

ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見

@Metachick_2021

September 5, 2025

1. はじめに
2. 受賞内容の概要と主な功績
3. ニュートリノの基礎知識
4. ニュートリノに関する二つの問題
5. ニュートリノ振動
6. ニュートリノの質量
7. まとめ

はじめに

めたち (@Metachick_2021)

- ・ 所属：数学科 B2 (物理は素人なのでお手柔らかに...)
- ・ 好き：Blender, AfterEffects, Geoguessr
- ・ 興味：数学、物理、情報、英語、哲学など...
- ・ 最近読んでる本：鹿島亮『数理論理学』、吉田伸生『ルベーグ積分論入門』など...



Figure 1: めたちだよ～

今日は 2015 年ノーベル物理学賞を簡単に解説します！

受賞内容の概要と主な功績

- ・ 2015 年のノーベル物理学賞
- ・ 受賞内容：ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見
- ・ 受賞者：梶田隆章さん、Arthur B. McDonald さん



Figure 2: Takaaki Kajita



Figure 3: Arthur B. McDonald

「ニュートリノ振動の発見」と「質量の存在証明」が功績

- ・ 太陽ニュートリノ問題の解決
- ・ 大気ニュートリノ問題の解決
- ・ ニュートリノに質量が存在することが示せた

ニュートリノの基礎知識

素粒子とは？

- ・ **素粒子**とは、これ以上分解できない(と考えられている)粒のこと。
- ・ 大きさは 10^{-18}m よりも小さい。(核子が 10^{-15}m 程度)
- ・ 電子も素粒子の一つである。



素粒子は大きく 3 種類に分けられる。

- ・ 物質粒子（物質を構成する）
- ・ 力を伝える粒子（電磁力を伝える光子や強い力を伝えるグルーオンなど）
- ・ ヒッグス場に伴う粒子（ヒッグス粒子）

さらに、これらは細かく分類すると 17 種類に分けられる。

ニュートリノは素粒子である！

物質粒子は全部で 12 種類ある。ニュートリノは素粒子のひとつである！

(e ニュートリノ、 μ ニュートリノ、 τ ニュートリノを総称してニュートリノと呼ぶ。)

- ・ アップクォーク
- ・ ダウンクォーク
- ・ チャームクォーク
- ・ ストレンジクォーク
- ・ トップクォーク
- ・ ボトムクォーク
- ・ e ニュートリノ
- ・ μ ニュートリノ
- ・ τ ニュートリノ
- ・ 電子
- ・ ミューオン
- ・ タウ

ニュートリノの特徴

素粒子であるニュートリノは幽霊粒子とも呼ばれている。

電氣的に neutral(中性) な ino(粒子) だからニュートリノと呼ばれている。

- ・ 電氣的に中性
- ・ とても軽い（電子の 10^{-6} 倍程度の重さ）
- ・ とても小さい
- ・ 透過性が高い（今この瞬間も私たちの体を通り抜けている）

→ニュートリノはとにかく他の物質と干渉しないので観測することがとても難しい素粒子である。

疑問：ニュートリノの存在をどのように予想・観測した？

Wolfgang Ernst Pauli が予言 (1930 年) :

“I have done a terrible thing, I have postulated a particle that cannot be detected”



Figure 4: Wolfgang Ernst Pauli

「 β^+ 崩壊前後でエネルギー差を計算すると辻褃が合わない」

ニュートリノが発見される前は、 β^+ 崩壊は以下の式で表されると考えられていた。

$$p^+ \rightarrow n + e^+$$

ここから、 $E = mc^2$ の式を用いてエネルギー損失を計算すると、実際に電子に持ち去られるエネルギーよりも小さくなってしまう。さらに何か電氣的に中性な粒子が飛び出していて、エネルギーを持ち去っているのではと考えられた。

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

この電氣的に中性な粒子こそがニュートリノであった。

ニュートリノは放射性崩壊で生まれる

→放射性崩壊のときにニュートリノは生まれる！

- ・ 宇宙が誕生したとき
- ・ 星の内部での放射性崩壊
- ・ 超新星爆発を起こすとき
- ・ 宇宙線が大気中の原子にぶつかったとき
- ・ 身の回りの物質からもほんの少しだけ

