

# 新たなハドロン物理

— 核子・中間子の質量表現 —

河野 誠公 著



## はしがき

原子核を構成する陽子と中性子がラザフォード (1919 年) とチャドウィック (1932 年) によってそれぞれ発見され、それらの核子を原子核という小さな領域に束縛させるためには、電磁相互作用よりはるかに強い相互作用が必要となる。湯川は核子間で中間子を交換する相互作用 (強い相互作用) を提案した (1935 年)。その( $\pi$ )中間子が宇宙線観測でパウエルらにより発見され (1947 年)、その後原子核物理が発展する。1950 年以降加速器を用いて次々と新しいハドロン粒子 (重い核子, 中間子) が発見され、一方で電子・核子非弾性散乱実験等により核子内にパートンと呼ばれる点状粒子 (クォークやグルーオン) が存在することが明らかとなった。Gell-Mann と Zweig はクォーク模型を提案し (1964 年)、フレーバ SU(3) 対称性により数多くのハドロンの存在とそれらの分類、構成が矛盾なく説明された。その後、クォークの閉じ込めと相対論的なクォークの運動を考えた (MIT) 袋模型が提案され (1974 年)、ハドロンの質量起源に関する知見などが得られたが、クォークの小さな質量と中間子、核子との大きな質量差のメカニズムを含めそれらの質量の特定には至っていない。

本書では、先に執筆した「標準モデルを超える新たな素粒子論」<sup>2,3)</sup>にて提案したスピノール表現に基づく 3 世代物質場 (クォーク, レプトン) の質量表現と「質量チャージ」を用いた各素粒子の質量の特定をハドロンに適用・展開する。ハドロン分類の指標となるストレンジネスやハイパー荷の定義を見直すとともに、ハドロンの質量表現を導き各ハドロンの質量が特定できることを示す。

本書の前半 (第 1 章～第 3 章) では、文献(1)を参考にして原子核・ハドロン物理を簡単に振り返る。第 1 章では湯川の中間子論を復習し、重陽子を例に核力に関する諸量を確認しておく。第 2 章では電子・陽電子対消滅実験と電子・核子非弾性散乱実験により得られたパートン (クォーク, グルーオン) 描像を振り返る。第 3 章ではクォーク模型とハドロンの分類と構成について復習し、袋模型とカイラル摂動論に基づくハドロンの質量に関する議論を確認しておく。

本書の後半(第4章~第6章)では、先ず第4章で、 $(n+1)$ 個のヘリシティの組合せ状態を真空状態として定義すると、その真空に超対称性生成子を作用させることにより、3世代クォークやグルーオンを含むベクトルボソンなど既知の全ての素粒子が構成される。<sup>2), 3), 4)</sup> 第5章では物質粒子3世代構造をもたらす「質量素荷」が導かれる。この新たな量子数を用いて3世代クォーク及びレプトン2重項の質量表現が導かれ各クォーク等の質量が特定される。<sup>2), 3), 4)</sup> 第6章では第4, 5章の議論をハドロンへ展開する。先ず6-1節では3-1節で復習したハドロンの分類指標となるストレンジネスとハイパー荷をスピノール表現を用いて再定義する。6-2節では第5章で導いた「質量素荷」を用いて $\pi$ ,  $K$  中間子と核子,  $\Lambda$  粒子の質量表現を導き個々の質量を特定する。中間子ではそれらの質量データと良い一致を見る。バリオンではそれらの質量データより1~2%程度小さな値となったが、これはクォークの世代混合の影響を考慮すると解消される。更に6-3節ではバリオンの質量表現に基づき最も励起した状態を与え、その最大励起状態と基底状態である核子との間に存在しうる各励起状態が、バリオン8重項, 10重項の各バリオンの質量と一対一で対応することを見る。最後に第7章では核子スピンの起源問題を扱う。7-1節でこの問題の発端となった偏極電子・核子非弾性散乱実験を振り返り、7-2節でクォークのスピノール表現に基づく解釈を与える。従来の核子スピンの解釈とクォークの3世代スピノール表現とが整合していることが示唆される。

ハドロンはクォークの複合粒子ではあるが、その量子数である電荷, スピンやカラー荷は、そのハドロンを構成するクォーク(反クォーク)の量子数の単純な合成和となっている。ハドロンの質量もそれを構成するクォークのもつ質量素荷の合成積に基づく質量表現で与えられることが確認でき、質量素荷が電荷やスピンと同様に真空の対称性に由来するヘリシティに基づく量子数であるとする「標準モデルを超える新たな素粒子論」の正当性がハドロンの領域においても裏付けられたものと確信する。

2017年4月

河野 誠公

## 目 次

第1章	強い相互作用と中間子論	1
第2章	パートン (クォーク, グルーオン) 描像	5
2-1	電子・陽電子対消滅実験	
2-2	電子・核子非弾性散乱実験	
第3章	ハドロンの構成と質量の起源	10
3-1	クォーク模型 (SU(3)対称性) とハドロンの構成	
3-2	袋模型に基づくハドロンの質量の起源	
3-3	カイラル摂動論に基づく中間子の質量公式	
第4章	素粒子の生成とスピノール表現	21
4-1	4次元ローレンツ群とスピノール対称性	
4-2	真空の定義とスカラー場の生成	
4-3	3世代クォーク, レプトンの生成	
4-3-2	物質場の3世代階層構造とカラー対称性	
4-4	ベクトルボソン(光子, W ボソン, グルーオン)の生成	
4-4-2	荷電ベクトル (Weak) ボソンの生成	
4-4-3	カラーベクトルボソン (グルーオン) の生成	
4-5	計量場の生成	
第5章	「質量チャージ」を用いたクォークの質量表現	37
5-1	質量素荷 (チャージ) の構成	
5-2	3世代物質2重項の質量表現	
5-3	3世代質量チャージの構成	
5-4	質量データベースとの比較	
5-4-1	荷電レプトンの質量の特定	
5-4-2	クォーク3世代の質量の特定	

