

## Hidden Local Symmetry or Fake Symmetry?

京大基研 九後 汰一郎

1985年のPhysical Review Letter誌に発表した我々のHidden Local Symmetryの仕事

“Is the  $\rho$  Meson a Dynamical Gauge Boson of Hidden Local Symmetry?”

Masako Bando, Taiciro Kugo, Shozo Uehara, Koichi Yamawaki and Tsutomu Yanagida, Phys. Rev. Lett. 54 (1985) 1215

が、2020年度の第20回素粒子メダルに選ばれた。素粒子メダルは、第一回の猪木-松田から、牧(-中川-坂田)、木村利栄、牟田、高橋康、大貫義郎、(Distler-)川合、風間-鈴木、(Nielsen-)二宮、稲見-林、荒船(-Freund-Goebel)、(坂田-梅沢-)亀淵、吉川-山崎、坂井典佑、中西襄、木下東一郎、河本昇、...等々と、名前を聞いただけでその業績が思い起こされる錚々たる受賞者達の連なる、我が素粒子論グループの栄誉ある賞であり、そういう賞をいただけることになって、たいへん光栄でうれしい出来事だった。ただ、この栄誉が、吉川さんから新幹線共同研究と呼ばれた仙台-名古屋-京都-広島の研究5人の共著の業績に対するものであったのだが、山脇さんが受賞を固辞されたのが唯一残念な事であった。このPRL論文以降のこの方面の山脇さんの精力的な仕事の数々が無かったら、このHidden Local Symmetryの考え方が今日のようなpopularityを得るには至らなかっただろう事を考えると、特に残念に思う。

この仕事前後の経緯を思い出しながら、私の立場からこの研究の意義づけを述べたい。(回想の常とは言え多分に自己中心的な偏った話になっていることをあらかじめお断りしておきたい。特に共著者の皆さんには失礼な点多々あると思うがご寛恕をお願いしたい。)

私は、今から考えると随分なわがまを許していただいたものだと思うが、1982年の9月から1984年の3月までの1年半京大から在外で研究させていただく機会を得た。最初の1年はCERNで、後の半年はMünchenのMax-Planck研で、それぞれ客員研究員として滞在した。CERN滞在の後半になって、ちょうど当時Max-Planck研に在外で滞在していた柳田勉さんから、超対称な理論で $E_7/SU(5) \times \dots$ の非線形表現のLagrangianを作りたいがどうしたものだろうと相談を受けた。そのころ、柳田さんはPecceiとBuchmüllerと一緒に、quark/leptonをGUT scaleあたりでのより基本的理論-超対称 preon 模型-におけるglobal対称性の自発的破れに伴う南部-Goldstone (NG) 超多重項のフェルミオン成分(彼らがquasi-NG fermionと呼んだもの)と考える新しいアイデアを提案していた[1]。Global対称性 $G$ が部分群 $H$ に破れた場合のNGボソンは、群論だけから決まるので、そのfermion partnerと同定されるquark/leptonも、その存在と量子数、世代の数などが理解できる事になる。当時は、string理論興隆の前で、GUT scaleあたりに想定される基本理論はどういうものかが問題になっており、特に、1979年にCremmer-Julia[2]

が Lagrangian をあらわに書き下した  $N = 8$  supergravity 理論が「究極理論」の候補かとも言われた時代であった。その Cremmer-Julia の長大な論文を京大の研究室で紹介した頃から、 $N = 8$  SUGRA に global  $E_{7(+7)}$  対称性と local  $SU(8)$  対称性が Hidden Symmetry として存在し、特に、スカラー場セクターの Lagrangian は、 $E_{7(+7)}/SU(8)$  の非線形表現 Lagrangian として与えられる事、さらにその local  $SU(8)$  がダイナミカルになれば GUT の  $SU(5)$  ゲージ相互作用が理解できる可能性があること、などに多大な興味を持った。坂東さんもこの可能性に大いに興味を持たれた。上原正三君と supergravity の conformal tensor calculus の勉強や研究を始めたのも、そういう流れの延長上にあり、CERN 滞在時代の前半も、未だ京都にいる彼との共同研究を継続していた [3]。

