

素粒子の模型と構造について

— 研究計画の歴史と評価 —

基研 牧 二 郎

§ 1. まえがき

基研の研究計画として取り上げられてきた色々の計画（長期・短期・モレキュール）が、どのように進められたか、また学問的成果や問題点は何かなどをめぐって研究部員会議で討論の機会を設けることとなり、今回は「素粒子の模型と構造」研究計画を取り上げていただくこととなった。限られた時間のなかで、しかも私は話しが大へん下手なのでよい報告ができるという自信は毛頭ないが、私なりの考えをのべ、御批判や忠言がえられれば有難いと思う。

周知のようにこの計画は「坂田模型の研究を中心テーマとした研究会」として1959年度からはじめられ、これまでほとんど毎年つづけられ今年度にいたっている。毎年1回（2回のこともあったが）の研究会のほかに世話人の連絡会や拡大世話人会の研究会なども行なわれてきたが、それらの多くは「素研」誌上に報告されている。しかし、ここでは主としてこの計画の根本的な目標が何であり、その重点のおき方が時期によってどのように変化したか、またこれまでにどのような成果が挙げられたか、また挙げ得なかったか、さらにはこの研究計画が異例に長く継続されてきたことの積極的意味はどのようなことであるか等々について、世話人の一人として一つの総括を試みたい。

なお、私の報告と関連して素粒子論の現状についての一昨年（'70）の河原林氏の講演（研究部員会議のシンポジウム「基礎物理学の将来」第一回、物性研究 14（'70）350）も参考として思い出しながらお聞きいただきたいと思います。

§ 2. 初期の成果

坂田昌一博士が素粒子の新模型を提唱されたのは1955年秋であったが、この模型の研究が基研の長期研究計画としてとり上げられたのは1959年度からであり、この間の3年あまりはいわば準備期にあったともいえる。すでにこの模型による素粒子の質量公式（松本1955～56）、相対論的取扱（牧、1956）、弱い相互

作用の整理（大根田ら），藤井 boson の導入などの仕事に加えて，完全対称性の考え（小川，1958）も生まれつつあった（これについては後述）。この期間は今日から見ると惜しまれる「永すぎた春」であったとも思われるが，当時の風潮のなかで坂田模型が甚だ異端視されていたことも争われぬ事実であった。

坂田模型の考え方をきわめて簡単にのべれば次のようなことである。

弱い相互作用の代表例である β 崩壊は中性子 (N) が陽子 (P) に変わり，電子 (e^-) とニュートリノ (ν) を放出する過程で，これを

$$N \rightarrow P + e^- + \nu$$

のように書くが，他方強い相互作用の典型的過程は，

$$N \rightarrow P + \pi^- \quad (\pi^- : \text{負のパイ中間子}) \quad (1)$$

である（湯川中間子論）。1949年に Fermi と Yang は，この過程を

$$N \rightarrow (P + \bar{P}) + N \rightarrow P + (\bar{P} + N) \quad (\bar{P} : \text{反陽子}) \quad (2)$$

と解釈し直し， $(\bar{P} + N)$ はこれが束縛状態として π^- になっているものと考えた。絵を描くと (1) と (2) とはそれぞれ Fig. 1, Fig. 2 であらわされる。

$\bar{P}$ と N とは，

もしこれらが S-波の束縛状態ならば 1S_0 -state としてギ・スカラー (0^-) となるから，これを π^- 中間子と見做す根拠があるのみならず，アイソ・スピン (I) の合成則から見て

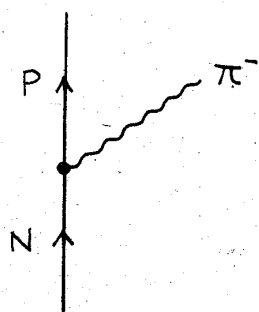


Fig. 1

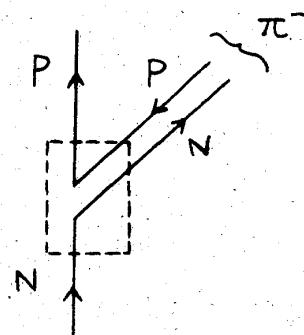


Fig. 2

も，粒子 ($I = \frac{1}{2}$) から π^- 中間子 ($I = 1$) を合成するという点でうまくゆく。

坂田模型は，この考え方を拡張して A -粒子を核子 (P, N) に加えて基本粒子と見做すことによって，1953年に発見された中野-西島-Gell-Mannの規則（ストレンジネス理論）：

$$Q = I_3 + \frac{1}{2} (N_B + S) \quad (3)$$

を説明することに成功した。上式で Q , I_3 , N_B および S は各ハドロン（強相互作用をもつ粒子）の荷電，アイソ・スピンの第3軸成分，重核子数およびストレンジネスをあらわす。

