

思えば遠くに来たもんだ

基礎物理学研究所 2026年

柳田勉

新しい素粒子物理学を切り拓きたい。

誰にも分っていない

ではあんたは何故ここにいるの？

若手が分かっているのは時間軸と空間軸のスケール。それを語るべきとを感じるから

時間軸って、どのくらい粘れば先が見えてくるの、なんであきらめず考え続けたのという問いの私の答え

空間軸って、議論できる仲間がどのくらい沢山いたの、どのくらいdiversityが広がったのという問いの私の答え

時間軸を説明するには自分の歴史をさかのぼらなければならない。これは極めて危険な作業。人は自分を真実以上に偉大に見せようとするから

これから私の話す事は40%差し引いて聞いて欲しい……自分としては真実を忠実に話すつもりだが……

では何の話をしようか？

長く生きてきたので沢山あるが、全部は話せない

一番若い時の話の方が役に立つかな？あまり意外性はないがSeesawかな

この名前を付けたのは自分だしな

60年前までタイムトリップをしてみよう
時は**1967年**、WeinbergのModel of
Leptonが出る。私はまだ高校生。この差は
最後まで大きかった。

1972年4月、大学院に入学

1973年5月、素粒子物理の将来と自分の能力
に絶望して就職活動を始める。**(日記あり)**
就職先が内定する。

1973年7月、CERNで中性カレント3例発見。
みんな騒いでいるが、自分にはそのすごさは
理解できず、勉強始める

（この頃小林—益川模型が提案される。4年
間ぐらい全く知らなかった。知らなかったこ
とが幸いだったことが後で分かる。）

この年の暮に就職を断る。担当の先生に叱ら
れる。

1973年秋、先輩たちが宇宙線の中で長寿命で発見された丹生粒子を第4のクォークだという小川先生の考えを議論していた。その質量は約1.5GeV。今でいう **charm quark**

即、3GeV近辺に $(c-\bar{c})$ bound stateがあるはずと気づく。 $e+\bar{e}$ の実験で見つかるはずと考えた。

しかし論文は書かなかった。こんなことで論文になるとは思っていなかった

1974年2月、SU(5) GUTの発見 Georgi, Glashow

1974年11月、J(Psi) 粒子が $e^+\bar{\nu}_e e$ 実験で発見。これは後に c と $\bar{c}$ のbound stateとなる。私の予言通り...小川先生に叱られる。

J(Psi)粒子は何なのか？

中性カレントを含む理論は何なのか？

この2つの問いが並行して始まって行く。

GUTの風も少しつつ吹き始める。

1974年4月、博士課程に進学、米沢先生との
禅問答が始まる。ほぼ毎日、しかも3年間以
上続く。これが私の基礎をつくる。

GUTの発見により、gauge理論を信じる。特
にWeinberg Modelは正しいと思う。

しかし、1974年から1976年にかけて中性カ
レントの実験結果はWeinberg Modelを否定
する。

実験結果は中性カレントはVector型というものだった

Weinbergは自分の模型を否定して新しいModelを提案する。

即、井上さん達はSU(6) GUTを提案する。

Inoue, Kakuto, Nakano (1977)

Non-abelian gauge theoryの量子化に成功

Kugo, Ojima (1977)