Frederick Reines と Clyde Cowan が観測 (1956 年)

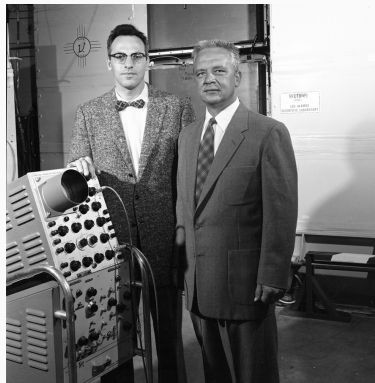


Figure 5: Frederick Reines(左)
と Clyde Cowan(右)

「チェレンコフ光を利用する」

荷電粒子が水中などで超高速で動くと**チェレンコフ光**という光を発する。つまり、荷電粒子の動きならば捉えることができる。しかし、ニュートリノは中性の粒子であった。どのようにしたらニュートリノを観測できるだろうか？

ニュートリノは**極稀に荷電粒子と衝突**する。ぶつかった荷電粒子がチェレンコフ光を発する。

→そのチェレンコフ光を観測すればよい！

2015 年ノーベル物理学賞でのニュートリノの観測

梶田さんはどうやって観測・実験した？

→スーパーカミオカンデを使った！

- ・ ニュートリノの検出器であるスーパーカミオカンデが日本の岐阜県飛騨市神岡町に存在する。
- ・ チェレンコフ光を観測するために大量の（約 5 万トン）水で満たされている。
- ・ 梶田隆章さんはスーパーカミオカンデで研究していた。



Figure 6: Takaaki
Kajita

- ・ e ニュートリノ、 μ ニュートリノは観測して、数えることも比較的容易。
- ・ τ ニュートリノは観測自体は可能だが、数えることが難しい。

→基本的に、 e , μ ニュートリノを観測していた

スーパーカミオカンデ

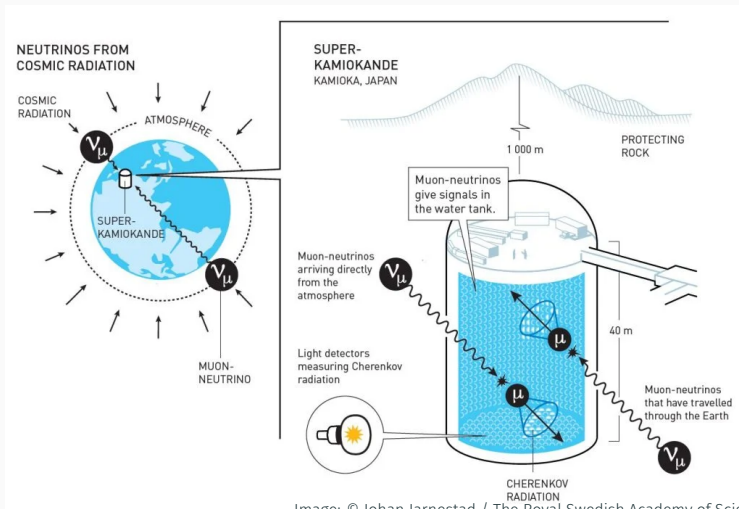


Image: © Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences. Source: "The Nobel Prize in Physics 2015 — Popular information", NobelPrize.org. Accessed: 5 Sep 2025.

