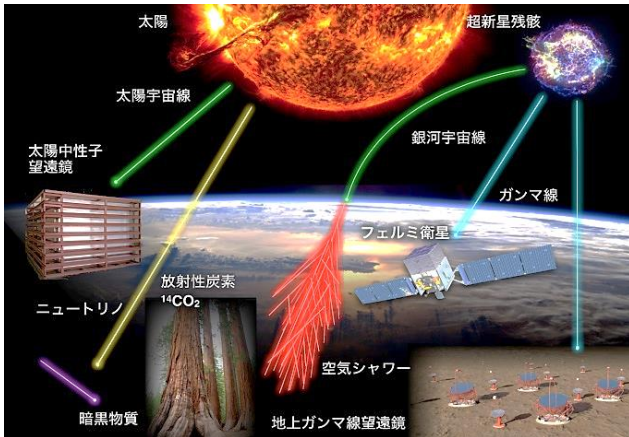


宇宙線研究部



研究テーマ・キーワード

- 宇宙線の加速機構とその伝搬の解明
 - ・宇宙ガンマ線観測
 - ・太陽中性子観測
- 宇宙線と地球との相互作用
 - ・超高エネルギー宇宙線の核相互作用の研究
 - ・宇宙線生成核種による過去の宇宙線変動の解明
- 宇宙線による宇宙素粒子物理学
 - ・暗黒物質・ニュートリノの研究
- 広視野望遠鏡による重力マイクロレンズ観測

宇宙線は宇宙から地球に降り注いでいる自然の放射線である。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、ガンマ線などの高エネルギー光子やニュートリノも含む。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する。宇宙線研究部では、フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡（フェルミ衛星）やチェレンコフ望遠鏡アレイ（Cherenkov Telescope Array: CTA）実験による宇宙ガンマ線の観測、また世界7ヶ所の高山に設置した太陽中性子観測網により、宇宙線の起源と宇宙プラズマに普遍的な粒子加速のメカニズムの解明を進めている。

宇宙線はまた、地上の実験では到達できない超高エネルギーの現象や未知の素粒子についてヒントを与えてくれる天然の素粒子実験場である。宇宙線研究部では、超高エネルギー宇宙線が大気原子核と衝突して起こす原子核反応を検証するため、Large Hadron Collider (LHC) や Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) などの衝突型加速器を用いた LHC forward (LHCf) 実験、RHIC forward (RHICf) 実験を行い、宇宙線の空気シャワー現象の解明を進めている。また、岐阜県神岡の地下においてスーパーカミオカンデによるニュートリノの研究や、将来計画のハイパーカミオカンデを推進するとともに、液体キセノンを用いた神岡地下での XMASS 実験や、イタリアのグラン・サッソ国立研究所での XENONnT 実験で、宇宙暗黒物質の直接検出に挑んでいる。

宇宙線は地球大気に突入して電離を起こし、さらに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ながら、そのエネルギーを地表まで持ち込む。年輪や氷床コアに残された宇宙線生成核を調べることで、過去に行った突発的な宇宙線増加現象や、太陽や地球の磁場変動史の解明を行っている。

加えて、ニュージーランドのテカポにあるマウントジョン天文台に 1.8 m 専用広視野望遠鏡 MOA を設置して、重力マイクロレンズ現象の観測から太陽系外惑星や暗天体（いわゆる MACHO 天体）の探索も行うとともに、広い視野を生かした重力波発生天体やガンマ線バースト、超新星爆発由来のニュートリノ検出に対応する天体の探索も行っている。

2018 年度の主な活動

ガンマ線観測による宇宙ガンマ線源の探求

宇宙線は、暗黒物質の相互作用や宇宙線と星間ガスの相互作用によって生成されると考えられているため、宇宙線・星間ガスの分布や性質の研究や暗黒物質探査に適している。

我々は、フェルミ衛星のガンマ線観測データの画像復元技術をこれまで開発し、銀河面からの拡散ガンマ線背景放射を考慮することで改善に成功した。これにより微弱なガンマ線天体の画像解析を行うことが可能になり、この

