

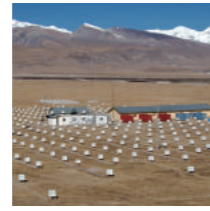
高エネルギー宇宙線研究部門



TA
(テレスコープアレイ)



CTA (国際宇宙
ガンマ線天文台)



Tibet AS-γ(チベット
空気シャワー)

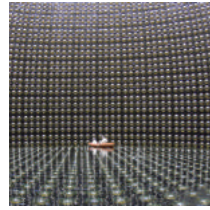


高エネルギー天体

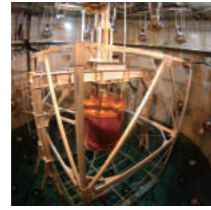


Ashra (アシュラ)

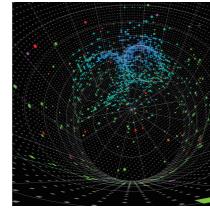
宇宙ニュートリノ研究部門



スーパー
カミオカンデ

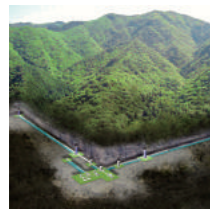


XMASS
(エクスマス)

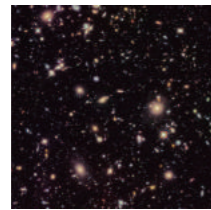


T2K

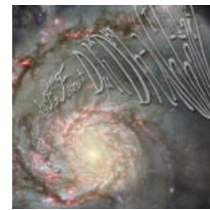
宇宙基礎物理学研究部門



KAGRA
(かぐら)



観測的宇宙論



素粒子論
素粒子の宇宙論

東京大学

宇宙線研究所

研究所紹介パンフレット



問い合わせ

東京大学宇宙線研究所

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

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5

Tel: (04) 7136-5148

Email: icrr-pr@icrr.u-tokyo.ac.jp

ようこそ宇宙線研究所へ

宇宙線研究所では宇宙から飛来する宇宙線、ニュートリノ、重力波などの観測を通して、最も大きい宇宙と最も小さな素粒子の神秘に迫ります。

宇宙線研究所の研究にご注目ください。



2015年ノーベル物理学賞受賞 梶田隆章所長

宇宙線研究所の観測所・施設

宇宙線研究所は、共同利用・共同研究拠点の1つとして国内外の共同研究を推進しています。

神岡宇宙素粒子研究施設

岐阜県飛騨市神岡町東茂住にある研究施設。神岡鉱山内に設置された世界最大の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデによるニュートリノや陽子崩壊に関する研究を行っています。また神岡施設では、低バックグラウンド検出器を用いた暗黒物質の探索実験、XMASS実験も行われています。

宇宙ニュートリノ観測情報融合センター

柏市の宇宙線研究所本拠地に設置され、理論・実験物理学者の交流を促し、スーパーカミオカンデ・グループが得た情報を、多角的に解析・研究を行うことを目的としています。計算機の運用・管理を行い研究所の活動を下支えする役割を担っています。

明野観測所

山梨県北杜市明野町にある標高900メートルの観測所。宇宙線が地球大気に衝突して生成される空気シャワーの検出装置としては世界最大のAGASAが設置されていました(1990~2003)。現在は極高エネルギー宇宙線の観測を行っているTA(テレスコープ・アレイ)実験の観測支援と関連する開発研究、高エネルギー宇宙線観測のための新しい装置の試験、また重力波検出用低温装置組み立てなどに使われています。

乗鞍観測所

岐阜県高山市丹生川町乗鞍岳にある観測所。銀河系・太陽惑星空間における宇宙線変動と磁場や、太陽活動に関する研究、太陽中性子の検出実験など最先端の宇宙線研究が行われてきました。地球環境に関する研究も盛んに行われています。宇宙天体からの超高エネルギーガンマ線を探索する予備実験や、宇宙線観測用望遠鏡の性能試験など、高い標高を利用した試験観測も行われています。



宇宙線とは

宇宙線研究所は、昭和25年に朝日学術奨励金によって乗鞍岳に設置された朝日小屋がその前身。1976年に東京大学宇宙線研究所として活動を開始してから、世界唯一の「総合的」宇宙線研究所として、日本国内に複数の世界的研究施設を持つのみならず、世界各地でも多岐にわたる観測・実験プロジェクトを主体的に展開しています。

重力波

アインシュタインの相対性理論によって予言されている時空の波。重たい天体の合体など時空の急激な変化でたくさん発生します。

地下



重力波望遠鏡

ニュートリノ

宇宙のかなたで起こる超高エネルギーの爆発や太陽などの星の中、地球の大気や内部で大量につくられている素粒子。しかしなんでもすり抜け、そのほとんどは遠くへと飛び去ってしまいます。