Figure 7: スーパーカミオカンデによる測定の様子

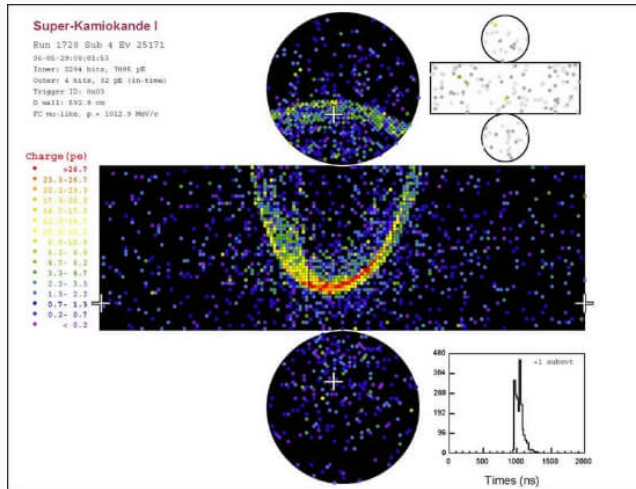


Figure 8: 実際の測定結果

Image: Super-Kamiokande official site — “検出器について”. Accessed: 5 Sep 2025.

なんと！ リアルタイムモニターもあるんです！

リアルタイムモニター：<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/realtimemonitor/>



ニュートリノに関する二つの問題

太陽からくるニュートリノ

- ・ 太陽内部の核融合反応で生じた e ニュートリノは、**ほぼ反応せず**に地球へと降り注いでいる。
- ・ その e ニュートリノを観察すれば**太陽内部の核融合の様子**がわかる！

実際に、Raymond Davis が太陽からくる e ニュートリノを観測した。

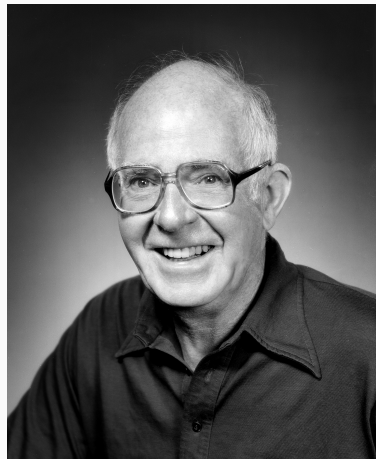


Figure 9: Raymond Davis

Image: Brookhaven National Laboratory — “Nobel Laureate Raymond Davis Dies”.

Accessed: 5 Sep 2025.

問題発生：太陽からくる e ニュートリノの**実測値が理論値の 30% 程度**であった。

1970-1994 の測定結果は以下の通りだった。

- ・ 測定値 : $2.56 \pm 0.16 \pm 0.16$ SNU
- ・ 理論値 : 8.5 ± 0.9 SNU

※ SNU とは 10^{-36} captures/atom/sec のこと。

どうして太陽ニュートリノは欠損した...？

- ・ 測定結果に間違いはなかった
- ・ 太陽内部での核融合の理論計算に間違いはなかった

→ ニュートリノに特殊な性質があるのかもしれない

大気からくるニュートリノ

- ・ 大気中の原子に高いエネルギーを持つ宇宙線があたることでニュートリノが発生する。
- ・ 大気ニュートリノには **e ニュートリノ** と **μ ニュートリノ** の 2 種類がある。

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu})$$

- ・ 大気ニュートリノはそのまま**地球内部を貫通**してどこか遠くへ行く。

- ・ 宇宙線はまばらに降り注いでる。
- ・ ニュートリノは地球内部を貫通して進むので、普通に考えれば...

