

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

October 10, 2024

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

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 1: Takaaki Kajita



Figure 2: 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 3: 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。



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ふ。さらに何か電気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。



この電気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)

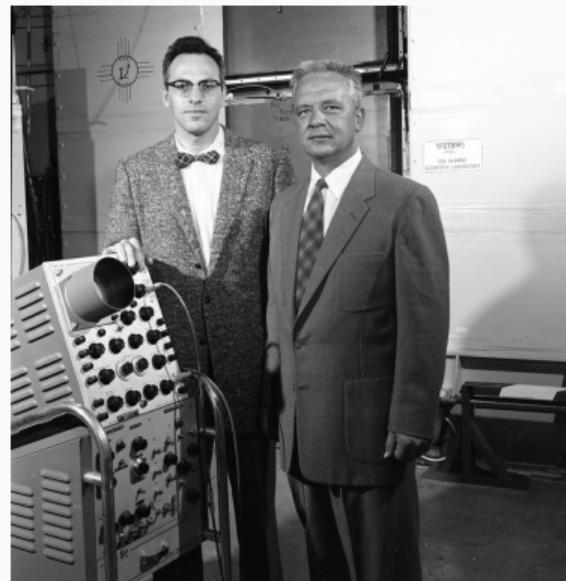


Figure 4: Frederick Reines(左)
と Clyde Cowan(右)

「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！

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 5: 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

