

宇宙線

研究所

～宇宙の謎を解く 3つの手法～

東京大学宇宙線研究所は、柏キャンパスを拠点に国際的な大規模宇宙観測実験施設を国内外で複数運用し、宇宙や素粒子の分野での研究を行っている研究所です。幅広い宇宙線研究が集約された、世界でも唯一の「総合的」宇宙線研究所でもあります。ここでは、宇宙線研究がどのように宇宙の謎解きにアプローチしているのかをご紹介します。

宇宙を知る手段として真っ先に思い浮かぶのは、光学望遠鏡による天文学ではないで

しょうか。宇宙の中で光は最も豊富な情報源であり、その光が作られた場所や旅してきた環境を正確に記憶し、宇宙の歴史や構造、宇宙に存在する物質の種類や密度、星の一生といったさまざまな問いに答えてくれます。可視光外のさまざまな波長領域へも観測を広げ、その生成過程や温度など波長に固有の情報を得ることで、宇宙や星の進化や成り立ちを詳細に知ることができるのです。

しかし、宇宙から飛来する情報源は、実は光だけではありません。宇宙線（原子核、陽子、電子など）、ガンマ線、ニュートリノ、そしてまだ観測されていない重力波や暗黒物質など、光とは全く違った情報を運んでくる「メッセンジャー」が多種存在します。そして、人類の持てる最先端の技術を駆使して、それらが運んでくるメッセージを読み解く研究が、宇宙線研究です。

最高エネルギー宇宙線、ガンマ線観測で天文学が始まる

宇宙のかなたから地球に飛来する宇宙線は、原子炉で起こすウラン核分裂により得られる核エネルギー程度から1兆倍という非常に高いエネルギーを持っています。このエネルギーの中でも、比較的エネルギーの低い宇宙線は、私たちの銀河系の中の超新星爆発（重たい星が死を迎える時

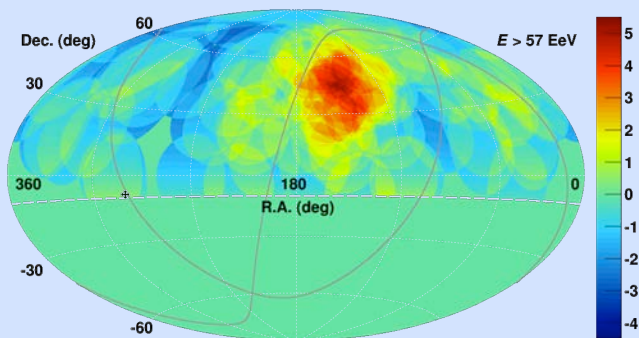


図1 テレスコプアレイ実験が捉えた最高エネルギー宇宙線が過剰に到来する方向（ホットスポット、赤色）のデータ。（提供：東京大学宇宙線研究所TAグループ）

に起こす爆発）などに起源すると考えられていますが、銀河系外からやってくる超高エネルギーの宇宙線がいったい宇宙のどこでどのように生成されているのかという謎には、未だてがかりがありません。