こういう背景もあって、柳田さんから  $E_7/SU(5) \times \dots$  の非線形表現の話を持ちかけられた時には、たいへん面白いと思い、早速その共同研究を始める事となった。ただ、その非線形表現の超対称 Lagrangian を決める project には、まだ二つの困難があった。一つは例外群を良く知らなかったことと、もう一つは超対称 Lagrangian を与える Kähler potential のあらわな構成法を知らなかった事である。(前者は Cremmer に「maximal な古典部分群の表現に分解して考えれば良い」と教えてもらい解決したが、後者は、少し後に京都グループの坂東-蔵本-益川-上原 (BKMU) の論文 [4] で初めて一般的に解かれるまで、誰も分からなかった。<sup>1)</sup> それで、München で柳田さんと合流した際には、NG superfield について 4 次までの Kähler potential の決定で良い事にして論文にまとめ、Phys. Lett. B に発表した [7]。

1984 年の春に京都に帰ってから、柳田さん達の提案したもっと易しい群を用いる模型、 $n_f$  世代の超対称  $U(4n_f + 2)/U(4n_f) \times SU(2)$  模型 [8]、の一番簡単な  $n_f = 1$  の場合を具体的に取り上げ、BKMU の上原君にも共同研究に入ってもらってその Kähler potential の表式を閉じた形で求め、現実の W ボソンをこの模型の hidden local symmetry  $SU(2)$  の dynamical gauge boson と見なす可能性を論じた論文を Phys. Lett. B に投稿した [9]。

2次元時空の  $CP^{n-1}$  模型 (=  $SU(n)/SU(n-1) \times U(1)$  非線形表現) [10, 11] では、auxiliary gauge field を導入して local  $U(1)$  symmetry をあらわにする formulation において、実際に gauge 場が  $1/n$  展開の leading order で運動項を得て dynamical に massless の vector 粒子を実現する事がよく知られていた。<sup>2)</sup> 4次元時空では、非

<sup>1)</sup>München では、偶々、小嶋君も滞在しており、超対称な理論では往々にして自発的対称性の破れから要請される NG boson よりも多くの massless boson が現れるが、その理由は「superpotential の対称性」が complex group の対称性で、一般に「Lagrangian の対称性」より大きいためだ、という論文 [5] を Kugo-Ojima-Yanagida の共著で書いた。この論文も京都の BKMU の最初の仕事 [6] と大分オーバーラップがあったが、その次に取り組んだ、非線形表現の Lagrangian の構成、すなわち Kähler potential の一般的構成法の問題は、私はかなり頑張って考えたのだが難しく、なかなか進まなかった。ある日、競合していた BKMU から送られてきた preprint に、その問題が完璧に解かれているのを見て「負けた！」と思った。

<sup>2)</sup>実は私も既に 1981 年に Townsend との共著 [12] で、この massless vector 粒子の実現は、tree level では破れている global  $U(1)$  対称性 (local  $U(1)$  ゲージ変換のうちの  $x^\mu$ -independent な変換の下での不変性) がダイナミカルに回復しさえすれば必然的であることを指摘していた。このロジックは、local  $U(1)$  対称性に対してなら 4次元時空でも成り立つもので、現実世界の photon の存在

線形表現 Lagrangian はくり込み不可能だということもあり、ダイナミカルな gauge 粒子の生成を直接示す例は難しい。しかし、もし hidden local symmetry が現実世界のゲージ対称性の起源を与えるものなら、そのダイナミカルな実現というのはそんなにまれな事ではなく、もう既に実例が現実世界にあるのではないかと考えた。そこで、強い相互作用のハドロン世界の  $\rho$  メソンは、他のハドロンへの結合定数がユニバーサルであると言われていたので、その実例を与えている可能性があると思い、この柳田、上原、九後の3人で調べ始めた。

カイラル  $SU(2)_L \times SU(2)_R/SU(2)_V$  の非線形 Lagrangian を、auxiliary  $SU(2)$  vector 場  $V_\mu$  を導入して hidden local  $SU(2)_V$  対称性を明白にする形に書き直し、 $V_\mu$  が、より基本的な理論のダイナミクスか、非線形 Lagrangian の強い相互作用そのものの量子効果かによって、ダイナミカルに運動項を生じると仮定して  $F_{\mu\nu}^2(V)$  項を加えて、effective Lagrangian を書き下し  $\pi$ -on と  $\rho$ -meson 系の現象を consistent に記述しているか? を調べた。その結果、残念ながら、どうしても現実の状況と合わないところが出てきた。今ではよく思い出せないのだが、Lagrangian の計算を何度も見直したと思う。それでもどうしても間違いを見いだすことができず、結局、「 $\rho$ -meson がカイラル非線形模型に内在する hidden local  $SU(2)$  のゲージボソンの dynamical realization である」という魅力的アイデアは成立しない、と結論することになってしまった。こう宣言してこの3人の共同研究は終わってしまった。1984年の夏休みに入る前である。