「検出するニュートリノの量には等方性があるはず」

大気からくるニュートリノ

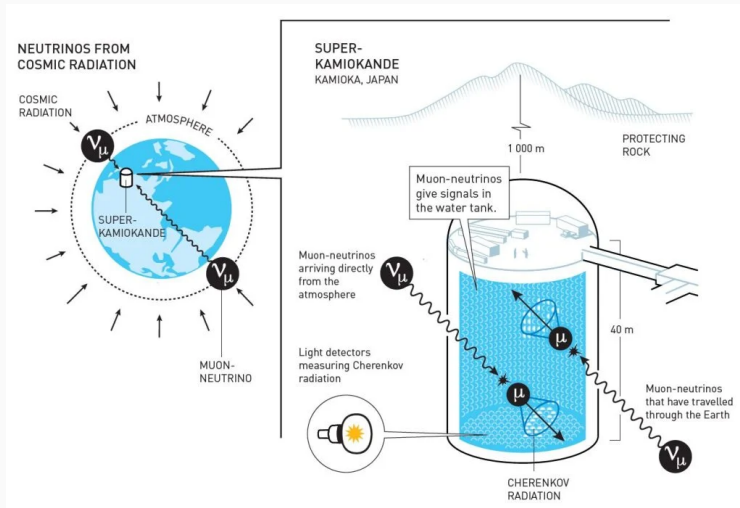


Figure 10: スーパーカミオカンデによる測定の様子

Image: NobelPrize.org. "Popular information". Accessed: 5 Sep 2025.

問題発生：地球の裏からのニュートリノが少なかった。

大気ニュートリノ問題

- ・ 横軸：天頂角
- ・ 水色：当初の理論値
- ・ 黒色：実測値

地球の裏からくる μ ニュートリノの値がずれていることがわかる。

→やはり特殊な性質がある？

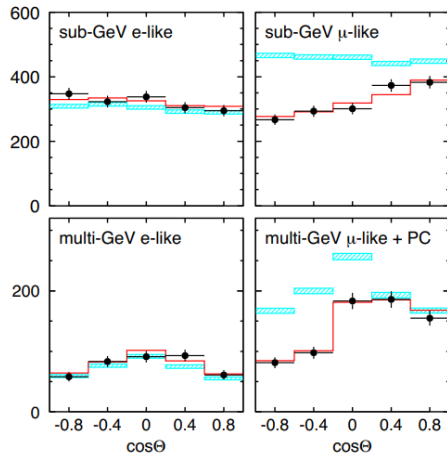


Figure 11: 大気ニュートリノの観測結果

Image: "The Nobel Prize in Physics 2015 — Advanced information". Accessed: 5 Sep 2025.

その特殊な性質こそがニュートリノ振動だった

ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは？

ニュートリノ振動

→ニュートリノは e, μ, τ の 3 つのフレーバーを行き来することができる。

- ・ ニュートリノのフレーバーは固有の状態ではなく、質量固有状態の重ね合わせである。
- ・ フレーバーは検出されるときのもので、質量固有状態は質量に対応した分類。イメージ的には対角化して扱いやすくした状態。
- ・ ニュートリノが距離 X 移動するときに、あるフレーバー α から別のフレーバー β へと変化する確率は、以下で与えられる。
- ・ つまり、ニュートリノはその状態が振動していると考えられる。

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\theta_M) \sin^2\left(\frac{\Delta m_M^2 X}{4E}\right)$$

ニュートリノ振動のようす

- ・ 大気中でニュートリノが生成される典型高度は 15km 程度
- ・ 地球の直径は 13000km 程度

μ ニュートリノの数が減っていることの辻褄が合う！

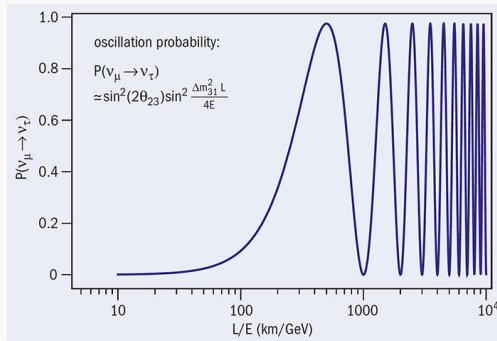


Figure 12: μ ニュートリノから τ ニュートリノになるようす

大気ニュートリノ問題の解決

- ・ 横軸：天頂角
- ・ 水色：当初の理論値
- ・ 赤色：ニュートリノ振動を考慮した理論値
- ・ 黒色：実測値

ニュートリノ振動を仮定した場合、矛盾なく説明で来ている！

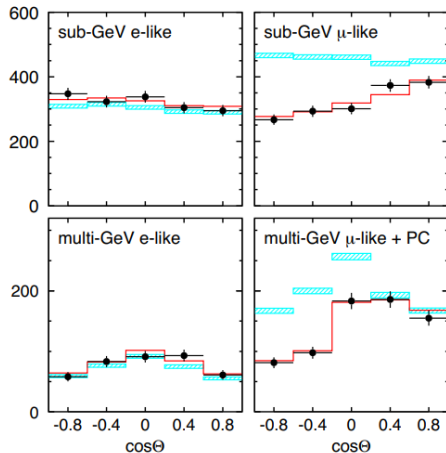


Figure 13: 大気ニュートリノの観測結果

Image: "The Nobel Prize in Physics 2015 — Advanced information". Accessed: 5 Sep 2025.

