

理学博士益川敏英君および理学博士小林誠君の「六元クオ

ーク模型の提唱」(共同研究) に対する授賞審査要旨

過去二〇年間における素粒子論の発展は、ゲージ理論の発展およびクオーク模型の確立によって特徴づけられる。小林・益川両君の「六元クオーク模型」の提唱は、この発展において重要な一段階を画したもので、小林・益川理論として知られている。

ゲージ理論は量子電磁力学に始まる。この理論はゲージ変換に対して不変であるという著しい特徴をもち、この変換は可換群を構成する。これをSU(2)群に拡張した理論はYangとMills(一九五四)によって提唱された。可換ゲージ場の拡張としての非可換ゲージ場は、しばしばYang-Mills場と呼ばれる。さらに内山(一九五六)は、一般のリー群に対する非可換ゲージ場を導入し、また重力場をゲージ場の一種と見做せることを示した。しかし当時は、非可換ゲージ場理論はアカデミックな興味の対象に止まり、現実の自然界との関係は明らかでなかった。

一九六〇年代には何百という素粒子が発見された。これらは強い相互作用をもち、ハドロンと総称され、強い相互作用をもたないレプトン(電子、ミューオン、ニュートリノ)などと区別される。このように多くのハドロンのすべてをいわゆる素粒子と見ることは概念的にも難しく、ハドロンはさらに基本的な粒子から構成される複合粒子である、とする考えがだんだんにひろまってきた。この方向では坂田模型(一九五六)が先駆的な役割を果たしたが、

Gell-Mann と Zweig (一九六四) は、すべてのハドロンはクォークと呼ばれる基本粒子から構成されているという考えを提唱した。この模型の特徴は、クォークの電荷が陽子電荷  $e$  の  $1/3$ ,  $2/3$  倍という分数倍の値をとること、クォークが単独では観測にかららない、ということである。その後のクォーク模型の発展により、ハドロンのスペクトル、質量、磁気能率などが理解されるようになってきたが、そこで問題となるのはクォークが一体、何種類あるか、という疑問であった。

当時、知られていた強い相互作用の現象論的  $SU(3)$  対称性を説明するため三元クォーク模型が提唱され、 $u\left(\frac{2}{3}e\right)$ ,  $d\left(-\frac{1}{3}e\right)$ ,  $s\left(-\frac{1}{3}e\right)$  という三種のクォークが導入された。ここに括弧内は電荷を表わす。これらの名称は、isospin up, isospin down, strange に由来する。さらに後になって種々の理由からもう一種類のクォークも予想され(牧、原その他)、チャーム粒子  $c$  と呼ばれた。

この時代には、一九五〇年代に発見されたパリティ非保存を契機として弱い相互作用の構造についても理解が深まり、小林・益川理論への発展も準備されつつあった。それらはカビボ混合の概念、 $CP$  非保存の発見、さらに Weinberg (1967)-Salam (1968) 理論である。

一般に、クォーク、レプトンは安定でなく、重いクォークは軽いクォークへ、重いレプトンは軽いレプトンへ崩壊する。その原因は弱い相互作用で、よく知られたベータ崩壊はその一例である。

クォークやレプトンは、例えば電子と電子ニュートリノ、また  $(\bar{u}, d)$ ,  $(\bar{s}, c)$  などの対をなして存在するので一つの対を世代と呼ぶ。現在知られている限り、違った世代の粒子は質量の違いを除いては全く同じ性質をもっている。

さて、弱い相互作用については、レプトン、ハドローンの区別なく、すべて同型の  $V-A$  型のフェルミ相互作用によって記述され、しかもその相互作用定数は同一であるという普遍的フェルミ相互作用の考えが現在の通説である。ところで、ハドロンが関与する場合、相互作用定数は、レプトンのみよりも一般に小さい。弱い相互作用は元来、同じ世代の中での転換しか直接に起きないと考えられるから、この事実はクォークの一つの世代が実は質量の固有状態でなく、質量なるものはすべての世代に跨ったマトリックスとして取扱わなければならないことを意味する。こうして Cabibbo (一九六三) は、弱い相互作用の普遍性を保持するためにフェルミ相互作用の中のハドロンに対応する  $V-A$  型の流れを

$$d' = d \cos \theta + s \sin \theta \quad (1)$$

のようにクォーク  $d'$  から  $u$  への遷移を表わすものと仮定した。これにより、ストレンジネスが変る崩壊がそれが変らない崩壊よりも起りにくい事実が説明される。ここに現れる角  $\theta$  をカビボ角という。

一方 Fitch, Cronin (1964) 等は中性  $K$  中間子の長寿命成分が二個の  $\pi$  に崩壊することを発見した。

$P$  (パリティ) 非保存の発見とともに  $C$  (荷電共役) の非保存が知られていたが、多くの人々は  $CP$  という積は保存すると考えていた。上記の発見はしかし、 $CP$  不変性の破れを実験的に証明したものであった。