技術を銀河中心領域に用いることで、これまで知られていなかったガンマ線天体候補を新たに発見した。これは銀河中心近傍における暗黒物質探査におけるバックグラウンドを解決する第一歩である。我々の画像復元技術を超新星残骸 RX J1713.7-3946 に適用したところ、より高いエネルギーのガンマ線画像とは若干異なることが判明し、これらの結果を、フェルミ・シンポジウム 2018 において発表した。

並行して、フェルミ衛星より高いエネルギーのガンマ線観測のため、次世代ガンマ線観測天文台 CTA の開発も進めている。その望遠鏡デザインの一つである Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT) に使用するシリコン光電子増倍素子 (SiPM) の開発を担当している。我々は、異なる構造、大きさを持つ SiPM の特性を系統的に測定し、その結果に基づいて仕様を最終決定した。また SiPM の増幅率の較正方法や増倍率の温度依存性を補償する方法を開発した。

さらに我々は、CTA の中口径望遠鏡に採用される予定となっている光電子増倍管 (PMT) を SiPM で代替する可能性を調査した。中口径望遠鏡に要求される検出器面積を考慮すると、費用的に有利であった PMT が当初は採用された。しかし最近では SiPM の費用は PMT と同等まで下がってきたため、月光下でも使用可能な SiPM は魅力的な選択肢となってきた。月光下でも観測が可能となると、中口径望遠鏡の観測時間を 2 倍にできる可能性がある。SiPM と PMT の光検出効率の波長依存性が異なることを考慮したシミュレーションでは、両者のチェレンコフ光の有効検出効率はほぼ同等である結果を得ている。現在 SiPM や PMT の光検出効率の角度・波長依存性を測定し、シミュレーションに反映しているところである。

そのほか、我々のグループは CTA の Schwarzschild-Couder Telescope (SCT) の信号処理系や、大口径望遠鏡の光検出器用の集光装置の開発にも貢献している。SCT や大口径望遠鏡の試作機を製作し (右図参照)、宇宙線の相互作用によって生成された空気シャワーに起因するチェレンコフ光の画像を取得することに成功した。



2019年1月17日に開かれた、SCT 試作機の完成記念式典
(図提供: Deivid Ribeiro, Columbia University)。

太陽中性子望遠鏡による太陽高エネルギー粒子加速機構の解明

宇宙線の起源を解明するため、太陽での高エネルギー粒子加速機構の解明を目標の一つとして研究を進めている。太陽での粒子加速の理解には、太陽表面におけるその発生時刻と継続時間を知ることが重要である。加速されたイオンと太陽大気との相互作用により、太陽中性子は生成される。この太陽中性子の観測を本研究所では行なっている。中性子は惑星間空間磁場によって進行方向を曲げられないため、太陽における高エネルギー粒子の加速機構の解明には、加速された粒子の観測よりも適していると考えられる。中性子の発生時刻は中性子のエネルギーによって決定できる。100 MeV 以上のエネルギーを持つ太陽中性子を検出するため、本研究所では 24 時間体制で稼働する太陽中性子望遠鏡の世界ネットワークを構築した。このうちスイスのゴルナーグラートでの観測は 2017 年度に終了した。またハワイのマウナケアでの観測も 2018 年度に終了した。

このネットワークに加え、新しい太陽中性子望遠鏡 SciBar Cosmic Ray Telescope (SciCRT) を、メキシコにある標高 4600 m のシェラネグラ山に、京都大学、高エネルギー加速器研究機構、メキシコ自治大学の協力を得て 2013 年に設置した。この検出器は加速器実験用途で以前に使用されたものであり、15000 本のシンチレーターを使うことで粒子の飛跡を測定し、従来の太陽中性子望遠鏡に比べて格段に高いエネルギー分解能と粒子識別能力を持つ。