疑問：ニュートリノ振動を仮説を検証するには？

- ・ τ ニュートリノは大気中で生成されない。
- ・ μ ニュートリノの振動から形成される。
- ・ 数を数えるのは難しいが、観測ならできる。

→例えば、上空から τ ニュートリノ が観測されれば検証できる！

→実際に、 τ ニュートリノ が生成されていると考えて矛盾のない結果が得られた！

太陽ニュートリノ問題もニュートリノ振動で説明がつく。

- ・ e ニュートリノだけを検出していたから欠損したのでは...？
- ・ 実際に、3種類すべてのニュートリノを検出したら欠損はなかった！

※ τ ニュートリノの検出には困難を極めた

ニュートリノの質量

ニュートリノ振動が起きる $\implies$ 質量が存在する

- ・ フレーバー状態（例： ν_e, ν_μ ）は質量固有状態 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle$ の重ね合わせで表された：

$$|\nu_\alpha\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle.$$

- ・ 質量固有状態は時間発展で異なる位相を取る (e^{-iE_it})。 $m_1 \neq m_2$ なら相対位相（うなり？）が生じ、フレーバーが変化する（振動）。つまり、振動の存在は $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2 \neq 0$ を意味する（＝少なくとも **ある固有状態は質量を持つ**）。
- ・ 実際の質量は、電子の 10^{-8} よりも軽いとされているが、正確な値は不明っぽい。

ニュートリノ振動の式（物質中を含む場合）

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\theta_M) \sin^2\left(\frac{\Delta m_M^2 L}{4E}\right),$$

- ・ ここで $\theta_M, \Delta m_M^2$ は「物質（電子密度）により有効に変化した混合角／質量差」。この現象は **MSW 効果** と呼ばれる。
- ・ 2 フレーバー近似と超相対論近似（ $E \gg m$ ）のもとで導かれる。実験でよく使う単位に直すと

$$P \approx \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}\right),$$

（1.27 は単位変換による定数）

まとめ

ニュートリノ振動は画期的！

- ・ ニュートリノは幽霊粒子で、謎に満ちていた。
- ・ 3種類のニュートリノ互いに行き来していた。
- ・ ニュートリノには質量が存在する。

ニュートリノを調べるということは...

- ・ 太陽の内部の様子がよくわかる
- ・ 宇宙のはじまりがよくわかる（宇宙マイクロ波背景放射）
- ・ 素粒子の正確な理論がわかる

- Lars Bergström ほか : 『The Nobel Prize in Physics 2015 Popular information』, THE NOBEL PRIZE, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2015/popular-information/> , 2024/07/09
- Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences : 『NEUTRINO OSCILLATIONS』, <https://www.nobelprize.org/uploads/2017/09/advanced-physicsprize2015.pdf> , 2024/07/09

- ・ 東京大学：『ニュートリノって何？』，スーパーカミオカンデ公式ホームページ，<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/neutrino/about/>，2024/07/09
- ・ 井上邦雄：『太陽ニュートリノ振動発見の歴史』，東北大学ニュートリノ科学研究センター，<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/JPSCR/2016S/neutrino/4-inoue.pdf>，2024/07/10
- ・ 京都大学理学研究科・理学部：『ニュートリノが質量をもつとは』，<https://www.sci.kyoto-u.ac.jp/ja/academics/programs/scicom/2015/201510/05>，2024/07/11
- ・ 鈴木厚人：『カミオカンデとニュートリノ』，丸善出版，2016 年