

素粒子の電磁質量差*

渡 辺 恒 利

ゲージ粒子グルーオンを含む静的な Hamiltonian 相互作用による素粒子 (N , Σ , Ξ , π 及び K) の電磁質量差を, Gauss 型波動関数のコーク模型で解析した。重粒子内部のスピン-スピン相互作用によるコーク間の距離の相違が, 電磁質量差の解析に重要な役割を果たすことが認められた。チャーム D 中間子の電磁質量差が, $D^+ - D^0 = 7.5 \text{ MeV}$ と計算され, 実験値 ($5.0 \pm 0.9 \text{ MeV}$) にかかなり近い値となった。

§1 はじめに

素粒子の表をみると, 大小のギリシャ文字やローマ字で表わされた粒子が 100 以上あって, その数が多いのに驚いてしまう。物質を構成する基本要素が 100 以上も存在することは, 単純にみて我々の頭脳には多すぎると思われる。これらを大別すると, 素粒子は比較的数の少ない, 強い相互作用をしない軽粒子 (電子, μ 粒子, 2つのニュートリノ計4つとそれらの反粒子から成る) とただ1つの光子と圧倒的に数の多い, 強い相互作用をするハドロン (さらにハドロンは Bose 統計に従う中間子と Fermi 統計に従う重粒子に分かれる) との3つに分類される。つまり素粒子(そのほとんどがハドロンの共鳴状態と呼ばれる粒子) がかくも沢山存在する原因はハドロンの数が多いことによる。この個数の不均衡からみると, ハドロンは他の2つ, 軽粒子と光子とは別のグループに属するのではないかと想像され

* この論文は, 明治学院大学 伊藤千秋博士, 東京商船大学 南川利之博士 (現在 SLAC に出張), 日本医科大学 三浦公雄博士と著者との共同研究を基にしてまとめたものである。

る。実際、素粒子という名が物質の究局的な構成要素という意味で使われるならば、軽粒子、光子、ハドロンという分類は大いに問題がある所である。

ハドロンが素粒子ではなく構造をもっているという考えは約20年前に坂田模型で具体化し、その後 Gell-Mann と Zweig によるコーク模型に発展¹⁾する。コーク模型では、ハドロンは3種類の基本粒子であるコークの複合粒子である。従ってこの立場からみると基本粒子は、軽粒子、光子及びコークである。事実、コーク模型は100を超えるハドロンの分類、整理を始め、種々の実験結果を説明することに成功してきた²⁾。ただむずかしい問題は、ハドロンを構成するコークがいまだに発見されない事実である。18世紀の原子模型では、原子を発見する実験技術が伴わなかったために原子の存在が当時認められなかったのに対し、現在十分な実験技術をそなえていてなおコークが発見されないことが対照的であり、種々の理論上の憶測を呼んでいる。例えば、コークがハドロン内の力学機構によって永久に外へ飛び出せない、いわゆるコーク閉じ込め理論が、種々の工夫をこらして提唱されているが、特殊相対性理論に対するエーテル説の役割に類似しているようにもみえる。

現在、素粒子ハドロンは、その名の由来する‘素’ではなく、複合粒子であることは常識であり、最近の実験ではハドロン内部の構成粒子の分布状態などが、軽粒子とハドロンの深い非弾性散乱等で詳しく調べられている。

この様な背景の下で、12年前ハドロンの構造を探る手掛りとして電磁質量差の解析が、コーク模型を使って行なわれた³⁾。下記の3つの要請に基づいて計算が実行されたので、それについて説明する。それは又本論文の動機、目的を明確にするのに役立つ。

1) ハドロン(重粒子及び中間子)は、電荷 $(\frac{2}{3}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3})e$ (e は陽子の電荷)をもつ3種類の重いコーク (u, d, s と書く⁴⁾)から構成される。重粒子はコーク3体、中間子はコークと反コーク2体から構成される(図1)。コークはハドロンの内部でほとんど静止している。

2) ハドロン内の2つのコーク間には、電氣的な Coulomb 力と磁氣的

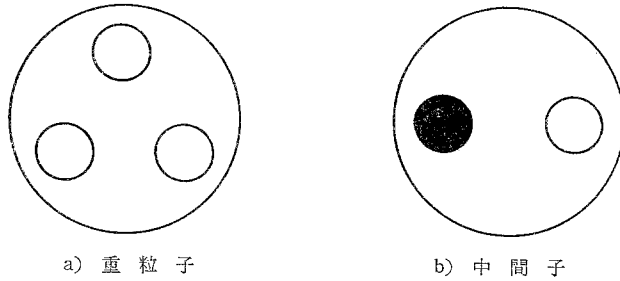


図1 ハドロンのクォーク模型図

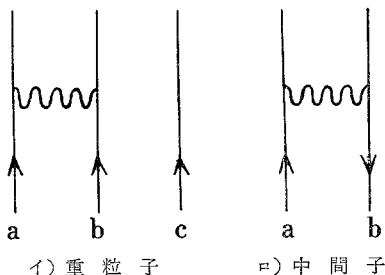
白丸はクォーク，黒丸は反クォークを示す。(反重粒子はすべて黒丸)