その後、夏休みになってから、名古屋の山脇さんが坂東さんや私と研究の議論をしに京都に来られた。その時にどういう議論をしたのか詳細を憶えてないのだが、坂東さんが Cremmer-Julia の論文以来興味を持っていた、 $N = 8$  SUGRA の  $SU(8)$  hidden local symmetry (HLS) からダイナミカルに GUT が導かれる可能性が話題になった (のではないと思う)。そこで私は、 $\rho$ -meson が HLS の dynamical gauge boson である可能性の検討を、柳田さん、上原君と最近までやっていたが、その可能性は現象論的にうまく合わないので否定された、ということ伝えた。しかし山脇さんと坂東さんは、それはたいへん面白い話だからもう一度最初から考え直すべきだと主張し、「そんなことをしてもどのみちダメですよ」と渋る私を説得された。それで、カイラル  $SU(2)_L \times SU(2)_R/SU(2)_V$  非線形 Lagrangian を、auxiliary  $SU(2)$  vector 場  $V_\mu$  を導入して hidden local  $SU(2)_V$  対称性を明白にする式変形を、一番最初の step から詳細に検討することになった。その時に3人で黒板で式変形をやっていく中で見つけたのか、あるいは、各人が家に持ち帰って計算をして誰かが気づいたのか、今となっては記憶が定かでないが、hidden local  $SU(2)_V$  symmetry を明白にする形の Lagrangian では独立な不変項が、(PRL の論文に書いた記号で)  $L_A$  と  $L_V$  の二つがあり、その両方に共通に含まれる次元2の overall 係数  $f_\pi^2$  以外

---

とそのゼロ質量も、その実例として理解できる。また、現実世界でもう一つだけ存在する massless 粒子 - graviton も同様に理解できることを、hidden local symmetry の dynamical realization と Ferrari-Picasso[13], Nakanishi-Ojima[14] の定理との関連で、後の1985年の国際会議 meson'50 のトーク [15] で指摘した。

に、 $L_V$  に掛けられる (PRL 論文で  $a$  と呼んだ) 勝手な係数を導入する自由度 (任意性) がある、という事に気づいたのである。Auxiliary vector field  $V_\mu$  を運動方程式を用いて消去すれば  $L_V$  はゼロになるので、その前の係数  $a$  は何でも元の非線形カイラル Lagrangian を再現するというわけである。しかしゲージ場が dynamical になると仮定してこの Lagrangian に  $V_\mu$  のゲージ不変運動項  $-(4g^2)^{-1}F_{\mu\nu}^2(V)$  を加えると、この  $a$  の自由度は決定的に重要になる。運動項が加われば、最早や  $V_\mu$  は運動方程式で消去できず、 $aL_V$  は  $\rho$ -meson mass や  $\rho\pi\pi$  結合定数などいろんな量に効いてくる。PRL 論文で書いたように、 $a = 2$  に採れば、 $\rho$ -coupling の universality, KSRF-relation, photon coupling の vector dominance 等、 $\rho$  と  $\pi$  と matter 場のあらゆる低エネルギーダイナミクスが矛盾無く記述できていることがわかる。

以前の柳田-上原-九後の試みでは、Lagrangian の可能な独立項を  $L_A$  や  $L_V$  の形には書かず、多分、 $a = 1$  に対応する場合の Lagrangian

$$L_A + L_V \propto \text{Tr}[(D_\mu \xi_L \cdot \xi_L^\dagger)(D^\mu \xi_L \cdot \xi_L^\dagger) + (D_\mu \xi_R \cdot \xi_R^\dagger)(D^\mu \xi_R \cdot \xi_R^\dagger)]$$

だけしか気づかなかったのではないか、すなわち L-R crossterm

$$L_A - L_V \propto \text{Tr}[(D_\mu \xi_L \cdot \xi_L^\dagger)(D^\mu \xi_R \cdot \xi_R^\dagger)]$$

も不変量であることを見落としていたのではないかと思う。

とにかく、この  $a$  parameter の発見のおかげで、 $\rho$ -meson が HLS の dynamical gauge boson の実例だとする見方が、一挙に不可能から可能である、という全く逆の結論に変わったのである。これは、HLS の gauge boson が dynamical になるという現象が、単に 2次元時空のおもちゃ理論だけで起こっているのではなく、自然界で普通に起こっている現実的なことだということを示唆する、たいへん重要な認識だ、ということで早速論文を書こうということになった。しかし、この仕事の成立の経緯を考慮して (仙台にいる) 柳田さんと (広島にいる) 上原君にも入ってもらい、(京都の) 私と坂東さん、(名古屋の) 山脇さんの 5人の共著で論文を書くことにした。柳田-上原と、坂東-山脇 のどちらとの共同研究が無かったも、この論文が書かれる事は無かったらと思うからである。

