

基研研究部員会議における講演“基礎物理学の将来”の報告

素粒子理論の現状と展望

— Hadron dynamics を中心として —

基 研 河 原 林 研

§ 0. 序 詞

基研研究部員会議に於て通常の議題の外に学問的な（専門外の人にも分るような）話も必要ではないかということが研究部員の中から要求されていました。これに基き素粒子物理学，原子核物理学，物性物理学夫々の分野に於る現状と将来及びその問題点等の報告が行われることになりました。その第1回目の報告が河原林研氏（京大・基研）によって昭和44年11月7日に行われました。以下はその講演の内容とそれをめぐる討論の要旨の報告です。

尚この報告は既に素粒子論研究（Vol. 40 No. 4）に掲載されています。物性研究にも同時に掲載すべき所，編集員の不行届のため大変遅れましたことをお詫び致します。尚第2回目の報告は碓井恒丸氏（名大理）によって，昭和45年7月3日に行われました。この報告は本誌次月号に掲載の予定です。

— 編 集 部 —

§ 1. はじめに

昨年，基研15周年記念シンポジウムにおいて，片山，小川，大貫，宮沢の各氏により，素粒子論の歴史と展望についての報告があり，それに基づいて多くの人達の討論が行われた。今日，私に与えられた課題は，素粒子理論の現状と展望についての問題提起ということであるが，昨年のシンポジウムの報告となるべく重複しないようにして，hadron dynamicsに関連した最近1年間の展開を中心に私の考えを述べさせていただきたい。

先づ，60年代の素粒子論をふりかえてみると，その最も大きな変化 — 成果？ — の1つは，“素粒子が何らかの意味で構造を持っている”という認識が確立されたことだろう。50年代の強い相互作用理論が3-3共鳴の理解をめぐって展開したといていいとすれば，60年代の強い相互作用理論は，続々と発見された hadron の励起状態の統一的理解がその中心課題であったといえるし，70年代もおそらく中心課題の1つとして残るだろうと予測

できる。

ここで“hadron の統一的理解”という場合、従来、比較的成功をおさめてきた半現象論的アプローチは、後に述べるように、簡単な模型にもとづく kinematical な、或は group theoretical なアプローチであった。現在、我々が到達しているその理解の仕方の一端を Meson 族を例にとって紹介すると次のようになるだろう。

