

ニュートリノで挑む宇宙誕生の謎

京都大学 理学部 中家 剛

1. 宇宙誕生の謎 — 消えた反物質 —

「無限に広がる大宇宙…」、という有名なナレーション。筆者が昔よく見たTVアニメの冒頭にかかるセリフを聞き、小さい頃から宇宙のことをもっと知りたいと思っていました。人類は太古から、夜空を見上げ、そこに広がる無限の空間と無限とも思える数の星々の輝きに魅せられてきました。

そして我々は現在、最先端科学を駆使して、宇宙はどのように誕生し今に至るのかを研究しています。

「宇宙誕生の謎」は科学の発展と共に理解がどんどん進んできたのですが、それと共に更なる謎がたくさん出てきました。今日、

我々の宇宙はインフレーションに始まり、ビッグバンを経て、元素が生まれ、星や銀河が誕生してきたことがわかっています(図1参照)。しかし、それと同時に大きな謎に直面しています。その謎とは

1. ビッグバン直後には、物質の元となる粒子と、反物質を作る反粒子が同じ数だけ作られたはずなのです。しかし、現在の宇宙には反物質が存在しません。いつ、どのようにして反物質(反粒子)は消えたのでしょうか。
2. 宇宙にある物質を調べていると、目に見えない、未解明の「暗黒物質」が大量に存在していることが分かりました。この「暗黒物質」が何なのかは、現在の素粒子物理学では分かっていません。
3. 宇宙空間全体が加速しながら膨張していることが分かりました。そして、宇宙には正体不明の「暗黒エネルギー」があることが分かりました。「暗黒エネルギー」とは何なのかもよく分かりません。

これらの謎を解明したいと考え、多くの研究者が挑んでいます。まだ決定

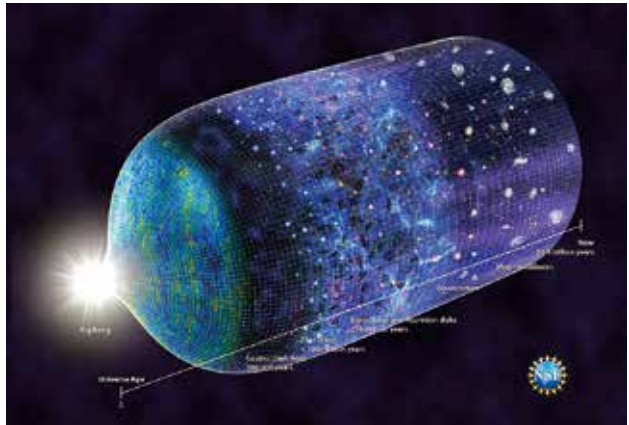


図1. 宇宙誕生から現在まで

(クレジット:N.R.Fuller, NSF)

打はありません。今回、私の行っている実験グループが謎1「消えた反物質」の手がかりになるかもしれない結果を得ることに成功しました。以下で、簡単に「消えた反物質」の謎、その謎と関係しているかもしれない「ニュートリノ」という素粒子、そしてその「ニュートリノ」を探る「スーパーカミオカンデ実験」と「T2K実験」を紹介します。

2. 素粒子と宇宙

宇宙は、そして我々を含め万物は素粒子からできています。今、分かっている素粒子は図2の通りです。物質を作っているクォークとレプトン、それに力を伝えるゲージ粒子、質量を与えるヒッグス粒子があります。

我々のよく知っている光は光子(Photon)という素粒子で電気や磁気の力を伝えるゲージ粒子です。電子はレプトンと呼ばれる素粒子の一種です。実は、この表にある素粒子には、対となる反粒子が存在しています。電子の反粒子は、陽電子と呼ばれるプラスの電荷をもった素粒子で

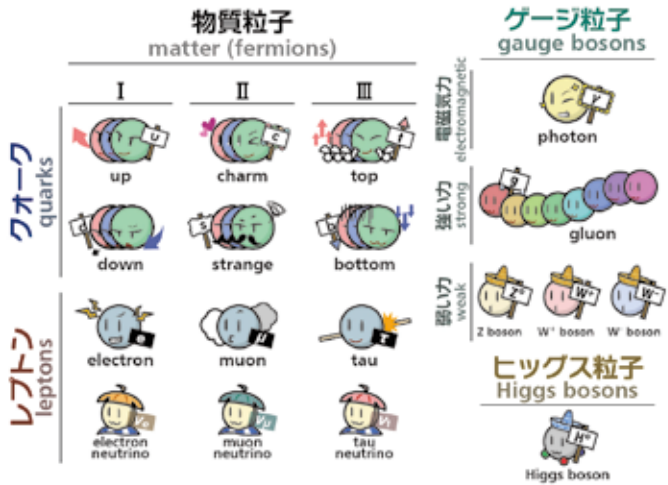


図2. 素粒子(ひっくすたん [HiggsTan] より) <http://higgstan.com>

す。同様に、我々の知っている物質にも、その電荷が反対の反物質が存在します。実は、反物質があると大変なことになります。物質と反物質が出会うと消滅してしまうのです。もし、反物質が宇宙に残っていると物質と反物質とで消えてしまい、星も生命も存在しなくなってしまいます。

