

[2008年ノーベル物理学賞受賞記念講演]

## CP 対称性の破れが我々に語ったこと

京都産業大学 益川 敏英



(Photo by Kenji Matsui)

© The Nobel Foundation 2008

(編集部注) 本稿は、益川敏英氏のノーベル賞記念講演の日本語原稿である。英語版のみがノーベル財団によって公開されているため、編集部が益川氏に依頼し、掲載させていただくことになった。

まず最初にスウェーデン王立科学アカデミーとノーベル財団に、私が夢にも思わなかったこの栄誉を与えていただいた事に感謝したいと思います。

---

私は家具職人の息子として日本の地方都市名古屋で 1940 年に生まれた。父は家具職人としての住み込み修行時代に、電気技士への転職を希望して通信教育を受けていた。しかし悲しいかな、十分な基礎教育を受けていなかった父には sin、cos が理解できなかつたと言っていた。最終的には数人の職人さんの協力を得て、自分も職人として働く小さな家具工場を営んでいた。これも自国が引き起こした無謀で悲惨な戦争で無に帰した。

戦後は手元に残った家具の扉の金具や木ネジを軒先に並べておいた所、結構売れたらしい。それに味を占め、ものを売る職業、具体的には生菓材料としての砂糖を商う商人に成っていた。

しかし若い頃に勉強した電気の知識を自慢したかったらしいのだが、話相手が見付からない。よくよく見ると目の前に息子が居る。それで私がターゲットにされた。

戦後の住宅環境の劣悪な中で殆どの家庭には風呂が無く、銭湯に通っていたのであるが、そこへの行き帰りに、自分の知識の自慢話を息子にするのである。どうして三相交流モーターは回るのか。日食・月食は毎月起こらないのか。それは地球の太陽を巡る公転面と月が地球を巡る面が 5 度傾斜しているからだ、と自分の知識を自慢していた。

だから私は学校の成績は良くないが、先生が教科書どうりでない話題に脱線した折などは、それをフォローして質問等に答えられる、おかしな少年であった。

両親は、子供の学習を毎日注意深く観察し、学習を手助けしてくれるような家庭では無かった。実際にこのような話が有る。何を思ったのか、母親が自分の所の子供が家庭で勉強して居るのを見たことが無い。そこで父兄会で先生に、「たまには宿題を出して頂かないと子供が家庭で勉強を少しもしないので困る。」と話したら、逆に先生から、毎日宿題を出しているが、お宅の息子さんは一度も宿題をしてきたことが有りません、と逆に先生から注意されたらしい。

その夜は大変であった。両親から 2 時間説教を食らった。

私が強烈に物理学者になりたいと思うようになった契機は高校に進学してから

やって来た。友達が高校に進学するから自分も、ぐらゐの動機で高校に進学したが、1年か2年の時であったと思う、地元の大学の名古屋大学の坂田教授が陽子、中性子、 $\Lambda$  粒子を基本構成子に選んだ画期的な複合粒子模型を発表した、と新聞紙面で報じていた。

その頃の私は大変幼く、科学はヨーロッパで19世紀までに作られたものと思っていた。これが日本の首都東京での出来事なら、私の人生も変わっていたかも知れない。しかし、私の住む名古屋の地で今科学が作られている！ならば私もそれに加わりたい、と強烈に思った。しかし、父は自分の始めた商売を息子に継いで欲しいと、強く希望していた。だから、大学受験は一回のみで、失敗は許されなかった。それから名古屋大学受験に向けて猛勉強が始まった。

無事大学に進学できると、大学での授業は高校までのそれとは大きく違い、大変刺激的であった。大学での最初の授業は数学の解析学であった。アルキメデスの公理が有って、正の数、 $\epsilon$  と  $\delta$  が与えられた時、或る数  $N$  が有って、 $N\epsilon > \delta$  とできる、と。そしておもむろにデデキントの切断の講義が始まった。何だこれは。大変なカルチャーショックであった。大学の講義を始め、大学で経験するもの全てが刺激的で新鮮であった。新しいものに触れる毎に自分はこの分野に進むのだと、毎回違うことを言っていた。

実際に4年になり大学院の進学分野を決めなくては成らない時期に、数学教室の教授から、君はもちろん大学院は数学を受けるのでしょ、と言われた。いえ物理教室の方に書類を出しました、と言って意外な顔をされた記憶が有る。多分直前まで数学教室の方に進む様なことを言っていたのであろう。