しかし，Fig. 1 と Fig. 2 との重大な相違は，Fig. 1（湯川型相互作用）は量子電磁力学との類比によって場の理論の局所相互作用として取り扱われ一定の成功を得られているのにたいして，Fig. 2 では，重い粒子（ $\sim 1 \text{ GeV}$ ）から軽い中間子（ $0.1 \sim 0.5 \text{ GeV}$ ）をつくるきわめて強い束縛力や， の部分の理論的取り扱いに納得できる方法が見出されていないことであり，この点は今日なお解決にほど遠い問題点として残されたままである。

しかし，完全対称性（前出）の考え方を数学的に推し進めると（池田，小川，大貫による $U(3)$ 理論など 1959）坂田模型の一つの重要な内容を展開することができる。すなわち， P , N , Λ の同質性に着目すると K -中間子（ $\bar{P} + \Lambda$ の束縛状態）は π とともに群論的図式で Fig. 3 のようにあらわされ， $U(3)$ （3次元ユニタリ変換）による強い相互作用の不変性を，basic な対

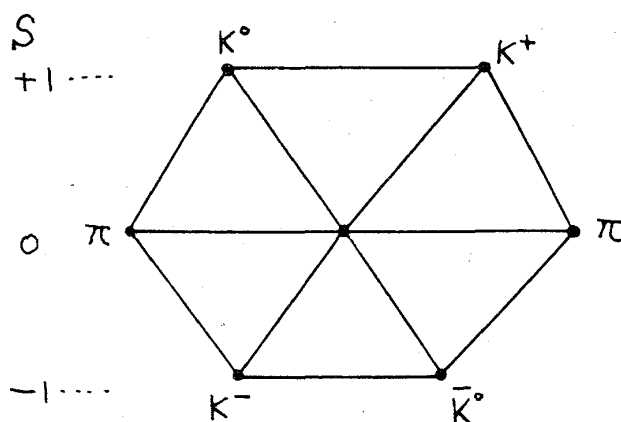


Fig. 3

称性として要請する場合の一義的な予言として， K も π と同じくギ・スカラーであり， K , π のほかに 8 番目のギ・スカラー中間子 (η) の存在が結論される。実際のパターンはこの対称性がある程度くずれたものであるが，これは松本の半経験的質量公式を $U(3)$ 理論で再構成した沢田-米沢の公式による半経験的な approach により，当時の段階で知られていた範囲のハドロンの共鳴準位の大局的知識を再現することができた。

他方，弱い相互作用に関しては，パリティ非保存の発見（Lee-Yang, Wu）以後，いわゆる $V-A$ 理論（弱い相互作用を Current 形式で記述するとベクトル型 (V) とギ・ベクトル (A) 型が $V-A$ の型で共存する。Feynmann-Gell-Mann 1958）が成功したがこれを坂田模型によって定式化すると基本粒子 P , N , Λ と軽粒子 ν , e^- , μ^- との間にいちじるしい平行性があることが指摘された（Gamba-Marshak-大久保，

1959) この平行性 ($\nu \leftrightarrow P$, $e^- \leftrightarrow N$, $\mu^- \leftrightarrow A$ の入れ換えによって弱相互作用の型は不変) が単なる見かけ上のものでなく, — たとえば或る未知の物質によって — P , N , A がそれぞれ, ν , e^- , μ^- と関係をもって作られているという構想を主張したのが「名古屋模型」(1959~60)である。また, この考え方と関連してニュートリノ一元論による構想も出された(武谷, 片山 1959~60), [ここまでの発展の詳細は Progress Supplement No. 19 に収められている]

