



素粒子物理の青春時代を回顧する

南部陽一郎

〈University of Chicago Chicago, IL 60637, USA e-mail: nambu@theory.uchicago.edu〉

20年以上前のことだが、私の生涯と仕事について物理学会誌に書いたことがある。¹⁾ 今回またこの機会を与えてくださった編集者の方々に前もって感謝の意を表します。

さて私の昔の記事を読んでみたら、1960年半ばごろまでの私の周りに起きたことごとを述べてあるので、当然今回はその続編ということになる。しかし新しい読者を考慮し、また社会的背景をも含めたいと思って初めからやり直すことにした。

1.

私は1943年に東大の物理学科を卒業したいわゆる戦中派の一人である。2年生のときに太平洋戦争が始まり、3年目は短縮されて陸軍に召集され最後は宝塚の近くのレーダー研究所に配属されて、物理の実際的問題に取り組む経験を得ることができた。戦争が終わったあと、すぐ東大物理教室の嘱託に赴任して学生や帰還者たちのグループに参加できたのは幸運だったといえよう。学生の木庭二郎、宮本米二、木下東一郎さんなどは近所の東京文理大と理研に席をおく朝永振一郎先生のもとで超多時間理論の展開に協力していたが、皆日常の困難な生活に追われてなかなか進展ははかどらなかつたようだ。私は研究室のなかに住み込んでいたがこれも幸運といおうか、日中は私のデスクの前に木庭二郎さんがいたので、彼の仕事ぶりを眺めて少しずつ朝永理論なるものを理解できるようになった。

1947年に Lamb shift とパイオンの発見という大事件のニュースが日本にも届き、朝永グループはアメリカの学者たちと量子電磁力学 (QED) の完成に向かって激しい競争にまきこまれる。私も自然に朝永グループに参加することになった。QEDの本質は相対論的不変性と繰り込み (renormalization) の概念にある。朝永さんは後者をホーキの原理とも呼ばれたが、私は放棄だか箒だかよく分からず、いずれにしてもあまり気に入らなかつた。(図1)

私はだんだんと自分で研究を進めることができるようになり、その結果1950年私は朝永さんの推薦によって、東大と阪大から集まった早川幸男、山

口嘉夫、西島和彦、中野董夫の4人とともに新設の大阪市立大学理工学部理論グループを作ることになったわけである。

先へ進む前に、戦争直後の時代にいわゆる坂田・武谷哲学から受けた影響を述べねばならない。武谷三男さんは東大の中村誠太郎さんをしばしば訪れ、皆の前でお得意の弁証論的方法論を説きまわす。われわれ若者は彼の雄弁にいわば洗脳されてしまった。例の物理学発展の三段階理論をここで説明する必要はないと思うが、彼はまたわれわれの理論偏重の傾向をしりぞけ、実験に注目することを強調した。これは湯川・朝永の成功がもたらした圧倒的刺

激のせいばかりでなく、悲惨な経済状態のもとでは実験など不可能であった事情にかんがみて適切な警告であった。これらの教訓がその後私の物理に対する態度に大きな影響を与えることになったと信じている。

私は今でも大阪市大の3年間を振り返ると感傷に耐えない。アメリカでは戦争中に蓄積された技術的知能的エネルギーが平和的事業に向けて爆発的に放出されたが、日本では将来はまだどうなるか見通しもつかず、惨めなバラック建ての研究室でいつもひもじい思いをしていた時代である。それにもかかわらずこれほど自由を楽しんだことはなかつた。年長の教授に気をくばる



図1 Joan Cartier 様のご好意により掲載。

必要はなく、理論の学生はまだ一人か二人なので講義の必要もない。われわれは完全に自分たちだけで研究を始めた。海外から加速器や宇宙線による新しい現象が次から次へと報告されてくる。アメリカやヨーロッパとの通信がだんだん容易になると同時に、国内の通信も盛んになってくる。民主化の空気に沿って、海外にいち早く出ることができた人たちからの情報をガリ版雑誌「素粒子論研究」などを通じて交換しあった。

大阪市大での共同研究の成果のひとつは新しく登場したストレンジ粒子の対発生理論である。われわれのような新参者でも世界の学者たちに先んずる仕事ができることを発見したのは大きな驚きだった。市大だけではなく、東大、京大などの若いジェネレーションも海外からどんどん到着する新しい現象についてオリジナルな貢献をし始めた。しかし市大のグループはその成功のおかげで長続きせず、数年のうちにバラバラになってしまう。私自身は1952年に再び朝永さんの推薦によって木下東一郎さんとプリンストンの高等研究所 (IAS) に行くことになったのである。

2.