ニュートリノ検出器

暗黒物質

現在知られている物質では説明のできない正体不明の物質のことを暗黒物質とよびます。宇宙に存在すると計算されている物質量の大半をしめています。



暗黒物質検出器

ガンマ線

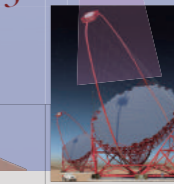
人工衛星・宇宙ステーション



気球

チェレンコフ光

0km-3km



ガンマ線望遠鏡

最もエネルギーの高い電磁波のことをいい、宇宙で起こるさまざまな超高エネルギー現象で生成されます。

空気シャワー

30km-40km

3km-5km

空気シャワー・アレイ

宇宙を飛び交っている高エネルギーの原子核や素粒子で、主に水素原子核など軽い原子核が99%をしめています。

1912年、オーストリアの科学者ヘスは自由気球を飛ばし、放射線は地上のみからではなく、天からやってくることを示しました。宇宙のかなたから様々な情報を運んでくる、いわばメッセンジャーである宇宙線は、物理学の理解にも大きな貢献をもたらしてきました。現在では、まだ全容が解明されていない素粒子ニュートリノの検出実験、世界初検出に挑む重力波や暗黒物質の探索実験なども加わり、新しい発見が期待される数々の観測・実験が行われています。

宇宙の巨大な加速器の正体を明かす

宇宙からやってくる宇宙線には

人類がつくり出すことのできるエネルギーの

1千万倍ものエネルギーをもつ粒子もあります。

どのような「超高エネルギー現象」が粒子を

そこまで加速するのでしょうか。



現在約150のガンマ線天体が発見されています。2015年10月に建設が開始された次世代国際宇宙ガンマ線天文台チェレンコフ望遠鏡アレイ(CTA)では、1,000を超える多種多様なガンマ線天体の発見が期待されます。粒子の飛行速度が空気中における光速を超えるときに発する光の衝撃波「チェレンコフ光」を観測します。

宇宙の超高現象を解き明かす

高エネルギーの宇宙線を生み出す、宇宙の超高エネルギー現象（超高現象）。その正体はまだ解明されていません。

宇宙から降り注ぐ宇宙線は、どこでどのように生まれたのでしょうか。実は、宇宙線がやってくる方向を見ても、その宇宙線が生まれた方向を見ているとはかぎりません。それは、宇宙線が宇宙空間をまっすぐに飛んでくるくるとはかぎらないからです。電気を帯びている粒子は銀河系内の複雑な磁場に曲げられて、すぐに進路をかえてしまいます。

これに対し、電気を帯びていないニュートリノやガンマ線は、銀河系内の磁場に影響を

受けません。また、電気を帯びている宇宙線であっても、非常に高速で飛んでいる宇宙線（最高エネルギー宇宙線）の進路は、あまり磁場の影響を受けません。宇宙線研究所では、このような多種の到来粒子を調べることによって、宇宙の超高現象を解き明かす観測実験を多角的に行っています。

超高現象を理解するために行っている研究は、観測だけではありません。宇宙線が高エネルギーになるためには、そのエネルギーまで加速できるようなメカニズムが必要になります。このようなメカニズムを持つのは、超高速のプラズマ流（電気を帯びた粒子の流れ）や超強力な電磁場といった極端な環境だと考えられています。宇宙線研究では、こうした「極端環境」を、物理学の基本原則から理解することを目指しています。

例えば、電気を帯びた粒子は、強い電場があるプラズマ衝撃波と呼ばれる波面の上を行き来することにより加速されるという説が有力です。しかし、現在見つ



テレスコープ・アレイ (TA) は最高エネルギーの宇宙線観測を目的に米ユタ州の砂漠地帯（標高1,400メートル）に建設され、2008年観測を開始しました。地表検出器507台と大気蛍光望遠鏡3ステーションからなり、700平方キロメートルの地表面積をカバーしています。

かっているようなエネルギーにまで加速するには充分でないなど、問題も指摘されています。宇宙線研究所高エネルギー天体グループでは、シミュレーションによりさまざまなモデルを検証し、宇宙の超高現象を理解する研究を進めています。

ニュートリノとは

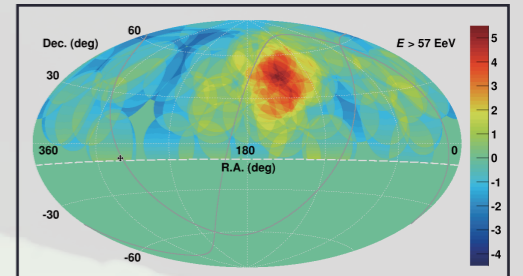
ニュートリノは、物質をつくる最小単位である「素粒子」の仲間の一つ。非常に軽く、また私たちの体やまわりの物質を簡単にすりぬけてしまうため、なかなかとらえることができません。しかし宇宙には大量に存在し、超高現象でも多数生成されています。

宇宙線の限界を知る

宇宙線のなかでも、高エネルギーの宇宙線はなかなか降ってきません。宇宙線のエネルギーには限界があるのでしょうか。

原子核やニュートリノ、ガンマ線といった可視光の100万倍から1000倍（1兆倍の1億倍、または10の20乗）という幅広い範囲をもっています。エネルギーが高くなるほど宇宙線の数はいくつか減ります（エネルギーが10倍になると、数は10分の1になります）。最新の観測により、可視光の100倍以上の宇宙線は地球上にほとんど到達しないことがわかっています。これは、超高エネルギーの宇宙線は、宇宙を満たしている宇宙背景放射と呼ばれる放射にせきとめられてエネルギーを失うという、相対性理論の予測に合う結果です。

可視光の100倍ものエネルギーの宇宙線は、100平方キロメートルの領域に年に1個も降りません。このため最高エネルギー宇宙線は、組成などまだ解明されていない点が多くあります。しかし、最高エネルギー宇宙線は、ほとんど進路を変えないため、どこから到来しているのかを探ることで、宇宙線の起源を調べることができます。米国ユタ州にあるテレスコープ・アレイ(TA)実験では、こうした最高エネルギーの宇宙線観測の結果、世界最高感度で宇宙線のホットスポットを捉えました。現在は、さらに広範囲に装置を展開し、データ量を4