§ 3. 次の段階

以上のような成果をふまえてわれわれは1960年代に入ったが, この頃から諸外国でもこの方面について重要な研究があらわれてくる。U(3)理論の刺戟をうけた Gell-Mann や Neéman のバリオン分類の8重法 (Fig. 4), 大久保の質量公式などがそれである(1961~62)。国内では坂田模型によって存在の予想される粒子が効果を積極的に核力分析に適用する仕事(広島グループら, 1961)がはじめられた。

1962年に, ニュートリノが(1942年に坂田一井上の二中間子論で予想されたごとく)二種類存在することが実験的に確証され, これにともなう名古屋グループや京都グループは名古屋模型の観点から第4番目の基本粒子の存在を論じた(1962)。正確に言えば, 名古屋グループ(牧, 中川, 坂田)はこの第4番目のものを存在しないか, あるいは(P , N , A とくらべて)非常に重いものと考え, 京都グループ(片山, 松本, 田中, 山田)はこれを V^+ と呼んだ。また, 二種類のニュートリノ (ν_e , ν_μ) の粒子状態を重ね合わせた別の粒子像 (ν_1 , ν_2) を導入してこのそれぞれに基本粒子が対応すると考えて弱相互作用の「角度」を説明しようとした。(のちに Calibbo もこの角度を導入し, その値をきめた—1963)。

さきに述べたバリオンの8重法分類によれば, Fig. 3 と同様に Fig. 5 のパターンになるが, これは坂田模型の原型のままでは可能でない。(P , N , A) と (Σ^+ Σ^0 Σ^-) (Ξ^0 Ξ^-) とは当然U(3)の異なった既約表現に属するからである。Gell-Mann らはバリオン族にたいする単に現象論的な分類

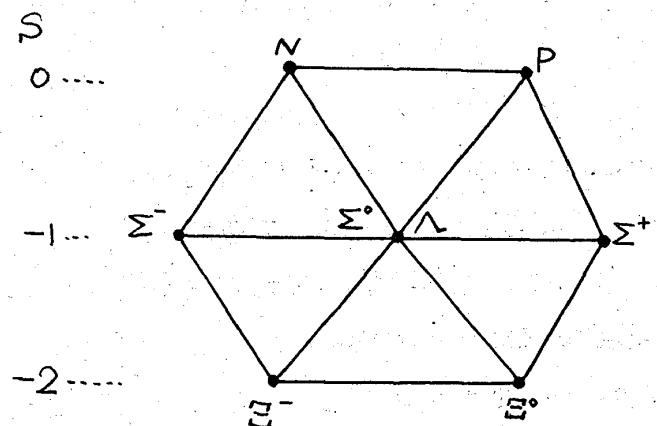


Fig. 4

牧 二郎

法としてこれを用いたのであったが、坂田模型の考え方に従うならば、これはあくまで基本粒子の対称性から導びかれるべき性質である。

1963年(3月)の研究会ではこれをめぐって、模型の変更か、或は対称性の議論の適用外としてむしろ対称性の破れ方や dynamics の立ち入った性質の解明にまつべきかについて議論があり、

前者の立場からは8重子背後に(実際の P, N, Λ とは異なる $ur-p, ur-n, ur-\lambda$ を設定して進むのが坂田模型の方法であることを坂田は指摘した。もし原型の坂田模型のままで考えたと Fig. 4 のようにならず、反面8重法によると(3-3)共鳴核子 N^* は、

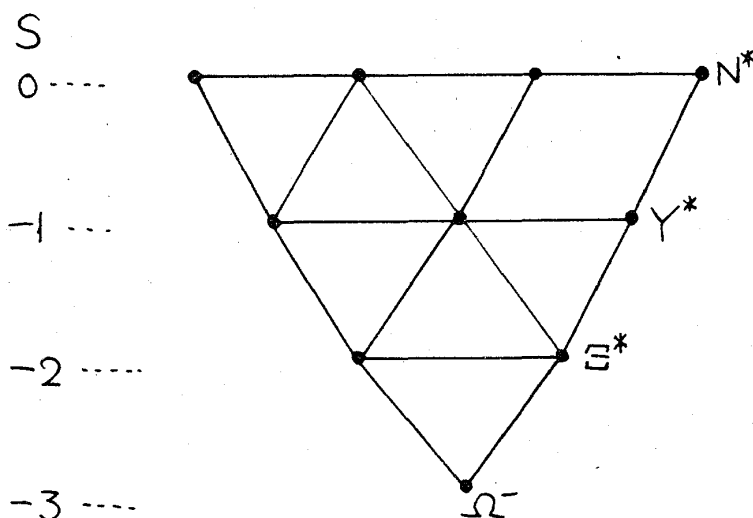


Fig. 5

他のバリオン共鳴状態とともに Fig. 5 のようなパターンとなり、この図の Ω^- 粒子は大久保=Gell-Mann の質量公式の予言と極めて近い質量値をもって実験的に確認された(1963末)。

