

45 「中間子の予言」

21 「陽電子の予言」に続いて、今度は中間子の予言について書いてみたい。

中間子は湯川英樹が予言した素粒子である。湯川が日本人初のノーベル賞受賞者であることを知らない人はいない。彼の受賞は、敗戦に打ちひしがれた日本人の心に大きな自信と希望を与えた。

湯川の偉大な人物像を紹介した本は多い。しかし、彼の発見は何が凄いのか、その具体的な業績は専門分野の人以外には理解されていない。ここでは、その業績についてできるだけ解り易く書き、少しでも理解してもらいたいと思う。

湯川が京都大学に入ったのは1926年、量子力学誕生の時期だった。彼よりもわずか5、6歳年上のハイゼンベルクやディラックが次々と論文を発表し、物理学の世界を大きく動かしていた。

当時は、シュレーディンガーが確立した波動力学（21 「陽電子の予言」参照）により、原子核の周りを回る電子のふるまいを研究するのが主で、大多数の学者は原子核の中まで入り込むことはしなかった。その理由は原子核の構造が全くわからなかったからである。

そんな中、湯川は不可解な原子核の中に真正面から踏み込んで行った。回りに量子力学を理解する先生もなく、勿論教科書もない。しかし、原子核や素粒子の世界の解明という点ではスタートラインに立ったばかりであり、日本が欧米に遅れているということとはなかった。

「原子核は陽子と中性子の集合体」であると多くの学者が捉え始めたころ、湯川が取り上げたのが陽子や中性子といった原子核を組み立てている素粒子の間に働く力、つまり核力の本質に迫ることだった。

陽子は+の電荷を持つので、2つ以上あれば反発して離れてしまう。中性子には電荷がないので、引き寄せあう力は働かない。それなのに、なぜ陽子と中性子は集まって原子核を構成しているのだろうか？そこには、陽子と中性子をしっかりと引き寄せている、何らかの力があるはずである。

原子の中に存在する力は2つ、1つは陽子（+）と電子（-）の間に働く電氣的な引力（電磁力）そしてもう一つは陽子と中性子の間に働く核力だ。そして核力は、電磁力よりも大きくなくてはならない。

原子核の周りに漂っている電子は、陽子や中性子と比べて比較にならないほど質量が小さい。そして、-電荷を持ち、原子核の中にある+電荷を持つ陽子とのバランスを保っている。従って核力は、陽子と中性子をしっかりと結びつけることができる“強い力”のはずだが、電子にその力は及ばない。

つまり核力は、原子核の範囲 2×10^{-15} (m) (1000兆分の2メートル) ほどの距離しか届かない力ということになる。そのような性質を持つ核力の正体とはどのようなものなのか？

湯川は「新しい粒子」を予測する。特殊相対性理論によれば、エネルギーと質量は等価である。核力のエネルギーは陽子と中性子をしっかりと結びつけているのだから、相当の大きさがなければならず、新しい粒子の質量はかなり大きいはずだ。その力は原子核の範囲程度しか伝わらないが、距離が短ければ短いほど強く、離れれば急激に弱くなるような力である。

この予測をもとに計算してみると、新しい粒子の質量は陽子のおよそ9分の1、電子のおよそ200倍ということになる。電子の質量は陽子や中性子と比べると極端に小さく、2,000分の1ほどなので、新しい粒子の質量はその“中間”ということになる。

また、+電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子の間で新しい粒子がそれらを結び付けるためには、+の性質のものと-の性質のものがあるはずだ。そう考えると陽子は+電荷を持つ「粒子」を放出して中性子となり、中性子はそれを受け取って陽子になる。逆に中性子は-電荷を持つ「粒子」を放出して

陽子になり、陽子はそれを受け取って中性子になる。このような相互作用により陽子と中性子は強く結びついているに違いない。

本当に新しい粒子は存在するのか？存在するなら、いつかは発見されるはずだ。

電子はトムソン（イギリス）、陽子はラザフォード（ニュージーランド/イギリス）、中性子はチャドウィック（イギリス）がそれぞれ発見した。こうして、原子の中にある素粒子が徐々に発見される中、なぜ湯川の予測する新しい粒子だけが発見されなかったのか？

