

ニュートリノ変身！ 素粒子から宇宙の謎に迫る

日本原子力研究開発機構J-PARCセンター
理学博士

坂元 眞一

経歴：昭和57年 東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程
博士課程修了、理学博士取得
昭和58年 イギリス、ラザフォード・アップルトン研究所
昭和62年 アメリカ合衆国、ラトガース大学物理学天文学科
昭和63年 東京大学理学部附属中間子科学研究センター
平成9年 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所
平成14年 日本原子力研究開発機構J-PARCセンター
現在に至る

1. はじめに

2015年、ノーベル物理学賞は、日本とカナダで進められてきた素粒子ニュートリノの研究成果に輝きました。“ニュートリノ振動”という新たな現象が発見され、長年、重さが無いとされていたニュートリノに、実は僅かですが重さがあることが判明したのです。これまでの素粒子物理学の常識を覆してしまった“ニュートリノ振動”とは、いったいどのような現象なのでしょう？

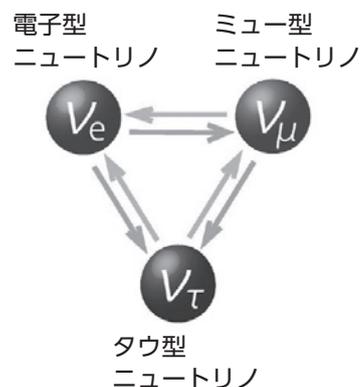
2. 素粒子ニュートリノの存在

素粒子ニュートリノは、幽霊粒子と言われてきたように、なかなか捉えることができない粒子です。20世紀に入り、電荷や質量を持たない粒子、ニュートリノの存在が予言されましたが、実験で確かめられたのは四半世紀も経た1956年のことです。アメリカの物理学者、ライネスとカワンが、原子炉で発生したニュートリノを捉えることに成功しました。その後も加速器を用いた研究が進められ、原子炉でできる電子型ニュートリノとは異なるタイプのミュー型ニュートリノが発見、さらに第3のタイプのタウ型ニュートリノの存在が確かめられたのは、2000年になってからのことでした。

3. ニュートリノ振動の発見

自然界にはニュートリノを発生する源がたくさんあります。その中で最も強力なものが、太陽です。その中心部では水素が核融合反応を起こし、熱と光を生み出すとともに電子型ニュートリノを放出しています。その数は、地球表面で1平方cm当たり、毎秒約660億個と言われています。そのニュートリノを観測していたのが、カナダの

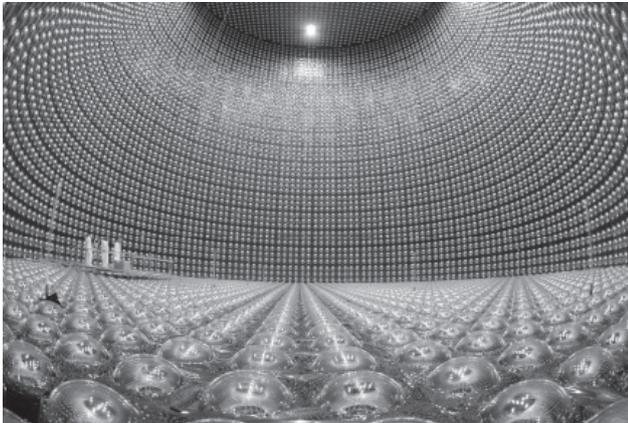
サドベリー・ニュートリノ観測所、地下深くにある直径18mの観測装置です。観測された電子型ニュートリノの数は、計算値の3分の1にしか過ぎませんでした。これは、電子型ニュートリノが地球に届く間にミュー型ニュートリノ、あるいはタウ型ニュートリノに変わってしまったことによるものと結論されました。このように、時間とともにニュートリノのタイプが変わる現象を“ニュートリノ振動”と呼んでいます (図1)。



■ 図1 3種類のニュートリノが時間とともに変身する現象を“ニュートリノ振動”と呼びます

宇宙線が地球の大気と衝突して電子型ニュートリノとミュー型ニュートリノを発生することも知られています。そのニュートリノを観測していたのが岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデです。地下1000mに設置され、5万トンの超純水と11,146本の高感度光センサー、光電子増倍管からなる世界最大のニュートリノ観測装置です (図2)。
日本の上空で発生したニュートリノは、スーパーカミオカンデに到達するまでにはおよそ10kmしか飛行しませんが、地球の裏側で発生したニュートリノは地球の中心を通り抜け、スーパーカミオカンデまでおよそ13,000kmも飛んできます。その二つの方向から飛んでくるミュー型ニュートリノの数を比較すると、地球の反対からのミュー型ニュートリノの数は、半分程度にまで

