

ニュートリノ観測で迫る宇宙の謎

東京理科大学 創域理工学部 先端物理学科 教授 いしつか 石塚 まさき 正基

1. はじめに

宇宙が人々の興味を惹きつける理由の一つは、その非日常的な空間スケールと時間スケールであろう。「一億倍」「一億倍の一億倍」など、子供の頃に大きさを張り合うために使った思いつく限りの表現が、そのまま現実世界に現れる。日常の物差しと比較すると太陽の大きさに圧倒されるが、その太陽でさえも宇宙の中では小さな存在である。

この広大な宇宙を研究対象とする宇宙物理学に対し、極小の研究対象を扱うのが素粒子物理学である。小さい方でもスケールはやはり非日常的である。水滴には一億の一億倍のさらに百万倍の数の水分子が含まれている。水分子 (H_2O) は酸素原子と水素原子で構成され、その中心には原子核が存在する。さらに、現在では、原子核を構成する陽子と中性子はクォークが集まった複合粒子であることが分かっている。では、クォークは何から出来ているかという点、その構成要素は未だ見つかっていない。このように、内部構造を持たない、物質を構成する最小の要素を素粒子と呼ぶ。電子も内部構造を持たないので素粒子と考えられている。今回のテーマであるニュートリノも素粒子である。

ニュートリノは宇宙と素粒子に跨る研究対象であり、日本が世界をリードする「お家芸」とも言える研究分野である。中でも、黎明期にニュートリノの観測手法の基礎を確立したカミオカンデが、その原点と言える。ニュートリノの研究の一つの側面として、天体から放出されたニュートリノを観測することにより、天体現象の位置や発生機構などを調査することができる。この代表的な例として、超新星ニュートリノ、太陽ニュートリノ、高エネルギー宇宙ニュートリノの観測を紹介する。また、別の側面として、宇宙から飛来するニュートリノを観測することにより、その素粒子としての性質を探ることができる。こちらの例として、ニュートリノ振動の発見を紹介する。宇宙はそれ自身が研究対象であり、また素粒子を研究するための実験室でもある。

2. 「幽霊粒子」ニュートリノ

ニュートリノは物質をすり抜けてしまうため、観測が難しく、その性質は未だ謎に包まれた部分が多い。そのため「幽霊粒子」とも呼ばれている。

宇宙の特集記事であるが、ニュートリノの歴史について簡単に説明する。ニュートリノは、ベータ崩壊で発生する電子のエネルギー分布を説明するために、1930年にパウリにより提唱された。当時、ベータ崩壊の過程でエネルギーが失われ、崩壊前後のエネルギー保存則が成り立たないことが問題となっていた。パウリは、この失われたエネルギーを説明するために、電気的に中性で質量の小さい未知の粒子が存在し、この『未知の中性粒子』がエネルギーを持ち去っている(従って、エネルギー保存則は破れていない)という仮説を提唱した。この粒子は、後にフェルミにより「電気的に中性で小さいもの」を表すイタリア語からニュートリノと名付けられ、1950年代にライネスとカワンが行った実験により、その存在が確認された。現在では、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種類のニュートリノが存在することが明らかになっている。

3. 幽霊粒子を捕まえる！(ニュートリノの検出)

宇宙は1ccあたり約300個のニュートリノで満たされている。これは、恒星や星間ガスの主成分である水素原子の10億倍の数である。このように至る所に存在するニュートリノであるが、どれほど高性能の顕微鏡でも、その姿を直接視認することはできない。そのため、観測装置(検出器)では、ニュートリノが物質中で反応した際に生じる別の粒子の信号を検出することで、目に見えないニュートリノを捉えている。ただし、この反応の頻度は非常に小さく、ニュートリノを観測するためには、強力なニュートリノ源と巨大な検出器が必須である。

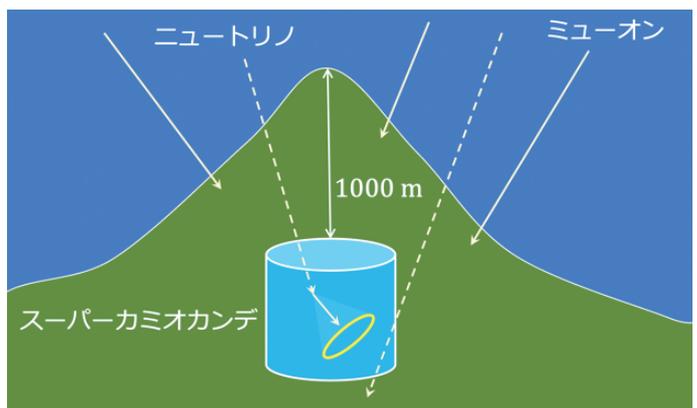
ニュートリノ源の種類は多岐にわたるが、その中でも最も多くのニュートリノを放出する天体が超新星で

