

NATURA EST
ABUNDANS



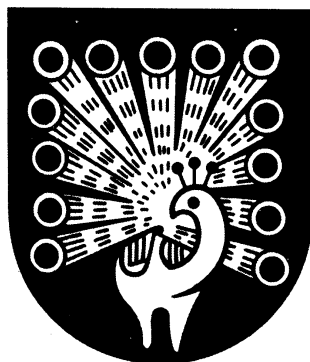
NATURA EST
SIMPLEX



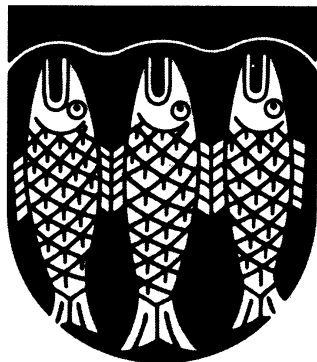
素粒子論研究

創刊75周年特別号

NATURA EST
FORMOSITAS



NATURA NON
FACIT SALTUM



2023年12月

素粒子論グループ

まえがき

『素粒子論研究』は2023年10月に、1948年10月の創刊から75年を迎えた。これを記念する75周年記念特別号として、2023年4月から10月にかけて素粒子論研究・電子版40巻に29点の記事をWebで公開した。

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soken.editorial/vol/vol40.html>

本冊子「素粒子論研究 創刊75周年特別号」は、電子版40巻を次のように企画ごとにまとめ直したものである。

- 素粒子分野の日本のノーベル賞受賞者のノーベル賞講演の日本語訳
- 素粒子メダル受賞者の寄稿文
- 素粒子メダル功労賞受賞者の寄稿文
- 『素粒子論研究』歴代編集長の寄稿文

以下、今回の75周年記念企画の経緯について記しておく。25周年、50周年に続いて75周年特集を考えようということは、2022年の編集委員の間でいつともなく話題になった。当時のメンバーは森田健編集委員長の下、酒谷雄峰、浜中真志、橋本幸士、小沼通二、中田仁（原子核分野から）、横山大輔（素粒子分野から）の7人だった。2022年度末に橋本は辞任、素粒子論委員会選出の委員は、板垣直之（原子核分野から）、佐藤亮介（素粒子分野から）に交代した。

75周年の企画内容を、素粒子・宇宙分野の日本のノーベル賞受賞者のノーベル賞講演の翻訳、素粒子メダル（素粒子メダルと素粒子メダル功労賞）受賞者によるエッセイ、(25周年記念に倣って)歴代編集長による回想、としようということは、スムーズに決まった。また、これに先立ち、素粒子論研究のウェブサイトのリニューアルも行い、素粒子論研究・電子版の記事をより読みやすくする環境を整えた。さらに、冊子版の廃刊から電子版への移行期における記録を残す試みも行った。75周年記念特別号の記事については、皆様のご協力により、29点の記事が集まった。素粒子・宇宙分野の日本のノーベル賞受章者は7人、その中の湯川、朝永、益川の日本語版はすでにあるので、対象は2002年の小柴と2008年の南部、小林、2015年の梶田の4人である。小柴、南部のご遺族と小林、梶田の了承を得て、翻訳掲載の許可を得るためノーベル財団に連絡した。少し時間がかかったがノーベル財団から許可が得られ、翻訳者候補を選定してお願いしたところ4人とも快諾してくれた。素粒子メダル受賞者の中には他界された方や連絡がとりにくい方もいたが、19人に執筆していただけることになった。2023年4月からのオンライン公開を始めた後に決まった2023年の素粒子メダル受章者にも執筆をお願いしたところ、短期間で書いてくださった。75周年特別号には間に合わなかったものもあったが、最終的に集まった原稿は19点だった。今回は間に合わなかったものや、今後の素粒子メダル受賞者によるエッセイなども、ご投稿いただければぜひ掲載していきたい。歴代編集長からも多くの方にご協力いただき、6編が集まった。

ノーベル賞講演の翻訳では、翻訳者によるその後の当該分野の進展や教育的なコメントが加えられたものもあった。また、素粒子メダル受賞者によるエッセイでは、論文からは窺い知ることができない研究の背景が生き活きと描かれており、どれも非常に興味深いものである。いずれも、特に若い研究者にはとても有益な記事であり、ぜひ一読していただきたい。また、歴代編集長の記事では、当時の素研編集部雰囲気鮮明に記されており、素粒子論研究の歴史を記す文書として非常に価値の高いものになっている。幅広く様々な人に読んでいただくと幸いである。

素粒子論研究編集部

目次

第 I 部 ノーベル賞講演翻訳	1
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 1 「ニュートリノ天体物理学の誕生」小柴 昌俊 (2002 年 12 月 8 日) 訳者 中畑 雅行 (東京大学宇宙線研究所)	2
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 10 「大気ニュートリノ振動の発見」梶田 隆章 (2015 年 12 月 8 日) 訳者 奥村 公宏 (東京大学宇宙線研究所)	18
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 19 「素粒子物理における自発的対称性の破れ：分野間交流による実りの一例」南部 陽一郎 (2008 年 12 月 8 日) 訳者 米谷 民明 (東京大学名誉教授)	37
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 26 「CP の破れとフレーバー混合」小林 誠 (2008 年 12 月 8 日) 訳者 日笠 健一 (東北大学 高等大学院機構)	90
第 II 部 寄稿文：素粒子メダル受賞者	104
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 2 「素粒子メダル創設の思い」東島 清 (大阪大学名誉教授)	105
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 3 「断想 くりこみ理論研究の頃」亀淵 迪 (筑波大学名誉教授)	106
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 4 「素粒子メダル受賞の思い出」牟田 泰三 (広島大学名誉教授、福山大学理事、広島リカレント学院長)	110
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 5 「「素粒子論研究」に投稿し続けて 2/3 世紀」中西 襄 (京都大学数理解析研究所名誉教授)	113
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 6 「モノポール研究の思い出」荒船 次郎 (東京大学 宇宙線研究所)	123
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 7 「ゲージ理論におけるカイラル対称性の自発的破れ」東島 清 (大阪大学名誉教授)	125
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 11 「異分野へ挑戦した経験」坂東 昌子 (NPO 知的人材ネットワークあいんしゅたいん)	126
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 12 「Hidden Local Symmetry or Fake Symmetry?」九後 汰一郎 (京大基研)	139
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 14 「マヨナラニュートリノ系での CP の破れとその検証法」高杉 英一 (大阪大学名誉教授)	146

素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 15	
「研究前線の片隅から」土井 勝（大阪医科薬科大学名誉教授）	149
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 16	
「マヨラナニュートリノの研究の思い出」西浦 宏幸（大阪工業大学名誉教授、大阪大学非常勤講師）	151
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 20	
「あひるの水かき—大学院で学んだこと」鈴木 久男（北海道大学）	153
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 21	
「ランダム面—ゲージ場、量子重力、ひも理論の交差するところ—」川合 光（National Taiwan University）	160
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 23	
「北ヨーロッパ、ポスドクの旅」河本 昇（北海道大学大学院理学研究院・名誉教授）	168
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 27	
「「弦から一般相対性理論」50年目の再訪」米谷 民明（東京大学名誉教授）	177
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 28	
「まだ見ぬ新粒子を稀少過程で探るとのこと」林 青司（日本物理学会）	210
第 III 部 寄稿文：素粒子メダル功労賞受賞者	213
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 8	
「素粒子奨学会—2つの素粒子メダル功労賞—」小沼 通二（慶應義塾大学名誉教授）	214
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 16	
「Science of all in the family 未来への研究体制への思い」坂東 昌子（NPO 法人知的人材ネットワーク あいんしゅたいん）	220
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 24	
「格子 QCD から計算科学へ」宇川 彰（日本学術振興会 世界トップレベル拠点形成推進センター）	226
第 IV 部 寄稿文：歴代編集長	235
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 9	
「75年目の編集長の日常」森田 健（静岡大学理学部）	236
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 13	
「ゆるい素粒子論グループ」橋本 幸士（京大理）	238
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 18	
「素粒子論研究の完全オンライン化の経緯についての断片」尾田 欣也（東京女子大学）	242
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 22	
「『素粒子論研究』と益川先生の思い出」福岡 将文（京大理）	245
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 25	
「機関誌『素粒子論研究』を救った 20 世紀末 DX (Digital Transformation) の大波」青木 健一（金沢大学名誉教授）	246
素粒子論研究・電子版 Vol. 40 (2023) No. 29	
「『素粒子論研究』とのつきあい」小沼 通二（元編集長、慶應義塾大学名誉教授）	274
編集後記	291

第I部

ノーベル賞講演翻訳

ニュートリノ天体物理学の誕生

ノーベル賞講演

2002 年 12 月 8 日

小柴昌俊

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学素粒子物理国際研究センター

翻訳 中畑雅行 東京大学宇宙線研究所

私の講演の一部は、前の講演者がすでにカバーしてくださったので、省略できてとても助かります。私の講演をさらに詳しく知りたい方は、私の総説論文「Observational Neutrino Astrophysics」[1]をご覧ください。

私はニュートリノ天体物理学の誕生について話します。この誕生の前に非常に重要な研究が行われましたが、それについては Davis 教授がご説明されました [2]。それは、 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl}$ から $e^- + {}^{37}\text{Ar}$ への反応を利用した放射化学的手法による研究でした。Davis 教授は観測されたニュートリノの強度が、理論的に予想された値の $1/3$ しかないことを発見しました。これはニュートリノ天体物理学への着想ということができ、私たちが実際に太陽ニュートリノに本格的に取り組み始めるきっかけとなりました。

私は二つの実験についてお話しします。1 番目の実験はオリジナルの KamiokaNDE ですが、「画像型水チェレンコフ検出器」とよんでもよいもので、表面の 20%を光電子増倍管が覆い、検出器内の水の総質量が 3,000 トンの検出器でした。この検出器には約 300

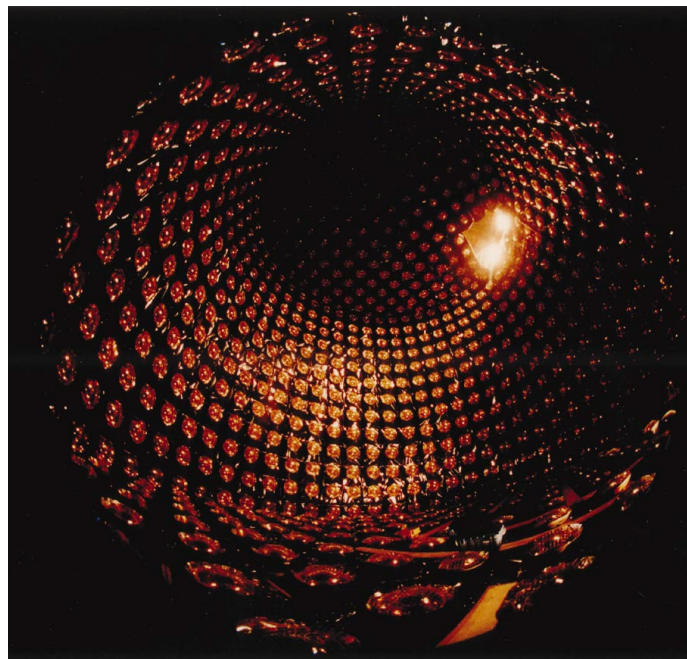


図 1. KamiokaNDE の内部。



©Peter Menzel Photography

図 2. 新たに開発された大口径光電子増倍管。

万ドルかかりました。この実験は、太陽ニュートリノの天体物理学的検出の実現可能性を示すことを目的としていました。2 番目の実験は Super-KamiokaNDE (S-K) です。同じタイプの検出器ですが、より優れた光感度を備えています。つまり、表面全体の 40% が光電陰極で覆われ、水の総質量は 50,000 トンです。この検出器の建設には約 1 億ドルの費用がかかりました。これは本格的な太陽ニュートリノ観測装置と考えられていました。

どちらの実験も、神岡鉱山の地下約 1,000 メートルの場所で行われました。2 つの実験の名称の末尾にある大文字の NDE は、もともと「核子崩壊実験(Nucleon Decay Experiment)」を意味していました。しかし、これらの検出器によってさまざまなニュートリノが検出されたことから、「ニュートリノ検出実験(Neutrino Detection Experiment)」とよぶようになりました。

図 1 に KamiokaNDE の内部を示します。側面だけでなく、上部と下部にも光電子増倍管の配列が見られます。この KamiokaNDE 実験の準備をしていたとき、米国でもっと大規模で同じタイプの実験が計画されていると聞きました [3]。この大きな実験との競争について、私たちは非常に真剣に考えなければなりませんでした。どちらの実験も、特定の種類の陽子崩壊、つまり $e^+\pi^0$ モードの検出を目的としていました。そのような特定のタイプの陽子崩壊の検出のみを目的としている場合、米国のはるかに大規模な実験で最初に

検出されることは間違いありません。では、小さな検出器で何ができるでしょうか？ 私たちはこの競争について非常に真剣に考え、大きな検出器との競争に打ち勝つ唯一可能な方法は、われわれの検出器の感度を米国の競合相手よりはるかに高くして、最も簡単な陽子崩壊モードを検出するだけでなく、他のタイプの陽子崩壊も測定することだと結論しました。それができれば最終的に、陽子はこの分岐比でこのモードに崩壊し、あの分岐比であのモードに崩壊するということができます。そうすれば、私たちの実験は、強い力、弱い力、電磁気力を統一する新しいタイプの理論である「大統一理論」への道筋を示すことができると考えました。

浜松ホトニクス株式会社のご協力により、超大型光電子増倍管を共同開発しました[4]。図 2 に示すように、この光電子増倍管の開発に成功したことを私はとてもうれしく思っています。

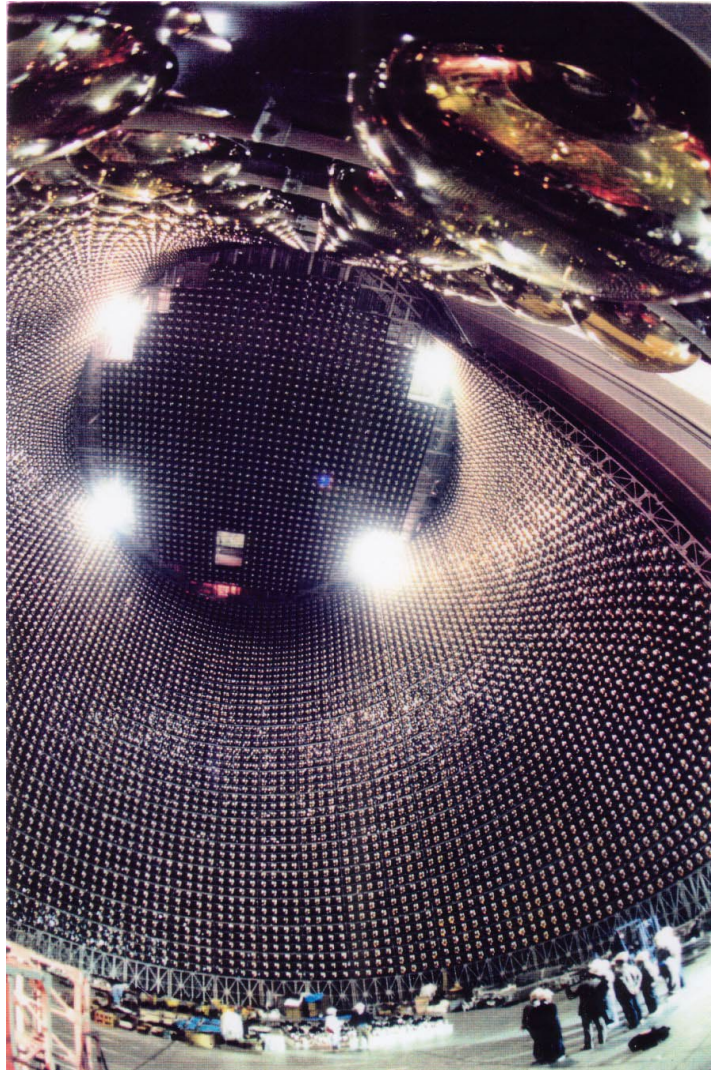


図 3. 魚眼レンズを通して見た S-K の内部。

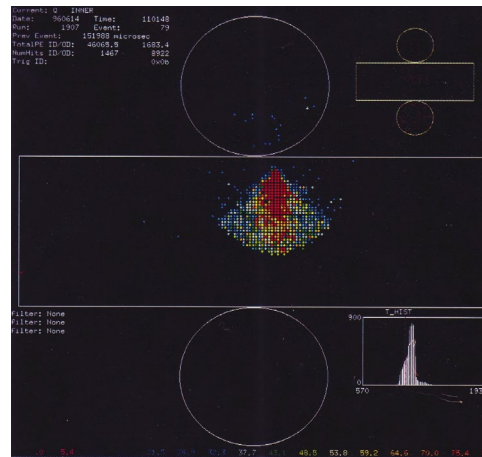


図 4-1. ミュー粒子が S-K に入射したとき。 図 4-2. 50 ナノ秒後。

図 3 に Super-KamiokaNDE 内部の魚眼写真を示します。他にもたくさんの光電子増倍管があり、全部で約 11,000 本の大口径光電子増倍管が見られます。

このタイプの検出器をご存知でない方が多くいらっしゃるかもしれませんので、Super-KamiokaNDE の性能をお見せしたいと思います。最初の例は、検出器を通過する宇宙線ミュー粒子の非常にスローな動画です。よく知られていますように、特殊相対性理論により、真空中では粒子は光速よりも速く移動することができません。ただし、水のような媒質中では、光速度自体が真空中の値の $3/4$ に低下します。したがって、粒子のエネルギーが非常に高い場合、その速度は水中の光の速度を超えることができます。そのような場合、高エネルギー、つまり高速度の粒子は、光の衝撃波である「チェレンコフ光」を生成します。チェレンコフ光は移動する荷電粒子の軌跡を軸に円錐状に放出されます。

図 4-1 は、ミュー粒子が検出器に入った直後の Super-KamiokaNDE の応答を示します。この図は、Super-KamiokaNDE 検出器の展開図を示しています。側壁をあるところで縦に切り、平らに広げ、上蓋を開き、下蓋を下ろした図です。ここでの各ドットは、光電子増倍管を表します。赤い光は、多くの光電子を受け取ったことを示しています。色の違いは、受け取った光電子の数の違いを示します。右下は、受光したチェレンコフ光の総数の時間プロファイルです。図 4-2 は 50 ナノ秒後のパターンを示しています。粒子がチェレンコフ光の波面よりも速く動いていることがわかります。さらに 50 ナノ秒後の図 4-3 は、チェレンコフ光がまだその途中にある間に、ミュー粒子がすでに底に達していることを示しています。粒子が水中を光速よりも速く移動していることがわかります。図 4-4、4-5、4-6 は、イベントのその後の展開を示しています。このように、この検出器で荷電粒子を詳細に観察できることがわかります。次の図、図 5 は、上が電子(e) 事象、下がミュー粒子(μ) 事象を示しています。これら 2 つの例を見ると、1 つは電子によるもので、もう 1 つはミュー粒子によるものであり、検出された光子の分布、特に光子の動径方向分布の違いを見ることができます。電子とミュー粒子は、質量が約 200 倍異なるこ

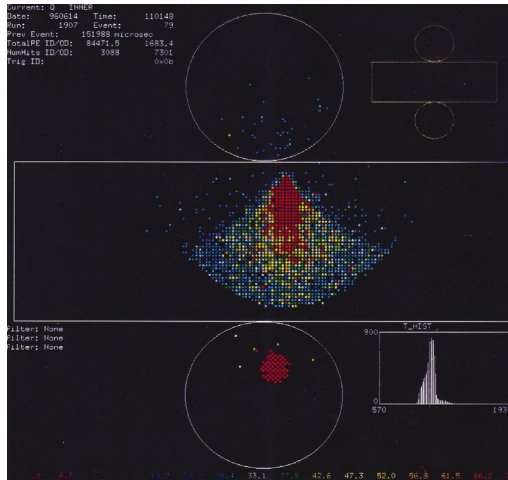


図 4-3. ミュー粒子が底面に到達。

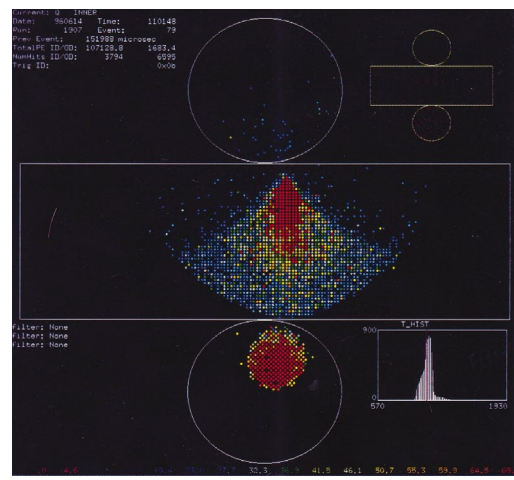


図 4-4.

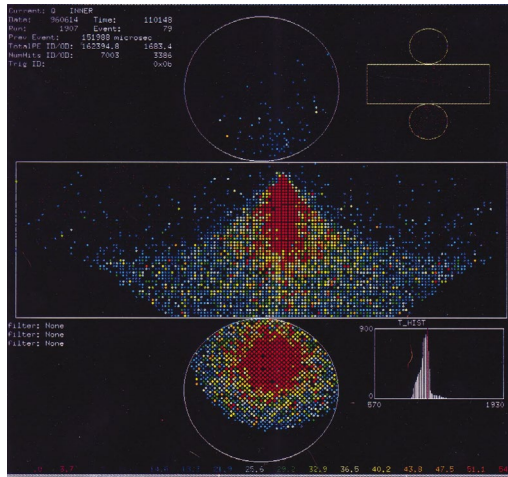


図 4-5.

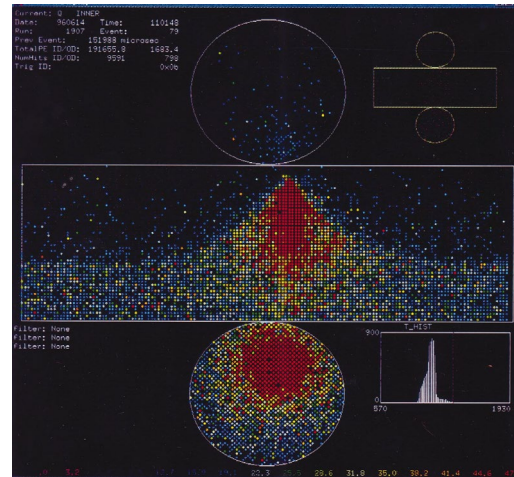


図 4-6.

とを除いて、非常によく似た粒子です。これは、水を横切る際に、重いミュー粒子は散乱が少なく、軽い電子は散乱が多いことを意味します。それだけでなく、電子はガンマ線を放出し、ガンマ線は電子と陽電子に転換されます。これらの低エネルギーの電子や陽電子は激しく散乱されます。したがって、これらの低エネルギー粒子が放出するチェレンコフ光は、上のイベントで見られるように広がって分布します。これらの光子の動径分布を定量的に測定することにより、 μ 事象と e 事象を 1% 以下の誤り確率で非常によく区別することができます。これはこの検出器の非常に優れた性能であり、最終的に「大気ニュートリノ異常」とよばれる現象を発見するに至りました。

古い KamiokaNDE は 4つの重要な結果をもたらしました。

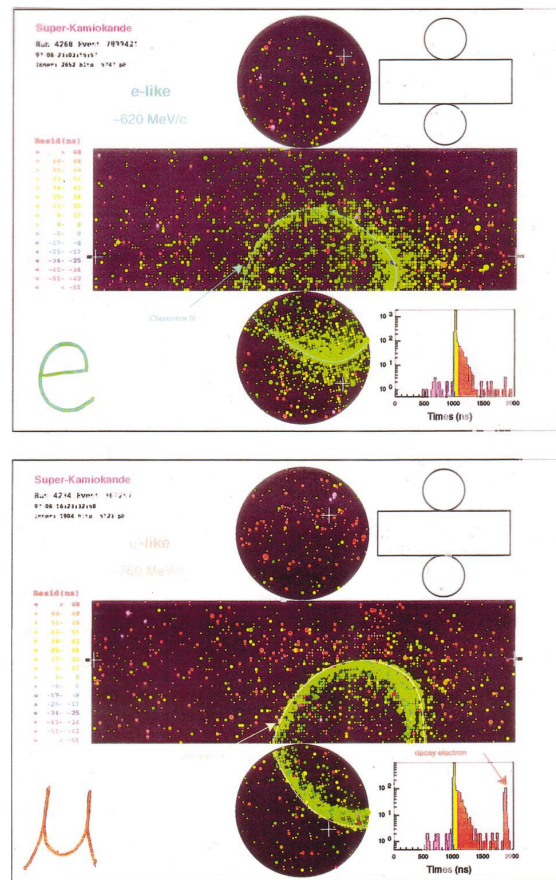


図5. 上はe事象、下は μ 事象。

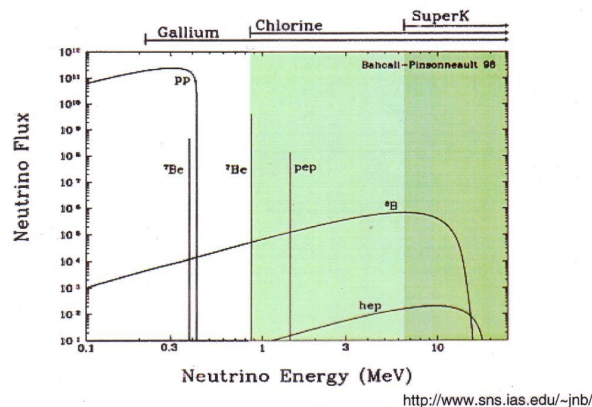
1つ目は、水中の電子との ν_e -e 散乱による太陽ニュートリノの天体物理観測です [5]。天体物理観測とは、必要なすべての情報が得られることを意味します。それらは、ニュートリノの到来方向、到来時間、およびスペクトル情報です。 ν_e -e 散乱の場合、電子の静止質量はわずか 0.5 MeV であるため、たとえば 10 MeV のニュートリノが入ってくると、衝突した電子はほぼ真正面方向に進みます。この反跳電子を観測することで、ニュートリノの到来方向をおおよそ推測することができます。また、反跳電子のエネルギースペクトルは、元のニュートリノのエネルギースペクトルと 1 対 1 の関係にあります。時間測定は 10 ナノ秒より正確です。

2つ目は、水中の陽子と反電子ニュートリノとの反応を用いた超新星ニュートリノ [6] の観測です。この反応により、 e^+ と中性子が生成されます。 e^+ は、それが発するチェレンコフ光によって観測されます。

3つ目は、いわゆる大気ニュートリノ異常の発見です [7]。前に述べましたように、 μ 事象と e 事象は確実に分離できるため、 μ 事象と e 事象を分けて観測することで、 ν_e に対する ν_μ の数の比を非常に正確に測定できます。有意度 4 シグマ以上の発見でしたが、この結果は後に Super-Kamiokande のデータにより 9 シグマ以上でしっかりと確認されまし

Solar Neutrinos

Standard Solar Model (SSM)



Solar Neutrino Experiments

	Target	Data / SSM (BP98)
• Homestake	^{37}Cl	0.33 ± 0.03
• Kamiokande	e^- (water)	0.54 ± 0.07
• SAGE	^{71}Ga	0.52 ± 0.06
• GALLEX	^{71}Ga	0.59 ± 0.06
• SK	e^- (water)	0.475 ± 0.015

図 6. (上) 標準太陽モデルが予想するスペクトル、(下) 実験結果と標準太陽モデルとの強度の比較。

た。

陽子崩壊に関心を持つ人が最近は少なくなってしまいましたが、KamiokaNDE で陽子崩壊が観測されなかったことで、良く知られた SU(5)ゲージ群に基づく大統一理論[8]は否定されました。

前の講演者はこの図、図 6 (のグラフ) を示しましたので、ここでは詳細には触れませんが、さまざまな実験のしきい値エネルギーに着目してください。

図 7 は KamiokaNDE が太陽ニュートリノの方向情報を容易に観測できることを示しています。等方的に分布するバックグラウンドのうえに、太陽から地球へ方向にあたる場所にイベントの蓄積があることが分かります。

次の図 8 は、エネルギースペクトルを理論予想に対する比で示しています。この図から、スペクトルの形は理論予想とあまり変わらないけれど、強度はほぼ半分になっていることが分かります。

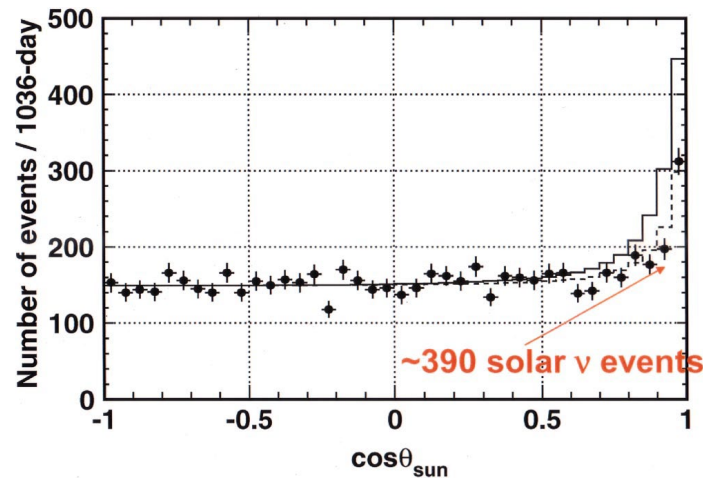


図 7. 太陽ニュートリノの方向観測。

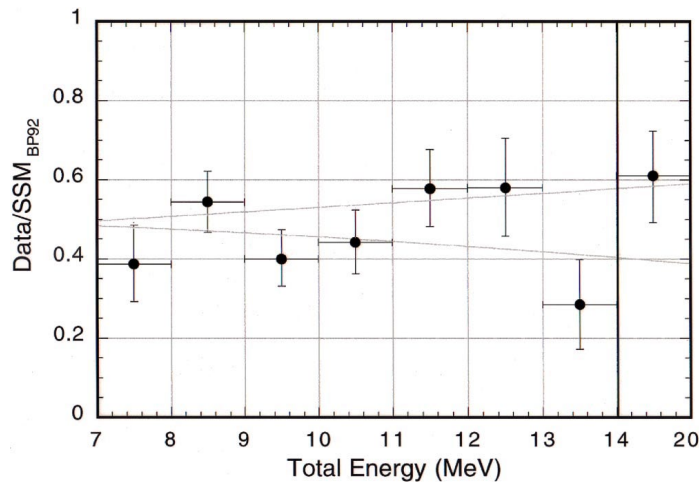


図 8. 規格化した太陽ニュートリノのエネルギースペクトル。

では、次に超新星ニュートリノ観測についてお話します。A. K. Mann 教授が率いるペンシルバニア州立大学の協力のおかげで、バックグラウンドの低減、水の純化などにより、検出器の性能を大幅に向上させることができました。1987年の初頭、私たちは太陽ニュートリノのデータを取り始めるのに十分なほど検出器のバックグラウンドを低減させることができました。2か月後、南天で超新星爆発があったと聞きました。そのため、すぐにデータを調べたところ、超新星ニュートリノの信号を非常に簡単に見つけることができました。なぜならば、超新星ニュートリノよりも観測がはるかに困難な太陽ニュートリノのデータを検出器で取得できるように既に準備ができていたためです。超新星ニュートリノは太陽ニュートリノよりもかなり高いエネルギーを持ち、さらに超新星ニュートリノは短時間に集中して到来するため、観測が容易だったのです。それを図 9 に示します。バック

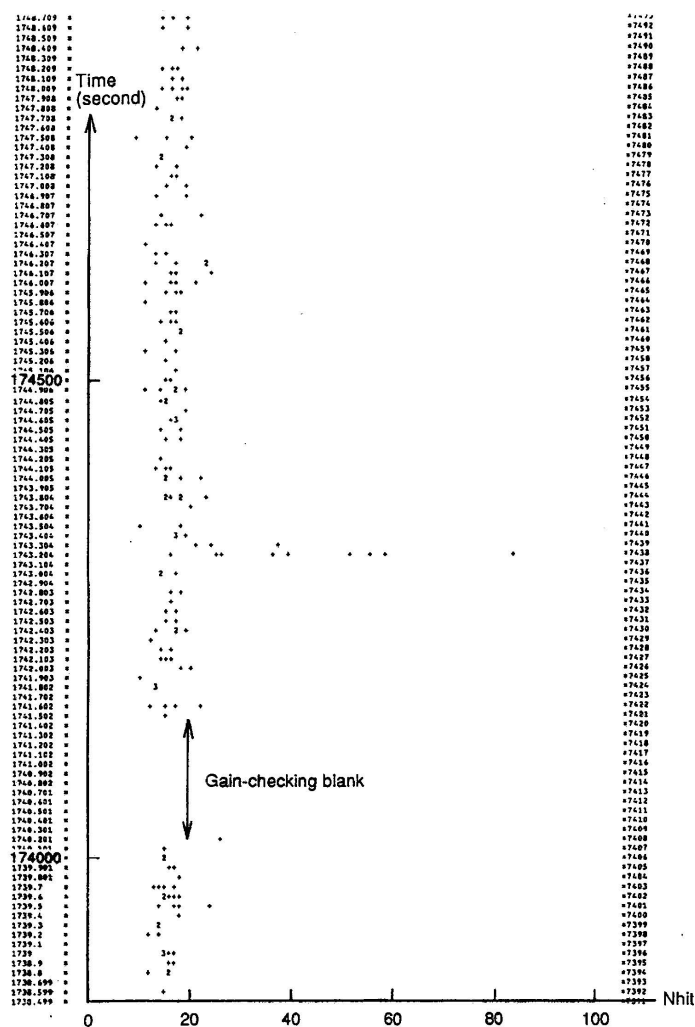


図9. 超新星 SN1987A からの信号の計算機プリントアウト。

グラウンド事象の上に 11 個¹の超新星ニュートリノ事象による光電子の信号がはっきりと見えます。この観測により、重力崩壊によって引き起こされる超新星爆発に関する理論的アイデアが確認されました。例えば、平均エネルギーとこれらの事象の総数が理論予想と一致しただけでなく、約 10 秒という持続時間は、これらのニュートリノが原子核のような非常に密度の高い物質から放出されたことを意味しています。

それらが希薄な星体から放出されたとすると、信号の持続時間は 1 ミリ秒未満になっていたはずですが、これらのニュートリノは、非常に密度の高い原子核のような物質から拡散してくる必要があったため、表面から放出されるのに 10 秒ほどかかってしまいました。おそらく中性子星が関わっています。

¹ 訳注：原文には約 17 個と書かれているが、図9と参考文献[6]にある通り得られた信号は 11 個である。

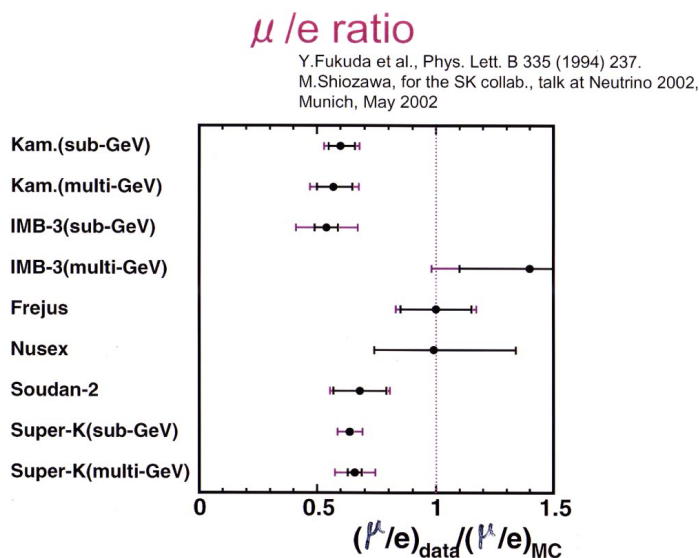


図 10. 数の比 $N(\nu_\mu) / N(\nu_e)$ について、実験値と予想値(MC(Monte Carlo simulation))の比。

ここで、大気ニュートリノ異常についてお話しします。宇宙線粒子が大気に入ると、窒素や酸素原子核と相互作用して、 π -中間子や K -中間子を生成します。これらの中間子は希薄な空気中で μ と ν_μ に崩壊します。つまり、そこで 1 つのミュー粒子と 1 つの ν_μ が得られます。二次的なミュー粒子も崩壊すると、追加の ν_μ と ν_e が得られます。したがって、すべてがこのように崩壊した場合、1 つの ν_e に対して 2 つの ν_μ が得られます。したがって、数の比 $N(\nu_\mu) / N(\nu_e)$ は 2 になります。より高いエネルギーに行くと、 π -中間子より寿命の長いミュー粒子は崩壊できません。実際、前に見たように、一部のミュー粒子は検出器に到達します。この場合、追加の ν_μ または ν_e は得られません。したがって、高エネルギーでは、この数の比は 2 よりも大きくなります。

図 10 に、KamiokaNDE で観測された上記の数の比を他の実験結果とともに示します。

次に、ニュートリノ振動についてお話しします [9]。これは私の話の中で最も難しい部分かもしれません。学部 1 年生にもわかるように説明したいと思います。

話を簡単にするため、自然界には 2 種類のニュートリノしかないと考えます。次に、たとえば、ニュートリノの状態を記述する波動関数は、2 つの独立した基底状態の線形結合によって記述できるとします。たとえば、質量行列を対角行列として、質量 m_1 と質量 m_2 の 2 つの基本ベクトルをそれぞれ選びます。したがって、任意のニュートリノの状態は ϕ_{m_1} と ϕ_{m_2} の組み合わせで記述できます。つまり、 $\phi_{\nu_\mu} = \cos \theta \phi_{m_1} + \sin \theta \phi_{m_2}$ となります。これは 2 次元幾何学のようなものです。ベクトルは、その x 成分と y 成分によって記述できます。したがって、 ν_μ 状態は、 θ を角度パラメータとする m_1 状態と m_2 状態の線形

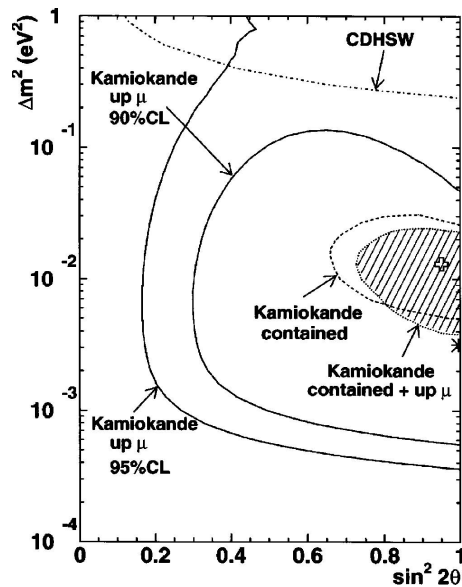


図 11. 許されるパラメータ領域

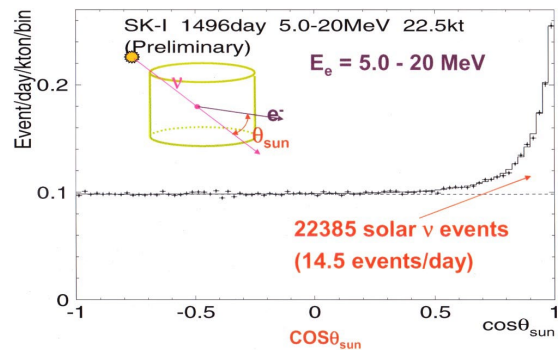


図 12. 方向分布観測。

結合です。2つの状態 ϕ_{m1} と ϕ_{m2} は、それらの固有周波数で振動します。この周波数は、状態の全エネルギー(E)に比例します。質量 m が小さい場合、与えられた運動量に対して $E \sim p+m^2/2p$ のように近似できます。これら2つの状態の周波数差に比例する $E_1 - E_2$ は、この近似を使えば、 $(m_1^2 - m_2^2)$ に比例することになります。この質量の2乗の差を、 Δm^2 と書くことにします。周波数がほぼ等しい2つの振動が共存すると、重ね合わさった振動の振幅は、二つの周波数の差の周波数でゆっくりと変化する「うなり」と呼ばれる現象が発生します。成分の振幅である ϕ_{m1} と ϕ_{m2} の変化は、元は純粋な ν_μ 状態だったところから ν_τ 状態を出現させます。

この Δm^2 と θ という2つのパラメータを使用することで、ニュートリノがあるタイプから別のタイプへ振動する様子を記述できます。

図 11 は、KamiokaNDE によって得られた大気ニュートリノ振動の結果 [10] を示しています。

Super-KamiokaNDE の話に移ります。

Super-KamiokaNDE は、これまでに3つの大きな成果を上げてきました。

1つ目は、高統計による太陽ニュートリノの天体物理観測です。図 12 では、等方的に分布するバックグラウンドの上に太陽から地球に向かう方向にニュートリノのピークが見られます。皆さんは、手の骨が折れた可能性があれば、医者に行ってレントゲン写真を撮ってもらいましょう。するとあなたの手の内側が見えるでしょう。骨が折れているかもしれません。ニュートリノを使うと、透過性ははるかに高いため、太陽の内部を見ることができます。図 13 は、太陽を(光で見た)「フォトグラフ」ではなく、世界で初めて(ニュートリノで見た)「ニュートリノグラフ」を示しています。下の図は、ニュートリノで見た銀河座標での太陽の軌道です。

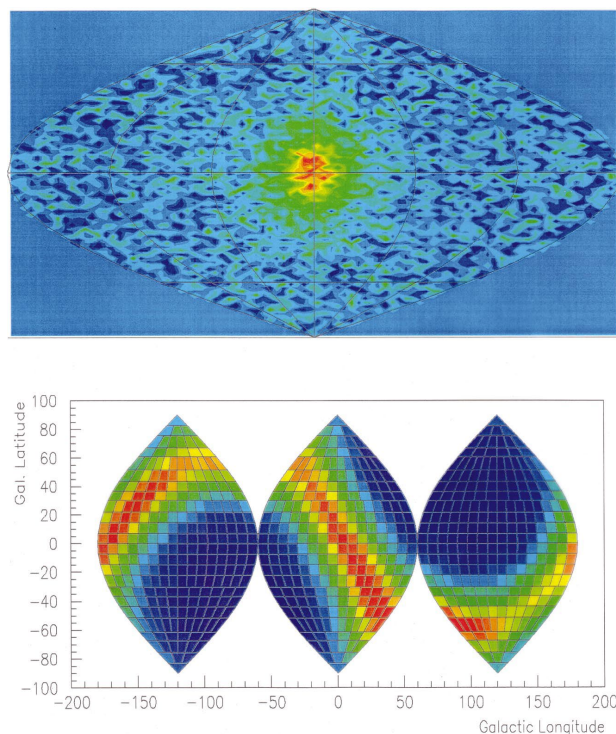


図 13. 太陽のニュートリノグラフ。

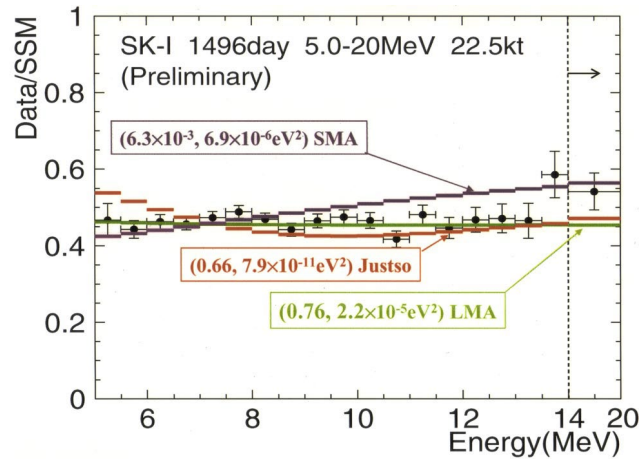
これはとてもすごいことのように聞こえますが、このニュートリノグラフを注意深く見ると、太陽のサイズは自分の目で見える太陽のサイズよりもはるかに大きいことがわかります。その理由はもちろん、ニュートリノ観測の方向精度が可視光の方向精度と比べてはるかに悪いためです。しかし、我慢してください。ニュートリノ天体物理学は誕生したばかりです。まだ幼児期なのです。

図 14 は、観測された太陽ニュートリノのエネルギースペクトル²ですが、標準太陽モデルからの理論予想と比較して示しています。

この観測されたエネルギースペクトルを理論からの予想と詳細に比較することによって、太陽ニュートリノ振動に関するより良い情報が得られます。

$N(\nu_\mu) / N(\nu_e)$ で観測された異常が実際にニュートリノ振動によるものである場合、振動の度合いは、ニュートリノがその生成場所から検出器まで通過した経路の長さに応じて異なります。ニュートリノが垂直上から来たとすると経路長は20キロメートルしかありません。水平方向から来たとすると、約1,000キロメートルの経路長になります。下から来たとすると1万3000キロメートルの経路長になります。このように経路長に大きな違いがあります(図15)。

² 訳注：図14の3本のヒストグラムは異なる振動パラメータから理論的に予測されるスペクトルを示す。



Bad fit to SMA and Just-so solutions.

図 14. エネルギースペクトル。

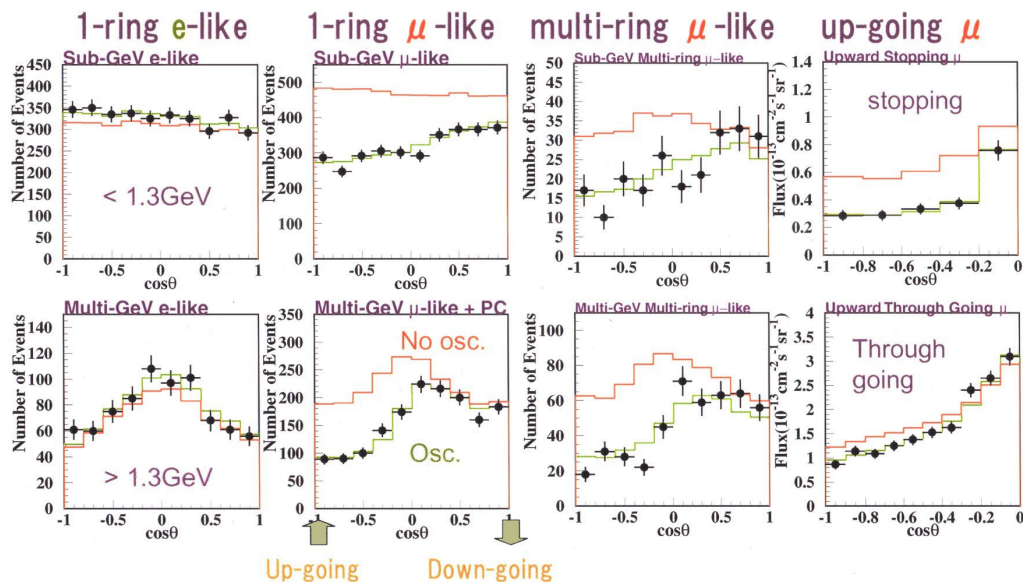


図 15. 経路長によるニュートリノ振動の変化。

e-事象の場合、それらは ν_e 起源ですが、「振動なし」の期待値からのずれは見られません。 μ 事象の場合のみ、それらは ν_μ 起源ですが、下からの方向に大きな減少が見られます。 μ 粒子を伴う反応の場合にのみ、遠距離方向にこの不足が見られます。図 16 は、Super-KamiokaNDE のデータによって決定された太陽ニュートリノ振動の許容領域を緑色で示し、大気ニュートリノ振動の許容領域を赤色で示しています[11]。

上記の KamiokaNDE と Super-KamiokaNDE の振動データを、他の利用可能なデータと統合してみます。次の図、図 17 はその結果ですが、太陽ニュートリノ振動の許される振動領域が一つだけであることを示しています。これは、すべての太陽ニュートリノ実験 (Super-KamiokaNDE、SNO[13] およびその他の放射化学法による実験[14-17])を統

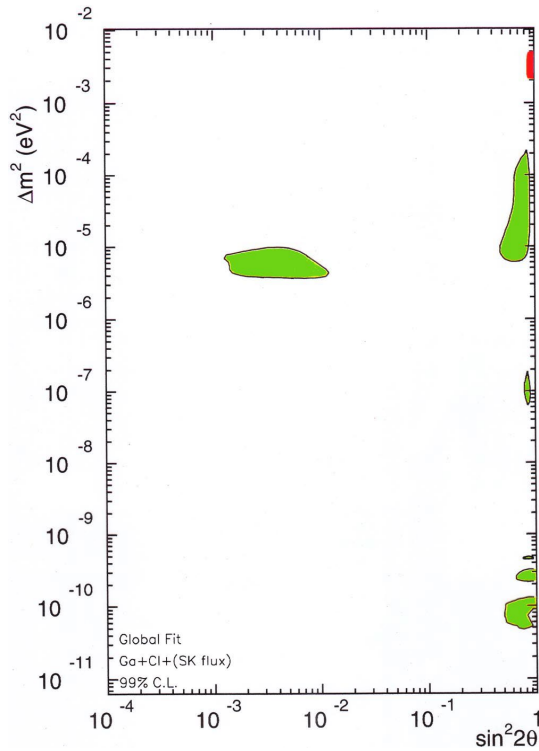


図 16. 振動パラメータの許容領域。

合することによって得られました。

観測された Δm^2 がゼロではない、つまりニュートリノの質量がゼロでないことを認めざるを得ないことになりました。これは、素粒子の標準理論を修正する必要があることを意味しています。

さて、適切なクレジットを与えるために、超新星ニュートリノ検出の著者リストを参考文献[6]に、大気ニュートリノ論文の著者リストを参考文献[12]に示します。

最後に、神岡の最新の結果をお見せします。神岡では現在、第三世代の実験が行われています。その KamLAND 実験は元の KamiokaNDE の空洞に設置されており、この実験では液体シンチレータを使用して、約 200 キロ離れた原子炉からの反電子ニュートリノを測定しています。そして、この実験は最初の結果 [18] をわずか 2 日前に発表し、私はそれを電子メールで受け取りました。この実験では、反ニュートリノフラックスとエネルギースペクトルを測定しています。その結果を図 18 に示します。得られた振動パラメータ $\sin^2 2\theta = 0.833$ および $\Delta m^2 = 5.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ は、図 18 の太陽ニュートリノの結果とよく一致しています。

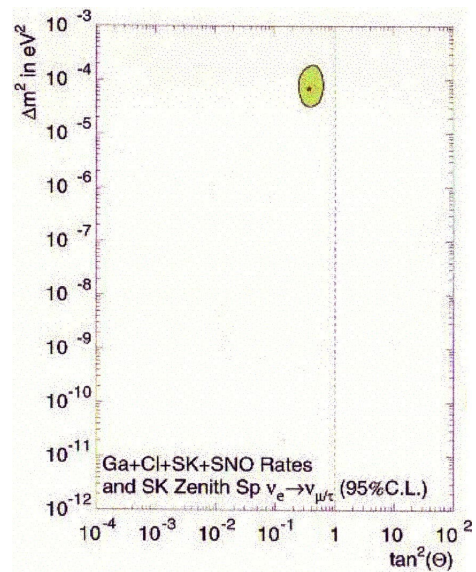


図 17. 太陽ニュートリノ振動の許容パラメータ領域。

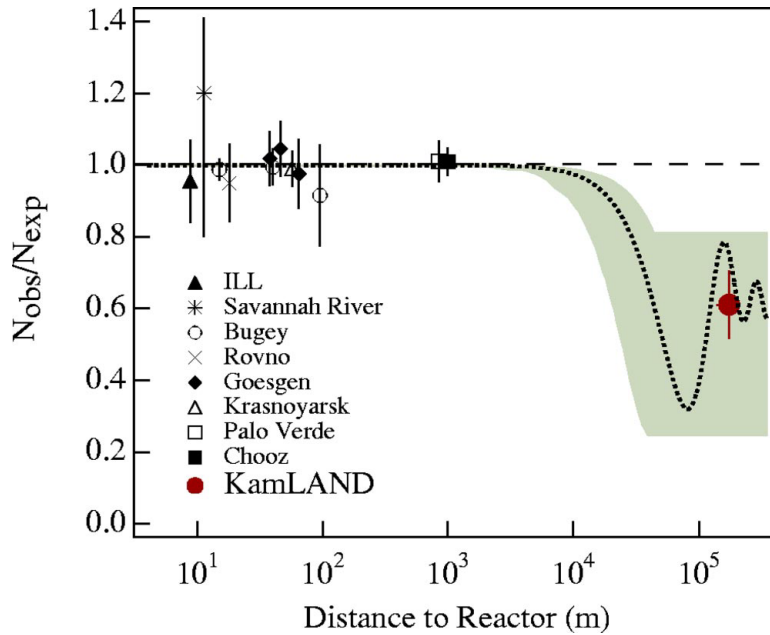


図 18. KamLAND の結果。

これは電子ニュートリノではなく反電子ニュートリノのニュートリノ振動の確認であるため、同じ振動パラメータを与えているという事実は、CPT 定理が破られていないことを示しています。さらにデータを蓄積すると、CPT 不変性の枠組み内で CP 問題に関する興味深い洞察が得られる可能性があります。この論文への参考文献は [18] に記載されています。興味深いのは、共同研究者の約 3 分の 2 が米国からの参加者であることです。神岡は今やニュートリノ研究のメッカと言われ、私はとても嬉しく思います。

ニュートリノ天体物理学が誕生した今、私たちは次に何をすべきでしょうか？ もちろん、研究者それぞれにいろいろな計画があるでしょう。メガトンの容積をもつ Hyper-KamiokaNDE を建設する動きがあります。3 つ以上の「Super-KamiokaNDE」を世界ネットワークで作れば、超新星観測に適しているかもしれません。最も挑戦的な問題は、1.9K の宇宙ニュートリノ背景放射 (CNB) の観測だと思います。それが観測されれば、宇宙が誕生してから 1 秒後の状態を教えてください。ニュートリノの質量がゼロでないことは、低エネルギーニュートリノが低温で全反射することを意味します。これは、CNB を集光するための放物面鏡の可能性を提供する素晴らしい贈り物です。しかし、そのような低エネルギーニュートリノを検出することは、本当に途方もない課題です。

謝辞

浜松ホトニクス株式会社の 50cm 口径光電子増倍管の製造に対する技術的貢献に感謝いたします。それらは神岡での実験の重要な構成要素でした。日本の文部科学省からは、神岡での実験に対して多大なるご支援をいただきました。

参考文献

- [1] M. Koshiba, Phys. Rep. 220 (1992) 229.
- [2] R. Davis, Jr., Nobel Lecture in Physics, Dec. 2002.
- [3] R. M. Bionta et al., Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 27.
- [4] H. Kume et al., Nucl. Inst. and Meth. 205 (1983) 443.
- [5] K.S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 16.
- [6] K. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1490.
- [7] K. S. Hirata et al., Phys. Lett. B 205 (1988) 416.
- [8] H. Georgi and S.L. Glashow, Phys. Rev. Lett. 32 (1974) 438.
- [9] Z. Maki, N. Nakagawa, and S. Sakata, Prog. Theor. Phys. 28 (1962) 870.
- [10] S. Hatakeyama et al., Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 2016.
- [11] S. Fukuda et al., Phys. Lett. B 539 (2002) 179.
- [12] Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.
- [13] Q. R. Ahmad, et al., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 011301.
- [14] B. T. Cleveland et al., Astrophys. J. 496 (1998) 505.
- [15] W. Hampel et al., Phys. Lett. B 447 (1999) 364.
- [16] J. N. Abdurashitov et al., J. Exp. Theor. Phys. 95, (2002) 181.
- [17] M. Altmann et al., Phys. Lett. B 490 (2000) 16.
- [18] K. Eguchi et al., Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 021802.