予期に反して、プリンストンでの2年は天国と地獄の混じったようなものとなってしまった。物理関係では、所長の J. R. Oppenheimer, A. Einstein のほか、W. Pauli, A. Pais, F. Dyson, C. N. Yang, T. D. Lee, G. C. Wick, G. Källén, L. van Hove, W. Thirring その他長期短期のメンバーたちがそろっていた。われわれ短期メンバーは研究所のキャンパスの中に住んだのですぐ親しくなった。日本での生活を比べれば夢のような環境だが、その反面お互いの猛烈な競争を感じないわけにはいかない。その上、私の計画していた研究テーマ、核力の飽和性と spin-orbit force の起源を追求することが一向にうまくいかない。啄木の「友がみな、われよりえらくみゆる日よ…」と同じ

心境になった。

それはともかく初めの年が終わり、もう1年の滞在が許可されたが、春先から秋までは休めで給料はもらえない。しかし Oppenheimer の好意で木下さんと私はその間 Cal Tech に滞在することになり、湯川さんが戦後最初に来られたとき制限のため使えずに残していた資金を提供していただいた。いままで日本にいた私の家族もそこで落ち合うことになった。木下さんと私は2台の車で南部を通過して大陸横断をした。途中黒人差別待遇の実情を目撃した。学校教育を別にすることを違憲とした有名な最高裁判所判決の1年前である。まだ戦後あまり経っていないころで、われわれ自身も何か不快な事件があるかもしれないと懸念したが途中はなにごともなく、パサデナに着いてからアパート探しのときにこれを初めて経験した。(後にシカゴに移ってからでもまだ差別の風習はまだ少し残っていた。) Cal Tech にはそのころ 500 GeV の電子シンクロトロンが動いていたので、私は実験の勉強をしようと思い、 $\gamma\pi$ production の phase shift analysis をやった。

2年目に例の Oppenheimer の「裁判事件」が起きるが、まだアメリカの政治問題に疎かったせいもあり、関心がなかった。プリンストンでの2年が終わったあと、私はもうしばらくアメリカの一流大学に滞在して何か立派な業績をあげたいと考えた。ある大学から就職の誘いを受けたがあまりに遠隔な場所で私の目的に添わない。research associate の口をあたってみたがそのころはまだそんなものは非常に少なく、諦めかけたところに思いがけなくシカゴの M. L. Goldberger から招待が来た。彼とはプリンストンでの知り合い、シカゴ大学もすでに訪れていた。しかしそのときのシカゴ市の印象はとてひどいものだった。アメリカも全力をあげての戦争中には国内の整備など構う余裕はなかったのであろう。大学の所在する Hyde Park 地域の通勤電車の駅は日本のと変わらない哀れなもの

だった。こんなところには二度とくるまい、正直のところこれが私の感想だったのに、皮肉にもそのシカゴに赴任することになったのだ。われわれの車がシカゴに近づくともまず Gary という有名な鉄工業地帯を通らねばならない。その真っ黒の煙の中に突入するのは地獄に入るような気がした。

ところが Institute for Nuclear Studies (INS) と呼ばれていた研究所に落ち着いてみると、その雰囲気はまるで天国のようだった。現在では名前が変わっているが、この研究所とその姉妹研究所 Institute for the Study of Metals (ISM) はマンハッタン計画に携わっていた人たちのため戦後にすぐ作られたもので、大きな建物の半分ずつを分け合っている。私はそれらの所員の全部とすぐ知り合いになり同じ家族の一員のように扱われた。

Fermi は毎週理論屋と議論会を開いていたが、これに2回ほど出席したあと彼は姿を消してしまい、まもなく亡くなった。残る INS のメンバーとしては Goldberger のほかに G. Wentzel, S. Allison, J. and M. Mayer, J. and L. Marshall, H. Anderson, J. Simpson, H. Urey, S. Chandrasekhar など、また物理教室は別で W. Zachariasen, M. Schein, R. Mulliken, などの人たちがいた。日本からのグループもできていて、藤井忠男さんは学位を取ったばかり、宮沢弘成さんは research associate、久保亮五さんは ISM の客員、私のクラスメート菊地良一さんもその所員、そのほか Schein のグループに加わった小柴昌俊さん、Chandrasekhar と関係して magnetohydrodynamics の実験をしていた中川好成さんなど賑やかなものどもがそろっていた。大学の人たちは皆歩いて通える距離に住んでいる。われわれはしょっちゅうお偉方の家に招待された。毎年大晦日に開かれる Mayer 夫妻のパーティは立錫の余地もない混雑ぶりでは有名だった。残念ながらもこんな風習はない。夫婦ともそれぞれ職業を持つのが普通になったからだろう。