その新しい粒子が、相互作用（キャッチボール）の強い力で陽子と中性子を結びつけているなら、莫大なエネルギーを持った粒子をぶつけなければ分離できないだろう。（37「小林・益川理論」図1～3参照）そんな莫大なエネルギーを発生させることができる実験装置はない。もし発見できるとすれば、超新星爆発によって発生する粒子の中に存在する可能性がある。つまり、宇宙から地球に降りそぐ宇宙線の中から発見されるかもしれない。電荷を持った粒子なら、陽電子のように捉えられるはずである。

陽子・中性子と電子の中間の質量を持ち、非常に短い距離の範囲内で作用し、離ればその力は急激に小さくなるということを数式で表すとどうなるだろうか？

まず波動方程式が出发点となる。周波数 ν 、波長 λ の一般的な波動は、場所を x 、時間を t とすると、

$$\phi(x, t) = \cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \nu t\right) \text{ と表せる。} \dots\dots\dots ①$$

$$① \text{ 式を } x \text{ で 2 回微分すると、} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \nu t\right) = -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \phi \dots\dots\dots ②$$

$$① \text{ 式を } t \text{ で 2 回微分すると、} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -(2\pi\nu)^2 \cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \nu t\right) = -(2\pi\nu)^2 \phi \dots\dots\dots ③$$

光の波動とすると、光速 $c = \nu \lambda$ であるから、これを②③式に入れて整理すると、

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \rightarrow \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \psi = 0$$

$\frac{\partial^2}{\partial x^2}$ を 3次元にすると、 $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \equiv \Delta$ （ラプラシアン）であるから、

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \psi = 0 \dots\dots\dots ④$$

これが平面波の波動方程式である。④式を質量を持つ粒子に適用するために、エネルギーと運動量の相対論的關係式（粒子が光速に近い速度で動いている場合） $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ を考慮すると、④式は次のとおりとなる。

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\right) \psi = 0 \dots\dots\dots ⑤$$

ここで、 m は粒子の質量、 c は光速、 \hbar はプランク定数である。

この式は、21「陽電子の予言」で示した、クライン・ゴールドンの方程式そのものである。

この方程式を解くことによって、新しい粒子の正体が明らかになる。

『中性子、陽子の原子核内での速度は小さいので、問題の主要な特徴は時間に無関係な方程式（⑥式）で示されるとする。』

$$\left(\Delta - \left(\frac{mc}{h}\right)^2\right)\psi = 0 \quad \dots\dots\dots\textcircled{6}$$

『 』は湯川の論文で、"Since the nuclear velocity is low, the main features of the problem show up in the time-independent equation (a)."となっていたものである。

実際、粒子は高速で動いているはずだが、粒子間に働く核力の相互作用はこのようなモデル化（時間に依存しない定常状態の解を求めること）で、充分正しい結果が得られるのである。

時間によらない球対称（原点を中心とする球状の座標）の解を求めるため、 Δ を極座標 (r, θ, ϕ) で表すと、 θ と ϕ の項は不要となり、

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} \right) \text{となる。} \quad \dots\dots\dots\textcircled{7}$$

⑥式において $\left(\frac{mc}{h}\right)^2 = 0$ とすれば $\Delta\psi = 0$ （電磁場の方程式）となり、その解は距離 r に逆比例し

$$\psi = \frac{1}{r} \text{となることから、求める解は } \psi = \frac{\delta(r)}{r} \quad \dots\dots\dots\textcircled{8}$$

という形になると考えられる。これから $\delta(r)$ を求めることによって方程式⑤の解が得られる。

⑦、⑧式を⑥式に入れると、

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} - \left(\frac{mc}{h}\right)^2 \right] \delta(r) = 0 \quad \dots\dots\dots\textcircled{9}$$