テレスコープ・アレイ実験が世界最高感度で初めてとらえた最高エネルギー宇宙線のホットスポットの天球マップ。近傍超銀河面の近くにあり、今後構造や発生源天体、エネルギー分布などの謎の解明が待たれます。

倍に上げるTA×4計画も進めています。また最高エネルギーガンマ線の探索も進められています。現在発見されているガンマ線の最高エネルギーは可視光の10兆倍（10の13乗倍）。チベット空気シャワー観測実験(Tibet AS-γ)グループでは、この10倍のエネルギー領域で人類がまだ目にしたことのないガンマ線観測を高感度で行う新しいプロジェクトも進行しています。



地表の空気シャワー検出器で初めてガンマ線観測に成功したチベット空気シャワー観測装置。宇宙線研究所と中国が共同で開発し、1989年、標高4,300メートルにあるチベット自治区ヤンパーチンに建設。空気シャワー最大発達の高高度を利用して最先端の観測を繰り返しています。

宇宙を深く探査する

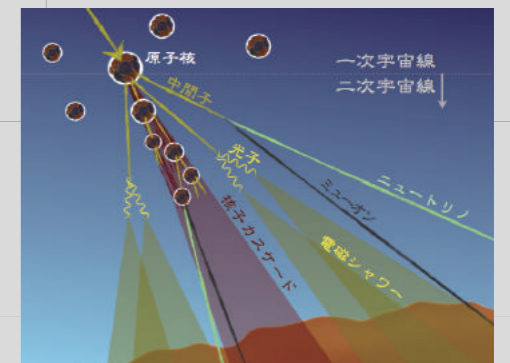
宇宙線は宇宙からの貴重なメッセージ。全天に目を向けて、より解像度の高い観測を続けることに意味があります。

宇宙は、まだ解明されていないさまざまな超高現象で満ちています。超高現象はいつ起きるかかわからず、そして人のライフスパンにとっては非常に希少なイベントともいえ、いかなるシグナルも逃さず全天で観測を続けることが、将来の大発見へとつながります。

北半球と南半球の2ステーションで広エネルギー領域のガンマ線を観測する大規模チェレンコフ望遠鏡アレイ(CTA)、南米のピエール・オージェ観測所とあわせて、最高エネルギー宇宙線の全天探査を実現しているTA実験など、宇宙線研究所にはより宇宙を深く広く探査する実験が進められています。

Column 地球の大気は絶妙な検出器

最高エネルギーの宇宙線は、東京の山手線よりも大きな面積に1年にわずか1個ほどしか降ってきません。この宇宙線がそのまま地表に届くとすれば、地表の広範囲に隙間なく検出器をしきつめなければ検出できません。幸い、宇宙線は宇宙から降ってくる姿のまま地表に到達するわけではありません。銀河のかなたからやってきたエネルギーの高い宇宙線（一次宇宙線）は、地球の大気中の原子核と反応して、「空気シャワー」とよばれる千億個もの宇宙線（二次宇宙線）のシャワーとなって地表の広範囲に降り注ぎます。この空気シャワーをつかまえることは、地表にまばらに散らばった小さな検出器でも可能です。このように、宇宙線観測では、地球の大気も検出器の役割を果たしています。



宇宙の謎を解く三つの手法

宇宙線研究所では大きく3つの「目」で宇宙をとらえることにより、天文学・物理学の根幹をなす理論や超高エネルギー天体现象の謎をひもとく大きな可能性をひめた研究を行っています。

① 電磁波でみる

電磁波とは、光のこと。しかし私たちの目に見える光「可視光」は、電磁波のほんの一部でしかありません。波長の違う電磁波を観測することで、さまざまな天体现象を理解することができます。

最もエネルギーが低く波長が長い電磁波は、テレビやラジオでおなじみの「電波」。現在の宇宙は全域でこの領域の電磁波を放っています（宇宙背景放射）。宇宙の始まりであるビッグバンのなごりとして知られています。

次に波長の長い「赤外線」や「可視光」領域では、さまざまな波長帯で観測することにより温度や原子構成などを調べ、星の形成や恒星の進化などが研究されています。

さらにエネルギーの高い電磁波は「紫外線」や「エックス線」と呼ばれ、地球の大気圏で吸収されて地上ではなかなか観測できません。しかし最もエネルギーが高い「ガンマ線」は、大気と反応を起し空気シャワーをつくります。これを観測することで、まだ謎の多い宇宙の超高エネルギー天体现象を調べることができます。

宇宙論

現在、宇宙は加速膨張しています。膨張を速めているエネルギーを暗黒エネルギーと呼び、まだ正体がわかっていません。この暗黒エネルギーは、宇宙の初期には現在の100桁倍もあったと考えられています。この暗黒エネルギーの正体や宇宙の進化を探るため、熱い宇宙の誕生ビッグバンをもたらしたと考えられている急激な膨張、インフレーションの検証を行います。また宇宙誕生後最初の10億年の宇宙を観測し、再電離などの大規模範囲で起こったイベントなどの宇宙史の検証が行われています。