モンテカルロシミュレーションによる予想では、太陽中性子の生成継続時間が既知の場合、そのエネルギースペクトルの冪指数を±0.1の精度で決定できる。また、もし±0.5の不定性を許容すれば、中性子の放射が瞬間的であったのか、もしくは5分以上継続していたのかを判別できる。この冪の不定性は、太陽表面での加速がショック加速であるか、統計加速であるのかを区別するには十分な精度である。

第24太陽活動期は2014年2月にその極大を迎えその後活動は低下した。2017年9月6日に、太陽フレアに同期して中性子イベントの頻度増加が、SciCRTで観測された。このフレアは軟X線強度で太陽フレアの規模を分類した場合に最高強度の100分の1程度の規模であり、信号の有意性も 4σ 程度であるが、現在、粒子飛跡を用いてこの信号が太陽方向から得られているのかどうかの解析を行っているところである。

本研究は、中部大学、信州大学、国立天文台、東京大学宇宙線研究所、宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所、防衛大学校、愛知工業大学、日本原子力研究開発機構などの共同研究である。

宇宙線ニュートリノと暗黒物質の研究

ニュートリノは質量をほとんど持たず、中性で弱い相互作用のみで散乱する貫通力の強い素粒子であり、太陽や地球など天体内部からの情報をもたらす。また、3種類のニュートリノが量子力学的に混合することにより、ニュートリノ振動が起こる。ニュートリノ振動の観測により、ニュートリノ質量などニュートリノの性質や、天体の物質密度などの情報を探る事ができる。宇宙空間にはこのような相互作用が弱く観測にかかりにくいニュートリノのほかに、暗黒物質素粒子 WIMP も存在すると考えられており、その初検出に向けて多くのプロジェクトが世界中で進行中である。

今年度は、SK-Gd 計画でのガドリニウム添加に向けたスーパーカミオカンデのタンク改修工事を行い、13年ぶりにタンク内に入り、光電子増倍管の取り替え作業やタンク壁の洗浄作業を行なった。注水の完了後、2019年1月からスーパーカミオカンデは観測を再開している。解析面では、ミューオンの崩壊に伴う崩壊電子の情報を使った、ミューニュートリノと反ミューニュートリノを識別する手法の開発を引き続き行なっている。また、スーパーカミオカンデの約8倍の検出器体積を持つ、次期超巨大水チェレンコフ検出装置ハイパーカミオカンデ計画において、プロジェクトと組織運営における重要メンバーの一員として重要な貢献を行なっている。

これと並行し、超低バックグラウンド液体キセノン検出器を用いた WIMP 直接探索実験である XMASS 実験を遂行してきた。本年度1月に本実験はデータ取得を完了し、液体キセノンの回収を行った。本研究の発展として、世界最大の液体キセノン暗黒物質検出器である XENONnT（2019年稼働予定）実験において、ガドリニウム水チェレンコフ検出器による中性子反同時計数装置やキセノン純度モニターの開発を行っている。また、将来のさらに大型の暗黒物質探索実験での応用を目指して、液体キセノン1相式 TPC の開発を行い、1相式としてはこれまでもっとも低いエネルギーである 13.9 keV X 線の比例蛍光の検出に成功し、電子・原子核反跳識別にも初めて成功した。

加速器を用いた宇宙線相互作用の研究

宇宙線のハドロン相互作用は宇宙線物理学の様々な側面で重要な役割を果たす。宇宙線は星間媒質と相互作用して宇宙ガンマ線やニュートリノを生成し、これら粒子を使うことで多様な宇宙線・宇宙物理学の研究が行われている。一方、地球大気中では、高エネルギー宇宙線が相互作用を繰り返すことにより「空気シャワー」と呼ばれる粒子群を生成し、これが地上から観測される。空気シャワーから元の宇宙線の情報を引き出すには、ハドロン相互作用についての精確な理解が不可欠であり、様々な加速器実験を使った研究により可能になる。たとえばスイスにある欧州原子核研究機構（CERN）の LHC や米国ブルックヘブン国立研究所にある RHIC のような衝突型ハドロン加速器は、宇宙線エネルギーにして 10^{14} から 10^{17} eV に相当するハドロン相互作用の研究の場を提供してくれる。