またこの間、ゲージ理論に基づく電磁相互作用と弱い相互作用の統一理論が発展した。これは Glashow によって提唱され Weinberg (1967) と Salam (1968) によって定式化されたものであるが、弱い相互作用を媒介するボゾン  $W$  および  $Z$  の発見 (一九八三) によって実験的にも証明された。

さて、三元クオーク模型以後のクオーク理論の発展を辿れば概略次のようである。

三元クオーク模型では説明できない現象の一例は中性K中間子のミューオン対への崩壊である。このようにストレンジネスが変化する中性の流れの関与する過程については、三元模型による理論値は実験値に比べて過大である。Glashow, Lipoulos, Maiani (1970) は第四クオークcを仮定すれば一種の相殺機構が働き、実験値と一致する理論値が得られることを示した。これをGIM機構と呼ぶ。

また Giorgi と Glashow (1972) は非可換ゲージ理論のくりこみ可能条件を調べ、その結果を Weinberg-Salam 理論に適用してクオークの二重項 (u, d)、レプトン二重項 ( $\nu_e, e$ ) の中ではある相殺機構が働き理論がくりこみ可能になることを示した。

\* 小林・益川 (一九七三) の理論はこの時点で出現した。小林・益川両君は、Weinberg-Salam 理論形式の範囲内で、四種類のクオークが  $SU(3) \times U(1)$  というゲージ群の表現として選り得る種々の場合を考察し、四元クオーク模型では実験的に知られているCP不変性の破れが説明できないことを示した。一般にCP不変性が破れるためには転移マトリックス要素は複素数でなければならないが、そのためには質量マトリックスが複素的であればよい。ここで両君は次の定理を証明した。即ち、もし四元模型のように世代が二つしかなければ質量マトリックスの位相因子は物理的意味をもたず、適当な変換によって消去されるので、二世代のカビボ機構によってCP不変性を破ることは不可能である。このことは四元模型が実在と合致しないことを意味する。

この困難を救うため両君はもっと一般的な機構をいくつか提案しているが、その一つは三つの世代、すなわち六種

類のクォークを含む質量マトリックスで、カビボ混合(1)式の拡張であり、それによるCP不変性の破れの理論はGI M機構の拡張である。この提案が意味するクォーク模型を六元模型という。六元クォーク模型は現在までに知られている実験的事実と調和する理論として最も簡単なものであり、その質量マトリックスは弱い相互作用を分析するための標準的理論として広く用いられている。

小林・益川理論が提出された一九七三年には、まだ三種類のクォークしか知られておらず、世代の概念すら未だ確立されていなかったから、両君の先見は特筆に値する。第四のクォーク(チャーム)は一九七四年 Ting と Richter による  $J/\psi$  粒子の発見によってその存在が確認され、第五のクォーク  $b$  (beauty または bottom) は一九七七年 Lederman, 山内等の  $\tau$  (ウプシロン) 粒子の発見によって確認された。これは Perl (1974) による第三の荷電レプトン $\tau$ の発見とともに第三世代の存在を意味する。 $\tau$ に対応するタウニュートリノも $\tau$ の崩壊過程の分析によって確認されている。第六のクォーク  $t$  (top) の検出は一九八四年、CERN のグループによって報告されているが、確認の段階には未だ至っていない。

小林・益川の理論は、三世代以上の基本粒子の存在を予言し、以後の研究の指針となっているが、単に予言に止まらず、さらに精密な定量的検証にも耐えて来た。現在のところ、この理論に背馳する実験的事実は未だ発見されず、この理論が物質の窮極構造の解明をめざす現代の物理学において確実な前進への最も重要な里程標として果たした役割は高く評価されねばならない。

\* M. Kobayashi and T. Maskawa: CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction. Progr.

