

素 粒 子

東大教養 伊豆山 健 夫

素粒子論シンポジウムについて、一しろうとの印象記を綴ります。本格的内容は、いずれ、各講師の方々が書かれるはずですから。

先ず結論を申します。私にとっては、極めて印象的でありました。第一に、物理的内容において私が基研の末席を汚していた1959～60の時点から考えますと、夢の様な進歩を感じたからであります。第二に、これは社会学的印象になりますが、今回の講演テーマは、ゲージ理論一色に染め上げられていたことであります。私が基研に居た当時の日本の素粒子グループには、考え方の相違によるいざこざがあつて、研究会や、研究部員会議で、ずい分と派手な喧嘩をしておられたものでした。今回のテーマの総てが、「色」か「味」についてであり、素粒子論に三色もの「色」と、六種類もの「味」が導入されたにもかかわらず、社会学的には、素粒子論研究者が一色に統一され一味になったのでしょうか。講演後の討論も、紳士的で、物静かでした。しかし素粒子そのものの味は、ますます変化に豊み、魅力 (charm) を帯びておりますので、講師の方々の銜いのない、淡々としたお話によって、私などはすっかり charmonium になってしまいました。

本論に入ります。私が基研の助手であつた頃、くり込み可能な理論は、電磁相互作用を扱う QED だけで、弱い相互作用も、強い相互作用も始末の悪いもので、発散の厄病神から逃れて、理論を非局所にすれば、泥沼があり、素粒子論が、近い将来、きちんとした話に乗る様にはとても思われませんでした。そのため、ラグランジュアンを使わず、S行列だけで、分散式を巧に駆使することによって、少数の確立した原理だけから理論を組み立てる試みが盛んに行われて居りました。他方において、代数的研究(群論 — $SU(3)$)が行われ、素粒子の質量公式が論じられておりましたが、以上二つのアプローチが噛み合わなかったことが、いざこざの原因だったか、と推察されます。

当時既に南部先生が、超伝導理論からのアナロジーで、ゲージ対称性の自発的破れの理論を立てて居られました。何かの研究会の折、ある先生が「物性論では格子というものがあるが、素粒子の世界にはそのような土台がないので、対称性の自発的破れは期待できなからう」と、黒板に結晶格子の絵を描きながらお話しして居られたのを、覚えて

います。近い将来、素粒子論は、やることがなくなってしまうだろうと言うお話しも度々耳に致しました。

さて今回、私が改めて感激致しましたことは、今や、ゲージ理論によって、弱い相互作用も、強い相互作用も、「くり込み可能な理論」に書き上げられてしまったことでもあります。何と申しまして、やはり、ラグランジュアンの土台がある理論は魅力的であります。それは

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a + i \bar{q} \not{D} q - \frac{1}{4} \mathcal{F}_{\mu\nu} \mathcal{F}_{\mu\nu} + i \bar{\mu} \not{D} \mu \quad (1)$$

型であります。ただし

$$\begin{aligned} F_{\mu\nu}^a &\equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g \varepsilon_{abc} A_\mu^b A_\nu^c, \\ \mathcal{F}_{\mu\nu} &\equiv \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu, \end{aligned} \quad (2)$$

$$q \equiv \text{クォーク場}, \quad \mu \equiv \text{レプトン場},$$

$$\not{D} \equiv \gamma^\mu \left(\partial_\mu - i g s^a A_\mu^a + \frac{i g'}{2} B_\mu \right),$$

$$\not{D} \equiv \gamma^\alpha \left(\partial_\alpha + i g' B_\alpha \right),$$

で、出発点のラグランジュアンに質量項がなくても、ゲージ対称性の破れのため、massive Boson が出てきたり^{*)}、またくり込み条件から、スケール不変性によって、質量の相互比が決まるようです。この辺りは牟田氏がきれいに説明しておられたのですが、私は不消化で、クォーク質量や、レプトン質量が決まるのかどうか、不明です。普通は、これらの結果を予測して、(1)に更に massive Higgs Boson 項や、 q 、 μ の質量項を付加しています。またゲージ場 B_μ の方にも、もう一つ指標を付けて、弱い相互作用と電磁相互作用を統一的に記述しているようです。