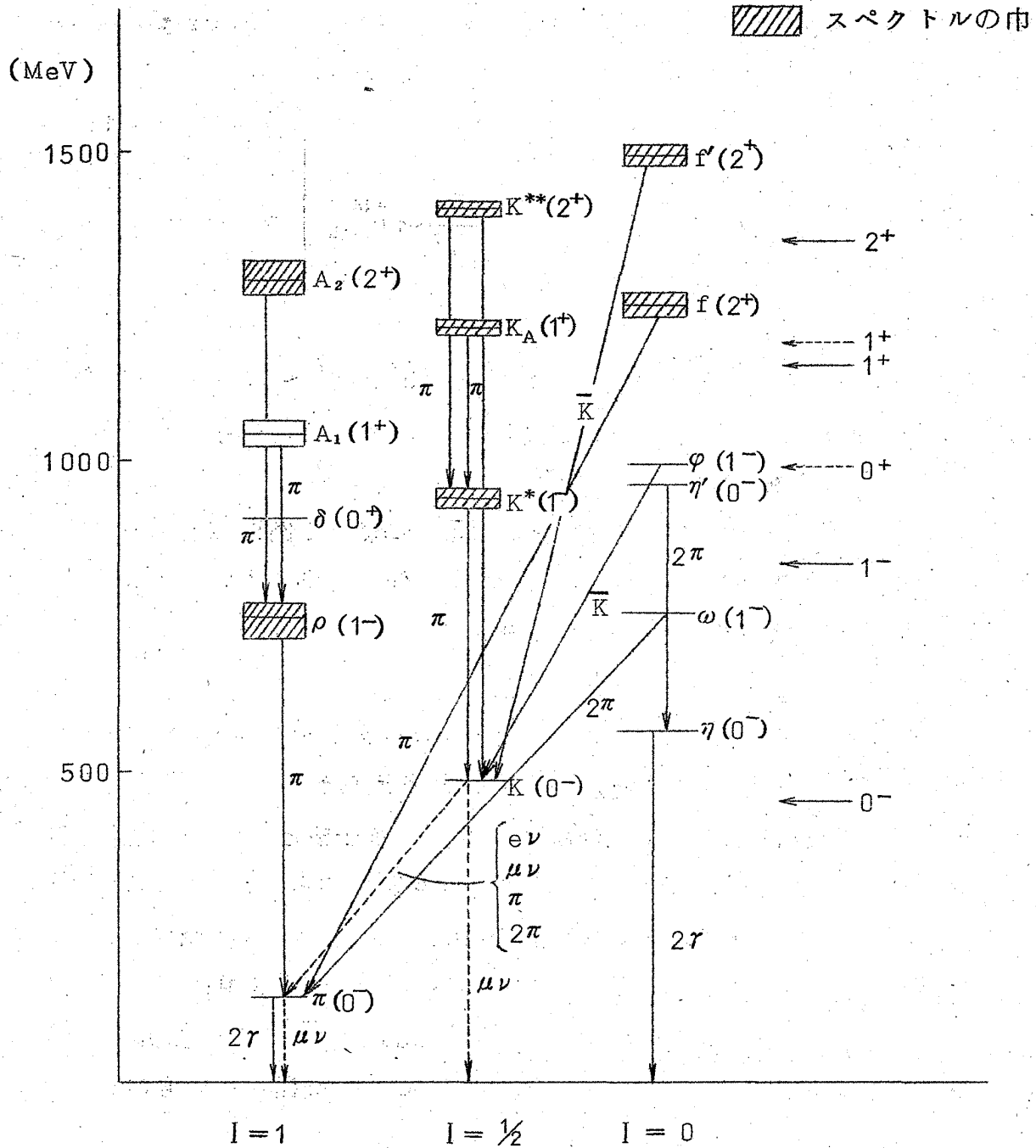
§ 2. hadron spectroscopy — Meson 族の場合 —

Meson 族についての励起状態を第 1 図に示す。すぐわかるようにスペクトルの巾が ρ のように ~ 100 MeV 程度にひろがっているものと、 π や K のように $\ll 1$ eV のせまい巾のものが共存している。巾の大・小はスペクトル間の transition probability をきめるので、上の事実はいくつかの質的に異った種類の transition probability を与える相互作用が hadron に共存していることを示唆しており、我々は通常これを次のように分類している。

相互作用の分類	coupling constant	examples
強い相互作用	$g^2 \sim 1$	$\rho \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
電磁相互作用	$e^2 \sim 10^{-2}$	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
弱い相互作用	$G/M_p^2 \sim 10^{-5}$	$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$
超弱相互作用	$G' \sim 10^{-3} G$	$K_L \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

はじめの強い相互作用をのぞくと、他は相互作用はすべて perturbation の第 1 近似でよい記述を与えることがわかっており、60 年代にその effective Hamiltonian の形についての整理がほぼ終ったと云える。70 年代はおそらくこのような effective Hamiltonian の背後をさぐる試みが中心課題となるだろうし、Universality の意味や Intermediate Boson の検証も重要な問題として残ると思われる。しかし、ここではこれらの問題についてはすべて省略させていただくことにして、強い相互作用の問題点を議論したい。

第 1 図



強い相互作用では、もはや perturbation に基づく計算法は一般には適用出来ないと考えられるので、原子、分子や原子核で用いられた group theoretical なアプローチでスペクトルの間隔や巾についての規則性をさぐる試みが行われ、成功をおさめた。hadron の Bohr radius や Rydberg 定数を、原子・原子核の場合と比較してみると、

原 子	photon	Bohr radius $a_A = \frac{h^2}{m_e e^2} \sim 10^{-8} \text{ cm}$	Rydberg $g_A = \frac{m_e e^4}{h^2} \sim 10 \text{ eV}$
原 子 核	pion?	$a_N = \frac{h^2}{M f^2} \sim 10^{-13} \text{ cm}$	$R_N = \frac{M f^4}{h^2} \sim 10 \text{ MeV}$
hadron	?	$a_H = \frac{h^2}{m_h g^2} \sim 10^{-14} \text{ cm}$	$R_H = \frac{m_h g^4}{h^2} \sim 1000 \text{ MeV}$

但し, $m_h \approx M$, $10 f^2 \sim g^2$, ($e^2 \sim 10^{-2}$, $f^2 \sim 0.1$) とおいた。

実際の hadron の level 間隔は $\sim m_\rho$ であり, このことは上の analogy からいくと m_h は nucleon にくらべてあまりおもくできない。又, 第1図からもわかる通り, pion は他の hadron に較べて例外的に軽い。この事実は pion を broken chiral symmetry に伴ってあらわれる goldstone 粒子としてとらえようという試みの基礎になっている。

さて, hadron dynamics は上記のスペクトルの間隔 ($\sim$ 数百 MeV) と巾 ($\sim$ 数 + MeV) を同時に規定するものと考えられ, いろいろな複合模型が考えられているが, 従来は, 複合模型にしても原子核との analogy の面などが強調され, hadron dynamics に特有な性質を明らかにするという段階にまで至っていない。実際, hadron dynamics というものが未だ well defined でない段階で, それに特有な性質というものがそう簡単にわかるものではないことはたしかだが, ここではあえて "duality" という性質がその一つではないかという問題提起をしたい。以下にその根拠らしいものをいくつかあげて, 解説をかさねさせていただく。