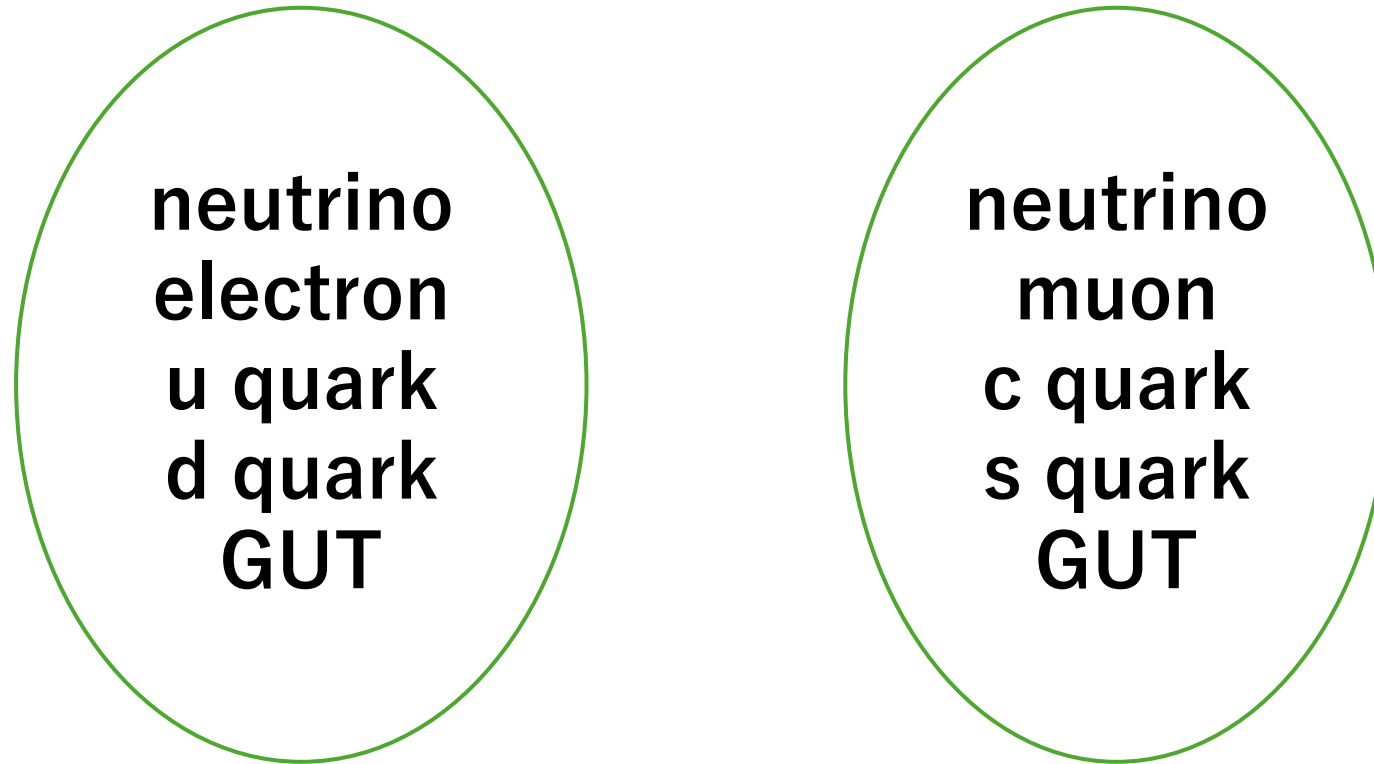
井上さんも九後さんも私とほぼ同年代、
彼らの成功を見て焦る。もう26歳だ。しかも
Weinberg自身が自分のModelを修正する。

私は、元のWeinberg Modelを信じる。そして、
その次の理論を考え始める。それもGUT
とは違う軸である。仲間のいない道であった。

Horizontal Gauge Symmetryを提案する。

Maehara, Yanagida (1977-78)

Horizontal Gauge Symmetry



← Horizontal SU(2) →

次はKaonの崩壊でのCPの破れだと考えた

2行2列のCabibbo matrixでは弱い相互作用でCPは破れない。しかし、horizontal gauge 相互作用にphaseが残ることを発見。CPの破れを説明できた。

この時、小林、益川を知らなかった

我々のモデルは、Wolfensteinのsuperweak現象論のモデルであることを後で知る。

この頃、世界の動きには興味はなかった

私の知るのは、九州、広島、京都ぐらいだった。当時、箱根より向こうには鬼が住むと言われていた。横浜から来た友人に聞くと「その通り」だと言っていた。

しかし、理由は忘れたが、核研に1っか月間滞在することになった。恐る恐る研究所を訪れた。やっぱり鬼がいた。寺澤英純さんである。確かに顔は鬼のようだったが、とてもやさしい先生であった。私を歓迎してくれた。

寺澤さんは、quarkやleptonのcomposite模型を考えていた。それらは、wakam, crom, hakamという、基本fermionから構成されている。ものすごく美しい考え。このhakamはhorizontal symmetryを担うものと言える。偶然にも、似た考えの方が東京にいたことですごく勇気づく。これは1977年の夏。