無限遠で 0 となるように⑨式の解を選び、 $\delta(r)$ を指数関数で表せば、 $\delta(r) = k \cdot e^{-\frac{mc}{h}r}$ 従って、

$$\psi(r) = \frac{k}{r} \cdot e^{-\frac{mc}{h}r} \quad \dots\dots\dots\textcircled{10}$$

が導かれる。ここで k は比例定数である。

$\frac{mc}{h} = \lambda$ とすると、 λ は粒子のコンプトン波長 $\frac{h}{mc}$ の逆数である。コンプトン波長とは、粒子に光や電磁波が当たったとき、その波動のエネルギーの一部を粒子に与えて変化した結果の波長をいう。

⑩式を λ で書き直して、

$$\psi(r) = \frac{k}{r} \cdot e^{-\lambda r} \quad \dots\dots\dots\textcircled{11}$$

⑪式を湯川ポテンシャルと呼んでいるが、これを導くヒントは朝永振一郎によりもたらされたアイデアがもとになっている。この事実によると、朝永は湯川の業績に極めて大きな貢献をしたことになる。

この式は、距離に逆比例するだけのクーロンポテンシャル（電荷を持つ粒子間に働く力） $1/r$ に比べて、指数因子 $e^{-\lambda r}$ が掛かっているため距離 r が $1/\lambda$ （コンプトン波長）より大きくなると力が急激に減少する式となっている。

実際の論文の書き方は、 $\psi(r) \propto -\frac{1}{r} \cdot e^{-\lambda r}$ を解として想定し、それを解に持つ相対論的方程式として

⑤式を導入している。

次に、相互作用の力の及ぶ距離について。

陽子または中性子から、相互作用のために新しい粒子が放出されるには、かなり大きなエネルギーが必要である。

新しい粒子の質量を m とすると、特殊相対性理論により粒子のエネルギーは $E = mc^2$ である。量子力学の不確定性原理を考慮すると、エネルギーと時間の間には $\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$ という関係が成り立つ。

ごく短い時間 Δt の間に光速で粒子が放出されるとすると、その距離は $d = c \cdot \Delta t = \hbar / \Delta E = \hbar / mc^2$ となり、粒子は距離 d だけ動くことができる。

この距離 d が原子核の大きさ $L = 2 \times 10^{-15}$ (m) 程度でなければならないので、新しい粒子の質量をエネルギーで表すと次のようになる。

$$mc^2 = \frac{\hbar \cdot c}{L} = \frac{6.626 \times 10^{-24} \text{ (J}\cdot\text{s)} \times 3 \times 10^{10} \text{ (m/s)} \text{ (MeV}\cdot\text{m)}}{2 \times 10^{-15} \text{ (m)}} \doteq 100 \text{ MeV}$$

電子の質量は 0.5 MeV であるから、新しい粒子の質量は電子の約 200 倍ということになる。

陽子の質量は電子のほぼ 2,000 倍だから、この新しい粒子は陽子・中性子と電子の中間の質量を持つということから、中間子 (メソン) と名付けられた。

このようにして、湯川は陽子 \leftrightarrow 中性子の転移によって中間子が放出・吸収されるという相互作用 (湯川相互作用と呼ぶ) で、ごく短い距離間で強い力を生じうることを示したのである。

湯川の論文は「On the Interaction of Elementary Particles I」(素粒子の相互作用について I) というタイトルで、1935年に発表された。

物理学の中心はヨーロッパ、そしてアメリカである。どんな重要な発見をして論文を発表しても、欧米の学会を舞台にした活動をしていなければ注目されなかった。湯川は、自分の研究を完成させるまでは留学を拒んできたため、無名の日本人学者が発表した初めての論文など欧米の物理学者の目に留まるはずもなく、なかなか認められなかったのである。

1937年日本に量子力学の創始者の一人ボーア (デンマーク) が来日、各地で講演を行った。このチャンスに仁科芳雄 (コペンハーゲンのボーア研究室に5年半在籍) を通して自分の論文に対する意見を求めた。

