

第7回

ニュートリノ物理学への招待

講師名 首都大学東京 理工学研究科 教授

安田 修 (やすだ おさむ)氏

受講日 平成29年10月21日

場 所 生涯学習センター

参加者 合 計 71名

受 講 者 数 60名

当日のみ受講者 11名



講師プロフィール

首都大学東京理工学研究科(物理学専攻)教授、理学博士

1959年北海道出身

1986年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了

1986年カリフォルニア工科大学研究員

1989年ノースカロライナ大学研究員

1991年東京都立大学助手

1999年オレゴン大学客員教授

2005年首都大学東京准教授を経て、2013年より現職

主な研究分野は素粒子論

《 はじめに 》

ニュートリノは観測のむずかしい素粒子の一種です。ニュートリノ物理学は、日本をはじめとする世界の観測結果により最近めざましい発展を遂げています。この講演では、2015年にノーベル賞の対象となった梶田先生のニュートリノ振動の発見を中心に、素粒子物理学の初歩から始めて、ニュートリノ研究の将来計画についても簡単に紹介します。



《 講義のあらすじ 》

1. 素粒子の基礎知識

2年前に梶田先生とマクドナルド博士がノーベル賞を受賞しました。どのような業績で受賞した

か、今後ニュートリノの研究はどのようなことが計画されているか、についてまずお話しします。

今のところニュートリノの研究は、実社会に何

の役にも立っていません。この領域の法則とはどのようなものかを探求するのが我々の使命で、数百年後に役立つかもしれないと思ってください。

ニュートリノは素粒子の一種ですので、まず素粒子について紹介します。水を構成している分子の水素と酸素は、真ん中に核があり、その周りを電子がまわっています。この原子核は、陽子と中性子と呼ばれる核子から成り立っており、さらに核子は三つの細かい粒子で成り立っていることが、1960年代にわかりました。その細かい粒子はクォークと呼ばれ、**u** クォーク、**d** クォークの2種からなり立っています。「それ以上細かく分けられないもの」が素粒子の定義です。

ニュートリノが最初に導入されたのは1933年です。物理の基本法則に「反応の前と後でエネルギーの和は同じである」というエネルギー保存則があります。また「運動量(速度×質量)の和も反応前と後で一定」という運動量保存則があります。ところが、中性子が陽子と電子に崩壊する反応では、この法則を満たしていないという問題がありました。それを解決するため、観測にかかっていない電氣的に中性な軽い粒子を導入しよう、とパウリが提言し導入したのがニュートリノの発端です。その22年後、ライネルとコーワンが原子炉近くの検出器でニュートリノを発見しました。原子炉は、中性子が陽子・電子・ニュートリノに盛んに崩壊(ベータ崩壊)している、言わばニュートリノの宝庫です。ニュートリノは物質と反応しないので、原子炉外に大量に出てきます。ニュートリノが軽い粒子であることは以前からわかっていましたが、カミオカンデの実験で初めて質量があると実証されました。これにより2年前に梶田先生等のノーベル賞受賞となりました。

原発以外のニュートリノの源が宇宙線です。宇宙のかなたから等方的に降ってくる陽子やヘリウム原子核を宇宙線と呼びます。飛んできたヘリウム原子核は、空気中の酸素・窒素分子と衝突し、2次粒子ができ、更にそれが崩壊して3次粒子が

できます。その中にミュー(μ)粒子と呼ばれるものがあります。その μ 粒子もわずか 10^{-6} 秒で崩壊してしまいます。電子と同様な性質を持っていますが、質量は電子の200倍です。

これまでをまとめると、素粒子は第3世代まであり、第1世代は、**u** クォーク、**d** クォークと電子ニュートリノ(ν_e)で、第2世代が μ 粒子とミューニュートリノ(ν_μ)、第3世代が**u**クォークの替りにトップクォーク、**d**クォークの替りにボトムクォーク、電子ニュートリノの替りに τ ニュートリノ(ν_τ)があります。現在は第3世代までです。

アインシュタイン特殊相対性理論の有名な式に $E=mc^2$ があります。これは質量を全部エネルギーに変えると、光速 c が秒速30万 km という大きな値であるために莫大なエネルギーになる、逆に言うと、エネルギーを質量にするときには、ものすごく高いエネルギーをつぎ込まないと重たい粒子は作れない、という事を意味しています。第2、3世代は、第1世代に比べると重たい粒子ばかりなので、何か特別な工夫がないと作れないことが知られています。

