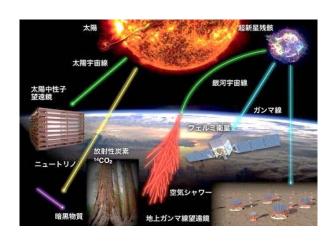
9-1. 基盤研究部門 | 宇宙線研究部



宇宙線研究部の研究テーマ・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

宇宙線研究部の紹介

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す。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。宇宙線研究部では、フェルミ・ガンマ線衛星 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 を進めています。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す。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ます。また、神岡(岐阜県飛騨市)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、液体キセノンを用いた暗黒物質の探索など、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、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みます。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、過去に発生し 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ます。加えて、ニュージーランドに 1.8 m 専用広視野望遠鏡を設置して、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の対応天体の探索も行っています。

2016 年度 宇宙線研究部の主要な成果

1. ガンマ線観測による宇宙ガンマ線源の探求

宇宙ガンマ線は、宇宙線と星間ガスの相互作用によって生成されるため、宇宙空間での宇宙線や星間ガスの性 質や分布等を調べるのに適している。銀河系内宇宙線源の最有力候補である超新星残骸に関して、過去のフェル ミ衛星によるガンマ線観測によって年齢 1 万年以上の古い超新星残骸において GeV (10 億電子ボルト) 領域の 宇宙線陽子が加速されていることを確認したが、その加速限界や比較的新しい超新星残骸における陽子加速につ いては、まだ解明されていない。我々はフェルミ衛星によるガンマ線観測データの画像解析を改良し、銀河系拡 散背景ガンマ線を考慮することで、より暗い天体の画像解析も可能とした。その結果、RX J1713.3-3946 や RCW 86 などの比較的新しい超新星残骸のガンマ線分布が GeV 領域と TeV (1 兆電子ボルト) 領域では異なる可能性を発 見した。これは、昨年度の IC 443 の画像解析おいて、GeV 領域と TeV 領域でほぼ同じガンマ線分布を得たこと と対照的であり、さらなる解析を進めている。また、ガンマ線強度分布は星間ガス分布を良く反映するため、星 間ガス分布の研究にも活用できる。最近の Planck 衛星の観測により、353 GHz 帯電波の減衰係数からダストの全天分布が 10 分角というかつてない分解能で測定された。ダストの総量は、星間ガスの総量と良い相関があると考えられているため、ガンマ線強度との相関を調査することで、その相関特性を明らかにできる。我々はMBM53-55、Pegasus Loop、Chamaeleon、Orion などの領域において、ガンマ線強度と 353 GHz 帯の減衰係数に非常に良い相関関係があることを示した。ただし、その関係は若干の非線形性を持つことが判明したため、その詳細の解析を進めている。

フェルミ衛星のガンマ線観測データ解析と並行して、次世代のガンマ線観測装置である CTA の望遠鏡の一つである Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT) の開発も進めた。我々のグループは GCT に使用するシリコン光電子増倍素子の開発を主導しており、候補となる素子の特性を測定し、最有力候補を決定した。現在、さらなる特性の改善に向けた測定を実施している。さらに CTA 大口径望遠鏡、中口径望遠鏡、小口径望遠鏡のそれぞれでチェレンコフ光の集光効率を高める装置開発を進めており、集光装置の試作やシミュレーションにより高い集光能力を得られることを示した。