宇宙の誕生の直後に、物質と反物質の間（正確には、粒子と反粒子の間）で少しだけ不均衡があり、100億個の粒子に対して、(100億-1)個の反粒子が出会って消滅した結果、1個の粒子だけが生き残り我々の宇宙を作ったと考えられています。この粒子と反粒子の間の不均衡を「CP対称性の破れ」と呼び、研究者はこの「CP対称性の破れ」を探しています。実は、クォークにおいて「CP対称性の破れ」が発見されていて、その理論を作った小林・益川先生が2008

年にノーベル賞を受賞されています。ただし、小林・益川先生の説明した「CP対称性の破れ」では宇宙誕生につながる「消えた反物質」の謎は説明できないため、他にも「CP対称性の破れ」があるはずだと研究者は考えています。

3. ニュートリノ

では、新しい「CP対称性の破れ」はどこにあるのでしょうか？我々は、クォークと別の素粒子であるレプトン、特にレプトンの中の「ニュートリノ」にその「CP対称性の破れ」があるのではと考え、研究しています。

まず、ニュートリノについて紹介します。ニュートリノは、電子の仲間で、電荷を持たない電子と考えてください。ニュートリノは宇宙中にたくさん存在し、光子に次いでたくさんある素粒子と考えられています。ただし、電荷を持たないため、捕まえるのがとても難しく、まるで幽霊のようだと考えられ、「幽霊粒子 (Ghost Particle)」というニックネームが付いています。日本は、この幽霊粒子ニュートリノの研究で世界トップを走っています。宇宙からのニュートリノを捕まえたことで小柴昌俊先生が2002年にノーベル物理学賞を、ニュートリノの質量を発見したことで梶田隆章先生が2015年にノーベル物理学賞を受賞しています（図3参照）。また、この発見につながったニュートリノ実験装置「カミオカンデ」と「スーパーカミオカンデ」もよくテレビや新聞で紹介されています。



図3. ニュートリノ研究でノーベル賞を受賞した小柴先生と梶田先生(2015年10月6日産経ニュース『先生は怖かった』師匠・小柴昌俊さんとつかんだ栄誉』より)

梶田先生が行っていたスーパーカミオカンデ実験で「ニュートリノ振動」というニュートリノの種類が変わる現象が発見されました。この「ニュートリノ振動」の起こり方が、ニュートリノとその反粒子（反ニュートリノ）で異なるのではと考えられています。

4. スーパーカミオカンデ

ニュートリノは非常に捕まえにくく、ニュートリノを捕らえるためには巨大な実験装置が必要です。ニュートリノ観測装置「スーパーカミオカンデ」は5万トンを使い、ニュートリノが稀に水と反応した時に出す光（チェレンコフ光）を壁に取り付けた光センサーで捉えます。スーパーカミオカンデの内側の写真が図4です。壁には、直径50cmの光電子増倍管とよばれる光セン

サーが1万個取り付けられています。ボートに乗った人から、スーパーカミオカンデの大きさが見て取れます。スーパーカミオカンデは、宇宙から降り注ぐ宇宙線とよばれる放射線を避けるために、山の下1000mの地下に設置されています。場所は岐阜県飛騨市神岡町にあり、1年365日観測を行なっています。

スーパーカミオカンデでは、宇宙からのニュートリノ、大気からのニュートリノ、そして加速器と呼ばれる装置で作った人工ニュートリノを観測し、数々のニュートリノの謎を解明してきました。

今回、人工ニュートリノを使った実験で、ニュートリノにおける「CP対称性の破れ」のヒントが見つかりました。

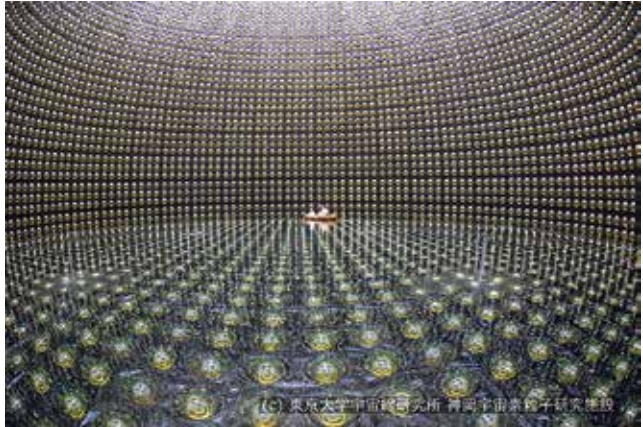


図4. スーパーカミオカンデ実験装置(東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設提供)

5. ニュートリノビームとT2K実験

スーパーカミオカンデはニュートリノを観測する装置ですが、実験にはニュートリノを発生する装置が必要です。我々は茨城県東海村にあるJ-PARCと呼ばれる陽子加速器で非常に強力なニュートリノビームを発生させ実験しています。図5はニュートリノビーム発生装置の写真です。

