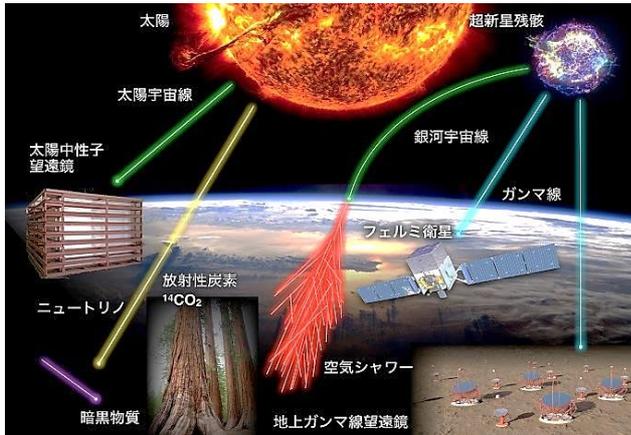


宇宙線研究部



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

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、また世界各地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。

ガンマ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。

2022 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

ガンマ線は、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。

現在、100 GeV 以下から 100 TeV 以上のエネルギーの宇宙ガンマ線を観測できる次世代ガンマ線観測天文台 CTA の開発を進めている。我々は、CTA のなかでも小口径望遠鏡に採用されたシリコン光電子増倍素子 (SiPM) の開発、調達、校正に責任を持つことになっている。小口径望遠鏡カメラの最終設計において、SiPM の増幅セルの大きさは、増幅率や光検出効率、クロストーク、消費電力などに影響するため、一番重要な仕様項目である。75 μm の増幅セルは、50 μm より 10% 高い光検出効率が期待できるが、増幅率が 2 倍高くなるため、クロストーク、消費電力も 2 倍以上増加する。最終的に、消費電力の観点から 50 μm の増幅セルを選択した。SiPM で発生した熱は、熱伝導性のよい接着剤で SiPM 電子基板に取り付けられたヒートシンクで排熱される。そのため、電子基板にも約 1 W/m/K の熱伝導性を持つ基板素材を採用している。小口径望遠鏡カメラの設計を確定したした

後、2023年に組み立てる予定のエンジニアリングカメラ(今後42台制作するカメラの初号機となる予定)の部品の調達を速やかに開始した。SiPMやそのバイアス回路を実装したモジュール納期は、通常6-8ヶ月程度であるが、熱伝導性のよい基板素材の供給が逼迫しているため、納期が15ヶ月に延長された。並行して、SiPMの初期不良率や寿命を測定する試験装置や手法を確立した。この試験では、高温、高湿度の環境下における高電流での加速劣化試験を実施する。

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

本研究は、太陽表面における爆発的なエネルギー解放現象であるフレアに伴う高エネルギーイオンの加速機構を、地上で中性子(>100 MeV)を観測することにより解明しようとするものである。太陽表面で加速された高エネルギーイオンそのものは、惑星間空間磁場により散乱されるため、地上で観測できても太陽表面における加速時の情報を知ることは困難である。一方、加速イオンと太陽大気との相互作用で生成される中性子やガンマ線は、磁場の影響を受けずに直進するので、加速機構を研究するために有効である。しかし、中性子は質量をもつので、エネルギーによって太陽-地球間に要する時間が異なる。さらに、中性子は地球大気中で減衰を受けるので、高山で、かつ昼間しか検出するチャンスはない。本研究所では、他の研究グループとの共同で、経度の異なる世界7箇所の高山で、太陽中性子24時間観測網を実現し、観測を継続してきた。これまでの観測で、1) 中性子の生成時間がX線やガンマ線などの電磁波と同時であると仮定すると、太陽表面でのイオン加速は統計加速であること、2) 中性子の生成時間が硬X線と比べて長時間であるイベントが最低1イベントあること、3) 太陽フレアで中性子が得るエネルギーは、軟X線の全エネルギーの0.1%を超えないこと、が分かってきた。

2013年には、メキシコの高山シェラネグラ(4,580 m, 北緯19度)に既存の太陽中性子望遠鏡と比較して、中性子に対する検出感度と中性子のエネルギー分解能に格段に優れた新検出器 SciBar Cosmic Ray Telescope (SciCRT)を設置し、2015年から本格的な観測を開始した。SciBarは加速器実験で用いられていた検出器で、SciBarを宇宙線検出器として用いることは、京都大学と高エネルギー物理学研究所(KEK)などのご厚意で実現した。SciCRTでは太陽中性子観測のほかに、方向別の宇宙線頻度の時間変動の観測を行っており、惑星間空間磁場の変動を調べている。SciCRTによる太陽中性子観測は、中性子の生成時間を仮定することなく、イオンの加速効率を求めることを目的としている。モンテカルロシミュレーションによれば中性子の生成時間が30秒以下の瞬間生成か、5分以上継続しているか区別しながら、統計加速かショック加速の区別ができる。これは、SciCRT以前の太陽中性子検出器では行えない。

