黒物質発見の兆候は得られませんでした。物質との相互作用の頻度に対して世界で最も厳しい制限を与えることに成功しました。現在は統計量を 20 倍に増やすべく観測を続けています。さらに約 60 トンの液体キセノンを用いた将来計画 DARWIN の実現に向けて、新たな検出器や極低放射能光センサーの開発も推進しています。

このように、私達は人工衛星、地上、地下深くから宇宙を観測し、暗黒物質の正体を明らかにしたいと考えています。



(左上) LHC 加速器で超高エネルギー宇宙線の衝突を研究する LHCf 実験。(左下) 屋久杉年輪中の放射性炭素 14 から、過去の太陽活動や宇宙線増加を研究する。(右上) 神岡地下のニュートリノ実験スーパーカミオカンデ (写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設) (右下) 次世代の暗黒物質探索実験 XENONnT (Credit: Roberto Corrieri and Patrick De Perio)

写真の説明: 左より、(1)LHCf 検出器完成を祝う CR 研メンバー、(2)雲核形成に関するビーム試験に取り組む学生、(3) 新型液体ゼノン検出器の開発に取り組む学生、(4) 放射性炭素 14 測定のため木を切る学生、(5)MOA II 専用大面積 (8 千万画素) CCD カメラと学生

Webページ: <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/>
連絡先: tajima@nagoya-u.jp (田島)

