

スーパーカミオカンデにおける ニュートリノ観測

Observation of Neutrinos at Super-Kamiokande



東京大学 宇宙線研究所
准教授

早戸 良成 Yoshinari Hayato

はじめに

ニュートリノは、この宇宙を構成している基本的な粒子（素粒子）の一種である。素粒子には、物質を構成する要素であるクォークと電子やニュートリノ、力を伝えるゲージ粒子、そして質量に関するヒッグス粒子があることが分かった（図-1）。電子とニュートリノは、まとめてレプトンと呼ばれる。レプトンには電子と似通った性質を持つ3種類の電気を帯びた粒子（荷電粒子）があり、それぞれ電子、 μ 粒子、 τ 粒子と呼ばれる。また、電気を持たない中性のレプトンにもやはり3種類あり、それぞれ電子ニュートリノ、 μ ニュートリノ、 τ ニュートリノと呼ばれる。ニュートリノは、長らくその質量が0であると考えられていた

ほど軽く、物質を構成するクォークや電子などとは「弱い相互作用」を通してしか反応しない。このため、物質との反応確率が非常に小さく検出が難しく、その性質を明らかにするための研究が続けられてきている。

本稿では、ニュートリノについて、ニュートリノ検出器の一つであるスーパーカミオカンデ検出器について、ニュートリノ振動について、そしてニュートリノ研究の意義について概説する。スーパーカミオカンデ検出器は、太陽や大気、そして加速器からのニュートリノを観測し、その性質の理解に大きな役割を果たしているが、本稿では特に、2015年のノーベル物理学賞に関連する大気ニュートリノ研究を中心に取り上げる。

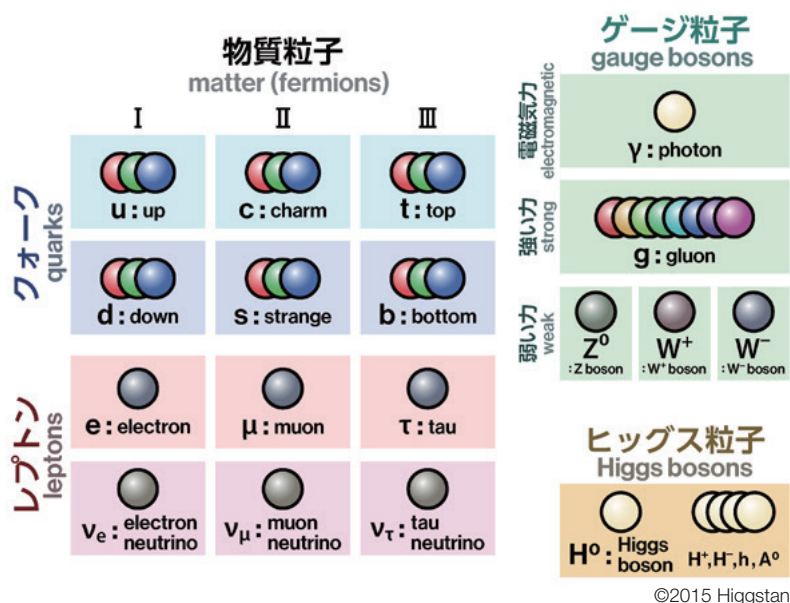


図-1 素粒子

ニュートリノとは

ニュートリノは、原子核崩壊を研究していたパウリが1930年にその存在を予言した。彼は、「原子核崩壊の一種であるベータ崩壊から放出される電子のエネルギーが一定ではない」という実験結果は、「電気を持たない非常に軽い粒子」が存在すれば説明できることに思い至った。しかし、この粒子を実際に観測することは難しく、ライネスとカワンが原子炉からの反電子ニュートリノ観測に成功したのは1956年のことであった。⁽¹⁾ この後1962年には加速器を用いて生成したニュートリノ中に電子ニュートリノとは異なる μ ニュートリノが存在することを、レーダーマン、シュバルツ、スタインバーガーらが発見した。⁽²⁾ 3種類目のニュートリノ(τ ニュートリノ)は、1970年代にその存在が予測されたが、実際に観測されたのは2000年のことである。⁽³⁾

