

# 解説

## ニュートリノ振動の発見

### ～パウリの予言から梶田教授の受賞まで～

川越至桜（東京大学 生産技術研究所）

#### 1. はじめに

「ニュートリノ振動」と聞いてみなさんは何を想像するだろうか。「何かプルプル震える現象」と考える人もいるのではないかな。

2015年、「ニュートリノの質量の存在を示すニュートリノ振動の発見」により、東京大学の梶田隆章教授と、クイーンズ大学（カナダ）のアーサー・マクドナルド教授がノーベル物理学賞を受賞した[1]。そして、「ニュートリノ振動」という言葉をテレビ等で見聞きする機会が増えたように思う。筆者も多くの人からニュートリノ振動について質問を受けた。

本稿では、ニュートリノ振動とはどのような現象で、その質量とどのような関係があるのかを紹介する。

#### 2. ニュートリノの歴史

1930年、放射性元素の研究をしていたオーストリアの物理学者パウリは、ベータ崩壊で放出される粒子のエネルギー分布の連続性を説明するために、「電気を帯びていなくて、知らないうちにどこかへ飛び出してしまふ、幽霊のような粒子がある」と考えたとつじつまが合う」として、中性で質量の小さな粒子の存在を提唱した[2,3]。このとき、パウリはこの粒子を「ニュートロン」と呼んでいたが、これが今日のニュートリノである。

1933年、ベータ崩壊の研究を進めていたイタリアの物理学者フェルミは、パウリの考えた粒子についても研究していた[4]。1932年に現在のニュートロン（中性子）が発見されたため、パウリの提唱した粒子を、中性（電気を帯びていない）という意味の「ニュ

ートラル（neutral）」と、イタリア語で小さいという意味の「イノ（ino）」を組み合わせ、「ニュートリノ（neutrino）」と名付け直した。

その後、1956年に初めて、アメリカの物理学者ライネスらは原子炉から生まれるニュートリノを捕まえることに成功した[5]。命名から20年以上経って、ニュートリノが発見されたのである。

現在では、世界中でニュートリノの観測や実験が行われている。また、ニュートリノの性質や未解明の素粒子理論、さらには天文現象を解明する手がかりとして、ニュートリノの理論的な研究も行われている[6]。

#### 3. ニュートリノの性質

##### 3.1 物質を構成する素粒子

ニュートリノは、その名の通り、中性の（電気を持たない）小さい粒子（素粒子）である。そして、宇宙で最も豊富な素粒子の一つである。

身の回りのものをどんどん細かくしていくと、これ以上分けることができない最小の単位と考えられている「素粒子」にたどり着く。物質を構成する素粒子は12種類あると考えられており、すべての物質は、クォークとレプトンという素粒子の仲間から形成されている（表1）。例えば、クォーク3つ（アップクォーク2つ、ダウンクォーク1つ）からできる陽子1つと、レプトンの仲間である電子1つを組み合わせると水素原子となる。

このクォークとレプトンは、それぞれペアになる粒子を持っている。ペアになる粒子は電荷が「1」異なるという特徴がある。例えば、電子とペアになっているのが電子ニュートリ

ノであるが、電子の電荷は「-1」であり、ニュートリノの電荷は、それから1つ異なった「0」となる。ニュートリノは電荷を持たないため、他の物質とほとんど反応せず、人間どころか、地球すら容易に通り返けてしまう。そのためニュートリノの観測は非常に難しく、その性質は謎に包まれていた。

表1 物質を構成するクォークとレプトン

	第一世代	第二世代	第三世代
クォーク Quark	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム
レプトン Lepton	電子	ミュー	タウ
	電子	ミュー	タウ
	ニュートリノ	ニュートリノ	ニュートリノ

### 3.2 ニュートリノの分類

ニュートリノには「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種類とそれぞれの反粒子がある(表1)。これは「フレーバー」(弱い相互作用の固有状態)による分類である。