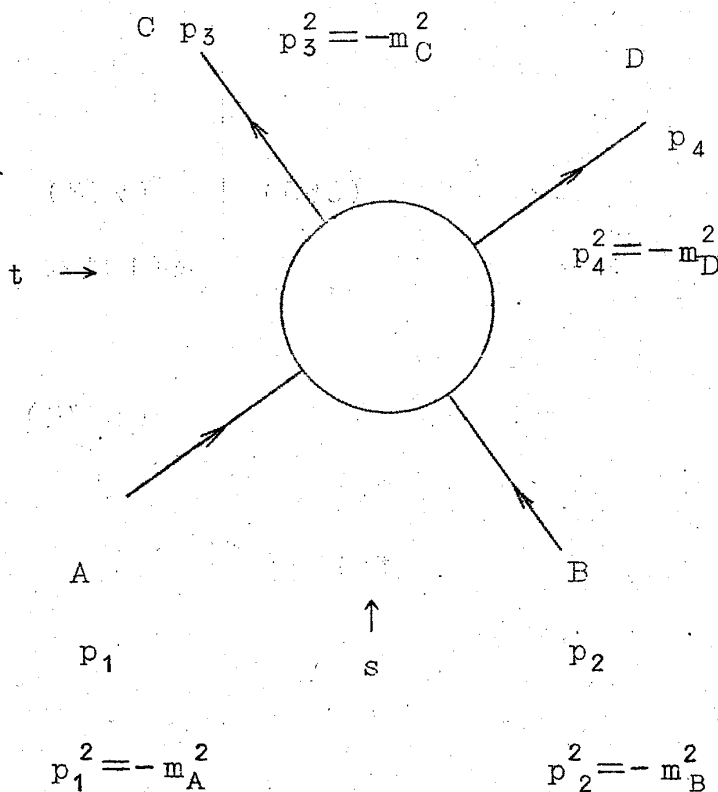
§ 3. Hadron dynamics ?

現在の素粒子論の理論的支柱は relativistic invariance と quantum mechanics であるといえる。両者ともその適用限界が議論されて久しいが, hadron に対しては, それを support する現象の方が圧倒的に多い。この両者を融合させた理論形式として場の量子論があるが, hadron のいろいろな現

象をここから出発して説明するのは容易でない。そこで、直接現象論と結びついた S 行列を考える試みがある。この立場では hadron の level, transition probability は半ば in put であり、半ば out put として取扱われ、一種の self-consistency の条件が重要になる。いずれにしても hadron の性質は散乱振幅を通じてあらわれるので、例として $A + B \rightarrow C + D$ の 4 体散乱振幅を考えてみよう。(第 2 図)

$$T_{A+B \rightarrow C+D}(\underbrace{s, t}_{\text{space-time variables (dynamical variables)}}; \underbrace{J_A, \dots; M_A, \dots}_{\text{kinematical variables (spin, Mass)}}; \underbrace{I_A, Y_A, \dots}_{\text{internal variables (Isospin, hypercharge etc)}})$$

space-time variables (dynamical variables) kinematical variables (spin, Mass) internal variables (Isospin, hypercharge etc)



$$s \equiv -(p_1 + p_2)^2$$

$$t \equiv -(p_1 - p_3)^2$$

s channel ($A+B \rightarrow C+D$)

$$s > 0, \quad t \leq 0$$

$$t \text{ channel } (A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D)$$

$$s \leq 0, \quad t > 0$$

第 2 図

一般に、散乱振幅は上に書いたように大雑把に分けて3つの variable に依存していて、従来、それぞれが単独に取扱われる傾向にあった。例えば s , t と $J_A, J_B, \dots, M_A, M_B, \dots$, etc は analytic S matrix の理論で扱われ、internal variables I, Y etc は symmetry 理論として、群論や composite model などに基いた取扱いがされていた。

後者での主要な問題は、一体問題としての hadron の mass formula (広い意味での) であり、quark model に基く、SU(3) 対称性によるアプローチが成功している。meson については $q-\bar{q}$ pair で回転による励起状態を考えた model がよく実験事実を説明することがわかっている。第3図にそれを示した。注意すべきは、観測にかかっている meson が model の prediction によくマッチするのみでなく、この model で exclude される meson、例えば 0^{--} や $I=2$ の meson は、実際にも観測にかかっていないという事実である。我々はこのような meson を exotic meson と呼んでいる。本当に exotic meson が存在するか否かは hadron の描像をえがく上で重要なポイントになるが、これについてはあとで少しふれたい。

L		J^{PC}	$I=1$	$I=\frac{1}{2}$	$I=0$	$I=0$
L=0	$1S_0$	0^{-+}	$\pi(140)$	$K(495)$	$\eta(555)$	$X^0(958)$
	$3S_1$	1^{--}	$\rho(750)$	$K^*(890)$	$\omega(750)$	$\phi(1019)$
	$\bar{3}P_0$	0^{++}	$\delta(960)$	$K_V(1100)$	$\sigma(750)$	$s^*(1070)$
L=1	$3P_1$	1^{++}	$A_1(1070)$	$K_A^{**}(1230)$	$D(1280)$	?
	$3P_2$	2^{++}	$A_2(1310)$	$K^{**}(1420)$	$f(1260)$	$f'(1515)$
	$1P_1$	1^{+-}	$B(1220)$	$K^*(?)(1320)$	?	?