粒子に対し、反粒子も存在します。粒子と質量が同じで、電荷(電氣的な性質を持っている量)が逆符号の粒子のことです。電子の反粒子は陽電子と呼ばれ、1930年にディラックが提唱し、その2年後にアンダーソンが発見しました。何故、我々の宇宙に物質だけがあって、反物質はないのかという問題は素粒子論と宇宙論の最前線の研究課題ですが、答えはまだ出ていません。

2. ニュートリノに働く力と観測方法

自然界には次の四つの力あるいは相互作用があることが知られています。

- ① 強い相互作用:クォークが三つ集まって、陽子、中性子になっている
- ② 電磁相互作用:電荷をもった粒子同士の間、引力なり斥力が働く
- ③ 弱い相互作用:中性子が崩壊し、陽子・電子・反電子ニュートリノへのベータ崩壊を引

き起こす

- ④ 重力相互作用:大きさが桁違いに小さいため、素粒子実験では無視してよい

重力相互作用を除く三つの相互作用を扱う理論が、素粒子標準模型と言われます。ニュートリノは電氣的に中性で、電子のように電磁相互作用が働かず、直接検出できない観測の大変難しい粒子です。ではどうやって観測するか。例えば、ニュートリノと原子核の周りをまわっている電子とは弱い相互作用が働いており、電子が吹き飛ばされるという現象が起こります。その電子を見ることにより、間接的にニュートリノを確認するという方法があります。もう少しエネルギーが高い場合は、中性子と μ ニュートリノがぶつかって陽子に変わり、 μ 粒子が出てきます。 μ 粒子は電荷をもっているため観測可能であり、ニュートリノの存在を推測できます。但し、この反応はめったに起こらないため観測が難しい訳です。そのためスーパーカミオカンデが力を発揮します。

スーパーカミオカンデは円筒型の測定器で、中に水がいっぱい入っています。水中を高エネルギー(高速)で荷電粒子が走ると、チェレンコフ光と呼ばれる一種の衝撃波が発生します。スーパーカミオカンデの周りに光センサーを多数置くと、どういう方向にエネルギーを持った荷電粒子が飛んでいるか観測できます。これを水チェレンコフ観測器と呼びます。施設は地下に設置されます。絶えず降ってくる宇宙線の μ 粒子は、ノイズとなり観測の障害となりますが、 μ 粒子は土と反応するため、地下深くで観測することによりノイズを減少させて観測を有利にするためです。

3. ニュートリノ振動とは

今回のような一般的な講演には数式を使わないようにしていますが、ニュートリノ振動については、数式を出さざるを得ません。ご理解願います。

ニュートリノの種類が変換される確率は走った距離に関して振動的な振る舞いをするため、この

現象のことをニュートリノ振動と呼んでいます。

真空中のニュートリノ振動(量子力学的干渉効果)

種類の違うニュートリノの状態 ν_μ, ν_τ と質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2) が2行2列の行列により

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad \theta: \text{混合角}$$

と関係つけられている時、エネルギーEで、距離Lだけニュートリノが走る間に ν_μ から ν_τ に変換される確率は

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 c^4 / eV^2) (L/km)}{(E/GeV)} \right) \quad \Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

: 質量二乗差

となること、示されている (1962年 牧一中川一坂田)。

牧 二郎 中川 昌美 坂田 昌一

確率は距離Lの振動的な関数→ニュートリノ振動と呼ばれる

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 c^4 / eV^2) (L/km)}{(E/GeV)} \right) \quad \Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

この値が $\pi/2$ になる時にニュートリノの変換確率が最大となる

$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} eV^2$ なら $E=0.6 GeV \rightarrow L \approx 300 km$ (T 2 K 実験)

$\Delta m^2 = 8 \times 10^{-5} eV^2$ なら $E=4 MeV \rightarrow L \approx 100 km$ (カムランド実験)