ある。しかし、その発生頻度は極めて小さく、銀河内で100年に数回程度と考えられている。一方、最も身近な恒星である太陽は、安定した強力なニュートリノ源である。恒星は、その活動のエネルギーを生み出す過程において常にニュートリノを放出している。天体以外でも、地球に降り注ぐ宇宙線（主に陽子）により大気中で生成される大気ニュートリノ、地球内部での放射性核種の崩壊で生じる地球ニュートリノなどが観測されている。ニュートリノは人工的に作り出すこともできる。原子炉は、熱と同時にニュートリノも放出する強力なニュートリノ源であり、前述のライネスとカワンは原子炉の近くに検出器を設置してニュートリノの存在を実証している。近年では加速器により生成したニュートリノビームを用いる実験も行われている。この利点として、ニュートリノの発生点、エネルギー、方向などを制御することができるため、ニュートリノの性質を探る測定精度が飛躍的に向上している。

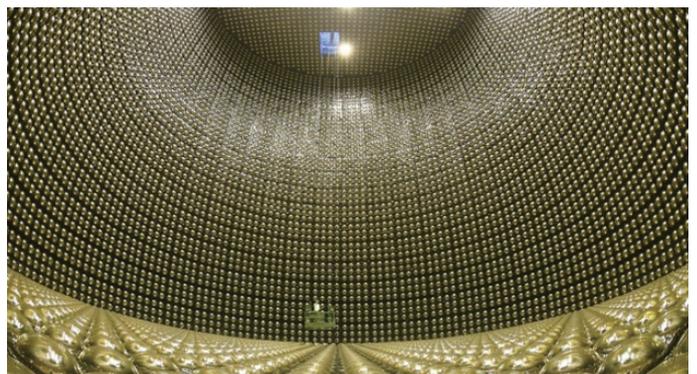
実験では、巨大な検出器でニュートリノを捉えるが、それでも観測できるニュートリノの数は小さい。例として、5万トンの水をニュートリノの標的としたスーパーカミオカンデをもってしても、1日に検出できるニュートリノの数は、太陽から飛来するニュートリノが20個程度、大気中で発生するニュートリノが10個程度である。このように、ごく稀に発生するニュートリノの信号を捉えるためには、検出器のデザインや設置場所にも工夫を凝らす必要がある。

以下に、工夫の例を挙げる。大気中ではミュオンと呼ばれる、電子と似た性質を持つ素粒子が生成され、地表に降り注いでいる（上向きに手のひらを広げると、一秒間に一個程度のミュオンが通過している）。このミュオンが検出器に入射すると、ニュートリノの信号と誤識別される場合があるため、ニュートリノの検出器の多くは地下深くに設置されている。ミュオンは物質中でエネルギーを失い、やがて静止するため、【図1】に示すように検出器を地中深くに設置することで、検出器に到達するミュオンの数を低減することができる。一方、ニュートリノはエネルギーを失わずに物質中を通り過ぎるため、ニュートリノの観測にはほとんど影響がない。スーパーカミオカンデは池ノ山の地下1000mに設置されており、飛来するミュオンの数は地表の10万分の1程度である。

ニュートリノの検出器の例として、スーパーカミオカンデの写真を【図2】に示す。円筒形の水槽に5万トンの超純水が蓄えられ、内壁には1万個を超える



【図1】地中に設置されたニュートリノ検出器の概念図



【図2】スーパーカミオカンデ検出器
(写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設)

50 cm 径の光センサーが取り付けられている。この光センサーは光電子増倍管と呼ばれるもので、微弱な光を捉えることができる。検出器に飛来するニュートリノのほとんど(99.99999...%)はそのまま何の形跡も残さずにすり抜けていくが、ごく稀にニュートリノが水中で反応し、電子やミュオンなどの電気を帯びた粒子(荷電粒子)が発生する。スーパーカミオカンデでは、水中を飛行する荷電粒子が放射する光(チェレンコフ光)を壁面に取り付けた光センサーで検出し、ニュートリノの観測を行っている。【図1】に示すようにチェレンコフ光は粒子の進行方向にリング状に放射される。このような原理で観測を行う実験装置は、水チェレンコフ型検出器と呼ばれる。