$q\bar{q}$ pair の廻転模型 (L=0,1 の場合) (質量単位 MeV)

hadron の dynamical な性質については, quark model に基いた非相対論的な取扱いがいろいろ試みられ, ある程度成功しているし, 更に, このようなアプローチで散乱振幅をも取扱う試み — quark counting の方法や Sakata rearrangement など — もある。

一方, s, t variables を正面から取扱う analytic S matrix の理論では Regge pole 理論 — Finite Energy Sum Rule — Veneziano 模型と展開することによって, ようやく従来の枠を出て, internal variables をも同時に取扱えるようになった。それについて説明する前に高エネルギー散乱の特徴をまとめておくと,

I) Constant total cross sections … ほとんど diffraction 散乱。

II) Exchange reaction cross sections は一般に energy の power で小さくなる。

例 $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ (charge exchange reaction) : $\frac{d\sigma}{dt} \propto s^{2\alpha(t)-2}$

ここで $\alpha(t)$ は $t(\leq 0)$ についてほぼ linear であることが知られている (第4図)。Regge 理論では $\alpha(t)$ は Regge pole の trajectory と呼ばれ hadron のスペクトルをさめる量でもあり, 多分将来の理論でも重要な概念として残る可能性が大きい。

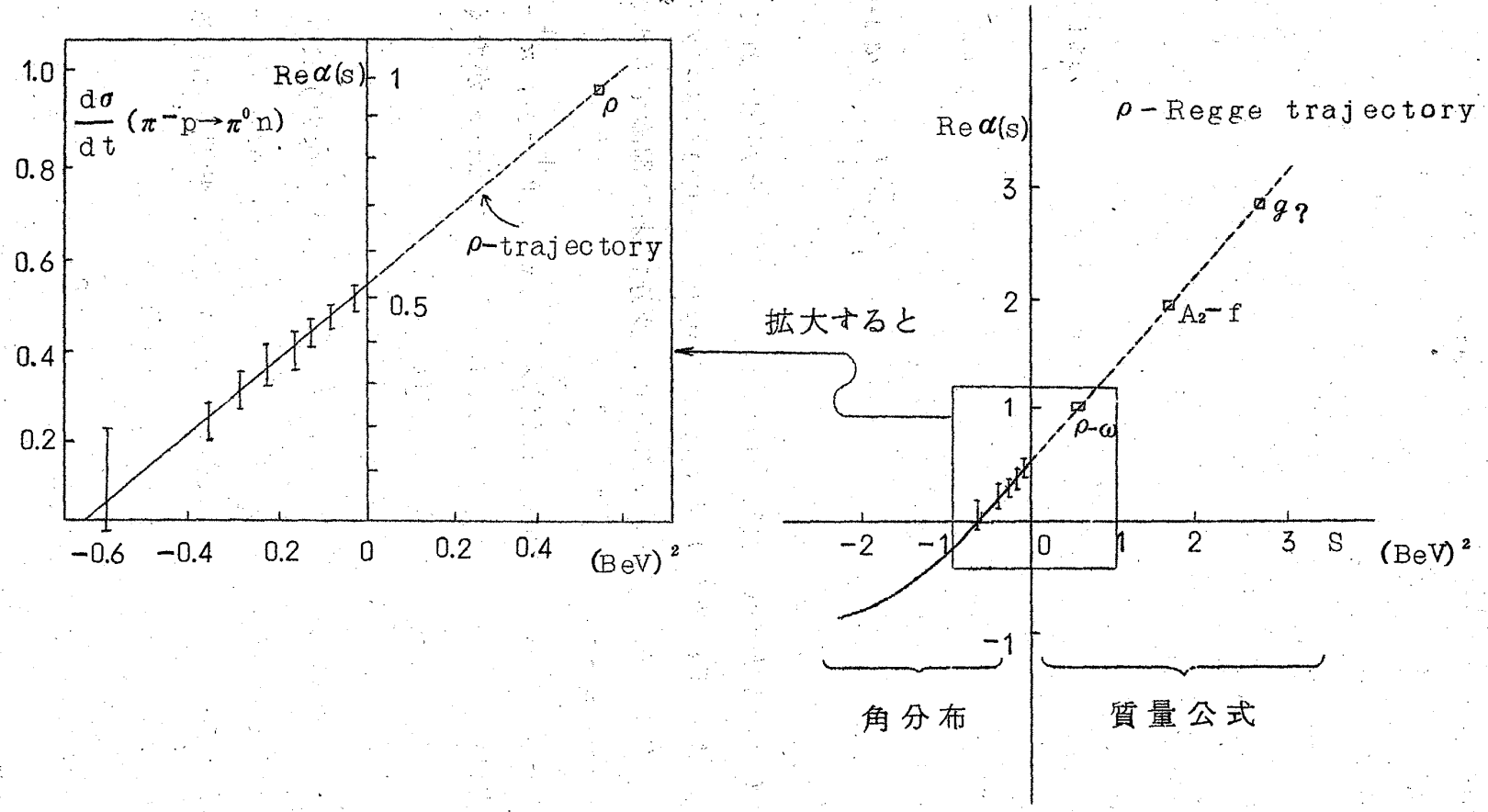
III) Exotic な量子数をもった channel (例えば $p-p, K^+-p, \pi^+-\pi^+$ etc) の散乱振幅は low energy で resonance structure がなく, high energy で cross section はすぐに flat になる。