本記事は、Birth of Neutrino Astrophysics, Nobel Lecture, December 8, 2002 by Masatoshi Koshiba in “Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2002” published by Almqvist & Wiksell International, 2003, pp.84-98 を、The Nobel Foundation と小柴俊氏から許可をもらい、中畑雅行氏に翻訳していただいたものである。

素粒子論研究編集委員会

大気ニュートリノ振動の発見

ノーベル賞講演

2015年12月8日

梶田隆章

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東京大学宇宙線研究所

翻訳 奥村公宏 東京大学宇宙線研究所

1. はじめに

ニュートリノは、電子やクォークと同じように素粒子の一種です。電氣的に中性で、電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) という 3 つの種類 (フレーバー) を持ちます。これらは、地球の大気中や太陽の中心など様々な場所で生成されます。ニュートリノは物質と相互作用を生じる確率が非常に小さいため、地球や太陽さえも簡単に通り抜けてしまいます。しかし、ニュートリノはごく稀にですが物質と反応します。荷電カレントと呼ばれる反応をとおして電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノはそれぞれ電子、ミュー粒子、タウ粒子を生成するので、物理学者は生成されるレプトンを観測することでニュートリノのフレーバーを知ることができます。

「標準模型」と呼ばれる素粒子の相互作用の理論は 1970 年代初めに確立され、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用を非常によく説明できます。しかし、標準模型では、これらの相互作用は一元化されておらず、別々に扱われています。さらに、ニュートリノは質量をもたないとして扱われています。しかし、物理学者たちは、ニュートリノが本当に質量を持たないのかどうか疑問に思ってきました。一方、もしニュートリノに質量があるとするれば、ニュートリノはあるフレーバーから別のフレーバーへと種類を変えることができます。この現象は「ニュートリノ振動」と呼ばれ、牧、中川、坂田 [1] や Pontecorvo [2] によって理論的に予言されています。例えば、ミューニュートリノとタウニュートリノの間でニュートリノ振動が起こっているとします。この 2 つのニュートリノの間だけで振動する、いわゆる二世代間振動と仮定すると、振動確率は次のように書くことができます。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) L (km)}{E_\nu (GeV)} \right) \quad (1)$$

ここで、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ はミューニュートリノがエネルギー E_ν で距離 L を移動してもミューニュートリノのままである確率を示します。 θ はニュートリノ混合角、 Δm^2 はニュートリノ質量の二乗差 $|m_3^2 - m_2^2|$ で表されます。ミューニュートリノが消失するとタウニュートリノが生成されるので、この場合、ニュートリノのフレーバーがミューニュートリノかタウニュートリノのどちらかになる確率は1となります。式 (1) からわかるように、ニュートリノ振動の波長はニュートリノの質量が小さいほど長くなります。

1970年代後半、強い力、弱い力、電磁気力を統合した新しい理論が提唱されました。これらの理論は、核子と呼ばれる陽子と中性子が 10 の 28 乗年から 10 の 32 乗年の寿命で崩壊することを予言しました。この予言を検証するために、1980年代初頭からいくつかの陽子崩壊実験が始まりました。これらの実験では、予測された陽子寿命の範囲での陽子崩壊事象を検出するために、約 100 トンから数千トンまでの有効質量をもつターゲットを用いて実験を行いました。神岡核子崩壊実験、通称、カミオカンデは、そのうちのひとつの実験です。

カミオカンデは、 3 千トンの純水（有効質量は約 1 千トン）の水チェレンコフ検出器を用いた実験でした。神岡の茂住鉱山の地下 $1,000$ メートルに設置されました。荷電粒子が相対論的な速度で検出器の水の中を通過すると、チェレンコフ光と呼ばれる非常に弱い光（光子）が放出され、カミオカンデの水槽の内面に設置された光電子増倍管で検出されます。光子は粒子の進む方向に円錐状に放出されるため、検出器壁面にリング状の模様（チェレンコフリング）が形成されます。

2. 大気ニュートリノ異常

1983年7月にカミオカンデ実験が始まり、私は大学院生として、初期段階からこの実験に参加しました。そして、観測されたデータを用いて反ニュートリノと中間子へと崩壊する陽子崩壊を探索する研究を行い、1986年3月に博士号を取得しました。しかし、陽子崩壊の証拠は観測されませんでした。

当時私は、解析ソフトウェアの性能が十分でないために、陽子崩壊事象の信号をその主要なノイズ事象である大気ニュートリノ事象から効率的に選択できていないと感じていました。そこで、博士論文を提出すると同時に、解析ソフトウェアの改良に取り組み始めました。そのソフトウェアの1つが、複数のチェレンコフリングがある事象で荷電粒子の種類を特定するものでした。これらの事象のそれぞれのリングについて、それが電子によって作られたのか、または、ミュー粒子によって作られたのかを判定したかったのです。チェレンコフ

リングはしばしば重なり合っているため、それらを生成した荷電粒子の種類を特定することは簡単なことではありませんでした。通常、ソフトウェアの性能は、最も単純な条件から最も困難な条件まで、段階を踏んで検証する必要があります。

実際、このソフトウェアは最も単純な条件、すなわちチェレンコフリングが 1 つしかない大気ニュートリノのシミュレーション事象に対して非常にうまく行きました。シミュレーションによって大気ミューニュートリノ（電子ニュートリノ）による反応によって生成されたミュー粒子（電子）は、約 98% の確率で正しく粒子の種類を同定することができました。この結果をもとに、カミオカンデで観測されたデータを用いて、大気ニュートリノ事象のフレーバーを調査しましたが、その結果は奇妙なものでした。ミューニュートリノ事象の数はシミュレーションで予測された数よりもずっと少なかったのです。一方、電子ニュートリノ事象の数にはそのような不一致は見られませんでした。最初は、解析で何か大きな間違いをしたと思いました。そこで、どこで間違いをしたのかを調べるために、データの事象を目視で確認することにしましたが、すぐに解析ソフトウェアは正しく粒子の種類を判別していることに気づきました。予想と反して、「これは単純な問題ではないな」と思いました。シミュレーション、事象選択、事象再構成のいずれかのソフトウェアに、まだ気づいていない深いところに間違いがある可能性が高いと思いました。そして、同僚である瀧田正人氏（現宇宙線研究所教授）と私は、1986 年の暮れから、間違いを見つけるために様々な研究を行いました。

1 年間の研究の結果、深刻な間違いは見つからず、ミューニュートリノの欠損はデータ解析やシミュレーションの問題に大きく依るものではないと結論づけられました。なお、大気中のミューニュートリノと電子ニュートリノのフラックスの比は、その生成過程から、フラックスの絶対値とは無関係に正確に予測することが可能でした。大気中のミューニュートリノと電子ニュートリノは、大気圏内の宇宙線の相互作用によって生成されるパイ中間子の崩壊連鎖で生成されます。パイ中間子はミュー粒子とミューニュートリノに崩壊し、ミュー粒子はその後、別のミューニュートリノと電子ニュートリノと一緒に電子に崩壊します。崩壊で生じたニュートリノはほとんど同じエネルギーを持っているので、宇宙線のフラックス等の詳細にかかわらず、大気中のミューニュートリノと電子ニュートリノのフラックスの比は約 2 になると予想されます。実際、詳細な計算により、ニュートリノのエネルギーが 1 GeV 付近ではこのフラックス比はおおよそ 2 であることが予測されました。1988 年に我々はフラックスの不確かさを見積もったところ、フラックス絶対値の不確かさは 20~30

表 1: カミオカンデで観測された事象数とシミュレーションによる期待値との比較。検出器の観測量は 2.87 キロトン・年。

	カミオカンデでの 観測値	シミュレーションに よる期待値
e-like 事象数 (多くは電子ニュートリノ荷電反応事象)	93	88.5
μ -like 事象数 (多くはミューニュートリノ荷電反応事象)	85	144.0

パーセントでしたが、フラックス比の不確かさは約 5 パーセントでした。これらの予測は、カミオカンデの観測データがフラックス計算の不確かさで説明することが非常に難しいことを示していました。

この結果は 1988 年に論文として発表されました [3]。観測された「ミューニュートリノらしい事象」(μ -like 事象、多くはミューニュートリノ相互作用による)、「電子ニュートリノらしい事象」(e-like 事象、多くは電子ニュートリノ相互作用による)の数を、シミュレーションによる対応する数と比較しました。その比較の結果は表 1 に示しています。なお、シミュレーションの結果は、大気ニュートリノフラックスの計算値を用い、標準的なニュートリノの性質を仮定しましたが、ニュートリノ振動による影響は含んでいません。

これらの考察から、カミオカンデは[3]の論文で、「我々は観測されたデータを、測定における系統誤差や大気ニュートリノフラックスの不確実性によるものでは説明することができない。ニュートリノ振動のようなまだ説明のつかない物理がこのデータを説明するかもしれない。」と結論付けました。実際、私は大きな混合角を持つニュートリノ振動の可能性に大変興奮しました。つまり、ほとんどのミューニュートリノは他のフレーバーのニュートリノと振動しているように見えたのです。当時は、大きな混合角を持つことは一般的に考えられていませんでした。そのため、この結果は私が大気ニュートリノ研究を続ける強いモチベーションとなりました。

その後、別の大きな水チェレンコフ実験である IMB がミューニュートリノ事象の欠損を観測したことを発表しました [4] [5]。カミオカンデはその後、大気ニュートリノの欠損について、データとシミュレーションの両方における μ -like 事象と e-like 事象の比について系統誤差を詳細に評価し、ニュートリノが振動していると仮定した場合に振動パラメータが許容される領域を示した 2 本目の論文を発表しました [6]。その結果、大気ニュートリノデータはニュートリノ振動の可能性を示唆するものでした。しかしながら、ニュートリノ振動はまだ観測データを説明する 1 つに過ぎませんでした。これは、観測された影響が μ -like 事象数と e-like 事象数の比が小さいことのみだったことに一部起因します。実際、カミオ

カンデや IMB で約 1 GeV 以下のエネルギー (sub-GeV) で見られた μ -like 事象の欠損は、検出器の鉛直方向と事象方向がなす角度 (天頂角) にも事象の運動量にも強い依存性を示さなかったのです。

大気ニュートリノのフラックスは、宇宙線フラックスの等方性のために上下方向でほぼ対称になると予測されます。注意として、sub-GeV の大気ニュートリノに対しては、宇宙線フラックスに対する地磁気の影響によって正確には当てはまりませんが、数 GeV のニュートリノのフラックスはほとんど上下対称になります。もしニュートリノの質量が非常に小さいとすると、ニュートリノ振動の波長は 100 キロメートルかそれ以上になる可能性があります。その場合、地下の検出器に到達するまでに通常数 10 キロメートル飛行する鉛直下向きのニュートリノは、その検出器内で反応する前に振動しないかもしれません。一方、鉛直上向きのニュートリノは、約 12,800 キロメートルまで飛行することができるので、別のフレーバーに振動するのに十分な時間があるのかもしれません。したがって、上向きの事象で事象数の欠損を観測し、下向きの事象では観測しないことは、ニュートリノ振動を非常に強く示唆することになります。

1988 年に大気中のミューニュートリノ欠損に関する最初の論文を投稿した直後から、データの中で 1 GeV より大きなエネルギー (multi-GeV) を持つ大気中のミューニュートリノ事象を選び、研究するようになりました。multi-GeV のミューニュートリノ相互作用は、典型的には数 GeV のミュー粒子を生成します。しかし、検出器内で生成された数 GeV ミュー粒子は、検出器を透過して周囲の岩石に抜けることが多く、これを **partially-contained** 事象として選別しました。ミュー粒子とその親ニュートリノとの角度相関は、ニュートリノのエネルギーが増加するにつれて実質的に良くなるので、数 GeV ミュー粒子の天頂角分布はニュートリノの天頂角分布をよく表しているはずで、そこで私たちは、multi-GeV 事象の天頂角分布について調べました。

大気ニュートリノのフラックスはエネルギーの増加と共に急激に減少するため、カミオカンデでは multi-GeV ミューニュートリノ事象の発生率は年間 20 事象程度であり、統計的に意味のある数を集めるには数年かかりました。最終的に、カミオカンデは 1994 年に multi-GeV 大気ニュートリノデータの研究を発表しました [7]。その結果、 μ -like 事象数は上向き事象の欠損を示し、下向き事象はそのような欠損を示しませんでした。一方、e-like 事象に対応する分布は、上向き事象の欠損を示す証拠を示しませんでした (図 1)。multi-GeV の μ -like と e-like のデータにおける上向き事象と下向き事象の比 (上下比) はそれぞれ

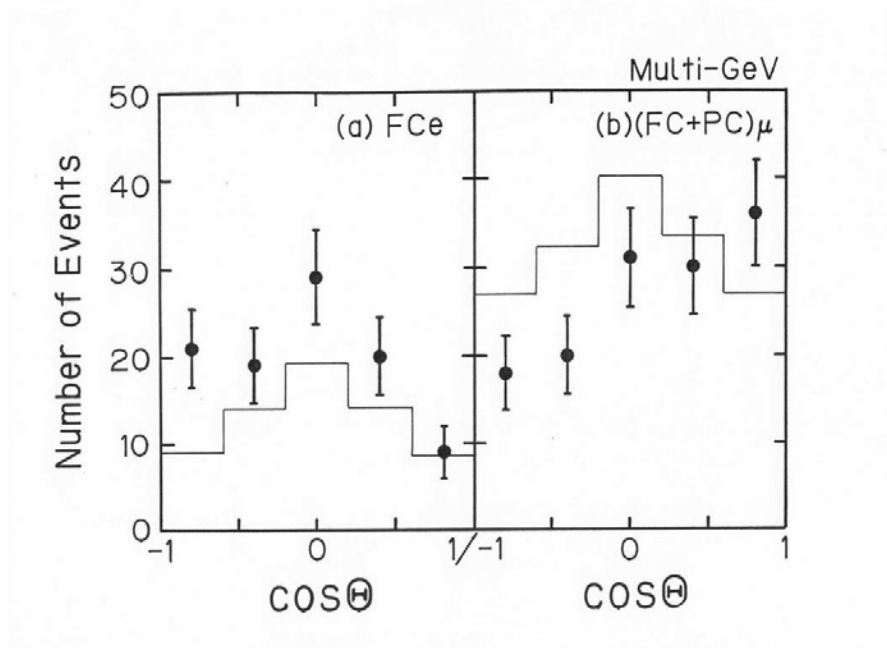


図 1: カミオカンデで観測された数 GeV の (a) e-like および (b) μ -like 事象に対する天頂角分布 [7]。

実線のヒストグラムは、振動を仮定しない場合の予測された分布を示す。事象数の絶対値には 20% から 30% の不確かさがある。

れ $0.58^{+0.13}_{-0.11}$ と $1.38^{+0.39}_{-0.30}$ でした。 μ -like のデータで観測された上下非対称の統計的有意性は 2.8 シグマに相当しました。つまり、観測された結果が統計的な揺らぎによるものである可能性は 1% 以下でした。これは、ニュートリノ振動で予測されるように、ミューニュートリノの欠損がニュートリノの飛行距離に依存することを初めて示す興味深い観測結果でした。しかしながら、この観測の統計的有意性は決定的と言えるほど強くはなく、さらに大量のニュートリノデータ、すなわち、さらに大きなニュートリノ検出器の必要性が強まりました。

3. ニュートリノ振動の発見

スーパーカミオカンデは、高さ 41.4 メートル、直径 39.3 メートル、総質量 5 万トンの大型円筒形水チェレンコフ検出器です。スーパーカミオカンデは、ニュートリノとの相互作用の詳細を調べる内水槽検出器と、入射または射出する荷電粒子を識別する外水槽検出器の 2 つの部分に分かれています。検出器の有効質量は 22.5 キロトンで、カミオカンデの約 20 倍です。図 2 にスーパーカミオカンデ検出器の模式図を示します。

スーパーカミオカンデは、国際共同研究です。1992年10月、日米の研究グループ間で共同研究協定が結ばれました。カミオカンデやIMBの共同研究メンバーも多数実験に参加しました。スーパーカミオカンデ検出器は、これらの実験の経験をもとに設計され、さまざまな技術的改良が加えられました。2015年現在、7カ国から約120名が共同研究のメンバーとして参加しています。

スーパーカミオカンデ実験は、5年間の検出器建設期間を経て、1996年春に開始されました。スーパーカミオカンデは、カミオカンデよりも大きな有効質量を持つため、カミオカンデの約20倍の速さでニュートリノ事象を集積することができます。さらに、11,200本の光電子増倍管でチェレンコフリングが観測され、ニュートリノ事象の詳細な性質を調べることができます。大気中のニュートリノ反応を解析する方法は、過去の実験で行われた研究により確立されていました。そのため、スーパーカミオカンデでは実験開始当初から、荷電粒子が内水槽検出器から出てこない **fully-contained** 事象と、少なくとも1個の荷電粒子が内水槽検出器から出てくる **partially-contained** 事象を含む様々なタイプの大気ニュートリノ事象を解析しました [8][9]。さらに、検出器下の岩石中でのニュートリノ反応によって引き起こされ、検出器を完全に通過する上向きミュオン事象 [10] と、検出器内で停止する事象 [11] も解析されました。これらの事象タイプのトポロジーや特徴は、互いに大きく異なります。そのため、データの解析には多くの研究者、特に若手研究者の共同作業が不可欠でした。スーパーカミオカンデは、カミオカンデとIMBのものをベースに、シミュレーシ

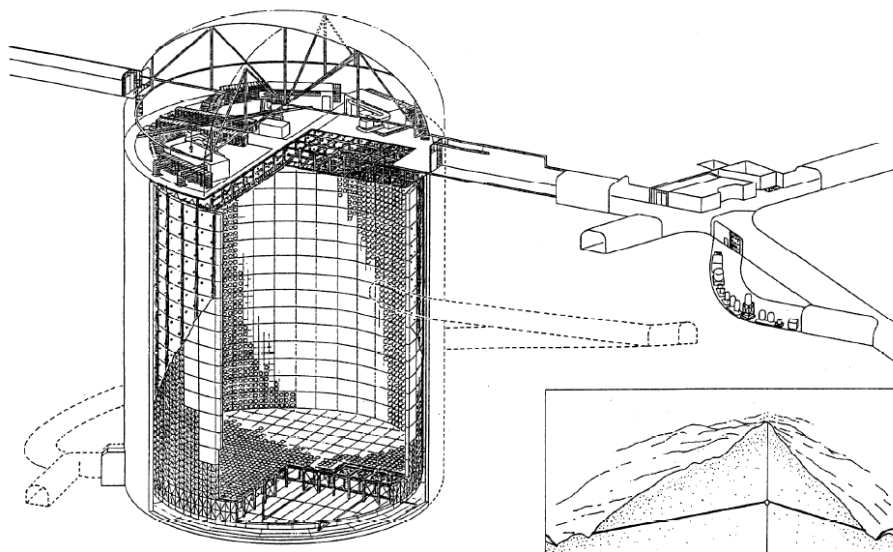


図2：スーパーカミオカンデ検出器の模式図。

ョンと解析プログラムを開発しました。そのため、スーパーカミオカンデは実験開始後、比較的早く信頼性の高い結果を出すことができました。

1998年の春までに、スーパーカミオカンデは535日分のデータを解析しました。これは33キルトン・年の観測量に相当します。全部で5,400の大気ニュートリノ事象があり、これはすでにこれまでの実験のデータセットの数倍になっていました。第18回ニュートリノ物理・天体物理国際会議（Neutrino'98国際会議）で、スーパーカミオカンデは大気ニュートリノ振動の証拠を発表しました [12] [13]。Neutrino'98国際会議で示された天頂角分布が図3に再現されています。図の上と下のパネルは、それぞれ multi-GeV の e-like と multi-GeV の μ -like (fully-contained 事象と partially-contained 事象を合わせたもの) のデータの天頂角分布を示しています。e-like のデータでは統計的に有意な上下非対称性は見られな

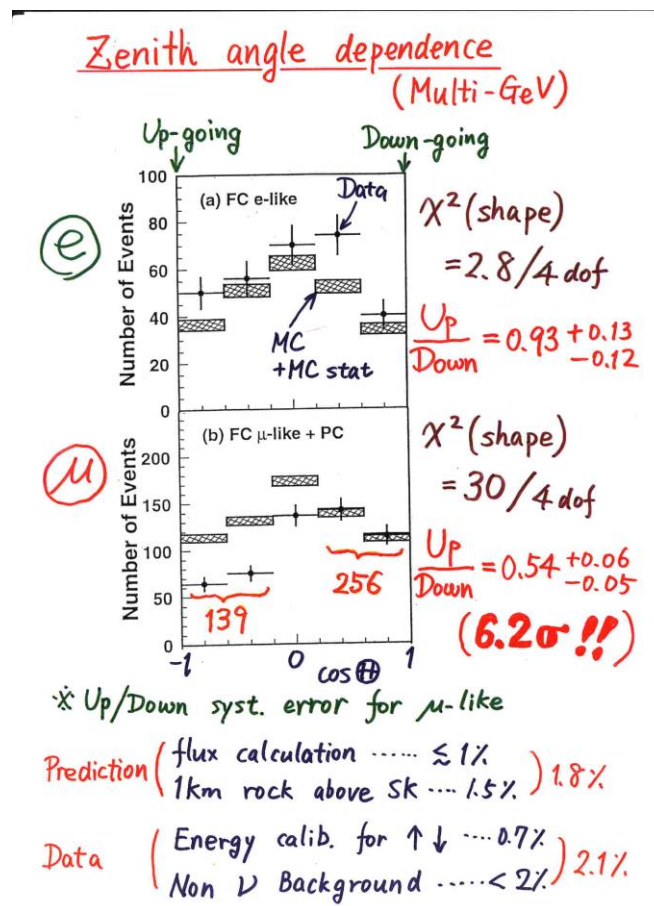


図 3: スーパーカミオカンデ実験グループが第 18 回ニュートリノ物理・天体物理国際会議 (Neutrino'98 国際会議) で発表した multi-GeV 大気ニュートリノ事象の天頂角分布 [12]。

かったが、 μ -like では上向きの事象が明らかに欠損していることが観測されました。その統計的有意性は 6 シグマ以上であり、この欠損は統計的な揺らぎによるものではないことを意味しています。図 4 は、Neutrino'98 国際会議で発表されたスーパーカミオカンデとカミオカンデの振動解析の結果をまとめたものです。2 つの実験から得られたニュートリノ振動パラメータの許容領域は重なっており、データが一貫してニュートリノ振動で説明できることを示しています。スーパーカミオカンデは、これらのデータの解析から、ミューニュートリノは他のタイプのニュートリノに振動し、おそらくはタウニュートリノに振動すると結論づけました。

当時は他に Soudan-2 と MACRO という 2 つの実験が大気ニュートリノを観測していました。Soudan-2 は 1 キロトンの鉄トラッキングカロリメーター検出器で、1989 年からデータを取っていました。この実験により、天頂角に依存したミューニュートリノの欠損が確

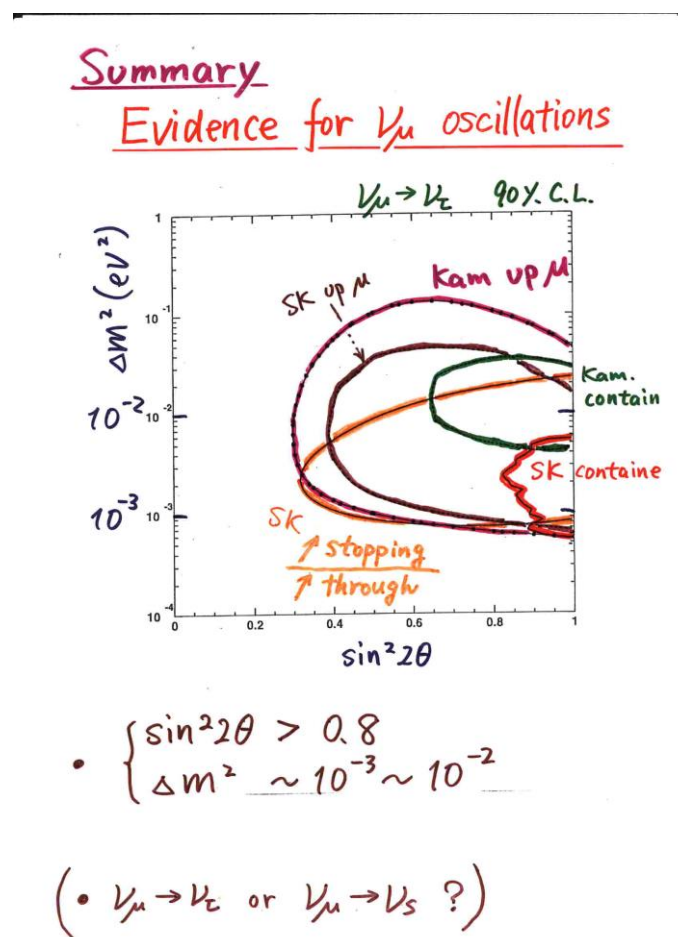


図 4: Neutrino'98 国際会議でのスーパーカミオカンデ実験による発表の最終スライド (サマリースライド) [12]。

認められました [14]。同様に、MACRO は地下の大型検出器で、大気ニュートリノ由来の上向きのミュー粒子と **partially-contained** ニュートリノ事象を測定することができました。この実験でも上向きミュー粒子 [15] と **partially-contained** 事象 [16] の両方で天頂角依存の欠損が観測されました。これらの実験の結果はスーパーカミオカンデの結果と全く一致し、その結果、ニュートリノ振動はニュートリノ物理のコミュニティによってすぐに受け入れられました。

4. 最近の研究成果と将来

スーパーカミオカンデのデータは、長距離を飛行した後にミューニュートリノの約 50% が消失することを示し、この効果は一般にニュートリノ振動として解釈されていました。しかし、「ニュートリノの質量二乗差 (Δm^2) とニュートリノ混合角 (θ) の値は?」、「ニュートリノ振動の理論が予測するように、本当にミューニュートリノの消失確率は振動するのか?」、「ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動を直接タウニュートリノを検出して確認できるのか?」、など、まだいくつかの未解決の問題が残されていました。これらの疑問には、これまでに実験的に答えが得られています。

4-1 「振動」を観測する

式 (1) に示すニュートリノ振動の式によると、ニュートリノの生存確率は正弦波状になるはずですが、具体的には、あるエネルギーにおいて、確率は L/E_ν (= (距離) / (エネルギー)) のある値で最も小さくなり、2 倍の距離を飛行すると 1 に戻り、さらに長距離ではこのように往復して振動し続けるはずですが、図 3 では、様々な L/E_ν の値を持つ大気ニュートリノ事象が各天頂角の区間に含まれているので、平均化された生存確率だけが観測されます。

スーパーカミオカンデでは、 L/E_ν の値が精度良く決定できる事象のみを用いた専用の解析を行いました。つまり、スーパーカミオカンデはこの解析で、方向が地平線の近くにあるニュートリノ事象をしませんでした。なぜなら、この領域では推定される到達方向が少し変わるだけで、ニュートリノの飛行距離が大きく変化してしまうからです。同様に、この解析では低エネルギーニュートリノ事象をしませんでした。なぜなら、これらのエネルギーでの散乱角は大きく、その結果、推定されるニュートリノ飛行距離の不確かさが大きくなってしまいます。高 L/E_ν 分解能事象だけを用いて、スーパーカミオカンデは、図 5 に示すように、測定されたミューニュートリノ生存確率が $L/E_\nu = 500$

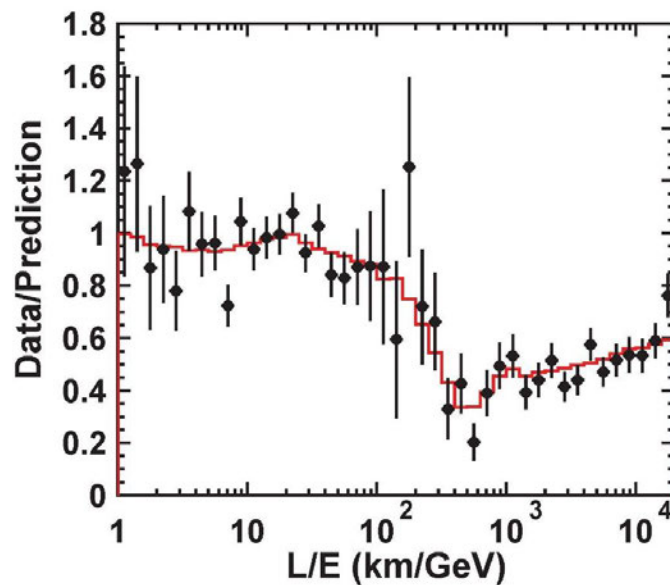


図 5: L/E_ν の関数としてデータと予測の比を表示したスーパーカミオカンデの観測結果 [17]。

km/GeV [17] 近傍で理論的生存確率の最初の最小値に相当する「くぼみ」を有することを示しました。これは、ミューニュートリノの生存確率がニュートリノ振動によって予測される正弦波関数に従うことを示す最初の証拠となりました。

4-2 タウニュートリノ検出

もし大気ニュートリノの振動が本当にミューニュートリノとタウニュートリノの間にあるならば、この振動によって生成されるタウニュートリノの荷電カレント相互作用を観測することができるはずですが。タウニュートリノの荷電カレント相互作用は、典型的にはいくつかのハドロン（そのほとんどはパイ中間子）を伴ったタウレプトンを生成します。タウ粒子の質量が重い ($1.78 \text{ GeV}/c^2$) ため、この相互作用のエネルギー閾値は約 3.5 GeV です。この閾値はかなり高く、これらのエネルギーでの大気ニュートリノフラックスはかなり少ないので、期待される事象発生率は 1 キロトン・年あたり 1 事象程度に過ぎません。したがって、タウニュートリノ荷電カレントの反応率は、全大気ニュートリノ反応率の約 0.5 パーセントに過ぎません。タウ粒子の寿命は 2.9×10^{-13} 秒であることに注意する必要があり、したがって大気ニュートリノ反応で生成されたタウ粒子はほとんどすぐいくつかのハドロンとニュートリノに崩壊してしまいます。したがって、典型的なタウニュートリノ反応では、最終的に多くのハドロンが生成されます。しかし、高エネルギーの中性カレント反応

でも多くのハドロンが生成されます。したがって、これらのバックグラウンドのために、水チェレンコフ検出器でタウニュートリノの事象を探索することは複雑になります。

それにもかかわらず、スーパーカミオカンデは、検出器内で生じた荷電カレント相互作用によるタウニュートリノ事象を探索しました。この探索は、様々な運動学的変数とニューラルネットワークを含む高度な統計手法を用いて行われました [18]。図 6 はタウニュートリノ候補事象の天頂角分布を示しています [19]。このような高度な手法を用いても、最終的なサンプルには多くの背景事象が残っています。しかし、背景事象だけでは説明できない過剰な上向き事象が存在します。様々な系統的な不確かさを考慮した後の過剰事象の有意性は、3.8 シグマです [19]。これらのデータは、確かに大気ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動によるタウニュートリノの出現と矛盾しません。

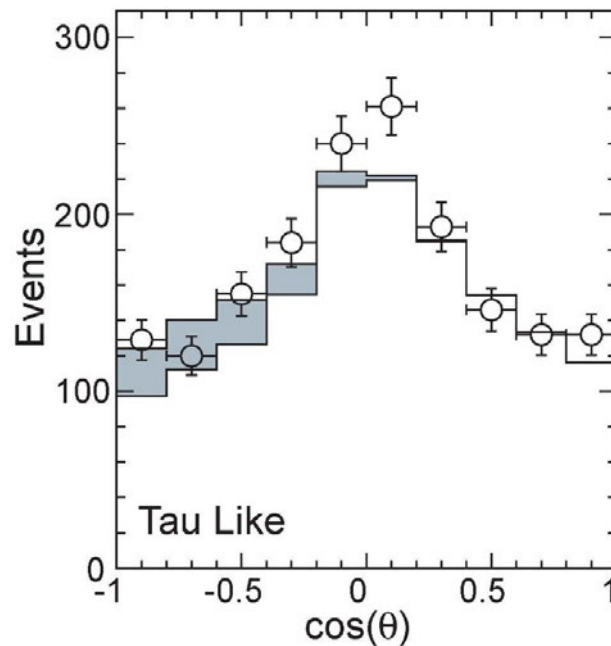


図 6: スーパーカミオカンデで観測されたデータから選別したタウニュートリノらしい事象 (τ -like) の天頂角分布 [19]。図中の丸とエラーバーはデータを示す。実線のヒストグラムは、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動を含むが、タウニュートリノ荷電カレント相互作用を含まないモンテカルロシミュレーションの結果を示している。灰色のヒストグラム部分は、タウニュートリノ相互作用を含むフィット結果を示しています。

4-3 データアップデートとニュートリノ質量および混合角

2015年現在、スーパーカミオカンデは約5,000日分のデータを取得しており、1998年に比べておよそ10倍のデータセットが既に得られていることとなります。図7は、これらの事象の天頂角分布を示しています。1998年のデータ（図3）に比べて、データサンプルの統計誤差が大幅に改善されていることがわかります。これらの事象を用いてニュートリノ振動パラメータが測定され、そのデータはニュートリノ質量二乗差 (Δm^2) が約 0.0024 eV^2 であることを示しています。ニュートリノの質量が縮退していないと仮定すると、最も重いニュートリノの質量は約 0.05 eV で、これは電子の質量の1000万分の1（またはトップクォークの質量の1兆分の1以下）に相当し、ニュートリノの質量は他の素粒子の質量に比べて極めて小さいことが示唆されます。これらの極めて小さなニュートリノの質量は、シーソー機構によって自然に説明され [20] [21] [22]、小さなニュートリノの質量が極めて高いエネルギースケールでの物理に関係していることを意味しています。

測定された混合角は $\sin^2 2\theta = 1.0$ である最も混合している状態と矛盾しません。1998年に行われた測定と比較すると、これらのパラメータはより正確に決定されています。ニュートリノの混合角はクォークの混合角と非常に異なっていることに注意してください。例えば、 $\sin^2 2\theta \sim 1.0$ は混合角 θ が約 45 度に対応し、一方類似のクォーク混合角は約 2.4 度に過ぎません。ニュートリノ振動が発見されるまでは、この違いは予想されていませんでした。実際、これらの混合角の違いは、クォークとレプトン間の深い関係を理解するためのヒントを与えてくれるかもしれません。

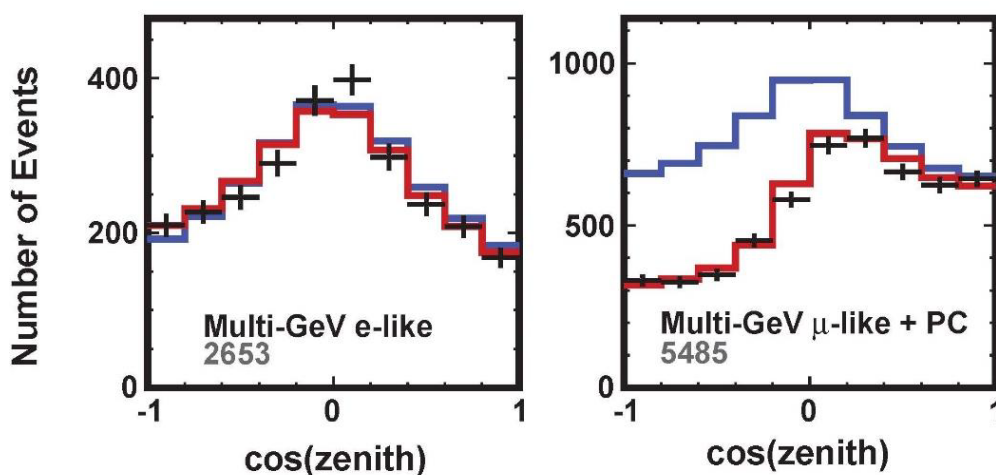


図7：2015年にスーパーカミオカンデで観測された multi-GeV の e-like (左) と μ -like (右) の大気ニュートリノ事象の天頂角分布。

4-4 ニュートリノ振動実験：過去、現在、そして未来

これまで議論したように、1990年頃の大気ニュートリノ実験からの初期のデータにおけるミューニュートリノ事象の欠損は、後続世代の実験によって1998年にニュートリノ振動の影響であることが確認されました。大気ニュートリノのフラックスは広いエネルギースペクトルを持ち、また広い範囲の経路長のニュートリノに対するデータを供給することに注意してください。これらの特徴によって、同様に広い Δm^2 の範囲でニュートリノ振動を調べることが可能になり、実際、ニュートリノ振動の発見につながったのです。

初期の大気ニュートリノ観測データとニュートリノ振動の発見は、加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験の動機付けとなりました。長基線ニュートリノ振動実験では、ニュートリノビームは加速器で生成され、一定距離離れた検出器で観測されるので、ニュートリノの飛行距離は1つの値に固定されます。また、大気ニュートリノフラックスは電子ニュートリノ、反電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、および、反ミューニュートリノの混合物であるのに対し、そのような実験のビームは高い純度のミューニュートリノ（または反ミューニュートリノ）であることに注意する必要があります。これらの理由から、長基線実験は精密な測定を行うのに適しています。

第一世代の長基線実験は2000年代に実施されました。K2KとMINOSはこの世代の実験で、ニュートリノ振動現象を確認し、ニュートリノ振動パラメータを独立に測定しました [23] [24]。OPERAもこの世代の長基線実験であり、ニュートリノ振動によって発生したタウニュートリノの相互作用によって生成されたタウレプトンを観測しました [25]。

ニューミュートリノとタウニュートリノ間の振動は、長基線ニュートリノ実験と大気ニュートリノ実験の両方によってよく研究されています。したがって、振動研究の次の段階として、3世代（フレーバー）振動効果に焦点を当てます。この目標を実現するための最初のステップは、混合角 θ_{13} を確立することでした。いくつかの原子炉ニュートリノ実験（Daya Bay、RENO、Double-Chooz）や長基線実験（T2K、NOvA）が、このパラメータの証拠を探すために行われました。これらの実験では、 θ_{13} を発見し、測定しています [26] [27] [28] [29] [30]。

太陽ニュートリノ実験 [31] と長基線原子炉ニュートリノ実験（KamLAND） [32] による測定を含めて、3世代ニュートリノ振動の枠組みにおける全ての混合角（ θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} ）とニュートリノ質量の二乗差（ Δm_{12}^2 , $\Delta m_{23(13)}^2$ ）の絶対値が測定されてきました。1998年以来、ニュートリノ振動に対する我々の理解が飛躍的に進歩したことは明らかです。しかし、まだ未測定のもの、しかし将来のニュートリノ振動実験で調べるべき重要なパラメータが残

っています。特に、ニュートリノ質量の大きさの順序（階層性）の測定と、ニュートリノ振動における CP 対称性の破れの可能性の確立は、今後の実験が目指している測定項目です。ニュートリノ質量の階層性は通常、 $m_{\nu_1} < m_{\nu_2} < m_{\nu_3}$ と仮定されます。実際、我々は太陽ニュートリノの測定を通して、 $m_{\nu_1} < m_{\nu_2}$ であることを知っています。しかしながら、 ν_3 が最も重いニュートリノ質量状態であるかどうかはまだ分かっていません。これは測定されなければなりません。もしニュートリノ振動で CP が破れていれば、ミューニュートリノから電子ニュートリノへと、反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへと振動する確率は同じではないでしょう。ニュートリノ振動で CP 対称性の破れを発見することは、宇宙のバリオン非対称性についての我々の理解に大きな影響を与える可能性があります [33]。したがって、これらの性質を測定するために、いくつかの長期線ニュートリノ振動実験 [34] [35]や、大気ニュートリノ [36] [37] [38]、および、原子炉ニュートリノ [39] [40]を用いた実験が現在計画されているか建設が進行中です。ニュートリノ振動実験が、素粒子や宇宙そのものをより深く理解するために基本的に重要な結果を生み出し続けることを期待しています。

まとめ

1988年にカミオカンデによって、大気ニュートリノのフラックスに予想外のミューニュートリノの欠損が観測されました。当時はニュートリノ振動がこのデータを説明する可能性があると考えられていました。その後、1998年にスーパーカミオカンデが大気ニュートリノの研究を通してニュートリノ振動を発見し、ニュートリノに質量があることを立証したのです。この発見の興奮に最初から携わることができた私は、非常に幸運だったと思っています。

ゼロでないニュートリノ質量の発見は、素粒子物理学の標準模型を超える物理、特に素粒子相互作用の大統一など非常に高いエネルギースケールでの物理を研究するための扉を開きました。同時に、ニュートリノ自体にもまだ多くの観測すべき点が残っています。ニュートリノの研究が進めば、宇宙における物質の起源など、自然を理解する上で根本的に重要な情報を与えてくれるかもしれません。

謝辞

カミオカンデとスーパーカミオカンデの共同実験研究者に感謝します。特に、小柴昌俊氏と戸塚洋二氏には、私の研究キャリアを通じて、継続的な支援と励ましをいただいたことに

感謝します。さらに、以下の方々の貢献にも感謝します。**Ed Kearns** は、スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの解析について、長年にわたり私と一緒に研究してくれました。瀧田正人氏、金行健治氏はカミオカンデの解析の際に一緒に仕事をしてくれました。戸塚洋二氏、鈴木洋一郎氏、中畑雅行氏はスーパーカミオカンデの実験をリードしてきました。**Hank Sobel** と **Jim Stone** はスーパーカミオカンデの米国での取り組みをリードしてくれています。中村健三氏と鈴木厚人氏は、スーパーカミオカンデの初期に非常に重要な役割を果たしました。多くの若いスーパーカミオカンデの共同研究者の努力は、ニュートリノ振動の発見にとって不可欠でした。また、ニュートリノフラックスの計算を行った本田守広氏に感謝します。

最後に、スーパーカミオカンデは神岡鉱業株式会社に謝意を表します。スーパーカミオカンデは、日本の文部科学省、米国エネルギー省、米国国立科学財団から提供された資金により建設、運営されています。これらの研究の一部は、大韓民国、中華人民共和国、EU、日本、カナダの様々な研究資金助成機関の支援を受けています。

参考文献

- [1] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, *Prog. Theor. Phys.* **28** (1962) 870-880.
- [2] B. Pontecorvo, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **53** (1967) 1717-1725 [*Sov. Phys. JETP* **26** (1968) 984-988].
- [3] K. Hirata *et al.*, *Phys. Lett. B* **205** (1988) 416-420.
- [4] D. Casper, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **66** (1991) 2561-2564.
- [5] R. Becker-Szendy, *et al.*, *Phys. Rev. D* **46** (1992) 3720-3724.
- [6] K. S. Hirata, *et al.*, *Phys. Lett. B* **280** (1992) 146-152.
- [7] Y. Fukuda, *et al.*, *Phys. Lett. B* **335** (1994) 237-245.
- [8] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Lett. B* **433** (1998) 9-18.
- [9] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Lett. B* **436** (1998) 33-41.
- [10] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **82** (1998) 2644-2648.
- [11] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Lett. B* **467** (1999) 185-193..
- [12] Takaaki Kajita, for the Kamiokande and Super-Kamiokande collaborations, talk presented at the 18th International Conference in Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino'98), Takayama, Japan, June 1998: Takaaki Kajita (for the Kamiokande and Super-Kamiokande collaborations), *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **77**

- (1999) 123-132.
- [13] Y. Fukuda, *et al.* (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562-1567.
- [14] W. W. M. Allison, *et al.*, (Soudan-2 collaboration), Phys. Lett. B **449** (1999) 137-144.
- [15] M. Ambrosio, *et al.* (MACRO collaboration), Phys. Lett. B **434** (1998) 451-457.
- [16] M. Ambrosio, *et al.* (MACRO collaboration), Phys. Lett. B **478** (2000) 5-13.
- [17] Y. Ashie, *et al.* (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 101801.
- [18] K. Abe, *et al.*, (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 171801.
- [19] K. Abe, *et al.*, (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 181802.
- [20] P. Minkowski, Phys. Lett. B **67**, (1977) 421-428.
- [21] T. Yanagida, in Proceedings of the Workshop on the Unified Theory and Baryon Number in the Universe, edited by O.Sawada and A.Sugamoto (KEK Report No. 79-18) (1979) p.95-98.
- [22] M. Gell-mann and P. Ramond, and R. Slansky, in Supergravity, edited by P. van Nieuwenhuizen and D. Z. Freedman (North-Holland, Amsterdam) (1979) p.315-321.
- [23] E. Aliu, *et al.* (K2K collaboration), Phys. Rev. Lett. **94**, (2005) 081802.
- [24] P. Adamson *et al.* (MINOS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 131802.
- [25] N. Agafonova, *et al.* (OPERA collaboration), Phys. Rev. D **89** (2014) 051102.
- [26] F. P. An, *et al.* (Daya Bay collaboration), Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 171803.
- [27] J. K. Ahn, *et al.* (RENO collaboration), Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 191802.
- [28] Y. Abe, *et al.* (Double Chooz experiment), Phys. Rev. D **86** (2012) 052008.
- [29] K. Abe, *et al.* (T2K collaboration), Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 041801.
- [30] P. Adamson, *et al.* (NOvA collaboration), arXiv :1601.05022.
- [31] A. McDonald, Nobel Lecuture (2015).
- [32] K. Eguchi, *et al.* (KamLAND collaboration), Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 021802.
- [33] M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B **174**, (1986) 45-47.
- [34] DUNE collaboration, Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report, Volume 1 to 4, arXiv:1512.06148, arXiv:1601.02984, arXiv:1601.05471, arXiv:1601.05823.
- [35] K. Abe, *et al.* (Hyper-Kamiokande working group), arXiv:1109.3262.
- [36] M. S. Athar, *et al.* (INO Collaboration), "India-based Neutrino Observatory: Project Report," INO-2006-01.
- [37] M. G. Artsen, *et al.* (IceCube PINGU collaboration), arXiv:1401.2046.
- [38] V. Van Elewyck (for the KM3NeT collaboration), J. Phys. Conf. Ser. **598** (2015) 1, 012033.
- [39] Z. Djurcic *et al.* (JUNO collaboration), arXiv:1508.07166.

[40] S. B. Kim, Nucl. Part. Phys. Proc. **265-266** (2015) 93-98

訳者追記：編集委員会の要望により本論文に参照されている実験について、実験名称、場所、検出器、観測時期などを訳者の方でまとめた表を下記に記す。計画中または建設中の実験は2023年時点のものである。年代は全て西暦である。

大気ニュートリノ実験

名称	場所 (国名)	検出器	実験期間
カミオカンデ [3,6,7]	日本	水チェレンコフ	1983 ~ 1996
IMB [4,5]	米国	水チェレンコフ	1982 ~ 1991
Soudan-2 [14]	米国	鉄トラッキングカロリメータ	1989 ~ 2000
MACRO [15,16]	イタリア	シンチレーションチェンバー	1989 ~ 2000
スーパーカミオカンデ [8-13,17-19]	日本	水チェレンコフ	1996 ~

長基線ニュートリノ振動実験

名称	距離	ビーム生成場所	観測場所	実験期間 (*)
K2K [23]	250km	KEK (茨城県つくば市)	岐阜県飛騨市神岡	1999 ~ 2004
MINOS [24]	735km	Fermi Lab (米国)	米国ミネソタ州	2005 ~ 2016
OPERA [25]	730km	CERN (スイス)	イタリア Gran Sasso	2008 ~ 2012
T2K [29]	295km	J-PARC (茨城県東海村)	岐阜県飛騨市神岡	2010 ~
NOvA [30]	810km	Fermi Lab (米国)	米国ミネソタ州	2014 ~

(*) MINOS の実験期間はニュートリノビーム照射開始からとした。

原子炉ニュートリノ実験

名称	場所 (国名)	検出器	実験期間
KamLAND [32]	日本	液体シンチレータ	2002 ~
Daya Bay [26]	中国	液体シンチレータ	2011 ~ 2020
RENO [27]	韓国	液体シンチレータ	2011 ~
Double Chooz [28]	フランス	液体シンチレータ	2010 ~ 2017

計画中または建設中の実験

名称	場所 (国名)	検出器	実験開始予定
ハイパーカミオカンデ [35]	日本	水チェレンコフ	2027
DUNE [34]	米国	液体アルゴン TPC	2030 初頭
KM3NeT [38]	ヨーロッパ (地中海)	水チェレンコフ	計画中
JUNO [39]	中国	液体シンチレータ	2024

本記事は、Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations, Nobel Lecture, December 8, 2015 by Takaaki Kajita in “The Nobel Prizes, Les Prix Nobel 2015” published by Science History Publications/USA, 2016, pp.7-23 を、The Nobel Foundation と梶田隆章氏から許可をもらい、奥村公宏氏に翻訳していただいたものである。

素粒子論研究編集委員会

2008年 ノーベル物理学賞講演

南部陽一郎

(米谷民明 日本語訳+解題)

訳者はしがき

以下の本文は『素粒子論研究』編集委員会の求めに応じ、南部陽一郎（1921–2015）の2008年ノーベル賞講演“Spontaneous Symmetry Breaking in Particle Physics: A Case of Cross Fertilization”を日本語訳したものである。

原文は英語特有な簡素な表現が多いので、そのままでは前後関係がしっくりしないところでは意識的に文言を最小限補い、数式については、誤植、記号の欠け落ち、および同一記号の異なる意味での重複使用等による混乱や誤解を避ける目的で修正を加えさせていただいた。また、受賞対象になった仕事は、今から60年以上も前に発表されたものであるのに加えて、非常に広い分野に関わり深い含蓄に富むものであるため、本講演内容は特に若い学生諸君にとって理解が困難な箇所が多々あるに違いない。そこで、初学者、非専門家を含めた広範囲の読者を念頭におき、なるだけ一面に偏らない客観的な立場からの理解に資するように、歴史的な背景や位置付け、その後の発展、現在への繋がり、等について解説を（誤植等の修正についての説明も含め）与えるとともに、関連する参考文献の紹介を主目的とする解題を本文の後に加えた。解題を付した箇所には矢印付きの番号をふってある。いささか長いものになったが、必要に応じて参照していただければ幸いである。

訳者にとって大学院入学の頃からいくつかの論文で親しみ大きく影響を受け尊敬していた南部先生に最初にお会いし言葉を交わしたのは、訳者が20代の終わり頃、ニューヨーク市立大学の研究員を務めていた1977年1月、南部先生の親しい友人でもあった同大学学長マルシャク（R. Marshak）先生の還暦を記念して開催された国際シンポジウムにおいてであった。それから45年を超える時が流れた。当時50代半ばの南部先生のまだまだ若々しく颯爽とした面影や、その後の様々な機会における先生との会話を思い起こしつつ訳出させていただいたが、先生自身の個性的な話し方や雰囲気や文章を再現するのはやはり難しい。もとより訳文の文責はひとえに訳者にある。ともあれ、本拙訳（+解題）が、現代素粒子論の最重要な一里塚の一つと言える先生の偉業を広範な方々に知っていただき理解を深めていただくための一助となることを願う。

米谷民明 2023年3月

素粒子物理における自発的対称性の破れ： 分野間交流による実りの一例

ノーベル賞講演，2008年12月8日

南部陽一郎*

シカゴ大学 エンリコフェルミ研究所，物理学科
エリス通り 5720, シカゴ，米国

*) 南部陽一郎のノーベル賞講演はローマ・ラ・サピエンツァ大学の
ジョバンニ・ヨナ=ラシニョによって代読された。

まず，私の出身について簡単にお話することから始めましょう。私は東京大学で物理を学びました。仁科，朝永，湯川という高名な3人の影響で素粒子物理に惹かれたのです。日本において素粒子物理を創始し基礎を築いたのが，この方々です。ただ，どなたも私とは異なる機関に所属しておられました。実は，東京大学はもともと凝縮系の物理の方面でかなりの強みがあるところでありまして，私が素粒子物理の分野に参入したのは，やっと終戦になり東京へ戻って来てからのことでした。しかしながら，今振り返って考えてみますと，初期段階で凝縮系物理と向かい合ったのは，私にとって実に有益なことだったと言わざるを得ないのであります。→¹⁾

素粒子物理は原子核物理から分かれて発展してきたもので，1930年前半，チャドウィックの中性子の発見，ローレンスによるサイクロトロンを発明，そして湯川による中間子論の提唱によって始まりました [1]。それに続く数十年間，新粒子がまるで隊列をなすかのように次々と確認され続け，また，場の量子論の進歩があって，自然界の基本法則について私どもの理解が進み，現在の素粒子の標準模型に到達しました。

私どもがそうした新粒子達と直面したとき，最初に試みたのはそれらの性質に潜んでいる規則性を見出し，その意味を追求することでありました。そして新粒子の分類に向けて研究を進展させる際に私たちが拠り所としたのは対称性の原理です。物理学において対称性があると，対応して保存則が導かれます。エネルギーや電荷などの場合にはこの保存則は厳密に成り立つのですが，その

頃の試みはそういうのとは違っておりました、質量や相互作用に関する近似的な類似性に基づくものでした。→²⁾

しかし、そうだとしても、類似性を探求するのはごく自然で、人間精神の大変役立つ特性と言えましょう。たとえば、陽子と中性子の質量、そして、両者が関与する強い相互作用が互いに非常に近いという事実から、アイソスピンのSU(2)対称性の概念が導かれました[2]。その一方、対称性をさらに精密なゲージ化された対称性にまで格上げするという、いわば反対方向の突き進み方も可能なのであります。その場合には、対称性が力学までをも支配することになります。これはまことに魅力的な可能性です。実際そうした動機から、強い相互作用のアイソスピン対称性は、美しい電磁気学の法則を手本としてSU(2)群の非アーベル的ゲージ場に拡張されました[3]。しかし、強い相互作用というものは短距離力なのです。それを説明するため、ゲージ場に質量を付与させると、普通にはゲージ不変性は壊れてしまいます。→³⁾

本日の私の話の主題は自発的対称性の破れ(SSB)ですが、これは物理学の基礎法則に潜むある種の対称性が実際には壊れた仕方で実現するという現象なのであります。実は、名称[4]こそSSBとは言いませんが、これと同様な現象は私どもの日常生活でも大変親しみ深いものです。例として、垂直方向に立てて置いたまっすぐな弾性体の棒を思い浮かべてみましょう。それは水平方向から眺めるとどの方角からでも全て同じに見えるという、縦軸回りの回転に関する対称性を備えています。しかし、もし上から縦軸方向に圧力をかけ続けてつぶそうとすると、どうしてもある一つの方向に曲がってしまい、この対称性は失われてしまいます。原理としては全ての水平方向が対等ですから、棒の曲がりには本来すべての方向で同じように可能なはずですが、しかしながら、そうした同等性は同じ実験を何度も繰り返さない限り見えてきません。SSBとはこういうものなのです。

量子力学においてSSBが起きるのは、典型的には多数の構成要素が集まって一様に広がってできている物質においてでして、SSBは物質が示す力学的効果の一つに他なりません。つまり、対称性により個々の構成要素にはどう反応するかは自由度が一定程度あるにも関わらず、要素間での相互作用の効果により、特定の一つの同じ方向に要素全体が揃って反応する結果になるという現

象です。比喩的に言えば、群衆の団が皆同じ方向を揃って見るようなものです。そうなってしまいますと、対称性によりエネルギー的には対等なのですから、どの方向に揃うのも同じく許されるとしても、方向を全体として変えるのは容易なことではありません。何故かと言いますと、そうした変化を起こそうとしても、それは局所的な操作では不可能だからです。その結果、あたかも対称性が失われているかのように振る舞うというわけです。もしも変化を起こす操作を系全体に渡って施すことが出来れば、失われたかに見える対称性を回復させることは依然として可能ではありますが、それはある種の相転移を引き起こすことに相当します。いくつか例を表にして挙げてみますと、

物理系	壊れた対称性
強磁性体	回転不変性（スピンの向きに関する）
結晶	並進および回転不変性（離散的な不変性は残ってよい）
超伝導体	局所ゲージ不変性（粒子数に関する）

などです。そして、物質中での **SSB** には以下の3つの特徴的な性質があります。

1. 基底状態が大きく縮退している。対称性の操作は一つの基底状態を別の基底状態に移す。
2. 一つの与えられた状況で実現可能なのは、縮退した基底状態のうちただ一つと、そこから励起される状態の完全系だけ。
3. 一般に十分に高温の状態では、**SSB** は失われる。

相対論的な場の量子論では、こういう現象が時間-空間の全体として可能になるのです。なぜかと申しますと、“真空”は何もない単なる空なのではなく、空間と時間がそのもの自体として各点ごとに固有な多くの自由度を備えているものだからなのであります。このことから、**SSB** は宇宙論で重要な役割を果たし得ることになります。つまり、宇宙は膨張し冷却するにつれ、一つまたは複数の相転移が起きるのに伴い、対称性が自発的に壊れ、時空自体の基底状態としての“真空”が、高い対称性を持つ状態からより低い対称性の状態へと遷移し、宇宙を支配する物理法則そのものが変化する可能性があるわけです。

さて、それでは SSB の考え方とその素粒子物理への応用へと私自身が導かれるに至った一連の出来事について思い起こしてみることに致します。1956 年のある日のことでした。後に超伝導の BCS 理論 [5] として知られるようになる理論について、R. シュリーファー (Schrieffer) によるセミナーがありました。そのとき私は、彼らの状態ベクトルについての仮説の大胆さに魅惑されたのですが、同時に、この仮説が明らかにゲージ不変性を満たしていないという事実で悩まされることになりました。それから少し経て、ボゴリューボフ (Bogoliubov) [6] とヴァラティン (Valatin) [7] が、独立に、BCS 状態にある物質におけるフェルミオンの励起としての準粒子という考え方を持ち込みました。彼等の準粒子は、運動量に依存して決まる割合で電子と空孔が重なっているような状態でありまして、定まった電荷を持つものではないのです。そうだとしますと、マイスナー効果のような電磁的性質を論ずるのに、どうして BCS 理論を信頼できるのでしょうか。→⁴⁾ この問題を自分で納得できるまでに解決するのに、実は2年ほどかかりました。同じ問題を取り上げた研究者が他にも多くおりましたが、私は自分の独自のやり方で理解を進めたかったのです。→⁵⁾ その解決は、かいつまんで申しますと、質量がゼロの集団モードが1個存在するために電荷の保存則が回復し、ゲージ不変性が保たれるということでした。現在ではこういう種類の質量ゼロモードは一般的に南部-ゴールドストーンボソン (NG) と呼ばれております。→⁶⁾

ボゴリューボフ-ヴァラティン (BV) の準粒子を記述する方程式 [8] を示しますと、

$$(1) \quad \begin{aligned} E\psi_{p,+} &= \varepsilon_p\psi_{p,+} + \Delta\psi_{-p,-}^\dagger, \\ E\psi_{-p,-}^\dagger &= -\varepsilon_p\psi_{-p,-}^\dagger + \Delta\psi_{p,+}, \\ E &= \sqrt{\varepsilon_p^2 + \Delta^2} \end{aligned}$$

となります。ここで、 $\psi_{p,+}$ と $\psi_{-p,-}^\dagger$ は、それぞれ、運動量が \mathbf{p} でスピンの + または - の電子と空孔の波動関数を表します。また、 ε_p はフェルミエネルギーから測った運動エネルギー、そして、 2Δ はエネルギーギャップです。この方程式に対応するハミルトニアン、電荷と電流の密度を、スピン行列 τ_i を用いて、電子と空孔を合わせた2成分の (演算子としての) 場 Ψ によって表すと次の

ようになります。

$$(2) \quad \begin{aligned} H_0 &= \varepsilon_p \Psi^\dagger \tau_3 \Psi + \Delta \Psi^\dagger \tau_1 \Psi, \\ \rho_0 &= e \Psi^\dagger \tau_3 \Psi, \quad \mathbf{j}_0 = e \Psi^\dagger (\mathbf{p}/m_e) \Psi \end{aligned}$$

ただし、 e, m_e はそれぞれ電子の電荷と質量です。すべての \mathbf{p} で、 $\psi_p|0\rangle = 0$ を満たす $|0\rangle$ が、BV の基底状態です。実は全電荷は H_0 と交換可能ではありません^{->7)}。問題はここなのです。つまり、連続の方程式が成り立っていないことになるわけです。ところが、BCS-BV の基底状態に導くのと同一相互作用からは、準粒子とは別の集団的励起 f も導かれること、そして、それが電荷-電流密度に寄与して連続の方程式を回復させる役割を果たすということが分かってまいりました。電荷、電流密度の正しい式は次のようになります。

$$(3) \quad \begin{aligned} \rho &\simeq \rho_0 + \frac{1}{\alpha^2} \partial_t f, \\ \mathbf{j} &\simeq \mathbf{j}_0 - \nabla f, \\ \left(\nabla^2 - \frac{1}{\alpha^2} \partial_t^2 \right) f &\simeq -2e \Delta \Psi^\dagger \tau_2 \Psi. \end{aligned}$$

先ほど触れた NG モードというのはこの f に他ならないのでして、物理学的に言って、これこそが失われた対称性を回復するように働く励起です。この事実、長波長極限で f がグローバルな対称変換を引き起こすため、その励起エネルギーがゼロになるという性質に反映しているのであります。^{->8)} さらに、この NG モードと電子間のクーロン相互作用は長距離で働くという性質を共有している結果として互いに混じり合い、振動数が

$$(4) \quad \omega_p^2 = e^2 n / m_e$$

で定まる、よく知られているプラズモンに変容するという現象が起きます。ただし、 n は電子の密度です。

BV 方程式の形は実はディラック方程式と大変よく似ております。^{->9)} このアナロジーに気がついたことから、私はごく自然に BCS 理論から素粒子物理へと戻ることになりました [9]。そうすると、エネルギーギャップ Δ に対応するのがディラック方程式に現れる質量 M ですので、壊れる対称性はカイラリ

ティーということになります。つまり、通常の電荷では ~ 1 であったところが、 $\sim \gamma_5$ に置き換わり、BCS理論の電磁的ベクトル流に相当するのは軸性流に他なりません。

もしも、この考え方を核子に適用し、カイラリティーが自発的に壊れた対称性であるとの仮定のもとで、4元運動量 p と p' の核子状態間での軸性流の行列要素の可能な形を調べると、核子の質量を M として、

$$(5) \quad \Gamma_{\mu 5}(p', p) = \left(\gamma_\mu \gamma_5 - 2M \gamma_5 \frac{q_\mu}{q^2} \right) F(q^2), \quad q_\mu = p'_\mu - p_\mu$$

となります。この結果によれば、ゼロではない一つの有限な値の核子質量 M がカイラル対称性と両立するには、その前提として、擬スカラーのNGボソンの存在が必要であることとなります。 $\rightarrow^{10)}$ 擬スカラー粒子としてはパイオンが現実に存在していますし、さらに、核子とパイオンの弱い相互作用によって引き起こされる崩壊（弱崩壊）反応に参与するベクトルおよび軸性ベクトルの相互作用において、

$$(6) \quad g_V \simeq g_A, \quad g_\pi \simeq \sqrt{2} M g_A / G$$

という性質が判明しておりました。ここで g_V と g_A は、それぞれ、ベクトル流、軸性流と核子との結合定数、 g_π はパイオンの軸性結合定数、 G はパイオンと核子の結合定数です。このうち、2番目の式はゴールドバーガー-トリーマン関係式[10]と呼ばれていたものでありまして、核子の弱崩壊を表す行列要素の軸性ベクトル流部分が

$$(7) \quad \Gamma_{\mu A}(p', p) \simeq \gamma_\mu \gamma_5 - 2M \gamma_5 \frac{q_\mu}{q^2 - m_\pi^2}, \quad q_\mu = p'_\mu - p_\mu$$

と書けることを意味しています。 $\rightarrow^{11)}$ この式を(5)と比べてみますと、パイオンの質量 m_π があるのが違うだけです。そこで私は、 m_π は M と比較すれば十分に小さいという事実に思いを巡らし、結局、次のような仮説を立てるに至りました。 $\rightarrow^{12)}$ 軸性流は近似的に保存されていて、核子の質量はSSBによって生成される、そして、パイオンこそが対応するNGボソンである。つまり、軸性流が正確に保存する極限では、パイオンはNGボソンとして質量がゼロになると考えようというわけです（この極限では当然陽子と中性子の質量も等しいです）。

この仕事に引き続き、私が提案する SSB を具体的に実現する一つの模型について詳細に調べたのが、ヨナ=ラシニョと共著で発表した論文 [11] です。→¹³⁾ この模型は BCS 模型と形式的によく似た形をしております。ラグランジアン密度は

$$(8) \quad L = -\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi + g\left[(\bar{\psi}\psi)^2 - (\bar{\psi}\gamma_5\psi)^2\right]$$

で、粒子数の位相変換、および、カイラル変換

$$(9) \quad \begin{aligned} \psi &\rightarrow \exp(i\alpha)\psi, & \bar{\psi} &\rightarrow \bar{\psi}\exp(-i\alpha) \\ \psi &\rightarrow \exp(i\gamma_5\alpha)\psi, & \bar{\psi} &\rightarrow \bar{\psi}\exp(i\gamma_5\alpha) \end{aligned}$$

の両方に対してそれぞれ不変です。SSB が起こりますと、 ψ が表わす“核子”は $M \sim 2g\langle\bar{\psi}\psi\rangle$ 程度の質量を持つこととなります。この模型は繰り込み不可能という問題はあるのですが、→¹⁴⁾ その代わりに SSB 機構が成り立つことは、容易に示して見せることができます。→¹⁵⁾ 生成される質量 M は“ギャップ方程式”

$$(10) \quad \frac{2\pi^2}{g\Lambda^2} = 1 - \frac{M^2}{\Lambda^2} \ln\left(1 + \frac{\Lambda^2}{M^2}\right)$$

によって定まります。ここで Λ は切断運動量です。また、核子-反核子（中間子）および核子-核子対（2核子バリオン）のスピンゼロおよびスピン1の結合状態も導かれます。特に、 0^- ($\sim\bar{\psi}\gamma_5\psi$) と 0^+ ($\sim\bar{\psi}\psi$) の中間子質量は、それぞれ $0, 2M$ という結果が得られました。また、これらの結果をより現実に近づけようという目的で、(8) の拡張として2種類のフレーバーを備えた模型についても考察いたしました。→¹⁶⁾

$$(11) \quad L = -\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi + g\left[(\bar{\psi}\psi)^2 - \sum_i(\bar{\psi}\gamma_5\tau_i\psi)(\bar{\psi}\gamma_5\tau_i\psi)\right].$$

ギャップ方程式は前と同様な形になり、それからアイソベクトルの 0^- パイオンとアイソスカラーの 0^+ 状態が得られます。パイオンの現実の質量値は、ラグランジアンに 5MeV のオーダーの小さな裸の質量項をあからさまに加えると説明できますし、さらに、それにより軸性結合定数 g_A の値も正しい方向に変化いたします。

ところで、BCS 型の SSB の他の例 $\rightarrow^{17)}$ として、 ^3He の超流動や原子核中の核子の対相互作用 [12] が知られています。そうした BCS 型の理論ではフェルミオンとボソンの間で、質量に関して単純な関係が一般的に成り立ちます [13]. $\rightarrow^{18)}$ さらに、BCS 理論は電磁場に対するロンドン質量の生成をも説明できるのです。この問題は、ヒッグスのスカラー場を導入すると大変考え易くなります [14]. $\rightarrow^{19)}$ ロンドン質量を m_L として、相対論的な取り扱いでロンドン関係式に相当するものは、運動量空間で

$$(12) \quad \begin{aligned} j_\mu(q) &= -K_{\mu\nu}(q)A^\nu(q), \\ K_{\mu\nu}(q) &= \left(g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{q^2}\right)K(q^2), \\ K(q^2) &\simeq m_L^2 \frac{q^2}{q^2 - m_L^2} \end{aligned}$$

と表せます。この 3 番目の式が、(4) に対応して起きている機構、つまり、質量ゼロの NG ボソンが有限な質量の“プラズモン”に変容する効果を表しております。これが電弱統一理論であるワインバーグ-サラム (WS) 理論 [15] において弱ゲージボソンに質量を与えるのに応用され、成功を収めました。 $\rightarrow^{20)}$ その場合、同時にカイラル対称性が自発的に壊れ、フェルミオンの質量も生成されます。それはアップクォークとダウクォークのいわゆる流れ質量 (current mass) なのでありまして、NJL 模型の場合で言えば、裸の質量に相当する役割を果たすものです。

さて、現在の素粒子物理の標準模型の立場から眺めてみますと、QCD との関係では、NJL 模型はいわゆる構成子質量 (constituent mass) $\rightarrow^{21)}$ の生成に関する有効理論と看做することができるだろうと思います。その場合は、切断エネルギースケール Λ (~ 1) GeV 程度以下の低エネルギーの自由度に注目することになります。そのもとでは Λ を超える短距離の力学的効果だけでなく、クォークの閉じ込めの効果も摂動として扱えるのです。この問題についてはたくさんの人によって幅広く研究がなされてきました。初田と国広のレビュー論文 [16] で採用されている有効ラグランジアンを次に示しておきましょう。 $\rightarrow^{22)}$

$$(13) \quad L = L_{\text{QCD}} \simeq L_{\text{NJL}} + L_{\text{KMT}} + \delta L$$

L_{NJL} がクォークの場の“流れ質量”項を含む NJL 模型です。 L_{KMT} は小林-益川-トホーフトのカイラル量子異常項

$$(14) \quad L_{\text{KMT}} = g_D \left(\det[\bar{q}_i(1 - \gamma_5)q_j] + h.c. \right)$$

です。つまり、この両方がカイラル対称性のあからさまな破れに寄与するわけです (δL が閉じ込めと 1 グルーオン交換の効果を含みます)。

一方、WS 理論は、超伝導をギンツブルグ-ランダウ理論 [17] で記述するのに類似しております。実際、後者は BCS 理論から導かれることがゴルコフ [18] により示されております。それと同様に考えますと、NJL 模型からはゲルマン-レビの模型 [19] に移行することになります。→²³⁾ もしこのアナロジーが本当だとしますと、ヒッグス場は背後にあるべき力学を有効理論の意味で記述するものと言えるのではないのでしょうか。→²⁴⁾

最後に質量の階層構造の問題に触れて今日の話の結びとしたいと思います。階層構造は宇宙の際立った特徴の一つです。確認されている基本的フェルミオンの質量のオーダーは、実に 11 桁に渡って広がる階層をなしています。もちろん、電荷やスピンとは異なり、質量は単純な規則性を持って量子化されているわけではありません。質量は相互作用の効果も寄与して定まる力学的な量であるからです。しかし、量子力学に繋がった水素原子のスペクトルであるとか、あるいは、双対弦理論に導いたレッジ軌跡 →²⁵⁾ のような意味でのパターンのようなものは、私どもには未だに見えておりません。

すでに前に触れたことと関係しますが、BCS 機構はこの問題に関わってくると思います。それによってフェルミオンの質量ギャップが生成されるだけでなく、NG ボソンやヒッグスモードのような低階層にあるボソン状態が生み出されるわけです。このボソンがさらなる SSB の引き金となる役割を果たし、階層的な SSB をもたらす、“タンブリング”[20] と名付けられるような一連の繋がりが起きている可能性が考えられます。実際、そうした例はすでに存在しているのであります。[21]：→²⁶⁾

1. 原子 — 結晶 — 音子 — 超伝導，という繋がり。結晶生成にとっての NG ボソンが音子で、この音子 (phonon) によって誘起される電子のクーパー対が超伝導を引き起こす。

2. QCD — クォークとバリオンのカイラルSSB — π, σ , 他の中間子 — 原子核の生成と核子の対相互作用 — 原子核の集団モード, という繋がり. これについては, さらに詳しい説明の必要はもうありません.

本講義の準備で助力していただいた, G. Jona-Lasinio に深く感謝申し上げます.

参考文献

- [1] たとえば, Y. Nambu, *J. Phys. Soc. Japan*, 76 (2007), 111002 を参照してください.
- [2] W. Heisenberg, *Z. Phys.* 77 (1932), 1.
- [3] C. N. Yang and R. L. Mills, *Phys. Rev.* 96 (1954), 191.
- [4] この名称は, M. Baker and S. Glashow, *Phys. Rev.* 128 (1962), 2462 に由来します.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.* 108 (1957), 1175.
- [6] N. N. Bogoliubov, *J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* 34 (1958), 58. この式は, 彼が *J. Phys. (1947)* Vol. 11. No.1, 23-32 で, 元々は超流動の記述のために最初に導入した変換式のフェルミオン版と言えるものです.
- [7] G. Valatin, *Nuovo Cimento* 7 (1958), 843.
- [8] Y. Nambu, *Phys. Rev.* 117 (1960), 648.
- [9] Y. Nambu, *Phys. Rev. Lett.* 4 (1960), 380.
- [10] M. L. Goldberger and S. Treiman, *Phys. Rev.* 110 (1958), 117.
- [11] Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, *Phys. Rev.* 122 (1961) 345; *Phys. Rev.* 124 (1961), 246. この模型を私が最初に発表したのは, 理論物理学中西部地区会議における講演 “素粒子の超伝導模型とその帰結” においてでした. *Proceedings*, eds. F. J. Biedenhahn *et al.*, Purdue University, 1960, p. 1.
- [12] A. Arima and F. Iachello, *Phys. Rev. Lett.* 35 (1975), 1069; *Ann. Phys.* 99 (1976), 253.

