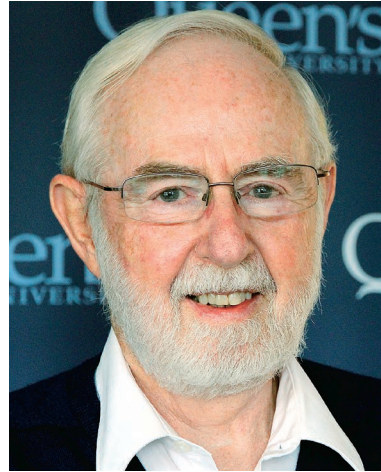


## 梶田隆章氏のノーベル賞受賞

荒船次郎\* ◇



梶田隆章氏 (東京大学提供)



Arthur B. McDonald氏 (Queen's University 提供)

今年のノーベル物理学賞は10月6日発表され、梶田隆章さん(東京大学宇宙線研究所長)に決まった。おめでとうございます!

「ニュートリノ振動の発見、したがって、ニュートリノの質量の存在の発見」に対する授賞で、素晴らしいニュースであり、新聞やテレビを見ると日本中が喜びを共にしているようだ。

このニュートリノ振動の発見は1998年に高山で開かれた国際会議で、梶田さんにより発表された。観測は岐阜県の神岡にある「スーパーカミオカンデ」と呼ばれる5万トンの水タンクと11,000本の光センサー(光電子増倍管)を備えた地下1,000mの観測装置により行われ、発表はその完成後間もない2年目のことだった。Pauliによる素粒子ニュートリノの提案以来70年近くも謎だった「ニュートリノに質量はあるのか?」という問題に、初めて答を出した講演だった。梶田さんの発表が終わると、まるで魅力ある音楽会の演奏終了時のように大きな拍手が会場に長く続いてなかなか鳴り止まなかった。この発表の翌日、米国の大統領クリントンがMITの卒業式のゲスト講演で

このニュートリノの質量の発見に言及したことも話題になった。素粒子物理学は当時、「標準理論」がほぼ完成し、理論家も実験家もそれを超える現象の発見を渴望していた。ニュートリノの非常に小さな質量の存在の発見は、標準模型を超えて未知だがより深い理論への重要な手掛かりの発見であって、その重要な発見に立ち会った感激が、あの熱烈な拍手となったのだろう。

梶田さんを中心とする解析で発見された「ニュートリノ振動」の現象は宇宙線が大気に衝突して生成するニュートリノ(大気ニュートリノと呼ばれる)の振動である。ニュートリノには3種類あって、電子ニュートリノ $\nu_e$ 、ミューニュートリノ $\nu_\mu$ 、タウニュートリノ $\nu_\tau$ と呼ばれることはよく知られている。ニュートリノは、作られた直後は、この3つのうちのどれか1つに決まっている。宇宙線が大気と衝突すると、パイ中間子が作られ、中間子が2段階で崩壊するときは、2つのミューニュートリノ( $\nu_\mu$ )と1つの電子ニュートリノ( $\nu_e$ )を放出する。したがって、大気ニュートリノを観測すると、 $\nu_\mu/\nu_e$ の比が2として検出されるはずである。ところが観測すると、上から降って来るニュートリノは予想通り $\nu_\mu/\nu_e$ 比が2

で、それぞれの絶対量も予想通りだが、地球を下から貫いて来るニュートリノの $\nu_\mu/\nu_e$ 比はほぼ1で、 $\nu_\mu$ の量が予想より異常に少ない、ということが発見されたのである。これは $\nu_\mu$ が飛ぶとき、飛距離が短ければ変わらないが、飛距離が地球半径くらい長いと $\nu_\mu$ は途中で別のニュートリノ、恐らく、主にタウニュートリノ( $\nu_\tau$ )に名前を変える「ニュートリノ振動」の現象が起きたことを意味している。上記の3種のニュートリノは実は質量の固有状態にはないことからこれが起きる。質量の固有状態も3種類あって $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ と呼ぶとき、 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ はそれらの線形結合で $\nu_\alpha = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} \nu_i$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ )で表される(行列 $U_{\alpha i}$ はMNS行列と呼ばれ、クォークに関する小林・益川行列と同様な意味を持つ)。ニュートリノの質量固有値が異なると線形結合係数が時間的に異なる振動をするため $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ は初めと異なり互いに混合し名前が振動する。それがニュートリノ振動である。ニュートリノ振動はニュートリノが異なる質量を持ち、MNS行列が非対角要素を持つとき起きるので、ニュートリノ振動の発見は、質量の存在の発見を意味したのである。

