



# 東京大学宇宙線研究所

## 1 はじめに

宇宙は今から約 137 億年前という気の遠くなるような昔に誕生し、今なお膨張し続けている。その広大な宇宙には数えきれないほどの銀河が存在し、そのうちの 1 つ、われわれの住んでいる天の川銀河の中にはさらに数千億という天体が存在している。それらさまざまな天体からは地球に向かって「宇宙線」と呼ばれる放射線が降り注いでおり、今こうしている間にもわれわれの体を通り抜けている。

宇宙線に興味を持った私たちは、「宇宙線を総合的に研究する世界唯一の機関」である東京大学宇宙線研究所を訪問。同所展示物を中心に見学して、伊藤英男先生に各研究の概要をご説明いただいた。なお、2011 年 6 月のメカライフ特集号では、同所付属神岡宇宙素粒子研究施設を訪問させていただき、スーパーカミオカンデの実験施設を紹介させていただく予定である。二号併せてお読みいただけたら幸いである。

## 2 東京大学宇宙線研究所の概要

東京大学宇宙線研究所では、宇宙線物理学における三つの大きな問題を解決するために日々研究をしている。その三つとは

- (1) 宇宙線はどこから来るのか
- (2) どうやって加速されるのか
- (3) 加速限界はあるのか

という命題である。宇宙線を調べることによってこれらの問題を解決し、宇宙物理学のさらなる進展ひいては人類の科学の発展へ貢献している。

東京大学宇宙線研究所は、1950 年に朝日学術奨励金で建てられた乗鞍岳の朝日小屋が前身である。これが

1953 年に東京大学宇宙線観測所となり、1976 年に同じような研究をしていた東京大学原子核研究所宇宙線部の 3 部門が吸収されて、現在の東京大学宇宙線研究所になる。1987 年には神岡において世界で初めて超新星からのニュートリノを捕え、1992 年にはオーストラリアにおいて超高エネルギーガンマ線を観測した。1996 年にはニュースで話題となったスーパーカミオカンデが完成。ニュートリノに質量があることを発見した。2010 年 4 月 1 日からは新たに共同利用・共同研究拠点と認定されている。

## 3 宇宙線って何？

宇宙といえば真空というイメージがあるが、星と星の間の空間に何も無いのかというとそうではない。そこには原子核や素粒子の仲間があちこちで飛び交っている。その中でもとくに電離作用を持つ高いエネルギーを持ったものを放射線と呼び、放射線の中でも地球に降り注ぐものを宇宙線と呼んでいる。また、宇宙線は地球に降り注ぐとき大気中の酸素や窒素と反応してミュオン、ニュートリノ、電子、ガンマ線、中性子といったものに変化する。このように地球に飛び込んできて変化したものを二次宇宙線、変化前のものを一次宇宙線と呼ぶ。

宇宙線の多くは初めから宇宙空間に存在しているのではなく、さまざまな天体現象から生まれていると考えられている。たとえば太陽の 8 倍以上の質量を持つ巨大な星が寿命を迎えると、超新星爆発と呼ばれる非常に大きな爆発を起こす。そのとき、まるでダイナマイトが粉じんをばらまくかのよう、星は構成していた粒子をばらまく。そしてそれらが宇宙線として、遙か彼方の地球にまで及ぶのだ。これが最も大きな宇宙線の源となる天体現象

だが、ほかにも活動銀河核、すなわち若い銀河の中心に存在すると考えられているブラックホールが宇宙線を放出することもある。ブラックホールと言えば、光すらも吸い込むという話は多くの方が聞いたことがあると思うが、実は吸い込むだけではなく放出も行っている。それをジェットと呼び、ブラックホールをコマに見立てると回転軸の方向に向かって物質を吐き出している。その向きがたまたま地球の方角を向いていたとき、地球では高エネルギーの宇宙線が観測されるのだ。