この性質を我々は交換される粒子群の力の balance (引力と斥力) によって説明している — Regge trajectories の exchange degeneracy —。

IV) Duality 中間エネルギー領域 ($\lesssim 10 \text{ BeV?}$) では, 散乱振幅は次の性質を持つ: (簡単のために s, t 以外の変数は省略)

$$\begin{aligned} T(s, t) &\approx \sum T_{\text{Resonance}}(s, t) & \left(\begin{array}{c} t \leq 0 \\ s_{\text{Min}} \lesssim s \lesssim s_{\text{Max}} \end{array} \right) \\ &\approx \sum T_{\text{Regge}}(s, t) \end{aligned}$$

第 4 図



角分布

質量公式

上のような性質を持つ例を explicit に与えるのが Veneziano 模型で、
散乱振幅は次のようにかける；

$$\begin{aligned} T_V(s, t) &= \sum_n \frac{C_n(t)}{s - s_n} & s \geq s_0 & \quad t \leq 0 \\ &= \sum_n \frac{C_n(s)}{t - t_n} & t \geq t_0 & \quad s \leq 0 \\ &= \sum_i T_{\text{Regge}}^{(i)}(s, t) & s \geq s_0 & \quad t \leq 0 \end{aligned}$$

但し、 $C_n(t)$ は t の n 次の多項式。はじめの式は T_V が pole の和で書けることを示し、2 番目は $T_V(s, t)$ が crossing symmetric であることを示している。“duality”といわれるのは $T(s, t)$ が 1 番目のように展開できると同時に、3 番目のようにも書ける性質である。

〔話に割り込んで〕

内山 duality とは式でゴチャゴチャ書かねばならないのか？ もっと直感的に分らないか。

河原林

$$\begin{aligned} \sum_n \text{diagram}_1 &= \sum_n \text{diagram}_2 \\ \Rightarrow \sum_i \text{diagram}_3 \end{aligned}$$

(Note: The diagrams are Feynman diagrams. The first diagram is a vertical line with four external lines. The second diagram is a horizontal line with four external lines. The third diagram is a horizontal line with four external lines, similar to the second but with a different internal structure.)

これじゃだめですか。ただこの式（黒板を示して）を書いただけですが。
特徴的なことは pole だけで書けているということ。しかも Regge pole behavior を示す。