1962年に物理教室の大学院に入ってからでも、この浮気症は直らず、一時期、脳の研究が重要であると、数人の有志で、パーセプトロンの勉強会などを行っていた。しかし、修士論文を書く頃には素粒子論の論文を坂田教授の主宰する研究室で準備していた。

この時期世界では、因果律から導かれる分散式に立脚した議論が世界的には盛んであり、J. Chew の唱える "Bootstrap Model" が流行であった。坂田の研究室では、1955年に坂田により提唱された、複合粒子模型の研究が主流であった。

研究室では Gamba, Marshak and Okubo が Kiev Conference (1959) で指摘したレプトンとバリオンの弱い相互作用での対称性に関心が集まっていた。即ち、

$$(\nu, e, \mu) \leftrightarrow (p, n, \Lambda).$$

この流れで  $\nu_\mu$  が発見されると、坂田研究室は自然に四元基本構成子模型が主流になっていた。1964年に、4元基本構成子模型が Z. Maki により提唱される。

この時期私は論文は書いていないが、南部先生の自発的対称性の破れのあの論文を読み、カイラル対称性の自発的破れに強い興味を抱いていた。この関係でカレント代数や PCAC により導かれるものにも興味を引かれていた。興味を広げて行く中で、1960年の

“The Axial Vector Current in Beta Decay”, M. Gell-Mann & M. Levy (1960) や

“Question of Parity Conservation in Weak Interactions”, T. D. Lee & C. N. Yang (1956)

に遭遇できた。これにより素粒子研究の要に、弱い相互作用を通してみえる、素粒子の姿への関心が強まった。

この時期、論文には一つもしていないが、Nambu-Jona-Lasinio の論文をベースに、色々な物理量を計算していた。例えば  $\pi$  の decay constant  $f_\pi$  は強い相互作用の典型的な物理量としては小さく感じられた。Nambu-Jona-Lasinio モデルのモデルパラメータは相互作用常数とカットオフパラメータであるが、これらを動かして、 $f_\pi$  を小さくするにはどうするか、等を執ように調べていた。結果はカットオフの付近の寄与が一番効いて来て結論が出なかった。これを契機に繰り込みを強く意識するようになった。

この時、日本では殆ど注目する人は居なかったが、弱い相互作用の高次効果を調べている人達が居た。例えばカレント・カレント相互作用の俣だと、高次効果は発散する。そこで中間状態に重いスカラー粒子とフェルミオン粒子を飛ばし、ボックス・ダイアグラムにするのである。中間状態の粒子の質量を十分重くすれば、近似的に四体フェルミ相互作用になる。中間に飛ぶ粒子をスカラー粒子にして繰り込み可能にし

よう、と言うのが、十分成功しているとは言えなかったが、アイデアであった。カレント・カレント型相互作用の高次効果を執ように追いかけている論文も気にして

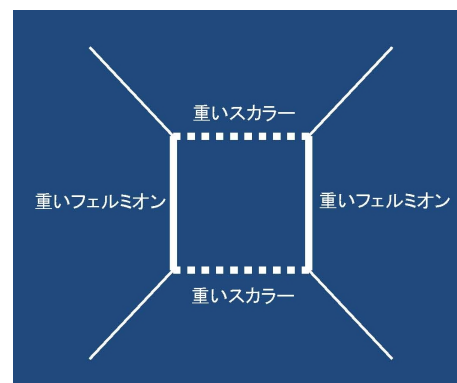


図 1: ボックス・ダイアグラム

いた。

また研究室で雑誌は一種類しか購読していないので、新着雑誌は奪い合いに成る。これを避けるために当番を決めて、新着雑誌の速報会を坂田研究室でもやっていた。私が最初にこの当番に当たった中にフィッチ・クローニン達のあの CP の破れを報告するあの論文が入っていたのである。これは強く印象に残った。これは何だと。しかしどこから切り込んで良いのかわからず 8 年間寝かせることとなった。