こういったさまざまな天体現象から放出される宇宙線を調べると、われわれの住んでいるこの宇宙の成り立ちや、はたまた眼には見えない素粒子の世界のことまでいろいろなことがわかる。それでは宇宙線についていったいどのような研究がなされているのか、いくつかかいつまんで紹介しよう。

## 4 巨大な基盤で宇宙をにらむ！ —テレスコープアレイ実験—

宇宙を観測していると、ときおりものすごいエネルギーを持った宇宙線が観測される。その源には超新星爆発や活動銀河核、パルサなどが考えられているが、実際のところはよくわかっていない。テレスコープアレイ実験はその原因を探るべくアメリカのユタ州で行われている実験で、その目的は極高エネルギーの宇宙線を観測し、加速機構や加速限界、すなわちどのようにしてそれほどの極高エネルギーを得たのか、またその上限はあるのかを調べることだ。

この実験の最大の特徴は、実験装置の設置面積にある。その面積はなんと 700km<sup>2</sup> で、これは日本最大の湖の琵琶湖よりも広い面積である。この敷地内に 1.2km 間隔で 507 台の観測装置を基盤の目のように格子状に設置し、宇宙線を観測するのだ。これほど



図1 テレスコープアレイ実験で使われるプラスチックシンチレータ

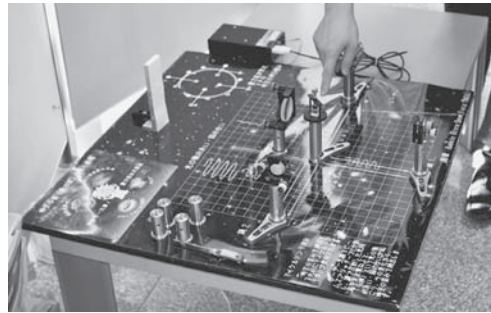


図2 小型のマイケルソン干渉計

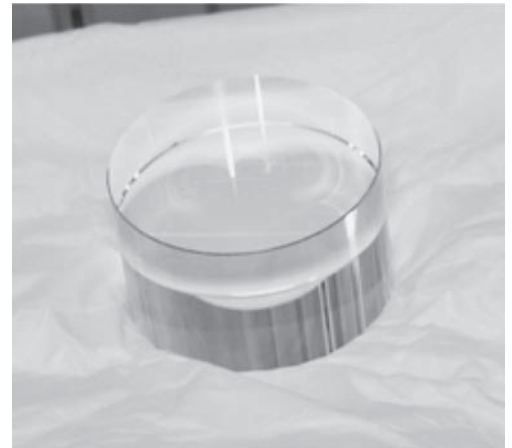


図3 重力波実験に用いるサファイア鏡

広大な土地を利用するには理由がある。宇宙線は大気と反応することで二次宇宙線と呼ばれるものになるが、このとき宇宙線はシャワーのごとく広範囲に広がりながら降り注ぐ。これを「空気シャワー」と呼ぶ。一般に高エネルギーの宇宙線ほど空気シャワーは広がってしまうので、極高エネルギーの宇宙線を測定するには相当な広範囲にわたっての観測が必要となるわけである。

ここでの宇宙線の観測にはプラスチックシンチレータというものをを用いる(図1)。ここに宇宙線が入ってくるとプラスチックが淡く光り、それを内蔵した光ファイバーと光電子増倍管によって検出するという次第だ。このような検出を設置したすべての検出器で行うのだが、お互いが離れすぎているため、それぞれの検出器は太陽電池によって独立に稼働しており、無線LANによってつながっている。また、これらの地表検出器のほかに、大気蛍光望遠鏡と呼ばれる望遠鏡が3か所に設置してある。これは大気中の空気シャワーの周囲が蛍光灯と同じような原理で光ることを利用し、それを光電子増倍管によって検出する装置だ。地表と大気中、両方を観測することで、