2.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。惑星間空間を太陽から地球へ直進する中性子の検出はその観測手段の一つである。本研究では粒子加速の起 きた時刻を知ることが重要であるが、中性子は質量を持つため、そのエネルギーによって飛行時間が異なる。そ こで本研究所では、中性子のエネルギーと到来方向を測定できる太陽中性子望遠鏡を、世界の 7 つの高山に設置 して太陽中性子の 24 時間観測体制を確立している。中性子は太陽高度が低くなると大気中で激しく吸収される ため、観測装置を経度の異なる高山に設置することで、この影響を取り除いている。地上で検出される太陽中性 子のエネルギーは 100 MeV 以上である。第 24 太陽活動期に進めてきた SciBar Cosmic Ray Telescope(SciCRT) 計画では、2013 年にメキシコにある標高 4600 m のシェラネグラ山に高感度宇宙放射線測定装置を、京都大学、 高エネルギー加速器研究機構(KEK)およびメキシコ自治大学(UNAM)との協力で設置した。本検出器は粒子 の軌跡をリアルタイムに記録することができるため、粒子のエネルギー分解能力・粒子弁別能力・方向決定精度 に優れている。また、本検出器は多方向宇宙線強度の変動を調べることも目標としている。現在全体の8分の3 を用いて宇宙線ミューオンと中性子の観測を行っている。太陽活動は2014年2月に極大を迎え、それ以降大規 模太陽フレアの頻度は減少しており、SciCRT も含めて太陽中性子イベントは検出されていない。太陽高エネル ギー粒子加速機構の解明に向け、SciCRT の検出能力のモンテカルロシミュレーションによる評価を本年度は進 めた。その結果、SciCRTでは100 MeV 以上の太陽中性子のエネルギースペクトルの冪(べき)の違いを±1以下 の精度で区別し、かつ太陽表面での生成時間が瞬間的である場合と、5分以上継続している場合の判別をできる ことが明らかになった。

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、防衛大学、愛知工業大学、日本原子力研究開発機構、KEK などとの共同研究である。

3.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として、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が存在し、また暗黒物質素粒子 weakly interacting massive particles(WIMP)も存在すると考えられている。今年度は、スーパーカミオカンデにおいて、大気ニュートリノ振動観測での物質効果の探索感度の向上のため、崩壊電子の情報を用いたミューニュートリノ、反ミューニュートリノ識別の手法の開発を開始した。ミューニュートリノが水中で生成する負ミューオンが、酸素原子核に捕獲吸収反応を起こす事に着目した弁別手法を開発中である。また、スー

パーカミオカンデを約20倍拡張する次期超大型水チェレンコフ検出装置「ハイパーカミオカンデ」の検討を進め、 ハイブリッド光センサーの水中長期実証試験を行うと共に、光子入射位置依存性の較正とそれを生かした入射位置 感度再構成手法の開発を行った。

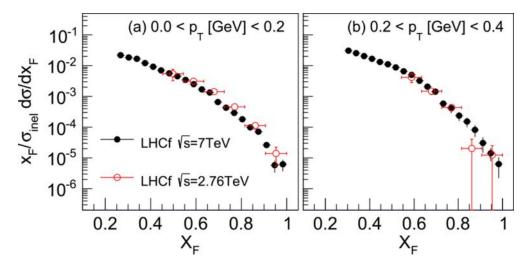
これと並行し、超低バックグランド液体キセノン検出器を用いた WIMP 直接探索実験である XMASS 実験を遂行 している。今年度は、低エネルギーガンマ線に対する液体キセノンのシンチレーション発光時定数についての測定 結果を論文としてまとめ出版した。また、将来の大型暗黒物質探索実験への応用として、液体キセノン 1 相式 TPC の開発を進め、ワイヤー電極を用いたプロトタイプ検出器を開発し、液体キセノン中での比例蛍光による遅延信号 の検出に成功した。本研究は、東京大学宇宙線研究所との共同研究である。

4. 加速器を用いた宇宙線相互作用の研究

宇宙からは人工の粒子加速器で作られるよりもはるかに高い、10²⁰ eV ものエネルギーを持つ粒子が飛来してい る。これらの超高エネルギー宇宙線が地球大気と衝突し二次粒子を多数生成することで、地上に大量の粒子群「空 気シャワー」が到来する。宇宙線研究では空気シャワーの観測から入射宇宙線のエネルギーや粒子種を求め、その 起源を探る。このとき、空気シャワーの発達を正しく理解するためにはハドロン反応の理解が不可欠である。現在、 スイスの欧州原子核研究機構(European Organization for Nuclear Research: CERN)が世界最高エネルギーを達成で きる LHC を運転している。LHC は陽子を $10^{13}\,\mathrm{eV}$ 近くまで加速するため、これらの粒子を正面衝突させることで、 10¹⁷ eV 相当の宇宙線と地球大気の衝突を再現できる。