万能物理学者 Fermi の伝統によって、毎週 INS 全体のセミナールが開かれた。Quaker Meeting と呼ばれた理由は、プログラムを決めず、誰でも思いつくままに立ち上がって、自分が考えてまだ完成していないことでも自由に発表したり議論したりすることを奨励されていたからである。原子核、素粒子、宇宙線、太陽系物理、天体物理、宇宙化学など研究所のすべての分野がトピックスとなった。これは私にはたいへんな刺激であった。

INS には Fermi と H. Anderson が作った 450 MeV のシンクロサイクロロンが動いていた。ハドロン共鳴状態の第 1 号 Δ が発見され、K. Brueckner と宮沢が Fermi に先んじてこの解釈を与え、また中性子と電子の相互作用が測定されたので有名だ。私はよく建物の底にあるコントロール室に梯子で降りて多くの人たちとおしゃべりをし、Anderson とは特に親しくなった。

理論のほうではシカゴは当時分散理論のメッカであった。分散理論は M. Gell-Mann と Goldberger の論文から出発し、うまい具合に時勢に乗って π -N 散乱データの分析に威力を発揮した。Goldberger の下には宮沢さんと R. Oehme がいたが、私もまた分散理論の数学的構造に魅せられて過去 2 年間の悪夢を忘れることができた。Goldberger とその友人 F. Low, J. Chew たちと協力したほか、自分自身でもグリーン関数の表示法などについて面白い発見をする。単に数学的な問題ではあったが、L. Landau が引用してくれたので気をよくした。1959 年キエフでロチェスター会議が開かれたとき彼は私を迎えてくれ、モスクワでも彼の研究所を訪ねることができた。

しかし私は湯川・坂田哲学を忘れていたわけではない。核子の form factor を説明するために中性ベクトルメソン (ω) の存在を仮定したときはこれをはっきりと意識していた。でも反響はきわめて冷たかったと思う。新しい粒子への抵抗はそのころでもまだ強かった。 π は強い力を担う唯一の素粒子、 Δ は

単に核子と π との共鳴に過ぎないと考えられていた。私は ω を新しい素粒子とみなしたので、強い相互作用に関して安定であるように質量を低く仮定したが、共鳴状態と素粒子との違いがはっきりしていたわけではない。

50-60 年代は武谷流に言えば、現象論の段階からモデル構成の段階に移っていった時代である。自然の力には重力以外に電、弱、強の 3 種類が、素粒子にはレプトン (e と μ) とハドロン の 2 種類²⁾ があることは誰も認めるところであった。弱い力は Fermi 理論に V-A と Cabibbo 混合の修正を加えれば少なくともバリオンに関しては問題がない。しかし強い力のほうはまったく分からない。電磁力についてはもちろん QED が大成功を収め、繰り込み可能の条件が量子場の理論の新しいパラダイムとして確立したものの、それだけでは強い力を理解することができないことは明らかであった。

3.

さてここで方法論の問題にちょっと触れておきたい。この点では二つのグループが存在して競い合っていた。これを仮に reductionists と generalists と呼んでおこう。reductionists はまず現象の中に対称性を見出し、それを何か基本粒子と基本相互作用の性質に還元しようとする。Gell-Mann がその代表である。(flavor) SU(2), SU(3), SU(6) などの対称性が確立する。しかしこれらは皆近似的対称性にすぎない。20 世紀の前半には時空の対称性、電磁力のゲージ不変性など厳密な対称性が確立した。これに反して素粒子物理には近似的な内部対称性が登場する。これは複雑な素粒子の世界の性格であるのかもしれないが、また類似性に敏感でアナロジーを好む人間の思考方法にかんがみても自然なことではないだろう。次のコメントが私の記憶に残っている:³⁾

“Classical physical theories are profound. Take the second law of thermodynamics, for instance:

Heat cannot flow spontaneously from a colder body to a hotter body. Compare this to what you have been doing. You propose some symmetry, and ten seconds later you are already trying to figure out how to break it.” …A. Salam

ゲージの原理は非アーベル的 Yang-Mills の理論によって一般化され、すべての力を記述するための理想的な理論だと考えられたが、対称性が不完全でレンジの短い実際の世界にどう適用できるのかは明らかでなかった。これに関する暫定的ながら大胆な試みは J. J. Sakurai (桜井純) の vector meson dominance model である。彼は Cornell 大学で学位をとってすぐシカゴに助教授として赴任し、精力的にこのモデルを推進してかなりの成功を収めた。しかし彼のプログラムを完成するのにまだ欠けていたものは、真の強い力は仮説的クォークの間に働くこと、また対称性は自発的に破れうるという認識であった。