精度を向上させているのだ。

## 5 一般相対性理論は正しいのか？ 一重力波実験一

かの有名なアインシュタインの一般相対性理論によれば、質量のあるものが加速運動すると「重力波」と呼ばれる波が発生するらしい。この波を検出しようと今世界中で競争が行われている。しかしながら、未だに検出例はない。この波は空間をゆがませながら、あらゆるものを貫通して進んでいく。その名前のイメージからなんとも重々しい感じがするが、その波は非常に小さなものだ。重力波の検出には空間のゆがみ、すなわち変位を測定するのだが、その変位は太陽-地球間距離が水素原子1個分変わる程度。このような超々微小な変位を検出する装置が完成していないのだ。

これほど小さな変位だと、並大抵の装置では観測ができない。そこで用いられるのがマイケルソン干渉計だ(図2)。マイケルソン干渉計と言えば2本の光の光学的距離の差によって干渉縞を出す装置だが、ここでは「二物体間の距離が重力波によって変化する」という性質を利用して重力波を検出す

るのに用いる。重力波によって空間がゆがめばマイケルソン干渉計の二つの光路はわずかに変化する。その変化によって干渉縞ができ、重力波が通ったことを観測できるという仕組みである。しかし、写真に示すような小型の装置では重力波のような極微小な変位はとても検出できない。そこで神岡鉱山に建設されているのが3kmの腕の長さを持つ巨大なマイケルソン干渉計である。光の経路が長いほど精度がよくなるため、これほど大きな装置となるのだ。また、この装置は精度を極限まで向上させるため、 $-253^{\circ}\text{C}$ という極低温にまで冷やしたサファイアを光学素子として用いている(図3)。これは、熱振動による影響を減らすためと、サファイアが低温で機械的損失が減るといった性質を持っているからだ。図4に示すのは柏キャンパスに置かれていたサファイア鏡の冷却装置。神岡の施設には直径2mのものが設置される。とにかく小さな変位を測定しなくてはならないため、振動は大敵なのである。

重力波が測定可能になると、これまでX線などでは測定が不可能であった天体現象について何かわかるかもしれない。また、重力波の検出は宇宙物



図4 サファイア鏡の冷却装置



図5 スーパーカミオカンデに取り付けられている直径50cmの光電子増倍管

理学の理論の証明にもなる。たとえばビッグバンによって宇宙が誕生したというのはどこかで耳にした方も多いと思うが、実はそれ以前に生まれたばかりの極小宇宙が突然加速的に膨張を始めたとするインフレーション理論がある。インフレーションは現在さまざまな観測から間接的にはあるが、起こっていたであろうことが示唆されている。これの詳細な情報を、重力波を検出することで得ることができるかもしれないのだ。このような途方もない理論が重力波実験によって立証されれば、宇宙物理学は新たな局面を迎えることになるだろう。

## 6

### ニュートリノを捕えた！ —スーパーカミオカンデ—

岐阜県神岡町の神岡鉱山の地下1000m. そこには超純水約5万tを蓄え、11200個の光電子増倍管の目によって監視されている巨大な円筒状の水槽がある。ノーベル賞のニュースで一躍有名になったカミオカンデの後継機、スーパーカミオカンデである。スーパーカミオカンデではニュートリノの観測を行っている。

ニュートリノは普段生活している間にもわれわれの体を大量に通るだけ、その量は太陽から降り注ぐものだけでも1cm<sup>2</sup>というわずかな面積に1秒当たり660億個という数にのぼる。それでは被爆しているのではないかと思ってしまうが、その心配はない。なぜならニュートリノはほとんどのもの

を素通りしてしまうほど他の物質と反応しないのだ。その理由は、電荷を持たないためであり、地球の裏側から地中を通して来たニュートリノすら観測できるほどである。そんななんでも素通りしてしまう物質をとらえるため、スーパーカミオカンデは大量の水を蓄えている。この巨大な水槽にニュートリノが飛び込むと、ごくまれにチェレンコフ光と呼ばれる光が観測される。これはニュートリノが極低確率で水分子と反応することで放出される光だ。これを直径50cmという巨大な光電子増倍管(図5)で捉える。つまり、下手な鉄砲も数撃たば当たる、というのをじっと待つ実験なのだ。