LHCf 実験では、2016 年度に LHC において陽子と鉛原子核衝突におけるデータ収集を行った。初期解析におい て、陽子と原子核周辺の仮想光子の衝突による高エネルギー中性子の生成が確認できた。また、光子対事象による 中性パイ中間子とイータ中間子の生成も確認された。2016 年度以前に取得したデータの解析も継続した。13 TeV 陽子・陽子衝突における超前方光子生成率の解析を完了し論文を投稿した。同データを用いた中性子生成、中性パ イ中間子とイータ中間子生成、ATLAS 実験との共同解析を進めている。また図(下)に示すように、過去の陽子・ 陽子衝突における中性パイ中間子生成率の解析も論文として公表し、異なる衝突エネルギーでの生成断面積が一致 するスケーリングを報告した。

さらに、ブルックヘブン国立研究所(Brookhaven National Laboratory: BNL, アメリカ)の RHIC における実験 RHICf を推進した。RHICfで2017年度前半に0.51 TeV 陽子・陽子衝突におけるデータを収集するため、現在準備を進め ている。LHCf と合わせて、宇宙線のエネルギーにして 10^{14} から 10^{17} eV におけるハドロン反応理解とその衝突エネ ルギー依存性を明らかにすることが期待されている。



LHCf 実験による、衝突エネルギー 2.76 TeV と 7 TeV における中性パイ中間子生成断面積。 図出典:LHCf Collaboration, Physical Review D 94, 032007(2016)。

5. 宇宙線生成核種による過去の宇宙線変動の研究

樹木年輪中の放射性炭素濃度は過去に地球へ到達した宇宙線強度の優れた指標である。宇宙線強度は太陽系近 くの超新星爆発などの高エネルギー現象による銀河宇宙線の加速や、太陽表面の極端な爆発現象(太陽フレア) による太陽宇宙線の到来などを反映する。このような過去の宇宙線強度の変動は年輪中の放射性同位体である炭 素 14(¹⁴C)濃度の測定によって完新世(およそ 1 万 2 千年前以降)では 10 年以上の時間分解能で調べられてい るが、1-2年の変動はほとんど調べられておらず、単年分解能の 14C の変動についてはほとんど分かっていない。 唯一の例外が、我々が 2012 年と 2013 年に発表した AD775 年と AD994 年の宇宙線増加イベントである。

現在はこの1万2千年の間に同様な急増イベントがなかったかを調べるために、アリゾナ大学(アメリカ)や スイス連邦工科大学チューリッヒ校(ETH Zürich)と共同で、米国産の樹木を用いて過去1万年の宇宙線増加を 調べている。10 年値の標準データ(IntCal)を精査して、¹⁴C の急増(0.3‰/年以上)する事象を 1 万年間に 15 同定し、その前後の 14C 濃度を単年精度で順次測定している。AD775 年の増加事象を除くと、これまでに 4 つの 事象では 1 年レベルの急増ではなかったことが分かった。一方、BC5480 年の事象で、1 年レベルの急増ではな いものの、10 年間に 20‰の ¹⁴C 濃度の増加を発見した。これは増加量としては極めて大きく、増加率もマウン ダー極小期などに比べて大きい。この増加の原因は、太陽活動の極端な極小期、連続する大フレア、またはこれら の連動などが考えられるが、詳細は不明である。

¹⁴C は太陽活動の周期性などの特性を調べるためにも有用である。2016 年度は太陽活動の極小期とシュワーベ サイクルの周期長の関係を調べるために、これまで単年分解能では未測定であったウォルフ極小期の ¹⁴C 濃度の 変化を測定した。 現代太陽の 11 年周期に比べてやや長い周期成分と、 連続する 22 年へールサイクルが確認され た。これまでに測定されたほかの極小期の特性と一致する傾向と相反する傾向が認められ、極小期のより詳細な 調査が必要である。

6. 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。2016 年度はこの実験データの 解析を行った。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。一方、陽子入射では比較的高い粒子生成効率が得られた。

7. 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

ニュージーランド・マウントジョン天文台に設置した視野 2.2 平方度の 1.8 m 専用望遠鏡と、3 色同時撮像カメ ラを持つ 61 cm 望遠鏡を用いて 365 日連続観測を継続している。銀河中心方向では、618 個の重力マイクロレンズ 事象をリアルタイムで検出し、全世界にアラートを発信した。この中から太陽系外惑星候補を 5 個発見し、解析を 進めている。また、重力波望遠鏡 LIGO の重力波アラートの追観測を引き続き実施し、重力波に付随した対応光学 天体の探査を行っている。2015年の重力波事象の追観測については、論文に発表した。