ニュートリノは、宇宙初期から今に至るまで様々な場所で大量に生成し、数からみれば最も有り触れた粒子であり、宇宙創成期に大量に生成したニュートリノは、今でも 1 cm^3 あたり300個程度が飛び交っていると考えられている。

核融合反応によって明るく輝く恒星では、光だけではなく大量のニュートリノも放出している。最も身近な恒星である太陽からは、1秒間に 1 cm^2 あたり660億個のニュートリノが地球に届いている。デイビスらは、この太陽ニュートリノを世界で初めて観測⁽⁴⁾、恒星の熱源が本当に核融合であるという確証を与えた。

巨大な星が最期に起こす超新星爆発時には、様々な重元素が生成、大量の光も発生するが、爆発エネルギーの約99%はニュートリノが持ち去ると考えられている。1987年に、超新星爆発からのニュートリノを世界で初めてカミオカンデにおいて観測した⁽⁵⁾ 功績により、小柴教授にノーベル物理学賞が授与されている。

宇宙にはニュートリノ以外にも、非常に高いエネルギーを持った陽子(水素原子核)やヘリウム原子核などが飛び交っている。これらの粒子が地球の大気に衝突したとき、ニュートリノをはじめ様々な粒子を生成する。この「大気ニュートリノ」をスーパーカミオカンデにおいて観測したところ、

1998年に、ニュートリノの種類が飛行中に変化する「振動現象」が確認され、ニュートリノの質量が0でないことが明らかになった。⁽⁶⁾ この成果により、梶田教授に2015年のノーベル物理学賞が授与された。なお、陽子などがどこで、どのようにして、これほど高いエネルギーにまで加速されているのかという謎はいまだ確定的な答えが見つかっておらず、現在も精力的に研究が行われている。

地球内部の熱(地熱)は原子炉などと同様、核分裂反応によるものが多くを占めると考えられていた。カムランド実験は、世界で初めて核分裂由来の「地球(反)ニュートリノ」観測に成功、この推測が正しいことを証明した。また、その後の観測により、地熱の半分程度は核分裂によるが、残りは地球ができた頃の熱がいまだ残っているらしいということも分かってきた。⁽⁷⁾

ほかにも、原子炉では反電子ニュートリノが生成しており、加速器を用いて生成することも可能である。これらの人工ニュートリノは、現在もその性質を探るための様々な実験に用いられている。

スーパーカミオカンデ検出器

スーパーカミオカンデ検出器は、岐阜県飛騨市神岡町の鉱山内に建設され、1996年4月から観測を開始した。比較的低エネルギーの低い太陽ニュートリノや超新星爆発ニュートリノから、高エネルギーの大気ニュートリノ、そして加速器からのニュートリノの観測、また陽子崩壊探索など、様々な宇宙物理・素粒子物理の研究が本検出器を用い行われている。

スーパーカミオカンデ検出器は、直径、深さとも約40 mの円筒型5万トン純水タンクと、超高感度光センサーである光電子増倍管(PMT: Photo Multiplier Tube)から成り立っている(図-2)。この検出器は、水中で荷電粒子が水中の光速よりも早く移動したときわずかに放出する「チェレンコフ光」を観測する。ニュートリノは電荷を持たず、観測可能なチェレンコフ光を出さない。しかし、水分子中の電子と反応した場合、電子にエネルギーを与える。また、水分子中の陽子・中性子と反応した場合は、電子や μ 粒子、そのほかの荷電粒子を生成する。これらの反応から生成した粒子が出すチェレンコフ光を観測することで、元のニュー