なスピンスピン相互作用が働く。

3) u クォークの質量 m_u と d クォークの質量 m_d は等しくない ($m_u < m_d$)。

1) について；クォーク模型には e を単位として整数の電荷をもつ乾-南部⁵⁾模型と、ここで仮定した Gell-Mann による整数でない電荷をもつ¹⁾模型が存在する。色の対称性から2つの模型の相違が実験で確認されることが提唱され、近い将来、決着がつくであろう。現在では、整数でない電荷をもつ模型が有力である。

当時(約10年前)クォークが発見されない理由としてクォークの質量が、例えば陽子のそれよりはるかに大きく、加速器のエネルギー領域を越えているためと考えられていた。当時発見されていた重い素粒子は、高々、陽子の2~3倍位である。例えばクォークの質量を陽子の質量 m の10倍と仮定してみよう。陽子はクォーク3体から出来ているので、クォークをハドロン内にとどめておく束縛エネルギーを V とすると、 $m=30m-3V$ 、で $V=-\frac{29}{3}m$ となる。陽子の中で、 V がクォークのエネルギーの大部分を食いつぶしてしまうことになる。原子核内の陽子(中性子)の束縛エネルギーが平均約 $-0.005m$ であることに注目すると、クォークの束縛エネルギーは非常に大きい。我々はこの様な強い力について経験したことがなかったので、それを正当化する議論をもたなかったし、始めからその力の特質について仮定せざるを得なかった。



イ) 重 粒 子 ロ) 中 間 子

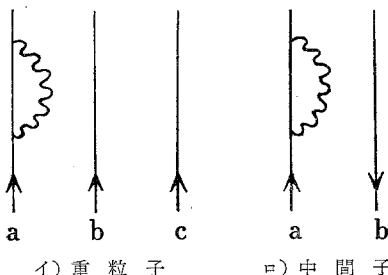
図 2 重粒子と中間子の電磁相互作用
または QCD の Feynman 図

イ) では省略したが (bc) 及び (ac) 間に波線が入る図もある。実線向上はコーク，下向は反コーク，波線は光子又はグルーオン

裸のコークの質量が非常に大きいことから，ハドロン内部でコークはそれほど激しい運動をしないだろうという直感に基づいて静的近似を行なう非相対論的 $SU(3)$, $SU(6)$ コーク模型の成功が要請 1) を正当化する。これを受け入れると，ハドロン内部の構造は非相

対論的近似で考えられ，内部構造の理解と描像を容易にする。

2) では，電磁質量差を生ずる原因としてコーク間で 1 つの光子を交換する電磁相互作用を仮定する (図 2)。その中には，コークの電荷に比例する Coulomb 力と磁気能率に比例するスピンスピン相互作用がある。これらの内では，Coulomb 力が電磁質量差に強い影響を及ぼすと思われる。次いで，コークの軌道角運動量 L とスピン S による $L \cdot S$ 相互作用が考えられるが，次節で述べる s 波の波動関数で期待値をとると，この項は消えてしまう。従って， $L \cdot S$ に次いで微小補正としてコークのスピンによる



イ) 重 粒 子 ロ) 中 間 子

図 3 コークの光子またはグルーオンによる自己エネルギーの Feynman 図

省略したがイ) では b と c, ロ) では b の自己エネルギーの図が加わる。実線向上はコーク，下向は反コーク，波線は光子又はグルーオン

スピンスピン相互作用を Coulomb 力と共に仮定するのである。コーク間の距離を L とし，これらの相互作用を通常のパテンシャルに直してみると，Coulomb 力は $1/L$ に比例し，スピンスピン相互作用は $(1/L)^3$ に比例する。

3) の m_d と m_u の差は，

u コークの自己エネルギーと d コークの自己エネルギーの差に基づくものと考えられる (図3. 自己エネルギーについては §2 のロ) の項参照) が, ハドロン内のコークについての自己エネルギーは, 内線のコークが観測の対象にならないのでパラメーターとしてハドロンの質量差から決定されると考える。なお, ゲージ理論によれば, 裸のコークの質量は Higgs スカラー中間子の真空期待値と Higgs 中間子とコークの結合定数から自発的対称性の破れを通じて与えられる⁶⁾。コークの質量に関する機構には, 電磁相互作用以外の要素が入り込んで来るので, コークの質量差がコークの電磁相互作用による自己エネルギーに 100% 起因するとは考えられない。