減少していることが判明しました。これは、ミュー型ニュートリノが、スーパーカミオカンデでは観測できないタウ型ニュートリノに変身したものと分かりました。



■ 図2 スーパーカミオカンデの内部には、5万トンの超純水を蓄えるタンク内部に11,146本の光電子増倍管が整然と据え付けられています（画像提供：東京大学宇宙線研究所）

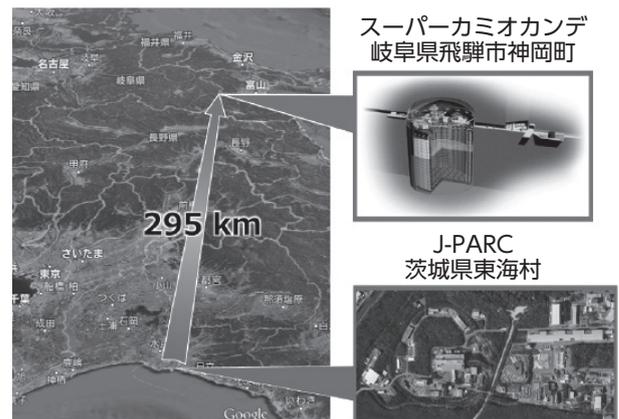
4. ニュートリノ振動と質量

この2つの観測結果から、“ニュートリノ振動”が起こっていることが確実となり、昨年、梶田隆章氏とカナダのアーサー・マクドナルド氏がノーベル物理学賞を共同受賞しました。質量の無い粒子は、常に光の速度で飛び交います。そのような粒子にとっては、時間が完全に停止しています。これは、アインシュタインの特殊相対性理論の教えるところですが、これまで考えられていたようにニュートリノに質量が無いとしますと、ニュートリノにとって時間が止まっており、ニュートリノのタイプが変わるといふ振動現象は起きません。ニュートリノが時間とともに振動することが確認されたということは、何よりもニュートリノは質量を持っている証拠となります。この発見は、ニュートリノだけではなく、素粒子の全体像を覆す画期的な成果と言えます。

5. ニュートリノ研究の今後

これで、ニュートリノ振動の研究は終わった訳ではありません。私たちの宇宙は、ビッグバンで始まったと考えられています。巨大なエネルギーの塊から、粒子とその反物質である反粒子が、同数生成されていきました。しかし、今日の宇宙は物

質だけから形づくられています。いったい何が起こったのでしょうか。宇宙生成の初期の段階で、粒子と反粒子の振る舞いに10億分の1程度の僅かな違いが生じるようになり、粒子の数が反粒子の数を少しだけ上回りました。この僅かな違いが累積していき、やがて反物質は姿を消していったのです。この宇宙を形成する主要な素粒子の一つがニュートリノです。そのため、宇宙の成り立ちを研究する上で、ニュートリノとその反物質である反ニュートリノの振る舞いの違いを究めることが極めて重要になります。この研究のためには、ミュー型ニュートリノと反ミュー型ニュートリノを区別して調べないといけません。それができるのは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設J-PARCです。世界最高レベルの加速器で大量のニュートリノを生成し、295km離れたスーパーカミオカンデに向けて発射します。（図3）



■ 図3 茨城県東海村のJ-PARCからニュートリノをスーパーカミオカンデに向けて発射、295kmの飛行中でのニュートリノ振動を観測する壮大な実験です（画像提供：東京大学宇宙線研究所、J-PARCセンター）

2010年から2013年までのミュー型ニュートリノの実験で、J-PARCで生成したミュー型ニュートリノの約5%が、スーパーカミオカンデに到達するまでに電子型ニュートリノに変身していたことが確認されました。ノーベル賞研究を更に大きく進めた偉大な成果です。現在、反ミュー型ニュートリノを生成し、それが反電子型ニュートリノに変身する様子を調べる実験を進めています。その振動の確率に差が見つかれば、宇宙の始まりの謎に迫る貴重な手がかりとなるものです。素粒子の研究から宇宙の謎の解明へ、ますます目が離せなくなります。