天文学

さまざまな波長領域で電磁波を観測することにより、天文学は花開いてきました。太陽のような恒星やブラックホールなどの重たい天体の形成過程や進化、大量の超高エネルギー宇宙線を放つガンマ線バーストなどの天体现象などを理解するために、より精密で広範囲の宇宙線の観測を行っています。

② 素粒子・原子核でみる

宇宙からやってくる宇宙線の99%は、水素やヘリウムの軽い原子核です。しかし、これはエネルギーで捉えた数字。数でいえば、素粒子であるニュートリノは原子核の何億倍も存在しており、光と同じくらいの密度があります。ニュートリノは超新星爆発などの超高現象や宇宙の初期に大量に生成され、全ての物質をすり抜けて地球に届くため、誕生した環境の情報をそのまま伝えてくれます。この観測により、天体、そして宇宙の誕生と進化過程の解明をめざしています。

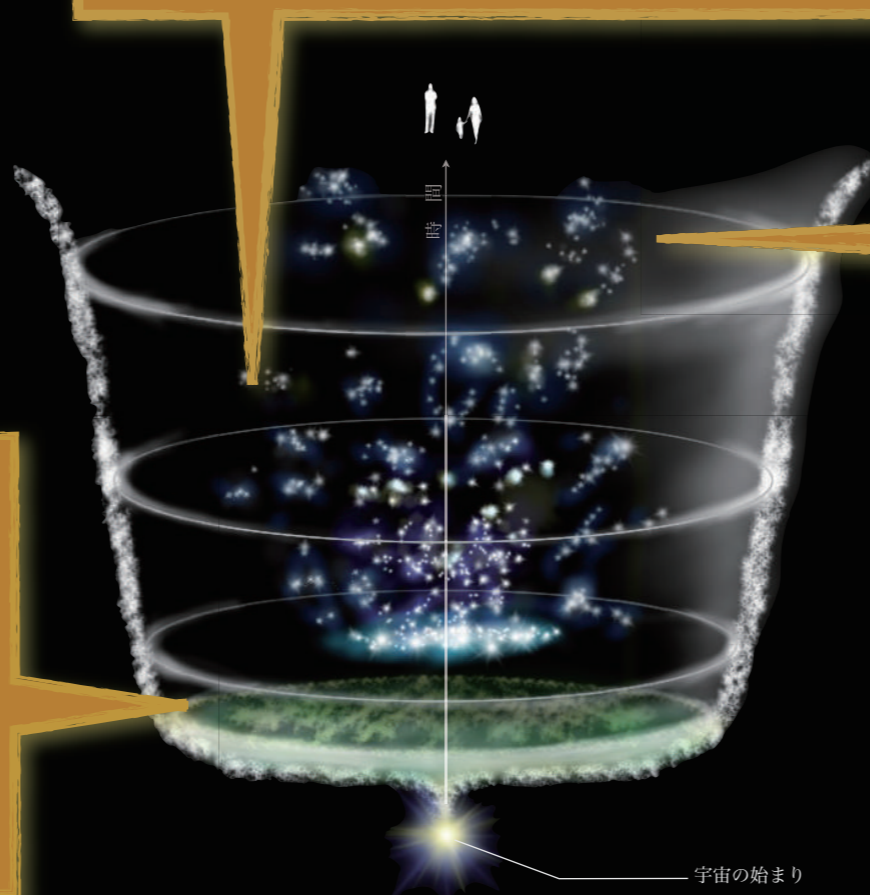
一般相対性理論

現代物理学の土台となっているアインシュタインの一般相対性理論は宇宙の数多くの現象を予測し、いあててきました。さまざまな角度から実証されてきた理論ですが、そのなかで唯一まだ検証されていない現象が重力波です。この重力波をとらえることで強い重力場における相対論の検証をめざしています。また、より遠方からやってくる超高エネルギーの電磁波や素粒子・原子核の観測で相対論を検証することも重要です。

③ 重力波でみる

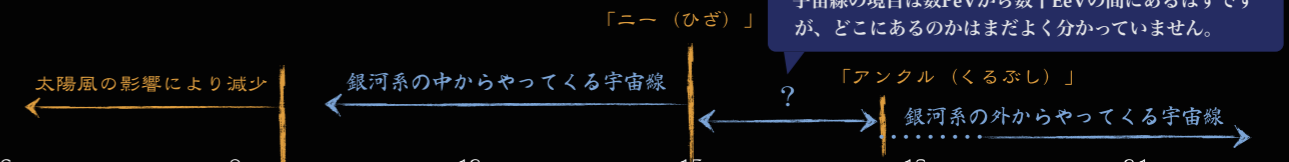
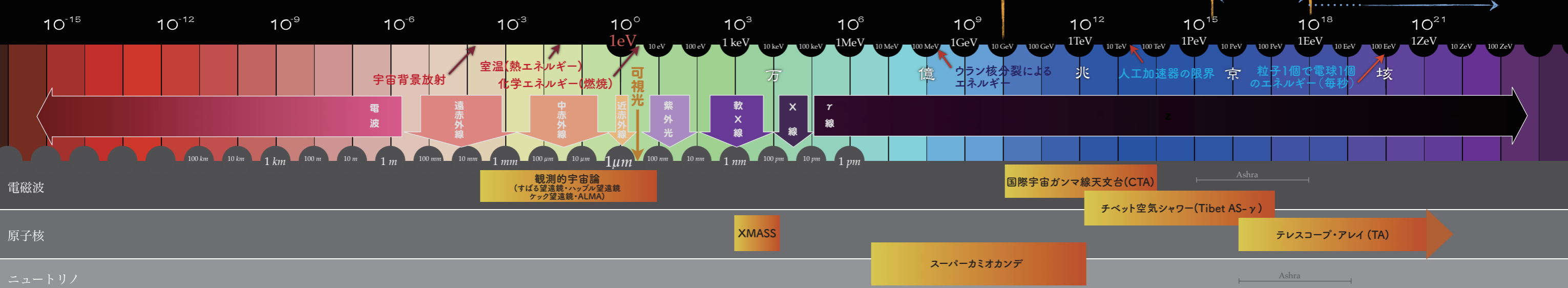
重力波とは、周囲の時空をゆがめるような非常に重たい天体が加速しながら動くときに生じる波のことで、宇宙空間を伝わってきます。この空間のゆがみは非常にわずかで、観測が非常に難しく、長年検出できませんでした。しかし、アメリカの重力波望遠鏡「LIGO」の研究グループが、2016年2月11日に初検出に成功したと発表しました。人類はこれまでの電磁波や素粒子、原子核とは違った宇宙を見る新しい眼を手に入れました。ブラックホールや中性子星の連星が合体するときにおこる高周波（短い波長）の重力波をとらえることにより、天文学や一般相対性理論の理解がより深まるでしょう。また、重力波は宇宙の始まりとされるインフレーションを直接観測できる唯一の手段でもあります。