一方、ニュートリノは「質量」(質量の固有状態)によって分類することもできる。質量による分類の場合、 $m_1, m_2, m_3$  という3つの異なる質量を持つ、「ニュートリノ1」、「ニュートリノ2」、「ニュートリノ3」の3種類となる。

このフレーバーによる分類と、質量による分類は一致せず、一つのフレーバーを選んだ時、それは異なる質量のニュートリノの重ね合わせになっている[7]。例えば、「電子ニュートリノ」といっても、それはニュートリノ1、ニュートリノ2、ニュートリノ3が混合した状態となっている。

## 4. ニュートリノの観測

ニュートリノは身の回りを光速で飛び交っており、我々の体を1秒間に約1兆個も突き

抜けているが、ニュートリノは電荷を持たないため、他の物質とほとんど反応しない。

しかし、ニュートリノはまれに物質と反応することがある(弱い相互作用)[7]。この反応を用いることで、ニュートリノをとらえようと、世界中で実験が行われている。

日本では、1983年、岐阜県神岡鉱山に観測装置カミオカンデが建設され、カミオカンデ実験がスタートした[3]。

### 4.1 超新星ニュートリノの観測

1987年1月、カミオカンデグループが太陽ニュートリノ(太陽からやってくるニュートリノ)の観測を開始した。そのわずか1ヶ月後、大マゼラン銀河で起きた超新星爆発1987Aからのニュートリノがカミオカンデで捕らえられた[8]。ここから「ニュートリノ天文学」が開花した。その功績で、2002年に東京大学の小柴昌俊名誉教授がノーベル物理学賞を受賞している[9]。

### 4.2 大気ニュートリノ

カミオカンデグループは、大気ニュートリノ(宇宙から飛んでくる宇宙線が大気と衝突することで生成されるニュートリノ)の観測も行っていた[10]。梶田教授を始めカミオカンデグループは、その結果から、電子ニュートリノとミューニュートリノからなる成分比が理論の予想と違っている事を発見し、「大気ニュートリノ異常」という問題を提起した。

1998年には、カミオカンデより20倍ほど大きいスーパーカミオカンデ[3]を使って、その異常の原因がニュートリノ振動であることを示した[11]。

### 4.3 太陽ニュートリノ

1969年からアメリカの物理学者デイビスが太陽ニュートリノの観測を開始した。また、カミオカンデグループでも太陽ニュートリノ

の観測を行い、どちらの結果からも、太陽ニュートリノのうち電子ニュートリノの成分が、理論予測の 1/3 程度しかないことが示された [12,13]。これは「太陽ニュートリノ問題」として 30 年来の謎となっていた。

後に、マクドナルド教授が主導したカナダの SNO 実験などにより、太陽ニュートリノ問題の原因も、ニュートリノ振動であることが明らかになった [14,15]。

### 5. ニュートリノ振動

3 節で述べたように、大気ニュートリノ異常や太陽ニュートリノ問題の原因はニュートリノ振動であることが明らかとなった。では、ニュートリノ振動とはどのような現象なのだろうか。

#### 5.1 ニュートリノ振動の原理

ニュートリノ振動とは、端的に言えば、あるニュートリノが飛行中に他の種類のニュートリノに変わる現象である。例えば、初めはミューニュートリノだったものが、飛行中に

タウニュートリノに変わり、その後またミューニュートリノに変わるといった具合に、周期的にニュートリノの種類が変わる現象をニュートリノ振動という。

ニュートリノは、「粒子」とであると同時に「波」としての性質を持つ。そのため、それぞれ異なる質量を持つニュートリノ 1、ニュートリノ 2、ニュートリノ 3 は、それぞれ異なる振動数を持つ「波」として空間を伝播する。3.2 節で述べたように、ニュートリノのフレーバーは質量の異なるニュートリノの重ね合わせとなっている。つまり、異なる 3 つの波の重なり具合により、ニュートリノのフレーバーが決まる [7]。