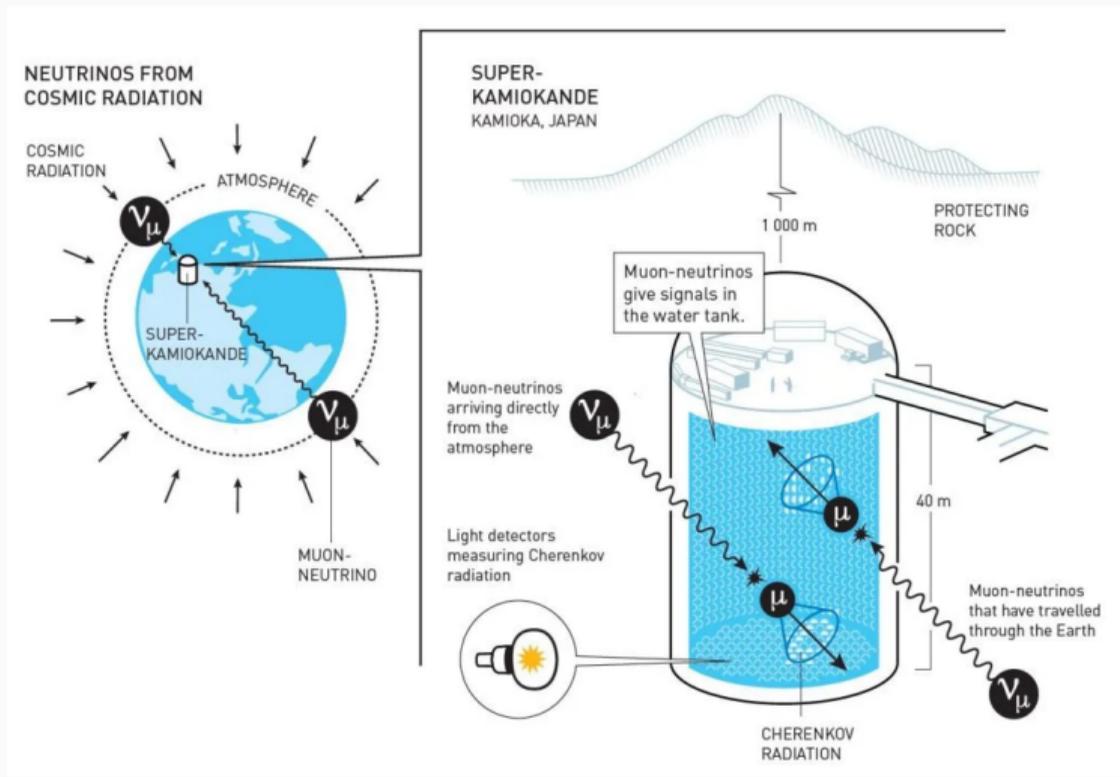


Figure 6: スーパーカミオカンデによる測定の様子

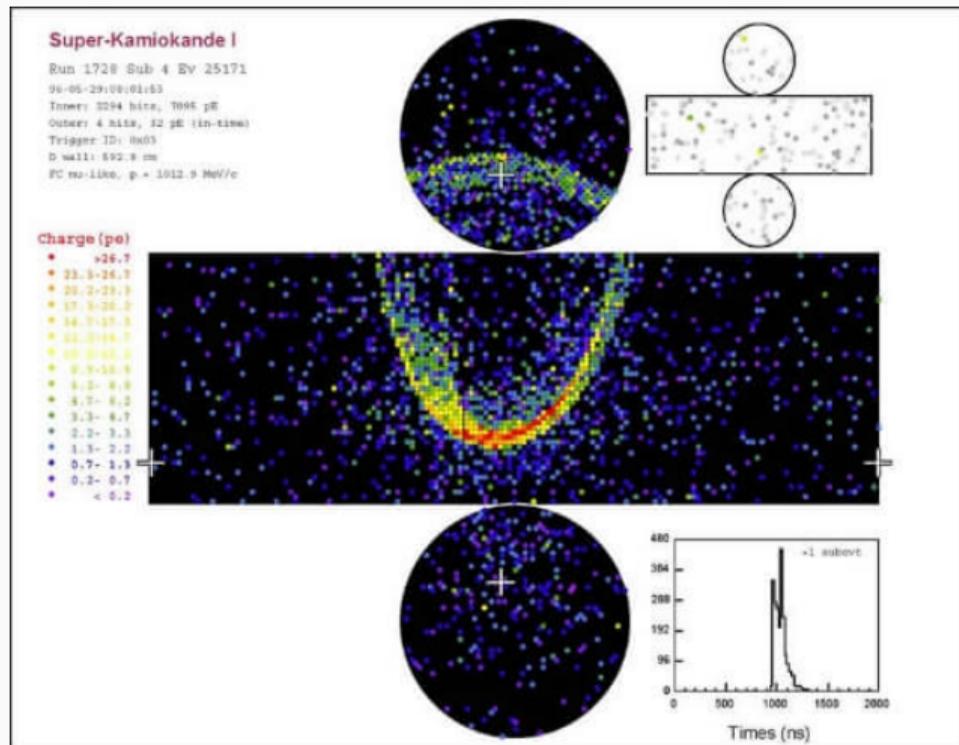


Figure 7: 実際の測定結果

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。

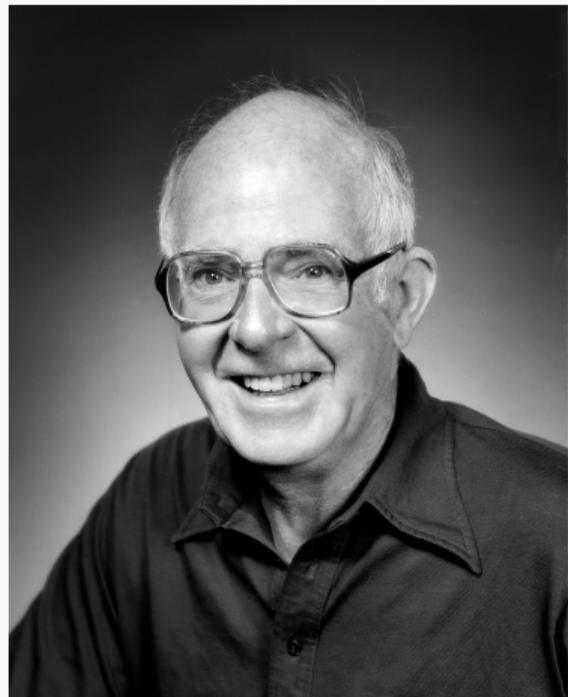


Figure 8: Raymond Davis

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

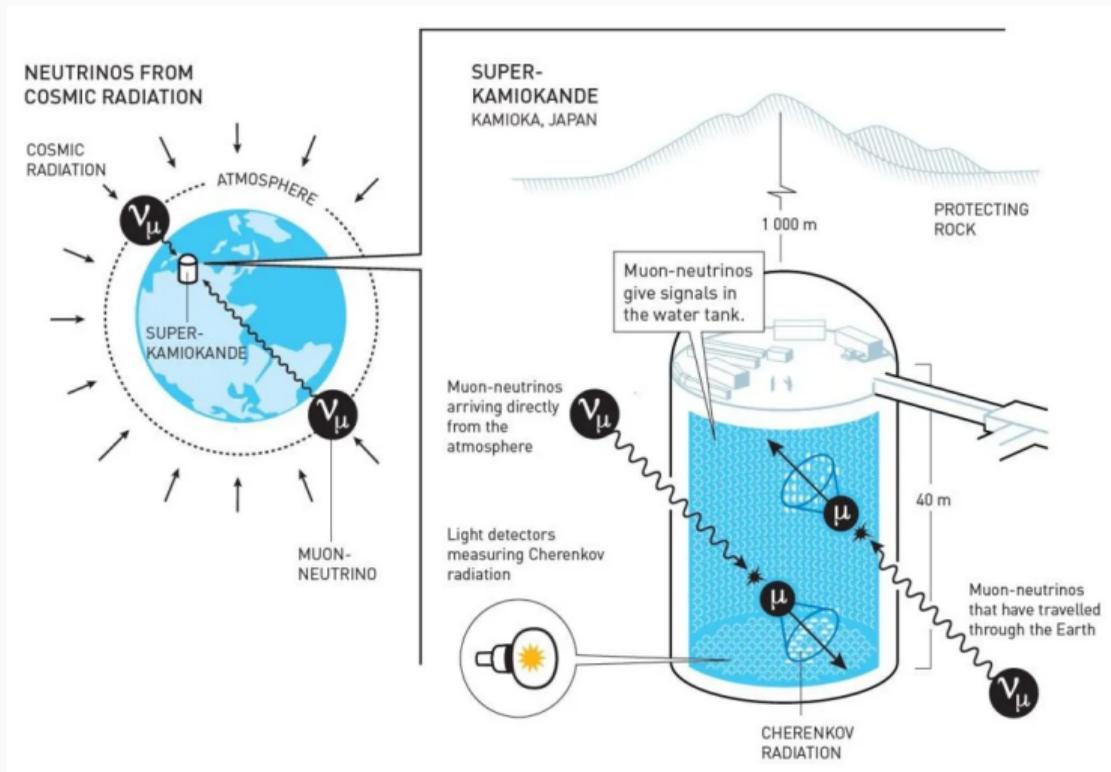


Figure 9: スーパーカミオカンデによる測定の様子

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：実測値