60 年代後半は Chiral Symmetry や Chiral Dynamics に興味は集中していた。この時期いじっていたのは、例えば、Y. Nambu & Jona-Lasinio Model で、Pion Decay Constant は強い相互作用の典型的な常数であるにも関わらず、強い相互作用の量としては小さい。 $\mu_\pi^2$  は chiral Symmetry の破れの一次の量である。と言うように。しかしそのことに関する論文は一つも書いてない。これらの作業は画家が習作の絵をポーズを変えたりして色々試してみるように、物理屋の習作であると思っている。

Nambu & Jona-Lasinio の論文の自発的対称性の破れのアイデアは大変魅力的な考えで有ったが、強い相互作用をするゼロ質量粒子は存在しない。そこで多くの人達が、Nambu-Goldstone (NG) の定理潰しに努力を集中する事となった。その中に Higgs がいた。NG Boson が現れるのは、Axial Current のフォーム・ファクターは  $\gamma_5 p_\mu$  と  $\gamma_\mu$  の係数二つのため、カレント保存の条件から、一つのフォームファクターにポールが現れてしまう。これが NG Theorem の内容であった。ここで Higgs は見かけ上 Lorentz 不変性が無ければ Form Factor がもう一つ増えるとして、クーロンゲージで議論を展開する。

これが、ゼロ質量の NG ボソンが消えるだけでなく、ゲージボソンが質量を持つようになる Higgs 機構についての論文であった。これには私はついて行けなかった。このすぐ後に Kibble が現れて、今日我々が知っている、共変形式の議論を与えた。この段階で私は理解できた。すぐに S. Weinberg と A. Salam による弱電統一理論が現れたり、Faddeev & Popov の論文も現われた。

一方四元クォークモデルについては、弱い相互作用の高次効果への関心から 1969 年の段階で GIM のプレプリントに気が付き、数人の人に注意を喚起している。四元クォークモデルは前に書いたように坂田の研究室出身者なら皆知っているが、この仕事で私は記憶を甦らされた。

この間の仕事の中に、小林氏との CP の論文の References の中に、"Z. Maki & T. Maskawa, RITP-146 と引用されている論文がある。これは CP の論文が投稿さ

れる直前に書かれた論文で、タイトル “Hadron Symmetries and Gauge Theory of Weak and Electromagnetic Interactions” である。この論文が PTP Vol. 49 (Mar. 1973), 1007 に現れていることをその後一度もアナウンスしたことが無いので、殆ど知られていない。4 元 quark のモデルで強い相互作用に特定の軸があれば、それと弱い相互作用との干渉で簡単に CP の破れを導入出来る。1974 年を過ぎれば強い相互作用は QCD で記述することは常識になって来るので、強い相互作用には特別な方向は Higgs が決める quark の質量項以外に無い、と知る事になるので、今日ではこの論文は必要で無くなるが、1972 年の時点では必要であった。

繰り込み可能な弱電統一模型が現れると、直観的に CP の破れ現象を取り上げる時が来た、と感じた。私は、1967 年に大学院を終了して、3 年間名古屋大学で助手をしていたが、1970 年に京都大学に移っていた。二年遅れて小林君も大学院を終了して京都大学助手に着任して来た。

日本には 5 月始めに 1 週間程の休日があるが、それが過ぎた頃、どちらからと言うこと無く、再び小林君と同じ職場に再会したので一緒に仕事をしよう、と言うことになった。テーマは私に付いては、先程述べたように、CP の問題は期が熟している、と感じていたので、それを提案した。この話題に付いて議論した事は無いが、小林君も名古屋の生活の中でこの問題に近付いていたらしい。

我々が四元クォークモデルと弱電統一模型をベースに CP 対称性の破れを調べ始めた。4 種類のクォーク場が weak  $SU(2) \otimes U(1)$  のもとでどの様に変換するのかを決めなくてはならない。

- A)  $4 = 2 + 2$
- B)  $4 = 2 + 1 + 1$
- C)  $4 = 1 + 1 + 1 + 1$

と書き、left 成分 3 通りと right 成分 3 通りの計 9 通りを調べたが、quark 場の phase の任意性を考慮すると、CP 対称性を破れないか、 $g_V/g_A$  の符号が実験と合わなかった。これは left 成分がケース A) で、right 成分が B) の組合せの時であった。それまで検討して来た case では全て CP 対称性に破れが生じなかったもので、私はこれで行けると思った。そこで小林君にこれでどうですか、と提案した。