上記の諸要請を基礎にして電磁質量差を解析した結果, 上述の重いコークによるハドロン構造の描像が, 1つの困難を除いて的を得ていることが分った。同時にスピンスピン相互作用の重要性が確認された (ハドロン内のコークのスピンの平行にそろうか, 反平行になるかによってスピンスピン相互作用の期待値が違うことがこの機構の成功につながる)。ただ1つの困難な点は, コークの質量差 $\epsilon (=m_d - m_u)$ が重粒子における場合と中間子における場合とでかなり違う (3倍位) ことである。ところで, 最近10年間で物理学の様子が大部変化した。強い相互作用, 電磁相互作用, 弱い相互作用を統一するゲージ理論が現われたことにより, ハドロンの構造の解析が明確に追求出来るようになった。例えば, その成功例として, 以前のコーク模型では π 中間子が光子に崩壊する ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) 崩壊確率が, 実験値よりはるかに小さくて, ちょっとした謎になっていたが, ゲージ理論の要請からコークに色の自由度 (3つ, 赤, 青, 黄) を導入することでその困難を切り抜けることが出来た。電磁気学で良く知られている様に, 質量0のゲージ粒子である光子が電荷に結びつくのに対し, 色に結びつく新しい質量0のゲージ粒子グルーオンが理論的に要求された。通常のハドロンは3つの色が同じ割合で混ざりあって無色になっている (色の対称性 ($SU(3)$) について1重項をつくる)。

一方, ハドロン内の構成粒子の分布が測定されるようになり, それに応じ

て Feynman によって、コーク模型を拡張したパートン模型が提唱された。⁷⁾

それらの成果をまとめてみると、以前のコーク像とは異なったものが得られる。コークは非常に重く、例えば上述の、陽子の質量 m の10倍以上とされていたが、現在は軽いと考えられ、例えば m_u や m_d は $0.3m$ 位、 m_s は $0.5m$ 位であるといわれる。なお、第4番目のコーク、チャームコーク (c と書く) を導入する必要性が、理論と実験の両方から生じ、コークは4種類に増えた。⁸⁾ c コークの質量 m_c は前の3つよりは大きく、 $1.5m$ 位と予想される。するとコークが非常に重いことから由来する非相対論的近似が、良くないのではないかと疑われる。

次に、グルーオンを媒介とする量子化された色の力学 Quantum Chromodynamics (QCD と略記する) が発展し、以前のコーク模型では手がつかなかったコーク間の強力な引力の理解にも考察が深まってきた。我々は以前にグルーオンによる Coulomb ポテンシャルを使って、通常のハドロンの状態である色の1重項が、特に安定していることを論じた。⁹⁾ 又 De Rújula 達は、Fermi-Breit 型の相互作用の下で、ハドロンの質量分布を論じた。¹⁰⁾

電磁質量差に目を向けると、 $m_d \neq m_u$ ならば、グルーオンを交換する相互作用は、ハドロンの電磁質量差に寄与する。それで、本論文ではハドロンの電磁質量差を引き起す源として、通常の電磁相互作用に加えて、グルーオンの交換による寄与を含める。その際、静的近似が成立すると仮定して、コークの質量差 ϵ が重粒子と中間子で異なるという、以前のコーク模型の困難を取り除き、ハドロンの構造について明確な像が描けるかどうか試みる。考察の対象となるハドロンは、核子 (陽子と中性子)、 Σ と Ξ 粒子、 π と K 中間子である。コークの波動関数としては、Gauss 型を採用する。これは以前のコーク模型で使われたものと同じ形式である。

結果として、グルーオンの相互作用を含むコーク模型で以前の困難が除けることが明らかとなった。しかし重粒子内のコーク間の距離がすべて等しいと上記の困難の解決につながらない。コーク間の距離の不一致は、ス

ピン-スピン相互作用に起因する。コーク間の拡りは、重粒子では、大きい方が 0.53 f (1 f (フェルミ) $= 10^{-13} \text{ cm}$), 小さい方が 0.45 f である。中間子では 0.41 f である。又擬スカラーチャーム D 中間子の電磁質量差は、 $D^+ - D^0 = 7.5 \text{ MeV}$ となって実験値 $5.0 \pm 0.9 \text{ MeV}$ ¹¹⁾ とかなり近い値が得られた。