数十EeV以上の超高エネルギーの宇宙線は、宇宙の磁場にほとんど影響を受けずにほぼ直進します。天の川の方向に限らずあらゆる方向からやってくることから、銀河系外に起源を持つと考えられています。また、数PeV以下の宇宙線は銀河系内部の超新星爆発などに起源を持つと考えられています。銀河系内起源と銀河系外起源の宇宙線の境目は数PeVから数十EeVの間にあるはずですが、どこにあるのかはまだよく分かっていません。



宇宙線エネルギーのものさし

※エネルギーのものさしは対数表示になっています。



素粒子の世界を探る・素粒子で宇宙をみる

ミューオンなどの素粒子や、ニュートリノの重さの発見など素粒子の世界に大きな貢献をもたらしてきた宇宙線観測。現在進められているニュートリノ実験は宇宙・素粒子研究にどのような発展をもたらすでしょうか。

ニュートリノ検出器スーパーカミオカンデは、ニュートリノが原子核と反応して出す荷電粒子が水中で光速を超えて飛ぶときに出す光の衝撃波「チェレンコフ光」を観測し、ニュートリノを捕らえます。(画像提供：東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設)

ニュートリノで宇宙をとらえる

光や他の粒子ではみれない天体の深部や宇宙の遠方の情報を運んでくるメッセンジャーとして、期待がたかまっているニュートリノ天文学。ニュートリノの性質を明らかにすることで物質の起源にも迫ります。

ニュートリノは、光や電気を帯びた粒子と全く異なった宇宙や天体の姿を見せてくれます。例えば太陽内部の活動を観測することを考えてみましょう。太陽中心部分で起こっている核融合反応でつくられた光は、周りの物質にぶつかり跳ね返されるため表面にでくるまでに数十万年かかります。これに対し、ニュートリノはほんの数分で太陽表面に達し、現在起こっている太陽内部の活動をリアルタイムで伝えてくれます。

このような天体深部の情報を伝えるメッセンジャーとして特に期待されているのは、超新星爆発という天体現象の解明です。超新星爆発が銀河系中心付近で起こった場合、スーパーカミオカンデでは1万ものニュートリノ事象を捕まえられることから、24時間体制で実験を運用しています。また、宇宙のかなたで起こった超新星爆発からの背景ニュートリノへの感度を高める、SK-Gdと呼ばれる性能向上計画も進んでいます。

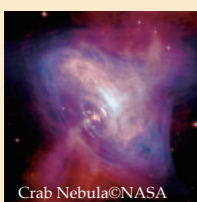
スーパーカミオカンデによるニュートリノの性質に関する様々な発見の中でも特に重要な発見は、「ニュートリノ振動」の発見です。ニュートリノ振動とは、ニュートリノが飛行している間にニュートリノの種類が変化することで、この現象はニュートリノに質量がなければ成り立たないため、ニュートリノの質量の有無を決定づける極めて重要な現象です。ニュートリノには、電子型、ミューオン型、タウ型の3種類があります。スーパーカミオカンデでは、1998年、地球の裏側の大気で生成されたミュー型ニュートリノの数とすぐ上空の大気中で生成されたミュー型ニュートリノの数を比較することで、ニュートリノが地球をすり抜ける間に種類を変え、ニュートリノ振動が発生していること、つまりニュートリノには質量があることが確認されました。それまで、正確無比に素粒子の性質を説明すると考えられていた理論である標準模型ではニュートリノの質量をゼロとして扱っており、その理論に修正を迫ることから、物理学の世界に



長基線ニュートリノ振動実験 T2K(Tokai-to-Kamioka)は、茨城県東海村にある加速器でつくったニュートリノを地中295km飛ばしスーパーカミオカンデで捉え、ニュートリノの種類がどれくらいの割合で変化したかを調べる実験です。