- [13] たとえば Y. Nambu, *Physica* 15D (1985), 147; *Phys. Lett.* 201 (1988), 1.
- [14] P. W. Anderson, *Phys. Rev.* 130 (1963), 439; F. Englert and R. Brout, *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 321; P. W. Higgs, *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 508.
- [15] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* 19 (1967), 1264; A. Salam, in *Elementary Particles*, Almqvist Förlag AB (1968), 167.
- [16] T. Hatsuda and T. Kunihiro, *Phys. Rep.* 247 (1994), 221.
- [17] V. I. Ginzburg and L. D. Landau, *J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* 20 (1950), 1064.
- [18] L. P. Gor'kov, *J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* 36 (1959), 1918.
- [19] M. Gell-Mann and M. Lévy, *Nuovo Cimento* 16 (1960), 705.
- [20] S. Raby, S. Dimopoulos, and L. Susskind, *Nucl. Phys.* B169 (1980), 373.
- [21] Y. Nambu, *Nucl. Phys.* A638 (1998), 35c.

(日本語訳文責：米谷民明)

解 題

米谷民明*

1)

南部は戦後東大に戻ってから物理学科の嘱託職に就いた。1947年頃、先輩の久保亮五が率いる東大物性論グループの影響で、強磁性に対する Ising 模型の Onsager の厳密解に取り憑かれ、生成消滅演算子を用いて解法を簡単化する方法を見つけた（統計力学の専門家、伏見康治等の激励もあり、後に出版：Y. Nambu, *Prog. Theor. Phys.* 5(1950)1）。それが自分にとって「最初の成功」だったと述べている（南部陽一郎，“わが研究の思い出：素粒子論研究”，日本物理学会誌 32(1977)773）。さらに同じ回想の中で「いわゆる統一理論の夢にわれわれは一步近づいてきた。私自身の感想を述べれば、これを可能ならしめたのは、素粒子物理と固体物理との類似性、即ち真空が普通の物質的媒質と非常に似ていることだとおもう。この類似性の程度は私が超伝導模型をはじめたときの予想をはるかに超えたものになってしまった。Weinberg-Salam の W 粒子の理論をはじめ、ハドロンのひも模型や単磁極に至るまで、超伝導、超流動の現象に緊密な対応が見られるのはおどろくべきことである」と、凝縮系物理分野との交流による双方向の実りを強調している。この思いが本講演の副題にも反映していることは指摘するまでもないだろう。

また、対称性の自発的破れ (SSB) とは直接関係するわけではなく、本講演では触れられていないが、統計力学が動機になって生み出され、後に弦理論 (M 理論) にも影響を及ぼしている仕事（‘南部力学’と呼ぶ）“Generalized Hamiltonian Dynamics”, Y. Nambu, *Phys. Rev.D*7(1973)2405 がある。南部の他の多くの仕事は、本解題でもその都度触れるように、ほぼ同時期に他の研究者によっても独立に成されていることに現れているが、その時代の研究の流れとの緊密な相互作用によって生み出されたものである。これとは異なり、『南部力学』はそのような相互作用がほとんど認められないと言えるほど、極めて独創的で特異的な仕事である。若い頃から流体力学にも強い関心を寄せていた南部は、晩年近

*東京大学名誉教授

くになり流体力学との関係も深い南部力学に立ち返り、その量子化を通して太陽系の惑星軌道の分布（Titius-Bodeの法則）の説明に応用しようと試みていた。本講演の最後に議論されている質量の階層性から、より幾何学的な空間構造の階層性にも思いを馳せていたのかも知れない。

なお、『南部力学』は読者の多くには馴染みがないかも知れない。興味があれば、訳者の解説、米谷民明，“南部力学と南部括弧”，日本物理学会誌 72(2017),231, を参照していただきたい。また，PTEP でも特集企画，“Recent Development of Nambu Mechanics in Physical Systems of Micro to Macro Scales I”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 12(2021)12月号，として取り上げている。

2)

解題 1) で引いた 1977 年の南部の回想の最後近くに「私は Heisenberg が物理学の本質は対称性の原理であるとどこかで言っていることをちらと思い出した」とある。南部の仕事の多くは何らかの形で対称性と深く関わる。言うまでもなく、対称性は西欧の科学的思考の原点からすでに支配的な意味を持っていた。近代物理学の意味で対称性を積極的に用いて物質の性質を調べるための普遍的方法論であることを明確にした最初の人、南部自身も [1] で触れているが、P. Curie であったようだ（たとえば、日本語の成書では『ピエール・キュリー伝』（キュリー夫人著、渡辺慧訳、白水社、1959年）第3章、特に p.46–60 を参照）。彼の磁性体磁気の温度依存性（キュリー-ワイスの法則、キュリー点）の研究は、本講演で触れられている物質の SSB、特に温度依存性（本文 3 ページ目の性質 3.）と直接関わる。また、彼が定式化した対称性に関する考え方に関する 3 原理のうちの一つ「ある結果が非対称を現すときは、この結果を引き起こした原因においてこの非対称が再発見されねばならない」は、「原因」の追求に関して、精神的な意味で SSB と繋がる側面を持っていたと言えよう。現代物理につながる意味での SSB の最初の理論的例こそ、P. Debye の結晶の比熱の理論（1912年）であろう。無限に大きい結晶格子の振動数に限りなく小さい値が可能であるのは、本文でも何度か触れられているように、まさに連続的並進対称性の自発的破れによる NG の存在に対応する。

そして、対称性をそれまでの段階とは全く違う新たな仕方で新たな理論を構築するための指導原理（相対性理論、特に、一般相対性理論）とすることによ

り、物理学のページを改め後世に最も大きく影響した物理学者は、言うまでもなく Einstein である。さらに、量子力学においてその後を継いだ多くの物理学者を代表するのが、Heisenberg、並びに本講義の中盤から重要な役割を果たす Dirac である。Heisenberg はアイソスピンの提唱者 [2] であるだけでなく、スピン交換力による強磁性体の模型 (1928 年) を提唱し、最も典型的な SSB の量子力学的起源の発見者でもある。一方、あからさまには引用されていないが、Dirac の場合、本講演内容にとって特に重要な点の一つは、真空がただの空でないこと (本文 3 ページ目) を最初に明らかにしたのが、電子の相対論的場の方程式 (1928 年)、つまり、Dirac 方程式の時空間反転不変性に対応する負のエネルギー解の物理的解釈から生み出された Dirac の海 (Dirac sea \rightarrow 真空のエネルギー \approx フェルミ面, 1930 年) のアイデア、そして空孔としての反粒子の概念であったことだ。これこそが、南部が着眼した BCS 理論と Dirac 方程式のアナロジー (本文 5 ページ, 解題 9 参照) に導くのに最初の契機を与えるものであった。

もちろん、Dirac の海の解釈は現在の標準的な量子場における振動因子 $e^{\pm i\omega t}$ の符号とその係数としての粒子と反粒子の生成消滅演算子を最初から完全に対称的に取り扱う立場からは不要であるが、粒子・反粒子対の生成消滅による真空のゆらぎの概念はそのまま成り立つし、南部のアナロジーも少し概念を入れ替えればそのまま成り立つ。対称的扱いは、私が知る限りでは、最初、W. H. Furry and J. R. Oppenheimer, *Phys. Rev.*45(1934), 245 において定式化された。この方法は、E. Majorana の 1937 年の論文で別の観点から再発見され、さらに粒子と反粒子の区別がつかない fermion, いわゆる Majorana 粒子, の可能性が指摘された (ちなみに、Majorana の 1937 年論文はイタリア語で発表されたものだが、L. Maiani による英訳が本誌, 素粒子論研究 63(1981),149 に出版されている)。Dirac の海のアイデアは boson にはそのままでは通用せず、例えば、Klein-Gordon 場では使えないが、対称的扱いは統計性に依存せず、より高い普遍性を持つ。

3)

Heisenberg [2] が核力に関して提唱したアイソスピン (元はアイソトピックスピン) 対称性は、対称性の変換が時空全体で共通の大局的対称性であった。これは現実には近似的な類似性であったものの背後に対称性を見つけようとする方

向である。核力だけに制限すれば正確に成り立つ対称性であるとの仮定により湯川中間子論（1935年）でも核力の理解を進めるための基本的指針の一つとなっていた。この湯川の仕事には、1年前のFermiの β -崩壊の論文が大きな刺激になったことがよく知られている。実際、そこでは、原子中の電子状態の変換に伴って光子が放出される機構とのアナロジーに基づき、アイソスピン第3成分の変化という「核子状態」の変換に伴って電子とニュートリノの放出が起こるといった描像が提唱されていた意味で、やはり、アイソスピンの考え方が背景にあったのである。南部はFermiの仕事には触れていないが、Fermi（弱い相互作用）と湯川（強い相互作用）のこの二つの仕事が現代的な意味での素粒子論の出発点になったと言える。

一方、一旦大局的対称性として確立した対称性から出発して、さらに、対称性の変換を時空の各点で独立に行う局所的対称性に拡張することをゲージ化と呼ぶ。南部は最初の方に比べてこちらの方を「逆方向」として考え方の違いを強調したわけである。ゲージ化を行うと、粒子の時空中での運動自体（静止状態でも時間が進むという意味での一般化された運動）が粒子場の局所的な対称変換が起こることに対応してゲージ粒子（ゲージ場）の放出・吸収が必然的に起こり、それによって粒子間の相互作用が記述できる。ゲージ化により普遍的な対称性に基づき相互作用を記述しようとする考え方をゲージ原理と呼ぶ。対称性によって相互作用という力学をも支配できるというのは確かに非常に魅力的な考えである。広い意味での（つまり、方法の詳細の違いはさておいて）ゲージ化の最初の成功例こそ、特殊相対性理論から一般相対性理論への拡張であったし、また電磁相互作用のゲージ原理に基づいた理解であった。しかし、どちらもゲージ粒子がゼロ質量の長距離力であることが共通であった。ヤン-ミルズ（Yang-Mills）理論 [3] は核力（＝強い相互作用）のアイソスピン対称性SU(2)のゲージ化を提唱したものだが、強い相互作用を含む素粒子の基本相互作用のゲージ理論的定式化、そして、ひいては標準模型への出発点になった仕事である。だが、強い相互作用は短距離力で、それを現実に適用するには単純には質量項を含めなければならず、ゲージ不変性が壊れてしまう。この困難のため、Yang-Mills理論には当初Pauli等による厳しい批判があったことがよく知られている。

歴史的には、非アーベル群の内部対称性のゲージ化に関しては、最も初期の

アイデアとして O. Klein の先駆的な論文 (1938 年) がある。また、1950 年代前半に Yang-Mills と独立に同様な考えをいただいた研究者が他にも複数いたこともよく知られている (YM 理論批判の急先鋒であった W. Pauli 自身に加え、内山龍雄, R. Shaw, ...)。これらゲージ理論の歴史と関連文献については L. O’Raifeartaigh, “The Dawning of Gauge Theory”, Princeton Univ. Press を参照するとよい。

本講演では触れられていないが、非アーベル群の場合にはゲージ場自身の自己相互作用による非線形性が効いて (より正確には、格子正則化した理論や非自明な古典解の励起によりゲージ群がコンパクト群として振る舞う場合、アーベル群でも非線形性が効いてくる)、質量が量子的な非摂動的機構により力学的に生成される可能性がある。本講演でも最後に触れている現在の標準模型の QCD では、アイソスピンではなくクォークのカラー SU(3) 対称性をゲージ化し、ゲージ不変性を壊さずに (むしろ、ゲージ不変性が最も高度な仕方で実現されているために) 実際に有効的な意味で質量が生成されハドロンの質量スペクトルが説明できることが実質的に数値実験等により確立されている (ただし、数学的な意味で厳密に証明されているわけではない。摂動論的な性質としては漸近自由性がこれと密接に関係する)。その結果としてクォーク質量がゼロの極限では大局的カイラル対称性が成り立ち、それが自発的に壊れた真空が実現される。本講演でも後に強調されるように、NJL 模型はこのような QCD での質量生成機構が示す特徴のうち、カイラル対称性の SSB による核子質量の生成に関しては低エネルギー有効理論の役割を果たすと、南部は考えていた。

一方、ヒッグス (Higgs) 機構は、ゲージ対称性のうちの無限遠まで広がるグローバル変換に対応する大局的な部分が自発的に壊れて実現する場合に生じる NG ボソンとゲージ場が混合することによって (従って QCD とは別の仕方で) ゲージ場の質量の生成が起こる現象である。このとき、NG ボソンは最初から質量の種としての独立な力学的自由度として導入されたヒッグス場から生じる。しばしば簡単に “ゲージ対称性が自発的に壊れる” というような表現がされることがあるが、局所対称性 (無限遠での対称変換が恒等変換に等しい) としてのゲージ不変性が壊れているわけではないことに注意しなければならない。実際、本講演の前半で触れられる南部自身や他の研究者による BCS 機構におけるゲージ不変性の追求もそれを確かめることが目的であったのである。

歴史的観点からさらに触れておくと、クォーク模型以前の段階で、[3] に基

づき、現実の強い相互作用をアイソスピン対称性 $SU(2)$ のゲージ化（より正確にはバリオン数、および‘奇妙さ’とバリオン数の適当な組み合わせ“hypercharge”も同時にゲージ化しているので、ゲージ群は $SU(2) \times U(1) \times U(1)$ ）によって定式化しようとした桜井純（実は、当時、南部とシカゴ大学で同僚）の勇敢な試みがあった（J. J. Sakurai, “Theory of Strong Interactions”, *Ann. Phys.* 11(1960)1）。このアイデアは vector dominance と呼ばれて当時の強い相互作用の研究に大きな影響を及ぼした。彼は「 B 質量（[3] ではゲージ粒子は b 量子と名付けられている）の問題のために理論を諦めるのは、量子飛躍（“quantum jumps”）に関わる困難のせいで Bohr の原子模型を諦めてしまうのと同じくらい惜しいことだ」（拙訳）と述べ、質量問題にも拘らずゲージ原理を追求することの重要性を強調している。解題 20) で触れるように、この仕事は、[14] のアンダーソン（Anderson）の論文（Higgs 機構に関する先駆的工作）の動機になっているという意味でも、実は本講演の内容とも深く関係するし、南部自身にも少なからぬ影響を与えていた。これに関連しては、南部の述懐「対称性の破れを伴うゲージ原理の本当の意義は、桜井や私が考えていた強い相互作用ではなく、実は弱い相互作用に見出されるべきであったことが、その後明らかになったのである」（拙訳）がある（Y. Nambu, “Gauge principle, vector-meson dominance, and spontaneous symmetry breaking”, in *Pions to Quarks—Particle physics in the 1950s*, eds. L. M. Brown et al. Cambridge Univ. Press, 1989, p. 639）。南部のこの述懐はその後のゲージ理論の標準模型への発展の錯綜し、皮肉に富む経過を反映するものである。このように、ある特定の現象を説明するために提唱されたアイデアが、結果的には様々な変遷を経て、実際には最初の提唱者の視野には入ってなかったような異なった対象や異なったスケールにおいて本質的な役割を果たすというようなことは、物理学の歴史ではよく起こっていることである。上に述べたように、強い相互作用のゲージ理論である QCD は、ゲージ対称性が最も高度に実現しているとされる（大局的なゲージ変換に対してさえも不変な状態のみしか物理的スペクトルに現れない）理論であり、その意味では（真空自体が大局的ゲージ変換で不変ではなく無限に縮退している）SSB とは対極にあると言える。だが、それは 70 年代の中盤から後半になってやっと一般に認識されてきた見方なのである。より詳しくは解題 21) を参照していただきたい。

また、さらにこうした背景に関連して付け加えさせていただくと、訳者の

個人的な体験で恐縮だが、私は QCD (1973 年) が提唱される数年前の大学院修士課程の頃、桜井論文を知って大きな感銘を受け、博士課程での研究テーマとして、最初は強い相互作用の現象論的模型として生まれた双対共鳴模型 (後に弦理論に発展, 解題 25) 参照) におけるゲージ原理の役割, そして、さらに一般相対性理論との関係へと思いを巡らすきっかけになったことを思いだす。今から見れば現代的な「ゲージ/重力対応」の芽がそこにあったと言えるが、それが 1/4 世紀を経て当初の段階では夢にも想像つかないような新たな展開に繋がった。

最後に南部の述懐で一言触れられている弱い相互作用へのゲージ原理の応用の試みについても簡単に触れておこう。例えば、広く知られているわけではないが、弱い相互作用の V-A 流を SU(2) 群に基づくゲージ場と結合させるカイラルゲージ理論につながるものとしては、最も初期の (桜井による強い相互作用への応用に先行してなされた) 仕事として S. Bludman, “On the Universal Fermi Interaction”, *Nuovo Cim.* 9(1958) がある。また、SU(2)×U(1) ゲージ群により電磁相互作用と弱い相互作用と統一する初期の試みとして S. L. Glashow, “Partial Symmetries of Weak Interaction”, *Nucl. Phys.* 22(1961), 579 はよく知られている。もちろん、これら初期の仕事は桜井論文と同様にゲージ場 (およびフェルミオン) の質量を与える正しい方法を欠いている。その解決には上で触れたゲージ理論における SSB を用いる Higgs 機構に基づいて初めて弱い相互作用の短距離力と電磁相互作用の長距離力を両立させることに成功した Weinberg-Salam 理論 (1967 年) まで待たなければならなかった (解題 20, 23) 参照)。そして、その意義が一般的に認識されるには 70 年代のゲージ理論の量子化に関する進展が必要で、さらに 4~5 年を経る必要があったのである。

4)

このように異なる電荷の状態が重ね合わさったような状態は、電荷を観測するたびに異なる結果を招き、そのままでは量子力学における電磁相互作用の記述にはどうしても欠かせないゲージ不変性を成り立たせることは不可能になり、電荷の保存則も成り立たない。しかし、そもそもゲージ不変性が成り立っていないように見える理論で超伝導に特有な電磁現象を本当に正しく扱えるのかというのが、南部の抱いた疑問である。最初からゲージ不変性を放棄してしまう

なら、そもそも質量はいくらでも手で加えることができ無意味になってしまうから、これは当然の疑問であった。

一方、マイスナー (Meissner) 効果は超伝導体 (つまり、抵抗がゼロ、言い換えると電気伝導率が無限大の物質) を磁場中に置くと、磁場の強さがある臨界値を超えない限り内部に侵入できないという超伝導に特有な電磁的現象の典型例である。これは超伝導体の表面に反磁性電流と呼ばれる一種の (電気伝導率が無限大で可能な) 永久電流が生じることによって起こる。特に第2種と呼ばれる超伝導体の場合は、ある臨界値の強さから磁場が細い渦糸の形で内部に侵入した状態が可能になる。その場合、渦糸の周りに巻きつくように反磁性電流が発生する。このため、もし仮に磁気単極子が存在するとして、それが超伝導状態に侵入することが可能な場合には、磁束の保存のため磁気単極子には必ず渦糸が付随すると考えられる。特にもし反対符号の磁気単極子の対があるなら、それらは渦糸で結ばれるため、そのエネルギーは磁気単極子対の距離に比例し対を無限に遠くまで引き離すことが不可能になる (磁気単極子の閉じ込め) という特徴的現象が起こると考えられる。後出のように、Meissner 効果は、相対論的な場の理論の立場からは Higgs 機構によって電磁場が有効的に質量を獲得する機構と本質的には同じである (詳しくは解題 19,20 を参照)。その場合も渦糸の解が存在でき、その運動は一種の紐の力学で扱える (H. B. Nielsen and P. Olesen, "Vortex-line models for dual strings", *Nucl. Phys. B*61(1973), 45)。南部の先の疑問はこのような理解が得られる以前の段階のものであるが、そこから 1960 年代から 70 年代にかけてこのような描像が生み出されるのにも繋がってゆく。

5)

ゲージ不変性の問題は、当然、当時多くの研究者を悩ました。BCS の著者の一人、Bardeen 自身も問題点を指摘する論文を書いている。これを反映し、[8] にはゲージ不変性に関連して当時までに発表されていた多数の論文が引用されている。BCS 理論では、ベクトルポテンシャルの縦波成分が正しく取り扱われていないのが原因で、(局所) ゲージ不変性が成り立っていないことが明らかにされたのである。1977 年の南部の回想の中の一言を引用すると、「その間に Bogoliubov, Anderson などの専門家がどんどん BCS 理論を精密化していった。」

実際、すぐ後で出てくる集団モード f の存在についても、最初に Bogoliubov[6] によって指摘されていた。それらに比べて少し遅れはしたが、[8] では、ゲージ不変性の回復へ向けて、量子電気力学で発展した (Feynman-Dyson の) 方法を用いて電荷の固有状態ではない準粒子の力学での“輻射補正” (電磁場の量子的揺らぎの効果) を取り入れて独自の定式化を与えた。

ただ、これらはもちろん大変重要な理論的進展であることに変わりはないが、BCS の主要結果そのものに実質的に大きな影響をもたらすものではない。すぐ後に出てくるように、縦波成分は電子対集団モード (NG ボソン) と一緒になって (有限質量の) プラズマ振動になり、十分に低エネルギーでは定性的な意味で無視できるためである。

6)

相対論的な場の理論の枠内で大局的な対称性が自発的に壊れた仕方で実現する場合、必然的に質量ゼロモードが現れることを、南部の仕事の影響の下で、一般的に示したのが、J. ゴールドストーン (Goldstone) である (Goldstone の定理: J. Goldstone, *Nuovo Cimento* 19(1961) 154; J. Goldstone, A. Salam, and S. Weinberg, *Phys. Rev.* 127(1962)965, 公理的な厳密な定式化に関しては次の解題 7) を参照のこと)。彼の最初の論文では、場の理論における SSB の最も簡単で物理的イメージが明確な例として ϕ^4 型のスカラー場の場合も含めて論じている。ただし、局所的なゲージ対称性を持つ理論では、Higgs 機構によって NG モードがゲージ場の一部と混合し、ゼロでない質量のゲージ粒子を生成する (すでに解題 4) で触れたように Meissner 効果の相対論版)。なお、Goldstone はフェルミオン多体系に Feynman グラフの方法を最初に適用した (1957 年) パイオニアの一人である。

7)

全電荷が H_0 と交換可能でないのは、 H_0 の第 2 項のためで、 $[\tau_3, \tau_1] = 2i\tau_2$ に対応し、 ρ_0, \mathbf{j}_0 は $\partial\rho_0/\partial t + \nabla \cdot \mathbf{j}_0 = 2e\Delta\Psi^\dagger\tau_2\Psi$ を満たす。右辺がゼロではないため、連続の方程式が成り立たない。記号 Ψ は電子と空孔を合わせて 2 成分の場の演算子を表すが (本文では (1) の波動関数と場の区別がされていない)、すぐに後で出てくる Dirac 方程式との類似性を明白化する意味で重要であった (解題 9) 参照)。スピンとのアナロジー自体は、[8] でも引用されているように、Anderson

(P. Anderson, *Phys. Rev.* 112(1958)1900) も気がついていて、ほぼ同等な物理的結果を異なる方法（乱雑位相近似の方法）で先行して導いている。だが、彼の取り扱い方では記号の使い方から見ても Dirac 方程式との関係に思い至るのは難しそうである。[8] では南部自身も Dirac 方程式との関係についてはまだ直接的には言及していない。しかし、Dirac 場に親しんだ目で (2) を見るなら、その 2 成分を Dirac 場の chirality の違いに対応させると、Dirac 方程式との類似性は明らかである。実際、解題 1) で触れた 1977 年の回想によれば、南部にとって「これから先は Dirac 粒子の質量と超伝導体のエネルギーギャップとの類似に至るのは一足とび」であった。素粒子物理と凝縮系物理の両方に確固とした足場を持っていた南部にしてこそその独自の着眼であった。

ただ、もちろん、新しいオリジナルなアイデアにはいつもそれなりに抵抗もあることは避けられない。基底状態＝真空が無限に縮退する結果として NG モードが導かれると、数学的に厳密な場の理論の定式化を目指す、いわゆる『公理論的場の理論』や厳密な散乱理論（S 行列の理論）の構成における（通常は真空の一意性と有限な質量ギャップの存在を暗黙の前提とする）標準的な基本公理とは一見抵触することになる。桜井論文との関連において解題 3) で引用した同じ回想には「私にとって恐らく最も勇気を要したのは、公理論における真空の性質に関するドグマへ挑戦する結果になったことだった」（拙訳）とある。関連して付け加えると、南部や Goldstone 等の仕事から 5 年ほどして、SSB の数学的に厳密な定式化が C^* 代数の理論に基づいて与えられている（D. Kastler, D. W. Robinson, and J. A. Swieca, *Comm. Math. Phys.* 3(1966),108.）つまり、南部にとっては一種の挑戦と感じられたものも、実は厳密なアプローチ側に逆方向に大きく影響を与えていた。これは SSB が無限に大きい自由度の系で生じる典型的で特徴的な現象であるから、その数学的に厳密な定式化も重要な課題になるため当然のことであった。

物理的なアナロジーを大切にして柔軟な思考を進めるところが、南部の仕事の独自性を特徴付けているように訳者には思える。南部自身あるインタビューで「何であれ、みかけ上のアナロジーがあれば、それを偶然のものと考えずに、その背後に本質的な、実体的な何かがあると考えたい」と述べている（南部陽一郎+H.D.Politzer, 『素粒子の宴』工作舎, 1979 年, p.163）。南部と訳者との個人的会話を思い起こしても、いつも何らかの意味でのアナロジーが話題になると

話が弾んだ。逆に南部にとってそのようなアイデアの面白さを感得できない場合なのか、驚くほど厳しい評価の言葉を聞いてびっくりすることもあった。後に解題 13) で触れる Heisenberg の非線形スピノル理論に対する南部の批判は、そのような厳しい評価の典型である。

8)

(3) の 3 行目の波動方程式はモード f が $\Psi^\dagger \tau_2 \Psi$ で表されるフェルミオン対を源とする励起であることを示す。 H_0 の中で電荷保存の対称性を壊すハミルトニアン H_0 の第 2 項に全電荷 $\int d^3x \rho_0$ (=大局的ゲージ変換の無限小生成子) を作用して得られるのが、この対であるという意味で、確かに失われた対称性の回復に対応する対称変換を引き起こす励起が f である。この f の寄与を加えて (3) の 3 行目の波動方程式が成り立つことにより連続の方程式が回復される。波動方程式の左辺には質量項がないため、特に時間依存性がない静的状態では集団モード f は、その源からの距離 r に関して $1/r$ 則で長距離に広がって分布する雲のような役割を果たすわけである。NG モードとクーロン相互作用の混合に基づいたプラズマ振動数 (4) の導出については解題 19) を参照のこと。なお、等式を表すのに \simeq 記号を用いているのは、もちろん、いくつかの近似、特にハートリー (Hartree) - フォック (Fock) 型の近似を行なった結果であるためである。また、 α について全く説明がないが、フェルミ面での運動量の大きさを p_F とすると近似的には $\alpha^2 \simeq p_F^2/3m_e^2$ で定まる定数である (つまり α がフェルミ面での電子速度に比例)。

ここの議論に関連した原文からの修正変更箇所について触れておく。原文では式 (2),(3) に電荷 e が抜けている (実は元論文 [8] でも、 e が抜けているのと正しく入っているのと両方の式が前半と後半で混在している)。 (4) にも次元が合わない誤植 (正しくは $e^2 n$ が、原文では en^2 となっている) がある。原文では電子の質量が m となっているが、後にロンドン質量も同じ m で表される。混乱を避けるため、訳文では電子質量を m_e に、ロンドン質量を m_L 、プラズマ振動数をただの ω から ω_p に変更した。これらの修正に伴い、 e, m_e 等の記号説明を該当箇所に移動したり、追加したりした。同様に、電子という粒子の固有の電荷、電荷密度、全電荷という異なる 3 つに対して全て単に 'charge' と同じ単語が使われているが、訳文では初学者の混乱を避けるため、一部では区別して表現した。

9)

質量 M の Dirac 方程式は、4 成分の Dirac 場 ψ をカイラリティ (chirality) $\gamma_5 = \gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_0$ の固有関数 ($\gamma_5\psi_{\pm} = \pm\psi_{\pm}$) として 2 成分で表されるの固有関数 ψ_+, ψ_- (Weyl スピノル) を合わせた 2 階建 $\psi = \begin{pmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{pmatrix}$ にして表すと、運動量空間で (1) 式と酷似した

$$\begin{aligned} E\psi_+ &= \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}\psi_+ + M\psi_-, \\ E\psi_- &= -\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}\psi_- + M\psi_+, \end{aligned}$$

($E = \pm\sqrt{\mathbf{p}^2 + m^2}$) という 2 本の式になる (ただし、 $\boldsymbol{\sigma}$ は、 ψ_{\pm} それぞれの 2 成分スピノルに作用する Pauli のスピン行列)。 (2) のギャップ項 $\Psi^\dagger\tau_1\Psi$ が Dirac 場の質量項 $\bar{\psi}\psi = \psi^\dagger\gamma_0\psi$ に対応し (Dirac の負エネルギー電子の「真空海」の立場では、 $2M$ が実際にもエネルギーギャップに他ならない、つまり、[真空海 ~ 軸性流に関する超伝導基底状態] というアナロジー)、大局的位相変換 (無限小生成子: $\Psi^\dagger\tau_3\Psi$) をギャップ項に作用させると $\Psi^\dagger\tau_2\Psi$ が得られるのと同様に、大局的カイラル (chiral) 変換 (無限小生成子: $\bar{\psi}\gamma_0\gamma_5\psi = \psi^\dagger\gamma_5\psi$) を質量項に作用させて得られるのが $\bar{\psi}\gamma_5\psi = \psi^\dagger\gamma_0\gamma_5\psi$ 。南部が 1 が γ_5 に置き換わると言っているのは、 $\bar{\psi}\psi$ と $\bar{\psi}\gamma_5\psi$ の関係のことである。 (2) 式との対応で言うと、形式的なアナロジーは $\varepsilon_p \rightarrow \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}, \Psi \rightarrow \psi, \tau_1 \rightarrow \gamma_0, \tau_2 \rightarrow \gamma_0\gamma_5, \tau_3 \rightarrow \gamma_5$ である。また、(比例係数の電荷を除き) 電磁ベクトル流 (=4 元電流) は $j_\mu = \bar{\psi}\gamma_\mu\psi$, 軸性流は $j_{\mu 5} = \bar{\psi}\gamma_\mu\gamma_5\psi$ と書けるのに注意。

10)

(5) の第 1 式の括弧内第 2 項の分母があるため、質量ゼロの NG ボソンが伝播した寄与と解釈できる。「前提」という言い方は、この解釈による。ただし、形状因子 $F(q^2)$ が $q^2 \sim 0$ の近傍で特異点を持たないスムーズな関数であることも暗黙の前提としていることに注意。この結果は軸性流が保存して連続の方程式 $\partial^\mu j_{\mu 5} = 0$ が成り立つという仮定のもとで核子に対する Dirac 方程式を用いて導かれる。下の (6) 式に出てくる g_π は通常は f_π と書かれ、パイオン (pion) 崩壊定数と呼ばれることが多い。軸性流との結合の強さが、レプトン (lepton) への崩壊確率を定めるためである (典型的には $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$)。なお、原文では (5)

の最初の等式の次に $\bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi}e^{-i\alpha}$ が挿入されている。これは前後の関係からしてここでは無意味で明らかな誤植なので削除した。

11)

軸性流と核子の結合は、軸性流の核子の行列要素 $\langle n, \bar{p} | j_{\mu 5} | 0 \rangle$ ($\propto g_A$) によって表される。状態 $|n, \bar{p}\rangle$ はパイオン状態 ($|\pi^-\rangle$) と結合する (強さが G) ので、低エネルギーではパイオンと軸性流の (パイオンの弱崩壊の振幅を与える) 行列要素 $\langle \pi^- | j_{\mu 5} | 0 \rangle$ ($\propto g_\pi$) を用いて近似的に $\langle n, \bar{p} | j_{\mu 5} | 0 \rangle$ を表すこともできる。両者の比較からゴールドバーガー-トリーマン (Goldberger-Treiman) 関係式が得られる。(7) の右辺第 2 項が中間状態としてパイオンが伝播する効果の寄与。元々 g_A の定義により、式 (5) では $F(0) = 1$ であることに注意。(7) 式が \simeq になっているのは、分散公式と呼ばれる S 行列要素の解析性に基づく数学的関係式を用いているとは言え、上で述べた中間状態以外の寄与が無視できるという大きな仮定が入っているため、実験事実との近似的な合致でしか正当化が困難な現象論的な関係とみなすべきものだからである。この導出については、 $g_V \simeq g_A$ も含めて、成書ではたとえば、K. Nishijima, *Fields and Particles: Field Theory and Dispersion Relations* (W. A. Benjamin, Inc., 1969, Ch. 8) に詳しく議論されている。また、GT 関係式を巡っての当時の研究者間のやりとりについて、Treiman 自身による興味深い回想がある (S. B. Treiman, “A connection between the strong and weak interactions”, in *Pions to Quarks*, eds. L. M. Brown et al., Cambridge Univ Press, p. 384. 解題 3) でも同書から南部の回想を引用した)。また、これらについての現代的な解説としては、たとえば Weinberg の教科書 S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields Vol. II* (Cambridge Univ. Press, 1996) 19.4 節 “Pions as Goldstone Bosons” がある。歴史についても触れられており、南部が果たした役割が強調されている。

12)

これは PCAC (Partially Conserved Axial Current) 仮説と呼ばれた。解題 10) で強調したように、PCAC 仮説は $F(q^2)$ が緩やかな関数であるという仮説を含む。PCAC については、南部の [9] とほとんど同時期に独立に Gell-Mann-Lévy [19] も実質的に同様な議論を場の理論の模型 (シグマ模型, より詳しくは後の解題 23)

を参照のこと)に基づき与えている。その前に核子とレプトンに共通に成り立つ弱い相互作用の普遍的性質を説明するために、アイソスピンベクトルの極性流が保存するという CVC (Conserved Vector Current) 仮説 (S. S. Gershtein and Y. B. Zeldovich, *Zh. Eks. Teor.Fiz.* 29(1955),698; R. P. Feynman and M. Gell-Mann, *Phys. Rev.* 109(1958)193; J. J. Sakurai, *Nuovo Cim.* 7(1958), 649) が提出されていたが, PCAC はそれをアイソスピン軸性流にまで拡張したものと言える。いずれも, 弱い相互作用, およびその強い相互作用との関係に関する現象論的・実験的性質を対称性の観点から整理し説明しようとする試みから生み出されたわけである。 $m_\pi = 0$ の極限では, 核子の裸の質量はゼロで, CVC により通常の SU(2) 対称性が保たれるので, SSB により生成される陽子と中性子の質量は必然的に等しい。

南部自身の回想 (南部陽一郎, “素粒子物理の青春時代を回顧する”, 日本物理学会誌 57 (2002 年, 1 月号) p. 2) によると, 「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, ソ連の惨めな状態のため会議の議事録が出るのに 2 年もかかっている。」(南部自身は実はこの発表のことを長い間忘れていたが, Marshak が思い出させてくれたとのこと。)『ロチェスター会議』とは, QED の爆発的進展のきっかけになったことでよく知られている 1947 年の Shelter Island 会議の後を受け, 1950 年代の初頭から当時 Rochester 大学の R. Marshak の尽力により, 同大学で数回開催されたのを皮切りに定期的に回り持ちで開催されるようになった素粒子物理関係の大きな国際会議のことで, マルシヤク会議と呼ばれることもある。1950 年代におけるその経緯と成果について, Marshak 自身による回想が解題 3) で引用した成書 *Pions to Quarks* p. 45 にある。日本人研究者の寄与に関しては, 特に坂田模型 (解題 21 参照) の U(3) 対称性に関する大貫義郎等の貢献 (IOO 対称性。この仕事は, その後の対称性に基づく素粒子の分類手法の手本となる役割を果たしたと言える), 南部の貢献を強調している。

その後の発展に少しだけ触れておこう。PCAC が成り立つと, 核子の散乱においてはカイラリティーの変化に伴ってカイラル対称性の SSB の NG ボソンとしてのパイオンが励起されることになる。ちょうど, 超伝導で電流の保存則を回復するのに NG ボゾン f の励起が伴うのと同様である。南部は [11] に引き続き,

この過程に対応する振幅をパイオンの運動量が小さい極限で系統的に表す公式を与えた（ソフトパイオン定理, Y. Nambu and D. Lurié, *Phys. Rev.* 125(1962),1429). 一方, CVC 仮説によれば, 極性ベクトル流が保存するためベクトル結合定数 g_V は強い相互作用による繰り込み効果を受けないが, PCAC 仮説により軸性ベクトル流も近似的に保存することになるので, 軸性ベクトル結合定数 g_A のほうもパイオン質量がゼロの極限では繰り込み受けないことになり, 式 (6) の第 1 式と調和する. さらに, これらの流れの交換関係が成す代数 (Current Algebra, 流れ代数, 最初 Gell-Mann により提唱された. Gell-Mann, *Physics* 1(1964),63) と PCAC を組み合わせると, より一層精密な結果が得られる. その代表的な例は, パイオン質量がゼロでない場合に, 繰り込み効果の違いによって生じる g_A と g_V との間の差を, パイオンと核子の散乱断面積に結びつける関係式 (Adler-Weisberger relation, S. L. Adler, *Phys. Rev.* 140(1965),B736; W. L. Weisberger, *Phys. Rev.* 143(1965),1302) である. これで実験的に知られていた g_V と g_A の違い ($g_A/g_V \approx 1.2$) を, 強い相互作用の繰り込み効果により説明できることが判明した. これはこの時期に発展した分散理論と呼ばれたアプローチで達成された最も目覚ましい成果であった. 流れ代数と分散理論の方法は観測可能量の間をその内部的な力学の詳細に依存しない仕方で調べるという意味で, 動機や考え方が量子論の初期段階において, Bohr や Heisenberg 等がとったアプローチに非常に近い. 後者が量子力学の確立に繋がったのと同様な意味で, これらの成果は, 弱い相互作用の V-A 理論 (Feynman-Gell-Mann, および独立に E. C. G. Sudarshan and R. F. Marshak, *Phys. Rev.* 109(1958)1860, J. J. Sakurai, *Nuovo Cim.* 7(1958), 649) を確立するのにも重要な役割を果たし, さらに, およそ 10 年後におけるゲージ原理と Higgs 機構に基づく WS の電弱統一理論 [15] という本質的な力学的理論に繋がったのである.

なお, 60 年代までの発展をかなり包括的に論じた南部自身によるレビューとして, Y. Nambu, “Symmetry Breakdown and Small Mass Bosons”, *Fields and Quanta* 1 (1970),33 がある. これを見ると, 南部が当時, 何を重視していたかがよく分かる.

13)

(8) は BCS 理論における音子 (phonon) 交換に起因する電子 2 体引力項 (電子エネルギーが音子の典型的振動数に比べて小さければ局所的な 4 点相互作用で近似で

きる)を核子場 ψ の相対論的な局所的4点相互作用に置き換えた形をしている。解題1)で触れた1977年の南部の回想には「要するに非線形模型をとった理由は、はじめからcut offを入れて、他の下らぬ手品をやらなければ数学的取り扱いは非常にすっきりしているから」とある。「下らぬ手品」とはきつい表現だが、Heisenbergの「形式的でかつ強引で受け入れ難い」難解な取り扱いとの対比を強調したもの。

というのは、[11]の本文でもさりげなく触れられているが、形式的にはこの模型とほとんど同じ非線形スピノル場理論が、Heisenbergによって1950年代前半から素粒子の統一場理論の候補として追求されていたのである(一時的にPauliが加わり共同研究をしているが、彼はすぐに放棄し、Heisenbergにとって最も辛辣な批判者になった)。例えば当時のレビューとしてW. Heisenberg, *Rev. Mod. Phys.* 29(1957)269, 成書として*Introduction to the Unified Field Theory of Elementary Particles* (J. Wiley & Sons. Ltd, 1966), また、日本語訳『素粒子の統一場理論』(片山泰久訳, みすず書房, 1970年)がある。より現代的な立場からの、その後の展開も含むレビューとして、彼の高弟の一人による興味深い解説がある(H-P. Dürr, “Radically Quantum: Liberation and Purification from Classical Prejudice” In: Elitzur, A.C., Dolev, S., Kolenda, N. (eds) *Quo Vadis Quantum Mechanics?*, The Frontiers Collection, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005)。Heisenbergの理論では、通常の意味では結合定数が長さの2乗次元を持つにも関わらず、スケール不変性が正確に成り立つという、極めて強引な仮定を基礎として、計算方法を組み立てており、南部の最初から切断 Λ を導入する方法とは大きく異なる。この仮定は古典運動方程式としては成り立ち得るが、ラグランジアンは不変ではないため、量子論としては普通の場の理論の立場で考える限り正準交換関係と矛盾し、不定計量を持つようなヒルベルト空間で考える必要があるなど、物理的にも数学的にもどう正当化するかは極めて疑問で、その後の発展には繋がっていない。南部が「手品」と手厳しく批判したことも頷かれる。

だが、そこでもすでにSSBの概念が明確な仕方で先行して使用されている(H. P. Dürr, W. Heisenberg, H. Mitter, S. Schlieder and K. Yamazaki, *Z. Naturforsch.* 14a(1959),441) ことについては「さすがはと感心した」と南部も認めている。実はHeisenbergが提唱したスケール不変性は、スピノル場の力学的意味での質量次元が通常の3/2ではなく1/2と仮定することに相当している。彼は繰り返

込み不可能性を逆手にとるような仕方で、正準形式とは全く異なる大胆なアプローチを構想していたのである。それによれば結合定数 g の質量次元は有効的な意味でゼロになるため、紫外発散が大幅に軽減される。そう考えると、Heisenberg の方法も実は対称性の原理に基づいてある種の切断を導入したという見方も可能である。その意味では Heisenberg 理論にも、そのままさらなる発展に繋がるわけではないにしても、姿勢としてはポジティブな側面が含まれていたとは言えるだろう（実際、たとえば、次の解題 14) で触れるように、実は 2 次元では Heisenberg の仮定が有効性を発揮するのである）。

おそらく、南部が Heisenberg 理論に対して「受け入れ難い」と強く反発したもう一つの理由は、その主張が過度に野心的で大胆すぎると思われたところにあった。実際、Heisenberg 自身は上で触れた統一場理論の本（日本語訳）の中で「一つの簡単な方程式で全ての物理法則を定式化するという統一理論の計画があまりに野心的に思われるため、この様相が主に多くの批判を生んできた」と述べ、「普遍性の主張は野心的な計画に起因するのではなく、素粒子が物質の最小単位であるという事実から避けられない」こと、また「基本方程式は全ての他の物理学の法則を完全に決定するものではない」ことを境界条件の不定性の問題と関係させて強調している。

一方、これはロシア以外では広く知られていることではないが、南部と独立に、本質的に同じ模型を同様に切断を仮定して論じて質量生成を導いているヴァクス (Vaks)–ラーキン (Larkin) の論文が、Heisenberg と南部が出席・講演した 1960 年のロチェスター会議に提出されていた（ロシア語版論文受理日、1960 年 7 月 23 日、英訳版：V. G. Vaks and A. I. Larkin, “On the application of the methods of superconductivity theory to the problem of the masses of elementary particles”, *JETP* (U.S.S.R.) 40(1961)282)。論文の末尾に「本論文を印刷に送ってから、同様な結果を含む南部の論文プレプリント (Y. Nambu, Report to Midwest Conference on Theoretical Physics, March 1960) に気がついた」と記されている（これが [11] に添えられたコメントで触れられている中西部地区会議に提出されたプレプリントのことだろう）。VL の仕事は NJL 論文と並んで記憶されるべきであろう。南部自身は [11] (I の論文受理日 1960 年 10 月 27 日、題名 “Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity” も非常に似ている) の第 II 論文で Goldstone の論文とともに引用している。本講演ではどちらの仕事も引用され

ていないが、これらについての興味深い歴史的経緯と南部自身の見解がある程度具体的に書かれたものとして、Y. Nambu, “Spontaneous breaking of symmetry” in *The Rise of the Standard Model – Particle Physics in the 1960s and 1970s* (eds. L. Hoddeson et al., Cambridge Univ. Press., 1997) p.512 がある。日本語で書かれたもので両者に触れているものとしては、すでに解題 12) で引用した日本物理学会誌 57 (2002 年, 1 月号) の記事がある。

14)

NJL 模型が繰り込み不可能なのは、結合定数 g の質量次元が負 ($= -2$) であることに対応する。繰り込み可能な理論では結合定数は通常ゼロ次元である。もし、時空次元を $4 (= 1 + 3)$ ではなく、 $2 (= 1 + 1)$ として扱うと、解題 13) で触れた Heisenberg のスケール不変性が (繰り込み効果による量子的破れ = スケール異常 (解題 22) 参照) を除いて) 実際に成り立ち、結合定数の次元はゼロとなるため繰り込み可能であるだけでなく、漸近自由性 (エネルギースケールが大きいとき有効的な意味での結合定数がゼロに近づくこと) と呼ばれる質量を生成させる上で力学的に好ましい顕著な性質を備える。この性質は 4 次元の QCD と共通で、2 次元 Heisenberg-NJL-VL 模型 (現在では Gross-Neveu 模型, D. Gross and A. Neveu, *Phys. Rev.*10(1974)3235 として知られる) は、質量生成、カイラル対称性の SSB 機構に関して QCD に対する toy model として (次の解題で触れる $1/N_c$ 展開を用いて) 詳しく調べられている。このように、非線形 4 体フェルミ模型は 4 次元で繰り込み不可能ではあるが、2 次元では繰り込み可能な toy model として QCD の模擬的小型実験室のような役割も果たしている。

なお、さらに付け加えておくと、実は、すでに 1950 年代に本質的に同じ 2 次元模型が A. A. Anselm, *ZhETF*(1959)36, 863 で調べられており、漸近自由性も実質的に示されている (英語版は *Sov. Phys.JETP* 9(36)(1959), 608)。論文受理日付は 1958 年 9 月であった。ただし、BCS 理論との関連は言及されていない。実は Anselm の動機は SSB ではなく、いわゆるランダウ特異点 (長距離の有効結合定数がゼロである代わりに短距離で発散する現象。ランダウ自身によるレビューとして、L. Landau, “On the quantum theory of fields”, in *Niels Bohr and the Development of Physics* (eds. W. Pauli et al., Pergamon Press, 1955), p. 52 がある) の問題に関係していた。つまり、場の量子的揺らぎに関してランダウ特異点とは逆の振る舞い

(短距離の有効結合定数がゼロで、逆に長距離では限りなく増大する繰り込み効果)が論理的に可能なことを、扱いやすい toy model で示すことに動機があったのである。その意味では、漸近自由性がそこで最初に発見されていたのは自然の成り行きで驚くには当たらない。解題 13) で触れた Vaks-Larkin の仕事を含め、このようなランダウ学派の広範な分野に渡る先駆的研究成果を記述したものととして、成書 “*Under the spell of Landau when theoretical physics was shaping destinies*” (ed. M. Shifman, World Scientific, 2013) がある。

15)

M を与える $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$ は、 $\bar{\psi}\psi$ の真空期待値。(10) は BCS 理論において要となるエネルギーギャップ Δ を定める式と近い形をしている。“容易に示せる”は、もちろん、正確に解けるという意味ではない。繰り込み不可能な紫外発散を運動量空間の切断で扱うだけでなく、[8] と同様に Hartree-Fock 型の近似を用いる。ファインマングラフで言えば、フェルミオンの 1 ループの鎖が 4 点相互作用で繋がってできるツリーグラフ (tree graph) を足し上げることに相当する。その意味で鎖近似 (chain approximation) と呼ぶこともある ([11] の Fig.2,5,6 参照)。この近似はもし形式的にフェルミオン場に N_c 個の (カラー) 成分を導入しラグランジアンに $U(N_c)$ 不変性を持たせると、 gN_c を固定して大 N_c 極限を取るのに相当する。 $1/N_c$ に関する級数展開はこの鎖についてのループ (loop) 展開に他ならない。その意味では、NJL の方法は系統的な展開に載せられるので、南部も自信を持っていたように、十分な明確さを備えているものだったと言える。

16)

ここの ψ はアイソスピン $SU(2)$ の 2 成分を加えて 2 階建にした Dirac 場で、 τ_i はこの 2 成分に作用するアイソスピンの Pauli 行列。(2) 式とは意味が全く異なるので混同しないように。

17)

BCS 理論の本質は、結晶中の格子振動の量子 = 音子と電子の相互作用により電子がクーパー対 (Cooper pair) を作り、その凝縮により電子のエネルギーに (1) 式のようにギャップ Δ を生じるところにある。Heisenberg-NJL-VL 模型は、

クーパー対の相互作用を相対論的なフェルミオンの4点相互作用で置き換えると、 Δ に対応しフェルミオンの質量の生成が起こることを示した。これと似た対相互作用が、他の系、代表的にはここに挙げられている ^3He の超流動や、原子核でも重要な役割を果たすことが明らかにされた。

BCS理論の50年以上にわたるこうした広範な影響・進展を総合的にレビューした成書として、*BCS: 50 Years* (eds. L. N. Cooper and D. Feldman, World Scientific, 2011)がある。BCS理論の創始者3人のレビューを含む形で纏められている。たとえば、超流動に関しては、レゲット (A. J. Leggett)、原子核に関してはベイム (G. Baym)、素粒子に関しては南部 (解題 24)で触れる)の他にウィルチェック (F. Wilczek)、ワインバーグ (S. Weinberg)のレビュー論文が収録されている。この中の特に Weinberg の論文では、彼と Salam が独立に提唱した電弱統一理論について、本講演と関連して注目すべき記述がある。彼等の理論では電弱相互作用におけるSSBに関して、NJLのようにBCS理論に似せた形でフェルミオンの相互作用によって力学的に起こる効果として導くのではなく、いわゆる Higgs 場をあからさまな仕方で用いた理由が次のように明解に述べられている。「知られていたクォークとレプトンに働く力で局所的な電弱対称性を力学的に壊すのに十分なほど強いものはない。それで私とサラムはそのような力学的な対称性の破れではなく、基本的な素粒子場の自由度としてのスカラー場を持ち込み、その真空期待値によって対称性の破れが古典近似の段階で得られるような方法をとった」(拙訳)。つまり、彼は本講演で南部が表明しているような意味で Higgs 場を背後にある力学の有効的な記述であるとの考えとは対蹠的に、Higgs 粒子を光子やゲージ (W,Z) 粒子 (質量 $\approx 80 \sim 90 \text{ GeV}/c^2$, 1983 年に CERN で確認) と完全に同格な意味の素粒子とみなしている。この本が出版されてから2年後の2012年に実際に Higgs 粒子がゲージ粒子と大きく変わらない質量スケール (質量 $\approx 125 \text{ GeV}/c^2$) で LHC 実験において確認されたという事実は、マイクロレベルの自然が実際にこのメカニズムの方を採用しているという見方を支持し補強するものと言える。しかし、もちろん、より高いエネルギーでの、より基本的な理論の立場からは南部が表明しているのと近い見方が復活する可能性も直ちには否定はできないだろう (解題 24 参照)。

18)

SSB で生成されたフェルミオンの質量を $M = m_f$ とすると、その仲間として現

れる2個のボソンの質量 m_1, m_2 が $m_1^2 + m_2^2 = 4m_f^2$ を満たす. (11) 式の NJL 模型ではアイソベクトルのパイオンが $m_1 = m_\pi = 0$, アイソスカラーのシグマ (σ) 粒子が $m_2 = 2m_f$. この関係は (8) でも同じである. [13] では, 他の BCS 型模型でもこれが一般的に成り立つという推論を与え, フェルミオンとボソンの間でこうした関係が成り立つのには, ある種の超対称性が隠れていることを暗示しているという予想を述べている. つまり, 南部はフェルミオン一元論的な力学に潜むと思われるさらなる対称性を通常の超対称性をヒントに探ろうとしていたのである.

関連して触れておくと, 通常の超対称性を持つ理論では, 対称性が正確に実現されている場合には全ての可能な質量の値でボソンとフェルミオンの独立な物理的自由度数が等しい (同じ質量を持つボソンとフェルミオンの独立な自由度が 1 対 1 に対応する) が, 自発的に超対称性が壊れて質量の縮退が解けても, もとの超対称性の反映として, ボソンとフェルミオンの質量の間で (BCS 型質量関係と近い形をした) 和則

$$\text{Tr}_{\text{bose}}(m^2) = \text{Tr}_{\text{fermi}}(m^2)$$

が成り立つ場合が多い (たとえば, S. Ferrara, L. Girardello and F. Palumbo, “General mass formula in broken supersymmetry”, *Phys. Rev. D* 20(1979),403 を参照). また, 超弦理論では, 超対称性が自発的に壊れると無限に多くの励起状態を含めてこれをさらに高度化した無限個の関係式が成り立つ場合がある. 興味がある読者は, 訳者の論文で恐縮だが, T. Yoneya, “Spontaneously broken space-time supersymmetry in open string theory without GSO projection”, *Nucl. Phys. B* 576(2000),219 を参照されたい.

原子核における集団運動を核子の対相互作用により定式化するいわゆる IBM (Interacting Boson Model) [12] は, 核子対を独立なボソンの自由度によって表す. そこには BCS における電子のクーパー対の役割と似た側面がある. ただし, BCS と同じ意味における原子核の微視的な理論とは言えず, 依然として超伝導の Ginzburg-Landau 理論に相当するような一種の現象論的有効理論であると考えられる. [12] と BCS 理論との関係については, M. Mukerjee and Y. Nambu, “BCS and IBM”, *Ann. Phys.* 191(1989),143 で, 超対称性とも関係させて詳しく論じられている. BCS ハミルトニアンが, ある近似の範囲内では超対称演算子とそのエルミート共役演算子の積の形に表せ, 系が確かにある種の擬

超対称性を備えていることが指摘されている。ただし、通常の超対称性とは異なり、超対称変換の生成子とハミルトニアンは交換可能ではない。それも超対称性の SSB と解釈する可能性が他のいくつかの論文で示唆されている（たとえば、Y. Nambu, “Supersymmetry and Superconductivity”, in *Rationale of Beings, Festschrift in Honor of Gyo Takeda*, eds. K. Ishikawa et al, World Scientific, 1986）。

19)

ロンドン兄弟は、超伝導体中での電流と磁場の関係に関して、通常の導体における電流と電場の関係についてのオームの法則に代わるような役割を果たす現象論的な式 $\nabla \times \mathbf{j} = -m_L^2 \mathbf{B}$ を提案した (F. and H. London, *Proc. Roy. Soc. A* 149(1935)71)。ベクトルポテンシャルで表せば、 \mathbf{A} のゲージ変換の自由度を除き $\mathbf{j} = -m_L^2 \mathbf{A}$ である。マクスウェル方程式と合わせると、Meissner 効果がこれから導かれる。プラズマの場合、 m_L^2 は (4) の ω_p^2 と一致する。Higgs 場を導入すると、この式を相対論化した関係式が電流の定義から (tree 近似 ~ 古典近似では)、(12) 式そのものよりさらに単純な関係式 $j_\mu \simeq -m_L^2 A_\mu$ (ただし、ローレンツゲージ $\partial_\mu A^\mu = 0$ の場合。通常 ‘ロンドン方程式’ と言うとこの式を指すことが多い) として、SSB に伴って自動的に得られる。

ここでは読者の理解を助けるため、非相対論的な電子の第 2 量子化された場 ψ, ψ^\dagger に基づいて、ロンドン方程式の導出を簡単な例として与えておく ((4) および (12) の背景になるのがこの式、実質的には最初に引用したロンドン兄弟の論文の結論部で量子論への拡張としてすでに論じられているが、この機構を取り出してさらに整理された有効理論の形式で一般的に定式化したのがギンツブルグ-ランダウ [17])。4 元電流ベクトル

$$j_\mu = -\frac{ie}{2m_e} [\psi^\dagger (\partial_\mu - ieA_\mu)\psi - (\partial_\mu\psi^\dagger + ieA_\mu\psi^\dagger)\psi]$$

で、近似 $\psi \rightarrow e^{ief}|\psi|, |\psi| = \sqrt{n}$ (n : 電子密度で一定とする) を採用すると

$$j_\mu \simeq -\frac{e^2 n}{m_e} (A_\mu - \partial_\mu f) = -\omega_p^2 A'_\mu, \quad A'_\mu = A_\mu - \partial_\mu f$$

となる。 f は、有限で一定の電子密度の状態が大局的ゲージ変換の自由度に起因する位相の不定性のため無限に縮退していることに対応する NG モード

と見なせる．これが A_μ (A_0 がクーロン場) と混合し A'_μ になりロンドン質量 ($m_L = \omega_p =$ プラズマ振動数) を生成する．時間依存性がない定電流で磁場を考えると Meissner 効果を与えるし (最初に超伝導体に外部電源をつないで定電流を起こす場合は電気伝導率が無限大の超伝導体内部でも電流は保存するので抵抗がゼロであるため, 内部の電場はオームの法則により磁場と同じくゼロであるのに注意), 逆に空間依存性が弱いとする近似で電場を考えるとプラズマ振動を説明する．この機構を完全に相対論的な場の理論の枠内で定式化したのが Higgs 機構に他ならない ($|\psi|^2/m_e$ がヒッグス場の絶対値の 2 乗の期待値に置き換わる)．さらに詳しくは次の解題 20) で触れる．

20)

原文では同じ m で表されている電子質量 m_e とは無関係で, (4) のプラズマ振動数 ω_p に相当することに注意．すでに触れたように, この点を明確にするため, 訳文ではロンドン質量を m_L で表した．ロンドン質量が, WS 理論では W^\pm, Z^0 ボソンの質量に対応する．(12) は, [14] の最初のアンダーソン論文 (の (10) 式) を引用したものである．ただし, 3 行目に係数 m_L^2 が抜ける誤植がある (そのままでは次元も合わない)．訳文では原文の 1 行目で符号をアンダーソンと同じ符号に変更し, 2 行目の括弧内の第 1 項目の記号 $\delta_{\mu\nu}$ を $g_{\mu\nu}$ に入れ替えた．本文では 4 元ベクトル添字はいわゆる Bjorken-Drell 流を採用しているので, 通常の記号使用法に従うなら, $\delta_{\mu\nu}$ ではまずい ($g_{ii} = -1 = -g_{00}$ ($i = 1, 2, 3,$ 非対角成分はゼロ．現代風では $g_{\mu\nu}$ より $\eta_{\mu\nu}$ とすべきだが, ここでは Anderson に従った)．

Anderson のこの結果は外部から摂動として加えた微小な電磁場 A^μ に対する応答として導かれたものである．その議論の要点は, 実際の系では j_μ により誘導されて生じる内部的場 $\frac{K(q^2)}{q^2} A^\mu$ を考慮に入れる必要があり, その結果として本当の物理的場は系への摂動として加えた微小な外場 A^μ から $A'_i = \frac{K(q^2)}{q^2} A^\mu + A^\mu = \frac{q^2}{q^2 - m_L^2} A^\mu$ に変形するということであった．これを用いると相対論的でゲージ不変な (期待値としての) ロンドン方程式は $j_\mu(q) = -m_L^2 (g_{\mu\nu} - q_\mu q_\nu / q^2) A^\nu(q)_i$ となる (ローレンツゲージでは $q_\mu A^\mu = q_\mu A'_i = 0, j^\mu = -m_L^2 A'_i$ で, 前解題で触れた相対論的ロンドン方程式と一致する．これにより独立な自由度として扱った A'_i のマクスウェル方程式が $(g_{\mu\nu} \partial^2 - \partial_\mu \partial_\nu) A'_i = j_\mu = -m_L^2 A_{i\mu}$ となり, ゲージ場の質量の生成が説明できる．

ただし、Anderson 論文では、非相対論的なプラズマとのアナロジーで相対論的なロンドン方程式を提案しているが、新たな物理的自由度としての Higgs 場を直接的に導入しているわけではない。[14] の Brout-Englert, Higgs の論文では複素スカラー場 ϕ (= Higgs 場) を独立な自由度として導入し、Higgs 場の位相部分に対応する NG モードとゲージ場の混合によってゲージ場が自動的に質量を持つことを具体的な模型によってあからさまに示した (tree 近似ではヒッグス場の 2 乗の真空期待値に比例, $m_L^2 = 2e^2\langle\phi^\dagger\phi\rangle$). したがって非相対論的なプラズマの場合の密度質量比 n/m_e の役割を果たすのが, $2\langle\phi^\dagger\phi\rangle$. 南部が考えやすくなると述べているのは、この理由による。Anderson の議論における $A^\mu \rightarrow A_t^\mu$ も、Higgs 場とゲージ場の混合の結果として (tree 近似で) 理解できる (彼等はそういう書き方をあからさまにしているわけではないが、特に、Brout-Englert 論文の Fig.1 が、ファインマングラフによる混合のイメージを明確に与えている)。展開式 $A_t^\mu = \sum_{n=0}^{\infty} (m_L^2/q^2)^n A^\mu$ が、真空からの NG ボソンの吸収・放出効果を tree 近似でゲージ場の伝播関数に無限次数まで取り入れると A_t^μ の質量が生成されることを示す。いわゆる Higgs 粒子は、Higgs 場のうち、質量ゼロの NG モードとなってゲージ場に吸収される部分の他に余分の有限質量の自由度に他ならない (従って、当然、Higgs 粒子の存在は Anderson の最初の議論だけでは導けないことに注意)。なお、[14] には省かれているが、同様な結果が数ヶ月遅れで発表された独立な論文として G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964),585 がある。

また、相対論的な場の量子論の枠内でゲージ不変性とゲージ場の有限な質量が原理的には矛盾しないことを、これらに先行して一般論として論じていた重要な指摘として、シュウィンガーの 1962 年の論文 (J. Schwinger, *Phys. Rev.*125(1962)297;128(1962)128) がある。元々、Anderson 論文は、Schwinger がそこで与えた質量生成のための条件がプラズマ機構の相対論化で満たされていることを論じたものである。実は、そのもう一つの動機は、解題 3) で触れた桜井の 1960 年の仕事にあったことが論文の記述から読み取れる。すなわち、桜井が仮定せざるを得なかった Yang-Mills のゲージ場 (B 場) の質量生成に対する一つの可能性を提案したのである。Anderson は凝縮系物理の理論家だが、素粒子論、場の理論にも強い関心を寄せていた。

Schwinger の条件を本文の議論に合わせて最も肝心のエッセンスだけを取り

出して簡略化すると以下の通りである。まず、(12)式は場の理論の標準的な言葉では外場 A_μ のもとでの電流の期待値を外場について1次までの近似で与える

$$\langle j_\mu(x) \rangle_A = i \int d^4y \langle j_\mu(x) j_\nu(y) \rangle_{A=0} A^\nu(y)$$

を運動量表示で表したものである。このことから、ゲージ場に関して1粒子既約な（外場が無い状況での）運動量表示の真空偏極を $\Pi_{\mu\nu}(q) = (g_{\mu\nu}q^2 - q_\mu q_\nu)\Pi(q^2)$ と置くと、スカラーの係数関数 $K(q^2)$ は

$$K(q^2) = \frac{q^2 \Pi(q^2)}{1 - \Pi(q^2)}$$

と書けることが導かれる。一方、このときゲージ場の2点グリーン関数は（通常の Fermi-Feynman gauge で）

$$\frac{g_{\mu\nu}}{q^2(1 - \Pi(q^2))}$$

と書ける。ゲージ場にゼロでない質量が生成されるには、これが少なくとも $q^2 = 0$ で極を持たないことが必要であるから、分母の q^2 因子を打ち消すように $\Pi(q^2)$ が $q^2 = 0$ で発散する特異点を持たなければならない。一般に（Higgs 場がないとき）4次元での通常の摂動論で低次項だけなら $\Pi(q^2)$ は $q^2 \sim 0$ 近傍で（もちろん、紫外発散の繰り込みは適当に行っているとして）スムーズな関数だから、ゲージ場はゼロ質量であることが保証されるが、相互作用が強ければ原理的には非摂動的に $q^2 = m_L^2 > 0$ で $\Pi(m_L^2) = 1$ となることにより有限な質量 m_L^2 が実現する可能性がある。一方、最初から Higgs 場が存在しその真空期待値がゼロでなければ、上で述べたように、対応する NG モードの存在のため、 $\Pi(q^2)$ にゼロ質量極特異点が自然に（あるいはいわば、自動的に）生じ、質量生成のための必要条件が実際に満たされる。さらにツリー近似に対応して極の寄与 $\Pi(q^2) = m_L^2/q^2$ だけで $K(q^2)$ を表すと(12)式の3行目が得られる。また、一般に独立な自由度としての物理的なゲージ場 A_i^μ の（真空偏極効果を取り入れた）マクスウェル方程式が2点関数と調和しなければならない（つまり、 $\langle j_\mu(q) \rangle = -(g_{\mu\nu}q^2 - q_\mu q_\nu)\Pi(q^2)\langle A_i^\nu(q) \rangle$ ）から、外場 A^μ とゲージ場 A_i^μ の（期待値での）関係は Anderson が指摘したように $\langle A_i^\mu(q^2) \rangle = A^\mu(q^2)/(1 - \Pi(q^2))$ である。

ところで、上に挙げた Schwinger 論文のうち2番目では、例として2次元時空の質量ゼロフェルミオンの量子電気力学（Schwinger 模型）が正確に解ける

ことを示し、有限な質量、 $m_L^2 = e^2/\pi$ 、を導いている。これはゲージ場が力学的に質量を持ち得ることを厳密に示す最も直接的で明確な例である。正確に解ける理由は、形式的には2次元では $\Pi(q^2)$ が1ループ (loop) の寄与だけで書けることである。物理的に言うと2次元ではゲージ場の横方向成分はないが、縦方向があるためプラズマ機構が起こる。その場合NGモード f の役割を果たすのは質量ゼロフェルミオンの対である（空間次元が1次元であるため、質量殻上のフェルミオン対が質量ゼロのスカラー粒子であるかのように振る舞うことに起因、いわゆる“bosonization”の起源。これが1ループでゼロ質量のスカラー結合状態として振る舞い、ゼロ質量の極特異点を生み出す）。

Schwinger 模型は次のようにQCDのクォーク閉じ込めに関して示唆的な物理的描像が得られるという点で、toy modelとして大きな意義がある。空間が1次元であるため磁場は存在しないから、通常のHiggs機構でMeissner効果に対応して生じる磁力線の渦糸（解題4参照）の代わりに役割を果たすのは、1次元空間方向の電気力線である。従って電荷を持つフェルミオンは電気力線の端点に対応し、フェルミオンは常に粒子-反粒子の対として閉じ込められることになる。そのため可能な物理的励起状態は有限な質量のスカラー粒子状態だけになる。つまり、Schwinger 模型の質量生成機構は、物理的直観的な言い方では、通常のMeissner-Higgs機構と比較すると磁場と電場の役割を交換した仕方により理解できる。QCDを（時空）2次元で扱うと、この性質はさらに明確な形で現れ、無限個の粒子スペクトルを生じる（'t Hooft, *Nucl. Phys.*B75(1974),461）。時空3次元（空間が2次元）でも磁場は空間的にはスカラーなので細い磁力線概念は成り立たず、電気力線による閉じ込めの描像が成り立ち得る。現実の4次元のQCDでは、この現象に相当することが漸近自由性で象徴される非アーベル的ゲージ場の非線形効果（=自己相互作用、解題3参照）によって維持されて、カラークォーク閉じ込めが実現していると解釈できる（ただし、空間1次元の場合とは異なり、厳密な証明は困難で、未だになされていない）。つまり、Schwinger 模型のようなU(1)ゲージ理論でも3次元以下の低次元では閉じ込めが成り立つが、4次元では漸近自由性が成り立たないことを反映し閉じ込めが維持されない。これは格子ゲージ理論の立場では、任意のゲージ群で強結合領域で閉じ込めが成り立つが、弱結合領域に移行しようとする時、その間に（有限な有効結合定数の値で）相転移が存在することに対応し、閉じ込め相とは

別の相になってしまう現象として理解できる。連続極限では次元が4未満の場合には結合定数が質量次元に関して正であるため、長距離の振る舞いは常に強結合領域にあると考えられる。4次元で漸近自由性が成り立つ非アーベルゲージ理論では強結合と弱結合を隔てる相転移点が結合定数がゼロの点に対応するため、裸の結合定数（=短距離での有効結合定数）がゼロであることと長距離での閉じ込めが両立すると解釈できるわけである（こうした描像が発展したのは1970年代後半である。本誌に（日本語で書かれた）当時の入門的レビューとして、記者自身によるもので恐縮だが、『場の理論における order, disorder』（米谷民明，素粒子論研究，59(1979)229がある）。

21)

“constituent mass”は、QCDのラグランジアンによって定義される“流れ質量（current mass）”とは異なり、ハドロンの主構成要素としてのクォークを仮定した複合粒子模型（クォーク模型）に基づいて現象論的に定義されるクォークの有効質量のこと。当然，その定義には模型依存性があるが，u,dクォークについては，核子の質量から，多くの場合， $300\sim 350\text{MeV}/c^2$ 程度になる。構成子クォーク模型は60年代後半から70年代初頭にかけて主に非相対論的なポテンシャル近似でハドロンのスペクトル，磁気能率，崩壊幅等の性質が詳しく論じられた。 ψ としてクォーク場を用いたNJL模型で考えるなら，カイラル対称性のSSBで生成される M を構成子質量と見做せる。

なお，クォークは最初ゲルマンにより1964年に提唱された（M. Gell-Mann, *Phys. Lett.* 8(1964),118）。実は独立にツバイク（G. Zweig）もエース ace という呼び名で提案していた。ただし彼の論文はCERNから出されたプレプリントがあるだけで雑誌に出版はされていない（彼はCaltech出身でゲルマンが指導していた学生だったが，ゲルマンがMITに長期出張するので，代わりにファインマンが指導教官になった。このアイデアについてゲルマンとの間で議論したことはなかったそうだ）。これはクォークの電荷を分数とする意味では，もしGell-Mannの名でなかったなら論文の出版はされなかっただろうとよく言われる大胆な提案であった。ハドロンをより基本的な粒子の複合系と解釈する一般的な観点から歴史的な流れで見ると，パイオンを核子と反核子の複合系であると提唱したFermi-Yang模型（1949年），そしてその拡張としての坂田模型（陽子 P ，中性

子 N , ラムダ粒子 Λ の 3 粒子を基本粒子として, 他の全てのハドロンをその複合系とする模型, S. Sakata, *Prog. Theor. Phys.* 16(1956),686) がその先駆と言える. 坂田模型には特にバリオンの分類に関して難点があることが判明し, Gell-Mann と Zweig は, この難点を解消しバリオンとメソンを統一的に分類できるスキームとして提案したのである.