ボーアの答えは「君は、新粒子が好きか？」という冷たいものだった。ハイゼンベルクやボーアは、観察されていない素粒子で場を説明する湯川に否定的であった。

その後、アメリカのアンダーソンにより「中間質量の新粒子の存在」が発表される。しかし、これは μ 中間子というもので、湯川のいう中間子 (π 中間子) とは異なるものだったことが後で判る。

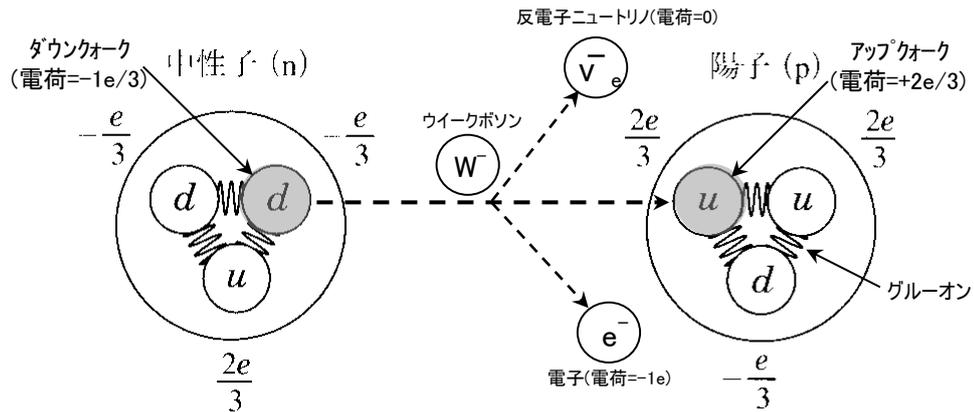
論文発表から2年ほど経過、徐々に中間子への関心が高まり湯川に欧米での講演の機会が与えられた。新しい粒子が受け入れられるためには時間が必要だったのである。

そして、ついに1947年「ネイチャー」誌に中間子確認を報告する論文が掲載された。アンデスの高地で宇宙線を調査していたイギリスの物理学者セシル・パウエルにより新しい粒子が発見されたのである。その粒子はすべての点において、湯川が予言した中間子と完全に一致した。論文発表から既に12年が経過していた。

湯川は、 β 崩壊 (中性子が電子と反電子ニュートリノを放出して陽子になること) における中性子、陽子、電子、反電子ニュートリノの4体相互作用は一つの過程ではなく、実はその間に何か photon (フォトン; 光子) に似た他の種類の素粒子が関係しており、それが中間子であると考えた。

湯川は、フェルミのβ崩壊（37「小林・益川理論」図3[下図；β崩壊説明図参照]）の理論をベースにしながら、陽子と中性子の間に働く「強い核力」の説明に成功した。

これまで電磁場だけが「場の量子論（電荷をもった粒子間の力が“光子”という素粒子のやりとりから生ずるといふ考え方）」によって論じられていたが、いろいろな粒子における“力の場”を普遍的な場の理論として確立した。実験をもとに量子力学と相対性理論によって、素粒子の素性や相互転移を研究する素粒子論がスタートしたのである。



β崩壊説明図

湯川は単に「強い力」だけでなく、「電磁力」「弱い力」も含めた素粒子間の相互作用を統一的に記述する「場の量子論」を構築し、現在の素粒子物理学の枠組みである「標準理論」に大きく貢献したのである。（標準理論とは、物質を形づくる基本粒子としてクォーク[陽子，中性子，中間子などを形成]，レプトン[電子，ニュートリノなど]，力を媒介する粒子[ゲージ粒子という]としてフォトン[電磁力]，グルーオン[強い力]，ウイークボソン[弱い力]，グラビトン[重力]，ヒッグス粒子[質量起源の粒子]が介在することによって相互作用が生じているとする理論）（2013.05.30）