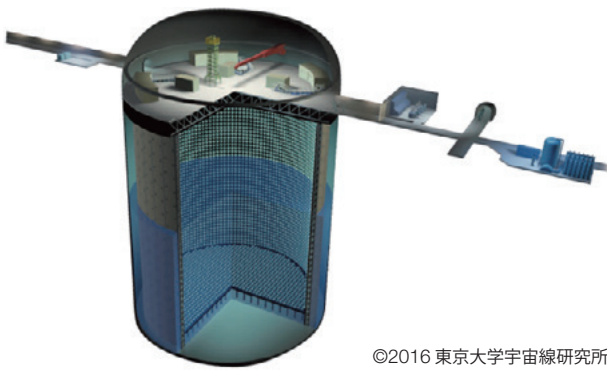


図-2 スーパーカミオカンデ検出器

トリノの種別やエネルギーなどの情報を再構成する。

この規模の検出器を用いても、太陽ニュートリノは1日に10個程度、大気ニュートリノも1日に8個程度しか観測することができない。更に、超新星爆発や陽子崩壊などという現象はいつ起こるか予想がつかない。このため、検出器を常時稼働させておくことが大変重要となっている。

検出器は、どの方向もおおよそ1,000 mの土砂で覆われる位置に設置されている。これは、地表で1秒間に100 cm²あたり1個程度降り注ぐ電気を帯びた μ 粒子などを約10万分の1程度まで減らすためである。

水タンクはPMTが設置された壁によって光学的に二分されている。壁の内側は内水槽と呼ばれ、直径50 cmのPMT 11,129本を設置、壁面積の約40%をPMTの有感領域で覆う。外水槽と呼ばれる壁の外側には、直径20 cmのPMT 1,885本が外向きに設置されている。内水槽は、検出器内でニュートリノ反応などによって生成した粒子を観測し、外水槽では検出器外部から侵入してきた粒子や、内水槽で生成して外に飛び出す粒子の観測を行う。

PMTから出力される電気信号はQBEE (QTC-Based Electronics with Ethernet) と呼ばれる特別なボードによってデジタルデータに変換される。1枚のQBEEには24本のPMTが接続され、変換後のデータはFast Ethernetによって計24台の読み出し用計算機群に転送される。各読み出し用計算機は、PMT約720本（外水槽は約480本）分のデータを読み出し、時間順に並べ直した上で6台のデータ集約・事象選別用計算機群に送る。データ集約・事象選

別用計算機は、各読み出し用計算機からのデータを集約、検出器全体分にまとめた上で事象を選別、12 kHz程度で事象データを記録している。1996年からスーパーカミオカンデで用いていたシステムも含め、大規模素粒子実験では事象をハードウェアで選別してきたが、2008年以後のシステムでは、この規模の実験としては世界で初めて、事象選別を完全にソフトウェアで行っている。これは、計算機やネットワークが高速になったことで初めて実現することが可能となった。

事象選別後のデータは、大容量ディスク装置とテープに記録される。その後、解析用計算機群を用いて各事象のタンク内での反応位置、粒子数の同定、エネルギーや飛行方向、粒子種別の判定などといった「事象再構成」を行い、この出力を用いてニュートリノ振動の研究や陽子崩壊の探索が行われている。

ニュートリノ振動

ニュートリノは大変軽く、直接その質量を測ることはいまだできていない。更に、ニュートリノに質量はないとして構築された素粒子の「標準理論」が、ほぼ全ての実験結果を非常によく再現していたことから、ニュートリノには質量がないと信じられてきた。このため、1998年にニュートリノ振動が発見され、質量を持つことが確実となったときの衝撃は大きいものがあり、梶田教授のノーベル物理学賞受賞につながった。

電子ニュートリノ、 μ ニュートリノ、 τ ニュートリノという分類は、フレーバーの違いにより弱い相互作用の違いが出ることに因る。ニュートリノがクォークと弱い相互作用を通して反応、電気を帯びたレプトンとなると、電子ニュートリノは電子に、 μ ニュートリノは μ 粒子に、 τ ニュートリノは τ 粒子になり、これ以外の組み合わせにはならない。しかし、生成したとき電子ニュートリノや μ ニュートリノであったものが、ある距離を飛行した後は期待される荷電レプトンの生成が抑制される、もしくは本来期待されない荷電レプトンが生成するといった、飛行中に別の種類のニュートリノに変化する現象（ニュートリノ振動）が観測された。この現象は、3種類のフレーバーのニュートリノが、3種類の異なる質量のニュートリ