一方 generalists のほうは、まだ自然法則が正確に分かっていないから、まず量子場の理論の一般的な性質を求め、それを個々の問題の分析に利用しようとする。その道具として axiomatic, constructive, dispersion, S-matrix, Regge pole などなどの名前をかぶせたいろいろの理論が生まれた。S-matrix と dispersion 理論は核物理が同じ問題に面していた 1930-40 年代に Heisenberg が導入した概念である。generalist グループの中の過激派は Chew で、S-matrix 理論に基づいて bootstrap, または particle democracy という理論を発展させた。基本的ラグランジアンはなく、ハドロンはすべてお互いの束縛状態とみなされるというのである。彼はそのカリズマ的性格によって多くの追従者をひきつけた。

現在からみると reductionists の歩んだ道が物理の王道であったことは明らかであろう。Heisenberg の S-matrix ができなかったことを湯川のメソンがやりとげた。湯川の伝統は発展を続けて

現在の標準理論にまで至っている。しかしながら generalists の道も決して無駄なものではなかった。CPT 定理をはじめ多くの概念が現象論的分析に役立っているばかりではない。現在の superstring 理論は彼らの子孫である。競争がまだ続いているというよりも、むしろ両方が統一される方向に向かっている。

さて1960年代に移ることとして、まず私の記憶に残っているそのころの社会的政治的雰囲気の説明しておきたいと思う。60年代はまさに騒乱にあふれた多事多端な時代であった。Kennedy 兄弟が暗殺される、ベトナム戦争と反ベトナム運動が平行して徐々にエスカレートする、黒人の差別待遇廃止の人権運動も同じ道をたどり Martin Luther King の暗殺、それに伴う暴動にいたる。その一方では人を乗せたロケットが月に着陸する。そしてこれらすべての上に冷戦と原爆の黒い雲がだんだんと厚くなってゆくばかりである…

物理学者は戦争に特殊の貢献をしたことによって純潔を失った。戦後にはその結果多大な報酬を受け取る反面、不愉快な束縛にも甘んじなければならなくなった。政府が出す研究費は戦前では想像もできなかったようなレベルに達し、加速器のエネルギーも Livingston 曲線に従ってどんどん上がっていったが、金をもらったからには冷戦政策にも従わざるをえなかった。

このような時勢のもとでいわゆるロチェスター会議の生みの親 R. Marshak が果たした役割は特別に評価されるべきである。私は最初木下さんとプリンストンに向かう途中でロチェスター大学に立ち寄った。すでにそのころ彼は chairman として日本の優秀な学生をとる制度を始め、その中から世界的人物を何人か出したのはご存知のとおりである。ロチェスター会議も同時に始まる。彼は外国の学者、特にソ連圏内の人たちが会議に出席できるように骨折った。私がプリンストンから出席したころはまだ20人程度の大きさだったと思うが、数年後にはアメリカ、ヨー

ロッパ、ソ連の持ちまわりになり、人数も1,000人以上に膨れ上がる。ロチェスター会議は素粒子物理のシンボルとなり、多くの歴史的発見がここで発表される。私はエゴの強い者同士の激論が何度か目の前で起こったのを覚えている。

4.

私が対称性の自発的破れ (SSB) の概念を見つけたのは偶然のできごとであるが、私が東大時代に培われた物性論への興味と、BCS 理論の生誕地がたまたま近くにあったおかげでもあったと思う。大阪市大時代、私は Bohm-Pines のプラズマ理論に魅せられ、多体問題を量子場の理論として一般化しようと試みた。プリンストンで木下さんと書いた論文はその帰結である。Wentzel も同じ興味をもっていた。また Bohm-Pines 理論とのかかわりで、Illinois 大学の J. Bardeen, D. Pines, F. Seitz などとも知り合っていたが、1957年のある日 Bardeen の学生 Schrieffer がセミナーにやってきてBCS理論の紹介をした。Cooper のいわゆる Cooper pair の論文はすでに出ていたが BCS の論文はまだであった。

このセミナーの印象は感動と疑問の混じったものだった。彼らが仮定した波動関数が condensate を作り energy gap を生むのには感心した一方、それが電荷の固有状態でなく、ゲージ不変性を破っていることにすぐ気がついた。これでマイスナー効果のような電磁的性質を議論しても信用できるだろうか？ γ が関与する過程の振幅を計算するときまずチェックすべきことはゲージ不変性ではないか？ この疑問は BCS 理論があまりにうまく成功したためにますます深くなっていった。