- 赤色：理論値

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？

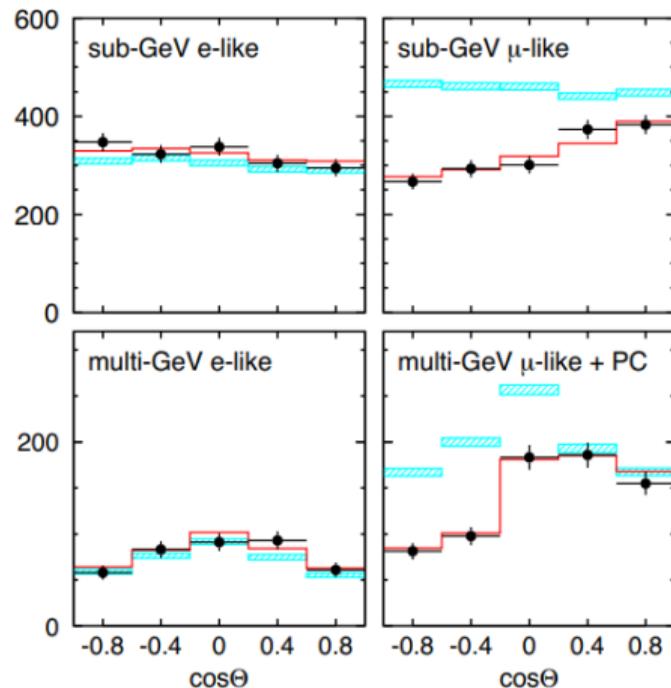


Figure 10: 大気ニュートリノの観測結果

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“種類”を行き来することができる。

- ニュートリノ振動は量子力学的効果。
- ニュートリノの“種類”は固有の状態ではなく、重ね合わせの状態である。

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau) \simeq \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\delta m^2 L}{E}\right)$$