この頃、中性カレントはWeinberg modelと矛盾しないという実験結果が増え始める。

1975-77年、tau leptonの存在が実験により
確かになって行く。

1978年、Horizontal symmetryをSU(3)_H
に拡張する。

この年の3月、九大で**春の学校**が開催。井上
さんがSU(6) GUTのreviewをやる。理論が
自動的にanomaly freeであることを強調

この春の学校がseesaw発見の道の**始まり**と
なる。

この頃anomalyの重要性を理解していなかった。Weiberg modelさえanomalousである

ベンチで休憩している井上さんに質問をした。
「本当にanomaly freeでないのだめですか？」勿論、「だめだ」という答え

ショックだった。SU(3)_Hはanomalousだからだ。anomalyを消すためには**右巻きニュートリノ**を入れなければならない

右巻きを入れれば、ニュートリノがquarkやleptonと同じぐらいの質量をもってしまう

では何故かるい？

解答を得るのに秋までかかってしまう。約半年間の苦闘だ。

なんでそんなにかかったの？

Horizontal symmetryが破れてしまえばN_R
はただのsinglet

低エネルギー領域に残っていてもいいはず。でも単独には質量は持てない。何かおかしい？

米沢先生に質問する。「Pauliの論文にヒントがあるかもしれない」と言うsuggestion

毎日図書館通いが始まる

夏休み、ついにPauliの論文を見つける

反粒子は元の粒子の逆のchiralityを持つ

を証明していた。つまり、 N_R のcharge conjugateは左巻き。ならば

N_R は自分の $(N_R)^c$ と質量を持つ！

後で知ったが、これはMajorana粒子と言う

めでたい、これでN_Rはいなくなった。でも
なんだか変だ？

Heisenbergの不確定性原理を思い出す。

$$\Delta t \times \Delta E \sim \hbar$$

すると、 $\Delta t \sim 1/M$ の時間にneutrinoはN_Rと
結合できる。その結果neutrinoは

m^2/M の質量を持つはず

これは2行2列のmass matrixの対角化で表されるはず

どうやって？

また図書館通いが始まる

Pauli-Grusey変換を見つける。

2成分Weyl fermionと4成分real fermionが等価であることを証明していた

何という事はない

$$N = N_R + (N_R)^c$$

$$nu = nu_L + (nu_L)^c$$

と書けるということ

すると、質量行列が…………と書ける

$$\begin{vmatrix} 0 & m \\ m & M \end{vmatrix}$$

小さい方の固有値が m^2/M なのは自明

こうしてneutrinoが小さな質量を持つことを示した。

1978年の暮

Seesaw mechanism の発見

完全に信じた。 KEKの会議で発表

Yanagida (1979, Feb)

当時、ニュートリノはmasslessと信じられていた

何でみんな興味をもったの？

Gell-Mann達が同じ時期に seesaw mechanismを見つけたからだと思っていた

後で分かったが、当時、背後にもっと深い理由があった

GeorgiのSurvival Hypothesis

~1979

高いスケールで対称性が破れると残った対称性で保証されない粒子は消えていく

‘ t Hooft のNaturalness

1979年 8 月の講演

massless粒子がいるならそのmassを禁止する対称性があるはず

Seesawまでの時間軸と空間軸を見てみよう

時間軸：Horizontal symmetryの提案から数えると3年かかっている。信じ続けたことが大事だった

空間軸：これは膨大だ。米沢先生との禅問答は自分の基礎を作った。小川先生のcharmの発見、理論研の木村先生からの支援の言葉、井上さんとの会話がなければ、絶対seesawを生み出せなかった。まだまだ続く……………

寺澤さんがcomposite模型の立場から
Horizontal symmetryを考えていたのは、精
神的な支えだった。Nambu-JonaLasinoは
考えの突破口を与えた。原論文から分かる。

理論から模型、実験結果そして人と分野の
diversityの広さがseesawの発見につながっ
ていったのは明白

これはAIとの戦いのキーポイントになる。懇
親会でみんなと話そう

さて中性カレントの話にもどろう

1978年8月東京会議、J.J.Sakurai (桜井)さんの総合講演で全てのデータがWeinberg-Salam模型と整合していることが示される。中性カレントの異常現象は全て消え去る。

新たな理論の出現を期待していた若者は非常に落胆していく。

1979年4月、東北大に移動。今で言うPDである。半年後に教養部に移動。助手である。江幡先生に感謝する。

ここで吉村さんに宇宙論を学ぶ。

1981年10月、ミュンヘンにPDとして移動。
R. Pecceiとcomposite quark/lepton そしてcomposite weak bosonの研究、これがその後の基礎となる

1982年10月、九後さんがミュンヘンの研究所に来る。

E_7 non-linear sigma modelの論文を発表
Kugo, Yanagida (1983)

1983年、non-linear sigma modelを調べ始める。C. Leeとローメソンがhidden local symmetryのgauge 場という考えを議論していた。時間切れとなる。

weak bosonがあるhidden local symmetry
のcomposite gauge bosonである可能性を
九後さんと調べ始める。これが後にローメン
ンの論文の基礎になる。

weak bosonについては後に上原さんを入れて
論文にする。 **Kugo, Uehara, Yanagida (1984)**

J.J.Sakuraiさんがミュンヘン滞在（1年間）

これは大切な話かも

1960年、J.J.Sakuraiはローメソンをgauge場だと強く主張

J.J. Sakurai (1960)