ニュートリノが3種類あることは、あまり知られていない。それぞれ電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという名前が付いており、電子、ミューオン、タウオンという素粒子と対になっていることからこれらの名前がついている。つまり、たとえば水分子と反応した場合、ニュートリノはそれぞれの対となる粒子に変換されてしまうのである。スーパーカミオカンデで検出している光は、これらの対となる粒子が放出されて水槽中を走ることによって放たれたものである。つまり間接的にニュートリノを見ているのだ。また、3種のニュートリノはそれぞれ入れ替わってしまう性質を持っている。それがニュートリノ振動と呼ばれる現象である。実は「ニュートリノには質量がある」という証明には、この現象を利用

している。前述したようにニュートリノは地球ですら貫通してしまうから、地球の反対側から飛んできたニュートリノも観測できる。そこで、宇宙線が地球大気と反応を起こして生まれたニュートリノに関して、地球の反対側から地球を貫通してきたニュートリノと上空から飛んできたニュートリノを比べてみたところ、その組成、すなわち飛来しているニュートリノの各種類の量に違いがあった。ある種のニュートリノが地球を通過中に、ニュートリノ振動によって別のニュートリノになってしまったことで、この差異は生まれたのだ。ニュートリノ振動はニュートリノに質量があるときにしか起きないため、この実験がニュートリノに質量があるという証明になった。

では、ニュートリノを調べると何がわかるのか。その応用例の一つに太陽活動の調査が挙げられる。太陽は内部で核反応を起こして輝いているが、内部の活動が表面に出てくるまでに10万年もかかってしまう。つまり、可視光では10万年前の状況しかわからない。ところが、ニュートリノはなんでも通過してしまうので、わずか8分後には現在の太陽の状態がわかってしまう。また、太陽以外にもはるか彼方の天体現象などを調査するのに役立つ。なぜならニュートリノは電荷を持たないので磁場の影響を受けず、また他の物質と反応する確率が非常に小さいので、あらゆるものを通り抜けて地球まで到達する。したがって、純粋なデータが観測できる。ニュートリノと