§2 では、コーク模型による電磁質量差を考察し、§3 ではその結果について議論する。

§2 ハドロンの電磁質量差

§1 で述べた様にコーク模型を使ってハドロンの内部構造を探る目的で、電磁質量差を考察する。以前のコーク模型で残されていた困難を取り除くためにそれを改良し、重粒子と中間子を統一して扱う。以前の解析では、電磁質量差を生ずる原因として電磁相互作用だけを考えたが、ここではグルーオンによるコーク間の相互作用も含めて考察する。それでは、ハドロンの電磁質量差の解析に必要な、いくつかの基本的な要請について以下で述べよう。

イ) 重粒子はコーク3体、中間子はコーク、反コーク2体から構成される(図1)。ハドロンは色の対称性について1重項の状態にある。

ロ) ハドロンの電磁質量差に寄与する相互作用は静的な Hamiltonian,

$$V = \sum_{i < j} (\alpha Q_i Q_j + k \alpha_s) \left\{ \frac{1}{|\mathbf{r}_{ij}|} + \frac{\pi}{2} \delta(\mathbf{r}_{ij}) \frac{16 \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j}{3 m_i m_j} \right\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで Q_i , m_i 及び \mathbf{s}_i は、ハドロン内部の i 番目のコークの電荷、質量及びスピンをそれぞれ表わし、 $\mathbf{r}_{ij} (= \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$ は i と j 番目のコークの相対的な位置ベクトルを表わす。 α (α_s) はコークと光子(グルーオン)との結合定数である。 k は重粒子、中間子が色の対称性について1重項(無色)であるためにつく数で、重粒子では $k = -2/3$, 中間子では $k = -4/3$ をとる。 \sum の意味は、重粒子では $i = 1, 2, 3$ について和をとり、中間子は1対(1, 2)だけだから和をとらない。

ハ) 重粒子における空間部分の s 波コーク波動関数は、

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = N \exp(-a\mathbf{r}_{12}^2 - b\mathbf{r}_{23}^2 - c\mathbf{r}_{31}^2) \quad (2)$$

中間子では

$$\varphi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = N' \exp(-a'\mathbf{r}_{12}^2) \quad (3)$$

を採用する。ここで N と N' は規格化条件

$$\int |\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3)|^2 d\mathbf{r}_1, d\mathbf{r}_2, d\mathbf{r}_3 = 1$$

及び

$$\int |\varphi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)|^2 d\mathbf{r}_1, d\mathbf{r}_2 = 1$$

で決まっている量である。 a, b, c 及び a' は、コーク間の距離と関係づけられるパラメーターで後に決められる量である。

イ) については、考察の対象となるすべての重粒子、中間子はコーク模型で s 波をとる。又 §1 を参照のこと。

ロ) について；(1) 式の丸カッコの第1項 $\alpha Q_i Q_j$ はコーク間の電磁相互作用の部分、第2項 $k\alpha_s$ はコーク間のグルーオンの交換による相互作用の部分に相当する。中カッコの第1項は Coulomb 型の相互作用を、第2項は局所的なスピンスピン相互作用を表わす。 α は良く知られている電磁相互作用の定数で、 $\alpha=1/137$ 、またグルーオンの結合定数 α_s はパラメーターとして扱い実験によって決められる。コークの質量 m_u, m_s 及び m_c は

$$m_u = 336 \text{ MeV}, \quad m_s = 540 \text{ MeV}, \quad m_c = 1500 \text{ MeV}$$

と与える。 m_u の値は、コークの磁気能率がコークの電荷に比例し、コークの質量に反比例するという要請と、コークが異常磁気能率を持たないという仮定に基づいて与えられる。 m_s 及び m_c については、¹⁰⁾ ¹²⁾ ハドロンの質量に関する分析から妥当な値を採用した。

コークの光子及びグルーオンによる自己エネルギー(図3)は直接考察の対象とはしない(自己エネルギーは光子又はグルーオンを2つのコーク間で交換する(図2)のではなく、コークが放出した光子又はグルーオンを自分で吸収してしまう(図3)ために生じる)。その影響は、コークの質量差 ϵ の中に入ってくるものと解釈する。

(1)式の相互作用の他に、§ 1 でふれた、コークをハドロンの中に閉じ込める強いポテンシャルが存在するが、我々はこのポテンシャルが個々のコーク質量に依存しないと予想し、従って電磁質量差に対するその寄与はないものと暗黙のうちに仮定している。

ハ) について； s 波コークの波動関数(2)と(3)は空間部分を表わすもので、全体の波動関数はこれにコークの重心運動に関する部分、スピンの部分、荷電スピンの部分及び色の対称性の部分加わる。しかしこれらは後の議論には余り顔を出さない。なお、全体の波動関数は、色の対称性を完全に満たしているが、空間部分とスピンに関する $SU(6)$ 対称性については破れている。