実験は東海村でニュートリノを発生し、神岡町で観測することから、Tokai-to(2)-Kamiokaの頭文字からT2K実験と名付けられました。T2K実験では、大強度の陽子ビームから発生するミュー型ニュートリノをビームにして、神岡に向けて発射します。東海から神岡までの距離は295kmで、なんとニュートリノビームが図6のように日本を横断しています。



図5. ニュートリノビーム発生装置(T2K実験提供)

T2K 実験で、ミュ
ー型ニュー
ートリノが電
子型ニュー
ートリノに
振動する
第3の「ニ
ュートリ
ノ振動」



図6. T2K実験:東海から神岡へニュートリノを！

を2013年に発見しました。これは梶田先生のノーベル賞に続く大きな発見でした。さらに面白いのは、このニュートリノ振動では粒子と反粒子で違っている可能性があることです。このため、T2K実験では2015年からニュートリノの反粒子である反ミュー型ニュートリノでニュートリノ振動の測定を開始しました。2018年の夏に、ニュートリノと反ニュートリノの振動を比べると、ニュートリノの方がたくさん振動しているという「CP対称性の破れ」のヒントを世界で最初に見つけました。まだ、「発見」と言えず、「ヒントを見つけた」と控えめに言っているのは、その可能性が95%だからです。物理の発見は、間違いがないように99.9%まではっきりさせる必要があります。このため、T2K実験はさらなるデータの追加と、実験装置の改善を進めています。

6. ハイパーカミオカンデ

T2K実験で見つかりそうな「ニュートリノのCP対称性の破れ」をより正確に測定するにはどうすればいいでしょうか？現在、研究者が提案しているのは誕生後25年たったスーパーカミオカンデの後継となる、新型のニュートリノ観測装置ハイパーカミオカンデを神岡に作る

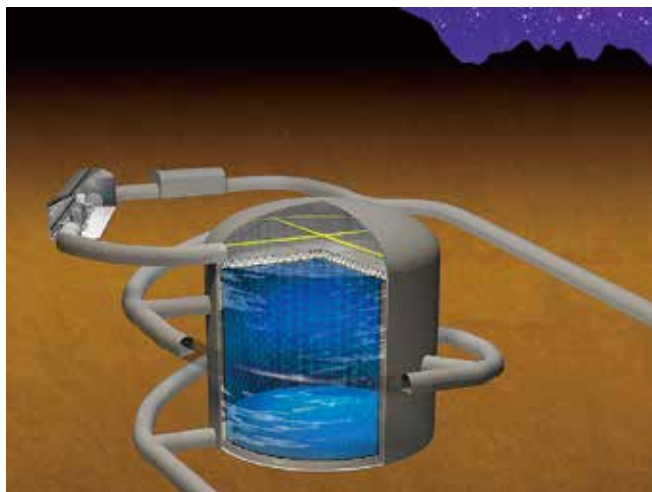


図7:ハイパーカミオカンデのイメージ図(ハイパーカミオカンデ実験提供)

ことです。ハイパーカミオカンデは、その大きさと性能がスーパーカミオカンデの10倍となります。よって、今まで10年かかっていた実験が1年でできるようになり、世界のニュートリノ研究がより一層加速すると考えられています。「ニュートリノのCP対称性の破れ」の謎を解いたり、「超新星ニュートリノの観測」とか多くの研究成果が期待されています。

さらに、ハイパーカミオカンデでは、究極の素粒子理論「大統一理論」の発見が期待されています。大統一理論では、万物の構成要素である「陽子」が壊れると考えられており、ハイパーカミオカンデでの発見が待たれています。ハイパーカミオカンデにより、素粒子や宇宙の研究がより一層発展することが期待されています。

7. さらに、その先へ

T2K実験やハイパーカミオカンデ実験で「ニュートリノのCP対称性の破れ」が発見されれば、宇宙誕生の「消えた反物質」の謎が解明されるのでしょうか？実は、それほど簡単ではありません。「ニュートリノのCP対称性の破れ」が「消えた反物質」の謎を説明できる可能性はあるのですが、別の理由があるかもしれないのです。よって、宇宙誕生の謎を解明するにはまだまだ研究が必要です。

今回は話していませんでしたが、謎2「暗黒物質」や謎3「暗黒エネルギー」の正体も見つけないといけません。特に、今は別々の謎と考えている「消えた反物質」と「暗黒物質の存在」も密接に関係しているかもしれません。「暗黒物質」にも「CP対称性の破れ」が関係していて、宇宙誕生の物語はもっと複雑かもしれません。いろいろ考えていくと、宇宙にはまだまだ未解決な問題がたくさんあり、ワクワクしてきます。

著者紹介 中家 剛(なかや つよし)



1967年、大阪府岸和田市に生まれる。

岸和田高校、大阪大学理学部、大阪大学大学院理学研究科を経て、1995年に博士(理学)取得。

米国フェルミ国立加速器研究所、シカゴ大学で勤務し、1999年から京都大学理学研究科勤務。教授。

T2Kニュートリノ実験の代表者を務める。趣味は散歩、釣り、読書、自転車、スキー。