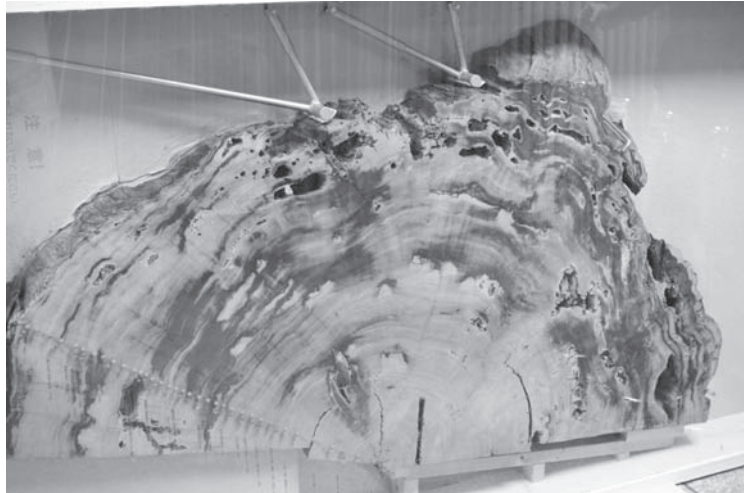


図6 年輪に宇宙線の痕跡を刻んだ屋久杉

は宇宙の情報の運び屋なのだ。

## 7 三つの力を統合する —大統一理論—

機械系のわれわれにとって「ちから」と言えばニュートンの運動第2法則であると思う。その「ちから」というものの本質を考えていくと、微視的な世界での現象に繋がる。微視的な世界の法則を記述している素粒子論の世界では、この世界には4種類の基本的な力があるという。基本的な力という意味は、すべての物理現象は、もとを辿れば必ずこの四つの力による影響に帰着できるからである。比較的なじみのある重力、電磁気力に加えて、弱い力と強い力と呼ばれる力である。弱い力とは原子核の崩壊の原因となる力、強い力とは陽子や中性子を原子核に押しとどめる力を生み出す原因となっているもので、宇宙創成のときこれら四つの力は一つであったと考えられている。このうち弱い力と電磁気力は電弱統一理論によって統合されたが、大統一理論ではさらに強い力も取り込もうとしている。この理論では陽子崩壊、すなわち寿命が無限と思われている陽子がいつかは崩壊すると予言している。実はカミオカンデの一番の目的はこの陽子崩壊の観測であった。水槽内の大量の陽子を観察していれば、いつかは崩壊するのではないかと考えられていたのだ。しかし、残念ながらスーパーカミオカンデに引き継がれた今に至るまで、まだそのような現象は観測

されていない。現在では、何かしらの機構が働いて陽子の崩壊を食い止めているのではないかと考えられている。

## 8 暗黒物質を見る！ —XMASS 実験—

この宇宙において現在われわれがよく知っている物質はわずか4%にすぎないことをご存じだろうか。残りのうち23%は暗黒物質(ダークマター)、73%はダークエネルギーで、既存の技術では観測不能な謎の物質で宇宙は満ちている。XMASS 実験ではこの謎の物質「暗黒物質」を検出しようとしている。

暗黒物質とはその名のとおり、真っ暗で何も見えない物質である。それどころか、いかなる電磁波を用いても観測できないのだ。暗黒物質はさまざまな観測から間接的にその存在が示唆されているものの、直接観測は未だなされていない。それは電荷を持たず、安定な物質であり、他の物質と反応する確率が極めて小さいためと考えられている。そこでXMASS 実験では感度を上げるため、水の代わりに液体キセノンを用いる。基本的な原理はスーパーカミオカンデと一緒に、暗黒物質が入ってきたときに液体キセノンと反応して放出される光を検出する。この実験で用いる装置は既存のものとは比べて約50倍の精度を誇るため、世界初の暗黒物質の観測成功が期待されている。

暗黒物質の存在が確認されると、宇

宙の成り立ちの一部がわかるという。現在の宇宙は銀河や銀河団(複数の銀河が重力で集まったもの)、何も無い空洞などが複雑に連なった大規模構造を取っているが、それは初期の宇宙に存在した暗黒物質のわずかなゆらぎが成長したものと考えられている。また、遠方銀河等を観測する際に起こっている重力レンズ効果の原因としても説明がつく。虫めがねのようなものは、レンズによって光が曲げられるが、重力レンズでは巨大な質量によって空間が曲げられるのにつられて光が曲がる。しかし、現在観測されている重力レンズ効果は、そこに存在しているであろう天体をX線などで測定した質量のみでは説明がつかないほど光が曲げられている。これはX線では測定できない質量、すなわち暗黒物質が存在しているのではないかと考えられているのである。

## 9 屋久杉で太陽がわかる!?

同所では屋久杉を使った面白い研究がされている。なんと屋久杉を調べることで過去の太陽活動がわかるというのだ(図6)。

高エネルギー宇宙線が大気分子に衝突すると、中性子がはじき出され、それが窒素原子核にぶつかることで陽子が2個はじき出されて炭素14となる。この炭素14は空気中の酸素と反応して二酸化炭素になり、それが屋久杉に取り込まれる。つまり、宇宙線が