●素粒子の現象が数km~数百kmの距離で観測される特異な例

●実験からは θ と Δm^2 のみしかわからないが、ニュートリノ振動があれば、少なくとも一つの質量 $\neq 0$ が言える

4. 大気ニュートリノの話

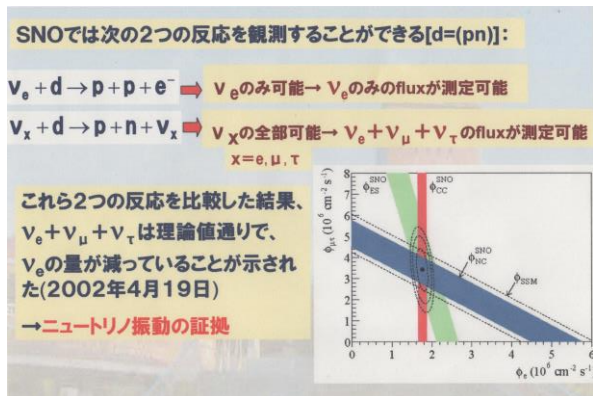
宇宙線が降ってきて大気分子と衝突し、2次宇宙線が出来ます。その主なものはパイ(π)中間子で、正の電荷を π^+ 、負の電荷を π^- と言い、 π^+ と π^- はあつという間に μ 粒子と μ ニュートリノに崩壊します。 μ 粒子もまたすぐ崩壊し、+の場合は陽電子・電子ニュートリノ(ν_e)・反 μ ニュートリノ($\bar{\nu}_\mu$)に、-の場合は電子・反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)・ μ ニュートリノ(ν_μ)に崩壊します。これらを観測することが大気ニュートリノの観測と呼ばれます。大気ニュートリノ観測で面白いことは、ニュートリノはそれ以上崩壊しませんので、ニュートリノと反ニュートリノの区別をしなければ μ タイプのニュートリノと電子タイプのニュートリノが2:1に理論的になることです。ところが観測では1.3:1になっています。少し μ タイプの方が減っており、これを大気ニュートリノ欠損と言います。その原因

は、 ν_μ が ν_e に変換する時ために、 ν_μ の量が減っていることです。1998年のスーパーカミオカンデの実験データで確認されました。

5. 太陽ニュートリノの話

太陽の中で何が起きているかは、原子核研究者ベーテが最初に核融合反応と解明しました。4つの陽子から、ヘリウム原子核ができ、その際2つの陽電子、2つの電子ニュートリノが発生します。この反応では、わずかなエネルギーが残存します。その残存エネルギーが熱として発生するプロセスが、太陽の中で起こる核融合反応です。ここで発生する電子ニュートリノを太陽ニュートリノと呼びます。

カナダオンタリオ州の鉱山で行っている、SNO (Sudbury Neutrino Observatory)という実験があります。標的として重水(陽子と中性子の束縛状態である重陽子+酸素から成る)を使っているのが特徴です。重水のメリットは2つの反応を同時に計測できることで、画期的な実験でした。



6. その後の発展: 三世代ニュートリノ振動

ニュートリノは厳密には3種類あり、質量で定義できる状態も3種類あります。その間の組み合わせを、行列を使いしっかり議論する必要があります。CP位相と呼ばれる量が素粒子物理学では大変重要です。C(C:粒子を反粒子に入れ替える)とP(P:上下左右の向きをひっくり返す)両方の変換に対して、理論が不変かどうかを判断する量がCP位相です。

ニュートリノの質量と混合

混合行列は牧・中川・坂田行列と呼ばれる(4個の変数を含む)

実際にはニュートリノには3世代あるので、3種類の混合となる:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3 \\ U_{\mu1}\nu_1 + U_{\mu2}\nu_2 + U_{\mu3}\nu_3 \\ U_{\tau1}\nu_1 + U_{\tau2}\nu_2 + U_{\tau3}\nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

3状態を導入して議論するので、確率は複雑になる

牧・中川・坂田行列の4個の変数:

$\theta_{12} = \theta_{\text{太陽}}, \theta_{23} = \theta_{\text{大気}}, \theta_{13}$: 3つの混合角

δ : CP非保存の位相

最終的に求めるものは牧・中川・坂田行列の変数4個と質量二乗差2個

質量の二乗: $m_3^2, m_2^2, m_1^2, 0$

CP非保存があると、重い粒子が軽い粒子に崩壊するスピードと、重い反粒子が軽い反粒子に崩壊するスピードに違いが出てくることが知られています。このことにより、宇宙には物質ばかりがあり、反物質のないことが説明できるかもしれないと考えられています。現在は、宇宙はもともと火の玉→膨張し冷却→陽子中性子が出来→原子核→原子→分子→物質となってガスを作り、惑星・恒星になった、と理解されています。その初期の過程で、重たい粒子は軽い粒子に崩壊していく。最初粒子・反粒子は同数あったが、重たい粒子の崩壊スピードが遅く、その結果物質のみ残ったのではないかという仮説があります。この仮説を立証するために、CP対称性の破れについて盛んに研究がなされています。