クォーク模型の発展でも, Gell-Mann 等によるカラー自由度とそのゲージ化 (QCD の始まり, H. Fritzsch, M. Gell-Mann and H. Leutwyler, “Advances of the color octet gluon picture”, *Phys. Lett.*48B(1973),365) の先駆と言える南部の特筆すべき重要な貢献がある (M. Y. Han and Y. Nambu, *Phys. Rev.*139(1965)B1006). ただし, この提案では Gell-Mann の最初の提案 (電子電荷を単位としたとき, u, d の電荷が $2/3, -1/3$) と異なり, クォークの電荷はあくまでも整数であることが前提にされており, カラー 3 重項の電荷は, 例えば $u \sim (1, 1, 0)$, $d \sim (0, 0, -1)$ 等のように仮定されている. つまり, 3 カラーで平均をとると, それぞれの電荷が $2/3, -1/3$ になるようになっていく. クォークの分数電荷の仮定には, 当時, クォークを現実の実体としての粒子とする立場 (Gell-Mann 自身は “mathematical quark” というような表現を用いていて, どこまでそう考えていたかは 1964 年の論文ではかなり曖昧なところがある) からは強い抵抗感があり (解題 12) で触れた IOO 模型の著者の一人の大貫義郎先生が訳者との個人的会話の中であるとき「 $1/3$ 電荷なんて全く考え付かなかったよ」と嘆息されたのが強く印象に残っている), 整数電荷になるようにクォーク模型を拡張する提案の主要な動機の一つになっていたのである. また, そうした拡張に向けてはもう一つの重要な動機として, 実際にクォークを構成粒子としてバリオンの基底状態を説明するには状態関数のスピン $1/2$ のクォークをフェルミ統計に従うとすると現れる困難があった (その理解の進展にはスピンと合わせて u, d, s の 3 種を合わせて対称群 $SU(6)$ で定式化する崎田文二他が提唱した方法が重要な役割を果たした). これらに興味がある読者は, 60 年代までのクォーク模型関係の論文が解説付きでまとめられている成書 J.J.J. Kokkedee “The Quark Model”, W. A. Benjamin, Inc., 1969 を参照するとよい. たとえば, クォークを通常フェルミ統計ではなくパラ統計で扱うという Greenberg の提案がある (O. W. Greenberg, “Spin and unitary-spin independence in a paraquark model of baryons and mesons”, *Phys. Rev.* 13(1964),598. 限定的な意味で現在のカラークォークと近い側面がある).

一方、パラ統計とは異なり、クォークにさらに新たな自由度を持たすアイデアによりクォークの整数電荷を実現し、統計性の困難を同時に解決しようとする方向では、Han-Nambu 論文に先行して L. van Hove らの指摘があったが (H. Bacry, J. Nuyts and L. van Hove, *Phys. Lett* 9(1964),279), 南部はさらに発展させてより満足のゆく仕方で進めようとしたのである。この方向への南部の追求は70年代前半まで粘り強く続けられている。しかし、南部が提案したクォークの整数電荷を採用したままで電磁相互作用と弱い相互作用を取り入れるとカラーの SU(3) 対称性はあからさまに壊れてしまう。実は南部はこの SU(3) をゲージ化する提案も直ちに行い、ゲージ粒子の交換に対応するポテンシャル模型によって SU(3) シングレット状態を定性的に議論した (Y. Nambu, "A systematics of hadrons in subnuclear physics", in *Preludes in Theoretical Physics*, eds. A. De-Shalit et al., North-Holland, 1966 年。正式な雑誌での論文ではないため、広くは知られていない)。だが、電磁相互作用を考慮した瞬間に、SU(3) ゲージ不変性は (SSB ではなく) あからさまに破れてしまうわけである。当然、同質な問題は解題 3) で触れた桜井のアイソスピンの SU(2)×U(1)×U(1) に基づく強い相互作用のゲージ化にもある。おそらく、当時のコンセンサスでは、強い相互作用の対称性は、いずれにしても、強い相互作用の中だけで成り立つものと考えられていたため、電磁相互作用でその意味でのゲージ不変性が壊れることは重大視されていなかったのだと思われる。もちろん、強い相互作用側の対称性を大局的対称性の枠内だけで扱うならこれで問題はないが、ゲージ化して扱う場合には、理論の整合性に対する瑕疵となってしまうことを当時多くの研究者は認識していなかった。具体的に言うなら、そのままでは一般にユニタリ性、言い換えると確率保存則、および繰り込み可能性が成り立つ保証はなくなる。60年代はゲージ理論のユニタリ性の理解が未だ一般的には十分でなかった時代であった。例えば、ゲージ理論のゲージ固定に関する (経路積分に基づく) 現代的な定式化の出発点になった Faddeev-Popov の論文は 1967 年に出版されている (これによれば、S 行列がゲージ固定条件の選び方に依存せず一意的に定まることが保証される。だが、言うまでもなくそれには古典作用自体は厳密にゲージ不変であることが前提)。この方法が発展し Higgs 機構にも応用されて、電弱統一理論としての WS 模型の繰り込み可能性とユニタリ性が 't Hooft (と Veltman) によって示されたのは 1971~1972 年である。Higgs 機構により非アーベル的なゲージ場の 1 部が質量

を獲得しても局所ゲージ不変性が成り立っているため、ユニタリ性は成り立つ。しかしながら、どういう原因によるにせよ、もし局所ゲージ不変性が陽に壊されるならそれは期待できない。

これに対して標準模型におけるカラーは、カラーが異なっても u, d はそれぞれ同一電荷 $2/3, -1/3$ で $SU(3)$ ゲージ対称性が常に正確に保たれる構造をしている。言い換えると、電流や弱い相互作用の $V-A$ 流はすべてカラーの局所的 $SU(3)$ 変換で厳密に不変である。これはゲージ理論を相互作用の基本理論として考える概念的立場からすれば、本質的な違いである。実際、1973 年の Gell-Mann 等の論文ではその点が強調されている。これはゲージ理論の理解の進展があったからこそ可能になった、それまでの様々な試みを整理して生まれた集大成であったと言えよう。この QCD の提案にとって特に重要な意味を持った進展は、ちょうど同年の非アーベル群のゲージ理論の漸近自由性の発見であった (D. J. Gross and F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* 30(1973),1334; H. D. Politzer, *ibid.*, 1346. 実はこれらの論文の 1 年近く前に同じことを 't Hooft が発見していたが、論文としては発表していなかったと伝えられている。Yang-Mills 理論そのものではないが、電磁場と結合する電荷を持つベクトル場を含む実質的に Yang-Mills とほぼ同等な理論において同様な結果が V. S. Vanyashin and M. V. Terent'ev, *Sov. Phys. JETP* 48 (1964),565 で得られていた。また、解題 14) で触れたように、2 次元 NJL 型模型における漸近自由性はすでに 1958 年に Anselm によって発見されている。)。

もちろん、それだけではなく当時まで得られた電子と核子の深非弾性電子散乱の結果や、 $e^+e^- \rightarrow$ ハドロン、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ に関する実験結果が分数電荷の点粒子自由度としてのカラークォークの存在を支持した。その後もクォーク、グルーオンのジェットを検出等、グルーオン交換によるクォークのゲージ相互作用自体を直接的に検証する新たな結果が得られている。こうした実験と理論の進展が相俟って最終的に単純で美しい形の QCD に結晶化したわけである。なお、これらの歴史的経緯に関しては、Gell-Mann 自身による回想“Quarks, Color, and QCD”が解題 13) で触れた *The Rise of the Standard Model*, p. 625 に載っている。また、カラークォークの実験的検証については同じ本の J. Friedman, “Deep-Inelastic Scattering and the Discovery of Quarks”, p. 566 を参照のこと。

以上の流れから納得できるように、1960 年代中盤の南部の提案は、ゲージ理論としての標準模型に向けての過度的段階においてではあるが、全体的な方

向としては基本的には正しく、クォークに基づく現在の強い相互作用の理解に向けて出発点であったと言える。もちろん、強い相互作用をゲージ原理で記述しようとする望みはその源流となった Yang-Mills の論文自体の動機でもあり、その後も解題 3) で触れた桜井論文で代表されるように長い歴史があるが、その流れがこれまで詳しく述べたほぼ 20 年の間の紆余曲折を経て理解が深まり最終的に QCD に行き着いたのである。解題 3) で桜井論文との関連で引用した南部の述懐 (1989 年) は、こうした錯綜とした経緯を顧みた回想であった。言うまでもないことだが、これに限らず、あらゆる過去の仕事の意義は歴史の流れの中で評価されるべきである。

22)

NJL 模型の核子場 ψ をクォーク場 q_i (i はクォークの“香り”, flavor, と呼ばれる種類を区別する添字, Gell-Mann の最初の提案では香りは 3 種 (u,d,s) であったが、現在では c, t, b が加わり 6 種) に置き換え、クォーク場だけで QCD の低エネルギー有効理論を表すのが (13) の右辺。

ここの議論と関連して誤解がないように強調しておく、元の QCD の力学ではクォークの閉じ込め (あるいはカラーの閉じ込め)、およびそれに付随して起こるカイラル対称性の破れ効果は、カラーゲージ相互作用の純粋に長距離非摂動効果であり、ゲージ相互作用の意味での摂動論では決して理解できない現象であることを忘れてはならない。70 年代のゲージ理論の発展において、この非摂動効果への解明へ向けた様々な試みを経てゲージ理論の力学的豊富さに関する理解は飛躍的に深まったのである。しかしながら、閉じ込め自体を前提としカラーゲージ場を消去した (クォークだけで表す) 現象論的な有効理論の枠内では、クォークが結合してできるカラーシングレット (color singlet) の複合状態の広がりが小さい範囲に限れば (波動関数の広がりが閉じ込め機構のスケールに比べて小さいので)、閉じ込めによる効果も摂動的に取り扱うことが、適用範囲に十分注意を払うなら実用的な意味の近似としては許されるだろう。この意味における QCD に対する (カイラル対称性の SSB に関する有効理論) としての NJL 模型は、クォークが (力学的役割は果たさない) カラー自由度を持つのでカラー種類数の分だけ解題 15) で触れた N_c 個 (現実には $N_c = 3$, 香りの個数と混同しないように注意) の自由度があるから、グローバル対称性 $U(N_c)$ を持つ

ことになる。従って $1/N_c$ 展開が有効な近似になる。関連して付け加えておくと、元の QCD では $1/N_c$ 展開はファインマングラフのトポロジーに関する種数 (genus) による展開 (通常 planar expansion と呼ばれる) になり、カラー閉じ込めの弦理論的描像と調和を意味する重要な力学的意義を持つことが 70 年代中盤に発見され (G. 't Hooft, "A planar diagram theory for strong interactions", *Nucl. Phys.* 72(1974), 461), それが現在のいわゆる holographic なゲージ理論と重力理論との関係に結びつく一つの重要な要素となっている。

一方, (14) は, $U_A(1)$ (カイラル) 量子異常に起源がある。これは, たとえクォークの質量がゼロでも, 大局的カイラル変換 ($U_A(1)$ 変換) $q_i \rightarrow e^{i\alpha\gamma_5} q_i$ の対称性がゲージ場の存在により生じる量子異常の効果のため破れる現象である。(14) はその効果をクォーク自由度だけの有効理論で表したもの (det は香り添字 i, j に関する行列式の意味) であり, 香りの種類を N_f と置くと, $U_A(1)$ 対称性を壊すが, クォーク場を香りの N_f 次元空間の添字に関して $q \rightarrow \exp[i\alpha + i \sum_a (\alpha_a + \beta_a \gamma_5) \lambda_a] q$ と変換する大局的 $U_V(N_f) \times SU_A(N_f)$ 対称性を保存する形になっている。ただし, λ_a ($a = 1, \dots, N_f^2 - 1$) は $SU(N_f)$ 群の無限小生成子。このラグランジアンの方は元々は小林-益川の 1970 年の論文で現象論的モデルとして提案されたが (当時の段階では $N_f = 3$), 後にトホーフ (G. 't Hooft) が, QCD のカラーゲージ場のインスタントン (Instanton) と呼ばれる ($U_A(1)$ 量子異常に直接的に寄与する) 配位を取り入れて具体的に導出した (1976 年)。 L_{NJL} がクォークの裸の有限な (流れ) 質量を含むと, この対称性もあからさまに壊れ, 残るのはフェルミオン数保存に対応する $U_V(1)$ だけとなる。また, クォーク模型によれば, Heisenberg が最初に提唱した近似的な大局的 $SU(2)$ 対称性の起源は, 第 1 世代の u, d クォークの流れ質量は異なるが他世代に比べて十分に小さいことにある。

なお, QCD におけるカラー閉じ込めに加えてカイラル量子異常とインスタントンによる $U_A(1)$ 問題の解決の機構を含む最も簡単なモデルは, 解題 20) で触れた Schwinger 模型 (2次元質量ゼロフェルミオン QED) である。この問題を含め, 1970 年代中盤までの QCD の急速な進展についての包括的なレビューとして, W. Marciano and H. Pagels, *Phys. Rep.* 36 (1978)137 を挙げておく。その後の発展も取り入れた $U_A(1)$ 問題に特化したレビューとしては, 't Hooft 自身による "How instantons solve the $U(1)$ problem", *Phys. Rep.* 142(1986), 357 がある。

歴史的にはカイラル量子異常が最初に現れたのは（あからさまに指摘されたわけではないが）、福田博–宮本米二による中性中間子の2光子崩壊 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ の計算においてであった（H. Fukuda and Y. Miyamoto, *Prog. Theor. Phys.* 4(1949),347. 独立に J. Steinberger, *Phys. Rev.* 76(1949)でも同様な結果が得られている）。通常の QED の場合、対応する量子異常を明白な連続の方程式の破れ $\partial^\mu j_\mu^5 = k\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} F_{\mu\nu} F_{\alpha\beta}$ の形に書き下した最初は、訳者が知る限り、完全に明白なゲージ不変性を持つ固有時間表示（元々は V. Fock が 1937 年に導入した方法で、南部も Y. Nambu, *Prog. Theor. Phys.* 5 (1950), 82 で用いている）を応用して、真空偏極、および関連するいくつかの問題を論じた “On Gauge Invariance and Vacuum Polarization”, J. Schwinger, *Phys. Rev.* 82(1951), 664 である。係数 k は量子異常に関与するフェルミオンが 1 種類だけの場合、その電荷 q により $k = q^2/(16\pi^2)$ と表せる。これが、1968 年（論文の出版は 1969 年）のほぼ同時期に Adler, *Phys. Rev.* 177(1969),2426 と J. S. Bell and R. Jackiw, *Nuovo Cim.* A60(1969),47 で独立に再発見され、ABJ chiral anomaly として広く知られるようになった。ちなみに前者はスピノルと電磁場の QED を用いた計算であるのに対し、後者は PCAC をあからさまに取り入れる目的でシグマ模型を電磁場に結合させた模型で計算を行っている。さらに付け加えておくと、これらの仕事に続き、軸性量子異常を外部重力場中のフェルミオンに拡張する最初の結果が、木村利栄によって得られている（T. Kimura, *Prog. Theor. Phys.* 42(1969), 1191. この結果は複数回再発見されている）。また、さらに 10 年後、カイラルアノマリーの経路積分の積分測度からの簡便な導出法が藤川和男によって与えられた（K. Fujikawa, *Phys. Rev. Lett.* 42(1979), 1195.）。

量子異常に関しては、実は、一般に（QCD も含め）量子場、重力場の理論や弦理論では、カイラル量子異常だけでなく、スケール不変性の量子異常としてのトレース（跡, trace）異常（あるいは、「共形異常 (Conformal anomaly)」, 「ワイル異常 (Weyl anomaly)」とも呼ぶ。歴史的なレビューとして、例えば M. Duff, “Twenty Years of the Weyl anomaly”, hep-th/9308075 がある）が力学的な意味で重要な役割を果たすことに注意しておこう。

ところで、解題 21) でカラークォークによる QCD を支持する実験的証拠の一つとして、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ を挙げたが、有限なパイオン質量を取り入れると、この崩壊確率は、関与するクォーク全てを考慮（u, d）したとき、 π^0 と結合するアイソスピン軸性流 $\bar{\psi}\gamma_5\gamma_\mu\tau_3\psi$ の量子異常の係数 k を用いると（数係数を除

いて) $m_\pi^3(k/f_\pi)^2/\pi$ に等しいためである (例えば, S. Weinberg, *Quantum Theory of Fields* V.II, Chap.22 参照). カラー自由度が存在する場合, k の値はカラーが存在しない場合に比べて 3 倍になり, それによって初めて実験値とよい一致が得られる. ただし, この k の結果自体は実はクォーク模型以前の古い計算と一致するだけでなく, Han-Nambu 模型でも得られるので (u,d クォークだけで考えると, 恒等式 (Sch): $1^2 - 0^2 =$ (GM): $3[(2/3)^2 - (-1/3)^2] =$ (HN): $2(1)^2 - (-1)^2$ が成り立つことによる), 分数電荷の直接の検証とは言えない. 両者を区別する直接検証に決定的な役割を果たしたのは, e^+e^- 消滅実験である. 例えばエネルギーが c クォークの敷居値以下であるとし, u,d,s クォークの寄与で考えると, (GM): $3[(2/3)^2 + (-1/3)^2 + (-1/3)^2] = 2$ に対して, (HN): $2(1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2 = 4$ となり, 明確な違いが出てくる.

23)

BCS 理論の 7 年前の Ginzburg-Landau 理論は, すでに解題 19) で触れたように, 超伝導状態を記述する新たな方法として, 電子 (対) の有効的な波動関数 = (複素) 秩序場を導入し, 自由エネルギーを秩序場の汎関数として表現することを提唱した. WS 理論においては独立な自由度としての Higgs 場が秩序場と類似した役割を果たす.

一方, すでに解題 12) で PCAC の具体的模型として触れた Gell-Mann-Lévy 模型は, 一般にシグマ模型と呼ばれる模型の最初の例を与えた (“シグマ”はパイオンの仲間のアイソスピンゼロの新たなスカラー場を導入し σ で表したのに由来, σ の真空期待値が核子質量を与える). NJL 模型のようにフェルミオンの自己相互作用により力学的に SSB を引き起こすのとは異なり, SSB を引き起こす種として独立なスカラー場の自由度を導入してフェルミオンと結合させているのがその特徴である. それにより古典近似 (あるいはツリー近似) の段階でも SSB による質量生成を導けるのがシグマ模型の一般的利点である (解題 17) でも WS 模型に関連して触れた). 以前に Schwinger が論じた模型 (J. Schwinger, *Ann. Phys.* 2(1957) 407) の拡張になっている. [19] では繰り込み可能な線形シグマ模型と, 繰り込み不可能な非線形シグマ模型の両方が扱われている. 後者は前者でシグマの質量を無限大にする極限を取り σ を消去したものと見做せる. パイオンに質量を持たせると同時に, 軸性流が PCAC, $\partial_\mu(\bar{\psi}\gamma^\mu\gamma_5\tau^i\psi) = a\phi_\pi^i$, ($a \propto f_\pi m_\pi^2$, ϕ_π^i

はパイオン場, $i = 1, 2, 3$ はアイソスピンベクトル成分) という要請を満たす仕方
でカイラル対称性をあからさまに破る模型になっているが, NJL 模型と同様に
 $m_\pi \rightarrow 0$ の極限で SSB を実現する. NJL では, BCS 理論とのアナロジーに基づ
いたフェルミオン場の 4 点相互作用の非線形な力学からの帰結として SSB を
導いているのに対し, Gell-Mann-Lévy ではそうしたアナロジーへの拘りなし
に, より取り扱い易いシグマ模型のボソン場の非線形力学とフェルミオンとの
結合によって SSB を結果的に導いた. 後者で $m_\pi \neq 0$ の場合は, 例えば, Ising
模型 (や Heisenberg 模型) で外部磁場があると, スピンの大局的反転変換の対
称性があからさまに壊れゼロでない期待値 (秩序パラメーター) を持つが, 磁
場がゼロになる極限 ($m_\pi \rightarrow 0$ に対応) をとって反転対称性を回復しても臨
界温度以下の低温相では期待値がゼロにならず, 反転対称性に関して SSB が実
現するのと同じ事情である. ただし, この段階ではどちらの論文でもゼロ質量
パイオンの出現に関して, Goldstone が普遍性を明らかにした SSB に伴って出
現する NG モードについての明確な理解にはまだ達していなかったと言える.

当然, クォーク場による NJL 模型が可能であるのと同様に, Gell-Mann-Lévy
模型もクォーク場に適用することができる. このとき何れにしてもクォーク場
理論の立場でカイラル対称性の SSB のもとでゼロと異なる m_π を生じさせるに
はゼロでない (カイラル対称性を陽に壊す) クォークの流れ質量 (m_u, m_d) が必
要であるが, m_π^2 と $m_u + m_d$ の間で成り立つ (模型の具体的詳細によらない) 一
般的な比例関係式が, 後に Gell-Mann 等により PCAC と軸性流の交換関係を
組み合わせることにより導かれた (M. Gell-Mann, R. J. Oakes, and B. Renner, *Phys.*
*Rev.*175(1968) 2195). これも流れ代数の考え方 (解題 12) 参照) の応用の一つと
言える. これらについても, 解題 11) で引用した Weinberg の教科書の第 19 章
に現代的な立場からの詳しい解説がある.

なお, 線形シグマ模型は 4 年後にゲージ化により Higgs 場の理論に繋がった.
また, 非線形シグマ模型は, ちょうど NJL 模型がそうであるのと同様に時
空 2 次元では繰り込み可能で漸近自由な理論になる. その場合, もし, 時
空 2 次元を弦が運動する軌跡としての 2 次元世界面に置き換えて考えると,
場の非線形な標的空間は曲がった時空中における弦の量子力学の模型と見
做すことができ, 弦理論で重要な役割を果たす.

24)

類似性 [Ginzburg-Landau \approx WS] に基づき, [BCS \rightarrow Ginzburg-Landau] \approx [NJL \rightarrow Gell-Mann-Lévy] から [Ginzburg-Landau \approx Gell-Mann-Lévy] を経て, WS 理論にとっての BCS 理論に相当する, Higgs 場を陽には必要としないような未知の力学的理論 (以下, “X” と略, [X \approx BCS], [X \rightarrow WS]) が背後にあるという予想. 南部は 70 年代からよくこの考え方を述べていた. たとえば, 解題 7) でも引用した 1979 年のインタビューでは「ワインバーグとサラムがやっていたことに特別強い感銘を受けなかったんですけども, だんだんとやはり, その意義が分かってきたような具合です. その当時はまだ中途段階のものとして考えられていたんですが, 昨年あたりからそうでもなくなってしまいましたね. ただ, 究極的にそれが根本的なものか, 私には疑問なんですけど...」と述べている. 解題 17) で紹介した Weinberg 自身の見解と比較すると両者の違いについて理解が深まる. ここで「昨年あたりから」と言っているのは, 1978 年 8 月に東京新宿の京王プラザホテルで開催されたロチェスター会議 (南部はこの会議の最後のサマリートークをした) のことを指している. 訳者 (や, さらに上) の世代にとっては大変思い出深い国際会議であるが, 現在の標準模型はこの会議でそれまでに蓄積された実験的検証結果と理論的理解に関する大方の評価が定まり確立されたという経緯がある.

[NJL \rightarrow Gell-Mann-Lévy] は, QCD とは逆に, 繰り込み可能なゲルマン-レヴィ模型の背後にあるものとして, ミクロなレベルで繰り込み不可能な NJL 模型を対置させているようにも受け取れるので, 違和感を感じる読者もいるかも知れない. 繰り込み可能なゲージ理論に基づいた標準模型の数々の検証がなされてきた現在の立場からは, 一般相対性理論や弱い相互作用に対するフェルミの理論 (1934 年) のように, 繰り込み不可能な理論は通常はあくまでも十分低エネルギー (= 長距離) だけで有効性を発揮する理論と見なす方が自然である. この立場からすると, より根本的なミクロ理論 X は, 重力も統合して紫外発散が解消されるような理論 (トップダウンの立場からは ‘紫外完全 (UV complete) 理論’, より保守的なボトムアップの有効理論的立場では ‘漸近安全 (asymptotic safe) 理論’ と呼ばれる考え方も含めてよいだろう) であるべき, と考えるのが現在多くの研究者の見方であろう. そのような理論のうち最有力候補は弦理論であることは誰しも認めるだろう (というより, 他に比肩できる候補がないと言った方が適

切). その顕著な特徴の一つは、弦の世界膜の内部的な力学を支配する(超)共形対称性の結果として、外部的に現れる対称性のゲージ化が自動的に生じてすべての基本相互作用が統一され得ると同時に紫外問題が解消する構造を自然に備えていることである。そこでは原理的には Higgs 場, ゲージ場, クォーク場, さらに重力場も含めて現在の標準理論の基本的な場も全ては『弦』というより基本的な自由度から導かれるべき2次的な物理自由度と考えられることになる。もちろん, それが本当の意味で実現でき, 現実の標準模型を説明できるかどうか, および直接的な実験的検証の可能性に関しては今後の発展を待たなければならない。

それでも重力との統合を特徴付ける究極的短距離スケールに遡る前に, 南部が言うように, 中間的なスケールで X 理論が一種の有効理論として役割を果たす可能性はあり得るだろう。本文から推測すると, 南部は, その場合, ある種の BCS–NJL 型模型がこの中間的スケールより長距離側で (QCD の場合とは違う意味で) X に近い役割を果たせると期待していたのかも知れない。

ところで, BCS 機構を相対論化するアプローチにおける南部の元の問題意識は, 根源的なフェルミオンの力学の観点から質量の起源を理解することにあつた。本講演の内容だけからは伺い知り難いことだが, 実は, 南部は Ginzburg–Landau 理論に関しては非常に複雑な思いを持っていた。「現在の Higgs 機構の先触れであつた Ginzburg–Landau の理論に私はもっと関心を払うべきであつた。私は彼らの秩序場の意味を理解せず, 頭の中からそれを追い出してしまつていた」(拙訳)との少しばかり自省めいた述懐が, 解題 17) で触れた成書 *BCS: 50 Years* に収録されている南部論文の回想にある。実際, 論文 [17] は [8][9][11] のどれにも引用されていない。この時期の南部には BCS 理論と Dirac 方程式の質量とのアナロジー, および質量の力学的 SSB による生成に如何に強く思い入れがあつたかを物語っているように思われる。たとえば, 1982 年に奈良の(当時, 内山龍雄が学長を務めていた)帝塚山大学で開催された国際シンポジウムの closing talk でも「私は個人的には Higgs 場は結果的には湯川中間子のようなものとなるという見方ないしは予想をしている理論家に賛同するものです」(拙訳, in “Gauge Theory and Gravitation”, eds. K. Kikkawa et al. *Lecture Notes in Physics*, 176, Springer, 1983) と, ゲージ場やクォークに比べて Higgs 場は2次的な自由度であるとの見解を強調している。先に引用した 1979 年のインタビュー

にも現れているように、WS 理論も、同じ理由、つまり、GL 理論を相対論化したものと言える Higgs 機構を用いていることからあくまでも暫定的なものであるとし、それほど深い意義があるとは考えていなかった。

実を言うと、訳者自身も学部4年目の卒業研究のテーマがBCS理論だった影響で、WS理論やHiggs等の論文を勉強した院生時代に幾何学的な意味が明らかなゲージ場や計量テンソルの重力場に比べてそうした意味を付与し難いように思われるスカラー場が基本自由度なのか疑念が湧いていたこともあり、当時、南部の講演を聞いて納得した覚えがある。さらに、関連して個人的な思い出を付け加えさせていただくと、私が上で引用した*BCS: 50 Years*での述懐を知る10年近く前の2000年代の前半頃であったか、あるパーティで先生に久しぶりにお会いしたときに、以前から気になっていたことだったので、‘ギンツブルグ-ランダウ理論をどう考えていらしたのでしょうか’と問うた際に、即座に同趣旨のお答えをいただいていた。確かに先生にとって長く心に掛かる問題であったのであったのである。

25)

ハドロンの共鳴スペクトルが、近似的にスピン J と質量 M が $J = \alpha' M^2 + \text{const}$ というレグジュ (Regge) 軌跡と呼ばれる関係 (傾き定数 α' に普遍性がある) を満たすものとして分類できることが現象論的に1960年代後半に確立された。これに基づく1968年のVenezianoによる双対振幅の発見から双対共鳴模型が生まれた。南部はこの双対共鳴模型に対して相対論的弦 (relativistic string) の描像を最初に提唱した一人としてもよく知られている (Y. Nambu, “Quark model and the factorization of the Veneziano model”, *Proc. Int. Conf. on Symmetries and Quark Models*, (Gordon and Breach, 1970), p. 269. これまた個人的な思い出で恐縮だが、1969年に学部を卒業して修士1年に進んだ訳者にとって、この論文のプレプリントに出会ったことが大学院で弦理論へ向かうのに最も重要なきっかけになった)。弦理論に関連する南部自身の回想として Y. Nambu, “From the S-matrix to string theory” in *The Birth of String Theory* (eds. A. Cappelli et al. Cambridge Univ. Press, 2012年), p. 275がある。そこでは、1950年代後半のS行列理論、分散公式に関する仕事、1960年代後半における無限成分波動方程式、そして60年代終盤から70年代初頭のVeneziano模型の因子化 (factorization) に基づく弦模型の提唱、そして

弦の作用原理に関する仕事と、弦理論にまつわる自身のエピソードが語られている。末尾に「弦模型について私が思い出す限りの自分の考えを記述したが、当然触れるべきであった他の人々の貢献について十分考慮していないことをお詫びする」（拙訳）というあとがきがつけられている。もしかすると、南部は本ノーベル賞講演についても部分的には同じような思いを抱いていたかも知れない。この本は2007年に、イタリア、フィレンツェにあるガリレオ・ガリレイ研究所で開催され、訳者も出席した同タイトルの国際会議が元になってできた本である。当然、弦模型の創始者の一人として南部も招待されていたが、(1年半後のノーベル賞授賞講演の場合もそうであったように) 高齢のため出席していない。主催者が大変残念がっていて近況などを尋ねられたのが訳者の印象に残っている。訳者が南部と最後に会話したのは、この会議から1年後、〈訳者はしがき〉で触れたニューヨークでの最初の出会いから31年後、京都大学でのある会合の際における会食においてである。1978年東京でのロチェスター会議での思い出（これに関しては『科学』（岩波書店、2009年1月号、p.109所収のエッセイ「私が好きな南部さんの論文」で触れた）も話題に上がったのであった。

弦理論の起源に関連して、南部の考え方が大きな影響力を持ったもう一つの点にも簡単に触れておこう。それは（すでに解題20）で Schwinger model の物理的解釈で触れたように）超伝導の Meissner 効果が、QCDにおけるカラーの閉じ込めの問題とも関係する側面を持つ可能性についてである。もし電場と磁場の役割を交換して考えると、第2種超伝導体における渦糸（解題4参照）に相当するのは電気力線の細い糸になる。従って、そこに反対符号の荷電粒子の対が侵入すると、荷電粒子が細い電気力線で結ばれ（‘dual’ Meissner 効果と呼ばれる）、力のポテンシャルは粒子間の距離が大きいとき、距離に比例する。この考え方をSU(3)群のカラー電気力線に適用すると、クォークは細いカラー力線の紐として弦で結ばれることになるので、クォークの複合状態としてはSU(3) color singlet だけが許されるという性質が自然に成立し得る。実はこの予想は1970年代中盤から後半にかけて南部自身（および、Mandelstam, 't Hooft,...）が強調した描像である。つまり、もしQCDの真空状態がこのように電場と磁場が交換した意味での一種の超伝導状態であるとする、クォーク閉じ込めの非常に単純な解釈が可能になるわけである。この描像は、同じ頃に提唱された格子ゲージ理論（K. Wilson, “Confinement of quarks”, *Phys. Rev. D*10(1974),2445）の強結

合領域での振る舞いとも調和する（解題 20）も参照のこと）。もちろん，解題 24）で触れた重力を含めた統一理論としての弦理論と方向とは異なるが，相対論的弦の物理的描像の起源の一つはここにあるし，実は現在ではホログラフィック原理（holographic principle）と呼ばれる重力理論とゲージ理論の関係（ゲージ／重力対応，すでに解題 3）でも触れた）とも深いところで結びつく考え方と言えるのである。

（なお，60年代から70年代にかけてのレゾナンス理論と双対共鳴模型とは具体的にどのようなものか，および，南部の貢献を含めた弦理論，それらと並行した超対称性を含む場の理論の進展，弦理論が如何にして量子重力とゲージ理論の統一理論として認識されたか，そして，それらがどのように相互に関係し影響し合って形成され，さらに現代に繋がっているのかに関して関心がある読者には，訳者自身の体験に基づいて記述した拙書で恐縮だが，米谷民明『究極理論への道-力・物質・時空の起源を求めて』（岩波書店，2021年）を参照していただければ幸いである。また，弦の古典力学での Regge 軌跡の導出に関しては，米谷民明『相対性理論講義-入門から弦の古典力学まで』（サイエンス社，SGC ライブラリ 146）を参照のこと。）

26)

[20]では，いわゆる大統一理論と関連して， $SU(5)$, $SU(9)$,... 等の大きなゲージ対称群の理論における段階的な SSB の繋がり（ $SU(9) \rightarrow SU(8) \rightarrow SU(7) \rightarrow \dots$ ）によって新たな質量スケールが現れる可能性が議論されている。SSB を引き起こすのは，Yang-Mills ゲージ場の交換によって引き起こされる最も引力が強いチャンネル（MAC, most attractive channel）で起こるフェルミオン対の凝縮であるとして議論を展開した。

[21]で南部はこれに基づく 2. を「ハドロソニウム鎖」と呼び，1. の「フォノン鎖」とを比較して論じた。また，タンブリング（tumbling）とは別な SSB の閉じた鎖的な繋がり可能性として“靴紐機構”（ブートストラップ, Bootstrap）についても論じている。要するに，鎖が円環的に閉じて自己完結する場合のことである。たとえば，あるチャンネル， t -チャンネル，の凝縮を引き起こすフェルミオン対が別の双対的な s -チャンネルに複合的な結合状態として現れる可能性がある。たとえば，標準模型の Higgs 場をトップクォークと反トップクォークが作る対の複合状態とする仮説がこれに相当する。実はこの種の自己完結的な

機構（双対ブートストラップ, dual bootstrap）は S 行列理論の立場からハドロンの靴紐理論として 1960 年代にレッジ (Regge) 極の理論と合わせて盛んに研究され, 1970 年代からの弦理論につながったものであるが, 場の理論の範囲でどこまで成り立ち得るかは疑問があろう. いずれにしても, 当然, 究極的な統一理論に近づけば近づくほど, そうした自己完結的な様相が顕著になると考えられる.

編集部注:

本記事は, Spontaneous Symmetry Breaking in Particle Physics: A Case of Cross Fertilization, Nobel Lecture, December 8, 2008 by Yoichiro Nambu in “Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2008 ” published by Almqvist & Wiksell International, 2009, pp.57-63 を, The Nobel Foundation と南部潤一氏から許可をもらい, 米谷民明氏に翻訳していただいたものである.

CP の破れとフレーバー混合*

ノーベル賞受賞講演

2008 年 12 月 8 日

小林 誠

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

高エネルギー加速器研究機構

翻訳：日笠健一 東北大学 高等大学院機構

1. 序

ご存じのように通常の物質は原子からできています。原子は原子核と電子からなっており、原子核は陽子と中性子によって構成されています。さらに、陽子や中性子は、2種類のクォーク、 u と d からできています。従って、通常の物質の基本的な構成要素は電子と2種類のクォーク u と d です。

しかしながら、素粒子の標準理論と呼ばれる、既知の素粒子現象の包括的な記述を可能にした理論によれば、クォークの種類は6種類です。残りのクォークは s , c , b , t という名前です。なぜこの4つが通常の物質中に存在しないかということ、普通の環境では不安定であるためです。電子も同様に仲間がおり、6つのメンバーを持つレプトンという族に属します。3種類のニュートリノがこの6つのうちに入っています。

標準理論でもう一つ大事な部品は基本相互作用です。3種類の相互作用がクォークやレプトンに働きます。強い相互作用は量子色力学 (Quantum Chromodynamics, QCD) で記述され、電磁相互作用と弱い相互作用は Weinberg-Salam-Glashow の理論により統一的に記述されます。これらはいずれもゲージ理論と呼ばれる特別な種類の場の理論に属します。

標準理論が確立したのは1970年代です。このきっかけはゲージ理論の研究の発展でした。特に、一般的なゲージ理論がくりこみ可能であることが証明 [1] されたのです。このことにより、素粒子の相互作用がすべて発散の困難のない量子場理論により記述できるという可能性が開かれました。それまでは、電磁相互作用しかその資格を持っていなかったのです。

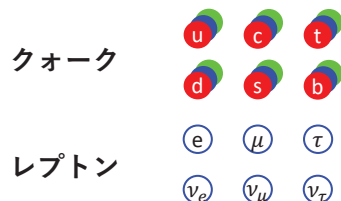
1970年代の新しいフレーバーの発見は標準理論の確立に重要な役割を果たしました。特に、 τ レプトン、 c , b クォークは1970年代に発見されたものです。私が1973年に益川敏英氏と6クォークモデルを提案 [2] した頃には、クォークは3種類しかないと広く思われていました。4つめのクォークが存在するかもしれないという兆候はわずかにありましたが、誰も6つあるとは思っていませんでした。

以下では、CP の破れとクォーク・レプトンのフレーバーの研究の発展について、日本の寄与に重点を置きながら述べることにします。次節は坂田学派による先駆的業績に当てます。私はここ

* 脚注および文献【】内は訳者による。

原文は <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2008/kobayashi/lecture/> および M. Kobayashi, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 1019 (2009) にも掲載されている。

基本粒子



基本相互作用



図 1. 素粒子の標準理論。

から多くを学んだのでした。3節では CP 非保存についての仕事に触れ、当時我々がどのように考え何を見いだしたかを述べます。4節はその後の発展を述べます。我々の提案した理論は B ファクトリーという種類の加速器により実験的に検証されました。最後の 5 節では、レプトンセクターのフレーバー混合について少し見ることにします。これはクォークセクターのフレーバー混合と対をなす現象であり、この分野でも日本がユニークで重要な寄与をしているのです。

2. 坂田学派

益川博士と私は 2 人とも名古屋大学を修了し博士の学位を取得したのですが、私が大学院に入学した頃、名古屋大学の素粒子理論研究室は坂田昌一教授により率いられ、独特な研究スタイルで知られていました。さて、1947 年に宇宙線中に見つかったのを端緒として、1950 年代初頭に、何種類もの奇妙な粒子が発見されました。今の言い方では、奇妙な粒子は s クォークか反 s クォークのどちらかを構成要素に含んでいる粒子で、奇妙でない粒子はそうでないものです。ですが、これから述べるのはクォークモデルが生まれる以前の時代です。

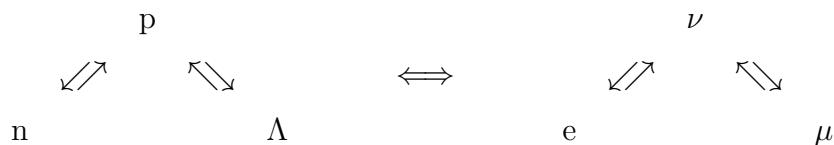
1956 年に、坂田は坂田モデルとして知られているモデルを提案しました [3]。このモデルは、あらゆるハドロンが陽子 (p)、中性子 (n)、ラムダ粒子 (Λ) の 3 つ組の中から何個かを組み合わせてできた複合粒子であるというものです。そのハドロンが奇妙であってなくてもです。言い換えると、このモデルでは 3 種類のバリオン p, n, Λ がハドロンの基本的構成要素というわけです。その後坂田モデルはクォークモデルに席を譲り、クォークの 3 つ組 u, d, s が p, n, Λ に取って代わりました。しかし、基本的な 3 つ組の考え方の嚆矢は坂田モデルにあります。

以下、坂田モデルにおける弱い相互作用について話します。原子核の通常のベータ崩壊は中性子が陽子に転化することにより起こります。同様に、ラムダ粒子も陽子に変化できると考えられます。坂田モデルでは、ハドロンの弱い相互作用はすべて、基本の 3 つ組間のこの 2 種類の遷移によって説明されます。



図 2. 坂田昌一 (1911–1970) (坂田記念資料室提供)。

この弱い相互作用のパターンは、レプトンの弱い相互作用とかなり似ています。



当時はニュートリノは1種類しかないと考えられていたことを注意しておきます。このようなバリオンとレプトンの弱い相互作用の類似性は Gamba, Marshak, 大久保 [4] によって指摘されました。

1960年に、牧, 中川, 大貫, 坂田 [5] はバリオン–レプトン対称性 (B–L 対称性) の考え方を押し進めて、いわゆる名古屋モデルを提案しました。このモデルでは、バリオンの3つ組 p, n, Λ はそれぞれニュートリノ, 電子, μ 粒子に仮想的な「B物質」が結合したものであると考えました。

$$p = \langle B^+ \nu \rangle, \quad n = \langle B^+ e \rangle, \quad \Lambda = \langle B^+ \mu \rangle$$

ここではB物質を B^+ と書いています。

複合モデルとしての名古屋モデルは特にそれ以上の進展を見せませんでした。その考え方の一端からおもしろい方向に発展がありました。1962年に、ニュートリノには電子型と μ 粒子型の2種類があることが発見されたからです。米国ブルックヘヴン国立研究所におけるこの結果 [6] が発表されると、牧, 中川, 坂田 [7] と片山, 松本, 田中, 山田 [8] はそれぞれ、名古屋モデルを拡張して2種類のニュートリノを含める興味深い試みを論文にしました。

牧らは、レプトンとバリオンを関連づける推論に基づいてニュートリノの質量を論じ、ニュートリノの状態の混合を記述する関係を導きました。

$$\begin{aligned}
 \nu_1 &= \cos \theta \nu_e + \sin \theta \nu_\mu \\
 \nu_2 &= -\sin \theta \nu_e + \cos \theta \nu_\mu
 \end{aligned}$$

ここで、 ν_1, ν_2 はニュートリノの質量固有状態で、牧らは陽子が B 物質と ν_1 の複合状態としました。この仮定は今の実験結果とは相容れませんが、レプトンフレーバー混合の正しい定式化を彼らが提示したのは強調に値します。この寄与を評価して、レプトンフレーバーの混合行列は現在 MNS 行列^{*1}と呼ばれています。

レプトンフレーバー混合はニュートリノ振動という現象を引き起こします。何年も後になって、ニュートリノ振動は思いがけない形で発見されました。このことについては後で触れることにします。

上の推論のもう一つの重要な帰結は、 ν_2 に対応する 4 つめの基本粒子の存在です。これは片山らによって詳しく述べられています。当時はバリオンをまだ基本粒子とみなしていたわけですが、ここで述べられた弱い相互作用の構造は後の Glashow-Iliopoulos-Maiani (GIM) [9] によるものと同じです。

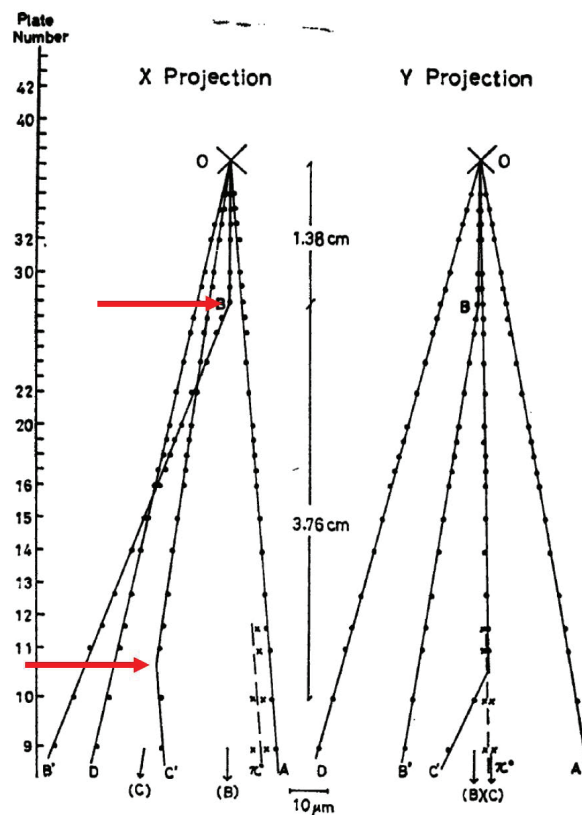


図 3. 宇宙線事象の 1 つ [10]。

これらの仕事は 1971 年に再び日の目を見ましたが、それは丹生たちが宇宙線にさらした原子核乾板検出器に新種の事象を発見した [10] からでした。そのうちの 1 つを図 3 に示します。飛跡のうち 2 本が途中でくの字状に曲がっており、対で生成された新粒子が崩壊したものと思われます。この新粒子の質量は 2 から 3 GeV、寿命は 10^{-14} 秒と推定されました。

坂田グループのひとりである小川修三は、この結果を知ってすぐ、この新粒子が拡張名古屋モデルに含まれる第 4 の実体に関するのではないかと指摘しました [11]。この頃には坂田モデル

*1 その後 PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) 行列と呼ばれることが多くなっている。

はクォークモデルに置き換わっていたので、この指摘の意味は、この新粒子が今で言うチャーム粒子ではないかということになります。これを受けて、日本のグループがいくつか、私も含め、4クォークモデルを調べ始めました [12]。当時私は名古屋大学の大学院生でした。

ここまで坂田学派のユニークな活動を紹介し、4クォークモデルについて詳しく述べました。我々が提案した6クォークモデルは、この4クォークモデルをそのまま単純に拡張したものというわけではありませんが、私にとってむしろ重要だったのは、名古屋大学の素粒子理論研究室の雰囲気でした。ここで述べた研究のほとんどは、私が大学院に入学する以前に行われたものではありますが、それを引き継いだ哲学は当時もまだ健在でした。全体像をつかむことはこの種の研究に必須であり、私はその重要性を学んだのでした。

3. 6クォークモデル

1971年に、非アーベルゲージ理論のくりこみ可能性が証明されました [1]。これにより、弱い相互作用を量子場理論により矛盾なく記述することができるようになり、Weinberg-Salam-Glashow理論 [13] が注目を浴び始めました。私は1972年に名古屋大学で博士号を取得し、京都大学に移りました。私がCPの破れの研究を始めたのはこの頃です。

CPの破れが最初に発見されたのは1964年、Cronin, Fitch たち [14] により、中性 K メソンの崩壊においてでした。CPの破れは、粒子と反粒子の間の対称性が破れていることになります。CPの破れの発見は、粒子と反粒子は本質的に差があることを意味します。

我々の考えは、もしゲージ理論が粒子の相互作用を矛盾なく記述するものであるならば、CPの破れもそれに含まれているはずということでした。この問題を解くには、それほど紆余曲折は必要ありませんでした。単に、くりこみ可能なゲージ理論がCPを破る条件を調べればよかったです。我々が見いだしたことは以下のようにまとめられます [2]。

当時はクォークは3つと広く思われていましたが、3クォークのモデルはゲージ理論として欠陥がありました。というわけで、理論的にはGIMタイプの4クォークモデルがすぐれていると考えられました。しかし、GIMタイプのモデルにCPの破れを含めることは不可能でした。GIMタイプの条件をゆるめて一般の4クォークモデルを考えたとしても、CPの破れを含む現実的なモデルは作れないということがわかりました。このことから、4番目のクォーク以上に未知の粒子が存在していなければならないことになります。私はこのことは重要でかなり強い結論であると考えました。

そこで、新しい粒子を導入してCPを破る機構をいくつか考案しました。そのうちの1つとして6クォークモデルを提案したのです。

以下では、CPを破るにはクォーク4つでは不十分で、6つが必要なことを理解してもらうため、クォークのフレーバー混合を少し詳しく解説します。

ゲージ理論の枠組では、フレーバー混合はゲージ対称性と粒子の状態の mismatch から生じます。ゲージ対称性は、複数の粒子を多重項というグループにまとめて入れ込みます。しかし、多重項の各メンバーは必ずしも1種の粒子そのものではなく、いくつかの粒子の重ね合わせであることがあります。フレーバー混合とはこの重ね合わせに他ありません。今の場合、関係するゲージ群はWeinberg-Salam-GlashowのSU(2)で、多重項は二重項です。

4つのクォークが SU(2) 群の二重項2つを構成していると仮定すると、最も一般的な形として

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix},$$

のように書くことができます。ここで d', s' は実際のクォークの状態 d, s の重ね合わせとなっており、行列を用いて

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

と書けます。この混合を表す行列は、数学でユニタリ行列と呼ばれる行列でないといけません。

次の問題は、CP の破れの条件がどうなるかです。量子場理論では、CP の破れは複素数の結合定数と関連しています。今の形式でもっと具体的に言うと、CP の破れが起こるのは、混合行列の要素の中に、除去できない複素数が現れるときです。ユニタリ行列の要素は一般的に複素数ですが、粒子状態の位相を調節することにより、実数に変えることができます場合があります。このとき物理的な結果は何も変わりません。このような場合の複素数は除去可能、そうでない場合除去できないと言います。このように、CP の破れの条件の一つは、粒子の状態の位相を調節しても取り除けない複素数が残ることです。

4クォークモデルでは、調節のための因子は、位相だけを対角要素にもつ行列2つで書けます。これらの位相をうまく選ぶことにより、どんな 2×2 行列も実行列にすることができるのは容易に見て取れます。

$$\begin{pmatrix} e^{i\phi_u} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\phi_d} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

この場合は CP の破れを導入するのは不可能であることがわかります。

6クォークモデルではこの論理展開のどこが変わるでしょうか。この場合、フレーバー混合は次のように表されます。

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}.$$

今回は混合行列が 3×3 のユニタリ行列となります。この場合は前回と異なり、クォーク状態の位相を調節することで行列要素の全部の位相を取り除くことはできません。位相の調節によって最大可能なのは、行列要素を4つだけのパラメータを用いた標準形に直すことです。よく使われる形は

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

です。ここでは、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3$) と書きました。 $\delta = 0$ ($, \pi$) の場合を除き、行列要素には虚数部分が残る、CP 対称性が破れることがわかります。

パラメータの実測値の階層構造を考慮すると、次のような近似的な形が得られ、現象論的解析に広く用いられています。

$$V = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4).$$

この表式では、 η が 0 でないとき CP 対称性が破れます。

さて、我々は当時この CP 非保存の機構はとてもおもしろいと思いましたが、6 クォークモデルだけを他の可能性の中から 1 つだけ選ぶ理由は持ち合わせていませんでした。系が十分多種類の粒子を含んでいれば CP 対称性を破ることは難しくないので、このモデルは特別とまでは言えません。しかし、その後の実験の発展によって、6 クォークモデルは別格の地位に押し上げられました。

1974 年に J/ψ 粒子が発見され [15]、時を置かずして、4 つめのクォーク c とその反粒子の束縛状態であることがわかりました。この発見は素粒子物理に大きな衝撃をもたらしましたが、その一方で 6 クォークモデルにはほとんど影響がありませんでした。

1975 年には、 τ レプトンが発見されました [16]。この発見こそは我々のモデルにとって重大な意味がありました。 τ レプトンは 5 番目のレプトンです。レプトンではあれ、クォークにも第 3 の世代が存在するのではと思わせました。この頃から我々のモデルは注目を集めはじめました。6 クォークモデルの現象論を調べた初期の論文としては [17] と [18] があります。

1977 年にアップシロン粒子が発見され [19]、5 番目のクォーク b とその反粒子の束縛状態であることがわかりました。最後のクォーク t の発見 [20] はずっと後の 1995 年でしたが、すでにそれ以前に 6 クォークモデルは標準的なモデルとなっていました。

その間、B メソンの系においては大きな CP 非対称性が期待されるという指摘がされていました [21]。これにより、モデルを B ファクトリーで検証する可能性が開けました。B メソンは b クォークかその反粒子を構成要素に含むメソンで、B ファクトリーとは途方もない数の B メソンを工場のように生成できる加速器を言います。

4. B ファクトリーにおける実験的証明

6 クォークモデルの実験的証明を目指して、2 つの B ファクトリーが建設されました。日本では KEK における KEKB、アメリカ合衆国では SLAC の PEP-II です。これらの加速器は通常のものとは異なり、互いに衝突する電子と陽電子は違うエネルギーに設定されています。このため、生成された B メソンはブーストを受けます。各 B ファクトリーには、実験グループである Belle (KEKB) と BaBar (PEP-II) が大規模の国際チームとして、多くの国の参加を得て組織されました。

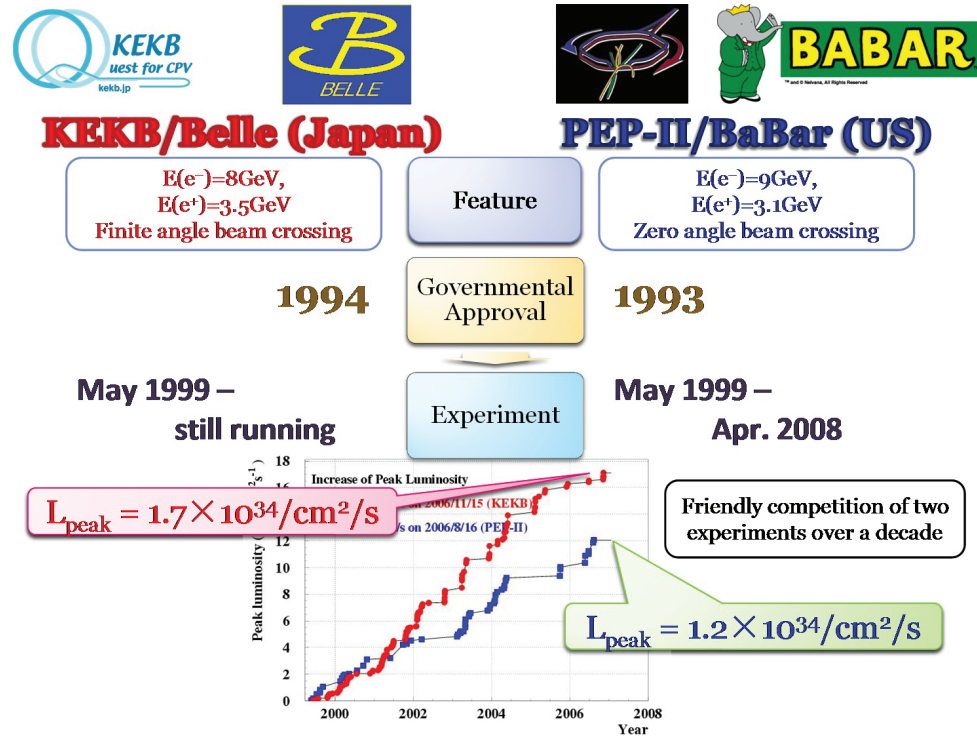


図 4. KEKB/Belle と PEP-II/BaBar。

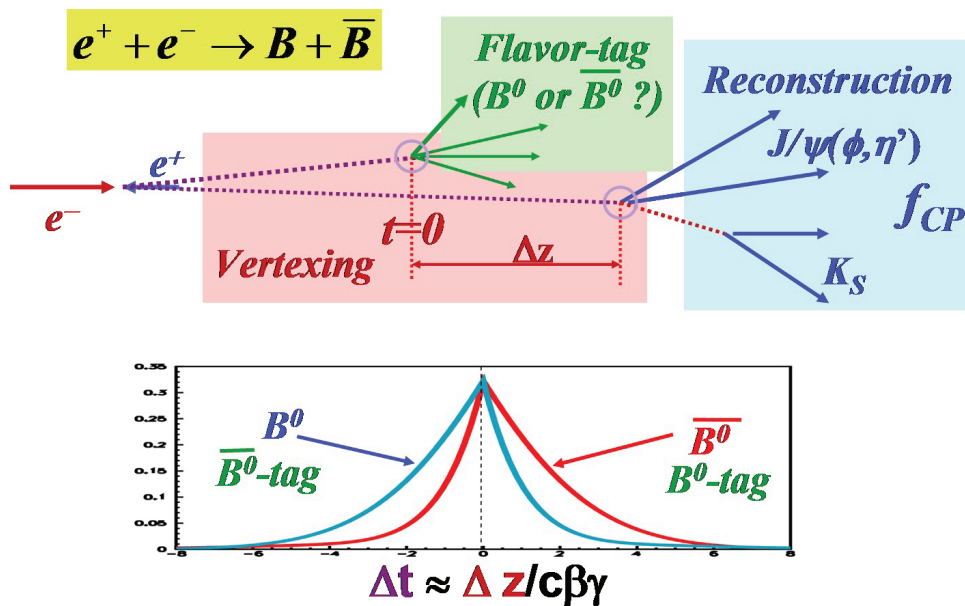


図 5. B メソン崩壊で CP の破れを測定する典型的な方法。

どちらもほぼ同時に採択され実験を開始しました。PEP-II/BaBar は今年運転を終了しましたが、KEKB/Belle はまだ続いています*2。どちらも世界記録である $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上のルミノシティを達成しました。ルミノシティは衝突型加速器の性能を表すのに鍵となるパラメータです。

*2 KEKB は 2010 年 6 月に運転を終了、その後継である SuperKEKB は KEKB よりも 30 倍大きなルミノシティを目指す加速器であり、2019 年 3 月に物理実験を開始している。

最後の点ですが、これがクォークと並行するレプトンのフレーバー混合と関連しているのではないかという提案がされています。実はレプトンフレーバーの混合に関して、日本がとても重要な寄与をしてきています。これを次の節で述べます。

5. レプトンフレーバー混合

最も重要な成果はニュートリノ振動の発見です。これがなされた SuperKamiokande は、日本中部地方の神岡鉱山に建設された巨大な水のタンクです [24]。

この実験では、宇宙線が地球を取り巻く大気に衝突してつくったニュートリノを観測していました。ニュートリノは容易に地球を通り抜けるので、下からも検出器に入射してきます。ニュートリノ振動とは、ニュートリノの種類が飛行中に変化することです。もしニュートリノが地球の裏側からやってくる間にニュートリノ振動が起こったとすると、検出されるはずの種類のニュートリノの観測数が減ることになります。