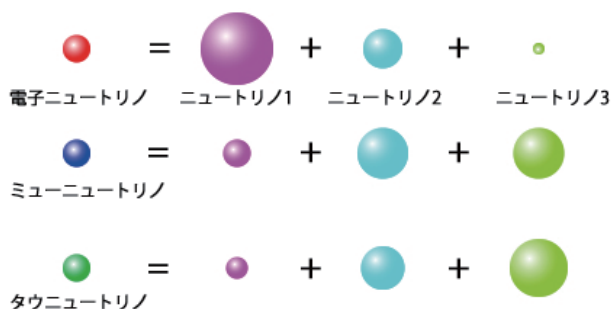
ノ（1, 2, 3）の混ざり合った状態であると考えようまく説明できる（図-3）。ニュートリノは空間を波として伝わり、その波長は質量によって異なるために起こる現象である。例えば、最初に μ ニュートリノが弱い相互作用で生成しても、そこに含まれる異なる質量のニュートリノはそれぞれ空間の伝わり方が異なるため、飛行後には μ ニュートリノだけでなく電子ニュートリノや τ ニュートリノと混ざり合った状態となる（図-4）。この性質を用い、ニュートリノがどのように変化（振動）するかを詳細に調べることで、軽過ぎて直接測定することのできないニュートリノの質量の違いや混ざり具合を知ることが可能となった。

スーパーカミオカンデでは、太陽中で生成した電子ニュートリノや、大気中や加速器で生成した μ ニュートリノを用い、ニュートリノ振動の研究が行われている。

大気ニュートリノ振動観測

ニュートリノが中性子や陽子と反応したとき、電子ニュートリノは電子を、 μ ニュートリノは μ 粒子を生成するため、ニュートリノの種別判定は観測された粒子が電子か μ 粒子かを判別すれば可能となる。スーパーカミオカンデにおいては、 μ 粒子は輪郭のはっきりしたリングを、電子は輪郭のぼやけたリングを作り（図-5）、この違いが判定に用いられる。更に、観測される光量は粒子のエネルギーと相関があり、観測されたリング数は荷電粒子数に対応するため、これらの情報も大気ニュートリノ振動の解析で用いている。