小林君はこの時少し首を傾げ、明日までに調べて来ますと答えた。多分結果は予想していたのであろうが、慎重を期してその様に答えている。翌日「益川さん、あれは  $g_V/g_A$  の符号が実験と合いません」と告げた。

この時期、私は労働組合の書記長をしていた。我々の理学部で、秘書さんの解雇問題が生じていた。我々若い研究者の研究の補助までしてくれている彼女等の解雇を見て見ぬふりをして、私は研究にのめりこむ事は出来なかった。午前小林君と議論。午後は組合の仕事。家に帰って食事と、家族とのその日に起きた事等に付いての会話。風呂に入ってから自分の仕事。これが当時の私の一日であった。

小林君が case (A,B) を潰してから、どうしたら 4 元 quark モデルで、実験に合う CP の破れを引き起こさせる事が出来るか、解の無い模索が始まった。

一月程苦闘が続いた。入浴中どう考えても、繰り込み可能な、4 元 quark モデルで CP 対称性の破れの実験結果を説明できる、良いモデルはない。そこで 4 元クォークモデルでは CP 対称性の破れの説明出来ません、と言う論文を書こう、と決心した。

この様な言い訳を考えながら、少々出来の悪い論文になるが銚先を納めるか、と決心して、風呂を出る事にした。この決心で 4 元クォークモデルに対する拘りは無くなった。ならば 6 元クォークモデルで行けば良いと瞬時に気が付いた。複素位相が残ることはそれまでの計算の経験から自明であった。

弱電統一理論の枠組では、Higgs scalar 粒子が有って、この粒子を表す場  $\phi$  が真空期待値を持つと、クォークが質量を持つ事になる。クォークが確定した質量を持つようにクォーク場を決めてみると、この新しいクォーク場で書いた、弱い作用作用を記述しているカレントに、ユニタリー行列、 $U$  が現れる。weak  $SU(2)$  この行列に複素位相が現れると、CP 対称性が壊れるのである。

これだけの説明では、何時でも CP の破れが生じるように聞こえるが、実際は、クォーク場  $q_i$  は複素量で、 $q_i \rightarrow e^{i\alpha_i} q_i$  と置き換える自由度がある。明らかにこれは物理を変えないが、 $U$  の行列要素は変える。弱い相互作用の荷電カレントは、up 型クォーク場の複素共役  $\bar{u}_i$  と down 型クォーク場  $d_j$  と  $U$  の行列要素  $U_{ij}$  の積の形に書かれていることを思い起こそう:  $\bar{u}_i U_{ij} d_j$ . それゆえ、 $2N$  個のクォーク場の位相変換

$$u_i \rightarrow e^{ia_i} u_i, \quad d_j \rightarrow e^{ib_j} d_j, \quad (1)$$

を行えば、行列要素  $U_{ij}$  は、

$$U_{ij} \rightarrow e^{-i(a_i - b_j)} U_{ij} \quad (2)$$

と変化する。 $2N$  個のクォーク場の位相を全て共通に変換すると  $U$  の位相は変わら

ないから、 $2N$  個のクォーク場の位相のうち、 $U_{ij}$  の調整に使えるのは  $2N - 1$  個である。

弱い相互作用のボゾンのソースであるカレントに現れる、 $SU(2) \otimes U(1)$  の 2 次元表現のクォーク場を、質量が確定した場で書いた時に現れる、ユニタリー行列  $U$  の複素位相は、 $N(N + 1)/2$  で、位相の調整に使えるのは、 $2N - 1$  であるから、残る位相の個数は、

$$N(N + 1)/2 - (2N - 1) = (N - 2)(N - 1)/2$$

となる。

この数は、 $N = 1$  と  $N = 2$  の時、すなわちクォークの個数  $2N$  が、2、4 の時、0 となり、その場合、行列  $U$  が複素位相を持たず、CP の破れがない、ということの意味している。 $N = 3$  世代の場合、すなわち、6 元クォークの場合に行けば、この数は 1 となり、初めて CP の破れが起こるのである！

かくして我々の仕事は終わった。CP 対称性の破れの起源が、部分的には、解明された。

---

しかしながら、この理論が本当に確かめられるのは、30 年余りという長い年月と多くの実験家たちの莫大な努力とが必要でした。私はここに、この人類の壮大なプロジェクトを支えた世界中の人々に感謝したいと思います。