BCS 理論が数学的に正しいと確信するようになるまでには2年ほどかかったが、結局ある collective mode が Ward-高橋の恒等式を満たして電流の保存を回復しゲージ不変性を救うことに気がついた。電磁場が SSB の結果プラズモンになって質量を持つという

ことも分かった。これは二つのゼロ質量のモード (クーロン場と南部-Goldstone (NG) ボソン) とが混じるために起きる現象である。もちろん Bardeen をはじめ実質的に同じ説明を与えた物性論の人たちもいたが、私は量子場の理論を使ってこれを数学的に明確な形で示すことができたことを非常に満足に思った。

もうひとつ BCS 理論で初めから私の注目をひいたのは超伝導体の中の電子に関する Bogoliubov-Valatin quasi-fermion の式と Dirac 方程式との類似である。一方は電荷の違った状態、他方はカイラリティの違った状態の混合になっていて、混合のためにエネルギーのギャップが生ずる。ゲージ不変性の問題が解決すると私は直ちに核子とパイオンのベータ崩壊定数を関係づける Goldberger-Treiman (GT) の式がカイラル不変性の Ward-高橋の恒等式に他ならないことに気がついた。ただパイオンの質量を無視するという大胆な物理的仮定をしなければならぬ。これで GT の関係の出所が分かったと同時に、少なくとも核子に関しては質量の起源の問題にも答えてくれる。まことにうまい話だ。

1959年キエフでのロチェスター会議で B. Toushek がニュートリノのカイラル変換性について講演したとき私はコメントとしてこのアイデアを初めて発表したが、ソ連の惨めな状態のため会議の議事録がでるのに2年もかかっている。ついでローマからきた research associate の G. Jona-Lasinio とこの仕事を続け Purdue 大学の学会で予備発表、本論文 (NJL) を1960年のジュネーブでのロチェスター会議で紹介した。このとき V. G. Vaks と A. I. Larkin が同様なモデルについて短い論文を提出しているが、パイオン物理との関連は述べていない。

理論の方法論に関して二つの派があると上に述べたが、私のこの仕事はどちらにも属していない。対称性を確立する代わりにそれを破る、また真空がひとつであるという公理も破っている。

私は数学的厳密さにこだわる後者の専門家の反対をもっとも恐れた。しかし坂田学派の影響で私は数式の背後にいつも実体を考えたい。真空を負エネルギーの海だとする Dirac の解釈が大いに気にいっていた。そんなわけでこの仕事は素粒子論屋よりも物性論屋のほうに人気があったと思う。例の NG ボソンに関しては物性論の中で実例を集めてから論文にするつもりであった。朝永さんが「あまり多くのことを一つの論文に書くな、別々の論文にしろ。」と言われたことが頭の中にあっただけで、Heisenberg の統一場理論はその悪いほうの例だと思っていた。Heisenberg は対称性が物理の指導原理であることを示すモデルとして非線形理論を選んだのだのかもしれないが、それが実際に the theory of everything だと主張する。しかし何でもそれから出すために indefinite metric, isospin をもった真空などなど、あらゆるからくりを持ち込まなければならぬ。たとえそのうちの一つの概念が正しいか有用であっても他が誤っていれば理論自身はつぶれてしまう。すべてを一つの袋に入れておくと全部なくしてしまう恐れがある。私は同じ過ちを繰り返したくなかった。私は SSB の可能性を誰でも理解できるように、できるだけ明確な仮定のもとに明確なかたちで示そうと思った。最初は QED のような繰り込み可能なモデルをとって見たが、高次の項の振舞いははっきり分からなかったので気を変えて Fermi-Heisenberg 形の相互作用に単純な cut-off を入れることにしたわけである。付け足しておくが Heisenberg は私の仕事を評価してくれた。1960 年のロチェスター会議のあと私はミュンヘンに彼を訪れ、協力者の山崎和夫さんなどと会話を交わすことができたのは楽しい思い出である。

それから数年間、私はこの理論をハドロンの個々の問題に適用することにつとめ、研究員の原康夫さんなどといわゆる soft pion の物理を始めた。S-matrix の loop 展開の論文もこれに関

連している。その間に SU(3) 対称性が発見され、クォークモデルが現れた。NJL の論文では核子を基本場と扱ったものだったが、核子をクォークに変えても、また現在の QCD にも有効理論として適用できる。60 年代には私はもっぱら強い相互作用にかかわっていた。これがまず解決すべき問題で、SSB を弱い相互作用に応用することは考えなかった。ゲージ場の量子論を強い力に如何に適用するかはまだ分からなかった。