2011年から、茨城県東海村に大型の加速器施設を作り、そこから300km先の神岡スーパーカミオカンデにニュートリノを打ち込む、T2K (Tokai to Kamioka)という計画が始まっています。この実験から、2011年6月に $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ というニュートリノ振動の事象が初めて発見されました。

7. ニュートリノ振動実験の将来計画

T2HK (Tokai to HyperKamiokande)という、スーパーカミオカンデに代わり、より大型のハイパーカミオカンデ建設計画があります。測定器の体積を増やし事象数を増やして、CP非保存位相を測ろうとするものです。この計画は、2025年にオ

ペレーション・運用が始まるという、非常に息の長い実験です。

米国ではDUNEという計画があります。シカゴ郊外の加速器から1,300km先のサウスダコタ州の測定器まで、ニュートリノを高エネルギーで放射します。2026年頃実験開始とされています。

最後に、費用の面についてちょっと触れます。1GWの原子力発電所がほぼ5,000億円、昔のアポロ計画が今の金額で10兆円。それに対し、ハイパーカミオカンデ計画の費用は約800億円と見積もられています。

ご清聴ありがとうございました。

《Q&A》

Q1: 膨大な国際協力の研究に影響を与えるファクターは、お金と人材でしょうか。日本の立ち位置は？

A1: 昔の日本は、お金がなく理論研究だけでした。その後、基礎研究・実験型研究にお金を割けるようになりました。それと若手の育成を地道に行ったことが成果につながっています。日本のニュートリノ観測については、外国人も参画し、世界でもダントツに成功していると思います。

Q2: 福島原発をX線撮影で透視した写真を見ましたが、ぼやけてあまりわかりませんでした。この透視に素粒子のようなものを使ったようですがいかがですか。

A2: 原子炉を通過した μ 粒子を観察して、炉中にどれだけデブリが残っているか分かったようですが、底の方がよく撮れなかったという話です。ただし、カメラが炉内に入る前に素粒子で観察できたことは、応用として画期的なことと思います。

Q3: 神岡鉱山とカミオカンデの関係についてもう少し説明願います。また、日本の素粒子物理学は世界の先端をいっていますか。

A3: カミオカンデが始まった頃は、鉱山の採掘をしていたのですが、今では止めて昔の鉱山穴のメンテナンスに力を入れています。小柴先生がこの場所に最初に目を付けられました。計画中のハイパーカミオカンデは、体積でスーパーカミオカンデの10倍です。光センサーは表面積に比例しますので、その数の差は大変大きい。日本の素粒子に関し、実験面は世界でダントツです。国際協力で高い成果を上げています。

Q4: 反電子ニュートリノについてもう少し説明願います。

A4: μ ニュートリノと中性子が反応すると、マイナスの電荷をもった μ 粒子と陽子になる。これを反ニュートリノと μ ニュートリノバーにしたとすると、反応は起こりません。反応の仕方が違い、ニュートリノと反ニュートリノには違いがあることは、実験的に証明されています。

- | | |
|---|---|
| <input type="radio"/> $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ この反応は起こる | <input type="checkbox"/> $\bar{\nu}_e + n \rightarrow e^- + p$ この反応はおこらない |
| <input type="checkbox"/> $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$ この反応はおこらない | <input type="radio"/> $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ この反応は起こる |

Q5: ニュートリノは役に立たないというお話がありましたが、莫大な国家予算を使い、研究者にノーベル賞が授与されることに驚いています。

A5: 個人の価値判断によると思います。ピュアなサイエンスで業績を上げるという事は、その国の品位を高めると思います。100年後、500年後を見据え、例えば100年前に電子が発見されたときには、何の役にもたてなかつたが、現代を見ると様変わりですね。自然科学の使命は、今は役に立たないが、物質の原理を探求しているという事だと思います。ご理解とご支援をお願いします。
理科系は確かに大変な研究もありますが、貴重な経験が得られますので、能力のある方は是非このような分野に進んでいただきたいと思います。

Q6: ニュートリノはなんでも通す物質・粒子とのことです。できることが具体的にあつたら教えてください。

A6: 地球の内部密度、特にコア密度はよくわかっていません。もしニュートリノ振動のパラメーターが全部測られた暁には、日本の加速器からブラジルに向けてニュートリノを放射し、地球内部の密度を正確に測定できると思います。ニュートリノを検出するのはなかなか困難です。測定器をどんどん大きくしなければならず、置き場所も問題です。技術的な応用はなかなか難しいのかなと思います。

(船富)