- 大気と地球の距離は
15km 程度
- 地球の直径は
13000km 程度

μ ニュートリノの数が減
っていることの辻褃が合
う！

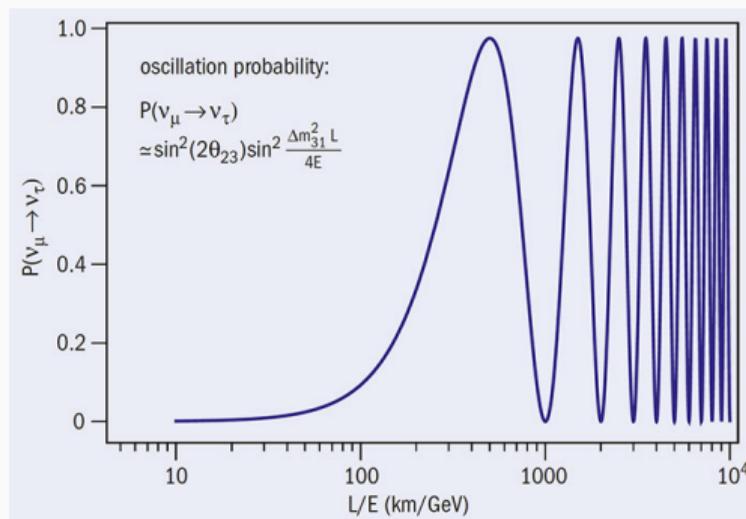


Figure 11: μ ニュートリノから τ ニュートリノになるようす

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

ニュートリノ振動を仮定した場合、矛盾なく説明できている！

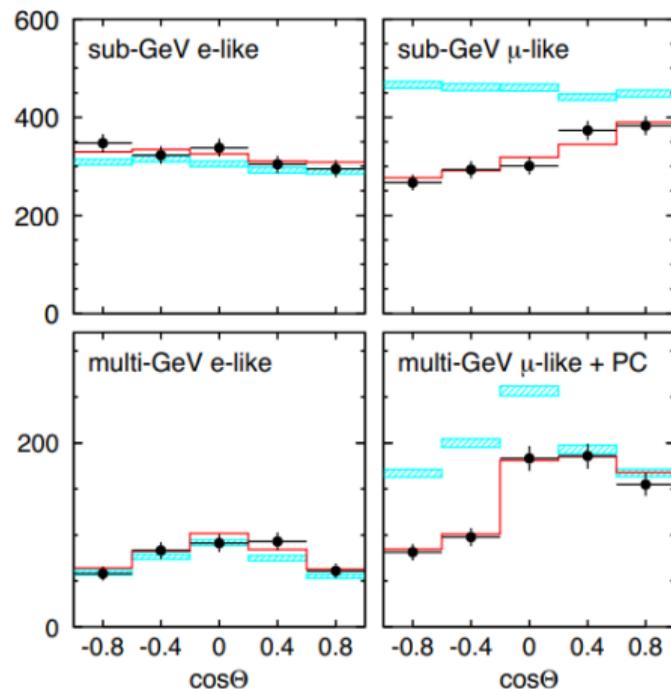


Figure 12: 大気ニュートリノの観測結果

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こる = ニュートリノが質量を持つ

- 従来の理論では、ニュートリノは質量を持たないと考えられていた。
- ニュートリノ振動が起こることによって質量が存在せざるを得なくなった。
- 従来の理論を改めるきっかけとなった！

$$m_{\nu_e} < 2\text{eV}/c^2$$

- ニュートリノの正確な質量の測定は誰も成功していない。
- ニュートリノの質量に関する不等式は得られている。
- ニュートリノは電子より 100 万倍以上軽い。

「ニュートリノ振動が起こる = ニュートリノが質量を持つ」
↑これは、なぜ？

質量を持たないと仮定してみる。

- 質量を持たない物質は光速で動く。
- 光速で動くと、時間が止まっているように見える。
- ニュートリノが別のニュートリノへ変化するには時間が必要。

→矛盾する！

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