Weinbergは応用場所を間違っている, weak interactionに応用すべきだと考えた。

桜井さんは、1年間、私と同じ研究所に滞在
1981年10月～1982年8月

まだ、ローメソンをgauge場と信じていた

当時、Pecceiと私はweak bosonを
composite粒子と考えていた (1981-82)

その考えを、九後、上原、私はnon-linear
sigma modelに存在するhidden local
symmetryを使い定式化する。 (1983-84)

日本に帰国、九後さんに会いこの考えをロー
メソンに応用することを提案 (1984)

Weinbergとの逆転劇

ローメソンをhidden local symmetryの
gauge場と定式化 Kugo, Uehara, Yanagida (1984年
3月ごろ) 論文は書いたが未発表…… > Bando et al (1985)

坂東さん達は理論の整備をはじめる

私はローメソンのinstantonを調べ始める

Ezawa, Yanagida (1985, Jul)

これが後のLeptogenesisの発見へと繋がる

Leptogenesisを発見

Fukugita, Yanagida (1976)

1976年4月からDESYに滞在

夏の会議で't HooftがLeptogenesisを極めて高く評価する。

DESYでこの話をした。多くの人で超満員

次の年の春に帰国

基研からLeptogenesisの話をするように招待される。喜んで引き受ける。

2か月後に基研のセミナー室で講演をやる

出席者は、福来さん、牧さんと知らない学生さんの3人だけだった。**ストリング全盛期**

こんなんなら招待するな！

さて、Seesaw Mechanism → Hidden
Local Symmetry → Leptogenesisと順風満
帆に見えるだろう。しかし内面はそうでない

まだ、neutrino振動さえ見つかってはいない。
それよりも辛いのは先が見えないこと。何を
やるべきだろうか？ 37 - 40歳のころ、
先の物理が見えなくなり悩む。(日記あり)
宇宙項への姿勢を自問し始める

研究者には、三つの重要な峠があるような
気がする

30歳前後 40歳前後 65歳後 である

今日は前者についてお話をした。後者について
ではまた別の機会にお話したい。

最後に、最近提案しているNo Scale Gravity
を黒板を使い説明したい

No Scale Gravity

Mukaida, Hong, Yanagida (2025)

$$L = f(\phi)^2 R + (\partial \phi)^2 - k(\phi)^4 + L_{\text{SM}}$$

$$L_{\text{SM}} = (\phi)^2 |H|^2 + (\phi) \text{NN} + \dots$$

NO Mass parameters !

-> *Scale Invariant Theory*

Cut-Off = $f'(\phi)$

Weyl transformation;

$$g_E = O^2 g, \quad O^2 = f(\phi)^2 / (M_P)^2$$

$$L_E = M_P^2 R_E + (\partial \chi)^2 - k(M_P)^4 \\ + O^{-4} L_{\text{SM}}$$

**The Einstein Gravity + a dilaton χ + CC + SM
scale transformation = a shift symmetry of the χ
 $\chi \rightarrow \chi + \text{constant}$**

But we have a singularity at $\phi=0$ point

We remove $\phi=0$ point. It is possible since $\phi=0$ is a fixed point of the scale transformation

**However, we have a disconnected ϕ space;
 $\phi<0$ region + $\phi>0$ region**

We impose Z_{2n} symmetry to identify them

The physical region is $\phi>0$ region.

Z_4 symmetry with $\phi(+2)$

ϕNN is allowed

Here, we assume $N(+1)$

**The right-handed neutrino N gets a large
Majorana mass**

However, the Z_4 has gauge anomalies
We can cancel the anomalies introducing the
standard quarks and leptons!!!

Then, we have three sets of fermions:

$T(1)$, $F(1)$ and $N(1)$

We have naturally the seesaw mechanism and the
leptogenesis

Hell, Pereira, Yanagida (1926)

A little extension gives a high-quality QCD axion !!!

O(3) Extension

Pereria, Hong, Ferreria, Yanagida (2026)

Introduce three ϕ_i ($i=1-3$) and assume O(3). The radial component = the original ϕ . Then we have two angle freedoms. All are massless. We then introduce explicit breaking :

$$O(3) \rightarrow O(2) \rightarrow R_4$$

Then we have two massive bosons which are identified with the Fuzzy DM and the DE axion. Surprisingly, we have a parameter region where the DE behaves effectively like a phantom $w < -1$.