大きな衝撃と新たな道筋をもたらしました。この功績により、現宇宙線研究所長である梶田隆章教授は、2015年のノーベル物理学賞を受賞しました。

この最初のニュートリノ振動の発見をかきりに、他の種類のニュートリノに振動する振動現象も次々と確認されました。とくにスーパーカミオカンデでは、太陽ニュートリノや人工的に作り出した加速器ニュートリノを用いた振動実験も実施し、ニュートリノの性質の確定に大きな貢献を果たしています。しかし、ニュートリノにはまだ確定していない性質がいくつか残っています。その1つに、ニュートリノとその反粒子である反ニュートリノの振動の仕方の違いがあり、ニュートリノの性質の全容に迫るため、スーパーカミオカンデの20倍の感度をめざすハイパーカミオカンデ計画も進められています。



星の死の火葬場 超新星爆発とは
太陽より8倍以上重たい星がエネルギーを使い果たして死をむかえるとき、中心部分には太陽の1.4倍もの重さにもなる鉄のかたまりが形成されています。この鉄のコアの重さを支えきれなくなって崩壊し中性子星やブラックホールとよばれる重たい天体になるときに、爆発的なエネルギーが放出されます。これを超新星爆発といいます。

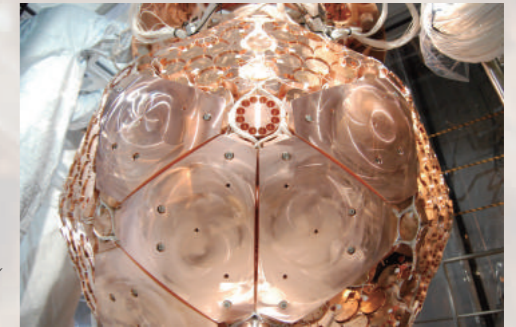
暗黒物質を探る

宇宙には私たちの知っている物質の5~6倍もの未知の物質が存在しています。

私たちの体や地球、太陽など明るく輝く星は、原子核などの既によく知られている物質でつくられています。ところが、銀河系の回転速度を観測すると、銀河系内の星の数から計算される回転速度とどうしてもあいません。銀河系内に存在する物質のさらに5~6倍もの重さの物質が存在しないと、計算があわないことがわかりました。光では検出することのできないこの得体のしれない物質を暗黒物質と呼びます。

直接観測は誰も成功していませんが、間接的な証拠はたくさんみつかっています。銀河の回転速度の問題のみならず、暗黒物質の強い重力がレンズのように光をまげる重力レンズと呼ばれる効果も観測されています。また暗黒物質は、現在の宇宙にある大規模構造をつくるためにもなくてはならない存在だと考えられています。この重力でしか知られていない暗黒物質の正体を、宇宙線研究所では理論と実験の両側面から探っています。宇宙線研究所の理論グループでは、宇宙論や素粒子論などの枠組みで暗黒物質を広く研究し、観測可能な領域を探っています。

宇宙素粒子検出装置であるエクスマス(XMASS)実験では、液体キセノンという、暗黒物質が原子核をはじき飛ばしたとき



神岡鉱山の中にあるXMASS (エクスマス) 実験

の発光量が多く、また大型化が可能な物質を使用し、これまで世界中で行われてきた暗黒物質実験の数十倍の感度で暗黒物質の直接的な探索にとりくんでいます。

また、暗黒物質どうしが衝突して消滅するときに発するガンマ線やニュートリノをとらえることで、暗黒物質を間接的に探査する方法もあり、極めて重要な実験です。このような暗黒物質探査実験にはCTAやスーパーカミオカンデ実験などがあります。

素粒子から宇宙を理解する

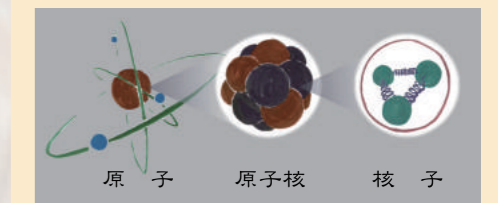
宇宙は現在の素粒子モデルでは記述できない謎にあふれています。さまざまに提唱されている新しい素粒子モデルから宇宙の現象を導きだし、素粒子の全体像に迫ります。

宇宙には4つの力が存在します。それは、重力、弱い力、電磁気力、強い力とよばれ、力はこの順番に強くなっていきます。では力とは何をさすのでしょうか。力は物質と物質の間に働く「相互作用」のことで、あらゆる物理現象で重要な役割を果たしています。全ての物質を小さく分解していくと、これ以上分解できないという極限に小さな粒子「素粒子」にいきつきませんが、物質が一つにかたまっているのも、相互作用があるからです。

重力は質量のあるものどうしに働き、電磁気力は電荷のあるものどうしに働きます。強い力は、原子核を一つにまとめている非常に強い相互作用、そして弱い力は粒子の「崩壊」を引き起こす相互作用です。このように役割や強さの違った相互作用ですが、調べていくうちに、これらの相互作用は「素粒子の間で、ある素粒子をやり取りすることにより働く」と考えると物質のふるまいが非常にうまく記述できることがわかったのです。物質を構成する素粒子とその間に働く力を媒介する素粒子からなるこのモデルを、「標準模型」といいます。

標準模型はさまざまな実験によって徹底的に検証され実証されてきた理論ですが、これだけでは宇宙の全ての現象を説明することができません。このため、理論・実験、宇宙観測を包括的に組み合わせ、標準模型を超える「新しい物理」の兆候を探る研究が行われています。

標準模型を超える新しい物理として有力視されているのは、「超対称性」とよばれる性質を持つ素粒子モデルです。宇宙線研究所の理論グループでは、これを宇宙論に応用し、誕生後間