大気ニュートリノは地球上のどこでも生成するため、ほぼ上下対称の分布を持つと考えられる。

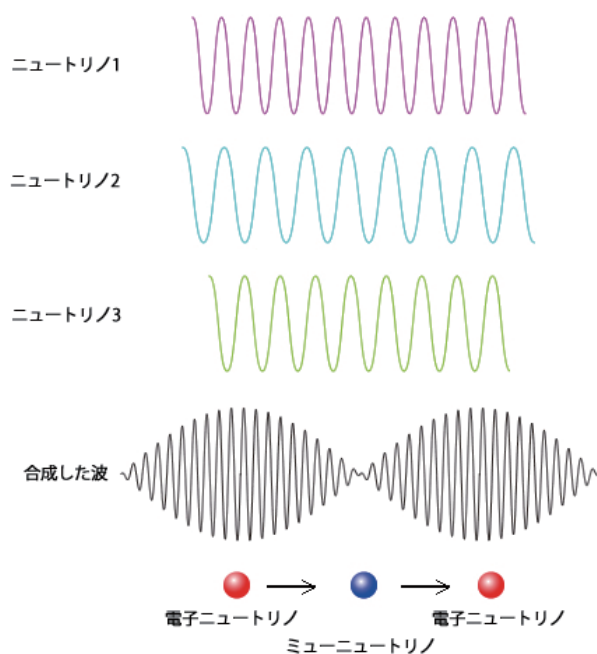


©2016 東京大学宇宙線研究所

図-3 ニュートリノの混合状態

十分エネルギーの高いニュートリノが核子（陽子や中性子）と反応して生成する電子や μ 粒子は、ニュートリノの進行方向に近い角度で放出されるため、観測される電子や μ 粒子の分布も、ほぼ上下対称になると期待される。しかし、実際の観測では上方向に飛ぶ μ 粒子、すなわち地球の裏側から飛んできた μ ニュートリノは、上空から飛んできた下向きの μ ニュートリノより少ないことが、スーパーカミオカンデにおいて観測された（図-6）。 τ ニュートリノは、そのエネルギーが十分大きければ τ 粒子を作る反応を起こすが、大半の大気ニュートリノはエネルギーが低く τ 粒子を生成できないので観測されない。そこで、長距離を飛んだ μ ニュートリノは τ ニュートリノに振動していると考えれば、観測結果をうまく説明することができる。これが、1998年のニュートリノ振動現象の発見である。その後、現在に至るまでの継続的な観測によりデータが増え、詳細な解析が可能となったことで、ニュートリノの性質をより深く、より精度良く理解することが可能となってきた。

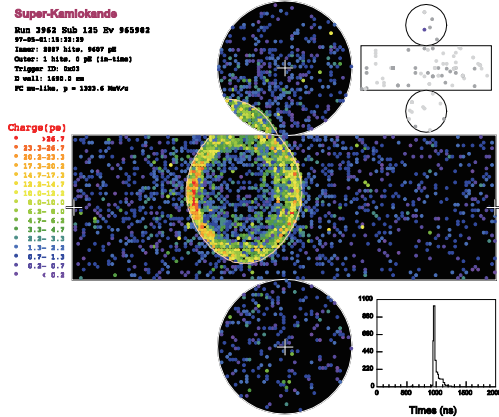
観測データを用いてニュートリノの質量差や混ざり具合を調べるには、数千年分の観測に相当するシミュレーションデータを生成する。これを基



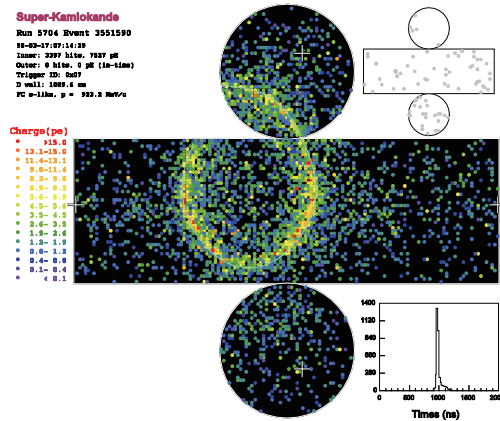
©2016 東京大学宇宙線研究所

図-4 ニュートリノの伝搬と振動

μ 粒子

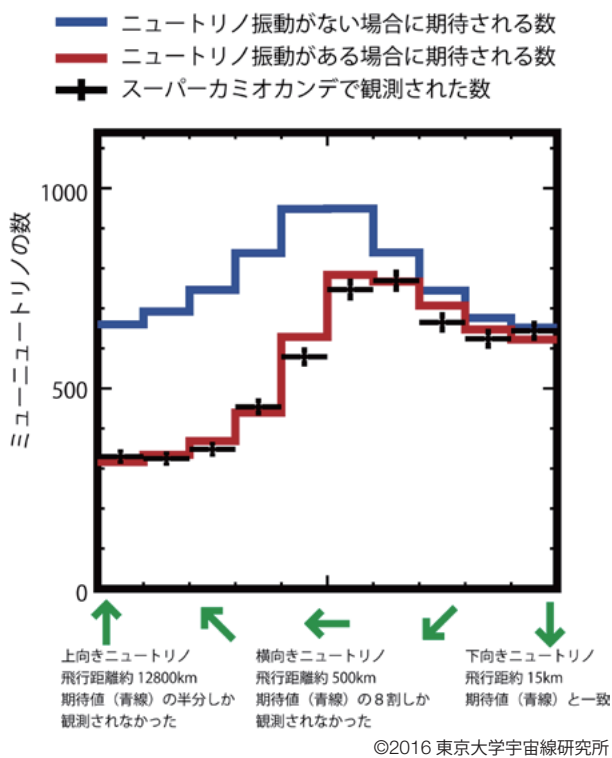


電子



©2016 東京大学宇宙線研究所

図-5 電子と μ 粒子の見え方の違い



©2016 東京大学宇宙線研究所

図-6 観測された μ 粒子の分布

に、ニュートリノの質量差や混ざり具合のパラメータを様々に変え、観測が期待される分布を計算、観測データに最も近い分布となるパラメータを見つけている。この解析には、多くのソフトウェアが必要となる。代表的なものとして、ニュートリノ・核子反応をシミュレーションプログラム、反応によって生成した粒子の検出器内の伝搬、チェ