強い相互作用の gauge 場 A_μ^a が、もう一つの指標 a をもつことによって(2)の最後の項

*) charged superconductor における Anderson mode のようなもの。一様な正電荷の中に、ばらまかれた電子の作る Wigner 結晶でも、電磁相互作用を考慮すると、Goldstone modesは、縦波・横波共に massive である。

基研 25 周年記念シンポジウムに参加して

が出てくるわけですが、これが、電磁場からは想像のつかない新しい物理を生み出すもとになります。クォーク場はこれらの新しい指標に対応して、 q_a^j となるわけです。 a の自由度は 3 つあり、SU(3) を構成しています。この 3 つを、赤、青、黄と言うのはユーモアでしょう。この自由度は、重粒子の構成に不可欠で、3 個のクォークが色スピンについて反対称 singlet 状態になって、重粒子ができていると考えられます。 A_μ^a の場は、クォーク同志を、近距離（重粒子内部）では、自由粒子の如く振るまわせる（asymptotic free）ことが示されており、遠距離では、クォークと反クォークを、その相互距離に比例するポテンシャルで、絶対に離れ難く結び付けてくれることが期待されています。 A_μ^a の場は、この意味で、にかわの役を演じているわけです。電磁場を量子化して得られる photon が、荷電 0 なのに反し、non-abelian なゲージ場 A_μ^a の量子化によって得られる gluon には電荷があるので、そのやりとりで遠距離に強いにかわ力を生み出すわけです。クォークが単独で見つからない理由です。この、クォーク閉じ込めの理論は、小林誠氏が話されました。重粒子を構成している 3 つのクォークが、重粒子内で自由粒子の様になっていることは、強い相互作用による散乱で見出されていた Bjorken スケーリングを説明することになります。

クォーク場 q_a^j のもう一つの指標 j は、flavor の自由度に対応するもので、up, down, strange, charm の 4 つの flavor を考えれば SU(4) の代数を構成します。最近のウプシロン粒子の発見で、少なくとももう一つはふやさなければならぬのですが、flavor 自由度 $\equiv f = 6$ と言われています（小林・益川理論）。従って SU(6) の問題になります。牟田氏のお話しでは asymptotic freedom を保証するためには $f \leq 16$ という結論が得られているそうです。クォーク・gluon の coupling が、asymptotic free をこわそうとするから、color singlet にいる 3 つの quark の、余分な自由度は余り大きくなつては困るということです。

flavor は弱い相互作用の問題で、レプトンは色自由度に全く関係がないので、強い相互作用に関係しないわけです。ゲージ場 B_μ が U(1) であっても、SU(2) $\times$ U(1) であっても、flavor index j を持たされるわけではありませんが、クォーク代数とラグランジュアン(1)の中の $g' \bar{\mu} \gamma^\alpha B_\alpha \mu$ の項と $g' \bar{q} \gamma^\mu B_\mu q$ の項を通じ弱い相互作用の flavor 依存性が出てきます。この辺りは藤川氏がくわしく話されました。電子・陽電子散乱の結果、ハドロンが発生する割合と、 μ^+ , μ^- の対が発生する割合との比、等々、弱い相互作用の

多数のプロセスの強度比が、flavor の代数から決められるわけです。量子味力学 (QFD) とでも呼ぶべき分野でしょうか。QFD はまた、弱い相互作用と電磁相互作用の間の壁を取り除いてくれました。この QFD は最も見事に確立された分野ですが、シンポジウムでは、これからという分野の方に重点が置かれたのでしょうか。QFD の話は藤川氏のが唯一つで、他は全部、量子色素力学 (QCD)、即ち強い相互作用のゲージ理論でした。