序にここで SSB の問題の後日談をしておこう。BCS 型理論は Landau-Ginzburg-Higgs (LGH) 型の有効理論に書き直せるから、NG ボソンの他にいわゆる Higgs ボソンが存在して、その質量はフェルミオンの質量の 2 倍になるのが特徴である。ハドロンの場合には σ メソンがそれに相当する。しかし超伝導体の中にも同じ集団モードが存在することを 20 年も後に C. M. Varma から教えられるまで気がつかなかった。そこで早速 BCS と LGH との関係を調べ、ヘリウム超流動体の集団モードにも当てはまることが分かった。1対2という(近似的)関係はフェルミオンとボソンを結ぶ 1 種の超対称性で、超対称性理論の場合と同じく、ハミルトニアンを $U(6) \rightarrow O(6)$ と名づけた。

さらに BCS 型の現象をあらゆる分野で系統的に調べてみようという気になった。原子核物理においても BCS 理論がでた当時からすでに pairing energy の解釈に適用されている。関連現象として有馬-Iachello の Interacting Boson Model (IBM) に目をつけた。IBM は超伝導、超流動よりも複雑だが、対称性が破れる系列の一つ(たとえば $U(6) \rightarrow O(6)$) は SSB だと解釈できることが分かった。しかしこれは原理の問題を指摘するにとどまり、精密な現象論的予言をすることができなかった。原子核の専門家には受けなかった。

次に取り上げたのはもっと重要な問題、すなわち標準模型の Higgs 場の解

積である。標準模型では Higgs 場は W, Z ボソンに質量を与えることと、基本粒子に質量を与えるという二重の役割を果たしているが、後者と Higgs ボソン自身の質量に関して予言能力はなく、単なるパラメーターとして扱われているに過ぎない。私は Higgs 場の背後に何か BCS 理論のような dynamics があると考えた。ここでいわれる top condensation のアイデアが生まれる。Higgs ボソンは基本粒子の間に交換されて引力を生ずるから、超伝導体におけるフォノンの役割をする。SSB が起こって基本粒子に質量を与え、同時に Higgs ボソンという束縛状態を生ずる。すなわち Higgs ボソンの存在は top クォークを媒介とする bootstrap: Higgs \rightarrow SSB \rightarrow Higgs の結果で、前の式を使えばその質量は top の 2 倍になる。これが私の発想であったが、W. Bardeen らはこれを NJL の形に直してもっと精密な計算をした。質量の値は少し低くなるが残念ながら実験データから期待される値にはならない。そればかりではなく他の基本粒子の質量の問題は依然として残っている。

5.

再び 1960 年代に戻る。BCS 理論の場合はゲージ不変性が私にとって問題だったが、クォークモデルの場合には統計が問題である。ハドロンの現象論を説明するためにはクォークをボース場ように扱われている。これについて Gell-Mann はクォークが単なる数学的記号かもしれないと問題をあいまいに扱っているのが私には満足できなかった。クォークは実在せねばならない。対応策として O. W. Greenberg はオーダー 3 のパラフェルミ統計で説明しようとしたが、Gell-Mann のクォークとおなじくあまりに形式的すぎる。私はクォークの内部自由度を増やすことを考えた。はじめは最小の 2 種類にして見るがあまりすっきりしないので、思い切って 3 種とするときれいな対称性が現れ、ハドロンはすべて SU(3) singlet と解釈される。田地隆夫、宮

本米二, A. Tavkhelidze などの人たちも同じような考えを発表したが詳細は異なっている。

私のプレプリントが出るとすぐ私の議論を群論的に改良したプレプリントが Syracuse 大学学生 M.-Y. Han から届いた。そんなわけで二人共同の論文を書くことになったのである。この中で私はクォークの間に *superstrong force* を導入し, $SU(3)$ (いわゆる3色) のゲージ場を仮定したが, この仮定がいかんして実現されるかは皆目見当がつかなかった。非アーベル場の量子論がまだ確立されていなかった時代である。またクォークが実在するとしても分数荷電の粒子は観測されていない。 $SU(3)$ の自由度を利用すればクォークに整数荷電をもたせることができるのに気がついた。しかしそれでもメソンや核子は $SU(3)$ nonsinglet のクォークに分解されうはずだ。この困難を解決するため私は *singlet* (無色または中性) の状態がもっともエネルギーが安定であることを電磁場のアナロジーから説明できることを示した。しかし色の自由度は理論的要請から導入されたもので, 現象論的にはハドロンがすべて無色である限り必要ではない。ハドロンの数はどんどん増えていったが, 単純な *flavor* $SU(3)$ の分類に矛盾する結果は何もないので現象論の人たちは当然無視された。