第6章	スピノール表現に基づくハドロンの質量表現	57
6-1	スピノール表現に基づくハドロンの構成指標	
6-2	「質量チャージ」を用いたハドロンの質量表現	
6-2-1	中間子 ( $\pi, K$ ) の質量表現と質量の特定	
6-2-2	核子, $\Lambda$ 粒子の質量表現と質量の特定	
6-3	各バリオン ( $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Delta, \Sigma^*, \Xi^*, \Omega$ ) の質量	
第7章	核子スピンの起源問題	72
7-1	核子スピンにおけるクォークスピンの割合	
7-2	クォークのスピノール表現に基づく解釈	
参考文献		76
付録A	スピノール代数と超対称代数	77
付録B	ニュートリノ振動の観測データベース	82
付録C	クォーク3世代混合行列	83

## 第1章 強い相互作用と中間子論<sup>1)</sup>

原子核は  $A^{1/3} \text{ fm}$  ( $A$ : 質量数) 程度の中に  $1 \text{ fm}$  ( $10^{-15} \text{ m}$ ) 程度の半径の核子が詰まった高密度な状態にある。この小さな領域に核子の束縛を可能とするには、原子が電子を束縛する電磁相互作用よりはるかに強い相互作用が必要となる。そこで、湯川は電子と陽子など荷電粒子間で光子を交換する電磁相互作用のアナロジーを考え、核子間で中間子を交換する強い相互作用を提唱した。(湯川の中間子論)

先ず、電磁相互作用を簡単に振り返る。点電荷  $e_1$  が原点に静止している場合の電荷密度  $\rho(\mathbf{r})$  は  $\delta$  関数を用いて、

$$\rho(\mathbf{r}) = e_1 \cdot \delta(\mathbf{r}) \quad (1-1)$$

この電荷分布によるクーロンポテンシャルを  $\phi(\mathbf{r})$  とすると、静的な場合の Poisson 方程式は、

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{r}) = -4\pi \rho(\mathbf{r}) = -4\pi e_1 \cdot \delta(\mathbf{r}) \quad (1-2)$$

ここに、太字の  $\mathbf{r}$  や  $\nabla$  はベクトル量を表わす。

となる。 $\nabla^2 (1/|\mathbf{r}|) = -4\pi \delta(\mathbf{r})$  を用いると、(1-2)式の解より2つの点電荷  $e_1$  と  $e_2$  間のクーロンポテンシャルが以下に求まる。

$$V(\mathbf{r}) = e_2 \cdot \phi(\mathbf{r}) = \frac{e_1 \cdot e_2}{r} \quad (1-3)$$

電荷が電場のソースとなりクーロン力を生じたと同様に核子が中間子場のソースとなり核力を生じると湯川は考えた。質量ゼロの光子と異なり中間子は質量をもつので、不確定性原理によりその相互作用の範囲は中間子の質量の逆数で与えられる。従い、核力は電磁力と異なり小さな領域のみ作用する短距離力となる。ちなみに、 $\pi$  中間子では  $1/m_\pi \simeq 1.4 \text{ fm}$  となる。

$\pi$  中間子はスピン  $S=0$  の (擬)スカラー粒子なので、以下のクライン・

ゴルドン方程式を満たす。

$$(\square + \mu^2) \phi(\mathbf{x}) = 0 \quad (1-4)$$

ここに、 $\mu$  は  $\pi$  中間子の質量

スカラー場  $\phi(\mathbf{x})$  の静的な密度を(1-1)式と同様に  $\delta$  関数を用いて以下に与える。

$$\rho(\mathbf{r}) = g_1 \cdot \delta(\mathbf{r}) \quad (1-5)$$

すると、静的な場合の Poisson 方程式は、

$$(\nabla^2 - \mu^2) \phi(\mathbf{r}) = -4\pi \rho(\mathbf{r}) = -4\pi g_1 \cdot \delta(\mathbf{r}) \quad (1-6)$$

この式を解いて湯川ポテンシャル  $V_Y$  を以下に得る。

$$V_Y(\mathbf{r}) = g_2 \cdot \phi(\mathbf{r}) = g_1 \cdot g_2 \frac{e^{-\mu r}}{r} \quad (1-7)$$

ポテンシャルの到達距離は  $1/\mu$  で与えられる。同符号の電荷をもつ粒子間に働くクーロン力は斥力であるのに対し、核子間に働く湯川ポテンシャルでは引力となる。

次に、パリティが負の擬スカラー中間子 ( $\pi$  中間子) と核子との以下の相互作用ハミルトニアンを考える。

$$H_{\pi NN} = i \frac{g}{2M_N} \bar{\psi} \vec{\tau} \phi_\pi \gamma_5 \psi \quad (1-8)$$

ここに、 $1/(2M_N)$  は規格化因子で、 $M_N$  は核子の質量

$$\begin{cases} \phi_{\pi\pm} = (1, \pm i, 0) / \sqrt{2}, & \phi_{\pi 0} = (0, 0, 1) \\ \vec{\tau} \cdot \phi_{\pi\pm} = \sqrt{2} \tau_\pm = (\tau_1 \pm i\tau_2) / \sqrt{2} \end{cases} \quad (1-9)$$

ここに、 $\tau_i$  はパウリ行列