これよりさき、この $ur-p, n, \lambda$ を用いて8重法の成功の基礎を説明する試みとして、さきの改訂名古屋模型の考えをうけていわゆる四元模型(Quartet Model)が提唱された(牧, 原ら)。しかし、坂田模型の原型に最も近い三元模型の範囲で基本粒子に分数荷電を与える模型(Gell-Mann の quark, Zweig の Ace-1964 はじめ)を考えるならば、Fig. 4, 5 のバリオン族は統一的に基本粒子 q の三体状態(メゾンは $q\bar{q}$)として理解され、これがのちにのべる非相対論的理論の一定の範囲内での成功とあいまって広く受け入れられるところとなった。

これにともない強い相互作用の Vertex (Fig. 2)は

— 四元模型でも quark 模型でも — Fig. 6 のようになり、力学的には更に複雑となった。今一つの重要な点は、基本粒子が P, N, Λ から $(ur)-p, n, \lambda$ に変更されたことによりハドロンの構成要素は現実に既に存在するものという制約から解放された仮説的存在となり、その考え方の源流を元の坂

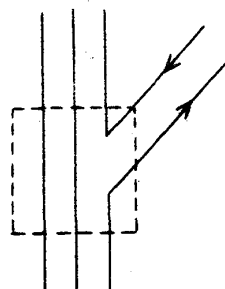
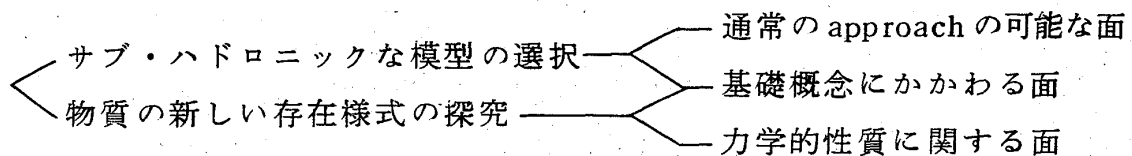


Fig. 6

田模型に仰ぐにしろ、それは仮説なるが故に多くの type の 模型を構想することが可能となったことである。

§ 4. 素粒子概念の分析

ここまで来ると、坂田理論の真のねらい、即ち素粒子理論にたいするその展望、が一層明確にされる。その第一は、物質の階層という考え方の確立であって実際、坂田理論の“ur-baryon”はその物理的な存在様式の解明を今後につまべきサブ・ハドロニックな物質の新しい階層であろうと考えられる。そして、第二に、こうした考え方の線上に素粒子概念の分析を展開しなければならないということである。問題の性質を図式的に示せば



のように考えてよいであろう。右の三つの面は、むろん相互に関連し合った諸側面である。

ひるがえって、素粒子概念の分析という課題そのものについていえば、それは本来上の図式ではつくされない多面的なものであり、一つのパターンを描けば図のようにすくなくとも三つの主要な方向があり (Fig.7), これらもまた相互に浸透し合っており、「ナワ張り」のようなものでないのは言うまでもない。

この図は極端に単純化して描いたものであるから、不十分な点はどうか頭の中で補ってこれを眺めていただきたい。

元にもどって、模型の選択と物性の Sub-hadronic property とがきわめて密接に結びついた問題であることは、たとえば 1965 ~ '56 に内外で精力的にしらべられた非相対論的描像 (Gürsey-Radicatti, 崎田の SU(6) 理論, 1964 年, を土台とする) にも端的にあらわれている。周知のごとくこの理論でバリオンはその 56 次元表現に分類されるのが最も良いが、ここで構成要素の 3 つの ur-baryons が S-波で基底状態に束縛されるものとする、quark 模型では order 3 のパラ・フェルミオンの統計性を導入しなければならず、これを避けて通常の (フェルミ) 統計の枠内で扱うためには ur-baryon の数を増やした three-triplet 模型 (Han-南部, 宮本, 堀) などに模型を修正する必要がある。また、前方散乱振巾の“加法性による