コーク 3 体の波動関数(2)式の他にこれと同等な、重心との関係を明確にする表現

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = N'' \exp(-\alpha(\mathbf{r}_1 - \mathbf{R})^2 - \beta(\mathbf{r}_2 - \mathbf{R})^2 - \gamma(\mathbf{r}_3 - \mathbf{R})^2)$$

がある。ここで \mathbf{R} はコーク 3 体の重心で、

$$\mathbf{R} = (m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2 + m_3 \mathbf{r}_3) / M, \quad M = m_1 + m_2 + m_3$$

で表わされる。

(2)式の a, b, c とこの表現の α, β, γ との関係は

$$a = (\alpha m_2 + \beta m_1) / M - (\alpha + \beta + \gamma) m_1 m_2 / M^2$$

$$b = (\beta m_3 + \gamma m_2) / M - (\alpha + \beta + \gamma) m_2 m_3 / M^2$$

及び

$$c = (\gamma m_1 + \alpha m_3) / M - (\alpha + \beta + \gamma) m_3 m_1 / M^2$$

である。電磁質量の解析には、(2)式の方が都合が良い。

さて、以上の要請に基づいて(1)式の期待値 (以下参照) を重粒子、それから中間子について計算する。

A) 重粒子

適当な関数 $f(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3)$ の期待値 $\langle f \rangle$ は

$$\langle f \rangle = \int \Psi^*(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) f(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) \Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 d\mathbf{r}_3$$

で定義される。(1)式の各項の期待値を計算する際に、必要な公式をまとめておく。

$$\langle \frac{1}{|\mathbf{r}_{12}|} \rangle = 2\sqrt{\frac{2(ab+bc+ca)}{\pi(b+c)}} = \frac{1}{r_{12}}, \quad \langle \mathbf{r}_{12}^2 \rangle = \frac{6}{\pi} r_{12}^2$$

及び

$$\langle \delta(\mathbf{r}_{12}^2) \rangle = |\Psi(\mathbf{r}_{12}=\mathbf{0})|^2 = \frac{1}{8r_{12}^3} \quad (4)$$

スピン-スピンの期待値は以下の様にして求める。量子力学から、スピン $1/2$ の重粒子は $(\mathbf{s}_1+\mathbf{s}_2+\mathbf{s}_3)^2=3/4$, 従って $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2+\mathbf{s}_2\cdot\mathbf{s}_3+\mathbf{s}_3\cdot\mathbf{s}_1=-3/4$ である。3つの対のうち、スピン3重項をつくる対(それを1及び2と指定する)は、 $(\mathbf{s}_1+\mathbf{s}_2)^2=2$, 従って $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2=1/4$ となる。上の式を合わせると、 $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2=1/4$, $\mathbf{s}_2\cdot\mathbf{s}_3+\mathbf{s}_3\cdot\mathbf{s}_1=-1$ が得られる。以上は、一般的な考察からの結果だが、コーク3体の波動関数(2)はコーク1と2の交換については、対称的(同じである)である(以下の議論参照)ので、 $\mathbf{s}_2\cdot\mathbf{s}_3$ と $\mathbf{s}_3\cdot\mathbf{s}_1$ の期待値が等しくなり、それぞれ $-1/2$ となる。

コーク間の距離について考察するために、(5)式(2番目)を使って各対の距離を書き出してみると、

$$\langle \mathbf{r}_{12}^2 \rangle = \frac{3}{4}(b+c)/(ab+bc+ca) \quad (5)$$

$$\langle \mathbf{r}_{23}^2 \rangle = \frac{3}{4}(c+a)/(ab+bc+ca) \quad (6)$$

及び

$$\langle \mathbf{r}_{31}^2 \rangle = \frac{3}{4}(a+b)/(ab+bc+ca) \quad (7)$$

となる。

陽子 (u, u, d) を例にとってみよう。陽子は2個の u コーク(それぞれ1及び2と指定する)と1個の d コーク(3と指定する)から成る。この内で、 $u-u$ コークの対がスピン3重項を作り、他の2対、 $u-d$ はスピン3重項と1重項の混合状態になっている。この2対の $u-d$ コークは、波動関数(2)が同一のコーク1と2について対称的になっている(厳密に言うと、Fermi 統計から同一のコークの交換に対し波動関数は反対称であり、色の

対称性が反対称になっているので、他の部分は対称、スピン3重項は交換に対し対称だから波動関数(2)は交換に対し対称的(従って、 $b=c$)である)ので、距離の期待値も、

$$\langle \mathbf{r}_{23}^2 \rangle = \langle \mathbf{r}_{31}^2 \rangle \quad (8)$$