内山 Pole だけで書けるといのは驚くに値しない。Weierstrass の定理を用いて、適当な制限で言える事だろう。

河原林 無限の pole の sum でないとだめ。

内山 無限個足した訳でなくて、上の方はいわばおまじないだ。絵じゃごまかされないよ。ぎざぎざと太い棒とどこが違うのか？ しろうとにも分る

様にしてくれ。

Veneziano 模型で重要な point は

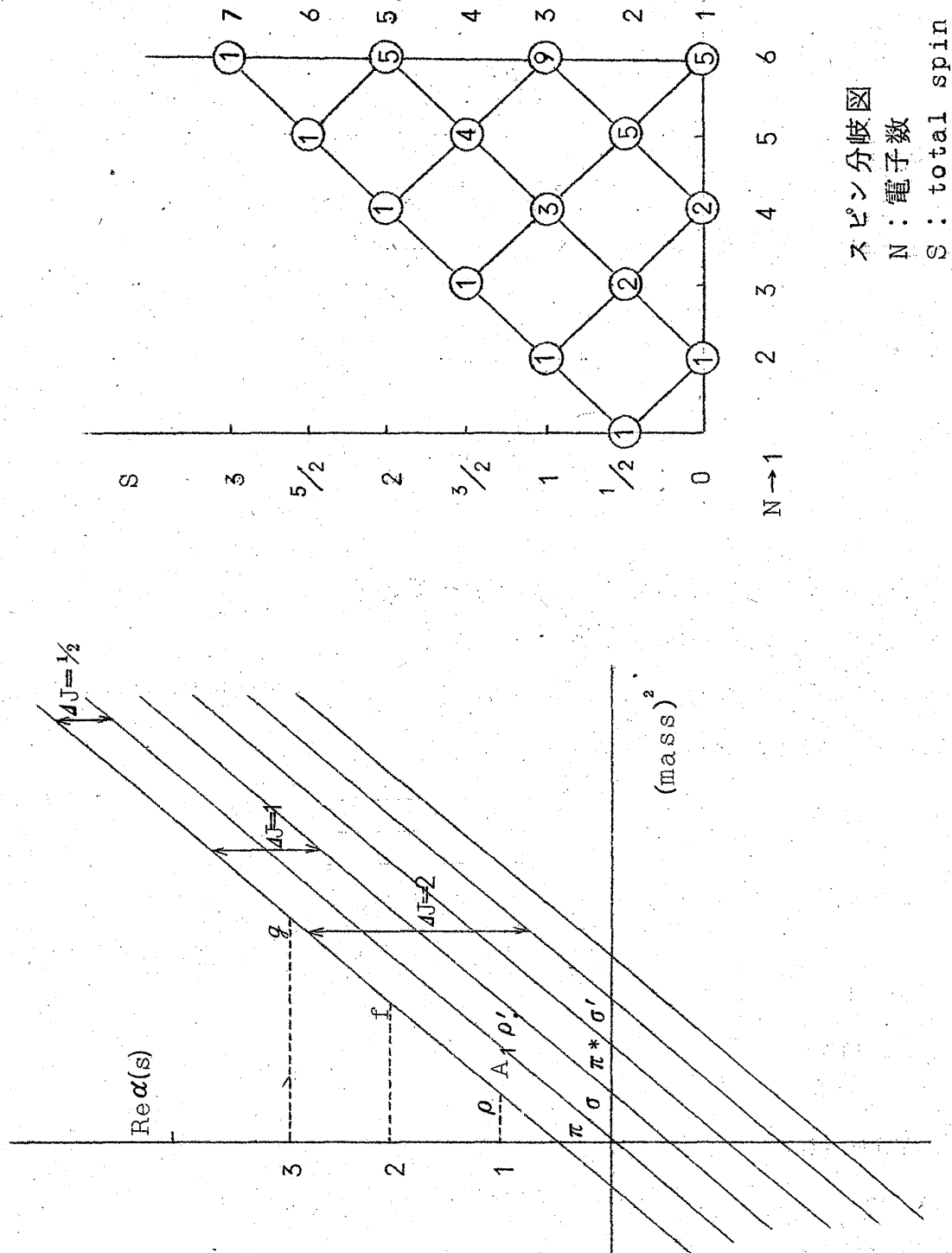
- a) linear trajectory ; $\alpha(t)$ が t の一次函数で、従って無限の resonances を伴っている。trajectory の勾配が universal であることも重要な性質であろう。
- b) crossing symmetry ; 直接 relativistic invariance と結びついた性質。
- c) unitarity ; これは第 1 近似として無視する — Narrow Width Approximation — 。本当に第 1 近似なのかいろいろ議論のわかれるところ。
- d) generalized exchange degeneracies ; exotic resonance が存在しない結果として説明されている。
- e) hadron の level density ; Veneziano 振巾にあらわれる resonance はすべて factorizable であることが可能であり、その結果、level の縮退が起る。 $E \rightarrow \infty$ では level density は $\sim e^{cE}$ ($c > 0$) とふえることが示されている。この意味について 1 つの解釈を第 5 図に示す。

左辺には Veneziano 模型で要求される hadron のスペクトル (spin と mass の関係) を、右辺には多電子系における spin- 電子数とその縮退度を示した。もし電子数を mass に対応させると、両者の類似は著しい。電子数は quark model では $q - \bar{q}$ pair の数に対応するので、このことは quark model で単に 1 つの $q\bar{q}$ pair で廻転による励起状態を考えるだけでは不十分で、 $q - \bar{q}$ pair のふえる励起状態を考慮しなければならないことを示唆している。もっとも単純に考えて $q\bar{q}$ pair がふえる励起状態だけを考えると、level density は e^{cE} でなく $e^{c'E^2}$ とふえすぎることがわかる。

[話に割り込んで]

内山 $e^{c'E^2}$ を e^{cE} にするには、何か spin の自由度に exclusion principle みたいなものを入れて、制限すればよいのか？

第 5 図



河原林 研

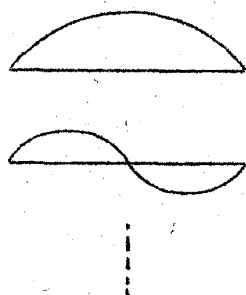
河原林 その点はまだ立入って考えていない。しかし、

$$H = \sum_{n=1}^{\infty} n a_{\mu}^{(n)+} a_{\mu}^{(n)}$$

$$[a_{\mu}^{(n)}, a_{\nu}^{(m)+}] = \delta_{\mu\nu} \delta_{nm}$$

とすれば、Veneziano 模型の level structure が出る事が知られる。これは harmonic oscillator ですね。

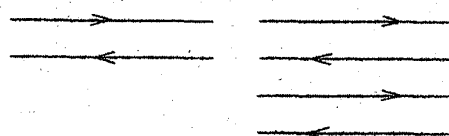
有限の弦の振動（有限であることが大切）



に対応した振動子がこれになっている。

内山 a_{μ} というのは何を表わすのか？

河原林 それは分らないのですが，quark のある励起状態に対応していると考えてもいいのではないか。



のように pair がふえればよい。但し、何かの制限をつけないとふえすぎる。

〔話続行〕

非常に興味のあるのは、このような今までの常識から考えられないような hadron の構造が、別のアプローチから実験的に要求されていた事実である。proton-proton の大角散乱の実験がそれで、数係数 C まで大体一致する。

f) duality diagram ; quark model にもとづいて connected diagram をかくと、これは上に説明した Veneziano 振巾と 1 対 1 に対応す

