

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異なり、物質とほとんど相互作用をしない。そのため、高感度のニュートリノ実験を24時間体制で継続しています。例えば太陽内部の活動を観測することによって、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、現在はまだよくわかっていない爆発の機構の解明のためにも、高感度のニュートリノ実験を24時間体制で継続しています。

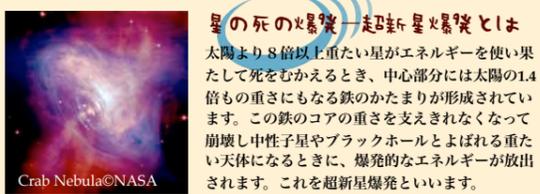
スーパーカミオカンデの発見は、素粒子の標準模型に大きな影響をもたらしてきました。標準模型はニュートリノの質量をゼロとして扱っていましたが、1998年、スーパーカミオカンデグループによる大気ニュートリノ実験により「ニュートリノ振動」と呼ばれる現象が発見され、これが否定されました。

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動することです。ニュートリノには電子型、ミュー型、タウ型という3種類があります。地球の裏側の大气で生成されたミュー型のニュートリノ数とすぐ上空の大气で生成されたミュー型ニュートリノの数を測り、地球を通り抜ける間に数が半減していることが示されました。ニュートリノ振動は質量がなければ成り立たず、



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下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。

標準模型は修正を余儀なくされました。この最初のニュートリノ振動の発見をきっかけに、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つく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、これを決定することで素粒子物理学は大きく進展することが期待されています。



星の死の爆発一起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。

暗黒物質を探す

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、計算が合わないことがわかりました。光では検出することが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。

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。

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かかっています。

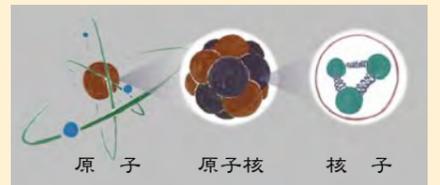
また、暗黒物質どうしが衝突して消滅するときに発するガンマ線やニュートリノをとらえることで、暗黒物質を間接的に探査する方法もあり、極めて重要な実験です。このような暗黒物質探査実験にはCTAやスーパーカミオカンデ実験などがあります。

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」にいぎつきますが、物質が一つにかたまっていられるのも、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。

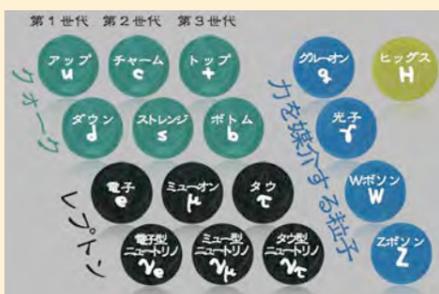


もない宇宙で起きる様々な素粒子現象や物質の起源、暗黒物質・暗黒エネルギーの正体に迫る研究を行っています。

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。

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」の兆候を探す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」と呼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



素粒子の標準模型。