Theor. Phys., Vol. 49, No. 2, Feb. 1973, pp. 652-657

『 素粒子論の発展と展望 ( \* 田代昭一博士追悼論文集) 』

1. Mixing Effect between Particles and Resonances. Progr. Theor. Phys. **38** (1967) 190. (with H. Kondo and Z. Maki)
2. Single Pion Production in Low Energy Pion-Nucleon Scattering and Chiral Dynamics. Progr. Theor. Phys. **41** (1969) 1515. (with M. Kobayashi and H. Kondo)
3. Nonlinear Realization of Groups and Chiral Transformations in the Quark Model. Progr. Theor. Phys. **43** (1970) 1334. (with C. Hattori, M. Kobayashi and H. Kondo)
4. Chiral Symmetry and  $\eta$ -X Mixing. Progr. Theor. Phys. **44** (1970) 1422. (with M. Kobayashi)
5. Symmetry Breaking of the Chiral  $U(3) \times U(3)$  and the Quark Model. Progr. Theor. Phys. **45** (1971) 1955. (with M. Kobayashi and H. Kondo)
6. Fundamental Quartet and Chiral  $U(4) \times U(4)$ . Progr. Theor. Phys. **46** (1971) 1647. (with Z. Maki)
- 7.\* Quartet Scheme of Hadrons in Chiral  $U(4) \times U(4)$ . Progr. Theor. Phys. **47** (1972) 1682. (with Z. Maki and I. Umemura)
- 8.\* A Note on the Leptonic Decays of Charmed Mesons. Progr. Theor. Phys. **47** (1972) 1060. (with H. Kondo and Z. Maki)
- 9.\* A New Approach to  $\gamma$ - $2\gamma$  Decay and Models of Elementary Particles. Progr. Theor. Phys. **48** (1972) 596. (with Z. Maki and I. Umemura)
- 10.\* Hadron Symmetry and Gauge Theory of Weak and Electromagnetic Interactions. Progr. Theor.

- Phys. 49 (1973) 1007. (with Z. Maki)
- 11.\* Some Remarks on the Quartet Model of Hadrons, Contributed Paper (#104) for XVI International Conference on High Energy Physics. (Chicago-Batavia, 1972). unpublished (with Z. Maki and I. Umemura)
- 12.\* CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction. Progr. Theor. Phys. 49 (1973) 652. (with M. Kobayashi)
13. Symmetry Breaking of Chiral  $U(3) \times U(3)$  and  $X\text{-}\pi\pi$  Decay Amplitude. Progr. Theor. Phys. 49 (1973) 634. (with M. Kobayashi and H. Kondo)
14. Spontaneous Breaking of Chiral Symmetry in a Vector Gluon Model. Progr. Theor. Phys. 52 (1974) 1326. (with H. Nakajima)
15. Spontaneous Breaking of Chiral Symmetry in a Vector Gluon Model (II). Progr. Theor. Phys. 54 (1975) 860. (with H. Nakajima)
16. The Bag Theory with Dirichlet Boundary Conditions and Spontaneous Symmetry Breaking. Progr. Theor. Phys. 54 (1975) 1833. (with T. Inoue)
17. The Problem of  $P^+ = 0$  Mode in the Null-Plane Field Theory and Dirac's Method of Quantization. Progr. Theor. Phys. 56 (1976) 270. (with K. Yamawaki)
18. Singular Lagrangian and Dirac-Faddeev Method -Existence Theorems of Constraints in 'standard forms'. Progr. Theor. Phys. 56 (1976) 1295. (with H. Nakajima)
19. Evolutional Trends in Current Nuclear Physics-Physical Significance of Numatron Project-INSNUMA-5. (with T. Marumori *et al.*)

20. How Dense Are the Coulomb Gauge Fixing Degeneracies? -Geometrical Formulation of the Coulomb Gauge-. Progr. Theor. Phys. **60** (1978) 1526.
21. On the Problem of Gribov's Ambiguity. In Proc. XIX Int'l Conf. on High Energy Physics, edited by S. Homma, M. Kawaguchi and H. Miyazawa (Physical Society of Japan, Tokyo, Japan, 1979) p. 500.
22. Structure of the Gauge Transformation Group in the Square Integrable Space and Gribov's Ambiguity in the Coulomb Gauge. Progr. Theor. Phys. **63** (1980) 641. (with H. Nakajima)
23. Concept of a Collective Subspace Associated with the Invariance Principle of the Schrödinger Equation-A Microscopic Theory of the Large Amplitude Collective Motion of Soft Nuclei-. Progr. Theor. Phys. **63** (1980) 1576. (with T. Marumori, A. Hayashi, T. Tomoda and A. Kuriyama)
24. Self Consistent Collective Coordinates Method for the Large Amplitude Nuclear Collective Motions. Progr. Theor. Phys. **64** (1980) 1294. (with T. Marumori and F. Sakata)
25. Quantum Theory of Collective Motion-Quantized Self-Consistent Collective-Coordinate Method for the Large-Amplitude Nuclear Collective Motion-. Progr. Theor. Phys. **66** (1981) 1651. (with T. Marumori, F. Sakata, T. Une and Y. Hashimoto)
26. New Bound for Single and Double Diffraction Cross Sections in Identical Particle Collisions, Progr. Theor. Phys. **66** (1981) 1915. (with H. Kondo and A. Minaka)
27. Nonlinear  $\sigma$  Models on Symmetric Spaces and Large N Limit. Progr. Theor. Phys. **67** (1982) 1038. (with S. Higami)
28. Self Consistent Collective Coordinate Method for the Collective Subspace and Nuclear Collective