この仕事の意義は、二つある。一つは、この仕事の最初の動機であった非線形表現に内在する HLS がこの世界のゲージ対称性の起源である、という可能性を示したことである。W boson も、photon も、GUT gauge boson も皆、HLS の dynamical gauge boson として説明できるかもしれない！ しかし、これについては、「そもそも、coset  $G/H$  の非線形表現の Lagrangian は、常に  $G_{\text{global}} \times H_{\text{local}}$  不変な形に書けるが、そのゲージ不変性は勝手に手で導入した auxiliary  $H_{\text{local}}$  gauge 場のせいであり、redundant な変数の導入によってもたらされた幻、*fake symmetry*、にすぎない。」という批判もある。しかし、‘通常’のゲージ対称性といえども、Seiberg がいみじくも言ったように、“Gauge symmetry is not a symmetry” であって結局は理論記述の redundancy に過ぎない。Massless の gauge boson が現れる場合だけは、redundant な vector 場による記述が避けられなくなるが、自発的に破れた

ゲージ対称性となるとそもそもそのゲージ不変性存在の「証拠」と言えるものは、hidden であろうが explicit gauge symmetry であろうが、破れが大きくなるにつれ益々あいまいになってくるのである [16]。

もう一つは、私が当初あまり予期していなかった点であるが、ハドロンの低エネルギー有効理論としての有用性である。QCD 等の強い相互作用系の低エネルギー領域で、南部-Goldstone boson と vector boson を統一的に対称性と consistent に扱う方法を与えるので、現在では、核物理学分野の人たちに良く使われている。

実は、HLS を上述の *fake symmetry* と (多分) 最初に呼んだのは Georgi である。彼はそれでも、HLS のゲージ場を導入すれば、有効作用の中の各相互作用項がどういう次元の相互作用になるのかの counting を正しく行う上でたいへん有用であることは評価している。形式的な有用性で言えば、HLS でゲージ対称性をあらわにすると、いろんなゲージ固定がとれるということもある。それに、この PRL 論文を書く際に山脇さんに指摘されて初めて認識したのであるが、この HLS の考え方は、1960 年頃の J.J. Sakurai による  $\rho$ -meson を massive Yang-Mills 場として記述する approach [17] に対して、その理論的根拠を与えるものと見なすこともできるのである。<sup>3</sup>

HLS のハドロンの物理学におけるこのような popularity をもたらしたのには、冒頭で述べたように、その後の山脇さんの功績が大きい。中でも、山脇さんの主導で書くことになった Bando-Kugo-Yamawaki の “Nonlinear Realization and Hidden Local Symmetries,” Phys. Rept. **164**, 217-314 (1988) が多くの引用数を誇っている。

これに関連して、数年前にネット上で、日本物理学会の 50 周年 (1996 年) 記念の特集中に武田暁先生の「素粒子の究極理論を求めて」という記事 [18] があって、偶々目にしたところに、「クォークが直接には顔を出さないエネルギー領域でのハドロンの相互作用を記述する有効理論を、いかにして構築するかが重要な鍵となるが、 $\rho$  中間子等のベクトル中間子を有効理論に現れるゲージ粒子として理解すること等を含む現実的な枠組が出されている。これらの研究の中で坂東・九後・山脇等による精力的な研究等は非常に評価すべき成果である。<sup>15)</sup>」

とあった事にはたいへん驚いた。Ref.15) は上述の Physics Report である。

<sup>3</sup>余談であるが、実は先に述べた 1982 年 9 月からの私の CERN 滞在時に、J.J. Sakurai さんも短期滞在で来られていて、私や私の家族に話しかけられたり短いあいさつを交わすくらいの顔見知りになった。10 月の終わり頃のある日、週末にかけて小旅行に行こうという出発前に家族全員で CERN の食堂に立ち寄った時、偶々、また桜井さんに会った。これからちょっと小旅行に行きます、じゃあ楽しんでらっしゃい、とあいさつを交わして出発したが、それが桜井さんとの最後の会話になってしまった。その週末に動脈瘤破裂で一人で滞在中の宿舎で亡くなられていたのを、週明けに研究所に戻ってきて知った。桜井さんとは結局、物理の話の一回もする機会が無かったのが残念である。その後私がこのような HLS の dynamical gauge boson として  $\rho$ -meson を捉え直す仕事をするとは、その時は考えもしなかった。桜井さんが我々の仕事を知ったらどういふ評価をされたらだろうか？ 喜ばれたらだろうか、単なる書き換えだと反発されたらだろうか。是非とも知りたかった、と思う。ついでながら、山脇さんがアメリカでのある学会で HLS の話をしたところ、Coleman が “ingenious” だと褒めてくれた、と山脇さんから聞いた事がある。