レンコフ光放出などのシミュレーションプログラム、事象を再構成するプログラム、ニュートリノ振動パラメータが変化した場合の分布変化を計算するプログラムがあげられる。これらはほぼ全て実験グループ内で開発を行っている。これらは常に改良が行われ、新たなシミュレーションデータの再生成や、事象再構成のやり直しなどが随時行われるため、専用の大規模計算機システムが導入されている。

ニュートリノ研究の意義と将来

ニュートリノの性質は、この20年間で多くのことが分かってきたが、いまだに分からないことも残っている。例えば、図-3にあるニュートリノ1と3はどちらが重いかわかっていない。また、ニュートリノと反ニュートリノが全く同じ振動をしているのかも分かっていない。現在、この宇宙は物質が大半を占め、反物質はほとんどない。このような宇宙ができるには、物質と反物質の違い(CP非対称性)があるはずである。しかし、クォークの物質と反物質の違いは非常に小さく、それだけでは説明できないことが分かった。現在では、ニュートリノと反ニュートリノの違いが大きければうまく説明できるという理論が立てられて、スーパーカミオカンデをはじめ、世界各国でニュートリノと反ニュートリノの違いを調べる実験が行われている。日本のJ-PARC加速器とスーパーカミオカンデを用いたT2K (Tokai to Kamioka) 実験に

において、最近このCP対称性が破れている兆候と考えられるデータが得られ始めており、今後の成果が待たれている。

宇宙にある鉄より重い元素は超新星爆発から生成したと考えられている。ニュートリノが大量に観測できるような超新星爆発はこの30年間発生していないが、スーパーカミオカンデにおいて超新星爆発からのニュートリノを観測できれば、星の最期の様子がより正確に理解できるだけでなく、この宇宙の成り立ちにつながる情報も多く得られると考えられている。また、宇宙に遍在するはずの過去に発生した超新星爆発由来のニュートリノを効率的に観測するため、現在スーパーカミオカンデ検出器改良計画が進行している。

陽子崩壊もいまだ観測されていない。陽子は、 10^{34} 年以上の寿命を持つことがスーパーカミオカンデの観測から明らかになってきている。もし陽子崩壊が観測されれば、なぜニュートリノなどのレプトンと、クォークが同じ3世代なのかという謎も解明できると考えられている。

スーパーカミオカンデは、今後も継続的にデータを収集し解析を続けることで、素粒子や宇宙のより深い理解に貢献していくと期待されているが、観測事象数の短期間での大幅な増加は見込めない。このため、約20倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデ検出器を建設し、ニュートリノ研究や陽子崩壊探索などの研究成果を短期間で大幅に飛躍させようとする計画が立てられ、実現に向けた努力が開始されている。

参考文献

- (1) F. Reines et al. : Detection of the Free Neutrino : a Confirmation. Science20, Vol.124, Issue 3212, p.103, July 1956.
- (2) G. Danby et al. : Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos. Phys. Rev. Lett. 9, 36, July 1962.
- (3) K. Kodama et al. : Observation of tau neutrino interactions. Phys. Lett. B 504, 218, April 2001.
- (4) R. Davis Jr. : Nobel Lecture : A Half-Century with Solar Neutrinos. Nobelprize.org, Nobel Media AB 2014, Jul 2016.
- (5) K. Hirata et al. : Observation of a neutrino burst

from the supernova SN1987A. Phys. Rev. Lett. 58, 1490, April 1987.

- (6) Y. Fukuda et al. : Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos. Phys. Rev. Lett. 81, 156, August 1998.
- (7) The KamLand Collaboration, Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. Nature Geoscience 4, 647, July 2011.