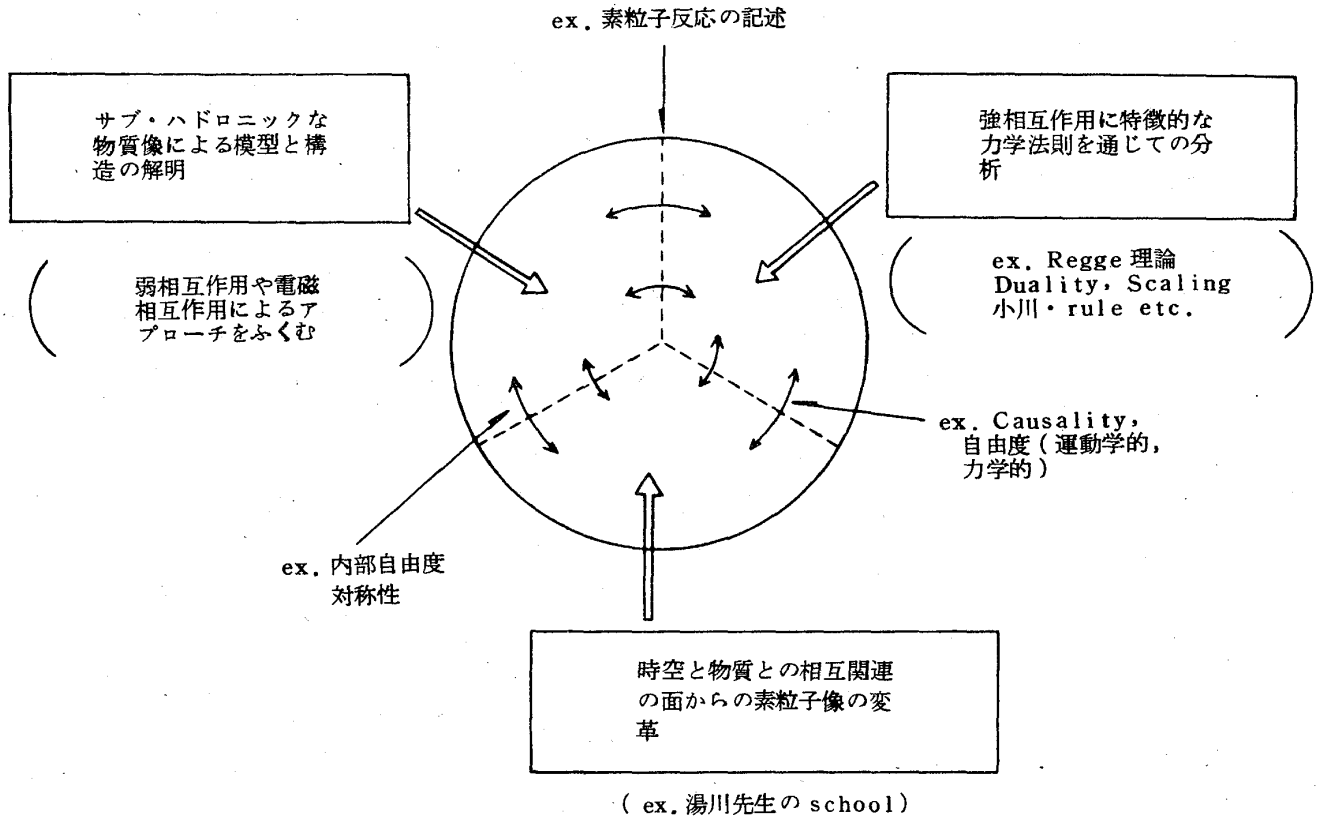


Fig. 7

quark-counting” という解釈，ハドロンの（強相互作用による）崩壊過程における大久保・飯塚の選択則，“Exotic” な共鳴状態が見出されないこと，等 — 大ざっぱな言い方をしたが，これらの事柄はいずれも sub-hadronic level の物質像が模型との関係で自らの或る側面を現実の過程にあらわしているものと見なされる。