図7 シンチレーション検出器との集合写真（後列右から2人目が伊藤先生）

降り注ぐと炭素 14 が屋久杉に取り込まれるということだ。一方、宇宙線の量と太陽活動には密接な関係がある。もし太陽が活発に活動していれば、太陽風というプラズマのバリアによって地球は包まれることになる。すると地表に降り注ぐ宇宙線の量は減るのだ。そこで年輪ごとに含まれる炭素 14 の量を調べることで、その時代の太陽活動の状況を調べよう、というのがこの研究である。

また、年輪を調べることで当時の気候も知ることができる。最近の調査では、炭素 14 によって予想される太陽活動の履歴と、過去の地球の気候変動にはある種の相関関係が見出されている。もしかすると近い未来、太陽活動によって将来の地球の気候が予想できるようになるかもしれない。

## 10 インタビュー

### メカライフ学生委員（以下、委員）

宇宙物理学や量子力学などでは難しい理論がたくさんありますが、それはどうやって検証しているのですか。

**A** それは、理論を構築した人が、まずその理論特有の現象を予言します。それでその現象を実験的に再現できれば、理論は正しかったと、そういった具合に検証します。

**委員** 実験方法などは実験屋さんが考

えるのですか。

**A** いえ、少なくとも一部は理論屋の仕事です。こういった実験をやればこういう現象が見られるはずだ。だからやってくださいと、実験屋の人をお願いします。

**委員** では、実験装置自体の研究といったものは……。

**A** それは実験屋さんの仕事です。加速器実験などの巨大な構造物になると構造設計ができないといけないので、そういった現場では機械系の方も多く働いています。

**委員** 話は変わりますが、今の技術力で検証ができないものはありますか。

**A** あります。インフレーションという、ものすごく急激な膨張期が宇宙誕生のときにあったと考えられているのですが、そのころの宇宙はごちゃごちゃしていたので当時の光が地球に到達しません。そのため、検証が難しいのです。さまざまな理論は出ているが、確認できないというのが現状です。

**委員** 宇宙の起源がわかったとして、それはこういった形で社会に還元されるのでしょうか。

**A** 直接的に社会に還元するものは、ないのかもしれませんが、でも、その過程で生まれる副産物には、価値のあるものがたくさんあります。実際、たとえば重力波実験で使用するレーザによる高精度な測定技術は、医療関係に役立つでしょうし、振動に関する技術は、

地震研究にも役立っています。

また、これは技術というより科学の在り方の話になりますが、第2次世界大戦以前は、戦争が新しい技術を生み出す母体になっていました。でも、それではいけない。戦争ではなく、何か別の目的をもって科学を進歩させなくてはならない。そのために、われわれのように巨大プロジェクトを立てて、その過程でさまざまな新技術を生み出していかねばなりません。

また私は、科学の裾野を広げることも大切だと考えています。そうしておけば、新しい難問に直面したとき、幾つかの研究分野が共同することで新たな技術が生まれ、その難問を解決できるかもしれない。もし、実用的でない、というような理由で規模を縮めてしまうと、裾野が狭くなって新しい技術が生まれにくくなる。そういった意味でわれわれの研究というのは大事なものだと思っています。

## 11 おわりに

インタビューの後に、説明していただいた伊藤先生と一緒にシンチレーション検出器の前で写真を撮らせていただいた（図7）。宇宙線についてあまり知識のなかったわれわれだが、今こうしている間にも、宇宙線がわれわれの体を通り抜けていることを知り、身近な存在と捉えるようになった。また、重力波実験や XMASS 実験など、世界トップレベルの技術について知ることができたのは、非常に貴重な経験となった。

最後になったが、今回の見学で施設の説明をしていただいた伊藤先生に、深く御礼申し上げる。機械系のわれわれに、宇宙線物理学の概要を大変わかりやすく説明していただいた。次回はいよいよ神岡宇宙素粒子研究施設を訪問する。ご期待いただきたい。

（メカライフ学生編修委員 近藤瑠歩、市川賀康、猿木恭文、末永晃一、田中文、中村恭子、益子雄太郎、山本篤史）