図 1 は波の重ね合わせのイメージである。異なる振動数を持つ波を重ね合わせると、うなりが生じ、重なり具合が場所（時間）により変化する。重なり具合が変化するという事は、ニュートリノのフレーバーが変化するということになる。つまり、ニュートリノが空間を飛ぶ間に波の重なり具合（位相）が変化し、フレーバーの種類が移り変わる。この現象をニュートリノ振動という。

図 2 は、ニュートリノ振動のイメージである。簡単のため 2 種類のニュートリノとなっている。横軸は距離（時間）、縦軸は各ニュー

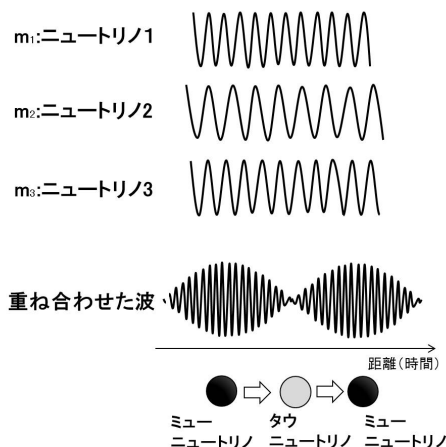


図 1 波の重ね合わせのイメージ  
異なる振動数を持つニュートリノの波が合成されることでうなりが生じ、空間を飛ぶ間にニュートリノのフレーバーが移り変わる。

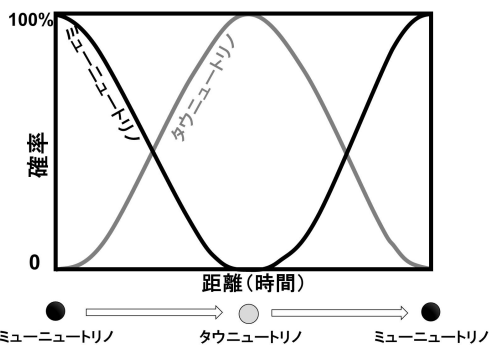


図 2 ニュートリノ振動のイメージ  
各フレーバーの確率は振動解となるため、「振動」とは、確率が振動していることを指す。

トリノの確率を表す。ある場所で、100%ミューニュートリノだったものが、別の場所では100%タウニュートリノとなり、またある場所ではミューニュートリノに戻るといった具合に、ニュートリノのフレーバーが周期的に変化し、入れ替わったように見える。「振動」とは、確率が振動していることを指している。

## 5.2 ニュートリノ振動の発見

4.2 節で述べたように、スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの観測により、1998年にニュートリノ振動が発見された[11]。

図3はスーパーカミオカンデにおける、大気ニュートリノの中に含まれるミューニュートリノの観測結果と、理論的に予測される観測数の期待値である[11]。斜線領域はニュートリノ振動がない場合に期待される観測数、実線はニュートリノ振動がある場合に期待される観測数、黒丸は実際の観測数を表す。地球を通り抜けて検出器の下からやってくるミューニュートリノの数は、上からやってくるミューニュートリノの数の半分となっている。

一方で、実際の観測結果は、ニュートリノ振動がある場合に期待される数と一致する結果となっている。従って、この結果は、ミューニュートリノが地球の内部を通って来る間に、ニュートリノ振動によりミューニュートリノから他のニュートリノ（タウニュートリノ）に変化してしまったことを示している。

ニュートリノ振動はその後、太陽ニュートリノや人工ニュートリノビームでも確認された[16]。

## 5.3 ニュートリノ振動と質量

ニュートリノ振動は、ニュートリノの質量が0だと起こらない現象である[7]。つまり、ニュートリノ振動が発見されたということは、ニュートリノが質量を持つことを示し

ている。

これまで、ニュートリノの質量は0だと考えられていた。しかし、ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノに質量があることが示され、素粒子の枠組みを説明する標準理論の見直しを迫る結果となった。