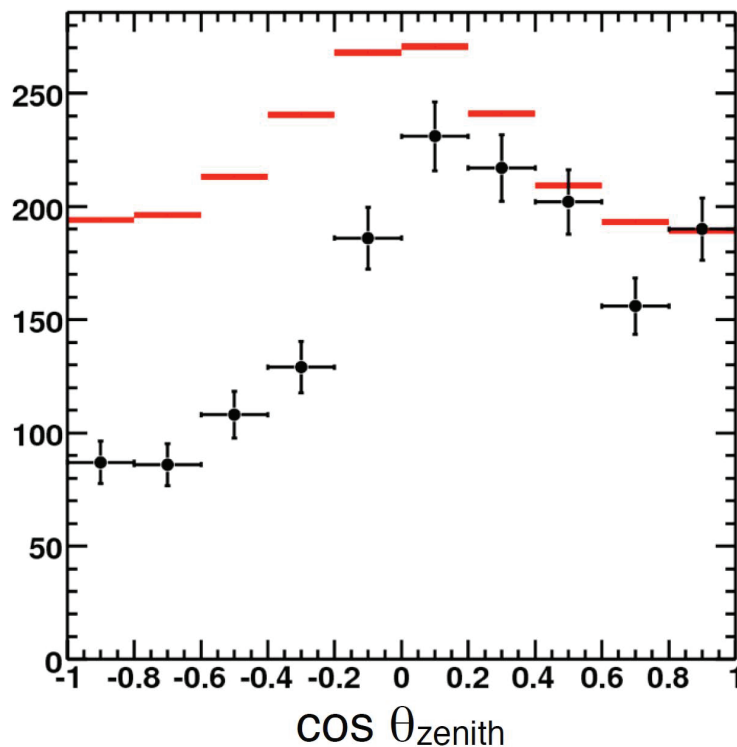


図 7. 大気ニュートリノの観測結果 [24]。

図 7 はこの実験の観測結果です。赤い横線は振動がない場合の予測値で、十字が実観測データです。この結果は明らかに（下方からの）ニュートリノの観測数が減っていることを示しており、ニュートリノ振動の予測と完全に一致しています。この大発見は戸塚洋二が率いたものですが、とても残念なことに、戸塚はこの 7 月に亡くなりました*4。

*4 この解析で中心的な役割を果たした梶田隆章氏は 2015 年にノーベル物理学賞を受賞した。



図 8. 戸塚洋二 (1942-2008) (KEK 提供)。

ニュートリノ振動はさらに、人工のニュートリノを用いた実験二つによって確かめられました。一つは K2K 実験 [25] です。この実験では、ニュートリノを KEK 研究所の陽子シンクロトロンによって生成し、これを SuperKamiokande で観測します。図 9 は観測されたニュートリノのスペクトルです。データは振動パターンを明らかに示しています。もう一つの実験は、KamLAND 実験 [26] です。KamLAND 検出器は水の代わりに液体シンチレータを使っていますが、場所はやはり神岡鉱山にあります。この実験では、周囲に位置する原子力発電所の生成したニュートリノを観測しました。データはきれいに振動の予測と合っています (図 10)。

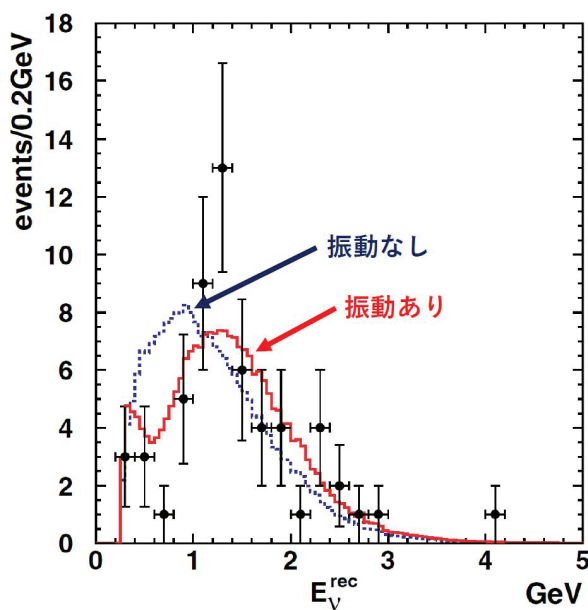


図 9. K2K 実験の結果 [25]。

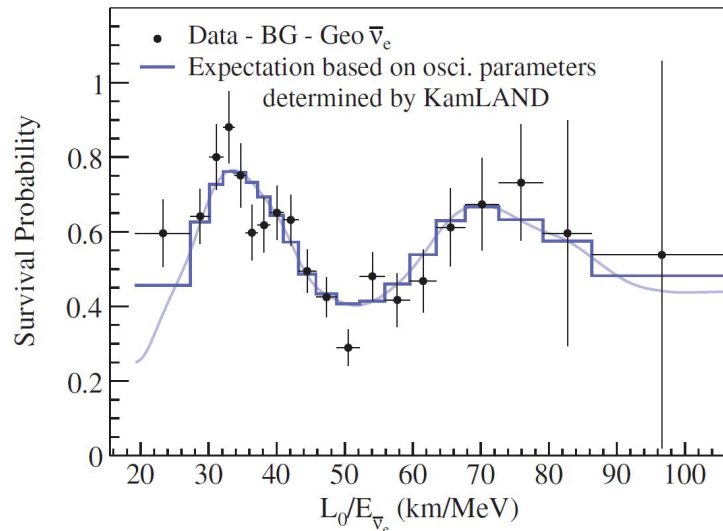


図 10. KamLAND 実験の結果 [26]。

これまで過去と現在の実験を見てきましたが、近い未来の実験として T2K 実験があります。KEK の北東 60 km ほどに位置する茨城県東海村に新しく建設された J-PARC 加速器によってニュートリノを生成し、SuperKamiokande に送るものです。検出器までの距離は K2K とさほど変わりませんが、強度ははるかに高いのです。T2K 実験は ν_e 出現の測定、つまり ν_μ が ν_e に変化するのを直接観測することを目指しています*5。この測定は、レプトンセクターでの CP の破れの大きさがどの程度可能かを予測するのに決定的に重要です*6。そしてこの CP の破れは宇宙の物質優勢の起源に示唆を与えると期待されます。

まとめますと、日本はフレーバー物理に対し重要な貢献をいくつもなしてきたと思います。これには、坂田学派のハドロン・レプトン両方のフレーバーに関する先駆的な研究、KEK Bファクトリーによる B メソン系の実験的研究、そして SuperKamiokande と KamLAND によるニュートリノ振動の観測が含まれます。私はこの発展の多くを目撃することができたことをとてもうれしく感じます。特に、B ファクトリー実験の同僚と一緒に仕事できたことは忘れられません。そして、益川博士との共同研究を通して、私もこの分野の進展に寄与できたことをとりわけ幸せに思っております。

*5 その後 2011 年に、T2K 実験は ν_e の出現を実際に観測した。なお、T2K は Tokai-to-Kamioka, K2K は KEK-to-Kamioka から来ている。

*6 ニュートリノと反ニュートリノの振動を比較することにより、CP 対称性の破れを探索することができる。T2K ではこの測定を行い、2020 年に CP の破れの兆候を見いだしている。

文献

1. G. 't Hooft, "Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields," *Nucl. Phys. B* **35**, 167 (1971); G. 't Hooft and M.J.G. Veltman, "Regularization and renormalization of gauge fields," *Nucl. Phys. B* **44**, 189 (1972).
2. M. Kobayashi and T. Maskawa, "CP violation in the renormalizable theory of weak interactions," *Prog. Theor. Phys.* **49**, 652 (1973).
3. S. Sakata, "On a composite model for the new particles," *Prog. Theor. Phys.* **16**, 686 (1956).
4. A. Gamba, R. E. Marshak, and S. Okubo, in Proceedings of the Ninth Conference on High Energy Nuclear Physics, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **45**, 881 (1959).
5. Z. Maki, M. Nakagawa, Y. Onuki, and S. Sakata, "A unified model for elementary particles," *Prog. Theor. Phys.* **23**, 1174 (1960).
6. G. Danby *et al.*, "Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos," *Phys. Rev. Lett.* **9**, 36 (1962).
7. Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, "Remarks on the unified model of elementary particles," *Prog. Theor. Phys.* **28**, 870 (1962).
8. Y. Katayama, K. Matumoto, S. Tanaka, and E. Yamada, "Possible unified models of elementary particles with two neutrinos," *Prog. Theor. Phys.* **28**, 675 (1962).
9. S. L. Glashow, J. Iliopoulos, and L. Maiani, "Weak interactions with lepton-hadron symmetry," *Phys. Rev. D* **2**, 1285 (1970).
10. K. Niu, E. Mikumo, and Y. Maeda, "A possible decay in flight of a new type particle," *Prog. Theor. Phys.* **46**, 1644 (1971).
11. S. Ogawa, 私信。
12. T. Hayashi, E. Kawai, M. Matsuda, S. Ogawa, and S. Shige-eda, "A possible interpretation of the new event in the cosmic ray experiment," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 280 (1972); M. Kobayashi, M. Nakagawa, and H. Nitto, "Quartet models based on fundamental particles with fractional charge," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 982 (1972); H. Kondo, Z. Maki, and T. Maskawa, "A note on the leptonic decays of charmed mesons," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 1060(L) (1972); Z. Maki, T. Maskawa, and I. Umemura, "Quartet scheme of hadrons in chiral $U(4) \otimes U(4)$," *Prog. Theor. Phys.* **47**, 1682 (1972).
13. S. Weinberg, "A model of leptons," *Phys. Rev. Lett.* **19**, 1264 (1967); A. Salam, "Weak and electromagnetic interactions," in Elementary Particle Theory, Proceedings of the 8th Nobel Symposium, Lerum, Sweden, 1968, edited by N. Svartholm (Almqvist and Wiksell, Stockholm, 1968), pp. 367–377; S. L. Glashow, "Partial symmetries of weak interactions," *Nucl. Phys.* **22**, 579 (1961).
14. J. H. Christensen, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, "Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson," *Phys. Rev. Lett.* **13**, 138 (1964).
15. J. J. Aubert *et al.*, "Experimental observation of a heavy particle J ," *Phys. Rev. Lett.* **33**, 1404 (1974); J. E. Augustin *et al.*, "Discovery of a narrow resonance in e^+e^- annihilation," *Phys. Rev. Lett.* **33**, 1406 (1974).
16. M. L. Perl *et al.*, "Evidence for anomalous lepton production in e^+e^- annihilation," *Phys. Rev. Lett.* **35**, 1489 (1975).
17. S. Pakvasa and H. Sugawara, "CP violation in six quark model," *Phys. Rev. D* **14**, 305 (1976).

18. J. Ellis, M. K. Gaillard, and D. V. Nanopoulos, “Left-handed currents and CP violation,” *Nucl. Phys. B* **109**, 213 (1976).
19. S. W. Herb *et al.*, “Observation of a dimuon resonance at 9.5 GeV in 400-GeV proton-nucleus collisions,” *Phys. Rev. Lett.* **39**, 252 (1977).
20. F. Abe *et al.* [CDF Collaboration], “Observation of top quark production in pp collisions,” *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2626 (1995) [arXiv:hep-ex/9503002]; S. Abachi *et al.* [D0 Collaboration], “Observation of the top quark,” *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2632 (1995) [arXiv:hep-ex/9503003].
21. A. B. Carter and A. I. Sanda, “ CP violation in B meson decays,” *Phys. Rev. D* **23**, 1567 (1981); I.I.Y. Bigi and A. I. Sanda, “Notes on the observability of CP violations in B decays,” *Nucl. Phys. B* **193**, 85 (1981).
22. B. Aubert *et al.* [BaBar Collaboration], “Measurement of the CP -violating asymmetry amplitude $\sin 2\beta$,” *Phys. Rev. Lett.* **89**, 201802 (2002) [arXiv:hep-ex/0207042]; K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Improved measurement of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system,” *Phys. Rev. D* **66**, 071102(R) (2002) [arXiv:hep-ex/0208025]. 【有意な非対称性の最初の観測は, B. Aubert *et al.* [BaBar Collaboration], “Observation of CP violation in the B^0 meson system,” *Phys. Rev. Lett.* **87**, 091801 (2001) [arXiv:hep-ex/0107013]; K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of large CP violation in the neutral B meson system,” *Phys. Rev. Lett.* **87**, 091802 (2001) [arXiv:hep-ex/0107061].】
23. J. Charles *et al.* [CKMfitter Group], “ CP violation and the CKM matrix: assessing the impact of the asymmetric B factories,” *Eur. Phys. J. C* **41**, 1 (2005). より新しい結果は <http://ckmfitter.in2p3.fr> を参照。【図 6 は O. Deschamps [CKMfitter Group], talk at 34th ICHEP, Philadelphia, 2008, arXiv:0810.3139 [hep-ex] にある (ただし角度の名称が異なる)。】
24. Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos,” *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562 (1998) [arXiv:hep-ex/9807003]. 【図 7 は J. Raaf, talk at Neutrino 2008 (<https://www.slac.stanford.edu/econf/C0805263/Slides/Raaf.pdf>) より。】
25. M. H. Ahn *et al.* [K2K Collaboration], “Indications of neutrino oscillation in a 250 km long baseline experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 041801 (2003) [arXiv:hep-ex/0212007]; M. H. Ahn *et al.* [K2K Collaboration], “Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment,” *Phys. Rev. D* **74**, 072003 (2006) [arXiv:hep-ex/0606032].
26. K. Eguchi *et al.* [KamLAND Collaboration], “First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 021802 (2003) [arXiv:hep-ex/0212021]; T. Araki *et al.* [KamLAND Collaboration], “Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion,” *Phys. Rev. Lett.* **94**, 081801 (2005) [arXiv:hep-ex/0406035]; 【図 10 は, S. Abe *et al.* [KamLAND Collaboration], “Precision measurement of neutrino oscillation parameters with KamLAND,” *Phys. Rev. Lett.* **100**, 221803 (2008) [arXiv:0801.4589 [hep-ex]] より。】

本記事は, “CP Violation and Flavor Mixing,” Nobel Lecture, December 8, 2008 by Makoto Kobayashi, in “Les Prix Nobel, The Nobel Prizes 2008,” published by Almqvist & Wiksell International, 2009, pp. 68–84 を, the Nobel Foundation と小林誠氏から許可をもらい, 日笠健一氏に翻訳していただいたものである。

素粒子論研究編集委員会

第II部

寄稿文：素粒子メダル受賞者

素粒子メダル創設の思い

東島 清

素粒子論グループは2000年度から会費制に移行しました。その2年ほど前から新素粒子論グループはいかにあるべきかの議論が始まり、新たに設けた素粒子論委員会のもとに5つのワーキンググループを作って具体案の検討を行いました。私は三田一郎さん、山口昌弘さん、米谷民明さんと一緒に賞WGを担当することになりました。

素粒子論懇談会やメールで寄せられた意見を元にWGでたたき台を作り、2000年3月の素粒子論懇談会に素案を提案しました。そこで、「素粒子メダル」および「素粒子メダル功労賞」を創設し、2000年度中に第一回目の授賞式を行うことになりました。メダルには素粒子論の生みの親である湯川秀樹さんの「素」という書をデザインしました。表彰状には、素粒子論の発展に重要な寄与をされた会員を、素粒子論グループ自らが顕彰することにより、現在は評価されなくても正しい研究を行っていれば必ず評価されるのだという信念を共有し、次世代の独創的研究を推奨する願いを込めました。

本当は、次世代を担う若手研究者を勇気づけるための「素粒子メダル奨励賞」を設ける予定でしたが、この時は将来の検討事項として先送りしました。その後、賞WGはじめ多くの人の尽力により、2006年度から素粒子メダル奨励賞が始まったのは大きな喜びでした。

素粒子論研究室を持つ大学はほんの一握りしかありません。ほとんどの素粒子論研究者は周りに同じ分野の人のいない環境で、一般教養としての物理や数学などを教えながら研究を続けています。近年、若手研究者・中小大学研究者を取り巻く環境はますます厳しさを増しています。任期付きのポストにいる多くの方は、任期が近づくとあらゆる所に応募して、むなしく不採用の通知を受け取った経験があると思います。この賞はそんな環境にある多くの研究者にとって、本人の励みになるだけでなく、素粒子について全く理解しない人に評価してもらおうきっかけにもなるでしょう。

誰も知らない素粒子メダルに格をつけるために、当面、歴史的業績を上げられた先輩達に貰っていただきましたが、本当は若い方々を応援するのが目的でした。そろそろ「当面」を外し、中堅研究者が受賞できる素粒子メダルになって欲しいと願っています。

最後に、年に数個では利益もないのに、意気を感じて湯川秀樹の書の入ったメダル制作を引き受けて下さった、西宮市の山文マーク工芸の故佐々木多摩枝さん、そして新素粒子論グループ発足に指導的役割を果たされ、昨年お亡くなりになった故坂井典佑氏に深く感謝するとともにご冥福をお祈りします。

断想 くりこみ理論研究の頃

亀淵 迪

私が素粒子論研究の途に入ったのは1949年4月、旧制大学の3年生（最終学年）として名古屋の坂田（昌一）研究室（以下E研）に配属された時である。この年の秋には湯川秀樹先生のノーベル賞受賞が報じられ、先立つ戦時中の1943年には朝永振一郎先生によって“超多時間理論”が提出されていた——周知のように、この理論の最大の成果が“くりこみ理論”である。まさにわが国の素粒子論が世界をリードしていた時代であった。このような状況下で、自然と私はくりこみ理論を中心とした場の量子論を自らの研究テーマに選んだ。以下の小文では1950年前後における自らの体験を、思い出すまに認^{したた}めてみたい。大先生の名前が頻出するかと思うが、敬稱などは一切省略する。

くりこみ理論の成立には湯川・坂田の寄与があった

上記の事情については、世上、あまり知られていないと思うので、私の断想をここから始めよう、まず湯川について。朝永超多時間理論最初の論文は、正しくその冒頭に、湯川の“マルの話”が引用されている。1942年ころからの湯川は、事あるごとに、この話を持ち出していたという。場の量子論を根本的に変革するための方策として、場の定義を世界点ではなく、四次元的な拡がりを持った微小領域で置き換えたらという提案である。“マル”とはこのような領域に対する、言わばロゴマークである。まことに遠大な構想であるが、如何に定式化するかは大問題である。しかし、このことを真剣に考えたのが朝永であり、マルを“空飛ぶ円盤型”（渡辺慧の用語）に置き換えた。すなわち、円盤の上面と下面を微小な space-like な面にすることにより、場の理論を明白にローレンツ共変的な形に書き直せることに気付いたのだった——超多時間理論の誕生である。

それまでは、むしろ“現象論屋”であった朝永をして、“場の理論屋”へと転向せしめたのは、湯川のマルがあったればこそ、と私は考えたい。

次は坂田の寄与である。くりこみ理論以前の量子電磁力学（以下QED）は、何を計算しても、その輻射補正が無限大になるという全くの混乱状態にあった。しかし無限大の一部が質量型であることを朝永に示唆したのは、当時坂田が提唱していた“C中間子論”であった：電子は電磁場と同時に、質量をもった中性スカラー場とも、結合定数 f でもって相互作用していると考え。この場合、電子の自己エネルギーは、もし $f^2 = 2e^2$ ならば、二つの場からの発散項が相殺して有限になる。この事実は、結果的に、発散項に関する限り、“C中間子は電子に対して質量くりこみの役割を代行する”と解してよい。

予てより電子のクーロン場による弾性散乱の補正に現れる発散項が、電子の自己エネルギーに現れる発散項に似ていると感じていた朝永は、電子の弾性散乱をC中間子論で計算することを思い立つ——staticではなくdynamicalな場合にも、 $f^2 = 2e^2$ ならば、C中間子は上記と同様な役割を代行するだろうと期待して。いろいろと紆余曲折はあったが、予想どおり、1947年の歳末までに、“弾性散乱に対する輻射補正中の発散項は、電子の質量にくりこめる”ことを確認する。そのためのProg. Theor. Phys.へのレターの受け付け日が1947年12月30日となったのは幸いであった。と言うのも、当時は知る由もなかったが、ライバルの米国でもH. W. LewisとS. T. Epsteinが同年11月下旬に、同様な主旨のレターをPhys. Rev.に提出していたからである。もし坂田のC中間子論がなかったなら、朝永のくりこみ理論到達は、たとい可能だった

としても、かなり遅れたのではなからうか。

私の言う湯川・坂田の寄与とは、このようなものであった。

くりこみ可能性をめぐる

E 研での卒論として、私は Fermi 相互作用のくりこみ可能性を調べ、摂動の高次に進むにつれ新しい形の発散項が次々と現れるので、結局くりこみは不可能だと結論した。この事があったので、卒業後もくりこみ理論を中心にして研究を続け、くりこみに関する論文はすべて読むことにしていた。中でも F. J. Dyson の二論文は、この理論の本質を解明したもので、非常に有益であった。

とこうするうちに、1951 年、Phys. Rev. に A. Petermann と E. C. G. Stueckelberg のレター “Restrictions of Possible Interactions in Quantum Electrodynamics” が現れた。ここでの議論は QED のみならず、一般の場合にも拡張できると考えた私は、殆ど徹夜でいろいろと調べてみた。Dyson 論文を熟読していたので仕事は捗った。到達した結論は、“Petermann らの restrictions とは、くりこみ可能性に対する必要条件であるが、少なくともスピンの 0, 1/2, 1 の場よりなる系に対しては、それはまた十分条件でもあり、つまりはくりこみ可能性の判別条件でもある” であった (この結論は、勿論、対称性やその破れ等々の現れる以前の、初期的場の理論の枠内でのものである)。従ってこの条件を基に、場の相互作用一般を “くりこみ可能なもの” と “不可能なもの” とに分類できることも分かった。

この結果に興奮した私は、翌朝早々に梅沢 (博臣) の下宿を訪ねて報告した。彼はしばしば私の計算を眺めていたが、紙片に小さな計算をした後に口を開いた: 「君のこの分類は W. Heisenberg の分類と同じだよ」と。これには驚いた。要するに私は相互作用の演算子部分の次元に着目していたのに対し、梅沢は結合定数の次元に着目したのであった。

因みに Heisenberg の分類についての 1939 年の論文を、私たちは坂田教授の書棚にあった謄写版^{とうしや}刷りで読んでいたのであった。彼は相互作用定数の次元を $[L^n]$ と書くとき、 $\eta = 0$ の相互作用を “第 1 種”、 $\eta \geq 1$ のものを “第 2 種” とし、その摂動項の高エネルギーでの振舞が第 1 種では緩やかだが、第 2 種では急激になるとした。他方、くりこみ可能性の判定条件を η で表せば $\eta \leq 0$ がくりこみ可能に、 $\eta \geq 1$ がくりこみ不可能に対応する。場の量子論では、 $\eta \leq 0$ として、 $\eta = 0$ と $\eta = -1$ とが可能であり、とくに後者に対しては (擬) スカラー場 ϕ の 3 乗項 $f\phi\phi'\phi''$ (ϕ 's は同種でなくても可) のみが許される: この場合は “super-renormalizable” と言われ、発散項は摂動の 2 次までで、それを繰り込んでおけば、3 次以上ではすべて有限となる。Heisenberg はこの場合を見落としていた。

当日の午後、私たちは坂田教授にこの結果を報告したところ非常に喜ばれた。以後この仕事は梅沢と私の共同研究となり、いろいろと議論の精密化に務めた。梅沢の主要な寄与は、スピンの 1 より大きい場合への拡張であり、そのための方法を^{コンジェクチャー} 予想したことである。発表する論文には、しかし、坂田教授が自らの “相互作用の構造” についての哲学を序文に入れたいと強く主張し、結局三者の共著となった (お陰でこの論文はしばしば “坂田・梅沢の研究” として引用される)。

後年、梅沢が初めて Heisenberg に会ったとき、彼はこの論文に言及し、非常に喜んでいたという。梅沢の感想では 「Heisenberg は自らに先見の明があったと感じたからではなからうか」とのこと。

くりこみ可能性を素粒子論の基礎とすること

上記の仕事の直後、私は理論を QED 並みにくりこみ可能とするため、その手始め

として Fermi 相互作用 ($\eta = 2$) をくりこみ可能にすることを試みた。スピノール場 ψ の対 ($\bar{\psi}\psi$) の 2 個を (擬) スカラー場で結べばよい。対の作り方をいろいろと変え、結果を Fierz の公式を使って Fermi 相互作用の形に戻せばよい。この考えを坂田教授に話したところ、教授の曰く：「そういう模型はすでに谷川 (安孝) さんがやっている。しかし、くりこみ可能性を理論の基礎とすることには大反対である。そもそもくりこみ法とは、人間側の考え出した計算上の便法に過ぎず、自然の本質を表わすものではない。われわれの現在なすべきことは、むしろ、第 2 種相互作用の研究にある」と。教授の厳しい言葉と激しい気迫に圧倒されたあわれな院生 (旧制) は、この問題の追求を断念した。しかし現在の私なら、おそらく次のように反論したであろう：「物理理論の内容は自然に従わねばならないが、その形式は人間側が決めるものであり、自由である」と。

周知のように、歴史は坂田教授ではなく、まったく逆の方向に進んだ。1955 年には H. Bethe らが教科書 “Mesons and Fields” で私と同じ考えを主張し、下って現在の “標準模型” では、くりこみ可能性が理論の基礎的要請の一つとなっている。もし坂田が生存ならば、こうした状況をどのように観るであろうか。自らの考えは標準模型を超える際に有効となる、とでも言うであろうか。

昨年私は 3 か月にわたってベルリンの科学史家 A. Blum と、1950 年代の場の理論について議論する機会を持った。彼に上記の出来事を話したところ、彼の言うには、「すると、くりこみ可能性を理論の基礎とする考えは、あなたが初めて提唱したことになる。発表された論文はなくても下書きでもよい、何かあったら送ってほしい」と：自分では思ってもみななかったことだが、そう言えばそうなるか。しかし最初に書き下した式は覚えているが、それについて書いたものは何も残されていない。誰が何と言おうと、自分の考えは徹底的に追求すべきであった、と今にして思う。

近似によらないくりこみ法について

朝永は 1949 年から 1 年間、プリンストンの “高級研究所” に滞在したが、1950 年 1 月 10 日付で坂田に手紙を書いている (本誌 vol. 2, no. 1, p. 196 に掲載)[†]。当時 W. Pauli も研究所に来ており、セミナーで「荷電くりこみの $\delta e < 0$ ($e = |e|$) は近似ではなく、一般に成立するのではないか。何か Lenz の法則のようなものが存在するのでは」といった話をし、ながながと議論が続いた、とある。この手紙については、E 研セミナーで坂田教授から知らされていたが、さしたる影響は受けず心には残らなかったように思う。しかし結果的にはこの Pauli 問題に取り組むこととなる。

当時、もっぱら私の念頭を占めていたのは、Lenz などではなく直近の諸事実であった：すなわち (1) 真空偏極を起こす荷電粒子のスピンが 0, 1/2, 1 の場合、摂動の 2 次における誘起電流 $\delta j_\mu(x)$ が同一の公式 (梅沢・河辺六男による) に纏められ、 $\delta e < 0$ が示される；(2) スピンが 3/2 の場合にも摂動の 2 次で $\delta e < 0$ となる；(3) スピンが 1/2 の場合、摂動の 4 次でも $\delta e < 0$ となる。これらの事実から私は、 $\delta j_\mu(x)$ に対して (1) のような公式が一般的に成立するのではと感じていた。

1951 年の 2 学期、朝永ゼミに出席するため梅沢と私は東京に内地留学したが、その上京の車中で私は梅沢に上のような予想を伝えた。すると彼は紙片を取り出して式を書き始め、私は横からそれを眺め、いろいろと口出しをしていた。当時の東海道線は名

[†] 戦後の日本では生活困窮の中にありながらも人々は研究を続けていた。他方逸早く渡米した湯川らは生活のことなど気にせず研究に専念できる境遇を有難く思い、何か日本に居る人たちを助けられないかと考えた。その一環として新しい情報を次々と日本へ知らせ、これが『素粒子論研究』の “海外通信” 欄に転載された (上記はその一例)。情動的には世界から孤立していたので、この欄はまことに貴重な情報源であった。

古屋・東京間に限っても全線電化はされておらず、急行に乗っても東京まで4、5時間は掛かったのではと記憶する。そのため議論には充分の時間があり、東京に着くまでに公式導出の荒筋が出来上った。あとはその彫琢であり、東京滞在中の仕事が決った。

議論の要点を述べれば、ローレンツ・ゲージ・荷電共役の変換の下での不変性を用いて、Heisenberg 表示の演算子に対しても、上記(1)と類似の式が導かれたのである。議論の途中で、いわゆる“線型応答の公式”(後に“久保公式”と呼ばれる)や“スペクトル表示”(後に Lehmann 表示と呼ばれる)の技法を用いている。

われわれの公式は、外部電流 $j_\mu(x)^{(\text{ext})}$ を用い d'Alembertian \square で展開すると

$$\delta j_\mu(x) = \sum_{n=0,1,2,\dots} a_{n+1} \square^n j_\mu(x)^{(\text{ext})}, \quad \text{ただしすべての } a_n < 0 \quad (n = 1, 2, \dots)$$

となる。とくに第一項は荷電くりこみ項であり、 $a_1 < 0$ より $\delta e < 0$ が確認される。この事情は電磁場のくりこみ定数 Z_3 を用いれば $0 < Z_3 < 1$ となり、これは後に Lehmann によっても導出されている。

東京から名古屋に帰り、早速この仕事をレターに纏め、Phys. Rev. に送ったところ、次のような査読者のコメントと共に返却されて来た:「何ら計算することなしに、こんな結論が得られるとは到底思えない」と。査読者の言う計算とは、当時世界を風靡していた Feynman-Dyson 式近似計算のことと思われる。そこで私たちは本論文を書いて Prog. Theor. Phys. に投稿し、これは受理された。^{††}

この論文は日本では余り注目されなかったが、米国では A. S. Wightman や A. Pais、欧州では G. Källén が評価してくれた。とくに Wightman は“公理的場の理論の嚆矢”^{こうし} と言い、Källén は事ある毎にこの論文を引用・言及してくれた。

Pauli 問題を日本に紹介した朝永が、その解答論文を読んではいなかったという事実を証明して、小文の結びとする。1967年10月の第14回 Solvay 会議“素粒子物理学の基礎的諸問題”で Källén が講演し、例によって私たちの論文に言及した。講演後、朝永が傍らの梅沢に「あんたらはその論文で、いったい何をやったのか」と尋ねたという—— QED 問題は QED (証明終わり)。

これをもって私の断想を終える。文献など詳細に関しては拙著『素粒子論の始まり——湯川・朝永・坂田を中心に』日本評論社(2018);『科学』92, p. 685 (2022)を参照されたい。

(2022.11.21)

^{††} 当時は一仕事終わると、まずそれを『素粒子論研究』に投稿して一般の反応を待ち、それに応じて英文論文を書き Progress に送るのが普通であった。

素粒子メダル受賞の思い出

牟田泰三（広島大学名誉教授、福山大学理事、広島リカレント学院長）

第3回 (2002年度) 素粒子メダル：

QCD 理論における繰り込み処方 (MS bar scheme) の研究

対象論文：

W.A. Bardeen, A.J. Buras, D.W. Duke and T. Muta

Deep Inelastic Scattering beyond the Leading Order in Asymptotically Free Gauge Theories

Phys. Rev. Vol. D18 (1978) No.11 3998-4017

研究内容：

量子色力学の高次効果の世界最初の計算及びその結果のニュートリノ散乱実験による検証、繰り込み処方依存性の発見、MS bar スキームの提唱

本文：

1977年秋のことです。当時、京都大学基礎物理学研究所助教授だった私は、飛行機でシカゴまで行き、レンタカーを借りて Fermilab にたどり着きました。共同研究のため1年間滞在することになったのです。Fermilab 理論部の当時の主任は Chris Quigg 教授でした。彼に挨拶をして、他の所員達 (W.A.Bardeen、A.J.Buras など) とともに挨拶を交わしました。当時の所長は J.D.Bjorken でした。

Buras は当時ポストドクとして Fermilab にいたのですが、彼とは、以前にルーバン (ベルギー) の夏の学校で一緒だったこともあり、旧知の仲でした。そんなわけで、旧交を温めることになり、部屋が隣同士であったこともあり、毎日顔を合わせて話し合うようになりました。

そのころ、私がセミナーで話すことになり、当時話題となっていた dimensional regularization について話しました。すると、セミナーのあとで、Buras が「自分も今 dimensional regularization を使って摂動計算をやり直しているけど、カットオフの計算と違って慣れないんだよね。」と言ってきました。「そうだよ。でも、カットオフに比べるとすごくスマートで、何か次元を超えた気分になるよ。」と談笑しました。これがきっかけとなり、しばしば彼と摂動の高次効果について語り合うようになりました。

ある日のこと、エール大学のグループと CERN のグループが QCD (Quantum Chromodynamics. 量子色力学) の高次効果の計算を始めたらしいというニュースが飛び込んできました。当時はまだ QCD が確立したとまでは言えない状況でした。だから、QCD の予言が何処まで実験的に確認できるかどうかを調べるのは重要なことでした。その中でも、2ループ以上の効果まで計算して、QCD の場の量子論としての特性を調べることができれば、世界のトップを走ることが出来ると考えられました。

QCD には漸近的自由性があるので、近距離現象と見なすことが出来る実験データに対しては、摂動計算を適用することが出来ます。繰り込み群で改良された高次効果を調べてみたいと考えていた矢先でもあり、早速 Buras と深非弾性レプトン-ハドロン散乱に対する高次効果の計算を始めることにしました。

計算は至極順調に進み、秋も深まった頃には予定した計算のほとんどが完了しました。丁度その頃、エール大学のグループが行った計算結果が手に入ったので、我々の結果と比較してみたら、愕然としました。結果が全く合わないのです。Fermilab 二階の廊下を歩きつ戻りつしながら黒板の前で Buras と激論を交わすけど、その原因がどうしても分かりません。もう一週間は経ったでしょうか。年末も近づいてきました。

そんな二人を気遣ってくれたのか、ある朝 Bardeen が「何を騒いでるんだ。」と議論に加わってきました。そこで状況を説明すると「ふーん」と考え込んでいます。翌朝のことです。朝早くから出勤している Bardeen は「君たちの繰り込み処方は何なの？」と聞いてきました。私たちは勿論 dimensional regularization を使っているので MS-scheme (minimal subtraction-scheme) です。すなわち、時空の次元を D としたとき、発散部分を $1/(4-D)$ として抜き出します。

調べてみたら、エール大学のグループはカットオフ法で計算し、無限大を off-shell 引き算で繰り込んでいます。彼らと我々では、繰り込み処方が違っていています。しかし、どんな繰り込み処方で計算しようと、物理的結果、例えば微分断面積のような物理量、は同じ答えになるはずで。実際、これまでに、one-loop レベルで計算された例では、どんな繰り込み処方で計算しても皆答えは一致しています。だから「エール大のグループか我々のどちらかがやはり間違っているんだろうか」と思ったのですが、待てよ「摂動計算という近似法では、繰り込み処方によって答えが違っていてもいいのではないだろうか」と気がつきました。one-loop レベルで繰り込み処方に依存しなかったのは「たまたま」であって、「2-loop 以上では繰り込み処方依存が顔を出すのだ」とやっと気がついて、気分爽快となり、自分らの計算結果に確信が持てるようになりました。その頃、シカゴ大学の大学院学生 Duke も議論に加わり、コンピュータが得意だった彼は、我々の結果を実験データと比較するプログラムを作ってくれました。

タイミングよく CERN の実験グループがニュートリノと核子の深非弾性散乱実験結果

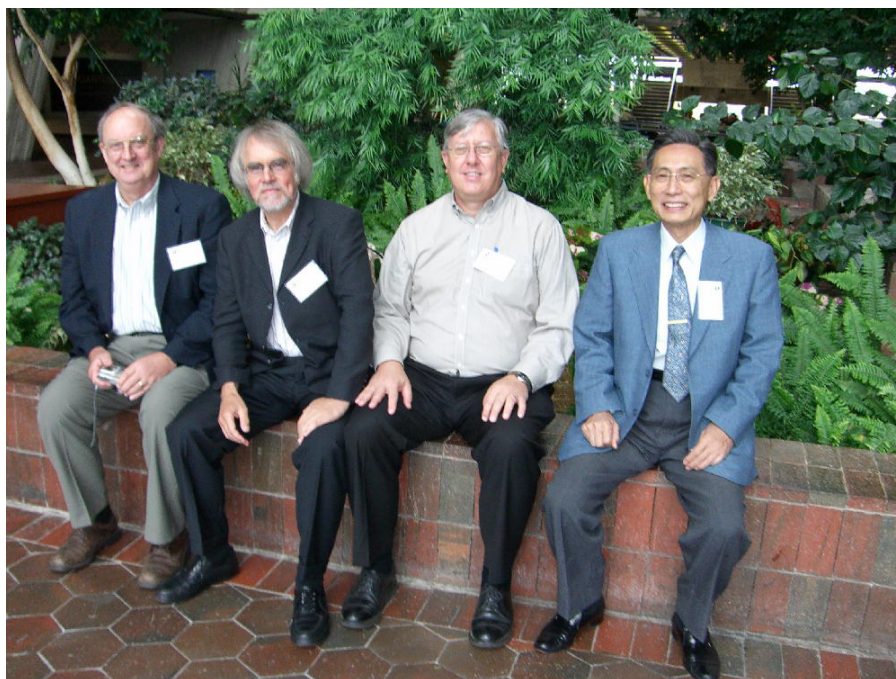
を公表しました。そこで、私たちの結果を比較しようとして、計算結果を眺めていたら、繰り込み処方として我々が採用している MS-scheme では、発散項 $1/(4-D)$ のみを取り除くので、発散項に付随して出てくる余分な項が摂動の収束性を悪くしていることに気づき、繰り込みをするときに発散項と一緒にこの余分な項も取り除く処方を導入した方がいいということに気づきました。そこで、この新しい繰り込み処方を仮に MS bar-scheme と名付けて、我々の結果と実験データとを比較することにしました。Duke はこれを一晩で仕上げてきました。その朝我々は実験結果と見事に一致するグラフを見て感動しました。

このあと我々の共同研究をプレプリントとして公表すると、実験の人たちも、理論の人たちも、参照するようになり、MS bar-scheme という言葉が、あれよあれよという間に一人歩きし始めて、定着してしまったのには驚きました。引用度数もどんどん増えて、もう 1700 を超えているようです。

1978 年夏に、私は帰国の途中で、スタンフォード加速器センターに立ち寄り、セミナートークをしました。このセミナーには沢山の人が集まり、部屋からあふれるほどでした。また、その年に東京で開かれた高エネルギー物理学国際会議でも講演することが出来ました。

写真説明:

共同研究者達（共同研究から 28 年経った 2005 年に Fermilab で再会し私のカメラで撮った写真、左から Bardeen, Buras, Duke, Muta、この 4 人の中では私が最年長なのに若く見えてしまう。日本人は損だな。）



「素粒子論研究」に投稿し続けて 2/3 世紀

中西 襄*

「素粒子論研究」発刊 75 周年の記念号が発刊されるとのこと。まずはお祝詞を申し上げます。素粒子メダル受賞関連の記事をとのことだったが、B 場に関しては西島先生の退官記念の際の講演記録「B 場導入の背景」が素粒子論研究 81, 164 (1990.6) に載っているのので、ここでは素粒子論研究に投稿した記事を全般的に振り返ってみたい。

素粒子論研究（以下、素研と略す）にはじめて投稿したのは 66 年前の 1956 年のことであった。それから一時的に途切れることはあっても、ずっと今日に至るまで素研に投稿し続けてきた。レフェリーがいないことをいいことに、ずいぶん言いたい放題をしてきたものである。研究会報告や海外通信のようなものは除外して、独立した記事は、プリント版 33 本、電子版 8 本である。ここでは、そのうち特にいくつかの記事を選んで紹介したい。（以下敬称略）

はじめの頃の素研への投稿は、正式論文を Progress に投稿する前の準備段階であった。英訳して、秘書にタイプを依頼する価値があるか、見て頂くためである。

素粒子論研究 12, 217 (1956.7)

任意次数摂動項の一般積分公式及び Power-Counting Theorem の証明

1949 年 Feynman と Dyson の一連の論文が現れ、QED の摂動展開による S 行列の一般項を共変的に計算し、くりこみを行なえることが明らかにされた。しかし、紫外発散の有無を判定する Dyson の次数勘定定理の証明は、数学的に正当といえるものではなかった。そこで Feynman のパラメーター積分公式を一般化して、一般の Feynman 積分を Feynman パラメーター積分の形で定義することを考えた。その結果、積分運動量の選択の仕方などに依存しないパラメーター積

* 京都大学（数理解析研究所）名誉教授.

分の一般公式を与えることに成功した。Feynman ダイアグラムのトポロジカルな構造自体から直ちに書き下せるので、のちに「位相公式」と呼ばれるようになった。そして紫外発散に関しては、運動量依存の因子 V とは別の、Feynman パラメーターのみの関数 U の原点付近の挙動のみで決まることが分かり、厳密な証明を与えることができた。¹⁾

なお、この公式は、のちに摂動論における解析性の研究のさいに役立った。また高次積分の実際計算にも応用された。

素粒子論研究 15, 344 (1957.8)

赤外発散の一般理論

赤外発散は摂動の各次数でキャンセルする。²⁾ これは S 行列のユニタリー性の結果ではない。ソフト光子 ($|k_\mu|$ の各成分が無小とみなせる光子で、軟光子と訳した) は、いくらでも生成されるからである。

なぜ QED で常に遷移確率での赤外発散がキャンセルするかを証明するには、その起こる機構の分析から始めることが必要である。

ソフト光子の極の位数は 2 で、 k_μ 積分は 4 重だから、これだけでは発散は起こらない。電子の外線とソフト光子の頂点のみで順次隣り合っている内線は、 $k_\mu = 0$ で 1 位の極をもち、そういう内線がソフト光子 1 個当り最大で 2 本あることにより対数発散する。この事情はソフト光子の個数が多くなっても全体がその個数倍されるだけで同じである。

遷移確率の計算では S の Feynman ダイアグラムの終状態の外線と S^\dagger の初期状態の外線とを接続して考えることになるが、さらに S の初期状態と S^\dagger の終状態をも接続したものを考えると便利である。これを K ダイアグラム³⁾ と名付けた。 K ダイアグラムでは電子線はすべてループを形づくるが、そのうち外線とソフト光子だけを隔てている電子線の全体を本質的外線と呼ぶ。

以上の準備のもとに結果を述べると、1 つの K ダイアグラムは本質的外線中の位置の相異により、いくつかの Feynman ダイアグラムのペアに対応する。つ

1) n 個の Feynman パラメーターをその大小により $n!$ 個の部分（「Hepp sector」と呼ぶ人もいる）に分けて U の下界を与える方法での厳密証明は発表が遅れて 1961 年の論文に書いたが、それでも Hepp の論文より 3 年くらい前のことである。

2) 実際、Coulomb 前方散乱の振幅は 2 次発散で、現実に存在する。

3) K は、このやり方の先駆的論文（頂点部分の最低次の補正）を書いた木下に敬意を表してであるが、彼自身は K ダイアグラムの導入には至らなかった。なお、筆者の仕事以前には、2 個以上のソフト光子がからむオーバーラッピング発散は知られていなかった。

まり 1 つの K ダイアグラムの初期状態及び終状態でカットしたものは、 S の Feynman ダイアグラムと S^\dagger の (一般には相異なる) Feynman ダイアグラムとのペアのいくつかのセットを得る。定理の述べる所は、これらのセットのペアを足し合わせれば、考えているソフト光子の積分の赤外発散は消失する事である。従って遷移確率における摂動論の一定次数までの計算で赤外発散は消える。無限個のソフト光子を考慮する必要はない。つまり光子に質量を導入するカットオフ計算が OK である。

ソフト光子は全く観測されないので、このキャンセルのメカニズムは微分断面積に対して成立する。有名な Yennie et al. の論文で全断面積に対するものと誤解されて残念だった。

素粒子論研究 16, 164 (1957.11)

崩壊確率の計算について

素粒子の崩壊確率は、Feynman ダイアグラムを使って計算するが、 S 行列要素を正確に求めれば 0 になる。これはどうしてかの疑問に答えたものである。不安定粒子が初期状態に存在するはずはないので、粒子の生成から考える必要がある。そして答えは、崩壊確率の計算は崩壊相互作用の最低次のみでストップせよということである。

素粒子論研究 17, 153 (1958.4)

着物を着た不安定粒子

「着物を着た」とは「はだかではない」すなわち高次補正を考慮したという意味である。不安定粒子の正確なプロパゲーターの分母は、自由場のそれに既約な自己エネルギーを付け加えたもので与えられる。それで分母の零点で不安定粒子の質量を定義してもよいであろう。それは複素数で虚部は共鳴状態の半値幅を与えるはずである。ところが実際にプロパゲーターを複素平面に解析接続してみると、そんな極は存在しない。それは梅沢-亀淵-Källén-Lehmann 表示が成立することから当然であった。そこで荒木 et al. は、物理的リーマン・シートではなく実軸上に現れるカット即ち分岐切断線 (散乱状態のエネルギースペクトルに対応する) を下へ少し曲げて非物理的 (あるいは第 2) リーマン・シートで期待される複素極があることを見つけた。

そこで、その複素質量を用いて不安定粒子の状態を定義することが考えられる。しかしそれではハミルトニアン「近似的」固有状態として期待される性

質を持たない。その原因はもちろんその複素値の極が物理的リーマン・シート上にないという情報を取り込んでいないからである。この情報を取り込むためには、シュヴァルツの超関数の概念を拡張する必要があることに気付いた。シュヴァルツの超関数は実数値の超関数で無限回微分可能なテスト関数をかけて積分したものとして — 数学的には線形汎関数として — 定義される。そこで、テスト関数を正則関数にとり、積分路を複素平面上の曲線に拡張する。つまり複素平面上の極まで考慮した線形汎関数を考える。これを「複素超関数」と名付けた。⁴⁾

この超関数を用いると、正しくハミルトニアンの固有状態が得られる。ただしノルムは 0 になる。それは当然で散乱状態だけで完全系をなすからである。そこで、複素デルタ関数を実数関数で「近似」してやると、都合のよい近似的不安定粒子状態が得られることが分かる。

不安定粒子の中間状態を実数値の質量をもつプロパゲーターで近似すると赤外発散に似たニセの発散が出てしまうから、正しく複素質量のプロパゲーターを用いるべきである。

素粒子論研究 18, 213 (1958.11)

分散公式の摂動論的証明

分散公式 (dispersion relation) が素粒子物理でも成立するという事実は、衝撃的な発見だった。これにより摂動論が役立たない強い相互作用による反応にも使える、近似なしの理論式が得られたわけだ (実験データの不足による誤差を除く)。直ちに、多変数解析関数論など用いた分散公式の公理的証明が行なわれたが、肝心の核子-核子散乱や核子の頂点部分の分散公式の証明はできなかった。そこで、公理論で使った前提 (ノルムの正值性を除く) をすべて満たす具体例として摂動論の 3 角形ダイアグラムが分析された。その結果、Karplus et al.、Oehme、南部は異常しきい値の存在を発見する。ここに異常しきい値とは新しいチャンネルが開ける値とは無関係な特異点である。

そこで筆者は、以前に見つけた摂動の一般項の積分公式に基づいて関数 V のサポートを調べ、核子-核子散乱や核子の頂点部分などの分散公式の摂動論的証明を与えた。

4) 同じ頃、数学者の佐藤も同様のものを考え「解析的超関数」と呼んだ由であるが、文献は何も残っていない。佐藤超関数 (hyperfunction) はその後の研究によるもの。

また一方で摂動の一般項の特異点に関する一般論を展開した。1959年 Kiev⁵⁾で開かれたロチェスター会議で、Landau がとび入り特別講演を行ない、摂動の一般項の解析関数としての特異点を与える見事な方程式系を発表した。このとき湯川が日本でも Nakanishi が同様の研究を行なった旨、コメントした由である。

素粒子論研究 21, 250 (1960.2)

摂動論における解析性について

これは上記の仕事を含めた摂動論における解析性の総合報告である。

1961年9月から筆者はアメリカに行ったが、海外通信(湯川宛)が素研に転載された。それ以外は帰国してからも、ずっと素研へは御無沙汰(18年間)した。ただし研究会報告はしている。

素研に再び投稿するようになったのは1978年のことである。九後・小嶋理論が出て、それを重力場へ拡張する仕事のレビューを載せた。

素粒子論研究 56, 185 (1978.2)

ヤン・ミルズ場と重力場の不定計量の場の量子論

筆者は Bethe-Salpeter 方程式で負ノルムの束縛状態を発見(1965年)して以来、ずっと不定計量の場の量子論に興味をもってきた。この総合報告は量子アインシュタイン重力建設の出発点といえる。

以下、素研に投稿した論説のうち、いくつか面白そうなものを拾っていこう。素研への投稿は研究会報告がメインで、それらをいちいちフォローはしない。

素粒子論研究 60, 131 (1979.12)

アインシュタイン理論とディラック理論の融合

ディラック理論はローレンツ群のスピンル表現に基づくもので、一般線形変換に拡張することはできない。それゆえ1930年代から、ガンマ行列を4脚場を使って一般共変化したディラック理論が提起されていた。この理論ではディラック場はスカラー場になる。どうして素粒子物理でディラック場がスピノル場に化けるのかは半世紀来の謎であった。

5) 現在はウクライナ領だが当時はソ連領。

筆者は量子アインシュタイン重力の枠組でこの問題をすっきりと解決した。自発的対称性の破れのおかげで、時空対称性と内部対称性とを融合する二次的対称性として素粒子物理におけるローレンツ対称性が出現するのである。この結果、素粒子物理におけるローレンツ対称性は基本的対称性ではないことが分かった。

筆者はこの結果は極めて重要なことだと信じているが、量子重力の専門家からはどうもあまり評価されていないようだ。(すぐに評価してくれたのは雑誌の「数理科学」だった。)

素粒子論研究 68, 139 (1984.1)

超宇宙仮説

宇宙の平坦性とバリオン数が 0 でないことを説明するための仮説である。超宇宙の中のバリオン数のゆらぎが我々の宇宙にたまたま取り込まれたと考えるわけだ。

筆者がこれを書いてしばらく後、宇宙論でエア・シャワーのような宇宙が次々と生まれる話が流行するようになった。(もちろんこの論説とは無関係。)

素粒子論研究 72, 345 (1986.3)

スーパーストリング病に関する所見

これは当時流行し始めたスーパーストリング理論に対するジョーク・ペーパーである。発表後、直ちに雑誌「パリティ」から同様なものと執筆依頼があった。さらに青山の英訳版が世界中を駆けめぐり、CERN の“Courier” にまで無断掲載された。このあとしばらくジョーク・ペーパーのプレプリがよく送られてきた。

素粒子論研究 81, 164 (1986.6)

B 場形式導入の背景

西島退官の記念講演の記録である。電磁場 $A_\mu(x)$ の量子化にさいして B 場 $B(x)$ の導入の必要性を強調した筆者の 1966 年の論文⁶⁾ とその後の B 場の活躍についてレビューした。赤外発散のカットオフに光子質量を導入することが正当化されるためには、ゼロでない質量をもつベクトル場理論とスムーズにつながらなくてはならない。しかし、それなら質量ゼロの極限でなぜ縦波が突然観測で

6) N. Nakanishi, Prog. Theo. Phys. **35**, 1111(1966).

きなくなるのか? Bethe-Salpeter 方程式の束縛状態についてこの問題を解決した筆者は、電磁場でも同様であるべきと推論したのである。

素粒子論研究 100, 95 (1999.11)

素粒子論における 10 の迷信

素粒子論の業界で広く信じられている命題で、筆者がそれは正当ではないと主張していることを 10 個選んで述べたものである。いわば筆者の日頃からのうつぶんのぶちまけみたいなものである。この論説を書いたから 20 年以上経ったがそれを書いた気持ちは今でも全く変わらない。

素粒子論研究 100, 167 (1999.12)

T* 積の怪 — 共変的摂動論 経路積分法による計算の落とし穴 —

T 積と T* 積の区別についてよく知らない素粒子屋 — 著名人を含めて — が多い。T 積とは時間順序積で、その言葉通り場の量の積を時間順序毎に並べ変えたものの全体である。従って時間座標の差の θ 関数を含む。それゆえ時空偏微分 $\partial/\partial x^\mu$ をほどこせば、当然、(一般には) ローレンツ共変性が破れる。そこで T 積の真空期待値を考えるさい、先に真空期待値をとって、あとから $\partial/\partial x^\mu$ をほどこすことにすれば共変性は破れない。これを T* 積と呼ぶ。T* 積ではすべてが明白に共変なので計算が簡単になる。共変的摂動論やその母関数である経路積分では、すべて T* 積を扱っている。

ところが T* 積では、場の方程式は $\partial/\partial x^\mu$ を含むので、一般に満たされなくなる。保存量のネーター・カレントを考えるとき、場の方程式を使うので、T* 積ではネーター保存量は正しく定義されない。この食い違いをアノーマリーと誤解する危険性が高い。エネルギー運動量テンソルのように、その定義式に $\partial/\partial x^\mu$ が含まれる量は格別な注意が必要である。

素粒子論研究 101, 320 (2000.9)

Extra dimension は存在しうるのか

— 基研研究会「場の量子論 2000」印象記 —

及び

素粒子論研究 102, 43 (2001.1)

Extra dimension は存在しうるのか — 補足 —

Kaluza-Klein 症が流行したのは、たしか 1980 年代の初めだったと思う。時空に

余分の次元を入れて、またそれを手で差別するようなブサイクな理論が本物であるはずがない。少なくとも筆者はそう信じている。それがまた 2000 年の研究会で堂々と復活しているのには驚かされた。この論説はそのときの印象記である。

素粒子論研究 106, 122 (2003.2)

T. D. Lee との確執

T. D. Lee はパリティ非保存の予言で若くしてノーベル賞を受けた。そのためか気位が高くなり、自分の論文の誤りを指摘されても、素直にそれを認めない。彼との議論やかかわりで、筆者はそのように思えた。

素粒子論研究 113, 76 (2006.7)

旧人類と新人類の重力アノーマリー

1984 年に Álvarez-Gaumé–Witten は、時空の次元数が $2 + 4n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) のとき重力場の量子論で重力アノーマリーが現れると主張した。しかし彼らの計算の元となった 2 次元量子重力の計算を調べると、彼らがアノーマリーとしているものは、 T^* 積と T 積との差であって、両者の区別をちゃんとしていないからであった。

この指摘にも拘わらず、多くの人が未だに AG–W の重力アノーマリーの存在を信じ続けている。この原因を調べてみたところ、彼らはオペレーター代数を表現できないときにアノーマリーが出たというのではなくて、すべてが経路積分法に基づいて考えられねばならないとしているからであった。

この小論ではこのあたりのところを詳しく分析した。筆者は「アノーマリー」が「計算間違い」の同義語にならないように希う。

素粒子論研究 116, 3 (2008.6)

高次元時空を信ずる人に問う

及び

素粒子論研究・電子版 6, 1 (2010.11)

余次元時空は物理として意味があるだろうか

2000 年の素研にも書いたが、高次元時空と称しながら 4 次元時空と余次元を混ぜ合わせる変換を禁止するような理論は、高次元時空の理論と称する意味があるだろうか。余次元の存在を信じる人がいっこうにいなくならないので、再び

筆を執ったものである。後者は坂東が主催する一般の人向けの談話会「アインシュタイン」での講演記録である。余次元存在への反証と考えられる観測結果の報告も取り上げた。

素粒子論研究 116, 148 (2008.10)

暗黒物質と標準理論

及び

素粒子論研究・電子版 21, 2 (2016.1)

暗黒物質の素粒子はとらえられない

1984年筆者は小嶋と共著の論文⁷⁾で、QCDのカラー閉じ込めを簡単に行なえる方法を提起した。縦波光子と同様に、カラー状態を補助条件で物理的状態空間から排除するのである。

もしこれが正しければカラー粒子は存在しても素粒子反応では絶対に観測にかからないが、古典的な万有引力ならば大局的にとらえられる。そうだとすると、これは正しく暗黒物質の性質であろう。暗黒物質を説明するために、わけのわからない粒子を導入するのは、説明とはいえないと思う。

素粒子論研究 116, 190 (2008.12)

反物質問題は意味があるのか

反物質問題の専門家に是非答えていただきたい質問である。「宇宙のはじめにはバリオン数が0であった」というのが大前提として唱えられているが、これはどういう根拠に基づくのか。もしバリオン数が厳密な保存量でないならば、どうして宇宙のはじめのバリオン数が定義できるのか。

素粒子論研究・電子版 18, 1 (2014.9)

剽窃事件顛末記

これは物理とは実質的に関係がない人間模様の記録である。アルジェリアのコンスタンチン大学の人が、筆者の執筆した本の Quantum Gravity の章のかなりのページを、そっくり丸写しして自分の論文として発表していたものである。不正がバレるまえは彼の共著者になっていた人たちが、いったん不正がバレると皆「ボク知ラナイヨ」とばかりに逃げようとする人間ドラマである。

7) N. Nakanishi and I. Ojima, Prog. Theor. Phys. **71**, 1359(1984);
N. Nakanishi and I. Ojima, Prog. Theor. Phys. **72**, 1197(1984).

素粒子論研究・電子版 37, 2 (2022.8)

時空概念の数学的イメージ

筆者は何人かの方の協力を得て、この 40 年、量子アインシュタイン重力理論を構築してきた。この理論は、実験的サポートのない勝手な仮定を導入することなしに、アインシュタイン重力を素粒子の標準理論と統合するものである。

アインシュタイン重力の精神的本質はミンコフスキー計量 $\eta_{\mu\nu}$ のような特定の計量を、先験的に即ち手で導入しないことであると思う。このことを量子論として実現するには、時空対称性は一般線形変換不変性（並進を含めればアフィン不変性）を要請することになる。

素粒子物理における時空ローレンツ変換対称性は二次的対称性である。従って「空間的」という言葉も理論のはじめから使用することは許されない。基本場間の空間的距離について (反) 可換性を主張するいわゆる微視的因果律は根拠を失う。それゆえ CPT 定理も使えず、アインシュタイン定数のオーダーで CPT 不変性が破れている可能性がある。

おわりに、素粒子論研究・電子版が今後ますます素粒子論グループの研究媒体として発展することを期待する。単なる研究会報告集になることなく、未完成な自由な発想を遠慮なく発表できる媒体としての機能を失わないようにして頂きたい。

[謝辞]

筆者は眼と脚と体の不自由な状態にあるので、今回も亜細亜大学教授吉田律氏に $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 入力をして頂いた。同氏に厚く感謝する。

モノポール研究の思い出

荒船次郎

2008年に「非可換ゲージ理論におけるモノポールのトポロジータ的性質の研究」で素粒子メダルを頂いた時は突然のことでとても驚いた。亀淵迪先生, 吉川圭二先生, 若い山崎眞見さん(功労賞は山口嘉夫先生)という尊敬する方々と同年に頂いたのは身に余る光栄で感謝している。その研究の一コマを紹介したい。

1973年のことだが, 私はシカゴ大学のエンリコ・フェルミ研究所の南部陽一郎先生の下で助手をしていた。ある日先生から「面白い論文が来ています」と't HooftのSU(2)モノポールのプレプリントを紹介された。確かに面白く, それは従来の素粒子と異なりソリトンを扱っていた。そして保存量である磁荷は従来の電荷などの保存量と異なり, 微小変換に対する不変性に伴う Noether Current が無かった。感激していると同研究所の Peter Freund さんが, 「Goebel がこれはホモトピーだと言っていたんだが,」と言う。私はまだホモトピーを知らなかったが, 図書館で高校生向けの易しいトポロジーの本を読むと「頭を球として毛髪を頭皮上の連続ベクトルとすると, つむじか禿が必要になる」などの面白そうな話と共に, 「Jordan の定理」が紹介されていた。それは「2次元平面内にベクトル場があるとき, 平面に1つの閉曲線を描く。この閉曲線上を1周するとき, 出発点から一周して元の点に戻るまでに周上でベクトル場の向きの回転する回転数は, 閉曲線の内部にあるベクトル場の全てのゼロ点の指数の和に等しい」という主旨の定理だった。ゼロ点の指数とはゼロ点を囲む微小円を描きその円周を1周する際のベクトル場の向きの回転数を言う。ベクトル場をヒグズ場として見ると, これはモノポールに似ている, と思い Freund に見せると「これだ! これが3次元ならよい!」と言った。彼が同研究所の数学に強い Geroch さんに尋ねたところ J. Milner の初心者向けの講義録「Topology of Differentiable Manifold」を勧められたと言う。私でも読める易しい短い本で, 聞き手に応じて必要最小限の本を紹介してもらえた幸運を喜んだ。それで2次元の Jordan の定理を3次元にした Hopf の定理を知った。磁荷はトポロジータ的な整数の Hopf 指数となり, トポロジーは微小変化に対して不変なので(微小変化である時間推移に対して不変であり)保存するという磁価保存の原理を整理し, ホモトピーとモノポールの位置に対応する場のゼロ点の関係をつける Hopf の定理の応用でモノポール・反モノポール対のソリトンの近似解を求め, それらを「Topology of Higgs Field」として論文にした。重要なヒントをくれた Goebel さんに共著者になってもらい3人で, Journal of Mathematical Physics に投稿した。Goebel さんとは10年後に猪木慶治先生と福来正孝君と一緒に Wisconsin 大学へ数か月滞在したとき再会を果たせた。論文提出直後にはプレプリントを読んだ Ohio 州立大学の W.W. Wada 先生からセミナーに呼んで頂き, ご自宅に招待して頂いたり, また後に国際会議で話をする機会も得たり, 南部先生からは Weinberg 模型でモノポール・反モノポール対のダンベル解に応用するお話を伺うことができた。 Freund さんとは親しくなり退職パーティーには出席できなかったが声が大きく冗談好きな Freund さんの思い出を綴った電報は Rosner さんが読み上げてくれたそうだ。このトポロジータ的な保存量は後に, 理論を不変にするコンパクトな群 G が自発的に破れて部分群 H になるとき遠方で Higgs 場/ゲージ場の自由度は G/H となるが, その遠方球面上の2次元的振

る舞いから H の 1 次ホモトピー群が整数ならそれが磁荷になりモノポールが存在するという形でかなり一般化され、大統一理論や少し異なるが物性理論にも応用されたが、そこまでは未だ知らないのどかな楽しいひと時だった。また後に、V.A.Rubakov が大統一理論のモノポールは陽子崩壊の触媒になるという面白い指摘をし、世界各地でそれを利用したモノポールの探索が大いに刺激された。福来正孝君とその（モノポール速度と標的原子核の電荷・磁気能率に依存して何桁も異なる）反応断面積の独特の振舞いを計算したことがあった。そして今は亡き Rubakov さんが我々の宇宙線研究所に数か月滞在してくれたことも、モノポールについては間接的だが、もう一つの懐かしい思い出となっている。（完）

ゲージ理論におけるカイラル対称性の自発的破れ

東島 清

このテーマに関心を持つきっかけとなったのは益川敏英氏のカイラル対称性の破れに関する講義だった。益川さんと共著論文を書いた中島日出雄さんはじめ、この分野の研究を行うことになる九後汰一郎さんや山脇幸一さんも参加した。

ヒッグス機構にはパラメーターが多すぎるが、南部模型のように対称性の破れがダイナミカルに起きれば、パラメーターを計算できるだろうと思われた。南部模型は繰り込み不可能なので、カイラル対称性の自発的破れによる質量は紫外カットオフに比例するが、繰り込み可能な理論ならば有限の値が出てくると期待された。益川・中島は繰り込み可能な U(1) ゲージ理論で非摂動的なフェルミ粒子の質量生成を調べるため、Schwinger-Dyson(SD) 方程式を詳しく分析した結果、繰り込み可能な理論であっても紫外カットオフが必要であることを示した。さらに、結合定数が小さければカイラル対称性は破れないが、結合定数がある程度大きいとカイラル対称性は自発的に破れ、フェルミ粒子は紫外カットオフに比例する質量を獲得することが分かった。ただ、益川・中島の論文は積分方程式に対する不動点定理を用いるなど非常に数学的で難しかった。福田礼次郎さんと九後さんが SD 方程式を非線形の微分方程式に直して分かりやすく解析したので、やっと理解できるようになった。

当時、相対論的束縛状態の問題は矛盾だらけだった。私は質量零の南部・ゴールドストーンボゾンがクォーク・反クォークの束縛状態としてどのように生じるかを調べた。グルーオン交換のポテンシャルは距離の二乗に反比例するが、引力が強すぎると互いに落ち込んでしまうので、束縛状態を作るには近距離で引力をカットオフする必要がある。QCD のような漸近自由な理論では近距離の引力が弱くなるので、人工的な紫外カットオフはいらないのではないかと考えた。漸近自由な理論では赤外領域の結合定数が発散するので、赤外領域では結合定数が一定になるとして解析した。その結果、引力が弱ければ束縛状態はできないが、ある程度引力が強くなるとクォークが零質量のままでは束縛状態がタキオンになる。安定性を回復するのに必要なだけクォークが質量を獲得するため、南部ゴールドストーン粒子は零質量になることが分かった。クォークの質量は QCD の繰り込み不変な有限質量スケールに比例し計算できる量になった。

九後さん・山脇さん・青木健一さんなど課題を共有して下さった方々に感謝します。

参考文献: K. Higashijima, Theory of Dynamical Symmetry Breaking, Prog. Theor. Phys. Suppl. 104 (1991) 1-69.