で、(6)と(7)式より $b=c$ が得られる。陽子の波動関数は、2つのパラメーター a と b で表わされる。中性子、 Σ 粒子及び Ξ 粒子の場合も、コーク対のスピン状態の関係について陽子と同じなので(1対のスピンが3重項、他の2対は互に対称的で、スピン3重項と1重項の混合状態にあること)、我々は上記の重粒子に対してすべて同一の波動関数(2)を採用する。

表I ハドロンの電磁質量差 (数値は MeV 単位である)

$$C_t = \frac{\alpha}{3r_t}, C_m = \frac{\alpha}{3r_m}, M_t = \frac{\pi\alpha}{36m_u^2 r_t^3}, M_m = \frac{\pi\alpha}{36m_u^2 r_m^3}, G_t = \frac{\pi\alpha_s \varepsilon}{18m_u^3 r_t^3}, G_m = \frac{\pi\alpha_s \varepsilon}{18m_u^3 r_m^3},$$

$$C = \frac{\alpha}{3r}, M = \frac{\pi\alpha}{12m_u^2 r^3}, G = \frac{\pi\alpha_s \varepsilon}{3m_u^3 r^3}, x = \frac{m_u}{m_\varepsilon}, y = \frac{m_u}{m_c}$$

	$\langle \Sigma \alpha Q_i Q_j \frac{1}{ r_{ij} } \rangle$	$\langle \Sigma \alpha Q_i Q_j (-\frac{8\pi s_i s_j \delta(r_{ij})}{3m_i m_j}) \rangle$	$\langle \Sigma k \alpha_s (-\frac{8\pi s_i s_j \delta(r_{ij})}{3m_i m_j}) \rangle$	$\langle \Sigma m_i \rangle$	
$n - p$	0 $-C_t$	0	M_t	0 $-2G_t$	ε
	0 -1.06	0	0.47	0 -1.26	3.15
$\Sigma^- - \Sigma^0$	C_m C_t	$2xM_m$	$-M_t$	$2xG_m$ $-G_t$	ε
	0.91 1.06	0.37	-0.47	0.49 -0.63	3.15
$\Sigma^0 - \Sigma^+$	C_m $-2C_t$	$2xM_m$	$2M_t$	$2xG_m$ $-G_t$	ε
	0.91 -2.12	0.37	0.93	0.49 -0.63	3.15
$\Xi^- - \Xi^0$	$\Sigma^- - \Sigma^+ - (n - p)$				
$\pi^+ - \pi^0$	1.5C		1.5M	0	0
	1.76		2.84	0	0
$K^+ - K^0$	C		xM	-xG	$-\varepsilon$
	1.17		1.18	-3.19	-3.15
$D^+ - D^0$	2C		2yM	yG	ε
	2.35		0.85	1.15	3.15

今後、記号を簡単にするために、スピン3重項の状態にある対(1, 2)の距離の期待値を r_t ($r_t=r_{12}$), スピン3重項と1重項の混合状態にある対の距離を r_m ($r_m=r_{23}=r_{31}$) と書く。

公式(4)を使って(1)の期待値を計算すると、各ハドロン¹の電磁質量差が得られる。結果を表 I にまとめておく。なお、Coleman-Glashow の関係式 ($\Sigma^- - \Sigma^+ = \Sigma^- - \Sigma^+ - (n-p)$) が成立する。次の組み合わせ

$$\Sigma^+ + \Sigma^- - 2\Sigma^0 = \frac{\alpha}{r_t} - \frac{\pi\alpha}{12m_u^2 r_t^3}$$

は、クォークの質量差 ε や、グルーオンの結合定数 α_s が入ってこないので計算には都合が良い。

B) 中間子

関数 $f(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ の中間子における期待値 $\langle f \rangle$ は、

$$\langle f \rangle = \int \varphi^*(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) f(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \varphi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2$$

で与えられる。(1)式の各項の期待値を計算するのに必要な公式を、重粒子の場合と同じ様²に書くと、

$$\left\langle \frac{1}{|\mathbf{r}_{12}|} \right\rangle = 2\sqrt{\frac{2a'}{\pi}} \equiv \frac{1}{r}$$

$$\langle \mathbf{r}_{12}^2 \rangle = \frac{6}{\pi} r^2$$

及び

$$\langle \delta(\mathbf{r}_{12}) \rangle = \frac{1}{8r^3} \quad (9)$$

となる。これらの式を使って(1)式の期待値から電磁質量差を計算したものを表 I にまとめておく。

我々は、5つのハドロン¹の電磁質量差の実験値、 $n-p=1.29\text{MeV}$, $\Sigma^- - \Sigma^0=4.88\text{MeV}$, $\Sigma^0 - \Sigma^+=3.10\text{MeV}$, $\pi^+ - \pi^0=4.60\text{MeV}$ 及び $K^+ - K^0 = -3.99\text{MeV}$ を5つのパラメーター (α_s , ε , r_t , r_m 及び r) を使って合わせてみた。