る。

あまりながくなるのでこの辺で私の報告を終りにさせていただくが、要するに duality をみたす Veneziano 模型は hadron に特有な dynamics の結果であろうという予想の下に話をまとめた。

最後に、今までふれなかったが重要な問題もあるので conjecture という形でそのうちのいくつかをまとめてみると、

I) 将来は個々の素粒子 (特定の mass, spin, etc を持った粒子) 及び、それらの相互作用という従来の考えよりは、スペクトル全体と、それらの全体の transition probability をきめる dynamics が重要になるだろう。この意味で Regge trajectory や trajectory 間の相互作用といった概念が将来残るのではないだろうか。

II) f) で述べたように duality diagram は従来の quark model の結果を Regge trajectory の表現という形で抽象化したものと考えられる。この diagram が将来の理論における一種の Feynman グラフになるかも知れない。

III) 今まで Exotic resonance は存在しないと考えられてきたが、Veneziano 模型から要求される hadron の level structure や baryon-antibaryon の困難 — これについては省略 — などと考えあわせると、本当は exotic resonance は存在するのではなかろうかという気がする。composite 模型もそう考えた方不自然でないように見える。では exotic resonance はどんな風にみえるだろうか？ 原子核の level については、測定技術の革新によって微細構造が明らかにされたように、hadron の level structure にも微細構造 — exotic resonance — は期待できないだろうか。

[話終り, 質問開始]

谷川 初めは quark 二体でやっていたのに、縮退度を出すには沢山いったのですね。

河原林 leading trajectory 上の resonance については二体で良い。

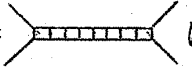
下の方は、まだ実験的によく見つかっていない。

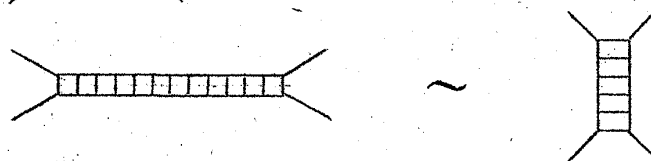
河原林 研

湯川 広がったものがあるって物がつまっていた、それが量子化されている。そのうちどれだけの自由度が必要か。連続体がいいのか。それとも、もっと naive に考えれば、空気や水がつまっているようなものである。それと exotic resonance とはどうか関係しているのか。そういうものが、elastic な性質として制限されていると言えばよいのか。

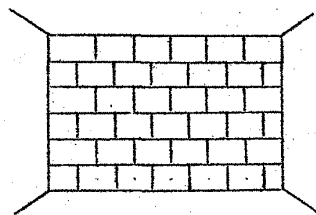
河原林 弦の様なものが一番良い様です。

谷川  Regge で書いた所を potential で置きかえられるか？

河原林  =  は今までもあった。今のは



という事は、はしごではダメで、基盤目でないとダメ



田中一 その Hamiltonian はどういう意味か。

河原林 Energy level とその density 及び propagator を表わせる。

$\langle n | e^{\alpha a^+} | 0 \rangle$ が vertex になっている。又 coherent state など analogy 以上のものかもしれない。number より phase が大切。

宮沢 今の話は dynamics は入っていない。私のいう dynamics とは unitarity のことです。ところが unitarity と duality とは相入れない。そこに書いた予想は賛成だが、duality と unitarity とは矛盾すると思う。unitarity すなわち factorization を要求すると発散する。だから level は power 位でふれるようになっているとよいのだが。

河原林 この議論は kinematics 以上の内容を含んでいると思ったので、dynamics といった。そしてこの duality は relativistic でなけ

れば表われない概念で、素粒子論で始めて出て来たものと思う。自由度は多すぎるかもしれない。

沢田 Dual Diagram から composite 的な構造を引き出すべきだと思う。もう一つ、実験に強いられて理論が変わったというのは本当だが、Sakata model のような composite model が素粒子の resonance との同一性を示唆して指導原理となった事は評価すべきだ。そして、更に matter と field との同一性がここにあると思う。

河原林 Sakata model は重要な役割をはたしたと思う。しかし、大部分の人がそう思ったのは、実験で resonance が発見された結果である。E.M. や Weak Interaction は、ここではふれなかったが大変重要だと思う。

牧 意見と質問を一つずつ。第一に、quark model の現在の形は近い将来に大きく脱皮しなければならないと思う。harmonic oscillator 的なものを出すには、必ずしも quark 的なものでない新しい物質を設定するのが必要かも知れない。urbaryon 的なものにあまり引きずられないようにしなければならない。

もう一つは、お話の全体に対する質問となるが、たとえば最近の 10 ~ 15 年を見たとき、日本で行われてきた仕事の評価、位置づけ等に関し個人的感想で結構ですからお聞きしたい。