4. 超新星ニュートリノの観測

恒星の内部は高温高密度の状態にあり、核融合により活動のエネルギーを生み出している。恒星の終焉の形態はその質量により異なり、太陽の8倍から10倍以上の質量を持つ恒星は、最後に超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こす。そのエネルギーは凄まじく、太陽が誕生から現在までの約45億年間で放出してきた全

エネルギーに匹敵するエネルギーが10秒間で放出される。このエネルギーのほとんどはニュートリノとして放出されるため、超新星は強力なニュートリノ源でもある。

1987年には、銀河系の近傍に位置する大マゼラン星雲で超新星SN1987A【図3】が発生し、13秒間に24個のニュートリノが観測された。そのうち11個は、カミオカンデ（スーパーカミオカンデの前身の水チェレンコフ型検出器）による観測であり、これは超新星で放出されるニュートリノを観測した初めての例である¹⁾。この観測から、超新星爆発で発生するエネルギーがニュートリノとして放出されるという理論予測が実証された。また、光とニュートリノが観測された時間差から、ニュートリノが質量を持つとしても、その大きさは非常に小さいことが明らかにされている（ニュートリノが質量を持つとすると、光よりも遅れて観測されるはずだが、観測結果からニュートリノがほぼ光速で飛行していることがわかった）。

2002年には、新しい宇宙観測の手法として、ニュートリノ天文学を開拓した功績により、小柴昌俊先生がノーベル物理学賞を受賞している。カミオカンデはすでに取り壊されているが、現在では、同じ山中でスーパーカミオカンデが観測を続けており、もし銀河系内で超新星爆発が起これば、1万個程度のニュートリノが観測される見通しである。超新星の爆発メカニズムには未知の部分が多いが、スーパーカミオカンデなどで多数の超新星ニュートリノが観測されれば、その解明に向けた研究が飛躍的に進展することになる。

近年では、過去に起こった超新星爆発で放出され、現在も宇宙を漂っていると予測される超新星背景ニュートリノの観測が注目を浴びている。超新星背景ニュートリノの数やエネルギースペクトルは過去に発生し



【図3】1987年2月23日、大マゼラン星雲で発生した超新星SN1987A。右は爆発前、左は爆発後を示す（© Australian Astronomical Observatory, Photograph by David Malin）。

た超新星の頻度と密接に関係するため、観測できれば宇宙の進化の歴史を理解するための貴重な情報を得ることができる。2020年には、超新星背景ニュートリノの観測感度の向上を目的として、スーパーカミオカンデの水中にガドリニウムを溶かす改良が施され、世界初の観測が期待されている。

5. 太陽ニュートリノの観測

恒星は、そのエネルギーを生み出す核融合反応および核融合の連鎖過程で起こるベータ崩壊反応により、常にニュートリノを放出している。太陽からも大量のニュートリノが発生しており、手のひらを太陽に向けると、1秒間に1兆個を超える数のニュートリノが通過している。ニュートリノは地球をすり抜けるので、夜中でも足元から太陽ニュートリノが飛来している。太陽ニュートリノの観測の歴史は古く、1970年頃から様々な手法で観測が行われている。それらの観測の結果、太陽ニュートリノの数は太陽活動のエネルギーから計算された予測値よりも有意に小さいことが判明した。これは太陽ニュートリノ問題と呼ばれていたが、後に、この欠損は後述するニュートリノ振動によるものと結論付けられた。

【図4】はスーパーカミオカンデによりニュートリノで観測された太陽を示す²⁾。太陽中心で起こった核融合反応によるガンマ線は散乱・吸収・放射を繰り返して、より波長の長い電磁波として伝播し、太陽表面に現れて地球で観測されるまでに10万年ほどかかると考えられている。つまり、我々が見ている太陽は、実際には10万年ほど前の核融合反応に起因する光である。一方、ニュートリノは他の物質とほとんど反応しないため、現在の太陽中心の活動状況を直接観測することができる。

6. 高エネルギー宇宙ニュートリノの観測

スーパーカミオカンデ以外にもニュートリノ検出器は世界各地に存在する。その一つとして、筆者が直接関与している研究ではないが、南極で行われているIceCube実験を紹介する。この実験では、南極の氷河をニュートリノの標的としている。IceCube実験グループは、氷河に穴を開けて中に光センサーを沈め、ニュートリノの反応により氷の中で発生したチェレンコフ光を検出している。自然を活かした直径1kmに及ぶ巨大な検出器を使用することで、高エネルギー宇宙