## 参考文献

- [1] W. Buchmuller, R. D. Peccei and T. Yanagida, "Quasi Nambu-Goldstone Fermions," Nucl. Phys. B **227** (1983), 503;  
"Quarks and Leptons as Quasi Nambu-Goldstone Fermions," Phys. Lett. B **124** (1983), 67;  
W. Buchmuller, S. T. Love, R. D. Peccei and T. Yanagida, "Quasi Goldstone Fermions," Phys. Lett. B **115** (1982), 233-236.
- [2] E. Cremmer and B. Julia, "The SO(8) Supergravity," Nucl. Phys. B **159** (1979), 141-212.
- [3] T. Kugo and S. Uehara, "Conformal and Poincare Tensor Calculi in  $N = 1$  Supergravity," Nucl. Phys. B **226** (1983), 49-92;  
"Improved Superconformal Gauge Conditions in the  $N = 1$  Supergravity Yang-Mills Matter System," Nucl. Phys. B **222** (1983), 125-138
- [4] M. Bando, T. Kuramoto, T. Maskawa and S. Uehara, "Nonlinear Realization in Supersymmetric Theories," Prog. Theor. Phys. **72** (1984), 313;  
Prog. Theor. Phys. **72** (1984), 1207.
- [5] T. Kugo, I. Ojima and T. Yanagida, "Superpotential Symmetries and Pseudonambu-goldstone Supermultiplets," Phys. Lett. B **135** (1984), 402-408.
- [6] M. Bando, T. Kuramoto, T. Maskawa and S. Uehara, "Structure of Nonlinear Realization in Supersymmetric Theories," Phys. Lett. B **138** (1984), 94
- [7] T. Kugo and T. Yanagida, "Unification of Families Based on a Coset Space  $E_7 / SU(5) \times SU(3) \times U(1)$ ," Phys. Lett. B **134** (1984), 313.
- [8] W. Buchmuller, R. D. Peccei and T. Yanagida, "Weak Interactions of Quasi Nambu-goldstone Fermions," Nucl. Phys. B **231** (1984), 53-64.
- [9] T. Kugo, S. Uehara and T. Yanagida, "Weak Bosons as Composite Gauge Fields of Hidden Symmetries," Phys. Lett. B **147** (1984), 321-324
- [10] H. Eichenherr, "SU(N) Invariant Nonlinear Sigma Models," Nucl. Phys. B **146** (1978), 215-223 [erratum: Nucl. Phys. B **155** (1979), 544]
- [11] A. D'Adda, M. Luscher and P. Di Vecchia, "A  $1/n$  Expandable Series of Non-linear Sigma Models with Instantons," Nucl. Phys. B **146** (1978), 63-76;  
"Confinement and Chiral Symmetry Breaking in  $CP^{n-1}$  Models with Quarks," Nucl. Phys. B **152** (1979), 125-144.

- [12] T. Kugo and P. K. Townsend, "Symmetry Restoration and Gauge Field Dynamics in the  $CP^{(N-1)}$  Model," *Phys. Lett. B* **101** (1981), 82-84.
- [13] R. Ferrari and L. E. Picasso, "Spontaneous breakdown in quantum electrodynamics," *Nucl. Phys. B* **31** (1971), 316-330.
- [14] N. Nakanishi and I. Ojima, "Proof of the Exact Masslessness of Gravitons," *Phys. Rev. Lett.* **43** (1979), 91.
- [15] T. Kugo, H. Terao and S. Uehara, "Dynamical Gauge Bosons and Hidden Local Symmetries," *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **85** (1985), 122-135.
- [16] ゲージ対称性の意味をめぐっての議論は、Yang-Mill 論文 50 周年の基研研究会「場の量子論 2004」での私の講演記録を参照ください：九後 汰一郎, 「ゲージ理論をめぐって : Yang-Mills 50 年」, *素粒子論研究* **110** (2004), 3 号, C22-C35.
- [17] J.J. Sakurai, *Currents and Mesons* (Univ. Chicago Press, Chicago, 1969).
- [18] 武田 暁, 「素粒子の究極理論を求めて」, *日本物理学会誌* **51** (1996), 5 号, 316-323.