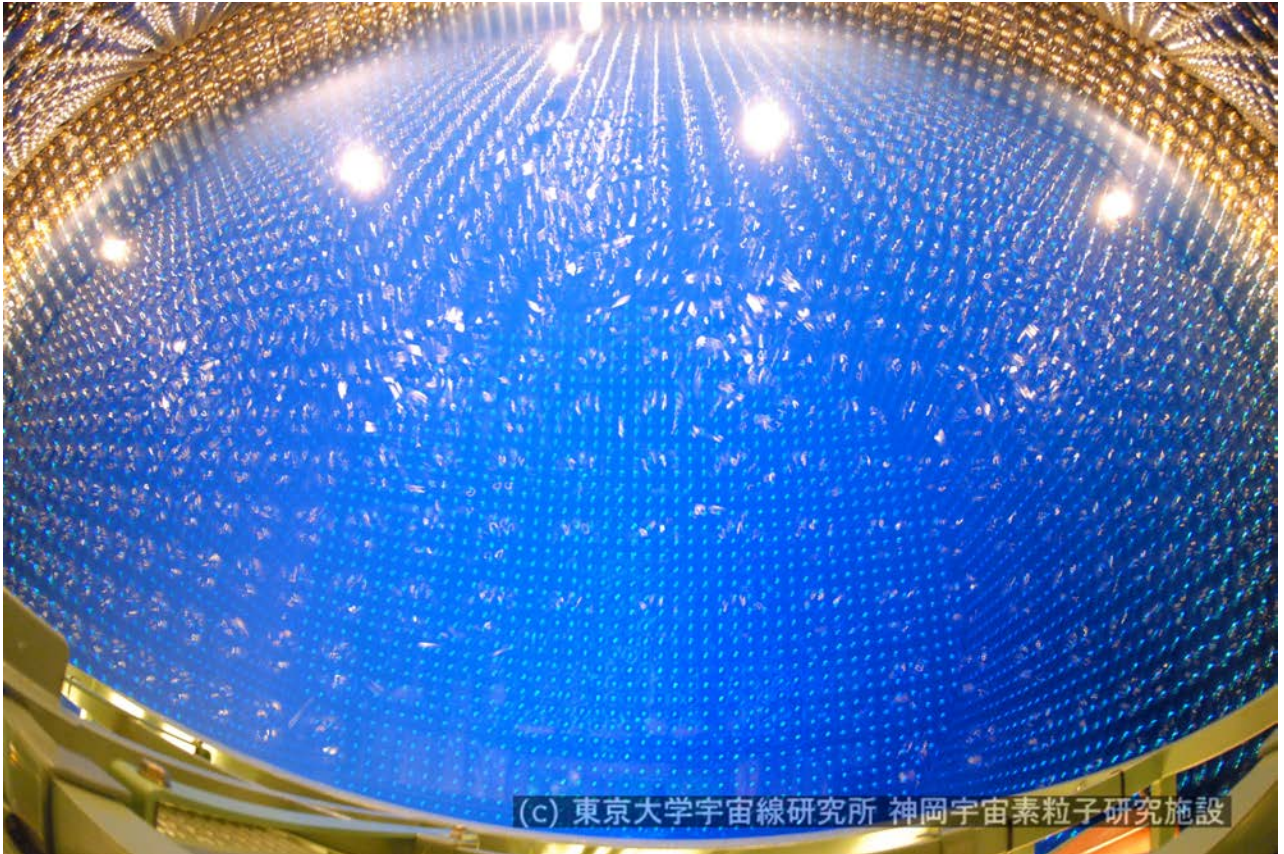
宇宙線起源の解明に大きな障壁となっているのは、宇宙線の到来方向から生成源の方角が割り出せないことにあります。電荷を持つ宇宙線は、銀河系内の磁場によって進路を曲げられてしまい、地球に飛び込む方向は、元の生成源の方向とは関連がなくなってしまうのです。しか

し、宇宙線起源を探る方法があります。一つは、磁場にあまり影響を受けない非常にエネルギーの高い宇宙線、最高エネルギー宇宙線をとらえること、もう一つは、宇宙線が高エネルギーに加速される時に出すガンマ線をとらえることです。これらは生成源から直進してくるため、観測できればどのような天体现象で作られているのかをとらえることができると考えられていますが、このうち高エネルギー宇宙線は年間を通して非常に稀で、観測には高い検出技術と広大な施設が必要となります。

このような課題に挑戦してきた宇宙線研究は、今まさに大きな転換期を迎えようとしています。2014年、最高エネルギー宇宙線観測実験「テレスコプアレイ」は、史上初めて宇宙線が過剰に到来する方向（ホットスポット）を捉え、宇宙線天文学時代への道を切り拓きました（図1）。また、近年の超高エネルギーガンマ線観測で、想像をはるかに超えるダイナミックで激しく活動する宇宙の姿が明らかになってきています。いままでに見つかっている超高エネルギーガンマ線源は150ほどですが、1,000以上のガンマ線天体の発見を目指す超高エネルギーガンマ線望遠鏡「チェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）」計画が世界中の研究者の協力のもとで現在進行中です。このような「多粒子天文学」により、巨大ブラックホールやガンマ線バースト、パルサーなど、謎に包まれた宇宙の超高エネルギー現象の機構解明も間近に迫っているのかもしれない。