大気ニュートリノ振動は旧カミオカ

\* 東京大学名誉教授

ンデの時代にも、既に兆候はとらえられていたが、欧州のFrejusトンネルの実験などでは観測されず、国際的に未だ認知はされていなかった。非常に興味深かったので、細部の分からないところを質問すると、実験グループの誰もが、詳しいことは梶田さんに聞いて下さい、と言ひ、発見の中心にいた未だ若い梶田さんに、私は何度も質問した。どんな質問にも、嫌がらずに親切に明快に答えていただき、私は、旧カミオカンデの時代から振動の存在を信じるに至ったが、旧カミオカンデからスーパーカミオカンデになって、データ量も精度も格段に向上し、1998年に梶田さんは誰にも疑いようの無い明瞭な解析結果としてニュートリノ振動を示し、国際的にも認知させた。その発表は歴史的と言ってもよいほどの快挙であった。

一方、太陽から来る電子ニュートリノ(太陽ニュートリノと呼ばれる)も振動する。太陽からのニュートリノが理論的予想より少ないことに現れていた。それは長い時間をかけて複数の観測装置の結果の総合として理解され、確立したが、その後カナダの重水を使った太陽ニュートリノ観測装置SNOが装置を改良し、SNO単独でも振動を証拠づけることができた。今回はSNOの責任者のマクドナルドさんがノーベル賞の共同受賞者に選ばれた。重水はニュートリノの衝突断面積が軽水より大きいのと複数の異なる反応を区別できる点で有利だが非常に高価である。カナダには重水型原子炉用の重水が大量にあるので、それを借用したユニークな実験だった。マクドナルドさんは日本にも何度も来てよく知られた温厚な人で、祝福すべき同時受賞であった。

なお、太陽ニュートリノの振動には、SNOに先行してスーパーカミオカンデによって中畑雅行さんや鈴木洋一郎さん等が行った精密な振動観測があり、神岡の地下装置Kamlandでは鈴木厚人さん等が行った原子炉ニュートリノの振動の観測があつて、これらの功績もSNOに劣らず重要なものであったことは書いておきたい。

今回のノーベル賞の対象となった研究のその後の発展としては、ニュートリノのMNS行列の最後の振動パラメータ  $U_{e3}$  がT2K実験として東海村の加速器ニュートリノを神岡に照射する実験や中国のDaya Bayの原子炉の実験等で決められ、MNS行列が1つの複素数の位相の不定性を除いて全て決まった。この位相(CP対称性の破れの位相)の決定と、また、ニュートリノ質量の絶対値の決定(振動観測では質量の2乗の差しか決定できない)やニュートリノは本質的に粒子と反粒子は同じなのか否か(Majorana型か否か)の決着などは依然として重要な実験課題である。

ニュートリノ研究を振り返ってみると、上記のような意味でのニュートリノ振動は1962年に米国におけるニュートリノに2種類 ( $\nu_e$  と  $\nu_\mu$ ) あることの発見を受けて、同年、牧二郎、中川昌美、坂田昌一等がニュートリノ振動を予言したのが最初であった(それより早いPontecorvoによる別種のニュートリノ振動の予言があるが)。また、大気ニュートリノの観測を振り返ってみると、世界で初めてそれが観測されたのは、1965年に三宅三郎等によるインドのKGF 鉱山の日印英共同地下実験であった。また、ニュートリノに質量があるとすれば、それは非常に小さなものであることから、1979

年に柳田勉は、質量の無いニュートリノが非常に重いニュートリノと混合することで、重いニュートリノの質量に反比例した非常に小さいニュートリノ質量が生じる see-saw 機構を提唱し、小さなニュートリノ質量が逆説的だが標準模型を超えた超高エネルギーの物理を反映していることを示唆した。カミオカンデでは、1987年の小柴昌俊さん等による超新星からのニュートリノバーストの観測はまだ記憶に新しい。小柴さんの考案したカミオカンデのアイデアは、その後、世界中にニュートリノ観測装置がたくさん作られた際の標準的なモデルまたは出発点となっている。また、スーパーカミオカンデとKamlandの太陽と原子炉のニュートリノ振動に関する成果など、梶田さんへのノーベル賞を機会に振り返ると、日本のニュートリノ研究の活発な背景も実感される。今回のニュースは、旧カミオカンデを支えた故須田英博さんも、スーパーカミオカンデを率いた故戸塚洋二さんも、天国で待ちかねていたことだろう。

梶田さんのニュートリノ質量の発見という快挙に対するノーベル賞受賞はきっと若い人たちの大きな励みになるに違いない。カミオカンデ、スーパーカミオカンデに微力ながらも理論家としてお手伝いしたこともあつて、一層、梶田さんを中心にこのような素晴らしい成果が上がり、それがノーベル賞という形で評価されたことが本当に喜ばしい。梶田さん、そしてカミオカンデグループ、そしてそれを支えた物理の先生方、ノーベル賞おめでとうございませう。梶田さんの、ますますのご活躍を祈念しています。

(2015年10月21日原稿受付)