もない宇宙で起きる様々な素粒子現象や物質の起源、暗黒物質・暗黒エネルギーの正体に迫る研究を行っています。

また、加速器ニュートリノ振動実験(T2K)、スーパーカミオカンデ、XMASSなどの素粒子実験、そしてCTAなどのガンマ線観測装置やTAなどの原子核宇宙線観測実験などでも、さまざまな角度から新しい物理の兆候を探っています。

このような新しい物理の先には何が待ち構えているのでしょうか。素粒子物理学では、電磁気力、強い力、弱い力がすべて「大統一理論」とよばれる1つの理論によって説明されるべきだと考えられています。この大統一理論をめざし、宇宙の進化を素粒子物理の体系から統一的に理解できるよう研究が進められています。



素粒子の標準模型。

重力波をとらえる

重力波はアインシュタインの重力の理論「相対論」が予測する現象の中で、直接観測できなかった唯一の現象でしたが、ついに検出に成功しました！宇宙空間を伝わるそのわずかな揺れを測定するため、人類のもつ最先端の技術がここに結集します。

重力波望遠鏡KAGRA（かぐら）は、レーザー光を2方向で何度も反射往復させて干渉の様子を観測し、わずかな距離の差を検出するレーザー干渉計型の望遠鏡です。写真は、レーザー光が中を通る真空管。

重力波で宇宙をみる

宇宙はどのように誕生したのか――。重力波をとらえることで、この究極の問いに迫れるかもしれません。可視光、電磁波、ニュートリノと広がってきた天体観測の手段に新たに重力波が加わることで、今まで観測できなかった天体や宇宙の姿が明らかになります。

時間、空間、そして重力はとても身近なものなので、改めてこれらについてじっくり考えてみることは、あまりないかもしれません。日常生活では、重力とは何の関係もなく、時間は淡々と流れてゆき、空間は、たて、よこ、高さの3方向に、はてしなく広がっているように思えます。でも本当にそうでしょうか？

アインシュタインの考えた一般相対性理論では、重力の強いところでは、空間がゆがみ、時間はゆっくり進んでいく、と予測されます。たとえば、2つの重くて小さな星が、お互いのまわりをぐるぐる回っていると、星の重力のために、まわりの時空がゆがみ、星の動きにつれて変化するゆがみが、光の速さでさながらの速さで周囲に広がっていく、と言われています。これが重力波です。

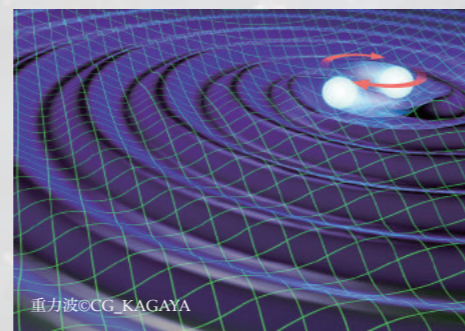
こんな不思議な波が本当にあるのなら、ぜひ、見てみたい、と思いませんか？しかし、重力波がやってきたとして、どうしたらそれが分かるのでしょうか？これまでにいくつかの方法が試されてきましたが、現在では主

に、「重力波が来ると長さが変わる」ことから、2つの鏡の間の長さを、レーザーを使って精密に測ることで重力波を見つけようとしています。鏡の間の長さをずっと測っていると、時々長さがちょっとだけ変わるので、重力波がやって来たことが分かる、というわけです。

それにしても、重力波による長さの変化はどれくらいなのでしょう？重力波の検出までに時間を費やしたことを考えるととても小さそうです。先ほどの、重くて小さな星たちからやってくる重力波の場合でも、太陽と地球の間の長さを水素原子1個分変えるくらいではないか、と言われていました。重力波による長さの変化がこれほど小さいので、他の原因で鏡の間の長さが変わってしまわないように、細心の注意が必要です。宇宙線研究所では、現在、他の機関と協力して岐阜県のトンネルの中に、およそ3キロメートル離して鏡をおき、重力波を見つけようとするKAGRA（かぐら）計画を進めています。鏡を吊ったり、冷やしたり、といろいろな工

夫をしています。アメリカのLIGO計画や、ヨーロッパのVIRGO計画でも、3キロメートルから4キロメートル離しておいた鏡の間の長さを測り続けることで、重力波を観測する仕組みです。

2015年9月14日、アメリカの重力波望遠鏡「LIGO（ライゴ）」の研究チームが、ついに人類史上初めて重力波を検出しました。アインシュタインが存在を予測してから100年も研究者たちが探し求めてきた重力波が、ついに見つかったのです。今後、重力波という新たな宇宙を見る目が開かれ、いままで想像もなかった宇宙の姿が明らかになっていくと考えられています。



重力波©CG, KAGAYA

深宇宙をとらえる

宇宙史最後のイベント「宇宙再電離」の謎を、可視光・赤外線観測でひもときます。

光は宇宙で一番速く伝わりますが、それでも距離が長くなると到達するまで時間がかかります。ずっと遠方から届く光は、ずっと昔に発せられた光ですから、遠くの天体を見れば、宇宙の歴史をさかのぼることができま