ここで quark-counting というのは， $\pi-N$ ， $N-N$ 反応の全断面積（それぞれ $\sigma_{\pi N}^T$ ， σ_{NN}^T とかく）の比が，大体 $\sigma_{NN}^T / \sigma_{\pi N}^T \approx 3/2$ となっている事実を N が ur-baryon の 3 体系， π が 2 体系であることから簡単に帰結されるものと理解しようとする考え方で，伊藤（大介）氏や Lipkin に負うものである。また大久保・飯塚の選択則とは（飯塚氏の説明法によれば），たとえば $\phi \rightarrow K \bar{K}$ に比して $\phi \rightarrow \rho \pi$ なる崩壊が起らないのは ϕ —メゾンの ur-baryon 成分がほとんど λ と $\bar{\lambda}$ であるから，ur-baryon の “line” を描くと前者はつながった “line” で崩壊するが後者はそれが不可能であるという相異によるものとする解釈をいう。（Fig. 8）

“つながった line” によるハドロンの相互作用という考えの有効性を検証するために，1967 年頃から井町—松岡—二宮—沢田らによってハドロンの散乱（反応）振巾を “ur-baryon の組み替え反応” として — 半現象論的方法で — 取り扱う試みが展開され，いわゆる Dual Resonance Model との何らかの関係が暗示されている。（Prog.

theor. Phys. Suppl. No. 48('70)

を見よ)

しかしながら、Sub-hadronicな物質像の解明に向けて素粒子概念の分析を行うという課題は生易しいものではなく、1964~7年頃の上述の一連の研究もこうした課題そのものに対する回答であるというよりは、むしろその難かしさを積極的に意識させるものであったといった方がよい。(ところが直観的な描像の効きやすいアプローチの場合、しばしばそうした描像にもたれすぎた発想法に流され、あたかも素

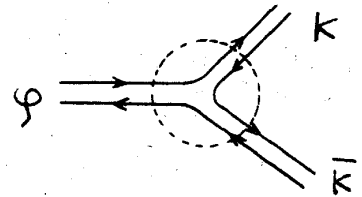
粒子の複合性とか ur-baryon の諸属性とかがすぐにでも何らかの確定した答の出しうる概念であるかのごとく安易に問題にされる危険性があり、しかもそれが“対応論的方法”として許されうるものとする誤った考え方もなかったとはいえない。)

§5. 研究計画の在り方についての模索

1968~70年の時期は、こうして、前節でのべた strategic な課題に研究計画全体としてどのように取り組むべきかについての模索の時期であったともいえる。加えて、いわゆる quark 模型の研究が世界的流行の柱の一つとなった結果、初期の段階のように研究計画を「坂田模型(ないしその variation)に関する研究の発表と討論の場」というイメージで限定的にとらえることも適當ではなくなった。むしろ、この研究計画は通常のものとは異なり、primary な研究発表の場であるというよりは坂田哲学を一つの指針としていろいろの研究(短期、モレキュール型など)に motivation を与え、またそれらを generate するための研究計画という性格を意識すべきではないか、という点が強調されることとなった。いいかえれば、物質に種々異なる階層があるように、研究計画のそれぞれも種々の階層のものがあってもよいのではないか、そしてこの研究計画は素粒子理論の進展のなかで、種々の行き方の中から戦略的に最も積極的な要素を評価し抽出するための討論が有効に行われることを目的とした「研究会」を organize することを中心にとらえるべきであるという考え方である。

実際、1969年度と1970年度の研究会(素研39('69)F59-82, 素研40('69)

$$\varphi \rightarrow K \bar{K} ;$$



$$\varphi \rightarrow \rho \pi ;$$

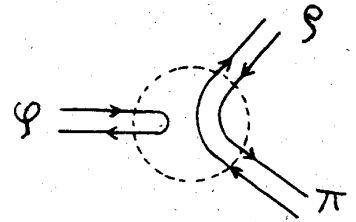


Fig. 8

牧 二郎

D 33-92, 素研 43 ('71) A 47-122 に報告)は, 大体この線の考え方に沿って企画されたものであった。

§ 6. 今後の課題 (むすび)