それはさておき私はもっと群の表現論を勉強することにした。一般的興味からでもあるが, *hadron spectroscopy* に何らかの秩序を見出すためにも必要を感じたからである。Regge 軌道が直線的に上昇していることは, 水素原子の $SU(4)$ 対称性のように何かの *dynamical symmetry* を思わせる。複数のスピンや質量を含んだ波動方程式については以前から多くの人たちの研究があり, Dirac などはローレンツ群の無限次元ユニタリー表現を使っている。私はまず練習として典型的なユニタリー表現がおなじみの生成, 消滅演算子を使って作れることを発見し, 簡単な無限成分波動方程式を書き下ろしてみ

ると, 水素原子のスペクトルを逆にしたおかしなものが現れた。あとで知ったことだが, これは1932年に E. Majorana が発見した方程式の拡張になっている。そこで非相対論的水素原子の問題を検討してみるとシュレーディンガー方程式が同じように群の生成子で表せる。たまたま A. O. Barut, C. Fronsdal, 高林武彦さんらも独立に同じようなプログラムを進めていたので, それから2年ほどわれわれは密接な連絡をとることになった。

しかしながら無限成分方程式のプログラムはやがて挫折する。理由はローレンツ群のユニタリー表現を使った波動方程式がいろいろな「病」を一般に持っていることが分かったからである。すなわち CPT, スピン統計, *causality* の破れ, タキオンの存在, 不自然な質量スペクトルや *g-factor* などで, うまく方程式を選べば避けられる場合もあるが, はっきりした原理がない。結局自然は局所場理論を採用している。その一部だけ取り出して記述する試みはどうも困難に陥るように見える。これは私が大阪市大時代に最初に書き下ろし二体問題の「Bethe-Salpeter」方程式(微分型)の場合にも遭遇したことで, 非物理的な解の存在のために追求しなかった。今回もやめにして忘れてしまおうと決心した。

皮肉にも翌1968年に Veneziano の公式が登場する。これはやはり場の理論にはよらず, Chew の *bootstrap*, Regge 軌道の概念から到達した *duality* 原理の具体的な表現であった。私はハドロンのスペクトルを諦めたばかりだったが, この公式にはすぐ魅惑され, 背後にどんな物理が隠れているかを知らうとした。まずやるべきことはこれを Breit-Wigner 共鳴の和に分解して, 各項のスピンを決め, 留数が正であるかどうかを確かめることだ。私は P. Frampton とこれに着手し, 少なくとも漸近的には留数が正であることが分かった。次にこの分解の一般的なアルゴリズムを見出したい。二体散乱を表す Veneziano の式はベータ関数である。

この積分表示(木庭-Nielsen の表示)

$$B(-s+a, -t+b) = \int_0^1 x^{-s+a-1} \times (1-x)^{-t+b-1} dx$$

をいじくっているうち, ある日第2項を $t=(p-p')^2$ のべきに展開してみた:

$$(1-x)^{-t+b-1} = \exp((-2p' \cdot p + 2m^2 - b + 1) \sum x^n / n)$$

$2m^2 - b + 1 = 0$ ならば各項は p と p' の積である。 $1/n$ の因子はグリーン関数のフーリエ分解に出てくるエネルギー因子 $1/E_n$ を直ちに思い起こさせる。これは $E_n \sim n$, すなわち1次元の調和振動子ではないか。ハドロンは紐のようなものであるというアイデアはこうして生まれた。ただし一般の定数項を処理するためには Kaluza-Klein 理論のように余分の次元を仮定する必要がある。これは不自然技巧的だと思ひ, それから1年ほどはこれ以上進歩できなかった。

1970年の夏キエフでまたロチェスター会議が開かれ, その前にコーペンハーゲンの夏の学校で講演する招待を受けた。私はまずカリフォルニアに行つて家族を友人のところに預け, そこからヨーロッパに立つことにした。しかしユタ州の Great Salt Lake Desert を通過するときエンジンが壊れてしまい, Wendover という砂漠の中の部落に3日間泊まる羽目になってしまった。(後年 J. Cronin が宇宙のガンマ線をとらえるために作った CASA 施設はこの付近である。) おかげでヨーロッパ行き計画はだめになり, 私はがっかりしてカリフォルニアで家族と夏を過ごす。私の講義録は先に送っておいた。論文ではないから, 点粒子の *action* に倣って気軽に紐の *world sheet action* (Nambu-Goto action) をその中に書いておいた。私が出席しなくても講義録がでるだろうと安心してしたが, 結局出版されることはなかった。しかし見たこともない講義録を引用してくれる人たちの好意はありがたいことだと思う。

6.