$r_t=r_m$ という解は見つからず、予想した通り、 r_t と r_m は異なる値をとっ

た。

結果は

$$\alpha_s = 0.53, \quad \epsilon = m_d - m_u = 3.15 \text{ MeV}, \quad r_t = 2.29 \text{ GeV}^{-1} = 0.45 \text{ f},$$

$$r_m = 2.68 \text{ GeV}^{-1} = 0.53 \text{ f}$$

及び

$$r = 2.08 \text{ GeV}^{-1} = 0.41 \text{ f} \quad (10)$$

である。

この値を使ってチャーム D 中間子の電磁質量差を求めると、 $D^+ - D^0 = 7.5 \text{ MeV}$ となり、実験値 $D^+ - D^0 = 5.0 \pm 0.9 \text{ MeV}$ にかかなり近い値が得られる。

§ 3 議論とまとめ

我々は Gauss 型波動関数のコーク模型で、重粒子 (N, Σ, Ξ) 及び中間子 (π, K) の電磁質量差をパラメーター ($\alpha_s, \epsilon, r_t, r_m, r$) で解析した。それから得られたハドロン構造は、重粒子では3個のコーク間の距離の期待値が、二等辺三角形型で、長い2辺が 0.53 f 、短い底辺が 0.45 f である。中間子では、コーク対の距離の期待値が 0.41 f であり、そのときコークの質量差は、重粒子、中間子で共通の値、 $\epsilon = 3.15 \text{ MeV}$ である。

コーク模型による以前の解析は、1つの光子交換の電磁相互作用を考慮して行なわれ、重いコーク像の成功をもたらしたが、ただ重粒子と中間子でコークの質量差が異なるという困難があった。³⁾ 最近の物理学の発展は、最近数年の間にコーク像を変えてしまった。特に高エネルギー領域で、ハドロン構造の知識が増して、コークの静止質量は以前に比べて小さく考えられている。従って、ハドロン内でコークが相当活発に動いているのではないか、そのため、以前の解析に相対論的補正が必要ではないかと思われる。しかし、重いコーク像から出発した、非相対論的コーク模型が、特に低エネルギー現象面で成功を取めたことが皮肉な現象である。軽いコーク像からこの現象を理解するためには、コーク模型を相対論的に扱って、精密な解析が今後要求される。

一方、QCD の発展はクォークの閉じ込め、クォーク間の相互作用に新しい側面を切り開いた。特に Non-Abelian ゲージ粒子であるグルーオンが関係する相互作用は、漸近的自由性という特質をもっている。非常に接近した2粒子間の相互作用は、離れている場合と比べて弱くなって自由粒子の様にふるまうという特質で、一見上記の非相対論的ふるまいとは逆の様だが、それがその謎の鍵であるかも知れない。

この様にクォーク模型での電磁質量差の解析も、物理学の発展によるクォーク像の変化から改良を要求される。従来の重いクォーク像によるクォーク模型の改良点として、クォーク模型を相対論的に扱うこと、及びグルーオンの交換による影響をとり入れることが考えられる。前者については今後の課題であり研究が現在進行中である。我々はここでグルーオンの交換による効果を、電磁相互作用に加えて考えることにした。ここではその効果をクォーク間における1つのグルーオンの交換近似で表現しているが、その結合定数については、ハドロンが色についての1重項であるという要請から生ずる実効化（1種の色についての平均化で、その結果 k が導入される）を行なっている。さらに、グルーオンとクォークの結合定数 α_s は、QCD の場の摂動理論で現われる結合定数ではなく、色の相互作用のバーテックスについては高次の項を含む実効的な結合定数である。しかしグルーオンがクォーク間で2個 (α_s^2 の項) 及びそれ以上交換する項、また、1個のグルーオンと1個の光子を交換する項 ($\alpha\alpha_s$ の項) 及びその高次の項は考慮していない。§ 2 で実験から決められた α_s の値、 $\alpha_s=0.53$ は、そういう意味で φ 中間子の3個の π 中間子への崩壊 ($\varphi \rightarrow 3$ つのグルーオン $\rightarrow 3\pi$) から求められる $\alpha_s(\varphi)=0.55$ に近い。そして $\alpha_s=0.53$ は α_s^2 及び $\alpha_s\alpha$ 、等の高次の項の影響が小さいことを示していると考えてよいだろう。これは、このクォーク模型の妥当性を示すものと考えられる。