素粒子論研究

異分野へ挑戦した経験

NPO 知的人材ネットワークあいんしゅたいん 坂東昌子

1 研究遍歴 素粒子統一論の夢から異分野への挑戦

物理屋は個々の現象の説明だけで満足できず、さらに統一像を追求することに心を躍らせる。人間にはもともと持っている好奇心が旺盛だ。何故か、何が原因か、もっと一般論として理解できないか、これが分かると、他の現象も同じルールで理解できないかとさらに謎がわく。私は、素粒子論以外の異分野に新参者として参入した経験が結構あるが、この心をいつまでも持ち続けている人が意外に少ないことを知った。どうも物理屋は、この心をずっと持ち続けている割合が多いようだ。これは、その分野集団の環境にかなり左右されているように思う。新たな科学の領域が成熟するのには、好奇心とあいまいな枠組みだけでは不足で、単なる趣味の域を脱して、核心を突く方法論の提案につながる新分野を予想させる芽が吹き出していなければ実現しない。既成の学会では、その底辺にそれなりの枠組みと方法論が共通した認識となっていて、そこで発行される学術誌(国際的な視点を持った)で、レフリーにもまれて論文を出すということは、その領域で一人前になるにはどうしても乗り越えないといけない重要な修業である。それがプロの仕事である。あたらしい領域に参入して難しいのは、その分野の前線を見極める作業だ。素粒子の論文なら、論文の性格と出来栄を勘案して多少甘いジャーナル、評価の高いジャーナル、日本の存在をアピールするジャーナル、異なる特徴を持つジャーナルを選定し投稿する。投稿後がもっと大変で、レフリーのコメントに応じて考え直し修正する行為も研究の一環である。もちろん、投稿前に研究会や学会などで、仲間のコメントや批判を受けるという場もあるが、掲載を獲得するためのレフリーとのやり取りはシビアだ。他分野に挑戦すると、この referee とのやり取りからその分野の考え方やレベルが見えてくる。成熟した分野であるほど常識が定着している。

しかし、逆に、常識が固定化していて、結構それだけ固定概念が定着しているために、思い込みも強い。それを突破したイノベーティブな発明や発見ができない。「科学者には、一定の発想、前提、枠組み、ルールなど、既存の枠内で問題の解決をはかる傾向があり、この枠内での問題解決が行き詰ることがある。それを突破するのは外部あるいは若手研究

者である。」とはトマス・クーン¹の言葉である。宮田隆²「分子から見た生物進化³」には、「他の問題を研究していた筆者のグループは外部研究者にあたり、その点、固定概念から自由であった」(P299)という記述がある⁴。

物理学の新展開が繰り広げられたフェーズに遭遇した若者たちは、新しい世界に果敢に飛び込んだのだ。この先取の気風を湯川精神と私は名付けている。基研が生み出した宇宙進化や生物進化の分野を切り開いた林忠四郎も木村資生も、物理的な視野でマイクロとマクロを繋ぐ挑戦をした。どちらも湯川精神が支えている。もちろん、新領域を切開いたのは、必ずしも湯川だけではなく、コペンハーゲンのニールス・ボーア研究所も CERN も同じ気風がみなぎっている。戦時中でも、敵国の科学者も同じ場に集い励まし合う仲間だった。同じ目標に向かって切磋琢磨し力を合わせるかけがえのない仲間だった。

2 2 フェーズ人生：素粒子論遍歴 1

1960年、私は湯川研所属の M1。その頃、南部の Gauge Invariance に関する論文が出た。当時シカゴ大学で、BCS 理論の 1 人、シュリーハーのセミナーを聞いて、対称性を具現する原理、Gauge 対称性の破れとの関係に疑問を持った。BCS があまりに見事に超電導現象を説明したため、当時あまり気にする人はいなかったが、南部はここを徹底的に検討した。それが有名な「自発的対称性の破れ」である。ゲージ原理は破れたのではなく、別の形で貫かれている。それを担っているのが、Nambu-Goldstone 粒子である。対称性のノンリニアな表現では新しい粒子 NG ボゾンが対称性を保証している。相転移をより普遍的な物理法則「対称性の自発的破れ」で理解した南部陽一郎先生の話だった。南部は、この相転移の枠組みを素粒子の世界に持ち込んだ。このことを私に教えてくれたのは、坂東君だった。同級生だったが、広い視野をもっていて、新しい風に敏感だったのかなとも思う。鈍感な私は、それを聞いてびっくりした。意気投合して、一緒に BCS 理論を勉強した。高校時代にさっぱりわからない熱力学を学んだ後で、ボルツマンの気体運動論を知って目からうろこだったのと同じ感動である。それ以後、このエクサイティングな自然の仕組みは、素粒

¹ 科学革命の構造：「パラダイムシフト」を論じたことで有名

² 物理学を専攻していて、基研のATOM型で6か月の滞在中に「松田博嗣先生に出会い、そのまま松田先生が九大に転任された際に助手として九大に。詳しくは「基礎物理学の現状と未来-学問の系譜・湯川・朝永をうけて」https://www.jstage.jst.go.jp/article/soken/115/6/115_KJ00004871268/_article/-char/ja/での講演参照のこと。また以下のブログも記述がある。<https://jein.jp/blog-bando/1273-blog126.html>

³<https://gendai.media/list/author/TakashiMiyataAE%E7%94%B0%E9%9A%86-ebook/dp/B00IJ6V060>

⁴ 「生物進化を考える」木村資生：<https://www.iwanami.co.jp/book/b267838.html>；ダーウィンの伝統を背負う集団遺伝学の転換をもたらす中立説はなかなか認められなかったそうだ。木村資生は相当苦労したようだが、遺伝学の権威クローの様々な批判は、中立説を鍛えより強固にしたという。異分野に挑戦してうける批判は鍛えられるチャンス、「わからずや」と決めつけないことだと納得した。

子論の基礎となった。

さて、湯川研は、場の理論の矛盾を乗り越える新しい方向を探っていてノンローカル (nonlocal 非局所場の理論) が多数派だった。実は、私を指導してくださったのは、位田正邦助手⁵とポストクの野上幸久⁶さんだった。1950 年後半から、CERN、BNL、DUBNA で加速器が稼働し、続々と新粒子が発見され、すでに 200 種を超えていた。大学時代、湯川が講演で、「こんなに素粒子があるなら素粒子と言えんなあ」と腕組みして話されたのが印象的だった。「素粒子」という概念が変わりつつあった。位田さんは、壁に貼った素粒子表を毎日眺めて、レプトンやハドロンとの質量はどう決まるのか、どう分類できるのか。どう統一的に理解できるか考えろ、という。名古屋大学の研究会にものこのこ出かけた⁷が、そこで、ニュートリノに加えて種類の違うニュートリノが発見されたという話で大騒ぎしていた。同時に京都でも注目されていて、これらが同時にニュートリノ混合の話につながったのは偶然ではなかったわけだ。当時、強い相互作用、弱い相互作用を理解するというのを、場の理論から理解しようとする、発散の困難に落ち込む。さらに、強い相互作用は摂動論的なアプローチもできない。お手上げの状態だった。だから、場の理論からの分析はあきらめて、マクロな観測量 S マトリックスから内部を推しはかるしかないという意見が多数を占めていた。一方、坂田モデルは、自由度を実体化しハドロンを複合系として理解し統一する。なかなか魅力的だった。さらには、坂田モデルから名古屋モデル、そして武谷の「最初にニュートリノありき、レプトンからハドロンへの変身は B 物質⁸」

ニュートリノ → (チャージ) → レプトン → (B 物質) → ウルバリオン → ハドロン・・・という構想へと広がった。おとぎ話の域は出ないが、ここからニュートリノ混合のアイデアも生まれたのだから興味深い。ともかく、その後ゲルマンが提唱したクォークもウルバリオンも現実感にはなかったから、場の理論に乗せるわけにはいかなかった。その後、たくさんの実験データが蓄積されて、逆に、素粒子のフレーバー対称性の方は、新しいルール

⁵位田さんには研究会に誘ってもらった。「女性だからと言ってゆっくり仕事をしてもよいなどと思っただけだよ。10 年先にパリティ非保存だといっても手遅れ」というような説教をいただいた。頼りなくいつやめるかわからない私を頼りないと思われたのだろう。あとで、位田さんはパリティ非保存の論文を、リー・ヤンの前に提唱して論文を書かれたらしい。それを湯川先生にみてもらおうとお渡ししたが、湯川先生は忙しかったのか、引き出しに入れたまま忘れておられたらしい。

⁶野上さんは間もなく海外に職を得られた。当時、湯川・武谷・坂田という 3 ポスは米国のマッカーシー旋風の影響もうけて危険人物とみなされ、湯川の弟子にあたる野上さんもビザが下りず、就職先をカナダのマックマスター大学に変更された。早川幸男もそのあおりで渡米できなかったという。

⁷坂田モデルが結構認められ始めて素粒子の分類で重要な役割を果たしていた。坂田がこの研究会で「坂田モデルもまた変更が必要になるかもしれない。しかし、この基本的視点はずっと残るだろう」というような挨拶をされて、感激して報告の手紙を書いたことを覚えている。

⁸B 物質の B は、ビールのことで、アルコールを飲んで強くなるという意味だと論文にあり、思わず笑ってしまったのを覚えている。今ならダークマターかな??

も提起され、群論を駆使して素粒子反応を分析できるようになり、S 行列理論に群論を駆使して、フレーバーの異なるプロセスの関係が統一的に理解できた。ただ、スピンの自由度はそう簡単にファクターアウトできない。「スピンは何とか群論統一的に普遍的な振幅に記述できないか」と意気投合して、九後・山脇・江口さんらと夜を徹して検討したこともあったが、結局あきらめたのも懐かしい思い出である。まあ、最終的には超対称性の議論が必要だったわけだ。

間もなく、九後さんも江口さんも、場の理論の基礎的な検討へとシフトしていった。それでも、私は、まだ現象論にこだわっていた。この時期、仲間にかかなりの批判をされた。福来さんは「ブレムスシュトラーリング⁹ (制動輻射) だな」と言ったひたひたと押し寄せている新しい流れに追いついていない私を批判したのだ。九後さんには、警告を受けた

吉田兼好「徒然草 第百八十八段」

ある人が息子を坊さんにさせようと思い、「勉強をして世を理解し、有り難い話の語り部にでもなって、ご飯を食べなさい」と言った。息子は言われたとおり、有り難い話の語り部になるべく、最初に乗馬スクールへ通った。「車や運転手を持つことができない身分で、講演を依頼され、馬で迎えが来た時に、尻が桃のようにフラフラしていたら恥かしい」と思ったからだ。次に「講演の二次会で、酒を勧められた際に、坊主が何の芸もできなかつたら、高い金を払っているパトロンも情けない気持ちになるだろう」と思って、カラオケ教室に通った。この二つの芸が熟練の域に達すると、もっと極めたくなくなり、ますます修行に勤しんだ。そのうちに、有り難い話の勉強をする時間もなくなって、定年を迎えることになった。」条件づくりばかり一生懸命努力して、お経の勉強をしなかった！（現代風に翻訳したもの）

「保育所作りや女性研究者の待遇改善、結局環境の準備だけして一生を終わるのか」という意味なのだろう。振り返ると、子供が小さい時は「小銭をためるような仕事」をしていたように思う¹⁰。つまらん論文で数を稼いでいるなあ。新しい原理に基づく場の理論が息を吹き返している流れが迫っていた。いったい私が目指したのは何？

私に限らず、研究の方向転換に苦勞した人は多かったと思う。どの分野にも発展のフェーズがある。流行を追いかけていると、イノベーションにはいきつかない。かといって、新しい流れの息吹に無関心でいてもいい仕事はできない。

夢は素粒子の統一理論だった筈、対称性、ゲージ対称性に軸足を置く必要がある。この

⁹ 荷電粒子が方向をかえて曲がっても、光はまだ同じ方向へ走り続けるという比喻。学問の流れは既に別の方向なのに、いつまでも同じ方向に走り続けている。

¹⁰ 他分野の仲間こんな話をしたら、ほんとに小銭をためていると思われてびっくりしたこともある。私の言ったのは、画期的な大きい仕事でなく適当なテーマでまとめる論文を書いている自分のことだった。

流れの延長線上で、ヒッグス、キップル、を経て、結局1967年のワインバーグ＝サラム標準理論に至る。これが基礎となって、この世に存在する相互作用を統一して理解する方向が垣間見えた。この世に存在する力がゲージ対称性で統一できたということだ。ワインバーグはそれまでずっと強い相互作用の中で、 ρ メソンとかゲージボゾンがあるのはどういうふうに考えたらいいか考えていたらしい。こういうとき、キップルがセミナーをして、それを聞いたワインバーグが、あっと思ったという。実はワインバーグのこの頃のエッセイを読むと、「高速道路を走っているときに思いついた」と書いてある¹¹。これは現象論しかできなかった素粒子論の世界を大きく変えることになった。それと同時に、宇宙の初期を素粒子論で説き明かすカギをも与えた。

2 フェーズ人生：素粒子論遍歴2

その後の仕事は、対称性を武器に素粒子の統一的理解へという方向に向かった。中でも、hidden local symmetry（隠れた対称性）という仕事は、ドラマティックな展開だった。ちょうど、山脇さんが「名大は忙しすぎるので勉強しに来た」といった。そして、繰り込み群で結合乗数の変化を追う議論をしていたら、ビル（バーディーン）の基研でのセミナーが始まる時間になったが、議論を続行することとした。それで、セミナから帰ってきた九後さんに、「どんな話やった？」と聞いた。なんだ、同じモチベーションの話じゃないか！「そんなら、ビルのところに行って議論しよう」と私が提案したら、松本賢一さん（松本公式で有名）が、「ちょっと待て」と言う。アイデアがあるときすぐにちよろちよろ言うものではない、「こっちで結論が出てから議論しよう」となった。論文は早々に仕上げた。それが「テクニカラーモデル」のはしりの論文だ。新しい相互作用がこの世の中にあってもいいのではないか、そして、ウルクォークのようなもの（テクニクォーク）があって、その結合状態がクォークだという階層があるのでは、という模型だった。Editorのジョージヤイには、「こんな相互作用はフェイクだ」と言われたが、最終的には採択された。もっとも、「テクニカラーは、商品名だからハイパーカラーに変えろ」といわれたが。これが契機になって、さらに、hidden local symmetry という概念に至るのだが、これは、なんといっても九後さんの功績が大きい。彼が、重力場の理論でよく使う変換の式を黒板に書いた時のことである。「え、それ今やっているのにぴったり使えるやん」と言ったら「こんなの当たり前前の式やで」と九後さん。そんな中から隠れた対称性の話が進んだのである。

ところで、群論が得意で冴えた九後さんも、私たちに負けたことがある。それが、超対

¹¹ 本当のところは、キップルのセミナーがきっかけだった。「あっ、これで弱い相互作用の問題が解けるはず」と思ったのだ。そして、さっさと論文を書いた。キップルが目の前にいるとき思いついたのだから、その場で議論して、一緒に論文を書くはずだが、単名で論文を書いた。このことを知って、私はあとで参考になるとワインバーグの論文（2ページほどのレター）を注意深く読み返した。確かに、キップルにヒントを得た筈なのに殆ど触れていないことを確かめた。

称性の非線形表現の仕事だ¹²。九後さんが、超重力理論から出てくる E_8 (最大の例外群) の話をしてくれた。じゃあ、超対称性理論の「自発的対称性の破れ」を使えば素粒子全体をまとめる統一理論が作れるかもしれない。数学のできる益川さんに相談したところ、「これ面白い。坂東さん、金鉱を掘り当てたな」と言って猛烈な勢いで検討を始めた。超対称性の変換は結構ややこしい、その中で不変量を見つけないといけない。さすが益川さん、間もなく不変量を見つけたのだ。九後さんは当時 CERN にいてやはり同じ問題に取り組んでいたのだが、「負けたあ」と言ってきた。益川さんに負けたので、私に負けたのではない。こうして、ほぼ対称性の破れに用いる道具はそろった。いくつか、この方向で世代を含み重力場も内包する統一理論を作ることを試みた。残念ながら、結局、定年までには大統一理論の構築には成功しなかった。まだまだ何かが欠けているのだろう。クォークやレプトンもすべて内包する、しかも余分な状態が出てこないモデル、そして、世代の起源も説明する理論はできないかと頑張った、特に世代間のクォークの示す質量は、指数関数的に拡大する。これを合理化する理論は見つからない。ひょっとしたら、世代の高いトップやボトムクォークは、我々の住む 3 次元空間の外に軸足を延ばしているのではないかなどと空想を働かせて試してみたりもしたが、決め手に欠ける。私の夢であるクォークの多様性をひとまとめにするきれいな統一理論はいまだに夢のままである。

ところで、一つ裏話。隠れた対称性の話は結構評判がよくて、結局 Physics Reports にレビューを書かせてもらったが、これはちょっとしたきっかけから始まった。私の夫は、当時、ハイパー核に取り組んでいて、評価されてバークレーに招待された。Physics Reports のエディターのジェリー (ブラウン) が、「この人はあの有名な hidden local symmetry の論文の著者の夫です」と片目をつぶってみんなに紹介したそう。で夫は、「ジェリーはあれをえらい評価している。Physics Reports に書かしてくれるから申し出てみたら」と言った。山脇さんはその話を聞いてすぐにオファーを出した。一つ返事で話が決まった。大騒ぎして九後・山脇・坂東で分担して仕上げた。レビューの中には、もちろん、九後さんが悔しがった超対称性の非線形表現 (Supersymmetric non-linear realization) も丁寧に書いているが、九後さんはもっとスマートにまとめて、悔しさを乗り越えたかもしれない。この時、頻りに九後さんの車で名古屋に通った。この往復の車で、チョムスキイの話や、木村資生の中立説などの素粒子以外の話も結構盛り上がったのも楽しかった。

¹² 超対称性というのは、スピンをつなぐ変換を可能にしている、スピン 0、1/2、1、などを同じ既約表現に属する。普通は、空間回転対称性から出てくる角運動量は、 $L=1$ だったら $L=1$ で 1 つの既約表現になっている。角運動量の異なる表現を一緒にまとめる群がありうるかといえば、それは無理筋だというのが常識だった。その枠を広げたのが超対称性の理論だ。ローレンツ対称性とどうしてもうまく両立しない。実は、昔、江口・九後・山脇で検討したスピンをもつプロセスをまとめきれなかったのもこのためだったのだ。

3 交通流の研究：異分野への挑戦

交通工学は、モータリゼーションの始まった1950年後半から急速に発展した分野だ。ここでは、ミクロな立場からアプローチした追従モデル(Follow the Car Theory)が Pipes や Newell などによって提案され¹³、交通工学のテキストに出ていく基本方程式を与えている。ところが、このモデルは自然渋滞を説明できない。すぐ分ることだが、例えば電車のように連なっている場合は、車間距離が短くても前車の動きをすぐフォローして動くから渋滞は起こらない。ところが、高速道路での運転は、一定密度を超すと渋滞が起きる。なぜか。前車の動きに反応して後車が反応する(stimulus-response 反応)様子が違うのではないか¹⁴。これが速度の変化に跳ね返るのが、慣性の法則に従って時間的遅れを生じるのではないか。この遅れが実は自然渋滞への転移の機動力だ、そう私たちは考えた。

物理屋は、複雑な現象でもエッセンスを抽出し、単純な法則を見出すことに喜びを感じる。複雑な現象から雑音を除き、本質的な要因、普遍性を見出し、真実を探り当てて「わかった」と思える。おそらく、物理学の対象が最も単純な自然現象だったので、そこで鍛えることができたのだろう。もちろん、物質科学も複雑な現象はまだまだあって、自発磁化・超伝導・超流動といった相転移現象は、かつては、物理の枠組みでは取り扱えないと思われ、「複雑系」として片付けられていたが、今では、自発的対称性の破れという概念で捉えられることが確立している。多体系は実に面白い¹⁵。とはいえ、人間集団にまでいくと物理学で解明できるかな、こんな議論が愛知大学の仲間のなかでよく交わされていた。いきなり自由意思のある複雑な人間の多体系を対象にしては歯が立たないから、最も単純なシステムから始めるべし、である。その適切な素材が交通流ではないか。個性を持つとはいえ、主役の運転者は、運転技術を訓練してルールに従い共通の動きをする。愛知大学教養部での専門以外の研究者との交流から、こんな議論が発展した。物理の同僚、長谷部さんは益川さんに似ていてひらめきがすごい。「高速道路の自然渋滞を、物理学の相転移現象とみて、ミクロな車の挙動から説明してみよう！」となった。そして、導入したモデルは、一種の反応の遅れを自然に導くモデル(Optimal Velocity Model : OVM)だった。シミュレーションにたけた中山さんや杉山さん¹⁶が出した結果から、非線形理論特有のリミットサイクルが出ることも確認できた。自由流と渋滞流の2つを別のフェーズを同じ理論から導出できる。「法則(運動方程式)」は同じだが、その系の環

¹³ 「車両の運転者は、前方車両、特に直前車両の挙動によって、自分の車両の速度をコントロールする」という物理屋らしいモデル。後に、レフリーとのやり取りから、提唱者は、2人とも物理出身の研究者だったことが分った。

¹⁴ 実際ニュートン第2法則、刺激を受けない運動体は速度を変えないが原則である。

¹⁵ More is Different(P.W. Anderson, SCIENCE (4 Aug. 1972, Vol.177, No.4047)、

¹⁶ この2人とも、名大素粒子論の出身。ポスドクを経験している。

境や状況によって違った現象を発現する統一的理解ができたのである。

ただ、われわれは、この分野で「新参者」である。「このままでは趣味で終わってしまう。さらに先に進めるにはどうしたらいいか」話し合った。提唱したモデルの評価はできるだけトップクラスのジャーナルに出そう。その前に、点検も必要だ。従来の仕事が出ているジャーナルを京大工学部から借り出し、分担して点検した。

しかし、何より励まされたのが、山口昌哉先生の助言だった。お会いして話した途端、まず「面白い！」と激励いただいた。そして、京大定年退職後、移られた龍谷大学の山口研で、セミナーをさせていただいた。先生は、異分野に挑戦する多くの研究者を育ててこられたが、この助言と激励がなかったら仕事はお遊びで終わったかもしれない。

こうして仕上げた長谷部・中山・杉山との 2 編の論文を投稿した¹⁷。一流のジャーナルに投稿して評価を受けるべし、である。専門誌 OR や Traffic Science での評価を受ける過程は大変だった。今までのモデルはだめだという論文だからなかなか手厳しい。レフリーが 3 人もついて、「30 年もこれでやってきたのだぞ」「模型だけで現実のデータの解析がない」「今までのモデルでも現象をうまく説明しているぞ」と長い補正項の式まで説明するコメントもあった。現実のデータ解析をしっかりとだめだというのは痛いところを突かれたと思った。この論文の運命はここでは省くが、結局 APS で発刊された新しい雑誌、PRE がいいと勧めてくれる人があった。投稿したら、すぐに採択された。やっぱり物理分野だった。今では、この論文は、専門の素粒子分野の「隠れた対称性」より引用数が多い¹⁸ので、ちょっと複雑な気持ちだ。また、同年秋に開かれた応用数学会でも発表した¹⁹。懇親会で、薩摩順吉先生にお会いしたら、開口一番、「京大工学部にいた時、保育所で保護者会の役をしていたが、そこで素粒子の坂東さんという名前はきいたが、どういう関係ですか？」と聞かれ、「あ、その坂東です」といって 2 人で大笑いした。薩摩研究室でのセミナーで話した機会には、ソリトンで有名な広田先生に議論いただいた。またセミナーで、

¹⁷ 「Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Calculation」米 OR 学会誌「Operations Research」に投稿。パターン形成の解析「Structure Stability of Congestion in Traffic Dynamics」は、山口先生の紹介で日本応用数学会のジャーナル誌(Japan Journal of Industrial and Mathematical Science)に 1993 年 6 月投稿

¹⁸ https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Masako+Bando&btnG=によると (2023/1/31)現在で

- ・ Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, M Bando, K Hasebe, A Nakayama, A Shibata... - Physical review E, 1995 – APS,Cited by 3289
- ・ Nonlinear realization and hidden local symmetries, M Bando, T Kugo, K Yamawaki - Physics Reports, 1988 – Elsevier Cited by 1673

¹⁹ この時面白かったのは、初めて異分野の学会に行くので一緒に行った中西さんが、フォーマルな背広をぶら下げてきたことだ。物理学会なら気楽だが気を使ったのだ。

鋭い質問をされる方がおられ、かの有名な戸田盛和先生だとわかってびっくりしたこともあった²⁰。統計数理研究所で「交通渋滞を起こす動的模型」というセミナーをさせていただく機会も得た。素粒子分野から情報分野に挑戦された先輩格(年は下?だが)の小柳義夫(元応用数理学会長)さんから紹介していただいたおかげである。例の AIC で有名な赤池弘次先生ともお話しする機会も得たが、幅広い学識とその視野の広さに感銘を受けた。AIC の A は赤池の頭文字だが、先生は「An Information Criterion」としかいわれなかったという。その先生がリーダーの統計数理研究所はいろいろな分野の現象を解析する日本では珍しい研究所だと知った。京大基礎物理学研究所にみなぎるチャレンジ精神がここにもある。多変量解析の公開講座にも生徒としても参加した。愛知大学の教養部に移って、様々な分野の研究者に出会ったと同時に新しい勉強の機会も得たなあ、と感無量である。

ただ、以上でわかるが、結局ネットワークで広げられたのは、固有の交通流分野ではなく、物理学、応用物理学、数理統計など、いわば周辺の数理・物理の分野だった。思い出すと、当初、豊田研究所のプロを知人から紹介いただいたが、「ああ、1 レーン問題はとうに片が付いていますよ」の一言だった。要するに常識が定着していると、プロはそこからはみ出たイノベーションには踏み出せないのである。

それでも専門家の中に OVM が定着したのは、杉山さんや中山さんが、海外の学会で発表し、日本でも国際会議を組織して、ネットワークを広げたからである。海外で知られるようになって初めて日本に逆輸入して、日本の専門学会でも引用するようになる。残念ながら、この道筋を通らないと、認められないのか、とちょっと情けない話ではある²¹、異分野に挑戦する時には、やはり国際会議に行き、そこで公明できる仲間を見つけ、研究の巾を広げることがどうしても大切だと痛感した。

²⁰ 東大工学部の学生から卒論で取り組んでいるので論文がほしいと請求があり、「どうして知ったの?」と聞いたら「うちの先生が教えてくれました」とのこと。以後彼とデータや論文(越・東大教授研究グループ博士論文や修士論文)は、OVM を発展させたものだった。

²¹ 詳しくは、サイエンスポータル参照

第1回「交通流を研究対象に」:

https://scienceportal.jst.go.jp/explore/interview/20090810_01/

第2回「多数の集団は面白い - 最も単純なシステムをとっかかりに」

https://scienceportal.jst.go.jp/explore/interview/20090811_01/index.html

第3回「難産の初論文」(坂東昌子氏 / 愛知大学 名誉教授)

https://scienceportal.jst.go.jp/explore/interview/20090812_01-2/index.html

第4回「国際会議の反応に驚き」

https://scienceportal.jst.go.jp/explore/interview/20090813_01/index.html

第5回「経済物理学へ - 社会の動きへの挑戦」

https://scienceportal.jst.go.jp/explore/interview/20090814_01-2/index.html

4 寺田物理

交通流を物理学的視点から最初に問題提起したのは、寺田寅彦のエッセイ「電車の混雑について」である。これを教えてくださったのも山口昌哉先生だった。正直なところ、それまで「寺田物理」は「盆栽物理」、プロのやることではないといった感覚がなかったわけではない。幼い頃には、茶碗の湯など、有名なエッセイをよんで面白がってはいたが、寺田物理は趣味の域をでないので、プロの科学にならないと思いこんでいた。寺田寅彦は自然の森羅万象に対して鋭い目を向けた。山口昌哉は、50歳になって、初めてカオスの世界に飛び込んだ。きっかけは、故富田和久教授（京大理学部物理教室教授）との議論だった。日米安保反対の嵐が大学を駆け巡っていた頃、理学部の教官会議というのが結成され、富田研究室がセンターになっていて、山口数学部長は頻りに訪問されていた。そんな中でも学問の議論は忘れないお2人、わかるような気がする。好奇心に満ちた異分野交流が始まると、そこから何か生まれる！それがカオス、新たな鉅脈に光が見えた時の心の躍動は年齢に関係ない。「50歳のときにカオスと出会って、人生が変わった（山口）」のだ。未開発の領域に飛び込むのは冒険だが、こうして交通流の研究を経験してみると、新分野挑戦には既に多くの先駆者がいることも分かった。破壊の物理、砂山、粉体流から液晶そして生物との境界線を探るソフトマター、アクティブマター・・・寺田物理は今や大きな流れとなっている。私の視野が狭かっただけなのだ。

20世紀の個別科学の進化の時代から、21世紀は、分野横断型の課題に取り組む視野が重要になってきた。そういう時代に我々は生きている。細分化された個別課題に対応した科学組織に慣れ親しんできた科学社会は、未だにそれに応じた研究体制や学会組織を構築しきれていない気がする。物理学はすでに、宇宙や生物などへと対象を広げてきた。宇宙物理は基研の湯川・武谷・早川3人の提案で長期研究会のプロジェクトから始まった。そこに参加した若手の林忠四郎は、宇宙物理の先導者となった。生物物理学に関しては寺本英が生物物理学に飛び込んでいる。このどちらにも湯川が先進的に指導力を発揮した。素粒子から生物学へ転身した福留助手が基研にいた頃、そこでウサギを買うことを許可したという逸話もある。一方、歴史を振り返ると、ほかにも世界には、スケールの大きな物理学者は存在していたようである。ちなみに、社会物理学という概念は、1835年に、ケトレによって提唱された。ケトレといえば、統計学の大御所であるが「社会物理学」という著書がある²²。

基礎となる経常研究費がどんどん少なくなり、競争的資金を獲得しないと、日常研究さえままならない現実の中で、目の前の短期的な研究成果と、研究費申請書類の山をこなす

²² 残念ながらこの本を見つけることはできないので、どなたか見つけることができれば教えてほしい。)

のにあくせくと時間を使わねばならない現実の中で、異分野挑戦が可能なのだろうか。確かに、今「異分野交流」に対して奨励する動きもあり大プロジェクトも動いてはいる。だが、単に異分野の科学者を集めるだけでは、中身がない。今の科学者は忙しすぎる。基研では、湯川所長が、いつもサロンにやってきて、「今どんなことしている？」と声をかけ、一緒に面白がっていたという。そんな中から、基研の研究会の構想も出てきていたのだ。湯川精神が生き続けていくのを切に願っている。

5 経済物理学、気候変動

経済物理への挑戦は、ひょんなことから始まった。きっかけは、文系に分かるテキストを作りたいということから始まった。愛知大学で、微積分を知らない文系の学生に統計を教えるために、教科書を作ろうと呼びかけ、経営学部の教員に加えて非常勤講師の物理屋、谷口正明さんも加わってもらい、「統計グループ」を結成した。結構自信作だったが、教科書にしないかというお誘いもあったが、教科書にすると高価になるので、生協に頼んで印刷して自主出版で毎年改良を加えてきた。学生たちに評判がよく、統計の勉強を勉強した学生たちは、統計はやさしい教科だと思っていたようだ。300人程度の統計基礎クラスで半分は90点以上とるので評点を5にしたら、教務課は「試験がやさしすぎるのでは」といつてきた。ほんとにできているのだから仕方ないと頑張ったものだ。学生たちは面白くなったらしく、「先生、みんなで合宿して勉強しましたよ」とまで言ってきた。易しくなんかない、誤差の話からt分布検定、仮設検定など結構なレベルまでわかるようにできているのだと自慢したいところである。

さて、このテキストのイントロでグラフの説明の際、経営の先生がわが国の国民総生産(GDP)と景況指数の年変化のグラフの紹介文を提案した。それを見て私は、「この2つどう関係なの？」と聞いたら、「いやあまり関係があるわけでもありません」という返事だった。谷口さんが、「GDP そのものではなく GDP の年ごとの差、 Δ GDP が景況指数と関係しているような気がする」と言ってグラフを作ってくれた。生産量は景況指数がよければ増産に転じるし、悪ければ抑えられる。しかし、少し時間遅れがありそうだ。それって、交通流と似ているなあ、調べてみようということになった。交通模型と一緒にやった中山さんも参加した。中山さんは、スマートで理解力が深い。頼もしい仲間を見つけてこの仕事は加速した。そして、動的景気変動模型が完成した。今度は、論文の投稿先を物理学会のジャーナル「JPSJ」に決めた²³。「経済現象に保存量があるか」という第2弾の論文も手掛けた。また、気候変動も同じイメージで手掛けたが、こちらはデータがあまりに恣意的で信じられないので断念した。気温は測り方によってどうでもなる。IPCCのリーダーたちが、地球の温度上昇がある筈だというメールのやり取りの中で一部のデータを削除したことが発覚して、ウォーターゲートに倣ってクライメートゲート事件と呼ば

²³ 物理学会の仕事をするようになって、JPSJ の存在を知った。PTP しか知らなかったが、こちらは結構広範囲をカバーしている。

れるデータ偽造で大騒ぎになったりもして、やる気を失った。

そうこうしているうちに、ニュートリノ混合の話がカミオカンデで見つかり、柳田さんが夏の学校で興奮して紹介してくれた。それで、そちらの方に移ってしまった。

6 社会の動きへの挑戦²⁴

湯川先生は、核兵器廃絶に一生をささげられたとよく言われる。プリンストンでのアインシュタインとの出会いの中で、原子エネルギーに関わった科学者として、様々な思いを語られたことだろう。ファシズムの嵐が科学者をもまきこんだ時代、「ドイツ国民に告ぐ」という澄明なドイツの科学者たちのメッセージに対して、アインシュタインの思いは愛国心とは違っていた。ニコライ・アインシュタインの「ヨーロッパ人に告ぐ」の基礎になったのは、「戦争の生物学」²⁵「世界連邦」²⁶構想にもつながっている「人類はみな同胞」という深淵だった。アインシュタインは、世界連邦の夢を湯川夫妻に託された。

アインシュタインも湯川も、この問題は科学の延長線上の問題と捉えていたようである。実際、湯川は核兵器の問題をヒトの進化の問題の一環だといっているし、ビキニ事件に端を発するラッセル・アインシュタイン宣言後組織されたパグウォッシュ会議にも朝永らとともに参加して、核兵器開発競争下の「力の均衡」について論じている。力の均衡は、安定な定常状態だといった議論もされている。だが、最終的には、人間の多体系、社会科学は専門外として社会学者に委ねられたようにも思われる。

気象シミュレーションを最初に試みたりチャードソンは、気象学が戦争の道具に利用されている現状を批判して、気象台長を辞任した。そして、戦争の原因についても統計的な分析を行ったという。社会現象をミクロな立場から扱う試み²⁷もある。しかし、未だに動きを決める原理がよくわからない気がする。交通流の研究に続いて、経済変動を動的な考察から導く「景気変動サイクル」の仕事なども手掛けたりもしたが、経済活動だけでなく幅広い現象に応用して、社会のマクロな集団運動が起こる現象が動的に分析もできる日は来るのだろうか。

そうこうしているうちに、私の人生を変えた事件が起こった。3・11 TEPCO 事故だ。そこで初めて、社会的責任というモチベーションで放射線の生体影響の研究に取り組んだ。すでに10年を経て、生物・医学分野の世界に飛び込んで、今もなお葛藤しながら、徐々に生命とは何かという基本的な問題へと近づいている²⁸。専門分野でしっかり鍛

²⁴ https://scienceportal.jst.go.jp/explore/interview/20090814_01-2/index.html

²⁵ ニコライ著『戦争の生物学』は科学の対象としての戦争の分析。

²⁶ 世界連邦の最初の提唱者は、カント「永遠平和のために」である

²⁷ A Micro-Social Theory である(注)。ここでは、経済的現象を取り扱うのだが、取り扱う量は、goods(生産物：G) Interest(持ち株：R)といった量を金額に換算してそれを解析するのである。

²⁸モチベーションなどは：3・11以後の科学に思うなどに別途紹介している。

え、そこで身に着けた基礎力と企画力で、国際的な場でのコミュニケーションの基礎を固めて研究を進める大切さを感じている。まだ、この分野では一定の評価を得るところまではいっていない。年をとっても、いろいろな分野に挑戦してみて、新たな学問の新しい息吹を持ち込みたいもの、この冒険はまたいつかお話しできるか、あるいはそのままあの世にもっていか、どうなるかなあ、と思いつつ、自分を励ますこのごろである。(完)

謝辞

いつもの癖で殴り書きの中、点検も十分せずに提出したこの原稿を、丁寧に点検していただいた浜中さんをはじめ、編集委員の皆様にはすっかりご迷惑をかけてしまった。浜中さんには、ずいぶんど苦勞を掛けてしまった。心から感謝している。何とか、最後まで行きついたが、肝心の放射線の生体影響を始めた冒険話は、進行中のことでもあり、ここでは、省略した。

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 ρ 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荣誉ある賞であり、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、この荣誉が、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 of 研究者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つ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。¹⁾ 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。²⁾ 4次元時空では、非

¹⁾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。

²⁾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^μ -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 ρ 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_μ 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_μ 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 π -on と ρ -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、「 ρ -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、 ρ -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_μ 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_π^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_μ 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_μ 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_μ は運動方程式で消去できず、 aL_V は ρ -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、 ρ -coupling の universality, KSRF-relation, photon coupling の vector dominance 等、 ρ と π 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、 ρ -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ことではなく、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_{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 ρ -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。³

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、 ρ 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。¹⁵⁾」

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。

³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 ρ -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.

マヨナラニュートリノ系でのCPの破れとその検証法

大阪大学名誉教授 高杉英一

1. はじめに

1980年頃、マヨナラニュートリノ系でのCPの破れの仕事は重要な問題だとの興味をもって取り組めばそれほど難しくはなかったろう。しかし、ニュートリノの質量は標準理論やSU(5)大統一理論ではゼロであり、SO(10)大統一理論に至って初めて質量を持つといった状況であり、むしろ質量はゼロであると考えるのが自然に思えた。ニュートリノ混合とマヨラナニュートリノ系でのCPの破れを考えるには、基礎知識によって高められた問題意識が必要であった。

その後、1998年にニュートリノ振動が観測され、ニュートリノの質量がゼロでないことが判明した。さまざまな考察からニュートリノはマヨラナ粒子である可能性は高く、このことを検証するニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の実験は以前に増して重要となり、現在沢山のグループで実験が行われている。この崩壊が発見されると、ニュートリノはマヨラナ粒子と確定し、マヨラナ粒子特有のCPの破れの位相も観測できる。提案から40年以上たつてようやく検証の実現性を感じさせられる時が来たかと思うと心から喜びを感じる。

2. マヨラナニュートリノ系でのCPの破れについて

この問題はちょっと考えるとすぐに答えを得ることができるであろう。マヨラナ粒子は位相の自由度がないので、小林・益川の場合の位相に加えて粒子の数から1だけ引いた数の新しい位相が現れる。(1引くのは全体の位相は意味がないからである。)したがって、3世代の場合には2つのマヨラナ粒子であることによる特有のCPの破れの位相が現れる。

簡単な問題ではあるが、この問題の面白さに気づくためにはいくつかの基礎知識を積み重ねることが必要である。私事になるが、どのようにしてこれらの知識を蓄えたかを説明したい。

私は、1973年にメリーランド大学大学院（東大には大学に在籍しながら留学する制度ができこれを利用した）に留学した。大学のスタッフのPatiやMohapatraはSU(4)統一理論を盛んに研究しており、クォーク系のCPの破れは W_L と W_R の混合に現れる位相が原因と主張し、この理論が大流行していた。私はこれに触発されCPの破れの起源に興味を持った。1975年にオハイオ州立大学の研究員になった頃Ellis達による小林・益川のCPの破れをもちいた素粒子の崩壊に関する論文を読み感銘をうけた。1978頃になると小林・益川理論は大盛況となり、国際会議で実験屋さんがCPのやぶれの位相の数の説明をするのを何回も聞いた。こうして小林・益川理論は私の頭に焼き付いた。

私は、1980年3月に大阪大学助手に採用された。5月頃になってボスの小谷先生から研究室のグループで一緒に研究をしようとの提案があった。どんなテーマが適切かと聞かれ、私はそれまでの研究経過からファミリーであったニュートリノについて研究をしようとの提案した。グループの仲間は、小谷先生の他、客員の土井勝（大阪薬大）さん、博士コース

にいた西浦宏幸さん、修士2年の奥田和子さんだった。まず参考文献として Pontecorvo のレビュー(Physics Report に掲載)を読み始めた。丁度その頃、ロシアからニュートリノに質量があるとする報告が届き(この実験結果は間違いであったが)、ニュートリノについての関心がさらに深まった。私は小林・益川のCPの破れからの連想から、ニュートリノをマヨラナ粒子とするとCPの破れに関して何か新しいことができるのではないと考えた。

私は帰国の前に Paschos と1ヶ月ドルトムント大学に滞在する約束をしており、7月半ばにドイツに向けて出発した。CPの破れに関しては私がドルトムントで研究内容を詰めることになった。当地に着いてまもなくCPの破れの研究を論文にまとめ阪大に送った。論文は大阪のグループで検討され、8月には世界の研究機関にプレプリが送られた。小谷先生達は大変手際よく進めた。

さて、私はドルトムント大学にいたので、8月に論文を Physics Letters の欧州の編集者に送った。その後、マックスプランク研究所に1週間ほど滞在した。そこではアメリカにいた時に行っていた研究の話をしたが、Peccei は私達のニュートリノに関する研究をすでに知っていたらしく、ニュートリノの仕事を続けるのかと聞かれた。私はニュートリノの研究に専念すると伝えると、Are you a neutrino man?ときかれ、Yes と答えたのを覚えている。また、滞在していた近重さんから、CPの破れの話をするよかったのと言われたのは今も覚えている。次いでDESYに1週間ほど滞在した。プレプリの棚に Bilenky 達の論文が並んでいるのを知った。内容は私たちの論文と同様なものであった。私はセミナーでCPの破れの話をし、その後帰国した。

3. マヨラナ位相を実験検証する方法

私がヨーロッパに行っている間、大阪のグループは、ニュートリノがマヨラナ粒子だとするとどのような現象が起こるのかを調べていた。小谷先生は原子核の崩壊に造詣が深く、ニュートリノを伴うモード、ニュートリノがマヨラナ粒子でなければ起こらないニュートリノを伴わないモードに関する論文を集め、それらの検討を行っていた。西浦君の行った計算の結果は、以前の論文では同一粒子の発生に関する統計ファクターの見落としがあることが分かった。私は、これらの作業が終わった頃帰国し、グループは本格的に二重ベータ崩壊の研究に邁進した。二重ベータ崩壊のニュートリノの質量による寄与にはマヨラナ特有のCPの破れの現れることから詳しく調べた。実際、ニュートリノ混合のある場合、質量には混合行列とそれを通してマヨラナニュートリノ特有のCPの破れの位相が現れる。この論文を12月に投稿した。

これらの仕事が一気呵成にできたのは、小谷先生をはじめ、土井さんや西浦さん達研究室一丸で行った成果であった。

4. その後の話

CPの破れの論文を8月に Physics Letters の欧州の編集者に送ったとの話を書いたが、

これは私がドイツにいたことから勘違いした結果ある。9月に入り編集者から、日本からの論文は米国の編集者が扱うことになっているので、そちらに転送したとの手紙を受け取った。私は欧州の編集者が受け取った8月の日付を受け取った日付にしてほしいとの手紙を欧州の編集者に送ったが、結局9月2日が受け取った日付となり、1ヶ月ほど遅れることになった。この不注意さは残念なことだったと今でも思っている。

私たちの夢であったニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の観測精度が、運がよければ、いつ観測されてもおかしくないところまでに進歩してきている。近い将来に発見できることを心から願っている。

研究前線の片隅から

土井 勝

素粒子メダル受賞者の大多数は、物理の研究と教育を目的とする機関に所属しておられる。私の場合は、所属が医療系の私立単科大学で、その物理学研究者が一人きりである点で、特異である。素粒子の苛烈な研究前線からすれば、片隅からの参入と言えるだろう。そんな私が受賞の栄に浴したことは、似通った環境にある研究者の励みになるのではないか。研究職に就くことに苦労しておられる、あるいは就いたものの不十分な研究条件のもとで奮闘しておられる研究者は、少なくないはずである。そのような方々に、私の経験と小規模大学の実情を拙文に記して参考に供したい。

阪大で小谷恒之先生の指導で学位を取得したものの、博士浪人の身となった。僥倖といえるしかないが、不思議な縁で、大阪薬科大学に採用された。当時の在籍学生総数は約 1,000 名、専任教員は 20 数名という小規模大学である。教員は専門教員（薬学教育を担当）と教養教員（教養教育を担当）に分かれ、教養教員は文系 5 名、理系 1 名という陣容であった。

職を得たものの、身近に文献雑誌はなく、物理の議論ができる相手もない。このような孤立状態でまともな研究はできない。小谷先生に研究室に出入りすることを願い出たところ、研究室の鍵と専用の机まで与えられた。

大学の 1 年先輩に当たる高杉英一氏が、小谷研の助手として米国から着任された（1980 年）。大学院生として西浦宏幸氏（D 課程）と奥田和子さん（M 課程）が在籍されていた。標準理論を超える統一理論を構築することが素粒子論の大テーマであった時代である。ニュートリノは、see-saw メカニズムなどを論拠に、マヨラナ型とするのが自然と思われた。そこで、マヨラナ型ニュートリノをテーマに 5 名が共同研究することになった。

最初に、ニュートリノが 0 でない質量を持ち、マヨラナ型である場合に、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊確率をやや荒い近似で計算した。また、CP の破れを表す位相について調べ、マヨラナ型の場合の位相の数はディラック型の場合より多く、その違いはレプトン数が保存しない現象に現れることを示した。これらを 5 名の共著で 2 つの論文にまとめ、Physics Letters に投稿した（1981 年）。素粒子メダルの受賞対象となった論文は、このときのものである。その後は主に、二重ベータ崩壊の理論の精密化に多大のエネルギーを注いだ。一連のニュートリノ研究の集大成として、小谷・高杉・土井の共著で PTP の Supplement に総合報告を書いた（1985 年）。

共同研究が佳境にあった数年間、本務校で授業と会議があるとき以外、小谷研に入り浸っていた。本務校にしてみれば勝手者であったに相違ない。幸い研究を奨励する大学であったから、苦情を聞かされたことはない。

退職して久しいが、在職した大学の実情を紹介する。薬剤師養成が目的なので、教育に熱心である。理系教員の授業担当は週 3~5 コマ程度だが、他に履修指導や生活相談など、学生への細やかな対応が求められる。また、教員が少ない分、各種の委員を免れられない。なお、自身のステータス維持のため、専門性に軸足を置きながら、守備範囲を広げることが大切である。

大学から配分される個人研究費は ≤ 50 万円/年である。掲載論文1報ごとにスポットで研究費の上乗せがあり、パソコンなど高額機器の購入費、学会発表のための出張費、論文投稿料は別に支払われる。研究費が不足したことはない。なお、国内外への留学や学会出席は、授業の穴埋めが可能な限りにおいて、特段の制限はない。

文献の取得に苦勞する。学会が発行する学術誌は会員価格で購読できるので、Physical Review、Physical Review Letters、PTP を自費で購読した。図書館で Physics Letters を購入してもらい、その他の文献は他大学からコピーを取り寄せてもらった。Net 環境の進歩で、今は以前ほどの不便はないのだろう。

採用と昇任では、研究業績は必要条件だが十分条件でない。職位により軽重はあるが、研究業績、学生指導を含む教育業績、大学運営への参画度、社会貢献度そして人物について、実績と可能性の両面から総合的に評価される。

私のような研究環境をどう受け止めるかは、人それぞれだろう。振り返って思うに、曲がりなりにも研究生活を全うできたのは、小谷先生を軸とする研究グループと職場の支えのお陰である。感謝に堪えない。時は移ろう。大阪薬科大学は、大学統合で大阪医科薬科大学となった。小谷恒之先生は2021年6月21日、鬼籍に入られた（享年98）。

マヨラナニュートリノの研究の思い出

西浦宏幸 (現在 大阪工業大学名誉教授、大阪大学非常勤講師)

私はマヨラナニュートリノを研究テーマの一つとして研究を続けてきた。この研究が素粒子論グループに認められて、第12回「素粒子メダル」を小谷恒之先生、高杉英一先生、土井勝先生と共同受賞した。受賞の対象になった研究は「マヨラナニュートリノのCP位相に関する研究」、対象論文は“CP violation in Majorana neutrinos” M. Doi, T. Kotani, H. Nishiura, K. Okuda and E. Takasugi, Physics Letters 102B, 323--326 (1981)である。この研究をしていた1980年頃、私は大阪大学大学院理学研究科のドクターコースの院生で、所属先の阪大教養部小谷研において、ニュートリノがディラック型かマヨラナ型のどちらであるかというニュートリノの性質の問題を調べていた。その当時、ニュートリノ質量が世界的にも興味を持たれていて、その関連でニュートリノの性質の決定について大いに興味を持っていた。ニュートリノがマヨラナ型であればニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊（ニュートリノレス二重ベータ崩壊）が起こることは古くから知られていた。しかし、ニュートリノに質量があればニュートリノ混合があるはずなので、ニュートリノ混合を考慮して現代的にUpdateしたニュートリノレス二重ベータ崩壊の理論を構築しようとしていた。その手始めとしてマヨラナ場の量子化について過去の論文を調査し基礎から勉強し始めた。小谷研では小谷先生を中心とするメンバー数人で毎週火曜日の午後に小谷先生の部屋に集まり夕方近くまで議論していた。院生の人数が少なかったのでアットホームで恵まれた環境で研究できた。このような研究環境のなかで、ニュートリノがマヨラナ型の場合には、クォークセクターの小林-益川の議論と違って、ニュートリノがディラック型の場合よりもレプトン混合行列に含まれるCP位相の数が多いことを発見した。3世代の場合には、ディラック型ニュートリノの場合では出現するCP位相が1つなのに対し、マヨラナ型ニュートリノの場合では3つの独立なCP位相が存在する。さらに、このマヨラナ型ニュートリノの場合に出現する余分なCP位相はニュートリノ振動においては観測できず、レプトン数を破るニュートリノレス二重ベータ崩壊のような過程でのみ観測可能なことがわかった。このようにして、マヨラナ型ニュートリノの関わる新たなCP対称性の破れの問題を認識するようになった。その後、ニュートリノ質量の寄与だけでなくV-Aに加えてV+A弱カレントも考慮し、さらにニュートリノレス二重ベータ崩壊で放出される電子の相対論的な取り扱いも取り入れて二重ベータ崩壊の崩壊の理論計算を進めた。その結果、特に、V-A弱カレントのみの場合でも、ニュートリノに質量があれば、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の崩壊確率にニュートリノ質量だけでなくニュートリノ混合行列（正確にはレプトン混合行列）の中に含まれるマヨラナ固有のCP位相の寄与や混合行列要素の大きさが観測量に入りこむことがわかった。ニュートリノレス二重ベータ崩壊が実験的に見つければニュートリノがマヨラナ型であると言えるが、それだけからはニュートリノ質量の絶対値を数値的に決定するのは難しいことが分かり、ニュー

トリノレス二重ベータ崩壊以外からの情報も併せて決定する必要があるとの認識に至った。マヨラナ型ニュートリノの場合に出現する余分な CP 位相の発見に刺激されて、その後、ミューオン崩壊においてディラック型ニュートリノの場合とマヨラナ型ニュートリノの場合でどのような差異があるかという問題を調べ、マヨラナ型ニュートリノ固有の CP 位相が関与する観測量の定式化も行った。

一方、二重ベータ崩壊の理論計算を行った際、ニュートリノレス二重ベータ崩壊を起こす原子核の核行列要素の理論計算をやり残していた。実際にはその計算をしなかった（できなかった）。小谷先生から核行列要素の計算もしてみませんかと勧められたことがあったが原子核理論に疎い私には手に負えなかったので辞退したことを記憶している。この点に関しては残念であった。核行列要素の理論計算が将来精度よくできるようになることを願っている。

最後に、今回このエッセイの執筆の機会を与えてくださった素粒子論研究編集委員会に感謝します。

2023年1月29日

あひるの水かき—大学院で学んだこと

北海道大学 理学研究院 鈴木久男

1. アヒルの水かき

筆者が1983年修士1年のときに参加した原子核3者若手夏の学校は、おそらく読者のほとんどが感じてきたように、様々な大学の同期と知り合う機会が、大変刺激的であった。ただし、筆者にとって、最も印象に残っているのが、筆者とは同じ名古屋大学同期の池森均氏（現；滋賀教育大学）が、長野の湖でボートに乗ったときの話である。池森氏が友人とボートに乗ったそうだが、自分たちの他は男女ペアであり、友人は他のボートをうらやんだそうである。そのとき池森氏が「あのアヒルを見なさい。優雅に泳いでいるように見えて、水の下ではたえず必死に水かきをしているのだ。」と言ったそうである。これは、むろんパートナーを見つける努力について言ったつもりであり、筆者の座右の銘となり、事実筆者のパートナーを見つけるときにも大いに役立ったのだった。

2. 学部時代

時期をさらに遡って、学部にはいると同期に山田泰彦（現；神戸大学）という大変な秀才がいたこともあって、優秀さではかなわないなとずっと思っていた。そして筆者が学部4年次で名古屋大学素粒子論研究室（E研）に配属されると、私はオーバードクターが10名以上いることに大変驚いた。こうしたことから、とにかく先輩、同期を追い抜かないと研究職を得られないと覚悟を決めて大学院進学を決めた。やるだけやっただめだったら、田舎に帰って地元企業に入ろうと思ったのだ。そのために何が重要かということは良く考えていた。たとえば、学部の卒業旅行にヨーロッパに行ったが、パリで絵を描いて売っている中に日本人が何人もいるのに大変驚いたことがある。多くの日本人の画家志望者が非常に緻密な絵を描いていたが、たぶん絵描きの世界でも優秀さよりも独創性が重要で生計を立てるのが相当大変そうであった。結局研究の世界も独創性が重要だろうが、画家を志すよりはましだろうと思ったのを記憶している。

3. 修士課程

名古屋大学の素粒子論研究室、通称E研では、スタッフに「先生」の称号を付けないことも驚きであった。スタッフも飾るところがなく、過去の物理業績以外では、人間として平等であるという気質があると理解した。逆に言うと、教えてくれる「先生」はいないようなので、大学院生たちは自分たちでなんとかしようという気質があふれていたのだ。新しいトピックが出てきたら、おおよそ先に飛びつくのはスタッフよりもまず学生たちなのである。そうした研究室の雰囲気の中、修士課程でもできるだけ早期に論文を書きたかった。そのため、修士2年からは当時注目を浴びている様々なことを勉強した。むろん修士の学生が新しいことをやることはそんなに生やさしいものではなかった。結局、場の理論に曲がった境界のある場合の繰り込みに興味を持って修士論文を仕上げた。今から考えると動機がはっきりしない論文であるのでどうかとも思うがとにかく研究論文を出したかったのだ。

4. 博士課程1年

1985年に博士課程1年から受託院生として KEK に移った。当時名古屋大学の助手であった山脇氏に勧められて受託性となったのだが、後で聞くと筆者はほっておくと独りよがりの研究になりやすいから、KEK 行きを薦めたとのことであった。また、対人能力の欠如も、筆者自身も認識していたが、KEK で苦勞すればよくなると思つてのことであつた。事実対人能力の欠如は筆者自身も痛烈に認識しており、しかたないので本などで勉強していたのである。同じような受託生とスタッフとも毎日話をする機会ができて、対人関係能力も急速に良くなっていった。現に当時、E 研に顔を出していた坂東昌子さん（後に物理学会会長）からは、筆者が博士課程2年でお会いしたときには、やっと人間らしくなったという、たいへんありがたいお言葉を頂戴したほどである。

さて、当時陸の孤島とも呼ばれていた KEK での生活は単純明快であり、朝9時ごろ部屋に行き、5時ごろまで研究、その後、皆でテニス、テレビゲームをして就寝といった感じであつた。自分の中では、博士課程は将棋の奨励会と同じでプロ予備軍であり、できるだけプロフェッショナルな生活パターンとしたかつた。また、そのほうがスタッフとの交流が多く、得るところが多くなると思つたのだ。当時 KEK 理論部のスタッフは、菅原寛孝氏を筆頭に、小林誠氏、湯川哲之氏、大川正典氏、菅本晶夫氏、そして風間洋一氏など、吉村太彦氏を除き、いずれもテニスが好きであつた。これらのスタッフやその他受託院生とほぼ毎日のテニスの練習のかいもあつてか、KEK のテニス大会で理論部チームが準優勝したこともあつた。ただし多少作戦も必要であつた。家庭を持つ他のほとんどの職員は、昼休みにテニスをしているので、我々がなれているナイターでの試合をあえて行うように仕向けたことも功を奏した。テレビゲームは、筆者が研究室に持ち込み他の受託生たちと毎日のようにやっていたが、野球ゲームがあまりに盛り上がりすぎて一時禁止になってしまったこともあつた。研究面では、様々な話題のセミナーに出て話題探しをしたが、博士課程1年では、スタッフと共同でできそうなことがなかつた。物理に関してのスタッフとの会話も面白かつたし、そこから得るものも多かつた。基本的に先生はいないので、板前は見て覚えると同様にもなるのだが、違いがわからない人は上達しない。

博士課程1年当時アノマリーが魅力的に思えた。特に、アノマリーを経路積分のメジャーから導出する、有名な藤川メソッドが非常に独創的で魅力的であつた。しかし、通常の摂動論的な導出との関係が自分なりにわからなかつた。そこで、摂動の計算としては、様々なアノマリーが固有時積分の境界として現れることで、藤川の方法と同等の形となることを示し、それを応用した結果を *Physical Review* と *Physical Review Letters* で出版した。何も良くわからなかつたので、勝手にそれらの雑誌へ投稿したのだが、後で周りからは驚かれた。

5. 博士課程2年

博士課程2年になってからもいろいろ話題を探していたが、当時菅本晶夫氏が挑戦していたヘテロティック弦のアノマリーの計算を手伝うことにした。菅本氏がアノマリーの評価に通常よく使われている正則化を用いると、モジュラー普遍性を壊してしまつて困つていたのである。様々な正則化を試していたノートをいただいて大変驚いた。そこで、点粒子

の場合に用いていた方法を用いて見ると、ヘテロティックストリングの場合も、アノマリーはモジュライの境界の値となることがわかったので、それを菅本氏に説明した。結局アノマリーは正則化から出ると思い込んでいたが、ヘテロティックストリングは有限なので、正則化はいらないという自然な結果であったのだ。すると、菅本氏がモジュライの境界となることを示すだけでアノマリーがないことを示すことができることを指摘してくれたのだった。そこでこの結果を 1986 年に *Physical Review Letters* で菅本氏と共著で出版した。また、タイプ I での結果は、筆者単著で出版した。

ここで、菅本氏が、名前をアルファベット順では菅本、鈴木となるが、鈴木、菅本にしようと言ったのだ。たぶん、筆者の将来のことを考えてくれたのだろうが、筆者はこの提案を受け入れたことを非常に後悔した。ちなみに、筆者は共同研究に際してそれぞれの貢献を公表するのは妥当ではないと思っている。それは、何かどちらかが主導したとかいう話になる恐れがあるからである。しかし、本稿であえてそれに触れるのは、素粒子の研究者を志している読者に伝えたいことがあるからである。共同研究はあくまでそれぞれの良いところが発揮されての研究であるので、どちらが良いという話ではない。先にどちらが解決策を思いつくかは共同研究の結果の一つであって、それをどちらが主導したという話とは全くことなるのである。素粒子論のコミュニティーでは、共同研究はアルファベット順であるのは、こうした精神に基づいていることである。

少し当時菅本氏から学んだことを記しておこう。ヘテロティック弦のアノマリーに着目したのは菅本氏であるので、筆者は企画者として菅本氏を尊敬していた。また、菅本氏はわからないところをすぐに質問してくれて、私の理解の助けにもなった。セミナーなどでもわからないところをすぐに質問していて、自分なりの言葉で説明して納得していた。日本では使われない用語であるが、多くのプロフェッショナルで必要となる能力としてアクティブヒアリングという言葉がある。これは、会話では肯定的に相づちをうち、考えながら聴き、疑問点をあげ、自分なりに要約していくというスキルである。筆者はこのアクティブヒアリングの重要性を菅本氏から学んだ。物理の研究以外でも活躍するこの能力は、今では筆者の強い武器の一つでもある。また菅本氏は一見にこやかであるが、逆にすべてを理解しようとするので、氏の大変な批評能力も勉強になった。ただ、こちらに任せる作業があると手伝ってくれなくなることが当時不満であったが、後になって学生と共同研究するときになって始めて、それは学生に責任感を持たせるためであることに気づいたのだ。それにしても、研究は一人でやっているときよりも複数のほうが遙かに効率が良いことに気づいた。そのためには対人的スキルが非常に重要となり、意識して周りの人と交流するようになった。

博士課程 2 年のとき、東島清氏が KEK に赴任してきて筆者は新たな刺激を受けた。東島氏からは、その後阪大での助手の期間も含めて多数のことを教えてもらったが、当時最も印象に残っているのは、研究者の善し悪しの判断についてであった。当時から助教になってから活発でなくなったスタッフが多数おり、このため一つのテーマで研究成果があっても十分でなく、いくつかのテーマで研究をしたほうが良いとのことであった。そのため、筆者は

当時アノマリーで少し名が売れていたが、アノマリーの専門家と言われるのがいやであった。とにかく新しい研究テーマがほしくて、セミナーで話を聞くたび関連して何かできないかを考えていたし、他の受託院生と企画したりもした。ただ、プロジェクトはうまくいかなかったものも多かった。

その後、CERN での長期滞在を終えて理論部に帰ってきた風間洋一氏と共に、Orbifold における Twist field のバーテックスの構成の構築という企画を考えて、結果を 1987 年に出版した。当時筆者は、技術では風間氏にかなわないので、アイデアで勝負しようとしていたように思う。風間氏は一見厳しく見えるが、実際におたがいに馬鹿なようなアイデアや夢を気軽に言い合えて筆者とは相性が良かったのだ。もっとも筆者が馬鹿なことを言えるようになったのは、すでに論文をいくつか書いていたという自信からきているというのも事実であったろう。また、論文には動機が最も重要であると教えてもらったが、これは注目される研究を出し研究職に就職することを目指す当時の筆者にも必須であった。

6. 博士課程 3 年から PD 時代

さて、筆者が博士課程 3 年になると、学術振興会特別研究員に採用はされた。もともと、やるだけやってだめだったら地元に戻って企業に就職しようと大学院に進学したのだが、ドクター 3 年になっても、これから自分が研究者としてやっていけるかどうかはわからなかった。家族も学者になるのは相当難しいと近所のひとからも聞いていたのだろうが、家族としては、本人にはやるだけやらせてみようと思っていたのだろう。当時筆者本人にも筆者の周りの人にも将来のことはわからないが、このことはどの社会でも同じことなのである。結局人生は何をなしたかのパフォーマンス評価しかされないと厳しさがあるのだ。素粒子の研究以外では、将来企業に行くかもしれないということで、企業情報や企業関係の小説なども読んでいた。先の見えない大学院時代を通じて、基本的に、自分の将来に関してのリスクマネジメントは、研究におけるリスクマネジメント同様に考えざるを得なかった。博士課程 3 年のときに、学術振興会 DC 特別研究員となって、短期的には収入が保証されたが、逆に素粒子研究のやめ時が延びたと感じて怖かった。