超高エネルギーガンマ線望遠鏡「チェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）」の完成予想図（提供：CTA Collaboration）



5万トンの純水で満たされたスーパーカミオカンデ（提供：東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設）

ニュートリノの謎と超新星爆発の深部を探る

ニュートリノは電荷を持たず通常物質となかなか作用しないため、高密度の天体をも軽々とすり抜け、ほぼ光速で飛び去ってしまいますが、実は、宇宙の始まり、太陽や地球の中などで大量に生成され、宇宙の中でも光の次に豊富に存在している素粒子でもあります。ニュートリノ検出装置「スーパーカミオカンデ」は、通常物質とニュートリノがごく稀に起こす反応を検出することで、太陽の中や地球大気中で宇宙線によって作られたニュートリノ、加速器で人工的に作られたニュートリノビームを観測し、さまざまな歴史的発見を打ち出してきました。

特にこれから注目すべきニュートリノの研究を、大きく2つご紹介しましょう。1つ目は、素粒子としてのニュートリノの研究です。素粒子どうしの相互作用を記述した「標準モデル」は、さまざまな加速器実験などで検証され非常によく確立された理論であるにもかかわらず、暗黒物質や反物質の量など、宇宙に多く残る謎を説明できません。このため、標準モデルを超える「新しい物理」が希求されています。この中でも特にニュートリノは、スーパーカミオカンデによる「ニュートリノ振動」と呼ばれる現象の発見から、標準モデルの枠組みを超える素粒子であることが示唆されており、今後その性質を特定していくことで、新しい物理への道が拓かれると期待されています。

2つ目は、超新星爆発で作られたニュートリノを捉えることです。周囲の物質に遮られることなく発生源から直進してくるニュートリノを捉えることができれば、光では物質に遮られて届かない天体深部の情報を得ることができます。スーパーカミオカンデの前身カミオカンデは、1987年に起こった超新星爆発からのニュートリノを11事象捉えるという歴史的な快挙を成し遂げました。スーパーカミオカンデであれば、1万事象ほど捉えることができるとされています。また、過去に起こった超新星爆発からのニュートリノをつかまえるため、近い将来に装置に改造を施す計画もあり、実現すれば超新星爆発の機構解明が飛躍的に進展することでしょう。

人類の新しい目ーアインシュタインの重力波

現在、スーパーカミオカンデがある池の山の地下では、「KAGRA（かぐら）」という大型重力波望遠鏡の建設が進められています。1本3キロメートルのアームを2本持った巨大レーザー干渉計で、地球と太陽間の距離が水素原子1個分の大きさ程度変化するという微細な変動をも捉える、超高精密度のものさしです。その目的は、宇宙から到来する重力波の史上初の観測で、2017年度内の本格稼働を目指しています。

重力波とは、空間の距離の伸び縮みが波として伝搬する現象で、中性子星などの非常に重たい天体が互いを周回する連星や、超新星爆発、ブラックホールの誕生など、重力場の変化により発生します。アインシュタインの一般相対性理論が予言する現象のうち、唯一まだ直接検証の実現していない現象で、この「アインシュタインの最後の宿題」を果たすことで、一般相対性理論の検証のみならず、電磁波や素粒子など他のメッセンジャーでは観測不可能な、まったく新たな天体や宇宙の情報をも得られることでしょう。KAGRAでは、年間10事象程度の中性子連星合体が捉えられると期待されており、まさに、「重力波天文学」の幕が開けようとしています。



神岡池ノ山地下に建設中の大型低温重力波望遠鏡
KAGRA（かぐら）の概念図(提供：東京大学宇宙線研究所)

ここでは、多様なメッセンジャーの観測を通して宇宙にアプローチするという観点から、宇宙線研究所で行われている代表的な研究の一部をご紹介します。この他にも、暗黒物質の直接探査実験や、高エネルギー宇宙現象の解明、初期宇宙や進化の解明、素粒子理論・宇宙論構築などの理論研究といった、新たな宇宙の姿をあらわにしていく研究が多角的に行われています。今後の宇宙線研究へご期待ください。

更に知りたい方は、東京大学宇宙線研究所のホームページ：

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

から、各研究プロジェクト紹介のホームページなどをご参照ください。