河原林 第一の意見には賛成です。

第二の質問は、例として坂田モデルをとって見たい。私の考えでは SU(3) は二つの時期に分けて考えられる。それは Ω^- の発見を境として、それまでは日本ではいい point をおさえてきたと思う。それ以後 SU(3) が確立してから、私の感ずるのは前期の考えにとらわれすぎてもっと自由に考えれば出たであろう考えが出なかったのではないか。

湯川 Gell-Mann にだけ Nobel 賞がいったのは不公平だと思う。もっと歴史的に long range に見れば、中野、西島、それから坂田、さらにさかのほれば二中間子論にまでさかのほれるのではないか。Nobel 賞に大国主義的傾向が見られるのは残念だと思う。

所で最近の素粒子物理学は新しい局面を迎えてると思うのだが。

河原林 研

河原林 去年、田中正さんが Veneziano-model は Planck の公式であると言われたのですが、今考えてみると本当にそうかも知れないと思うようになっていました。

田中一 Spectrum を出す Image は实在概念なのか、それとも機能概念なのか？ 实在概念だとすると、超高エネルギーとも関係あるということになるか。

河原林 現在は機能概念として考えられると思います。だからもう少しこういうものからはなれる方がよいということも考えられます。

湯川 私は实在概念だと思いたい。核のときは energy level の spectrum それ自身は機能概念であって、実体は核子、核力の方にあったが、素粒子の場合は、機能概念と実体概念とをそうはっきりわけられないのではないか。

松田 加速器はエネルギーを上げるよりは、精度を上げるべきだとおつしやったが、これは将来計画にも関係するのか。

河原林 核のときと同じように微細構造が出るかも知れないという意味で言ったのです。

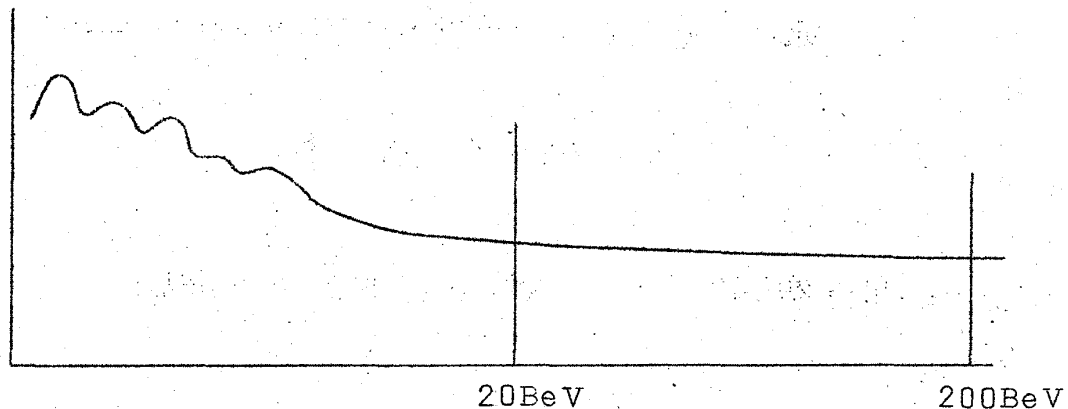
沢田 pair を exotic に結びつけるからで …… exotic は原子核に近いものかも知れない。同じ composite でも二種類に分けられるのかも知れない。

お聞きしたいのは pp と $p\bar{p}$ が近づくとおつしやったが、Serpukhov の実験では K^+p と K^-p とが一致していない。一致するまでに何かおこるかも知れない。どう思うか？

河原林 K^+p と K^-p のちがいはまだ実験の信頼度がわからないので、私はあまり serious にはとらない。一般的に particle と antiparticle とが一致するというのは理論の信頼度からいうとかなり確かであると思う。

沢田 $s \rightarrow \infty$ までいつても何も起らないか？

河原林



エネルギーがもっと高くなると pomeron 以外の所は 1% 或はそれ以下ぐらいになり, pomeron の中にもっと面白いことがふくまれているのではないか。

山田 e^{-E} はどんな意味があるか？

河原林 e^{-E} はこれ以外に Hagedorn が large angle scattering を説明するために出している。更に e^{-E} の C の値までよく合う。この値は trajectory の slope に関係していますが, これが重要だと思う。

岩崎 Energy を上げて何も変わらないというのは, 複合的なもののもとなっているものがあられもないということか。

河原林 Structure はあるかも知れんが, やはり cross-section は一定になると思う。原子, 原子核, Hadron と考えていくと後の二つの間にはあまり差がない。このことはここに quark が現われることはないということだと思う。この辺に Chew たちの Bootstrap model がいいという根拠があるのかも知れない。

山口 Coulomb 力の Rydberg 定数の形を原子核や Hadron にそのまま使うのはやはりむちゃであろう。量子論的な構成像からぬけ出そうとしているのに, はじめに構成要素に分解した例を出す必要はなかった。