筆者にとって、加藤光祐氏が KEK に赴任してきたことは幸運であった。これで、東島氏と共に共形場理論の専門家スタッフが増えたのである。超弦理論の初期の研究から、時は共形場理論の時代に入っていた。1987 年、 $N=2$ super conformal minimal model によって超弦理論を構成するという、Gepner モデルが登場した。これは Calabi-Yau コンパクト化と直接対応がつくという、当時はかなり非自明で魅力的なものであった。KEK 理論部でも興味を持つ人が多く、Gepner 模型の文献紹介をやろうということになった。筆者は当時共形場理論の基本をほとんど知らないのにも関わらず Gepner モデル紹介担当となった。そしてそれらをつたなくも紹介すると共に、Gepner が $SU(2)/U(1)$ モデルをパラフェルミオンと呼んでいたものを、特定のレベルに限ってではあるが、superfield を用いて超対称性を入れ、 $SU(N)$ 群に拡張できることを説明した。当時ドクター 3 年で焦っていた筆者は、とにかく論文を出さなければと思い、できればこの一般化されたパラフェルミオンなるものを出版し

たかった。だが、特定のレベルだけで成功していて、たいした結果ではないという加藤氏の意見を聞き、論文とするのをあきらめたのだ。当時新しい $N=2$ のモデルを作りたいと思っていたが、加藤氏は $N=2$ の minimal model に関しては、 $SU(2) \times U(1)/U(1)$ という構造のコセット模型としてあらわされ、それ以外コセットでは作れないと教えてくれた。専門家である加藤氏がコセットで作るのに否定的な意見だったため、風間氏を誘って、自由ボソンを用いて $N=2$ 超対称性共形場模型を作ることを始めた。道具がはっきりしていて有望そうなのだが、風間氏が詳細に見てみると細部でうまくいかなかった。結局はその方法でもうまくいくのではあるが、当時はこの方向ではだめだと思っていたので、他の方法も探ってみることにした。ふと思い出して、先に Gepner のパラフェルミオンの一般のゲージ群への superfield を用いての単純な拡張だと思っていたが、実はこれは超対称性を保って非可換群を群のランク分の $U(1)$ で割ったものができていたことに気づいたのだ。後はそれを一般的に拡張していくだけではあった。当時学生でつめの甘い筆者と、慎重でかつ方向性を示してくれた風間氏との共同研究がうまくいった。多くの場合言ったとたんだめだと思ふアイデアを言い合えることも重要であった。この研究がほぼ完成したのは、博士課程3年の終わりからPD学振特別研究員として、東京大学駒場に行ってからのことである。当時、 $N=2$ のモデルは、minimal model に限られるというのが業界の思い込みであったので、出版にはかなり注目を浴びることになった。投稿した論文は、レフェリーからは、 $N=2$ は minimal model しかあり得ないので間違いであるというコメント付きで返ってきていたが、その後海外の権威ある研究者たちが Kazama-Suzuki model として引用してくれるようになって初めて、出版が認められたのだ。また、その後外国での評価を受けて日本でも評価されるようになった。

駒場では、当時学生であった、伊藤克司氏や山口昌弘氏と知り合ったが、一緒にテニス合宿にいたり、やはり私が研究室にゲームを持ち込んで一緒に遊んでいたため、大学院生には迷惑をかけた印象しかない。とりあえず、筆者が阪大の助手として移ったことで、筆者が駒場にいたのはたった半年であったことは、彼らにとっては救いではあったと思う。ちなみに、風間氏の勧めで学振として駒場に行くことが決まったのちに始めて、風間氏が駒場に移ることを知って驚いた。風間氏は、勧めた当時はまだ赴任が決まっていなかったのだと言われたのだが、とりあえず研究には大変都合が良かった。筆者には東京生活は刺激的で、午前中に研究がうまくいくと午後から東京の町の散策に出ていて不在としていることも多々あった。

ところで、筆者の説明能力に関して大学院時代を通じてかなり稚拙であった。風間氏からも、さんざん説明が下手だと言われ続けてきたが、風間氏からようやく説明が良くなったと言われたのは、筆者が博士号を取って東京大学駒場に学振研究員として移ってからなのである。このようにしてうまく話すコツがわかったのは大学院卒業後からなのである。そのため、現在北大の学生の発表に対して、知らない記号の数が多すぎるなど指摘しているとき、自分の当時のことを棚に上げてという気持ちを感じることもあるのだ。

ここまで、結局うまくいった研究を述べているだけだが、学生の当時からうまくいかない研究の方が遙かに多かった。セミナーを聞くために何か面白そうなことができないかを絶えず考えていた。また、世に出た論文でも思った通りのレベルまでできたものはなかった。たとえばうまくいったと見える Kazama-Suzuki model にしても、幾何学的解釈などの目標には届かなかったのだ。結局アイデアが大事なのだが、アイデアのほとんどは失敗となる。ただし、アイデアそのものに優劣はなく、テーマとの相性が悪いだけで、他の視点からみると重要になることもあった。

7. あひるの水かきで学んだこと

さてここまで、筆者の主として大学院時代の話を書いてきたが、結局、筆者が大学院で何を学んだのだろうか？ 筆者は、大学院入学後から現在まで研究や大学組織のためのあひるのみずかきをしてきたのではないか。筆者の大学院での試行錯誤は、新しい価値の創造への努力を習慣化させ、素粒子研究以外のことについても企画力とアイデアが最も重要であるというスタンスは変わっていない。筆者の大学院時代から現在にいたるまで、企画し馬鹿なアイデアを多数出し、試行錯誤するという、デザイン思考の繰り返しであった。このことは素粒子の研究だけに限らない。筆者は北海道大学に赴任してからは、素粒子だけでなく教育研究もし、大学の管理職により大学の教育改革の企画から実施まで担当することになった。教育研究では、日本で初めてクリッカーを用いた授業をしたり、統合科学授業などで文理融合的な科目を立ち上げたりとしてきた。しかし、これらは単に海外で行われている教育研究の最先端を調べ、日本の実状に合わせて行うだけであり、筆者にとっては、素粒子の研究よりも先が読めるという点で遙かに楽であった。また、大学の教育改革のほうでは、北海道大学で2013年から総合教育部長として、アメリカ式のGPA制度の導入、入試改革や留学生特別プログラム(Integrated Science Program)の立ち上げなどにも関わり、ときに絶望的な状況の中で新しいアイデアを出して切り抜けてきたこともあった。このためには学生時代や大阪大学での助教時代に、筆者と重力波などで共同研究をし、阪大の高等教育センター長でもあった高杉英一氏らから学んだ対人的駆け引きのスキルも重要となった。また組織理解に関する基本については、後に大阪大学の副学長になった東島清氏が、筆者の大学院時代に教えてくれていた。むろん大学院卒業以降に学んだことの方が多く、KEK やその後大阪大学に赴任した後も、雑談として話してくれた中で、東島氏の鋭い客観的観察力や、組織の天秤たるに必要な能力の認識から学ぶことが多かった。しかし、なんと言っても東島氏が、大学院時代に様々な考え方の人々に配慮していくことの重要性を教えてくれた意義は大きかったと思う。創造性を支えるために様々なスキルが重要であることも大学院時代に気づいたことである。まず、知的能力としては、根本から考え直す批判的思考、創造的思考、戦略的思考、高い到達目標設定力、チーム思考、リスクマネジメント。行動特性として、順応性、細部へのこだわり、柔軟性、俊敏性、独自性、粘り強さである。また対人的スキルとしては、説得力のあるコミュニケーション、調整能力、アクティブリスニング(聞きながら考え、疑問を持つこと)、他者へのおもいやりと畏敬の念などがあげられる。これらすべ

ては研究者として必要な能力であるとともに、社会で必要とされる能力であると今は確信している。優秀さの欠如のためにそれ以外のスキルで補強する態度は、実は正解であったのだと思う。そして、研究成果のためにしてきたあひるの水かきとして向上させてきたこれらの能力は、将来企業に行っても有効なスキルとなるという、当時の筆者の人生におけるリスクマネジメントの一つでもあったのだ。

ランダム面-ゲージ場、量子重力、ひも理論の交差するところ—

川合 光 2023年1月 台北にて

75周年記念に向けて、素粒子メダルを受賞した研究についての記事を依頼されましたので、私にとってもいい機会だと思い、その研究に至った経緯を思い出しながら書いてみました。

ランダム面のユニバーサリティ

私が大学院に進学したのは1978年ですが、そのころにはゲージ理論の摂動論的側面はほぼ完全に理解されていました。そのため、当時の素粒子論・場の理論の主要な目標の一つは、閉じ込めなどの非摂動的性質を理解することでした。具体的にいうと、QCDからハドロンの弦理論が導かれるかという問題です。これが正しい主張であることは、格子ゲージ理論の数値計算によりほぼ確実ですが、今でも解析的な説明には成功していません。

ハドロンの弦理論の直観的描像の一つは、格子ゲージ理論における強結合展開です。例えば Wilson loop の強結合展開はループを境界とするいろいろな面についての和で与えられますし、また、真空のエネルギーは、閉じた面についての和となります。このように、いろいろな面についての和を考えることを、ランダム面といいます。

これは、スカラー場の Green 関数がいろいろな経路の和、すなわち、ランダムウォークで表されることのまっすぐな拡張と思われまます。スカラー場の場合、最も基本的な自由スカラー場は、自由なランダムウォーク、すなわち、経路が自分自身と交わっても特別な重みがかからないという性質をもったものと対応しています。そうすると、ランダム面の場合も、自由ランダム面、すなわち、面が自分自身と交わっても特別な重みがかからないようなものが最も基本的であるように思われます。

自由ランダムウォークは、ステップ数が大きい極限、すなわち連続極限では、中心極限定理によりユニバーサルな形をもちます。実際、 D 次元の格子化された時空内の2点 x, y を L ステップで結ぶ経路の総数は、 L が大きいとき、次のように書けます。

$$n(x, y; L) \sim \text{const.} \kappa^L L^{-\frac{D}{2}} \exp\left(-\frac{(x-y)^2}{2La^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 κ, a は格子の形、すなわち、正則化に依存する定数です。特に、 L ステップからなる閉じた経路の数は

$$n(L) \sim \text{const.} \kappa^L L^{-\frac{D}{2}-1} \quad (2)$$

となります。ここで、 L の指数に -1 が現れたのは、閉じた経路上のどの点を出発点=終点とみなしても、閉じた経路としては同じだからです。式(1)を、Feynman 流の固有時間を使ったプロパゲーターと比べると、 La^2 は固有時間に対応することがわかります。(ただし、 $\frac{1}{a^2} \log(\kappa) - m_0^2 = -m^2$ となるように、bare mass m_0^2 を調整します。) また、連続極限では $L \propto a^{-2}$ 、すなわち、ランダムウォークの Hausdorff 次元が2であることがわかります。

これを、ランダム面に拡張したくなるのは自然です。そうすると、(1)に対応するものは、 k 個の閉じたループ C_1, \dots, C_k を境界とするような、 A 枚の **plaquette** からなる Euler 数 χ のランダム面の総数 $n_\chi(C_1, \dots, C_k; A)$ となります。また、(2)に対応するものは、 A 枚の **plaquette** からなる Euler 数 χ の閉じたランダム面の総数 $n_\chi(A)$ です。前者は、 k 個のループの位置や形状に依存する複雑なものですが、後者は χ と A だけの関数です。式(2)が中心極限定理の帰結であったことを考えると、 $n_\chi(A)$ も A が大きいときは、正則化の細部に依らないユニバーサルなものになっているはずです。そこで、瀬尾さん、菅本さん、宇川さん、米谷さんらという議論していただいた結果、1981年ころに次のような予想を立てました (文献[1])。

$$n_\chi(A) \sim \text{const.} \kappa^A A^{-b_\chi - 1} \quad (3)$$

ここで、 b_χ は時空次元と χ だけに依存するユニバーサルな量です。この母関数は収束半径 $t_c = \frac{1}{\kappa}$ の付近で、 $F_\chi(t) = \sum_{A=0}^{\infty} n_\chi(A) t^A \sim \text{const.} (t_c - t)^{b_\chi} + (t$ について正則) のようにふるまうので、 $b_\chi - 2$ のことを **string susceptibility** の臨界指数とよぶこともあります。

これが正しいことは、6年後に **Liouville** 理論を完成させることにより示せました。それが、素粒子メダルの対象となった **Distler** 氏との共同研究です (文献[5])。しかしながら残念なことに、時空次元が1より大きいときは、自由ランダム面が存在できないことも同時に判明してしまいました。この問題は $c = 1$ (あるいは $D = 1$) バリアーの問題といわれ、いまでも未解決です。

また、1981年当時は、**large-N** についての興味深い研究がいろいろされていました。特に、米谷さんの一連の研究は、時空に広がった場の自由度が **large-N** で内部自由度に転嫁する様子を明確に示したものであり、大変印象的でした。そのような流れで、私も自然に **large-N** ゲージ理論の場合のランダム面について考えました。**Large-N** では、ランダム面のトポロジーは **Wilson loop** は円盤に、真空のエネルギー密度は球面になります。ここで時空が周期的境界条件を満たしているとします。そうすると、円盤や球面はトーラスには巻き付きませんから、ランダム面による表示が成り立つ限り、すなわち、強結合展開の収束半径内では、**large-N** ゲージ理論の **Wilson loop** やエネルギー密度は時空の体積に依存しないということになります (文献[7])。これは、**large-N reduction** とよばれています。特に、1点だけからなる **large-N** 格子ゲージ理論は、強結合領域、すなわち、中心不変性が自発的に破れない領域では、無限に広がった理論と等価です。いいかえると、時空自体が内部自由度から生成されるわけです。閉じた弦が重力を表すという米谷さん、**Scherk** らの結果はよく知られていましたので、この結果は量子重力の基礎になりうると感じました。臨界弦と非臨界弦の違いのため、しばらくこの方向は進展しませんでした。およそ15年後に、石橋さん、北澤さん、土屋さんとの共同研究で実現しました (文献[8])。

非臨界弦とランダム面

ランダムウォークが1次元の重力と等価であったことの拡張として、ランダム面は2次元の重力と等価であると予想されます。(この予想は多くの人によって自然発生的になされ

たと思います。) 例えば、上の $n_\chi(A)$ は次のような量と等しいはずだということです。(ここで、 M は Euler 数が χ の閉じた 2 次元面です。)

$$\begin{aligned} Z_\chi^{(0)}(A) &= \int \mathcal{D}g \mathcal{D}X \exp(-S[g, X]) \delta\left(\int_M \sqrt{g} - A\right), \\ S[g, X] &= \int_M \sqrt{g} \frac{1}{2} g^{ab} \eta_{\mu\nu} \partial_a X^\mu \partial_b X^\nu. \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、紫外発散の振る舞いを知っておくことが大事です。まず、各 g に対して X の経路積分を行うと、 X は曲がった 2 次元時空中の自由スカラー場ですから、自由エネルギーに現れる紫外発散は $C_1 \Lambda^2 \int \sqrt{g} + C_2 \log(\Lambda) \int \sqrt{g} R$ の形です。すなわち、

$$\begin{aligned} \int \mathcal{D}X \exp(-S[g, X]) &= (\kappa_\chi)^A (\mu_\chi)^\chi Z_\chi[g], \\ \kappa_\chi &= \exp(C_1 \Lambda^2), \quad \mu_\chi = \exp(4\pi C_2 \log(\Lambda)). \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $Z_\chi[g]$ は紫外発散を含まない g の汎関数です。 g に対する経路積分も同じ形の紫外発散を与え、結局、紫外発散のない有限な量 $Z_\chi(A)$ を使って

$$Z_\chi^{(0)}(A) = \kappa^A \mu^\chi Z_\chi(A) \quad (6)$$

と書けます。この κ が式(3)の κ に対応するものですが、上の議論からわかるように宇宙項のくりこみで吸収される量です。 μ は弦理論では string coupling にくりこまれる量ですが、ここでは各 χ に対して個別に議論しているので重要ではありません。

このように紫外発散を分離したのち、式(4)は共形ゲージ $g_{ab}(x) = \hat{g}_{ab}(\tau, x) \exp(\phi(x))$ で次のように表されます。

$$\begin{aligned} Z_\chi(A) &= \int d\tau Z_{bc}[\hat{g}] Z_\chi[\hat{g}] \int \mathcal{D}\phi \exp\left(\frac{D-26}{48\pi} S_L[\hat{g}, \phi]\right) \delta\left(\int_M \sqrt{\hat{g}} \exp(\phi) - A\right), \\ S_L[\hat{g}, \phi] &= \int_M \sqrt{\hat{g}} \left(\frac{1}{2} \hat{g}^{ab} \partial_a \phi \partial_b \phi + \hat{R}\phi\right). \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $Z_{bc}[\hat{g}]$, $Z_\chi[\hat{g}]$ はそれぞれ、背景計量が \hat{g} のときの bc ゴーストと、 D 個のスカラー場の分配関数であり、 $S_L[\hat{g}, \phi]$ はいわゆる Liouville 作用の運動項の部分です。式(4)で D 個のスカラー場のかわりに、一般の場を考えることもできます。特に共形場の場合は、式(7)は、 $Z_\chi[\hat{g}]$, D をその共形場の分配関数と中心電荷 c に置き換えたものになります。

式(4)あるいは式(7)のように、2次元計量の共形モードの自由度を残したものを非臨界弦とよび、ゲージ自由度として落とした臨界弦と区別しています。上にも述べましたが、現在、非臨界弦がうまく定式化できているのは、 $c \leq 1$ のときのみです。

量子重力と力学的単体分割

式(4)は格子化した時空内のランダム面の連続極限として自然なものですが、上で述べたように、2次元量子重力の特別な場合ともみなせます。ここで量子重力とは、局所場と計量場からなる系についての経路積分という意味です。量子重力は、構成的定式化があれば便利ですが、そのとき重要なのは、長距離の極限が一般座標変換に対して不変であることです。ここで長距離とっているのは、カットオフの長さ a に比べて長距離という意味です。そうすると、連続極限 ($a \rightarrow 0$) が存在するなら、少数のパラメーターの微調整によ

り、有効作用はなじみのものになるはずだからです。

これに対する一つの答えが、力学的単体分割(DT)です。これは、時空をランダムな格子に離散化し、その離散化の可能性について足し上げるというものです。例えば、時空のトポロジーが2次元球面のときは、2次元球面の可能な3角分割をすべて考え、各3角分割上に導入した場の分配関数をすべて足し上げるというものです。ここで、ユニバーサリティのおかげで、分割の細かい定義は重要ではなく、例えば、4角分割であったり、3角と4角が混ざっていたりしてかまいません。そうすると、球面上の任意の2つのディスクは同じ揺らぎをもつことがわかります。なぜならば、それぞれの内部にすべての可能な3角分割が現れるからです。つまり、一般座標変換に対する不変性を、“任意の2つのディスクの量子揺らぎが1対1に対応する”ことと解釈すれば、DTはそれを自動的に満たしているといっているわけですね。DTのアイデアも、ランダム面について考えていた多くの人が同時多発的に気づいたのだと思いますが、Ambjørn氏がBoulatov氏が最初だといっていたのを記憶しています。(私自身は、Weigarten模型のFeynman図が、格子時空でのランダム面を世界面のランダム4角分割に写したものに他ならないことから認識していました。)

その後の発展によって、時空が2次元の場合はDTが正しいことが、 $c \leq 1$ の場合に確認されました。実際、その場合のDTの分配関数は行列模型で計算できますが、連続理論の厳密解(文献[4][5][6])はその結果と一致していました。また、 $c > 1$ のときはDTの連続極限がとれないこともモンテカルロ計算で確認できます。

時空が4次元の場合には、いくつかの数値計算がありますが、DTの連続極限が正しくEinstein-Hilbert作用に対応しているのか、それとも、ユニタリティを壊した R^2 型の作用に対応しているのか明らかではないようです。(個人的見解は後者です。)

Liouville 理論の勘所

上にも述べましたように、自由ランダム面に関する2つの予想、すなわち、性質(3)、および、非臨界弦(4)との等価性は、 $c \leq 1$ という制約の下で正しかったわけですが、それまでには紆余曲折がありました。まず、上の論文[1]が出たすぐ後に、Zamolodchikov氏が式(7)を計算したという論文を出しました(文献[2])。式(7)はPolyakovがすでに得ていたのですが、この先には2つの難関があります。一つは経路積分のmeasure $\mathcal{D}\phi$ をどう定義するか、もう一つは宇宙項 $\int_M \sqrt{\hat{g}} \exp(\phi)$ をどうくりこむかという問題です。これを解決したのが我々の論文[5]ですが、時間の順に起きたことを述べてみたいと思います。

論文[2]では、「Liouville理論の相互作用 $\exp(\phi)$ はsine-Gordonと同様に可積分なはずであり、そうすると1-loopで厳密な値が得られると予想される。」として、 ϕ についての1-loopの計算から球面の場合の臨界指数 $b_{\chi=2}$ を求めました。それが正しいかどうか調べるために、Cornell大学の院生だった岡本さんと共同で、 $D = 2,3,4$ の正方格子の時空の場合に、数値計算をしました(文献[3])。具体的には、large-N reduced Weingarten模型のモ

ンテカルロ計算です。結果は、 D にはほとんど依存せず、 $b_{\chi=2} \sim 1.5$ となりました。これは、 $D = \infty$ のときに厳密となる平均場近似と一致しています。すなわち、ランダム面は2次元的には広がらず、無限に分岐したサンゴのような構造になっています（これらの結果は、岡本さんの学位論文の一部となっています。）同時多発的にこれに気づいた人達も多く、コペンハーゲンの人たちは **branched polymer** とよんでいます。大分あとになります。これが $c = 1$ のバリアーの正体であることを明確に示せましたので、KEKでの格子ゲージ理論の国際会議で行ったランダム面のレビューのなかで報告しておきました（文献[9]）。

いずれにしても数値計算の結果は文献[2]と大きくずれており、その差を理解するために、式(7)についていろいろ計算をしました。その結果、ループ展開は $D = -\infty$ のまわりの摂動展開にすぎず、むしろ、Liouville理論の本当の問題点は、 ϕ の **measure** を正しく定義し、宇宙項のくりこみの不定性を解消することであると確信しました。

臨界弦

そうこうするうちに、統一理論としての弦理論が流行になりましたが、かなり異様な雰囲気だったように思います。実際、1984年から1~2年の短い間に、GreenとSchwarzによるアノマリー相殺機構、WittenたちによるCalabi-Yau多様体へのコンパクト化、Grossたちによるヘテロティック弦、という3つの仕事が立て続けに現れました。さらに一部の人たちのカリスマ性も相まって、さも、ものすごく特別な唯一のものが見つかった、これは千載一遇のチャンスであり乗り遅れてはいけない、といった高揚感と緊迫感がありました。

私自身は、上記の **large-N reduction** 以来、重力としての臨界弦に興味を持っていました。また、ゲージ理論の次の素粒子論の方向性はやはり量子重力だろうと思い、Schwarzの **Physics Reports** などを読みこんでいました。そのため、この流行に驚きはなく、ヘテロティック弦は大変面白いと思いましたが、他の2つはあまり本質的ではないと感じました。アノマリー相殺は、その指摘自体は大変重要ですが、弦理論の紫外有限性からの当然の帰結に思えました。また、Calabi-Yauコンパクト化は、なぜ4次元の $N=1$ 超対称性を金科玉条とするのか、あるいは、なぜ世界面上で大域的超対称性が $N=2$ に拡大した場合を特別と思うのか、がしっくりきませんでした。

そこで、Lewellen氏、Tye氏と共同で、10次元からのコンパクト化を一旦忘れて、平坦な4次元時空をもつ一般の臨界弦理論を構成してみることにしました。すなわち、ゴーストの寄与を足したときに左右の全中心電荷がゼロになるように、世界面上に、時空を表す自由場に加えてカイラルな共形場を導入します。さらに、モジュラー不変性およびスピント統計の関係が成り立つように、それらの境界条件を組み合わせればいいわけです。

（非臨界弦の経験からも、そのようなものは極めて自然です。）今流に言えば、おそらくこれが弦理論の摂動的真空の一般形ですが、すべての可能性を具体的に書き下すのは、共

形場の分類と同じレベルの難しい問題です。

しかし、ごく特別な場合ですが、共形場として自由フェルミオンの集団を考えると、許される境界条件の組み合わせの一般形を具体的に表すことができます (文献[10])。この場合も、境界条件の組を生成する手続きがあるというだけで、時空が 10 次元の場合以外は分類まではできません。そこで、ヘテロティック弦の場合に、できるだけ多くの時空が 4 次元の真空を構成し、その構造を調べました。その結果、タキオンがない安定な真空に限ってみても、超対称性をもたない真空の方が持つ真空よりずっと多いことがわかりました。タキオンがないということは、モジュラー不変性から、プランクスケールより高いエネルギーで漸近的に、ボゾンとフェルミオンが同数存在することを意味します。よって、タキオンがなく超対称性がない真空とは、超対称性がプランクスケールで自発的に破れた真空だといえます。上の結果は、我々の世界もそういう真空だと考える方が自然だといっているわけです。また、同様な解析から、余分な $U(1)$ ゲージ場はあるものの、GUT 的なゲージ構造をもつ真空よりも、標準模型と同じゲージ構造をもつ真空の方がたくさんあることがわかりました。これは、プランクスケールのすぐ下で GUT を通さずに標準模型が現れること、まさに砂漠が実現していると考えた方が自然であることを意味しています。このような理由から、低エネルギーに超対称性はないはずだと常々いつてきましたが、LHC のおかげで少数派の立場から解放されました。また、砂漠の方も、LHC の結果はかなり強く示唆しているように見えます (文献[11] [12])。

Liouville 理論のくりこみ

この大流行は 4 年くらいで冷めましたが、結局この間になされたのは、臨界弦の摂動論的構造の理解であったといえます。その結果、臨界弦には無数に多くの摂動論的真空があることがわかり、検証可能な予言をするためには、非摂動効果の理解、あるいは構成的な定式化が不可欠であることがわかりました。(その後 1990 年代に、この方向の進展があったわけですが、いまだに満足な形になっていません。) そこで、この間に臨界弦で得た経験を生かして、非臨界弦についてもう一度アタックしてみようと思っていました。

そうこうするうちに、文献[4]が現れました。これは、2 次元重力を光円錐ゲージで解き、球面の場合の臨界指数 $b_{\chi=2}$ を計算した結果、行列模型で得られたものと一致しているというものでした。一方、上に述べたように、Liouville 理論の問題点は測度の定義と宇宙項のくりこみの 2 点だと思っていましたので、Distler 氏と一緒に、それをどうすれば、同じ結果がでるか議論しました。その結果、非常に簡単な構造が判明し、球面に限らず一般のトポロジーの場合の臨界指数を与えることができました。この仕事は、ほぼ同時に David によってもなされました (文献[5] [6])。

以下に詳しく述べますが、我々の結果は大変単純なもので、なぜ文献[4]でやらなかったのかむしろ疑問に思いました。それで、半年ほど後に Zamolodchikov 氏にあったときに聞いてみました。結構驚いたのですが、その当時彼らは、我々の結果を完全には信じておら

ず、 \sqrt{g} がゼロの付近は Liouville 場 ϕ では表しきれないという感触を持っていたようでした。「自分たち（光円錐ゲージ）はトポロジーの制御を失うが、あなたたち（共形ゲージ）は宇宙項の制御を失う。」といわれたので反論したので覚えています。そののち、彼は共形ゲージでの重要な計算をいくつか発表していますので、今は違うと思いますが、確かに、当時何人かの人から同様の質問を受けたことがあります。以下、詳細です。

Liouville 理論は、式(7)で表される背景計量 \hat{g} 上の理論ですが、経路積分の測度 $\mathcal{D}\phi$ は、関数空間の計量 $\|\delta\phi\|^2 = \int \sqrt{\hat{g}} e^\phi (\delta\phi)^2$ から誘導されています。それを普通の平坦な測度 $\mathcal{D}_0\phi$ にとり換えると、超局所的な変換のヤコビアンは局所的な作用の指数関数の形に書けるので、 $\mathcal{D}\phi = \mathcal{D}_0\phi \exp(-S_1[\hat{g}, \phi])$ となるはずですが、(7)の作用 $-\frac{D-26}{48\pi} S_L[\hat{g}, \phi]$ を適当に補正すれば、測度は平坦としていいわけです。これは一種の輻射補正ですから、補正後の作用を定めるためには、何らかのくりこみ条件を指定する必要があります。次のような簡単な議論から、それが、 \hat{g}_{ab} に対する Weyl 変換

$$\hat{g}_{ab}(\tau, x) \mapsto \hat{g}_{ab}(\tau, x) e^{\sigma(x)} \quad (8)$$

に対する不変性であることがわかります。まず、式(7)は、式(4)の g_{ab} に共形ゲージの式 $g_{ab} = \hat{g}_{ab}(\tau) e^\phi$ を代入して書き換えたものでした。ですから、 \hat{g}_{ab} を式(8)のように置き換えても、その変化は ϕ のシフト

$$\phi(x) \mapsto \phi(x) - \sigma(x) \quad (9)$$

で相殺されます。これは、式(7)を背景計量 \hat{g}_{ab} 上の理論と見なしたとき、Weyl 不変であること、すなわち、全中心電荷がゼロの共形場だということです。このことから、 ϕ は、 \hat{g}_{ab} を背景計量とみなした時、中心電荷が $26 - D$ の共形場であるべきだとわかります。さらに、Weyl 変換に対して(9)のように変換することを要求しますと、結局、 ϕ の作用は

$$-\frac{D-25}{48\pi} S_L[\hat{g}, \phi] \quad (10)$$

となります。これは、式(7)の作用で、 S_L の係数を1だけずらしたものになっていますから、結局、 ϕ の測度に対するヤコビアンは自由スカラー場の場合と同じだったわけです。式(10)から、 $D \leq 25$ なら ϕ の短波長揺らぎは安定ですので、以下、 $D \leq 25$ とします。

宇宙項も、もともと g_{ab} で書けていたわけですから、上と同様に、 \hat{g}_{ab} の Weyl 変換に対して不変なはずですが、いいかえすと、

$$\int_M \sqrt{g} = \int_M \sqrt{\hat{g}} : e^{\alpha\phi} :_{\hat{g}} \quad (11)$$

と表したとき、 $: e^{\alpha\phi} :_{\hat{g}}$ が次元2の primary field であればいいわけです。このことから、

$$\alpha = \frac{25-D-\sqrt{(1-D)(25-D)}}{12} \quad (12)$$

であることがわかります。ここで、 $D > 1$ とすると、 α が複素数になり、宇宙項が正定値でなくなってしまう。これが、 $D = 1$ のバリアーです。

結局、式(7)で、作用を(10)に修正し、宇宙項を(11)に修正したものが、くりこまれた Liouville 場であることがわかりました。ここで重要なのは、宇宙項の多点関数は紫外発散をもたないため、これ以上のくりこみは必要がなく、 $Z_\chi(A)$ は有限であることです。ま

た、修正の後、 ϕ の測度は平坦であり、特に、定数のシフト $\phi \rightarrow \phi + \text{const}$ に対して不変です。このことから $Z_\chi(A)$ の A 依存性が簡単に求まり、臨界指数(3)は

$$b_\chi = b \chi, \quad b = \frac{25-c+\sqrt{(1-D)(25-D)}}{24} \quad (13)$$

で与えられることがわかりました。ここで得られた、 b_χ が χ に比例するという事実は、行列模型が2重スケーリング極限をもつことを意味しており、その後の発展につながりました。

以上、2次元重力についての Distler 氏との研究に至った経緯を書いてみましたが、結局、1980年代のおよそ10年間の思い出話となりました。それから30年以上たったわけですが、明らかになったこともある一方、本質的に重要な問題もたくさん未解決なままです。当時は、素粒子論に限っても、いろいろなテーマごとに一家言のある人が多く、議論を通して多くのことを学びました。最近では、情報伝達が速いので仕方ないかもしれませんが、特異な意見をもっている人が少なく、一様化している気がします。嘘を何回ついても本当にはなりません、変なことを何回も言ってこそ、本当に新しいものが出てくると思います。そうしやすい雰囲気にしていきたいものです。

文献

- [1] T. Eguchi and H. Kawai, Phys. Lett. **114B**, 247 (1982);
- [2] A. B. Zamolodchikov, Phys. Lett. **117B**, 87 (1982);
- [3] H. Kawai and Y. Okamoto, Phys. Lett. **B130**, 415 (1983);
- [4] V. Knizhnik, A. Polyakov, and A. Zamolodchikov, Mod. Phys. Lett. A3, 819 (1988).
- [5] J. Distler and H. Kawai, Nucl. Phys. **B321**, 509 (1989);
- [6] F. David, Mod. Phys. Lett. **A3**, 1651 (1988).
- [7] T. Eguchi and H. Kawai, Phys. Rev. Lett. 48, 1063 (1982).
- [8] N. Ishibashi, H. Kawai, Y. Kitazawa and A. Tsuchiya, Nucl. Phys. B498, 467 (1997).
- [9] H. Kawai, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **26**, 93 (1992).
- [10] H. Kawai, D.C. Lewellen, S-H. H. Tye, Nucl. Phys. **B288**, 1 (1987).
- [11] Y. Hamada, H. Kawai, K. Oda, Phys. Rev. **D87** 053009 (2013), Phys. Rev. **D89** 059901 (2014) (erratum)
- [12] Y. Hamada, H. Kawai, K. Oda, S. C. Park, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 24, 241301

北ヨーロッパ、ポスドクの旅

団塊の世代真っ只中の我々は学部生時代に学生運動の影響を少なからず受けて一度ならず社会の中でどう生きるか常識に囚われずに考えてみた経験を持った人が多かった世代に属すると思います。自分もそんな中の一人で研究者になる道を目指そうと心に決めると、素粒子の研究者に成るには絶望的な狭き門だと認識させられていました。しかしどうせやるなら大変でもやりたい事を貫徹しようと、それまで属していた東工大の原子核研究室の河合先生を説得して素粒子論の研究に鞍替えしました。

同じ頃東京の田無に在った東京大学原子核研究所（核研）に帰って来られた藤川さんに弟子入りしようと河合先生と当時核研の理論主任だった丸森先生にお骨折り頂きました。当時は日本ではまだポスドクのシステムがあまり整っておらず、博士課程終了後職がない場合はなんとかアルバイトで食い繋いで将来の可能性に備えてる若手研究者があちこちに沢山おりました。そんな中で核研は領域一つづつにポスドクポジションを持ち、まだ職の無い若手研究者にとって暖かく受け入れてくれる大事な役割を果たしている研究所でした。

そんな環境に学生として入って行った私は研究テーマを選ぶに当たって、それまであれこれ自分で考えて試行錯誤してきた中で、より原理的な素粒子の理解をしたいとの願望は有るものの、まず実態としての素粒子という物質に手を触れてみたいと考えました。またこの頃（1974）はチャームクォークの束縛状態である J/ψ メソン（3.1Gev）が発見された時であり現象論が大注目を浴びている時期でもありました。そんな中で電子・陽電子消滅散乱で重心エネルギー 3.6GeV 近辺で電荷を持つ粒子のエネルギーの割合が急に減少する現象が観測されていました。それは重いレプトンのチャンネルが開けニュートリノがエネルギーを持ち逃げするからでは無いかと計算を始めていました。そんな中でスタンフォードの電子・陽電子消滅散乱の線形加速器で 24 イベントの電子+ミューレプトンが生成され他の粒子の見えないイベントが見付かったとのファックスによる未確認情報を得て多めに気を良くし重いレプトンの計算を進めました。この研究は藤川さんとの共同研究で PRL に出版されました。論文のタイトルに "Energy Crisis and Heavy Lepton" という当時の中東のエネルギー危機の世相を反映したキャッチーなタイトルをつけた事は印象深く記憶に刻まれています。こうして関連する幾つかの仕事をまとめ博士論文（1976）としました。これらの仕事は後に質量 $3.6/2=1.8\text{Gev}$ の重いレプトン τ の発見初期に関わった計算になりました。こんな風に新しい現象論の創生期にその歴史的発展を見れた事は後の研究を進める上での

大きな糧になりました。

この頃 (1975) 京都の基礎物理学研究所と核研で新粒子 J/ψ に関しての国際ワークショップが有り、重いレプトンに関して話す機会を与えられました。その会議に出席していたドイツ・ハンブルクの DESY の実験屋さんの Wiik 氏から声をかけられ、フンボルト財団の奨学生として DESY に来ないかとのお誘いを受けました。核研の藤川さんと寺沢さんはアメリカ帰りの新進気鋭の研究者で我々にも外国に行くチャンスを得ることを啓発してくれていました。特に寺沢さんには外国での研究者の生活、研究スタイル、心構え、等の全般を教えて頂きました。この頃外国に行くポスドクは受け入れ先としてシカゴ大学の南部先生、コーネル大学の木下先生と東大本郷系列が主流で他に見当たりませんでした。そこで新たなチャレンジとして DESY へのポスドク応募の準備を進めました。

博士課程終了後核研のポスドクに着くのが自然な流れでしたが、その職は友人に譲り学振のポスドクを取り、受け入れ先を KEK の菅原さんをお願いする事にしました。その頃 KEK の理論部は設立されて間も無い頃で 5 人のスタッフ (川口、菅原、荒船、小柳、福来) が居られ、私は KEK の初代のポスドクになりました。この頃私は既に既婚で妻の仕事場所の関係で別居生活をして KEK のゴルフ塔 (KEK はゴルフ場の跡地に建設された) に住んで週末相模原に帰る生活を送っていました。当時も結婚に対する一般的な考え方は、職を得てから結婚するというものでした。研究職を得るのが大変難しい時代でしたが、職を得るまで待つという考え方を取らないチャレンジを試みようと思った訳です。

KEK に移ってからは重いレプトンの研究を続けながら、弱い相互作用を含む現象論的発展に注目して現象論と理論発展の関係の認識を深めていきました。新しいチャームクォークが発見され重い 3 番目の τ レプトンの存在も確立しつつあり、“いったいクォークとレプトンはいくつあるのか?” という疑問が自然な疑問として認識されてくる訳です。そんな中で CP の破れを自然に生じる為には、6 つのクォークが必要であるとの小林・益川理論はこの頃既に注目されています。正に慧眼というしか有りません。またその頃弱い相互作用の中性カレントの存在は現象論的に確立しつつあり、ワインバーグ・サラム模型に有利な証拠が整いつつあるものの、ゲージ群の構造、クォークとレプトンのマルチプレットの組み方、カレントの構造に関して色々な提案がなされつつ有り、正にグランドユニフィケーション (GUT) の狂乱に入る前夜の様相を呈していました。

こうして約 10ヶ月の KEK 滞在中フンボルト奨学生としてドイツ・ハンブルクの DESY の理論部への移籍の準備をし渡欧 (1977年2月) しました。フンボルト奨学生は、初めの4ヶ月間ドイツ語の研修を義務付けており、ハンブルクの南 60km に有るリュネブルク

のゲーティンスティチュートでドイツ語会話の基礎からの教育を受けました。約 20 人のクラスに国籍の違いが 10 位の構成員で主に 20 歳位の若い人達と一緒に授業を受けるのは新鮮な経験でした。ただ 4ヶ月間も研究所に通えずホームステイで毎日ドイツ語のみの生活に不安になり中古の自動車を日本の実験屋さんから譲り受けて、3ヶ月目にゲーティンスティチュートを抜け出してリュネブルクから車でハンブルクに通いました。この事が DESY の理論主任のハンス・ヨース氏に知れてひどくお叱りを受けました。

ゲーテでの語学研修も終えやっと DESY の理論部に部屋を与えられ落ち着く事が出来ました。宿も研究所から歩いて 10 分程の距離で、ゲーテの後半からは妻も加わって新たなドイツ生活が始まりました。研究所での生活は新しい経験の連続でした。その頃ポストクとして DESY の理論部にいたドイツ人のシアホルツ氏とケルナー氏とは親しくなり、色々ドイツ生活の助言を頂きました。DESY のポストクを経由してビーレフェルトに移っていた黒田正明氏にはドイツ文化の楽しみ方を色々教えて頂きました。また理論の現象論のリーダーだったトム・ウォルシュ氏とは初めの頃色々議論をさせて頂きました。

ここで私が直面した問題はどの路線で研究を進めるかという事でした。理論部に着任して暫くして、理論部のセミナーをする機会を与えられました。スタンフォード (SLAC) とブルックヘブンのチャームクォークの発見から 2 年が過ぎ、DESY の電子・陽電子消滅散乱の加速器の稼働を成功させた実験グループは次の物理の成果を求め積極的に活動していました。そんな中での私の重いレプトンのセミナーは注目を集め多くの実験屋さんが聞きに来てくれました。実際その後実験グループの PLUTO が重いレプトンの崩壊から正のパリティを持つ A_1 ベクターボソンを発見した時、崩壊のプログラムコードを提供して貢献しました。この頃の DESY の実験グループの成果の主要ターゲットはグルオンジェットの実験的確立にありました。DESY の理論グループは協力してこの動きに対応し QCD のグルオンジェットの確立に貢献しました。私も共同研究に加わる様に間接的な誘いを受けました。

当時 DESY のライブラリはプレプリントが充実していて、世界の研究の動向を確実に捉える事ができ、コピーも自由に出来る良い環境の中で自分の進むべき方向を探していました。重いレプトンの現象論の研究も積極的に進めており最先端の電子・陽電子消滅の実験が行われている環境にいる身としては、現象論の研究を更に進めるのが一番自然にみえました。しかしここで次の様に考えました。重いレプトン τ の更なる発展の研究は理論的な側面からは数年で収束するだろうと予測しました。その理由は τ が sequential lepton (電子と同等で質量が大きいだけの違い) で有るため解析が容易で有る事。またグルオンジェッ

トの理論計算も同様に数年で収束しどちらも実験サイドのテーマとしては発展するであろう。しかしどちらも5年先に理論サイドの主要テーマとしては注目されないであろうと予測した訳です。

一方新粒子の発見 (c-クォーク、 τ -レプトン、b-クォーク (1977)) により勢いづいたモデルビルディングの研究は百花繚乱の時代を迎え可能な限りのバラエティーの模型が提唱され、実証実験の実現の可能性に関係無く、予言も多岐に渡っていました。特に電子・陽電子消滅散乱の全断面積から強い相互作用のカラーの自由度が3と確定した事から強い相互作用のゲージ群がSU(3)に確定し、電弱相互作用に加え強い相互作用まで含めた大統一理論 (GUT) の研究が盛んに行われる様になりました。そんな研究の発展を横目で見ながら、手を変え品を変えの安易な模型の提案の研究スタイルに違和感を覚えていました。実際ずっと後の発展を見ると電弱相互作用の群は元々のワインバーグ・サラムのSU(2)XU(1)で落ち着き、GUTが正しいとすると陽子崩壊が必然的に起こりうるとの予言が主な成果として収束しました。

重いレプトンの一連の研究で素粒子の一つを手に触って色々調べることが出来た感覚を得たので、今度は強い力のダイナミカルな側面を場の理論としてどう理解するかを考えてみようと思う様になりました。特にクォーク・グルオンは高エネルギーでは漸近的自由に振る舞い低エネルギーではクォークの閉じ込めが起こる事をどう理解したら良いのか。

こうして私は誕生間もなくまだポピュラーで無かった格子ゲージ理論に興味を持ち勉強を始めていました。特に1975年のケン・ウィルソンのエリーチェのレクチャーノートに感銘を受け関連論文を読み漁りました。この方向の研究を進める事により、いずれハドロンの質量が計算できるのはでないかとの直感を得ていました。ある日昼食時の議論で理論の現象論のリーダーのウォルシュ氏と議論になり「遠くない将来にハドロンの質量が計算できるようになるだろう」と私が発言したところ、彼は「パイメソンの質量は50年経っても計算出来ないだろう」と言い切りました。そこでどっちが勝つかビール1ダースを賭けたのを覚えています。一般にはこの様な認識でした。

重いレプトンの現象論の研究から、全く新しい理論的研究に足を踏み入れるのに随分戸惑いもありました。ドイツ人の友人 (ケルナー氏) にある時、現象論の研究からより理論的な格子理論の研究に移ることをどう思う、と率直に質問した事がありました。彼の返答は「僕が君くらい若かったらチャレンジしてみる。」との返答でした。この会話には随分勇気づけられた事を記憶しています。後から考えてみるとこの時の決断が重要な分岐点になりました。

新しい分野に分け入るに当たって近くにその分野の専門家がいる訳でもなくもっぱら一人で関連論文を読み、研究テーマを探して試行錯誤する毎日でした。DESY の同じ建物の上階にハンブルグ大学の素粒子の第2研究室が有り、そこのスタッフのゲルハルト・マック氏に何度か議論して頂きました。また同じ階に居た場の理論の大家のツィマンジック氏に議論をお願いした事もありました。こうして現象論の研究からより理論的な研究に移行するにはリスクの伴う大きなエネルギーが必要でした。最大のリスクはポスドク一年後は次の職探しに応募しなければならず、分野の大転換には時間が必要で次の論文が短い間に準備されにくいという問題が有ります。そこで新たな分野で問題を見つけ、何とか解決するのに必死になる訳です。

格子ゲージ理論ではクォークの閉じ込めを議論する為にウィルソンループをオーダーパラメーターとする相転移の概念が導入されました。ゲージ場を格子に乗せると強結合領域ではクォークの閉じ込め相が現れ、弱結合領域では群構造により、閉じ込め相に留まるか、クーロン相、ヒッグス相になる事が予言されました。ならば”フェルミオンを入れたら一体相図はどう変化するのだろうか?”との疑問に至りました。ウィルソンのフェルミオンの伴う格子ゲージ理論の作用には、ホッピングパラメーター K が導入されていますが、ゲージ結合定数 g^2 と K の空間で相図がどうなるかを解析的に調べるという問題を設定した訳です。(この研究が素粒子メダル推薦の初めの論文です。)

ウィルソンループをどの様にしてゲージのプラケット作用が満たしていくか。メソンの2点関数はクォークと反クォークのランダムウォークのウィルソンループの足し上げの描像として捉えられ強結合展開を試みました。特に弱結合領域ではクォークは漸近自由に振る舞い $K = 1/8$ ($g^2 = 0$) でクォークの質量は0になる。強結合極限で π -メソンの質量を計算して0になる点は $K = 1/4$ ($g^2 = \infty$) となり、この二つの極限は繋がっており、この曲線上でカイラル対称性が自発的に壊れる事を指摘しました。ずっと後になって格子ゲージ理論のモンテカルロによる数値計算ができる様になってから、この指摘が正しいことが数値的に示されました。

こうして論文を執筆して、出版する以前に次の職を探す時期に至りました。論文が仕上がってないからピンチです。応募書類には研究中的内容と研究計画を詳しく書いてアピールしました。するとアムステルダム大学から研究中的の中身のセミナーをしに来るように招待されました。同様の研究テーマに興味を持つ研究者が居るとの事でした。それが後に共同研究者になるヤン・スミット氏でした。幸運な事にこの状況で私をポスドクとして受け入れてくれました。

ハンブルグ滞在2年目、我が家に長女が生まれました。次の職探しで大変な時期でしたが、出産に関しても条件が整ってからという方針は取らず、喜んで受け入れる方針を取りました。その為引越し荷物が少し多めになった為ハンブルクからアムステルダムへの引越しには小型トラックをレンタカーして荷物を運びました。借りたレンタカーをハンブルグに戻って返して、自分の車でもう一度アムステルダムに引き返す時、ドイツ・オランダの国境で夜中の12時を過ぎて、丁度ドイツ滞在ビザが切れてしまいました。当時はまだ国境が有り、通貨の単位も国によって違っていました。国境警備隊に捕まり、警備隊の山奥のアジトに連行され尋問され指紋を注意深く取られました。当時私は長髪で私が連合赤軍の兵士の一人に似て居ると認識された様です。暫く調べられやっと解放され新しい新居に戻りました。当時日本とドイツの学生運動の連合赤軍兵士が共闘して幾つかの大きな社会問題を引き起こしていました。

私はアムステルダム大学の一角に自分のコーナーを得て落ち着きました。これまで一人で試行錯誤してきた研究を理解してくれる議論の相手のヤン・スミット氏が出来たことは大きな喜びでした。まだ未完成だった論文を何とか仕上げ投稿しました。ところがレフリーからは審査辞退の返事が届き、次のレフリーも又審査辞退で更に次のレフリーに回り「価値のある論文」との評価を頂き出版されました。問題を設定してからここに至るまでに約3年かかりました。(私にとって記念碑的論文を素粒子メダルで評価して頂き嬉しく思います。) ヤン(スミット)はこの頃、学生のカールステンと後になって有名になる格子アノマーを調べていました。

アムステルダムに来て暫くしてモンテカルロによるウイルソンループのSU(2)格子ゲージ理論による数値計算のクロイツの論文を見つけショックを受けたのを良く覚えています。これでハドロンの質量が数値的に計算出来ると確信しました。このクロイツのモンテカルロ計算の成功に注目してサンタバーバラで格子ゲージ理論の国際会議が開かれる事になりました。是非出席して発表もしたいと思い西回りで日本に里帰りをする地球一回りコースの旅を企画しました。パンナムの80日間世界一周1000ドルという企画を利用し、ニューヨーク、ウイスコンシン、ミネソタ、ロサンジェルス、サンタバーバラ、ハワイ、東京と周り、里帰りをしました。この旅の間に5箇所セミナーをさせて頂きました。

サンタバーバラの国際会議は後に格子ゲージ理論の国際会議として毎年開かれている会議の初回と位置付けられた重要な会議でした。ウイルソンの基調講演が有り、クロイツのモンテカルロによるウイルソンループの計算の成功は大きなインパクトを与え格子ゲージ理論によるハドロンの質量計算を含む強い相互作用の物理の本格的な数値計算の到来を予

言させるものでした。

この頃私はウィルソンの格子ゲージ理論の定式化に基本的な疑問を抱えていました。それはホッピングパラメーター K は $K=1/8$ ($g^2 = 0$) から $K=1/4$ ($g^2 = \infty$) に移動する間にルッシャーのユニタリーバウンド $K=1/6$ を超えてしまうのをどう考えたら良いかというものでした。この疑問をサンタバーバラコンフェレンスの時にウィルソンに議論として直接ぶつけてみました。するとウィルソンは取り敢えずその疑問は置いておいて、強結合領域でうまくいっているか、ハドロンの有効相互作用を導いてみたらどうかと勧めてくれました。つまり弱結合領域で予想されるカイラル対称性の自発的破れが、強結合領域で起こっているかを強結合極限で調べる事に対応する訳です。

アムステルダムに戻って早速議論を続けました。元々ヤン（スミット）と私は強結合領域でのメソンの振る舞いを、それぞれハミルトニアンとラグランジアンで定式化で調べていました。そこで強結合極限、 $SU(N)$ の $N \rightarrow \infty$ でのメソンの有効作用を解析的に導きました。特にウィルソンの格子フェルミオンに対してウィルソン項のない場合のスタaggerドフェルミオンの導出も与えました。この定式化は後に格子フェルミオンの定式化として広く使われています。そこではクォークの質量とパイメソンの質量の関係が明確になっており、強結合極限ではありますが期待される自発的対称性の破れのメカニズムが成り立っている事が具体的に示されました。（素粒子メダル推薦二つ目の論文）。その後この定式化はバリオンを含む系にも拡張されました。アムステルダムでは共同研究者も得て、研究も進展して充実した研究生生活を送ることが出来ました。

こんな事も有りました。ある日私の雇い主であるボウトハウゼン教授に呼ばれ部屋に伺うと、高齢（80歳）のディラックがおられ古い自分の理論の重力定数の時間依存の可能性の話を説明していました。その晩私とディラックは晩飯に招待され、ディラックとゆっくり話すことが出来ました。若い頃、ハイゼンベルクと二人で日本を訪れたことを懐かしく話してくれました。こうして世紀のレジェントに会う光栄に浴しました。

次の職を探す時期がやってきました。前回の苦労した経験から多くの場所に応募をし、積極的にセミナーをして回りました。その頃アムステルダムの隣町のユトレヒトで佐々木隆氏がポスドクをしていました。彼はニールスボーア研究所（NBI）を経てユトレヒトに来ており、トホーフトの居るユトレヒトでワークショップがあった折、出席していたNBIスタッフに私を紹介してくれました。そこで私はポールオルセン氏に当時の研究成果をアピールしました。その様な事も有り、ニールスボーア研究所のポスドクとして受け入れて頂きました（1981）。

この頃、当然の事ながら数少ない公募のある度に、日本の大学及び研究所の職に応募しており、落選し続けていました。そんな中で感じていた事は日本に職を得るのは絶望的かもしれないが、ここまで努力しても最終的に希望の職を得られなくて、転職したとしても本望であると。この先徹底的に挑戦し続ける覚悟が芽生えたのを記憶しています。

こうしてニールスポーア研究所 (NBI) での新しい生活が始まりました。この研究所は言わずと知れた、デンマークの誇るニールスポーアに因んで創設されたコペンハーゲンの研究所で、ニールスポーア時代の親しみやすい交流の雰囲気が残っていて、街の雰囲気も含めたちまちま気に入ってしまいました。ニールセン、オルセンと気軽に議論が出来る事は、研究者として大きな喜びでした。特にニールセンには時間制限無しの議論を何度もして頂き大きな影響を受けました。NBI のポスドク終了後も何度もこの研究所に帰って来て、議論をしニールセンとも共同研究を行った事は如何にこの研究所が私に取っても魅力が有るかを示すものです。

私と同時期に日本から重本和泰氏がポスドクとして来られ自然な流れで一緒に共同研究を始めました。ヤンの学生のカールステンが NBI に格子カイラル異常項に関してセミナーに来て、ニールセンの鋭い洞察により発展した格子カイラルフェルミオンの問題はその後数年間にありました。我々は格子カイラル異常項の本質的理解を得ようと数値計算を試みました。我々はラグランジアンでアプローチしましたが、同僚のポスドクグループと競争になりアンブロン、グリーンサイト、ペターセンの米・北欧艦隊はハミルトニアンで定式化を試みました。研究は時として競争で有り、戦いである事を実感した経験でした。

またこの頃ハドロンの質量計算はモンテカルロの数値計算で試みられつつありましたが、解析的には行われていませんでした。そこで強結合極限 (ランダムウォーク近似と呼んだ) で、電卓でメソンとバリオンの質量を定量的に計算しました。c-クォークまで入れたメソンの質量は 10 パーセント以内に合う値が得られ、バリオンは約 2 倍になりました。ほぼ同時期に得られたモンテカルロによる質量計算の値は良い値を与えましたが、後にクリティカルスローイングダウンが起こっている為、信頼性に欠けるものであった事が明らかになりました。

その後共同研究にダムガール氏も加わり、強結合極限で有限温度、有限密度の QCD の有効相互作用を導き有限温度系に相転移が起こることを解析的に示しました。またフレーバーの自由度による依存性も調べました。またフェルミオンを導入した改良作用としては初めての提案を、その頃 NBI にビジターで滞在した江口氏との共同研究で行いました。この時期には格子ゲージ理論関連の諸問題にアプローチしました。

こうして次の職探しの時期に至りましたが、有難い事に一年延長して同じ NBI 内に有る、北欧共同利用研究所 (NORDITA) に職を繋いで頂きました。その滞在の最後に京大の理学部素粒子論研究室から助手のオファーを受けて晴れて、帰国することが出来ました (1984)。

帰国 2ヶ月前には二人目の女の子を授かりました。私のヨーロッパでの生活は家族を伴ったものでした。ポスドク仲間、研究所・大学のスタッフ、ビジターとの交流は頻繁に行われ、日本の習慣と違い自宅に招いてパーティ形式で行われることが多く有りました。お返しでこちらがパーティをする機会も多く、強力な妻のサポートがヨーロッパでのポスドク生活を豊かにしてくれました。

こうして私の 7年半にわたる北ヨーロッパ、ポスドクの旅は終わりました。

2023年1月25日

北海道大学大学院理学研究院・名誉教授

河本昇

「弦から一般相対性理論」50年目の再訪

米谷 民明

(東京大学名誉教授)

私が弦理論と一般相対性理論による重力理論との関係を指摘した論文 [1][2] を仕上げたのは、今から 50 年も前の 1973 年初夏から初秋にかけてでした。私は北海道大学大学院博士課程 3 年目の学生で、't Hooft によるゲージ理論の繰り込み可能性の確立から 1~2 年、同年春には D. Gross 等による漸近自由性の発見があり、それに基づく QCD の最終形の提案 (Gell-Mann 等) がなされる少し前でした。そんな昔のことですから、記憶は次第に化石化しつつあるような気がします。その頃のことや経緯についてはこれまで様々な機会に断片的に記してきました。それらとは別に一応まとめたものとして、文献 [3] と、弦理論の歴史を私自身の体験に基づいて描いた日本語の本 [4] (特に第 3 章) があります。興味があれば是非そちらに目を通していただければ幸いです。私自身としてはそれらに書くべきことはほとんど書き尽くしたという感がありますので、今となってはまた改めて同じようなものを繰り返し書くのには少なからず抵抗があります。そこで、本誌編集委員会からの“素粒子メダルの仕事に関連するエッセイ”をという要請に応じて、少しでも新味があるようにと、口頭だけで出版物としてはどこにも出ていない 8 年前の国際会議 (Strings 2015, ICTS-TIFR, Bengaluru, India, June 22- June 26, 2015) の晩餐会でのスピーチのために用意した英語草稿を (ごくマイナーな修正を除き) そのまま用い、それに新たに文献リストと注を末尾に加え、背景、関連する仕事、その後の展開等を説明する形式にさせていただきました。無味乾燥なものにならないよう、私の仕事に関係して出会った人々とのエピソード (そして最後には「補足」という形で弦理論の未来への私の期待) にも、できるだけこれまでの繰り返しにはならない範囲で異なる角度から触れました。ところが、一旦書きだしますと、まるで化石が溶け出したかのように関連する思い出が連なって湧き出て来ますので、当初の自分の心算よりかなり長いものになってしまいました。

なお、上のスピーチそのものは、アインシュタインが重力場の方程式に最終的に到達した1915年（11月25日）から100年目という節目の年であるのに合わせて、弦理論と一般相対性理論との関係を最も初期の段階で論じた研究者による回顧的スピーチを、会議の晩餐会における余興（After Dinner Session）として会議組織委員会の主催者が計画したものです（Chair: Michael B. Green, Speaker: Tamiaki Yoneya, John H. Schwarz）。あえて原文の英語のままにするのは本誌記事としてちょっと異例かも知れませんが、そうした方がその場の雰囲気や少しでも読者の皆さんに伝えられるのではないかと考えたからです。注と合わせて特に研究者を目指す若い学生さんたちにとって刺激になり弦理論に興味を持っていただけるとするなら、私にとってそれに勝る喜びはありません。

個人的な話が多くて恐縮ですが、このスピーチに関連して思い出すのは結構反響があったということです。私のスピーチの後すぐに司会のGreenがSchwarzの話が始まる前にプライベートに「すごく興味深い話だった」と言ってくれましたし、また、session後直ちにE. Wittenが私のところにきて「この仕事するときどこにいたんですか」との質問がありました。スピーチの中で私が北大大学院にいたということは冒頭からすぐ後のところで一言触れてはいたのですが、多分、彼は私とその当時、東京や京都のような日本のセンターにいたのではないことに関心があり、それを確かめたかったのかも知れません。^{*}その後、会議中も休憩時の立ち話や昼食時に「面白い話でよかった」と言ってくれた出席者が他にも数人おり、まことに拙いスピーチではありましたが、それなりに興味を持っていただけたということで安堵しました。

^{*}E. Wittenはこの1年前に京都賞を受賞しており、受賞記念講演[5]では私の仕事にも一言だけ触れていた。また、15年前のStrings 2000会議（Michigan Univ.）では彼の父親（Louis Witten, 1922年生まれ）ともパーティで話したことがあったが、私の仕事のことをよく知っていて「息子とも話したことがある」との由だった。

L. Wittenについてはご存知ない方も多いと思うので少し補足しておく。彼は古くからの一般相対性理論の専門家であり、私がNew York滞在中の1977年に出版され、これは面白そうな内容だと思い迷わず購入していた“Asymptotic structure of space-time”（Plenum Press, N. Y.）というSymposium Proceedingの編集者として以前から名前を記憶していた。この本には一般相対論の数学的側面に関する大家達（Geroch, Parker, Newman, Plebanski,...）によるreviewに加え、半年前に発表されたばかりのP. van Nieuwenhuizenの超重力理論のreviewも掲載されており、当時もその後も大変参考になった。また、彼はDeWitt夫妻（Bryce + Cecil）がその20年前に主催し、歴史的に一般相対性理論の意義を物理諸分野に浸透させるのに重要な役割を果たした国際会議“The role of gravitation in physics”（Chapel Hill, Univ. of North Carolina, 1957）に、Feynman, Wheeler等と共に参加している（日本からは内山龍雄先生が出席）。

(Speech at the Strings 2015 conference, After Dinner Session, June 24, 2015)

General Relativity from Strings

Tamiaki Yoneya
University of Tokyo

It is a great pleasure for me to be here, attending this wonderful meeting. I would like to thank the organizers for warm hospitality, and for a kind arrangement of this after-dinner session.

The organizers asked me to give some historical reminiscences related to my old works on the connection of string theory with gravity. So let me talk about how I happened to come to this work, as faithfully as I can remember now. Although I am not sure whether such a personal history of myself interests you, I hope that it at least would help to convey to you the now forgotten atmosphere at the genesis of string theory in the early 70s.

I became a graduate student in 1969 at Hokkaido University, Japan. That was just the year when the string theory was born. I vividly remember big excitement, when I was first exposed to a very short but quite a stimulating paper by Susskind [6] on the string interpretation of the Veneziano formula [7]. I was struck by the simplicity of the idea, giving a direct physical meaning on what was originally a mere mathematical expression, something like the Planck formula, for the S-matrix elements of meson scatterings. And then I encountered a beautiful and more comprehensive paper by Nambu [8], and my interest in this subject was further strengthened. I chose, as the subject of my master thesis, the dual resonance model or the dual model, which

is the way the present string theory was called at that time. In my first work on this subject [9], I have studied formal symmetry structure of the general n -point Reggeon vertices, which were generalizations of the Veneziano formula to those with external lines corresponding to arbitrary stringy excited states. The word ‘Reggeon’ was the way we called such general states (of an open string) at that time. This experience was useful for me for developing my understanding on the essence of the channel duality.

From the first encounter with the dual string model, a basic question on the relation between the dual model and ordinary quantum field theory was increasingly occupying my mind. Remember that the Veneziano formula originally emerged without any connection with field theory. There were two particular problems which I was concerning with. One was whether and how the channel duality could be compatible with the ordinary Feynman rules of field theories. Another was the meaning of the existence of massless spinning states. With respect to this second question, I expected that the dual model corresponding to open strings should be regarded as an intrinsic extension of local gauge field theories. From this viewpoint, I first tried to clarify the role of massless spin-one state in the model, by studying whether the interaction vertices of those states can be regarded as minimal interaction, just as we have in local gauge field theories which are governed by gauge principles. My thinking was that, if the interactions of these massless spinning states had non-minimal structure, the connection of the dual model with gauge principle would not perhaps be of such fundamental significance. I could confirm [10] that in all cases of open-string models which had world-sheet conformal invari-

ance, the corresponding vertices could indeed be derived as minimal interactions with an appropriate generalized local gauge transformation of string wave function, or string fields, in an exact sense without making any low-energy approximation. Thus I was convinced that the dual open-string models must indeed be regarded intrinsically as an extension of gauge field theories. Needless to say, all these sound trivial from our present standpoint. But, I would like to stress that, as far as I knew at that time around the middle of 1971, no one had ever formulated explicitly such a viewpoint, and when I first submitted a paper on this to a journal, it was rejected. After a few months of this experience, I came to know through a letter I received from Masatsugu Minami (who was at the Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University) that a similar viewpoint had recently been discussed independently by Neveu and Scherk [11], in a different way using a low-energy approximation, namely, the zero-slope limit. I was shocked by this, and I resubmitted the paper to a different journal, PTP.

By this time, I hit an idea of extending my viewpoint to closed strings. I thought, the closed-string model, which was called the Virasoro-Shapiro model at that time, should similarly be regarded as an extension of general relativity. However, in those days, the atmosphere of particle-physics community was almost totally against general relativity. I myself felt that such a connection would be a rather strange and bizarre thing. Although, as an undergraduate student, I had been quite enthusiastic about general relativity, I myself became prejudiced against gravity, after starting researches in particle physics. During that period, current algebra and S-matrix were the

major stream at least in my environment at that time, so that the classical geometric theory such as general relativity seemed to be useless.