2003年からは世界7か所で太陽中性子24時間観測を行ってきたが、7か所の観測点を長期間にわたって維持するのは困難であり、令和4年度中に観測点は2地点となった。ボリビアのチャカルタヤ山(5,250 m, 南緯16度)と、メキシコのシェラネグラで、シェラネグラにはSciCRTのほか、24時間観測網の一環として設置された太陽中性子検出器もある。どちらも、現地研究者が主体的にメンテナンスを行っている。

太陽活動は2020年のうちに、第24太陽活動期から第25太陽活動期に移行した。活動期は、太陽活動の極小から極小までで定義されている。第25太陽活動期は徐々に活発になり、次年度以降、シェラネグラやチャカルタヤでの太陽中性子検出が期待される。

本研究は、中部大学、信州大学、東京大学宇宙線研究所、JAXA宇宙科学研究所、防衛大学校、日本原子力研究開発機構、メキシコ自治大学、サンアンドレス大学などとの共同研究である。

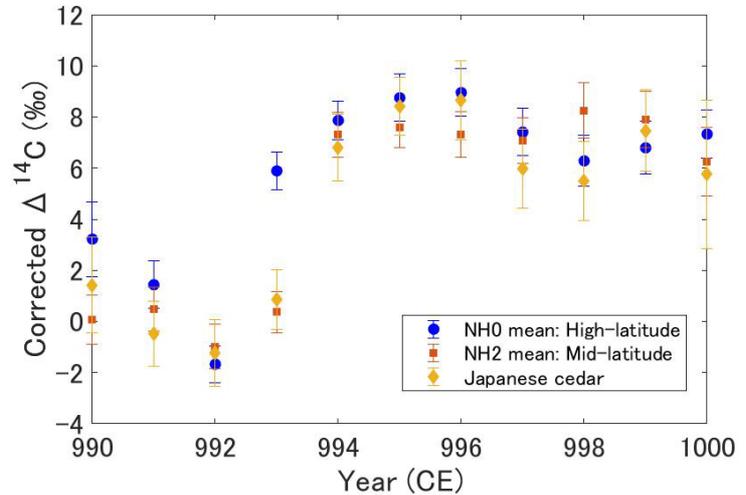
宇宙線生成核種を用いた過去の宇宙線変動の研究

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。これまでに、屋久杉などの ^{14}C 濃度測定から西暦774年、西暦993年、紀元前660年頃の宇宙線増加イベントを検出してきた。これらの宇宙線急増の原因は、Solar Energetic Particle (SEP) イベントと考えられており、その規模は観測史上最大のSEPイベントの数十倍に及ぶと見積もられている。このような大規模な太陽面爆発が現在発生すると、現代

社会に甚大な影響が及ぶと危惧されている。我々は、大規模な SEP イベントの発生頻度等の調査のため、過去 1 万年間を対象に樹木年輪中 ^{14}C 濃度を測定し、西暦 774 年のような大規模 SEP イベントを探索している。本年度は、紀元前 4000 年–3000 年代の調査を進め、複数のイベント候補 (^{14}C 急増) を検出した。

また、西暦 993 年の宇宙線イベントに対して屋久杉の再測定結果から、 ^{14}C 急増が記録されるタイミングに明瞭な地域差があることを報告した (Miyake et al., 2022、図)。高緯度の樹木と比べると、屋久杉など中緯度の樹木は 1 年増加のタイミングが遅れる。このような違いが、大気輸送によるのか、炭素固定の時期の違いなのか、今後の研究が重要である。

さらに、南極氷床試料中 ^{10}Be のバックグラウンド変動に対する理解を深めるため、南極積雪試料の ^{10}Be 分析を実施し、 ^{10}Be の地理的分布の調査を行った。



993 年宇宙線イベントの ^{14}C 変動の違い (Miyake et al. 2022、高緯度、中緯度、屋久杉)。

地下実験での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る。3 種類のニュートリノが量子力学的に混ざり合っ起こすニュートリノ振動により、ニュートリノの質量などニュートリノの性質を探る事ができる。宇宙線研究部では、神岡地下施設でのスーパーカミオカンデ (SK) 実験でのニュートリノ研究を行うと共に、有効体積を 8 倍大型化した将来計画ハイパーカミオカンデ (HK) 実験を推進している。

スーパーカミオカンデでは、検出器内の純水にガドリニウム (Gd) を添加することで、過去の超新星爆発から放出される超新星残存ニュートリノの観測を行なっている。2020 年夏の最初の 0.01% のガドリニウム投入に続き、2022 年夏には 0.02% のガドリニウムを追加導入した。検出器性能への大きな影響は見つかっていない。また、既存の加速器データによる較正を行なったハドロン生成モデルを用いて、新しい大気ニュートリノフラックスモデルの開発を継続し、新 Bartol ニュートリノフラックスモデルとの比較を行った。この結果は、大気ニュートリノ生成にフォーカスして毎年行なっている国際研究会 WAMP2023 で議論された。