す。しかし星は遠ければ遠いほど、見かけ上暗くなり観測が難しくなります。このため、

宇宙137億年の歴史の中でも、大イベントが立て続けに起こったとされる宇宙誕生最初の10億年間は、まだよく理解できていません。

しかし、世界最大級の主鏡を持つ鏡望遠鏡であるすばる望遠鏡や600キロメートル上空で地球を周回するハッブル宇宙望遠鏡、2基の望遠鏡からなるケック望遠鏡など、世界最高感度を誇る大型望遠鏡を駆使し、特別に開発した狭帯域フィルターなど新たな手法を取

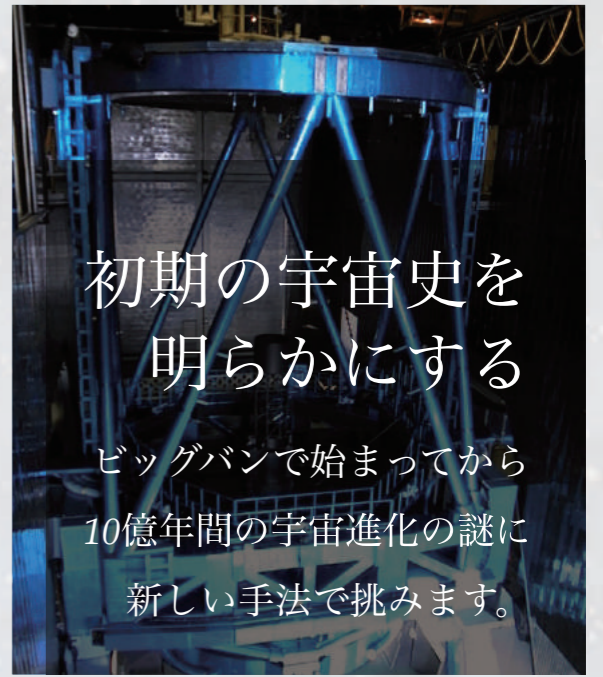
り入れることで、さらに深部の原始銀河を探し出すことができます。宇宙線研究所観測的宇宙論グループでは、このような新たな観測

手法で最深の宇宙の姿を研究しています。現在見つかった最遠の銀河は、誕生からわずか10億年に満たないときに存在した銀河。いったいどのように形成されてきたのでしょうか。

ビッグバンで始まった宇宙は高エネルギーの素粒子が飛び交い光の通ることのできない世界でした。急激な膨張を経て宇宙が冷えると、素粒子は互いに結合し、水素原子がつくれ光が通ることができるようになります。これは「宇宙の晴れ上がり」と呼ばれ、誕生後40万年後に起こりました。

しかしその後、水素原子の電子が再びもぎ取られ、イオン化される「宇宙再電離」と呼ばれる大イベントがおきます。宇宙再電離が起こるためには、電子を水素原子核（陽子）

初期の宇宙史を明らかにする ビッグバンで始まってから 10億年間の宇宙進化の謎に 新しい手法で挑みます。

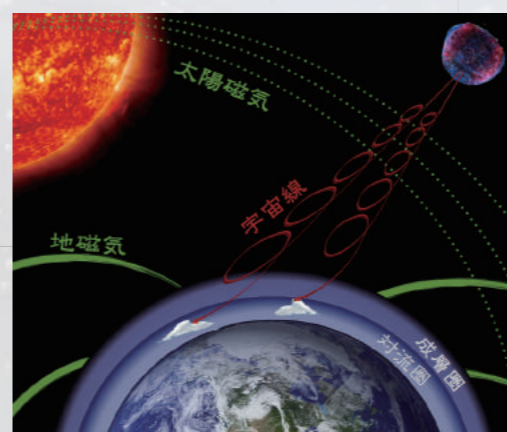


から引きはなすだけの十分なエネルギーの紫外線が存在してはなりません。しかし、現在の観測から見積もられている原始銀河からの放射量は、宇宙全域で起こった再電離を説明するには不十分です。何が再電離を起こしたのか、さらにはどのような過程で起こったのかはまだ分かっていません。この宇宙史最後のイベントを解き明かす研究が現在活発に行われています。

Column 宇宙線でみる地球と太陽系環境

宇宙線は地球の環境にも大きな影響を与えている可能性があります。エネルギーの高い放射線である宇宙線が大気中の分子にぶつかると、イオン化をひきおこしまわりの水蒸気をかき集めて雲をつくりやすくします。つまり宇宙線が多くなると雲が大量に発生して太陽光を反射するので、地球が寒冷化する可能性があるのです。

では、宇宙線の増減を決めているものは何でしょうか。それは、太陽の磁場です。太陽活動が停滞期に入ると太陽磁場も弱まります。それまで太陽系内に侵入しにくかった宇宙線が入りやすくな



り、地球に到達する宇宙線量が増えるという仕組みです。このような宇宙線の増減は、宇宙線がつくる放射性原子核の量を測ることで調べることができます。過去の放射性原子核は木の年輪や南極の氷床などに蓄積されており、これを調べることで詳細な情報を得ることができます。

また太陽近傍の磁場を調べることもできます。太陽の強力な磁場は、宇宙線の到来方向をずらしてしまうので遠方からやってくる宇宙線を調べるためには邪魔になりますが、この到来方向のずれを調べれば、太陽と地球の間の磁場を詳細に調査することができます。これは、宇宙線でみる「太陽の影」の変動を調べることで研究されており、チベット空気シャワー観測装置による14年以上におよぶ太陽の影の観測が大きな役割を果たしています。



宇宙線研究所が所有する樹齢約二千年の屋久杉