- Dynamics-Boson Mapping of the Collective Subspace-. Proceedings of the 1982 Basov International Summer School of Nuclear Physics, Romania, Ed. by D. Bucurescu, V. Ceausescu and N.V. Zamtyv. (with T. Marumori *et al.*)
29. Structure of Non-Linear Realization in Supersymmetric Theories. Phys. Lett. **138B** (1984) 94. (with M. Bando, T. Kuramoto and S. Uehara)
  30. Non-Linear Realization in Supersymmetric Theories. Progr. Theor. Phys. **72** (1984) No. 2. (with M. Bando, T. Kuramoto and S. Uehara)
  31. Non-Linear Realization in Supersymmetric Theories II. Progr. Theor. Phys. **72** (1984) 1207. (with M. Bando, T. Kuramoto and S. Uehara)
- 17 年来 論文 24 篇 ( \* 2 篇 共同 執筆 )
1. Single pion production in low energy pion-nucleon scattering and chiral dynamics. Progr. Theor. Phys. **41** (1969) 1515. (with C. Hattori, H. Kondo and T. Maskawa)
  2. Nonlinear realization of groups and chiral transformations in the quark model. Progr. Theor. Phys. **43** (1970) 1334. (with C. Hattori, H. Kondo and T. Maskawa)
  3. Chiral symmetry and  $\eta$ -X mixing. Progr. Theor. Phys. **44** (1970) 1422. (with T. Maskawa)
  4. On the lepton-hadron collisions. Progr. Theor. Phys. **45** (1971) 482. (with J. Iizuka and H. Nitto)
  5. Symmetry breaking of the chiral  $U(3) \times U(3)$  and the quark model. Progr. Theor. Phys. **45** (1971) 1955. (with H. Kondo and T. Maskawa)
  6. The universality of the family of structure functions. Progr. Theor. Phys. **46** (1971) 1170. (with

J. Izuka and H. Nitto)

7. Apparent violation of the  $\Delta S = \Delta Q$  rule in high energy neutrino processes. *Progr. Theor. Phys.* **46** (1971) 1944. (with T. Hayashi, M. Nakagawa and H. Nitto)
8. Quartet models based on fundamental particles with fractional charge. *Progr. Theor. Phys.* **47** (1972) 982. (with M. Nakagawa and H. Nitto)
9. Symmetry breaking of chiral  $U(3) \times U(3)$  and  $X \rightarrow \gamma\pi\pi$  decay amplitude. *Progr. Theor. Phys.* **49** (1973) 634. (with M. Kondo and T. Maskawa)
10. \* CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction. *Progr. Theor. Phys.* **49** (1973) 652. (with T. Maskawa)
11. Vortex-line models for dual strings and magnetic monopoles. *Progr. Theor. Phys.* **51** (1974) 1636.
12. Notes on the BNL event of " $\Delta S/\Delta Q = -1$  process. *Progr. Theor. Phys.* **54** (1975) 1239. (with T. Hayashi and M. Nakagawa)
13. On the ground state of  $O(N)\text{-}\lambda\phi^4$  model. *Progr. Theor. Phys.* **54** (1975) 1537. (with T. Kugo)
14. A V-A six lepton model without the separate conservation of lepton numbers. *Progr. Theor. Phys.* **58** (1977) 369. (with T. Kugo)
15. Cosmological constraints on the mass and the number of heavy lepton neutrinos. *Progr. Theor. Phys.* **58** (1977) 1775. (with K. Sato)
16. Pair creation in strong electric fields. *Progr. Theor. Phys.* **64** (1980) 1045. (with H. Aoyama)
17. Possible spin-one resonances in the strongly coupled Higgs sector in "High Energy Physics-1980". (American Institute of Physics 1981). (with T. Matsuki)

18. Strong CP violation in the chiral  $\sigma$  model. *Progr. Theor. Phys.* **66** (1981) 2173. (with K. Kanaya)
19. Numerical evidence for a phase transition in the  $RP^2$  spin model in two dimensions. *Phys. Letters* **109B** (1982) 209. (with N. Fukugita, M. Okawa, Y. Oyanagi and A. Ukawa)
20. Note on mass generation mechanism of composite quarks and leptons. *Progr. Theor. Phys.* **68** (1982) 694.
21. Phase structure and duality of  $Z_N$  lattice gauge theory with generalized actions in four spacetime dimensions. *Nucl. Phys.* **B215** FS7 (1983) 289. (with M. Fukugita and T. Kaneko)
22. A simple picture of Rubakov-Callan effects, in "Proceedings of the Workshop on Monopole and Proton decay" (KEK 83-12, 1983)
23. Radiative corrections in a strong magnetic field. *Progr. Theor. Phys.* **70** (1983) 1375. (with M. Sakamoto)
24. Fermions in the background field of the Kaluza-Klein monopole. *Progr. Theor. Phys.* **72** (1984) 122 (with A. Sugamoto)