本年度は RHICf 実験の解析を進め、2017年に取得した衝突エネルギー0.51 TeV の偏極した陽子・陽子衝突の実

験データから、超前方中性 π 中間子生成が陽子スピンに対して非対称になることを見出した。これは、これまで予想されて来なかった新しい発見である。また2015年にLHCにおいて取得した $\sqrt{s} = 13$ TeVの陽子・陽子衝突のデータを用いて、LHCf実験とATLAS検出器の共同データ解析を進め、特に回折相互作用の研究と空気シャワー発達への影響について詳しく解析を行った。LHCf実験は2021年に計画されるLHC-RUN3でのデータ取得に向けて、特にATLAS実験のRoman Pot検出器との共同実験の議論を開始した。

宇宙線生成核種による過去の宇宙線変動の研究

地球へ降り注ぐ宇宙線は、大気と相互作用を起こして様々な二次粒子を生成する。その中でも半減期の長い宇宙線生成核種(^{14}C や ^{10}Be など)は、過去に地球へ到達した宇宙線強度の優れた指標として用いられている。我々は樹木年輪の ^{14}C 濃度や氷床コアの ^{10}Be 濃度を測定し、過去の宇宙線変動を調査している。特に、地球への宇宙線フラックスが急増するような、大規模な太陽面爆発の発生頻度を明らかにすることを目的としている。

これまでに、我々は屋久杉の ^{14}C 分析から西暦775年と西暦994年の宇宙線増加イベントを発見した。これらの発見に端を発し、さらなる宇宙線増加イベントの検出をするため、測定期間を広げた単年分解能の ^{14}C 分析が行われている。今年度は、過去3000年間のほぼすべての連続単年データを取得した。この期間に、少なくとも3つの急激な ^{14}C 濃度増加のあることが明らかになった。また、アリゾナ大学のグループとともに、米国産と国産の樹木サンプルの分析を行い、紀元前800年頃の急激な ^{14}C 濃度の上昇を検出し、原因に関する議論を行った。さらに、チューリッヒ工科大学をはじめ多くの研究者らと、775年と994年の宇宙線イベントに関して世界各地の樹木サンプルを用いた詳細な調査を行い、2つのイベントの ^{14}C 生成率やイベント発生時期、さらに ^{14}C 濃度の地域差を高い精度で明らかにした。 ^{14}C 濃度に緯度依存性(高緯度ほど ^{14}C 濃度が高くなる傾向)がみられたことから、2つのイベントを引き起こした宇宙線は荷電粒子、つまり大規模な太陽面爆発である可能性が強まった。他に、994年イベントの原因追究のため、南極ドームふじ氷床コアの ^{10}Be 濃度を測定し、グリーンランド氷床コアにみられる ^{10}Be 濃度増加と無矛盾な結果を示した。南北半球に同程度の ^{10}Be 濃度増加が検出されたことから、イベントの起源は荷電粒子(太陽起源)の可能性が高まった。

宇宙線による雲核生成実験

太陽活動と地球気候との相関機構の仮説の一つとして、銀河宇宙線による雲核生成の増加がある。この仮説を検証するため、大気反応チェンバーを用いて、放射線医学総合研究所のHIMAC加速器による高エネルギー陽子、窒素、キセノンイオン照射によって、電離密度と雲核生成効率の関係を調べてきた。この数年にわたり、この実験データの解析を入念に行った。その結果、大気内のナノメートルレベルの粒子密度は、高エネルギー重イオン粒子によって生成されたイオン密度に対応して変化し、入射イオンの違い、すなわち電離密度にはあまり依存しない可能性があることが分かった。現在これらの成果をまとめている。

広視野望遠鏡による太陽系外惑星探索と重力波対応天体探索

本年度は413の重力マイクロレンズ事象を検出し、フォローアップ観測を行う世界中のグループに、リアルタイムのアラートを発信した。複数の惑星候補イベントが発見され、これら事象の解析を現在進めている。また、2019年4月から予定されている重力波検出器の観測O3に対応して追観測を実施すべく、準備を行っている。