しかしながら、1つのグルーオンの交換による寄与を新たに加えても § 2 で述べた様に、クォークの波動関数を完全に対称的にとると重粒子内のクォーク間の距離がすべて等しくなり ($r_i=r_m$)、以前の模型によるクォーク質量

差の困難を救えないことが、我々のコーク模型から結論される。スピンスピン相互作用によって生ずるコーク間の距離の相違が重要な役割を演じ、それを考慮して重粒子と中間子で共通のコーク質量差 ϵ を使って実験値を説明することが出来、上記の困難を除くことが出来た ($r_t=0.45f$, $r_m=0.53f$)。スピンスピン相互作用に基づく影響は、昔から、 $\Delta(1236)-N(940)$, $\rho(770)-\pi(140)$, 等の質量差で考察されていたが、グルーオンによるスピンスピン相互作用の影響は最近注目されている。例えば中性子の電荷半径が0でなく負であること、コーク4体の中間子や5体の重粒子の存在などを可能にする引力が考えられること等が、スピンスピン相互作用に基づいて論じられている。電磁質量差の解析からも、ここで我々はその重要性を認めることが出来た。

スピン3重項の対の距離 r_t は、斥力が予想され r_m より大きいこと、従って比 r_m/r_t は1より小さいことが予想されるが、我々の解析の結果では、 r_m/r_t は1より大きい。これが結論として考えにくい問題である。これについては、相対論的補正も含めて近い将来論ぜられよう。

得られたパラメーターの値を使ってチャーム D 中間子の電磁質量差を求めると、 $D^+-D^0=7.5\text{MeV}$ となり、最近の実験値 $5.0\pm 0.9\text{MeV}$ ¹¹⁾ とかなり近い値である。なお、グルーオンの項を含めていない以前の計算では、 $D^+-D^0=13.2\text{MeV}$ ¹⁴⁾ であった。

我々は、この結果に励まされて相対論的補正を含めて考察を進める予定である。

著者はアジア大学紀要に本論文の執筆をすすめてくれた、明治学院大学伊藤千秋博士、東京商船大学 南川利之博士 (現在 SLAC で研究中)、日本医科大学 三浦公雄博士に深く感謝する。

文献と注釈

- 1) M. Gell-Mann, Phys. Letters **8** (1964), 214. G. Zweig (unpublished).
- 2) Quark Model の Review について;
J. J. J. Kokkedee, *The Quark Model* (Benjamin, New York, 1969).

- 3) Y. Miyamoto, Prog. Theor. Phys. **35** (1966), 175.
 T. Minamikawa, K. Miura, Y. Miyamoto, J. Arafune and Y. Iwasaki, Prog. Theor. Phys. Suppl. Nos **37** & **38** (1966), 56.
 J. Arafune and Y. Iwasaki, Prog. Theor. Phys. **35** (1966), 339.
- 4) コークの記号として (u, d, s) の他に (p, n, λ) と書く場合もある。 u, d コークは荷電スピン $\frac{1}{2}$ の2重項で up quark 及び down quark の略であり, ストレンジネスは0である。 s コークは荷電スピン0, ストレンジネス -1 をもち, strange quark の略である。
- 5) M. Y. Han and Y. Nambu, Phys. Rev. **139** (1965), B 1006.
- 6) T. Watanabe, 亜細亜大学教養部紀要 **7** (1972), 87 参照。
- 7) R. P. Feynman, *Photon-Hadron Interactions* (Benjamin, 1972)
- 8) Y. Hara, Phys. Rev. **134** (1964), B 701.
 Z. Maki and Y. Ohnuki, Prog. Theor. Phys. **32** (1964), 144.
 新粒子 Y (アップシロン) の発見等から第5番目のコーク b コークを考える人もいる。さらに6番目のコークも考えられている。
- 9) C. Itoh, T. Minamikawa, K. Miura and T. Watanabe, Prog. Theor. Phys. **51** (1974), 1575.
 T. Watanabe, 亜細亜大学教養部紀要 **8** (1973), 62.
- 10) A. De Rujula, H. Georgi and S. L. Glashow, Phys. Rev. **D12** (1975), 147.
- 11) I. Peruzzi, *et al.*, Phys. Rev. Letters **39** (1977), 1301.
- 12) 例えば, T. Appelquist and H. D. Politzer, Phys. Rev. Letters **34** (1974), 43.
- 13) D. J. Gross and F. Wilczek, Phys. Rev. Letters. **30** (1973), 1343.
 H. D. Politzer, Phys. Rev. Letters **30** (1973), 1346.
 T. Watanabe, 亜細亜大学教養部紀要 **10** (1974), 62.
- 14) C. Itoh, T. Minamikawa, K. Miura and T. Watanabe, Prog. Theor. Phys. **54** (1975), 908.