ゲージ理論も、だんだん自由度がふえ、色自由度 3, $f = 6$ と言うことですが、この先まだまだ増え続けるのではと、よそ事ながら心配です。いっそゲージ場・プラス・アルファの一元論にできないものかな、等と思われます。この場に、string 付きの monopole 解があつて、クォークができてよいだろうに、と言うわけです。クォークは磁石の極のようなもので、磁極は、結局は、電磁気学の発展と共に、「真磁極は存在しない」という理論に組み込まれてしまったのですから。

最も自然なクォーク閉じ込めの解釈は、小林誠氏が話されました。ゲージ対称性の破れによって、素粒子論の真空は、超伝導状態になっている。ただし duality 変換で、Meissner 効果は $\mathbf{E} = 0$ 。これにクォークが入ると、それから放射される電気力線は、超伝導状態には入り込めないから、正常状態のトンネルを掘って、この中に電気力線が割込んでくる。トンネルの断面積は電気力線密度との兼ね合いで決まるからよいとして、問題は長さで、長さに比例して、超伝導をこわした分のエネルギーが上がる。反クォークが、この電気力線の総てを吸収してくれるまで、string = トンネルは続く。クォーク・反クォークのポテンシャルが距離に比例するのは、当然の様に思えると言うわけです。

meson はこれでよいとして、重粒子を string からどうして作るか、と言う問題もあります。難かしい問題のようですが南部氏による理論もあり、シンポジウムでは井町氏がお話し下さいました。未だ定式化はできていないのですが、今後の発展が楽しみです。

私の目から見ると「始めにゲージ場ありき」ではなく、「始めに fermion 場だけがあった」と言う考えの方が一元論に近いし、superfluid velocity の場としてゲージ場が理解される様に思われるのですが、現在の素粒子論では、「くり込み可能な理論」でなければ第一の資格審査をパスできません。この点で現在のゲージ理論に対抗するだけのものは、なかなか作れないでしょう。

難かしそうな話になりますが、Flavor と color の二元論が統一され、弱・電磁相互

基研 25 周年記念シンポジウムに参加して

作用と強い相互作用の間の壁が除かれたら、素晴らしいことでしょう。更に重力場も。こうして、夢はふくらむ一方でしょう。

私は全くしろうとなので、「私にとって面白い」と言う以上のことは、何も分かりません。QCD の一連の講演が終わったとき、私の後ろに居られた素粒子の著名な先生が「難かしいばかりで、何も新しい結果が出ていないではないか」とつぶやいて居られました。

過去 25 年の基研の歴史と共に、また素粒子論の発展と共に経験を積んでこられた専門家の目から見て素粒子のゲージ理論がどの様に評価されるのかは分かりませんが、目下は素粒子論と物性論の距離が近付いているので、私共には素粒子のゲージ理論が面白くまた親しみやすく感じられるのでしょう。

宇 宙 ・ 原 子 核

京大・基研 長 岡 洋 介

2 日目の午前は宇宙物理と原子核のセッションであった。

佐藤勝彦氏の宇宙物理の話では、前日の素粒子論の話に引き続いて、最近の素粒子論の発展が宇宙物理に何をもたらし、また宇宙物理は素粒子論に何をもたらし得るかという話題が取り上げられた。

Weinberg と Salam のゲージ理論の成功によって、電磁相互作用と弱い相互作用とが統一的立場から見られるようになった。これからさらに進めば、強い相互作用も含む大統一理論が、さらには重力も含む超重力理論が可能になるだろう。このような統一は、実は理論の枠組の問題にすぎないのではなくて、宇宙の初期の超高温状態では実現していたというのである。それが、宇宙が膨張して冷えていくに従って、つぎつぎと真空の相転移、対称性の自発的な破れが生じ、まず重力が、それから強い相互作用が分離し、最後に弱い相互作用と電磁相互作用の分離が生じたのである。まことに気宇雄大な話である。このような宇宙の歴史物語が、逆に素粒子論にもたらすものと言え、何よりも