ニュートリノの観測が可能である。

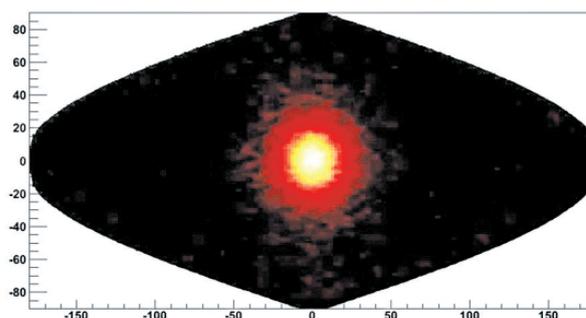
現代の宇宙観測では、様々な観測手段で得られた情報を融合して天体現象を研究するマルチメッセンジャー天文学の重要性が増してきている。ニュートリノは、発生源の周辺の物質や、地球に到達するまでに通過する星間ガスなどの影響をほとんど受けず、対象となる天体の情報を直接引き出すことができる。また、その発生機構も電磁波やその他の宇宙線と異なるため、マルチメッセンジャー天文学に欠かせない観測手段と言える。2017年9月には、IceCubeにより高エネルギーニュートリノが観測され、その到来方向や時間情報が配信されると、世界各地の天体観測施設で追尾観測が行われた。その結果、中心に巨大なブラックホールを持つブレイザー天体 TXS0506+056 の光度が増加していることが確認され、同じ天体から高エネルギーガンマ線が検出された。これは、ニュートリノと高エネルギーガンマ線が同じ天体から放出されていることを観測した最初の例となっている^{3,4)}。

7. ニュートリノ振動の発見

天体から直接放出されるニュートリノだけでなく、地球に降り注ぐ宇宙線（主に陽子）が大気中の窒素や酸素などと反応した際に生じる電子ニュートリノやミューニュートリノが地表に降り注いでいる。これは、大気ニュートリノと呼ばれる。大気ニュートリノのエネルギー分布は超新星ニュートリノや太陽ニュートリノに比べて高い領域にまで広がっている。スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測の結果、スーパーカミオカンデの上空から下向きに飛来するミューニュートリノの数は予測通りなのに対し、地球を通過して検出器に上向きに入射するミューニュートリノの数が予測よりも少ないことが判明した。

この欠損の原因は、ニュートリノの性質から説明ができる。それまでの研究では、ニュートリノは質量を持たないと考えられていたが、ニュートリノが質量を持つ場合には、ニュートリノの種類が飛行中に変化する「ニュートリノ振動」と呼ばれる現象が予言される。スーパーカミオカンデで観測されたミューニュートリノの欠損は、ニュートリノ振動により説明できることから、ニュートリノが質量を持つ証拠として報告された⁵⁾。2015年にはニュートリノ振動を発見した功績により、梶田先生がノーベル物理学賞を受賞している。

ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノが質量を持つことを示しただけでなく、その大きさが電子やク



【図4】スーパーカミオカンデによりニュートリノで観測された太陽（スーパーカミオカンデHPより）

ォークなどの他の素粒子に比べて極端に小さいことや、3種類のニュートリノが量子力学的に大きく混合していることを示しており、背景に潜む未知の物理法則の存在を示唆している。ニュートリノが宇宙に存在する物質の起源に関係している可能性も指摘されており、その背景となる物理法則の検証が、現在の素粒子物理学における重要な研究課題となっている。

8. おわりに

人類の歴史や行動範囲は、宇宙のスケールと比べると限りなく小さいが、蓄積してきた知識の範囲は驚異的なものと言える。人類は、知的好奇心と創意工夫により、遙か彼方の天体現象やビッグバンから始まる宇宙の歴史を探究し、理解しようとしている。

本稿で述べたように、ニュートリノは宇宙を探る観測手段であり、素粒子物理学の分野においては、未知の物理法則を探る糸口でもある。2027年には、東京理科大学も参加するハイパーカミオカンデが観測を開始する。今後のニュートリノの研究の動向にも関心を持っていただければ幸いである。

【参考文献】

- 1) K. Hirata *et al.*, Phys. Rev. Lett. 58, 1490, pp. 1490–1493 (1987).
- 2) K. Abe *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D94, 5, 052010 (2016).
- 3) IceCube, Fermi-LAT, MAGIC *et al.* Science 361, 6398, eaat1378 (2018).
- 4) M. Aartsen *et al.* (IceCube Collaboration), Science 361, 6398, pp. 147–151 (2018).
- 5) Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett. 88, pp. 1562–1567 (1998).