HK の建設は順調に進んでいる。2022 年は、主空洞へのアクセストンネルが完成し、主空洞の掘削を開始した。本年度は、2018 年から SK 水槽に設置された 136 本の HK 実験用新型 20 インチ Box&Line 型 PMT に対して、Ni-Cf 線源較正ランを用いた性能評価を行った。これは、水中で行われた初めての大规模な長期テストであり、新型 PMT は、過去に空気中で行われた先行研究から期待されたとおりの性能を確認できた。

暗黒物質 WIMP 探索のための XMASS 実験の最終データ解析を、1590.9 日のフルデータセットを用いて公表した。また、ニュートリノを含まない 4 重ベータ崩壊の探索についても報告し、2022 年末をもって、XMASS コラボレーションとして共用研究を完了した。

加速器を用いた宇宙線相互作用の研究

高エネルギー宇宙線はどこでどのように加速されているか？この間に答えを得るべく観測が世界中で様々な手法で実施されている。高エネルギー宇宙線の観測は、大気と衝突を繰り返して生じる粒子シャワー現象 (空気シャワー) を地上から観測することで行われている。観測される空気シャワーから元の宇宙線の情報を抜き出すためには、宇宙線と大気との高エネルギー相互作用を理解することが不可欠であり、宇宙線の化学組成 (陽子、

ためには、宇宙線と大気との高エネルギー相互作用を理解することが不可欠であり、宇宙線の化学組成（陽子、鉄原子核など）では使用する相互作用モデルによって観測データの解釈が異なるという問題が生じている。そこで、我々は欧州原子核研究機構（CERN）にある世界最大の粒子加速器 LHC と米国のブルックヘブン国立研究所にある RHIC 加速器を用いて、高エネルギーハドロン相互作用の研究を行っている。

2022年度は、9月に LHCf 実験のデータ取得を行った。LHC 加速器で 6.8 TeV まで加速された陽子と陽子を衝突させて超前方領域に生成されたガンマ線や中性子を LHCf 実験のカロリーメータ型検出器で測定した。この衝突の重心系エネルギーは 13.6 TeV であり、これは宇宙線のエネルギーに換算すると 10^{17} eV にも達する。これは超高エネルギー宇宙線の 10^{20} eV に近く、宇宙線相互作用モデルの検証に最適である。9月中旬に検出器を LHC 加速器内に設置し、9月23-27日に測定が実施された。測定は計画通りに完了し、合計で3億事象のデータを取得することができた。これは2015年に同様の陽子-陽子衝突で取得したデータの約7倍にも達する。この高統計データを用いて、これまで出来なかった K^0 中間子の生成断面積測定が可能となる。K 中間子の寄与が高エネルギー宇宙線観測で問題となっているミュオン超過を解決する可能性があり、今後は精力的にデータ解析を実施していく予定である。また、この測定では ATLAS 実験との共同測定を実施しており、共同解析によっても高エネルギー相互作用の詳細を明らかにしていく。

液体キセノンを用いた宇宙暗黒物質の研究

宇宙空間には、相互作用が弱く観測にかかりにくい暗黒物質素粒子 WIMP が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。宇宙線研究部では、イタリア・グランサッソ国立研究所の地下施設において進行中である液体キセノンを用いた XENONnT 実験による暗黒物質直接探索の推進と、その将来計画である DARWIN 実験に向けた検出器開発を行っている。今年度は XENONnT 実験で取得した最初のデータを用いた解析作業の取りまとめを主導し、科学成果として①前身の XENON1T 実験で観測された低エネルギー電子反跳事象の超過現象に関する検証、②WIMP 暗黒物質の直接探索、という2つの重要な結果を報告した。双方とも暗黒物質をはじめとした新物理の兆候は観測されなかったものの、前者においてはいくつかの新物理モデルに関して世界最高感度での制限を与えており、また後者においても暗黒物質のパラメータに関して XENON1T 実験を超える感度での制限をつけることに成功した。この他にも、東京大学宇宙線研究所神岡施設とグラン・サッソ研究所における環境トリチウムの測定を昨年度から継続して行ない、水素・水蒸気に関する比放射能を測定した。

また将来の液体キセノン暗黒物質検出器に向けた研究開発の取り組みとして、石英容器を用いた密閉型液体キセノン検出器におけるコーティング電極の作成に向けた紫外光に対する液体キセノン中での金属表面での光電効率測定を行うと共に、低ダークカウント SiPM の検証やプラスチックシンチレータを用いた高感度なハイブリッド光電子増倍管の開発を行った。