1960年代は強い力の性質が確立した

時代である。武谷の第二段階、モデル構成の段階に達し、標準理論すなわち第三の段階の兆しも見えてきた。クォーク力学の性質が *deep inelastic scattering*, Feynman の *parton model* などから窺えるようになった。しかし $SU(3)$ とクォーク以後決定的な進歩はない。60年代の終わりごろ人は一般に悲観的だったが、私をこのムードに追いやったのは3色クォーク理論があまり買われなかったこと、無限成分方程式の失敗だけではなく、まわりの社会的政治的混乱も大いに原因している。最後の点は私にも波及し、身の不安を感じるようになる。ベトナム戦争がだんだん悪化するにつれ科学者一般の研究条件も厳しくなる。予算削減で突然大規模な失業が生じ、タクシー運転をやっている *Ph. D.* もいるという噂が流れる。A. Wightman と私は物理学会長だった Marshak から理論屋の失業調査を頼まれた。われわれは新しい *Ph. D.* の人たちに手紙を出したが、その結果は憂鬱なもので、私も憂鬱になった。私がちょうど砂漠で事故を起こした年である。その後紐理論は多少進歩した。紐がクォークを閉じ込めることができることは初めから分かっていたが、実は私にはジレンマがあった。二つのクォークが紐で永久に結ばれているといううまい描像の一方、観測可能な整数荷電のクォークも持ち合わせている。どちらに鼻打ちしようかと迷った。しかし結局ハドロンの紐理論も本質的な理論としては壁に突き当たってしまう。1973年に紐の理論屋一同が Aspen の研究会に集まったときこういう結論に達したと吉川圭二さんは最近追想しておられ

た。紐理論は無限成分方程式の場合と同じく、やはり局所場理論でなかったからである。ちょうどそのころ漸近自由性が発見され、QCD という正統的局所場が紐にとって代わってクォーク閉じ込めの可能性が実現した。紐は強い力の基本的な理論ではなく、閉じ込めという部面の近似的表現に過ぎないことになった。

1930年代に始まった素粒子物理は40年後の1970年代に成熟期に達した。QCD がついに完成し、ワインバーグ・サラム電弱理論とともにいわゆる標準模型ができあがる。 J/ψ や D メソンが発見され、Cabibbo や坂田たちの仕事から予期されていたクォークとレプトンの2世代のメンバーがそろったと思ったら、すぐ第3の世代が出現して小林・益川の予言を実証する。標準模型(理論)によってこれまでに知られた素粒子現象を記述する基本法則が大体確立した。これからはまず標準理論を精密測定でチェックして、何か食違うところがあれば次のサイクルが始まる、というのが誰でも期待するところで、実際標準理論のテストは現在に至るまで着々と進んでいる。

しかしもっと注目すべきことは素粒子物理の性格がガラリと変化したことではなかろうか。1970年代は一種の相転移の時期と言うべきであろう。物理の歴史を通じて実験は理論と手を携えて歩んできた。ところが標準理論の延長である大統一理論のほか、超対称理論や超弦理論が出現し、それ自身の論理を追って独走を始める。その性格は非常に数学的、形式的になる。学生時代にやさしい現象論で育った人たちは変

化についていけず落伍してしまう。(相対論、量子論の場合も同じようなことが起きたにちがいない。) 一方天文学、宇宙物理が理論実験両面で大成長の時代に入る。素粒子物理はこれらと合流し、お互いに助け合うことになり、極微の世界から極大の世界までが統一されようとしている。

もうひとつ大きな変化は、素粒子物理がほんとうに *big science* になったことである。研究は実験でも理論でも集団事業となった。よい例は超弦理論だ。毎日インターネットに発表されるおびただしい論文を見ればわかる。またこれらすべての事情がもたらした結果として、進歩に以前よりももっと時間と努力がかかることになった。この辺で筆をおくことにする。

文 献

- 1) 南部陽一郎: 日本物理学会誌 **32** (1977) 773. 素粒子物理の歴史については, *Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 105* (1991); V. L. Fitch and J. Rosner: *Twenty Century Physics* (Amer. Inst. Phys., 1995) p. 665 などがよい参考になる。
- 2) Lepton は L. Rosenfeld, hadron は L. D. Okun の命名による。
- 3) これは J. J. Sakurai: *Ann. Phys.* **11** (1960) 1 に引用されている。

(2001年9月27日原稿受付)

Remembrance of the Youthful Years of Particle Physics

Yoichiro Nambu

abstract: This is a narrative on particle physics in its formative years viewed through my own work and experience.