1971年度は, 以上概観したこれまでの経験の蓄積のうえに今後の見通し, ないし strategy, について可能なかぎり討論を煮つめたいと考え, またそのことが成功するかどうかの試金石としてベストをつくすという意志をふくめて, 研究計画をみとめていただいた。去る10月21/22日の拡大世話人会で今年度の研究会 '72 1月19-22日の準備をし, そこで討論すべきいくつかの柱をきめたが, その中の一つの問題点として, 最近, 丹生氏等が宇宙線エマルジョン・チェンバーによる分析によって発見した新しい藤尾粒子Xの解釈の問題がある。これは未だ一例であり今後の追試が待たれるが, 小川氏等によるとこの粒子の質量のきわめて大きいこと ($1.5 \sim 2.0$ GeV) と寿命の長いこと ($\sim 10^{-14}$ sec, 発見された崩壊モードは $X \rightarrow \text{hadron} + \pi^0$) の両者 (とくに後者) を理論的に説明するには強相互作用で保存する新しい量子数を導入し, § 3 にのべた第4番目の基本粒子の存在をこれに対応させるのが有力な可能性を与える。もしこの考え方で進みうるならば, われわれは quark-ace 模型の成果を含みながらこれを超えて名古屋模型の考え方を再確立する四元模型によって素粒子の sub-hadronic な模型に新しい見地をもたらすことができるであろう。すでに広島グループ, われわれ (牧, 益川, 梅村), 名古屋グループその他でこの新粒子現象の解釈を中心に興味ある試みが展開されつつあるが, 問題の位置付けとしてはさしあたりは § 4. の “通常 approach の可能な面” の段階にとどまっており, sub-hadronic な物質像の解明における真のむつかしさは依然のこされたままである。しかしながら, 現存のいかなる模型も (とくに quark-ace 模型について), 暫定的なものであり今の段階で固定化すべきでないとは再三強調してきたわれわれの立場からすれば, このような新しい方向は追求するに値する重要なポイントであろう。

研究計画の将来の進め方に関して, 私としてここで具体的な提言をする用意はないが, すくなくとも明らかなことは, 素粒子概念の追求・分析の点において Fig. 7 に示した  の部分は, 素粒子理論の現段階として不可欠のものとする。 (研究計画を「模型と構造」という名称で継続するか否かにかかわらず。)

< 討論 >

宮原: $(p, n, \lambda) \leftrightarrow (\nu, e, \mu)$ を $(p', p, n, \lambda) \leftrightarrow (\nu_e, \nu_\mu, e, \mu)$ にするとはど

の様なことか。

牧 : u -baryon の数を一つふやすことを単に群論的に言えば $U(3)$ から $U(4)$ にするだけであるが、対称性と裏腹の問題である Symmetry-breaking については、一層の検討が必要となる。

小川 : fractional charge の問題はやはり気になる。

小沼 : $\frac{e}{3}$ という fractional charge は、quark が三種類、バリオンの構成が三体系ということとむすびついていた。

中野藤 : 素粒子の構造に時空がどの様にして入るのが。

牧 : 湯川理論の場合には、素粒子の内部自由度を、時空的に広がった素粒子の時空的自由度から媒介されるものと考えろという明確な立場がある。われわれの行き方も Fig. 7 の意味で何らかの形で将来つながって行くものと思う。

中野藤 : 例えば、コマの model の様なものか。

牧 : コマの model に近いものとして、中野(董夫)氏の剛体模型にはじまる仕事の流れがあり、広がった素粒子像の一つの具体例である。

中野藤 : 高林氏の model は?

牧 : 高林氏の理論はむしろもっと抽象的・一般的な力学的模型の枠から改める性格のものではないかと感じている。

中野藤 : 素人からみると、数学的なものと物理の実体がどの様な関係になっているかわからない面が多々あるが…。

また、先程の話だと Fermi-Yang ははっきりした“けり”がついた形でその後の理論が発展したのではないですね。

牧 : $(\bar{P}N) \rightarrow \pi$ になるという指摘が重要であった。鎖近似で relativistic に取扱うたことがあるが、ここでも問題は場の理論の発散と直接に関係してしまう。要するに、Fig. 2 又は 6 の $\square$ のところは、これまで何の解決も与えられないままに今に残っている。