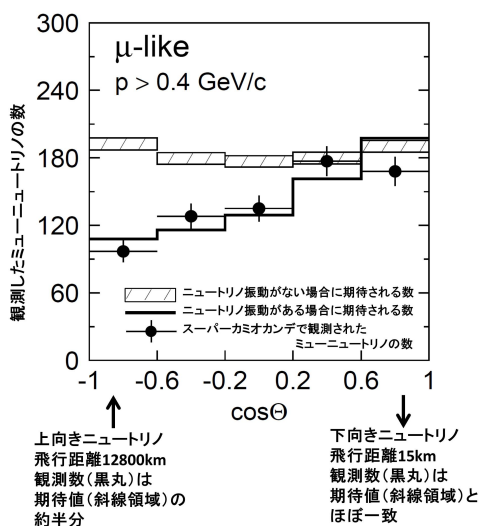


図3 スーパーカミオカンデによるミューニュートリノの観測数と期待値[11]

斜線領域はニュートリノ振動がない場合に期待される観測数、実線はニュートリノ振動がある場合に期待される観測数、黒丸は実際の観測数を表す。検出器の下から来るミューニュートリノ数（上向きニュートリノ）は、上から来るミューニュートリノ（下向きニュートリノ）の数の約半分となっている。

## 6. おわりに

1930年にパウリが予言したニュートリノが、20年以上経って発見された。その後、世界中で様々なニュートリノ実験が行われている。そして、1987年、大マゼラン銀河で起きた超新星爆発からのニュートリノをカミオカンデで検出したことで、ニュートリノ天文学が開花し、小柴氏がノーベル賞を受賞した。そして今回は、ニュートリノ振動の発見によ

り梶田氏がノーベル賞を受賞しており、日本のニュートリノ実験は世界をリードする成果をあげ続けている。

ニュートリノは、未解明の素粒子理論や天文現象、物質の起源を解明するための重要な手がかりを与えると期待されている。今後のニュートリノ研究にも是非注目してほしい。

## 文 献

- [1] The Nobel Prize in Physics 2015  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2015/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/)
- [2] Pauli, W. (1930) 'Liebe radioaktive Damen und Herren', Open letter to the group of radioactive people at the Gauverein meeting in Tübingen.
- [3] スーパーカミオカンデ  
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
- [4] Fermi, E. (1934). 'Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen. I'. Zeitschrift für Physik, **88**, Issue 3-4, pp. 161-177.
- [5] The Nobel Prize in Physics 1995,  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1995/reines-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/reines-bio.html)
- [6] Kawagoe, S. et al. (2010) 'Neutrino oscillation and expected event rate of supernova neutrinos in the adiabatic explosion model', Phys. Rev. D, **81**, 12, 123014.
- [7] Fukugita, M. and Yanagida, T. (2003) 'Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics', Springer, Berlin.
- [8] Hirata, K., et al. (1987) 'Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A', Phys. Rev. Lett. **58**, 1490.
- [9] The Nobel Prize in Physics 2002,  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2002/index.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/index.html)
- [10] 東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子

研究施設

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

- [11] Fukuda, Y. et al. (1998) 'Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos', Phys. Rev. Lett., **81**, 1562.
- [12] J. N. Bahcall et al. (1968) 'Present Status of the Theoretical Predictions for the  $^{36}\text{Cl}$  Solar-Neutrino Experiment'. Phys. Rev. Lett., **20**, 1209.
- [13] Hirata, K. S. et al. (1989) 'Observation of  $^8\text{B}$  solar neutrinos in the Kamiokande-II detector', Phys. Rev. Lett. **63**, 16.
- [14] Ahmad, Q. R. et al. (2001) 'Measurement of the Rate of  $\nu_e+d\rightarrow p+p+e^-$  Interactions Produced by  $^8\text{B}$  Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory', Phys. Rev. Lett., **87**, 071301.
- [15] Ahmad, Q. R. et al. (2002) 'Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory', Phys. Rev. Lett., **89**, 011301.
- [16] Hosaka, J., et al. (2006) 'Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I', Phys. Rev. D, **74**, 032002.



川越 至桜