So I decided to put aside the problem of connecting closed strings to general relativity, as a possible future work. And I turned my mind to the first question of reconciling the channel duality with Feynman rules. Minami's letter was useful for me also in that he mentioned Noboru Nakanishi's work [12]. Nakanishi, who was also at RIMS, studied a systematic method of decomposing integration regions of n -point dual tree amplitudes, in such a way that each decomposed region involves only pole singularities corresponding to the usual Feynman diagrams. I tried to re-formulate his rule of decomposition such that the factorization property of the amplitudes became manifest simultaneously: Then it would be possible to extend his rules to general loop amplitudes. I partially succeeded in this program [13], on the basis of my previous work on general Reggeon vertices. For example, this resolved the problem of an infinite multiple counting which had been a difficulty in the ordinary way of constructing non-planar loop amplitudes of open strings known at that time. I then expected that the whole rule could be recast as a quantum field theory of strings. I tried it very hard, but unfortunately could not manage it in any satisfiable and publishable way. As everyone knows, this program of constructing a covariant string-field theory was beautifully achieved after 13 years by Witten [14] in 1985.

Actually, the failure of constructing string field theory allowed me to return my mind again to the possible connection of dual models to general relativity. I remember, that was about the beginning of 1973. Around this time, many people, especially who are phenomenologically-

oriented, were departing from the dual string model. This was just the period when the gauge field theories were about to resurge as the fundamental theory of strong interactions, as well as of electro-weak interactions. But I felt that the dual string models must contain something deeper as a theoretical framework which was perhaps beyond the field theory, and that had not yet been fully clarified. I started thinking that as the Yang-Mills theory had turned out to be useful, general relativity might also become important even for particle physics, someday in some unexpected way. Also, independently of the interpretation within hadronic physics, possible connection of dual strings to gravity by itself would be very suggestive of a unification of quantum theory and general relativity.

To demonstrate the connection, the first thing to do was to exhibit a concrete correspondence of physical amplitudes in the zero-slope limit, and also to make the comparison of interaction vertices with finite α' . Another thing which I strongly wished to clarify was to establish some definite correspondence principle between the two structures. I expected that there must be some characteristic property, in analogy with the correspondence, for example, between commutation relations and Poisson brackets which played so important role in creating quantum mechanics. Although I am not completely successful, especially, in the latter program of the possible correspondence principle, I decided to publish my modest results. First paper was a brief letter [1] which was submitted in July, 1973, and then the full paper in October [2]. The title of the full paper was “*Connection of dual models to Electrodynamics and Gravidynamics*”. The reason I added the word ‘electrodynamics’ was to discuss the similarity and contrast

between the two cases of open and closed strings in a simplest possible setting, on the basis of my previous works on the case of open strings. In regard to the possible correspondence principle, I could only emphasize that the non-linear geometric structure of general relativity was replaced by (and encoded into) the non-locality or extendedness of strings [15]. That was discussed in my full paper by comparing the structures of both sides at the level of generating functionals for a general class of tree amplitudes. This interpretation of stringy extendedness actually constituted one of the motivations behind my later proposal of the space-time uncertainty relation [16][17], which I was going to publish first in 1987 in a volume commemorating the 60th birthday of Professor Kazuhiko Nishijima. In the meanwhile, I received a preprint by Scherk and Schwarz [18]. Their impressive works stimulated me to continue my thinking further. In fact, after my initial papers, I published two follow-up papers [19] in the mid 70s, discussing the geometrical properties of the couplings of graviton state to fermionic strings, extending the methods I had developed in the case of gauge-string connection.

I remember that, at the time of the first publication of my results, I was, however, not completely sure about my standpoint in interpreting the connection between dual models and gravity. There was a different and competing viewpoint, existing actually from the early 70s, on the relationship between dual strings and field theory, namely, the possibility of strings emerging as a non-perturbative object from local gauge field theories. Among such possibilities are the so-called fishnet interpretation, which was later going to be delineated by 't Hooft's large N limit [20], and also the idea of relativistic vortices, as

proposed by Sakita-Virasoro [21] in the first case, and in both cases by Nielsen-Olesen [22][23]. I was asking myself rather perplexingly, “If such a view were correct, would it imply that general relativity could be contained in gauge theory without gravity?”. I had not been able to resolve this puzzle for many years. Of course, the holographic interpretation, being developed in recent years, is certainly providing us an entirely new perspective for this question. These were how I came to my early works on the connection of strings to gravity, and also some of my related thoughts during this period.

Finally, as an aside, I would like to remind you that this year is, not only 100 years of General Relativity, but also 150 years from Maxwell’s monumental work with the title, “*A dynamical theory of the electromagnetic fields*”, which was published in 1865 [24]. This work can be regarded as the start of gauge field theory, in a sense that Maxwell reformulated systematically and rightly his electromagnetic field theory in terms of the vector potential, by extending various previous results given by himself and other workers, most notably, Michel Faraday. Interestingly, in the same paper, he also briefly pointed out a fundamental difficulty in extending his formulation further to gravity. In this sense, he can also be regarded as an initiator of our unification program.

To conclude: I am now convinced that the unification of gauge theory and general relativity as open and closed strings must be, at least in a broad sense, the truth of Nature. Nature must not fail to utilize such a simple and beautiful way of unifying fundamental interactions.

Thank you for your attention !

文献と注

- [1] T. Yoneya, Quantum gravity and the zero slope limit of the generalized Virasoro model, *Lett. Nuovo Cim.* **8** (1973), 951–955.
- [2] T. Yoneya, Connection of dual models to electrodynamics and gravodynamics, *Prog. Theor. Phys.* **51** (1974), 1907–1920.

後の項目 [12] [13] に関連して直接交渉があった中西襄先生の他に、この仕事に最初に注目してくれたのは大阪大学の内山龍雄先生をはじめとする私より 2~3 世代上の先生方だった（本稿では 1 世代 = 10 ± 2 年と定義する）。プレプリントを出した翌年の 1974 年の初め頃に京大基研で開催された「重力と一般相対性理論」の研究会に呼ばれた。また、1975 年 1 月に数理研で開催される予定の国際会議で話すようにと、組織委員長の荒木不二洋先生から直接電話で依頼されて恐縮した。

T. Yoneya, Dual string models and quantum gravity, in *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics* (ed. H. Araki, Springer, 1975), 180–183.

この talk では主に項目 [19] の最初の論文に基づいて論じた。だが、反応は今ひとつで、質問が少ない。特にそれから数ヶ月後の春の学会特別講演（『Dual model と場の理論』、当時座長だった益川敏英先生に 2009 年頃にお会いした機会にお尋ねしたところ、記憶されていなかった）では、質問やコメントが皆無で、無視されたような気がして落胆したことを記憶している。自分としてはごく自然な流れで行なった研究だったが、今とは違い、重力とは縁遠く一般相対性理論への関心が薄い当時の素粒子論研究者の大多数には変なことをやっていると思われていたようだ。その辺のことも考慮し、重力の普遍性と閉じた弦の相互作用の普遍性とのアナロジーを強調し、技術的な側面は出来るだけ省いて非専門家向けの一般的な話をしたつもりだった。私の未熟さもあり、そうした意図も聴衆の多くには伝わらなかったのだろう（この特別講演については [4] で詳しく触れた）。

アメリカ New York では崎田文二先生、吉川圭二先生が注目して下さり、1976 年から 2 年間の City College 研究員としての滞在となった。この 2 年間は研究面でも人生経験の意味でも貴重な、いわば、“Sturm und Drang”

の遍歴時代となった。項目 [19] と [20] で詳しく触れる。なお、注全体にわたり、日本人で私より年上の方々は「先生」と敬称させていただく。

- [3] T. Yoneya, Gravity from strings, in *The birth of string theory*, eds A. Cappeli et al., (Cambridge Univ. Press, 2012), 459–473; preliminary version は arXiv から (<https://arxiv.org/abs/0901.0079>) からダウンロードできる。
- [4] 米谷民明, 「究極理論への道 – 力・時空・物質の起源を求めて」, 岩波書店, 2021年10月(第3章『統一量子重力理論への道』)。
- [5] E. Witten, 京都賞受賞記念講演, “Adventures in physics and math”, 2014年。
- [6] L. Susskind, Harmonic-oscillator analogy for the Veneziano model, *Phys. Rev. Lett.* **23**(1969), 545–547.
- [7] G. Veneziano, Construction of a crossing - symmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories, *Nuovo Cim.* **A57**(1968), 190–197.
- [8] Y. Nambu, Quark model and the factorization of the Veneziano amplitude, in *Proceedings of the International Conference on Symmetries and Quark Models, Wayne State University, June 18–20, 1969*, ed. R. Chand (Gordon and Breach, New York, 1970), 269–277.
- [9] T. Yoneya, General Reggeon vertex in dual theory, *Prog. Theor. Phys.* **46**(1971), 1192–1206.
- 私の最初の full paper. 最初に引用してくれた C. Montonen とは 30 年後に印象的な出会いがあったが, [4] に書いたのだからここでは繰り返さない。
- [10] T. Yoneya, Note on the local gauge principle in conformal dual models, *Prog. Theor. Phys.* **48**(1972), 616–624.
- 部分的に重なる仕事が P. Ramond によってもなされていたことを彼から好意的な手紙をもらって知った。これも [4] に書いた。
- [11] A. Neveu and J. Scherk, Connection between Yang-Mills fields and dual models, *Nucl. Phys.* **B36**(1972), 155–161.

- [12] N. Nakanishi, Crossing-symmetric decomposition of the n -point Veneziano formula into tree-graph integrals. 2. Koba-Nielsen representation, *Prog. Theor. Phys.* **45J**(1971), 919–926 and references therein.

中西先生自身が詳しい回想録『数理解析物理学研究回顧（場の量子論研究）』（数理解析研究所講究録 2006, 1524:71-150）に「この研究をやっていた当時、あまり計算がきれいにいくので、すっかり夢中になっていたのを記憶する」（第12節, p. 29）と書いておられるように、この結果は数学的に大変エレガントなものであり、当時私は魅了された。

- [13] T. Yoneya, Feynman-like rules for the dual-resonance model on the basis of the Nakanishi decomposition, *Prog. Theor. Phys.* **48**(1972), 2044–2065.

ここで“partially”という理由の一つは、ループ振幅の特異点のうち、いわゆる Pomeron (= closed string) に対応する特異点を分離できる形式にはなっていない点である（論文の中でも脚注でコメントしてある）。この問題（open-closed string duality）は実は現在の string field theory でも、私が知る限り、満足のゆく定式化ができていない。これは OSFT の立場から holography を明確な仕方で定式化する問題と深く関係し得る。

2年後、この論文の方法を拡張して開弦理論と Yang-Mills 理論の対応を、S 行列より踏み込んで off-shell の Feynman rule のレベルで詳細に調べた。

T. Yoneya, Gauge freedom in dual Feynman-like rules and its relation to the massless Yang-Mills field theory, *Prog. Theor. Phys.* **52**(1974), 1355–1368.

どちらの論文も、[12] と私の修士時代の仕事 [9] を合体させた（直感的な world-sheet 描像とは非常に異なる）弦の物理的描像に関して明確さを欠いた形式で書かれていることもあり、ほとんど知られていない。何れにしても共変的弦場理論が定式化される 10 年以上前の当時の発展段階では時期尚早な議論であったことも否めない。

- [14] E. Witten, Non-commutative geometry and string field theory, *Nucl. Phys.* **B268**(1986), 253–294.

- [15] この性質は一般相対性理論の一般座標変換に関するゲージ不変性が、弦の世界面を支配する対称性としての共形対称性によって保証される全く新たな機構によって置き換えられていることを意味する。80年代半ばの

進展によって、この機構は一般の背景場中での共形不変性を非線形シグマ模型として扱い、 α' 展開（ゼロスロープ極限）摂動論に基づく繰り込み群による定式化に一般化された。これに関する代表的な仕事としては C. G. Callan, D. Friedan, E. J. Martinec and M. J. Perry, *Strings in background fields*, *Nucl. Phys.***B262**(1985), 593–609.

が挙げられる。平坦な背景場で弦の広がり自動的ゼロスロープ極限で重力子とその仲間の非線形相互作用を生じるのに対して、この繰り込み群のアプローチでは一般の背景場が非線形な（拡張された）Einstein 方程式を満たさなければならないという条件が得られる。両者を合わせると、背景時空と弦の自己相互作用が同じ作用原理で支配されているのであるから、弦理論が本来は背景独立な理論であることを強く示唆する。実際、弦理論の共形対称性により成り立つ [演算子/状態] 対応のため、弦のスペクトル自体が背景を無限小変形する自由度とも見做せる。

しかし、明白に背景独立な満足な弦理論の定式化は、現在でも知られていない。私自身は一つの可能性として、相互作用項だけからなる作用原理の運動方程式の解として世界面の BRST チャージを導出する形式で、背景独立性を実現しようとする考え方を 1986 年 4 月に富山で開催された国際会議の review talk で示唆した（同様なシナリオは独立に D. Friedan や E. Witten によっても指摘されていたことが後で分かった）。

T. Yoneya, Approaches to string field theory, in *Seventh workshop on grand unification /ICOBAN'86*, ed. J. Arafune (World Scientific, 1987), 508–532.

このときは随分と反響があり、講演に続いて活発に質問があった。会議後すぐにサンタバーバラと京都のグループで取り上げられ具体化の試みがなされたが、その後目立った発展は、残念ながらほとんどないようだ。

G. T. Horowitz, J. Lykken, R. Rohm and A. Strominger, Purely cubic action for string field theory, *Phys. Rev. Lett.* **57**(1986), 283–286.

H. Hata, K. Itoh, T. Kugo, H. Kunitomo and K. Ogawa, Pregeometrical field theory: creation of space-time and motion, *Phys. Lett.***B175**(1986), 138–144.

- [16] T. Yoneya, Duality and indeterminacy principle in string theory, *Wandering in the field*, Festschrift for Prof. Kazuhiko Nishijima on the occasion of his sixtieth birthday (World Scientific, Singapore, 1987), 419–428.

これについては、1987年の西宮湯川シンポジウムの招待講演でも論じた。

T. Yoneya, String theory and quantum gravity, in *Quantum String Theory*, Proceedings of the second Yukawa memorial symposium, Nishinomiya, Japan, October 23-24, 1987 (Springer, 1988), 23–31.

このアイデア（以下 STUP と略）には [15] で触れた富山の会議の少し後頃に思いついていたのだが、時間とか空間に関する不確定性を正確に定義するのが難しく、すぐ論文にする気にはならなかった。翌年たまたま折よく依頼された西島先生の還暦記念の本への寄稿の機会を利用して試論的に書いてみたのであった。後になって同じ頃に関係したアイデア（‘minimal distance’）が、D. Gross や G. Veneziano 等により独立に議論されていたことを知った。次項 [17] のプレプリントを出したところ、Veneziano から批判的なコメントがあり、私が直ちに反論を送るというやり取りが数ヶ月続いた。その後、彼とは何度か顔を合わせる機会があったのだが、この問題について彼と直接議論した記憶はない。何れにしても、彼とのやり取りは自分の考えをさらに明確にするのに役立った。一方、Gross の反応は少し違っていた。彼は当時 Princeton Univ. にいて、しばしば崎田先生の学生の博士論文審査のために City College に来ることがあったり、また彼のセミナーの際の討論等を通じて N. Y. 時代から知己であった。91 年の崎田先生の還暦を記念する City College でのシンポジウムの際に彼と立ち話をする機会があった。この問題も話題になり、彼は私の考え方もそれなりに理解してくれたという印象が残っている。

関連する思い出に触れよう。西宮シンポジウムの少し前だったか、原子核研究所でのセミナーの中で背景独立性の問題と関連して STUP にも触れたところ、当時所長だった Y^2 （山口嘉夫）先生から「湯川さんみたいなことを言うんじゃない！」と頭ごなしに怒鳴られてしまった。私は直ちに「そういうものではありません。最後まで話を聞いてからまた議論してください」と制して話を続けた。私としては弦理論の非局所性の本質的特徴をできるだけ単純な仕方で定性的に捉えることを意図して提案したのだが、そんな皮相的理解しかされないとするなら心外であった。それは時間方向と空間方向で UV と IR が対応するダイナミックな関係を意味をしており、もちろん、従来の非局所場理論の枠内では捉えられない新たな性質である。 Y^2 先生は辛辣で勇ましいことで有名な方であった。国内の

国際会議等で私が話をするときには、ほとんどいつも一番前の正面の席に座っておられ、たいてい棘があるような質問やコメントをされた（富山の会議、西宮湯川記念シンポジウムも例外ではない）。だが、たとえ少々の外れなところがあっても、そのように歯に衣を着せない率直な批判をしてくれる人は他にいなかったから、私にとって得難い貴重な存在であった。実は私が北大院生時代に先生が集中講義に来られたとき、ちょっとしたハッピーニングがあり、その頃から先生とは不思議な因縁が出来ていたような気がする。私の CERN 滞在中に住宅担当係の方とアパートの手続きのことで話をしていたとき、私が東大から来たこと知り「Prof. 山口はお元気ですか」と聞かれた。きっと CERN でも先生は武勇伝を残していたのだろう。先生の定年退職後も数年間は国際会議や研究会で会っていたが、その後顔を合わす機会がない期間が大分続いてから、岡山に開設された光量子研究所の開所式に招かれた折、しばらく振りでお会いしたのが最後になった。「ちょっと病気をしちゃってね」と弱々しい表情でおっしゃられたのが、20年近く経た今でも私の脳裏に焼きついている。

- [17] T. Yoneya, On the interpretation of minimal length in string theories, *Mod. Phys. Lett. A4* (1989), 1587–1595.

弦の世界面を特徴づける共形不変量としての極値的距離 (extremal distance) の概念に一種の conjugation に基づく双対的性質があり、STUP を関係つけられることが分かり、やっと論文にする気持ちになって書いた。私の N.Y. 時代に何気なく入った書店の書棚で偶然見つけ、これは役立ちそうだと直感し購入していた本 (L. Ahlfors, “Conformal invariants – Topics in geometric function theory”, 1973) を見直してヒントが得られたのであった。最初 PRL に投稿したのだが、(察するに Veneziano がレフェリーだったようで) 何度かやり取りした後も掲載されず、出版に1年程かかった。7~8年後、私が主張していた立場が弦の散乱に加えて D-ブレーン散乱の特徴的なスケールの定性的理解にも適用できることを次の論文で指摘してから、M. Li and T. Yoneya, Point D-brane dynamics and space-time uncertainty relation, *Phys. Rev. Lett.* 78 (1997), 1219–1222.

やっとある程度広く認知されるようになったようだ。例えば、明らかにこの考え方を取り入れた記述が Polchinski の教科書 (1998 年) にある (Volume 2, p. 161)。彼は 1993 年の Santa Barbara ITP の workshop “Nonperturbative

string theory”に私が半年間滞在したときからの知己であったが、この問題に関しては直接議論したことはなかった。彼が興味を示しているということは、M. Li から聞いていた。Li とは他にも STUP の M 理論への拡張が動機付けになった仕事として以下の論文がある（プレプリント hep-th/9906248, これも正式出版に2年かかったことになる）。

H. Awata, M. Li, D. Minic and T. Yoneya, On the quantization of Nambu brackets, *JHEP*(2001)12, 013.

この論文を書いていたとき、私以外の若手3人はたまたまシカゴ EFI に滞在（Li はポストドク）していて、南部陽一郎先生も関心を持たれ、それを通じて私の STUP のアイデアにも興味を持たれたようであった。それから数年後、一度だけ先生との会話の中で話題に上がったことがあった。なお、論文タイトルにある ‘Nambu bracket’ には馴染みがない読者が多いかも知れないので、私が書いたレビューを挙げておく（実は、私の放送大学定年退職（2015年）後のいくつかの仕事は、上の論文でやり残していた問題が動機になっている。下記の2番目の論文参照）。

米谷民明, 南部力学と南部ブラケット, 日本物理学会誌 72(2017), 231–235 ; T. Yoneya, Canonical Nambu mechanics: Relevance to string/M theory and approaches to quantization, *PTEP*12(2021)12C101.

私の理解では、Gross や Veneziano 等の ‘minimal distance’ の考えだけでは D-brane の場合には有効ではない。そのことも含め、STUP に関しては歴史的な展開も含めて包括的に論じた論文として

T. Yoneya, String theory and space-time uncertainty principle, *Prog. Theor. Phys.* **103** (2000), 1081–1125,

また、[4] の第4章でもかなり詳しく触れた。よりコンパクトなものとして、Strings 2000（Michigan Univ.）での talk に基づく次の論文がある。

T. Yoneya, Space-time uncertainty and noncommutativity in string theory, *Int. J. Mod. Phys. A* 16(2001), 305–315.

また、この仕事を中心に回想を記したエッセイとして以下がある。

T. Yoneya, The short-distance space-time structure of string theory : Personal recollections, in *Looking beyond the frontiers of science – dedicated to the*

80th birthday of K. K. Phua, (eds. L. Brink et al, World Scientific, Singapore, 2022), 313–327.

- [18] J. Scherk and J. H. Schwarz, Dual models for nonhadrons, *Nucl. Phys.* **B81**(1974), 118–144; Dual models and the geometry of space-time, *Phys. Lett.* **B52** (1974), 347–350; Dual field theory of quarks and gluons, *Phys. Lett.* **B57**(1975), 463–466.

私の仕事を巡ってあるやりとりが吉川圭二先生と Schwarz の間であったことを、帰国したばかりの吉川先生に初めてお会いしたときに聞いた。最初の論文で私の [1] を引用せざるを得なかったのは、その効果だったのかも知れない。70年代後半の私の N.Y., City College 時代には西海岸のカルテクにいた Schwarz (1941 年生まれ) とは直接交流する機会がなかったのだが、前項目でも触れた 93 年の Santa Barbara ITP workshop で数ヶ月居室をシェアしたのがきっかけになり、親しく付き合うようになった。当時、私は低次元ブラックホールの行列模型による非摂動的定式化を求めて Jevicki と共同研究をしていたが、Schwarz から、自分の学生でこの問題に興味を持ち私に相談したいという学生がいるとのことで会うように頼まれたことがあった。そのとき、自分がいては学生が話しにくいだろうと、私と学生と二人きりで議論できるように Schwarz が配慮してくれた。彼は豪放な笑い方に特徴がある極めて明るい性格の人であると同時に、そういう細かい気配りをする人でもある。

- [19] T. Yoneya, Interacting fermionic and pomeron strings: Gravitational interaction of the Ramond fermion, *Nuovo Cim.* **A27**(1975), 440–457; Geometry, gravity and dual strings, *Prog. Theor. Phys.* **56**(1976), 1310–1317.

このうち前者では Ramond のフェルミオン開弦と closed string の重力子状態との結合を local Lorentz 変換を [10] の方法を拡張して定式化し、後者は dilaton 状態と B 場への拡張とその幾何学的解釈を論じた。関連して、グラスマン座標を用いて Neveu-Schwarz 弦の明白に超共形共変的な超場演算子形式 (つまり, 2DsuperCFT の演算子形式) を定式化した以下の論文がある (この仕事については [4] でもある程度詳しく触れている)。

T. Yoneya, Grassmann algebraic approach to the Neveu-Schwarz model and representation of supermöbius algebra, *Prog. Theor. Phys.* **54**(1975), 526–541.

これは通常のボソン振幅の場合に Fubini-Veneziano が 1970 年に与えた Koba-Nielsen 振幅の演算子表示を、Neveu-Schwarz 模型に拡張したもので、このコンテキストで超場を導入したのはこれが最初である（1年程後に L. Brink 等が、私の仕事を知らずにこれと近い論文を書いている）。

spinning string の相互作用を論じた私のこれら一連の仕事は、いずれも、弦理論における時空超対称性を発見した有名な GSO 論文

F. Gliozzi, J. Scherk and D. Olive, Supergravity and the spinor dual model, *Phys. Lett.* **65b**(1976), 282.

の以前に行ったものである（[1][2]に加えて超重力と関係し得る [19]の最初の論文が引用されている）。私がこれらの問題について考察していた頃は、まだ超重力理論は存在してなかった。後者と GSO 論文について最初に知ったのは、1976年の9月に New York, City College に到着した後のことだ。時空超対称性に関する Wess-Zumino の論文は 1974 年に出ていたのだから、当然、こういう着眼点もあったんだ、いいところをやられたなと感心すると同時に、私自身、もっと粘り強く弦理論と重力の関係を追求してもよかったかなと反省した。

それから大分後になってからのことだが、Schwarz と GSO 論文について話題になったとき、彼は「これは本来自分がやるべきことであった」と、幾分悔しそうな表情も交えて述懐したのが印象に残っている。彼は当初は dual pion 模型と呼ばれていた NS 模型の創始者として複雑な思いを持っていたであろう。70年代後半からの8~9年は（私自身も含め）ほとんどの研究者が弦理論への興味を失い離れて行った中、彼は、多分、この思いをバネにして弦理論と超重力理論との関係について深く追求を続け、84年の（M. Green と共著の）ブレークスルーに繋がったのだろう。

ただ、私にとって疑問だったのは、GSO 論文ではいわゆる GSO 射影で時空超対称性には不要な余計な状態を落としたが、(タキオンとしての 'pion' を含む) 余計な状態の意味が何かであった。90年代の発展により、それが不安定ブレーンの存在により超対称性が自発的に破れる場合と解釈でき、余計な状態を含めたとき時空超対称性が non-linear realization として隠れた仕方で存在しているとの理解が出来ることが分かり、個人的には疑問が一応解決した。

T. Yoneya, Spontaneous broken space-time supersymmetry in open string theory without GSO projection, *Nucl. Phys.***B576**(2000)219–240; T. Hara and T. Yoneya, Nonlinear supersymmetry without the GSO projection and unstable D9-brane, *Nucl. Phys.***B602**(2001),499-513.

その意味では弦の世界面上の超共形対称性 (Neveu-Schwarz, Ramond, Jervais-Sakita, ...) こそが、実は一般座標ゲージ対称性を含む時空超対称性を支えるより深い対称性であると言える。これは2001年にカルテクのセミナーに呼ばれて話したときにも強調したのだが、Schwarz (おそらくこれらの論文のレフェリーは彼だったのだろう、気に入ってくれたようで非常に positive なコメントをもらっていた) は嬉しそうな表情で聞いていた。また、このときはたまたま E. Witten 夫妻がカルテクに滞在中であった。Nappi (妻) が興味を持ったらしく、セミナーの後すぐ夫妻で私のところにきて短時間議論した。

話が前後するが、GSO 論文が出る少し前頃から私の興味は [20] の 't Hooft 論文の影響もあり、次第にゲージ理論の非摂動的構造、特にクォーク閉じ込め問題、のほうに移っていた。私自身にとってはこれも自然な流れであった。短い期間のうちにたくさんすることに手を出してすぎて熟成が足りなかったことは、その後の反省材料となったが、私としては研究の幅や視野を広げることがそれなりにできたし、結果的に他の研究者に引き継がれ後の発展に繋がった部分もある。そして、当然、閉じ込め問題はカラー電場の弦、あるいはカラー磁場の渦糸などの有効自由度としての役割を通して間接的に弦理論と深い関係にある。実際、弦理論の90年代後半からの再復活はまさにこうした関係に関する理解が深まり、重力とも関係する新たな段階に至るものであったわけだから、この‘寄り道’は、当時は深い雲に覆われて視界外だったが、今から見れば『弦から重力』の問題へと、15年以上を経て再び繋がる道であったことになる。

その経過についてももう少し記してみよう。New York で最初に書いた論文は、ゲージ場のインスタントン解を例として非摂動的配位の空間無限遠での振る舞いに対応する力学変数の重要性を論じたものになった。より詳しくは関連するエピソードも含め [4] に書いたが、ここでも簡単に触れる。

S. Wadia and T. Yoneya, The surface variables in the vacuum structure of Yang-Mills Theory, *Phys. Lett.***66B**(1977), 341–345.

実はこの論文の本来の主眼は、重力のハミルトン形式に関して Regge-Teitelboim (1974 年) が指摘していた表面項の重要性と同様なことをゲージ理論で示すことにあったのだが、byproduct として、後に Gribov ambiguity として広く知られるようになった非摂動的なゲージ場の配位におけるゲージ固定条件に伴って起こる非一意性についても実質的に指摘してあった。これは Gribov 自身の論文のプレプリントより 1 年近く前に投稿しているが、私たちの論文はほとんど忘れられていた。ただ、Gribov ambiguity は連続理論での非摂動的なゲージ場の配位の特徴の一つとは言えるが、それだけで直ちに閉じ込めなどの説明になるわけではない。

この仕事の次に取り掛かったのは、このような非摂動的な配位での量子揺らぎの特徴を共形異常 (conformal anomaly) に基づいて経路積分により一般的に定式化し、インスタントンの力学に応用する問題であった。

T. Yoneya, Conformal anomaly and the interaction of instantons, *Phys. Lett.* 71B(1977), 407–411.

このアイデアはインスタントン周りの揺らぎを 1 ループ近似で直接計算した 't Hooft の 76 年の仕事に触発されて思い至ったものである。私が知る限り、この論文は量子異常を経路積分で直接導いた最初の例であった。カイラル (ABJ) 異常についても同様に適用すれば、Atiyah-Singer の指数定理の積分表示が得られることを一言簡単にコメントしてある (Pauli-Villars 正則化法を用いていて、量子異常は積分測度からではなく regulator fields の作用積分からの寄与となる方式で扱っているため、最後の結果は同じだが、後に広く用いられるようになった藤川和男先生が提唱された方法 (1979 年) とは一見異なる。だが、古典作用以外の regulator 部分を測度の定義と解釈すれば結局同じで、正則化の仕方の違いに過ぎないと言える。経路積分を直接用いているわけではないが、Pauli-Villars 正則化によるカイラル異常の導出は、80 年代に入って Jackiw 他によって詳細に調べられている)。今から思うと、これは切り離して別の独立な論文にしてきちっとした形で詳細を論じておいた方がよかった。当時は閉じ込め問題が私の目標であった。共形異常はスケールの生成という意味でそれと深い関係にあるのに比較すると、カイラル異常の方は数学的には面白いが、dynamics にとっての重要性は小さいと考え、その気にならず怠ってしまった。また、2次元非線形シグマ模型に適用するとより効果的な結果が得られるともコメントしてあるが、これに

ついても、じきに他に集中したい問題 ([20] で触れる) に頭が占められてしまい、途中で棚上げにしてしまった。共形異常の応用に関しては私の仕事を受けて、2次元 \mathbb{CP}^{n-1} 模型のインスタントン気体の場合について、1~2年後、ドイツ (B. Berg-M. Lüscher) とロシア (L. Frolov-A. Schwarz) のグループによって詳細に調べられ拡張された。

この仕事に関連してもう一つ悔やまれるのは、このとき、どうして私は共形異常の議論の弦理論への応用・拡張に思い至らなかったのかということだ。2次元非線形シグマ模型 (\mathbb{CP}^1 模型) での計算もある程度やっており、また、超重力理論への応用については、共形異常が打ち消す条件を調べた片手間のような小さな論文を一つその後すぐ書いていたにも拘らずにである (この論文の主要結果は、翌年の Christensen-Duff の包括的な仕事で確かめられ、拡張された)。

T. Yoneya, Background metric in supergravity theories, *Phys. Rev.D*17(1978),2567–2572

[10] から始まって [1][2] を経て [19] に至ったように、つい数年前、N.Y. に来る前までは世界面の共形不変性にあれほど拘って仕事をしていたのに、N.Y. に来てからは急速に発展する渦中の大波に投げ込まれたせいか、ゲージ理論の非摂動的性質に魅了され、弦理論のことはすっかり忘れてしまっていた。弦理論への応用は 81 年の Polyakov の有名な仕事 (conformal anomaly に関しては A. Schwarz の包括的な CMP 論文だけを引用している) まで待たなければならなかった。

先に「熟成が足りなかった」と書いた理由は以上のようなことである。この頃の私には、色々な芽があったのに十分に発展させずに、ただ一途に閉じ込め問題の手がかりを求め、次々とテーマを巡る遍歴者のようなところがあった。もちろん、閉じ込め問題は純理論的には今でも証明されていない難問であるから、当時の段階でいくら集中しようが良い結果に至ることは覚束ないことではあった。その意味では致し方がない面もあった。崎田先生とはよく二人だけで先生の馴染みの寿司屋に出かけた。一度、「もう論文はこれ以上しばらく書かなくてよいから、本当に何をすべきかをじっくり考えてはどうか」とお小言を頂いた。私にとって貴重な得難い助言であった。

この機会を利用し、N.Y.時代（1976–1978）における印象的な出会いについて記しておきたい。少し長くなるが、ご容赦いただきたい（長年の友人 S. Wadia と A. Jevicki とのことは [4] で触れたのでここでは省く）。まず、一人は R. Jackiw である。私は 1977 年夏の Banff Summer Institute に参加したが、そのときの講師の一人が彼であった。彼は年齢は私より 8 歳上だったが、どういうわけか（私の質問や、彼の講義内容と関係する私のインスタントン関係の論文を気に入ってくれていたためか、あるいは彼がレフェリーだったのかも知れない）気が合い、講義が終わった後に、ビールを飲みながら話そうと宿舎の彼の部屋に呼ばれて、一緒に School に参加していた S. Wadia も交えて深夜まで話しこんだことがあった。少年時代に母国ポーランドから家族と共にアメリカに移住した頃の思い出をしんみりと語っていたのが印象に残っている。82 年に内山先生が奈良で主催し私も組織委員の一人として加わった国際会議 “Gauge theory and gravitation” に彼が来日した際に再会したが、それから大分後になって、私が何度かセミナーや、Jevicki (Brown Univ.), W. Taylor (MIT) 等と立ち上げた学振の日米共同研究プロジェクト等で MIT に滞在したときも、一度、仕上げたばかりの論文を私の部屋に持参して「君がやっていることも少し関係あるから読んでみてくれ」と言ったりなどで、昔のことが思い出された。彼は気が難しそうでとっつきにくい人と思われているようだが、私はそうは思わない。少し前に亡くなったというニュースを聞き、悲しい思いをした。

もう一人、私と同年生まれの E. Weinberg。詳しくは内容を記憶していないが、彼とは一度私がコロンビア大学に出かけて行って長時間議論したことがあった。実を言うと崎田先生が当時 PR に投稿された彼の論文のレフェリーだったのだが、手に負えないということで私が下請けを頼まれてしまった。いっそのこと彼と直接議論するのが手っ取り早いとのことで、崎田先生が彼に電話をかけ、1対1で議論することになった。こんなことは今では考えられないが、当時はおおらかな時代であった。そこで意気投合するほどに互いに理解でき満足して別れたのが、愉快的な好ましい記憶として残っている。その6~7年後、CERN 滞在中に私が1週間訪問したコペンハーゲン NBI で偶然顔を合わせ旧交を温めることができたが、驚いたことに、それからさらに35年近く後に沖縄で開催された Strings 2018 に彼が出席していて思いがけなくまた再会し、懐かしく昔のことを話し合った。「驚いた」のは、彼の仕事は弦理論との関係は薄く、それまで私

が出席した String conference には一度も参加していたことがなかったからである。彼は KIAS の客員メンバーを務めているようだから、旅行のついでの機会だったのかも知れない。

最後に M. Kaku のこと。彼も私と同年生まれの日系 3 世である。Kaku-Kikkawa の論文などで名前はよく知っていたが、City College で同僚になるとは予想していなかった。彼と最初に会ったとき、機関銃のような勢いで電動タイプライターを打っていたのが第 1 印象となった。その頃の彼は車の運転をしなかったのだから、崎田先生の家でのパーティーに呼ばれたときなど、私が自分の車を運転して一緒に出かけたことが数回ある。彼との話で印象が残っているのは、彼が非常な物知りであること、そして、日系人として強制収容所にいた戦時中の家族の苦労話や、彼が当時住み活動していた N.Y., lower Manhattan 地区の Chinatown の reform 運動についてだった。収容所で生まれた兄とは異なり、戦後に生まれた彼は、言葉の苦労をさせないようにと、最初から完全に英語だけで育てられたため、自分は日本語が話せないとのことであった。ちょっと困るのは、彼が私の名を引用するときは何故かいつも 'Yonea' と綴り、y を落とすことである。吉川先生が亡くなられてから、Physics Today 紙に彼が投稿した追悼文にもこのミスがある。彼から内容をチェックしてもらいたいと原稿を送ってきたので 'Yoneya' と訂正して送り返した。だが、掲載文では依然として y が抜けたままであった。

話を戻そう。量子重力の基本理論としての弦理論そのものの研究に戻ったのは N.Y. から帰国後、北大から東大に異動 (1980 年) し数年後の 1 年間の CERN 滞在 (1983~1984) から帰ってから、Green-Schwarz の量子異常の新たな打ち消し機構の発見をきっかけに起こった爆発的な弦理論の復活に触発されてのことだった。閉じ込め問題の追及は CERN に行く前にきっぱり諦め、CERN 滞在中は充電期間だと割り切って量子重力の基礎をできるだけ根本から見直そうという意図で昔の文献を再検討しながら考察を進めていた (その中身については [4] に記したのでここでは触れない)。滞在中、Alvarez-Gaumé のセミナーで E. Witten と共著の重力量子異常の打ち消しの話があった。IIB 型弦理論の有効性を指し示す彼らの包括的な議論に大いに感心し、ここからの発展もあり得ると予感したが、こんなに早くそこに繋がるとは予想外であった。

その後の弦理論の発展で特に感慨深いのは、なんと言っても90年代後半のPolchinskiによるDブレーンの発見、そして特に97-98年にかけてのMaldacenaの論文がきっかけになったAdS/CFT対応である。私が最初に重力と弦の関係を指摘した頃の弦理論はハドロンの弦であったので、「ゲージ理論から重力が出てくるのか？」ということで、その解釈にかなり苦しんだ（「二律背反」問題として[4]で詳しく述べた）。しかし、この対応関係を通じ、相互作用の統一のための弦とハドロンの弦が、あたかも‘回り舞台’が360度回転して最初のシーンに戻ったかのように結びつくことになり、私が25年前に幸運にも最初に行き当たった“弦と重力の関係”の真の意味は、結局、こういうことであったかという思いを持てたのである（私自身のその後の関係する仕事も含め[4]（第4章）で詳しく触れた）。

- [20] G. 't Hooft, A planar diagram theory for strong interactions, *Nucl. Phys.* **B72**(1974), 461–473.

私がこの仕事を知ったのは、[1][2]の論文を書いたから1年近く経てからだったと記憶している。なんと素晴らしくエレガントな仕事だろうと本当に感心した。そして、数年後、N.Y., City College 滞在中に出会った

G. 't Hooft, On the phase transition towards permanent quark confinement, *Nucl. Phys.* **B138**(1978), 1–25.

はさらに増して実に魅惑的な論文であった。これに大きく影響を受け、その数ヶ月後、私は't Hooftの議論を格子ゲージ理論で定式化し、その双対性と $Z(N)$ (center) vortexの凝縮による閉じ込め機構を論じた。

T. Yoneya, $Z(N)$ topological excitations in Yang-Mills theories : duality and confinement, *Nucl. Phys.* **B144**(1978), 198–218.

このとき、初めてIsing ModelについてのOnsager解、Kramers-Wannier双対変換などの原論文を詳しく読んだが、その素晴らしさには魅了された。南部先生が1950年代最初の頃やはりそれらの影響で論文を書いておられる（本誌2023年、8月号「南部陽一郎ノーベル賞講演」の筆者が担当した日本語訳と解題を参照）のも、然もありませんと思った。この論文で議論したvortexの凝縮機構では、vortexがその長さに比例したエントロピーを持つことを用いている。これはゴム弾性の統計力学とのアナロジーがあ

ることから、南部先生が強く興味を持たれたようだった。これに関連しては [4] に詳しく書いたのでここでは繰り返さない。

ところで、't Hooft 論文と近い内容で格子ゲージ理論の立場で独立になされた仕事として、

E. Fradkin and L. Susskind, Order and disorder in gauge systems and magnets, *Phys. Rev.D***17** (1978),2637–2658.

があるのだが、私は当時知らなかった。内容的に私の上の 1978 年論文と $N = 2$ の場合に重なるところがある。また、私の論文から 1 ヶ月遅れて M. Green も一般の N を扱っていて、私のと部分的に近いところがある論文を書いている。これについては [4] で触れた。Green は Fradkin-Susskind 論文を引用しているので知っていて書いたわけだ。私の論文のプレプリントが出てから半年以上して NP に掲載される頃だったか、Susskind から手紙付きで論文別刷を受け取り初めて知った。80 年代になって物理学会から格子ゲージ理論の論文選集（「新編物理学選集 80」, 日本物理学会, 1983 年）を編集するように依頼されたが、その中にこの論文を収録した。70 年代後半から親しくおつきあいしていた共同編集者の岩崎洋一先生（実は City College における私の前任者）は、私の 1978 年論文の方を選びたいと言われたのだが、教育的見地からは議論の焦点が絞られていて分かりやすい Fradkin-Susskind の方が論文選集により相応しいと考え私は固辞した。

ここまで書いたついでに Susskind（1940 年生まれ）との思い出を、少し [4] と重なるところがあるが記しておきたい。私の City College 時代、彼は City College から地下鉄で数駅のところにあった Yeshiva Univ. に在籍していて、City College（彼自身 N.Y. 出身で学部での母校）の物理学科コロキウムにはよく出向いて来ていたので顔は何度か見かけていたが、個人的に議論したことはなかった。私の東大赴任後、Stanford Univ. に移っていた彼が来日した機会にセミナーに招待したのがきっかけになり、交流が始まった。そのとき投稿したばかりの論文

T. Yoneya, Space-time local symmetry of string field theory, *Phys. Rev. Lett.***55**(1985),1828–1830

を読んでもらったところ、彼もこれとほとんど同じようなことを考えていたとのことだった。これは実はすでに 10 年前の私の論文（[19] の 2 番

目のPTP論文)で示唆していたことを具体化し、背景時空の無限小変形を引き起こすようなstring fieldの変換をlight-cone SFTの枠内で論じたものだ。背景独立性に関するささやかな仕事ではあるが、このような議論をした最初で、[15]で触れた富山会議での私のtalkの背景になった。さらに次の論文でdilaton弦場の無限小変形による結合定数の変化を扱った。

T. Yoneya, String-coupling constant and dilaton vacuum expectation value in string field theory, *Phys. Lett.* B197(1987),76–80.

私が知る限り、これもSFTにおける‘soft-dilaton theorem’に関する最初の仕事で、後に複数のグループ(MITおよび京都グループ)により共変的SFTへ拡張された。

それからかなり後になるが、彼の招待でStanford Univ.に1ヶ月ほど滞在した(1999年春)ことがあった。彼と最初に顔を合わすなり、開口一番、「弦が重力を含むことを式無しに説明するにはどうするのが一番良いだろうか」と聞かれた。[2]で触れた昔の学会特別講演で強調したことを思い出し、たとえば、万有引力の普遍性とclosed stringの相互作用の普遍性のアナロジーから入るとどうだろうかと言ってみたと記憶している。もちろん、これももっと説明が必要だが、図だけでもある程度は説明可能で、私は一般向けの科学雑誌の記事で弦と重力の関係に触れるときは、よくそういうやり方をしていた。また、具体的にどういう問題だったか記憶していないが、何か超対称性に関連することで彼から質問があり議論が始まった。[19]で触れた超場形式の論文で私が昔論じたことと関係していたため、黒板にグラスマン変数を書いて説明し出すと、彼は自分はグラスマン変数が出て来ると頭が混乱して何も考えられなくなってしまうと言って、ちょっと引くような感じになった。確かに彼の仕事は常に明確な物理的イメージに基づいていて形式的な議論は極力避けていることはよく分かっていた。そこにこそ私は[6]で最初に影響を受けた学生時代から強く惹かれ尊敬していたのだが、これにはちょっと驚くと同時に、しばしば形式論に頼ってしまいがちな私にとっての反省材料になった。

もう一つ、滞在中、研究室の若い人たちとともに彼と夕食を共にしたときのことが忘れられない記憶として残っている。私と向かい合った彼が、

Tamiaki, “Old soldiers never die, they just fade away.” Do you know about this phrase?

と、なんと、米軍のマッカーサー元帥の退任演説（1951年）における有名な言葉を突然引用した。私は「もちろんよく知っている」と答えたが、彼がどういうつもりでこれを持ち出したのか、彼はこれ以上は語らず、私も問わなかった。もしかして上で触れた私との議論と関係しているのか、今でも測りかねる謎になっている。「老兵」でなくとも、何らかの形で生が突然絶たれない限り、時間の流れに縛り付けられた私たちの誰にも“fade away”する最終期が、遅かれ早かれ、いずれは訪れるのは必定だ。このとき彼自身は還暦に近い年齢で、まだ風の冷たい季節なのにずっと半ズボンで通すなど私が舌を捲かざるを得ないほど元気であった。そんな彼でも老いの不安を感じていたのであろうか。彼はまるで正に還暦で再誕生したかのように、80歳を優に超える今でも驚異的な勢いで最近流行のテーマで論文を書き続けている。そんな理論物理学者がかっていただけるか。

本筋に戻ろう。上の私の1978年論文のフォローアップとしてモノポール凝縮機構と関連してSU(N)/Z(N)型の模型を論じた次の論文がある。

T. Yoneya, Monopole condensation and quark confinement in a weak coupling SU(N) lattice gauge model, *Nucl. Phys.***B153**(1979), 431–444.

2-form のZ(N)ゲージ場の自由度を陽に導入してZ(N)群を取り出す仕方には今から見てもある程度意味があるかも知れない。実はこれには‘frustration’があるスピン系の統計力学がヒントになっていた。私が東大に異動してすぐ、物性理論の鈴木増雄先生の研究室のセミナーに呼ばれて話したことがあった。また、関連する博士論文の審査を頼まれたこともある。

関連する私の仕事にもう一つ触れておきたい。’t Hooft の1974年論文では大N極限のゲージ理論をある種の弦理論として解釈する可能性についてもlight-cone gaugeのHamilton形式で議論していた。これはスピーチでも触れたように、[21][22]で論じられた‘fishnet diagrams’による弦の解釈をより系統的に定式化しようとするものであった。私はこれとWilsonの格子ゲージ理論の論文（同じく1974年に出版）に触発され、少し後になるが、統計力学でスピン系を平均場の理論に書き換えるのにしばしば用いられる方法を拡張し、通常のWilson作用のlattice Yang-Mills理論を、そ

れと原理的には任意の N で同等であることが明白な仕方で、一種の string field theory に変換可能であることを示した。

T. Yoneya, A path-functional field theory of lattice gauge models and the large- N limit, *Nucl. Phys.* **B183**(1981), 471–496.

‘string field’ の性格がスピン系の場合の平均場に相当していて fundamental string でもないし、また Wilson loop operator と異なるため、‘path-functional field’ という新しい言い方をしてみた。上の 79 年論文でも 2-form ゲージ場の形式で導入していた、現在では ‘1-form symmetry’ と呼ばれる string field のトポロジカルな $Z(N)$ 対称性に基づき、ゲージ場の相についての議論を与えた。当時、この仕事は全く注目を浴びなかったが、最近、実質的に同様な議論が McGreevy 等によりなされている。この論文ではこうした対称性の考察に加え、さらに大 N 極限での性質を論じた。ゲージ理論の大 N 極限は弦理論の D ブレーンとの関係を通じ 90 年代に holographic principle に繋がった。現在の観点から見ると、私が導入した ‘path-functional field’ は、バルクの fundamental string field を境界に投影して得られる影のような自由度と見做すべきものという意味で、私の ‘寄り道’ も時空を超えた高所から見れば『弦から重力』に繋がっていた。

- [21] B. Sakita and M. A. Virasoro, Dynamical model of dual amplitudes, *Phys. Rev. Lett.* **24**(1970), 1146–1149.
- [22] H. B. Nielsen and P. Olesen, A parton view on dual amplitudes, *Phys. Lett.* **B32** (1970), 203–206.
- [23] H. B. Nielsen and P. Olesen, Vortex line models for dual strings, *Nucl. Phys.* **B61**(1973), 45–61.
- [24] Maxwell は、ここに紹介した 1865 年論文の中の *Note on the Attraction of Gravitation* と題された小節で、重力場の力線に関する考察の結果として

The assumption, therefore, that gravitation arises from the action of the surrounding medium in the way pointed out, leads to the conclusion ... (中略) ... that the presence of the dense bodies influences the medium so as to diminish this energy wherever there is a resultant attraction. As I am unable to understand in what way a medium

can possess such properties, I cannot go any further in this direction in searching for the cause of gravitation.

と論じ、重力を電磁場と同様な意味での力学的場によって理解する際の難しさを指摘した。それからちょうど 50 年後に一般相対性理論が解決を与えたわけだ。等価原理により重力エネルギーは局所的には常に消去できることに現れているように、一般相対性理論では局所的なエネルギー密度の概念は成立しないから、Maxwell が直面した困難は全く別の観点から考えなければならない。ここではこれ以上この問題に踏み込むことは出来ないが、一般相対性理論におけるエネルギーの問題に関しては、長い論争の歴史がある。

ところで、本スピーチの最後に触れたように、Maxwell, Einstein に加えて 1000 年前のアラビアの自然科学者 Ibn al-Haitham (Huygens, Newton 等から始まる近代的な光の理論に繋がる先駆的業績で知られる) の業績を称え、国連は 2015 年を国際光年と定め、世界中でそれに因んだ催しが行われた。日本物理学会でも一般向けの科学セミナーをこのテーマで開催した。そこで私が行なった講演『光と場：マックスウェルから弦理論まで』は、ある意味で本スピーチの最終部を敷衍したようなものなので、参考のため表紙と最後の 2 ページ分を抜粋して添付しておく。

添付ファイルへの補足：未来への希望

「量子」重力に関する最近の議論の大半は（量子場の entanglement の問題に動機づけられた議論も含め）基本的に半古典近似に基づいている。もちろん、あらゆるレベルで理解を深めることは重要であることはいうまでもない。だが、局所場近似が有効な低エネルギーに止まっているのは、量子重力にとって最も本質的な UV 領域の問題とどう繋がるかが不明である。弦理論は UV 領域の困難を解決して全ての相互作用の統一を成し遂げるほぼ唯一の可能性であることについては、ほとんどの研究者が同意するだろう。しかし、弦の非局所性の性格の本当の理解がまだまだ不十分だと私は考えている。また、非摂動的な意味での定義が不明で、ファイル最後のページの 4 番目の項目のような概念的な問題は未だ手つかずである。特に弦の非局所性に関する非摂動的な定式化には、例えば、[19] で触れた私と Wadia との論文で議論したようなゲージ場の場合と通じるような開弦場の無限遠での性質を適切に捉えることが、holography の定

式化と関係して重要になる可能性があるとは私は予想している。つまり、開弦のループとしての閉弦がバルクの重力を記述するが、それと境界付近で開弦が与えるゲージ場の力学とが対応する。これを満足の行く仕方で捉えるには、完全に量子化された開弦の力学だけから全体を整合的に閉じた形で定式化する必要がある。もちろん、数学的定式化が出来ただけでは不十分で、それに伴う概念的な基礎が確立して初めて本物の理論になる。そして、その結果として様々な概念的課題自体の意味と位置づけも当然変遷してゆく。100~200年のスパンで電気と磁気の統一理論の歴史とのアナロジーで比喩的に言うなら、弦理論は未だFaradayとMaxwellの間の中間的な状況にあるという見方もできそうだ。

最後のページに出てくる「電磁運動量」とは、現在の言葉ではベクトルポテンシャルのことである。これはFaradayが電気と磁気の背後にあるべきより根源的な物理的自由度（直観的イメージとしては、一種の渦で、その時間変化が電場を、空間変化（回転）が磁場を与える）として“electro-ionic state”（電気活性状態）となすけていたものを数学的に具現化したものだ。Maxwellの1865年論文はこれに基づいて電場と磁場を統一し、その力学を具体的に定式化した。最後の項目で、弦を「電磁運動量」に擬えたのは、言うまでもなく前のページでまとめてあるように、量子化された弦から自然に重力と電磁力が得られるためである。このアナロジーからすると、まさに電磁運動量がゲージ場として定式化されたのに相当して、上で述べたような弦の本来の意味が明らかにされ、ゲージ理論と一般相対性理論の真の統一として、新たな非摂動的な弦理論の展開がそう遠くない将来どこかの段階でなされるだろうと考えるのは自然である。そのための種や鍵はおそらく予想外で意外な、もしかすると、ごく手近なところに隠れているのかも知れない。多くの人が弦理論を忘れかけている今こそ、そうした進展に向けての好機と捉えてみてはどうだろうか。


歴史に関連して私が好きな言葉の一つに、あるフランス人女流作家が残した「過去は想像力により捉えなおすなら、息吹が戻り活力になる」（英訳からの拙訳）というのがある。これは知的探求に向かう情熱や構想は想像力によって高められ、同じ想像力がその歴史や道筋を鑑賞し刺激を得るにも役立つという相乗の意味で、科学的精神にも適用できると思う。また、実際的にも量子力学への飛躍におけるド・ブロイ、ハイゼンベルク、シュレーディンガー、ディラック

ク等の例が示しているように、過去とのアナロジーが新たな方向への研究の動機付けとして役立つことはよくある。これは個人の理解や考え方の成長と進展そのものも、その本質上（生物学的にも、昔からよく言われるように、個体発生は系統発生を繰り返す）、歴史的な発展と並行するところがあることから論理的にも不思議ではなく、むしろ当然と言えるのではなかろうか。

日本物理学会 2015 年度科学セミナー 2015/8/20
東大駒場キャンパス

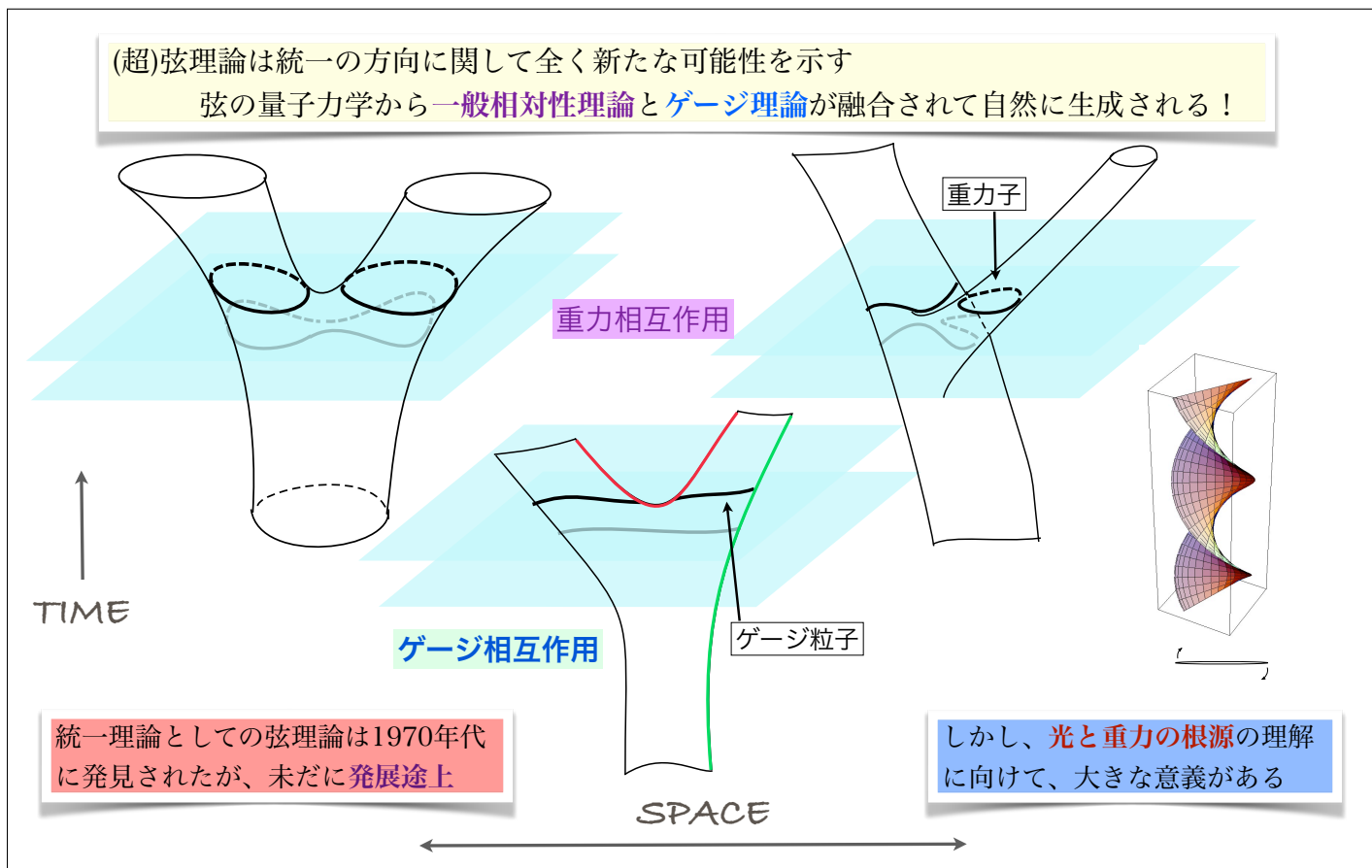
米谷 民明 Tamiaki Yoneya

光と場：マックスウェルから弦理論まで

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$


- マックスウェルは何を成し遂げたか
- 光とは何か：相対論と量子力学による深まり
- 光と力はどう関係しているか：ゲージ理論
- 光と重力の根源を探る：弦理論の可能性

© Tamiaki Yoneya



おわりに：まとめと補足、そして展望

- マックスウェル理論の形成：具体的な物理的イメージ or アナロジー（力線，渦）が重要な役割を果たした **電磁運動量（=電気と磁気の統一）**：電磁的「渦」の物理的自由度
- 「**電磁運動量**」のゲージ場としての真の意義：（特殊）相対論的量子力学=場の量子論により、初めて明らかになった。だが、それには **1世紀にも渡る時**を要した
- アインシュタインの一般相対性理論：基本相互作用を**局所的対称性の原理**に基づき定式化する道を切り開いた。古典場理論としての**ゲージ理論の最初の出発点**は、この方法のさらなる拡張を試みた数学者ワイルの仕事にある
- ゲージ理論は量子場の理論と自然に調和できるが、一般相対性理論は量子力学の構造と基本的に調和し難い構造を有する（**局所時空対称性 vs. 量子力学の状態概念の非局所性**）
- 弦理論：一般相対性理論とゲージ理論を（量子力学の立場から）自然に**統一する方向**を指し示す。電磁力と重力の統一に関する弦の役割には、比喩的には電気と磁気における電磁運動量と似た意味がある。その真の意味の解明には時間がかかるだろう：**今世紀の課題**

まだ見ぬ新粒子を稀少過程で探るということ

林 青司 (日本物理学会)

良く知られているように、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ といったレプトン・フレーバーが変化するニュートリノ振動では、仮にニュートリノの質量固有値が全て縮退しているとする(世代間の混合角がゼロでなくても)振動は起きない。それは、その場合、世代間(フレーバー間)の global な対称性(フレーバー対称性と呼ぼう)が生じ世代数が保存されるため、フレーバーが変わるような遷移は禁止されるからである。

クォークのセクターでも、例えば $s \rightarrow dZ$ といった、電荷は変化せずフレーバーが変化する“Flavor Changing Neutral Current (FCNC)”によって引き起こされる K メソンに関する $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$, $K_L \rightarrow \mu\bar{\mu}$, $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$ といった過程が存在する。しかし、これらの現象の起きる確率は通常の弱い相互作用による過程の場合と比べて非常に小さいので、こうした FCNC に依る過程は“稀少過程 (rare process)”とも呼ばれる。

当初のクォーク模型や電弱統一理論であるワインバーグ・サラム模型においては、u,d,s の三つのクォークのみ存在するものとされていた。この場合、第二世代の s クォークは、第一世代の u, d クォークとは異なり、SU(2) doublet を組む相棒が存在しないため、ラグランジアンの中の弱い相互作用を記述する項が、フレーバー対称性を破ることになる。その帰結として、 $s \rightarrow dZ$ という FCNC 過程が tree (古典) レベルで、弱い相互作用と同程度の確率で生じてしまい実験事実と著しく矛盾するという重大な問題を、理論は抱えることになった。その解決法は意外に単純なもので、s クォークと doublet を組む相棒として、チャームクォーク c を導入する、というものであった (Glashow - Iliopoulos - Maiani, GIM)。これによりゲージ相互作用(共変微分)のセクターはフレーバー対称性を持つことになるので、FCNC 過程は tree レベルでは生じなくなるが、u と c クォークの質量の差により、理論全体としてはフレーバー対称性は破られているため、量子効果により loop レベルでは FCNC が引き起こされることになる。実際には、FCNC に関与するのはクォークの質量差そのものではなく、質量 2 乗の差 Δm^2 であるが、 Δm^2 が弱スケール M_W の 2 乗より十分小さいとすると(2 世代模型では、これは十分正当化できる近似である) FCNC の遷移振幅は近似的に $\Delta m^2/M_W^2$ に比例することになる。逆に言えば、 $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ といった FCNC 過程の実測された遷移確率を用いて、当時まだ見ぬ新粒子であった c クォークの質量を予言することが可能であった。こうして、Gaillard と Lee は c クォークの質量を正しく予言し、やがて c クォークからなるメソンが実験的に発見され(“11 月革命”)、その実測された質量も彼らの予言どおりであることが分かった。

よく知られているように、小林・益川により、K メソンのシステムにおける CP 対称性の破れを説明するためにクォーク・セクターは 3 世代に拡張され、標準模型は最終的な完成に至ったのであるが、ここでもフレーバー対称性の破れと、それに伴って生じる FCNC 過程が本質的に重要である。実際クォーク質量の間に一つでも縮退があると、CP の破れは示す物理量は全て消滅することが示される。GIM, Gaillard-Lee そして小林・益川の仕事は、いずれも素粒子理論(現象論)の鑑と言えるものであろう。量子効果を通じてのみ現れる、まだ見ぬ粒子の存在や性質を理論的に予言し、その予言が正しい事が実証されたのだから。

前置きが長くなってしまったが、私は稲見武夫 氏と共に 2007 年度の第 7 回素粒子メダルを受賞させて頂いた。その対象となる、1981 年に論文として発表された研究は、ワインバーグ・サラムの $SU(2) \times U(1)$ 電弱統一理論の枠組みで、当時まだ未発見であった t クォーク、あるいは仮に第 4 世代があるとした場合のクォークやレプトンのような非常に重い (M_W より大きい質量を持つ) フェルミオンの存在を一般的に仮定し、その FCNC 過程における効果を loop 計算により具体的に求め、いくつかの表式 (関数) の形にまとめたものであった。

当時、私は東京大学 (駒場) の博士課程 (今で言えば後期課程) の院生で、大統一理論などを勉強してはいたが、まだ雑誌に投稿できるような研究成果は無かった。そのような時に、助手 (今で言う助教) をされていた稲見さんより、重いフェルミオンの FCNC 過程への寄与を計算してみないか、との御誘いを幸運にも頂戴した。研究結果は Progress of Theoretical Physics に掲載され (原稿は、当時本郷で助手をされていた東島清 氏に読んで頂いた) 私にとって初めての学術論文となり、また博士論文 (の前半) を形成することが出来た。私は、稲見さんから頂戴したテーマに沿って計算しただけなので、共同受賞は申せない気もするが、個人的には、loop 計算は、単なる計算と言えなくもないものの、場の理論や模型構築の基礎といった、素粒子現象論を行うのに必要な諸々の素養を養うのに大変有効であり、その後「標準模型を超える物理」を研究して行く上で大きな助けになったように思える。

上述のように、2 世代模型の場合の Gaillard-Lee による先駆的な仕事が既にあり、我々も、これを言わばお手本のように思っていたが、我々の研究では M_W を超えるような質量 m_f を持つ重いフェルミオンの寄与を計算したかったので、Gaillard-Lee の計算で用いられた、 $x \equiv (m_f/M_W)^2 \ll 1$ として x の一次の項のみで近似することは行わず、全ての x の領域で正確に成り立つ表式を求めた。当時、 t クォーク質量は M_W より小さいであろうとの、多少漠然とした予想 (期待) がコミュニティにはあり、KEK のトリスタン実験も t クォークの生成を目指したものであったかと思う。その意味では、Gaillard-Lee の計算を単に 3 世代に拡張するだけで良しとするのが自然であったかも知れないが、我々はそのような方針をとらなかった。結果的には、今では良く知られているように t クォークの質量は 173 GeV で M_W より大きく、幸運にも我々の計算結果は、K メソンのみならず、B メソン系での FCNC 過程の遷移確率、CP 対称性の破れ、といった色々な物理量の決定に用いられるようになった次第である。

我々が $x \ll 1$ とする近似を用いなかった理由は、重いフェルミオンの効果が、低エネルギーで decouple するのが、あるいはしないのか (non-decoupling) という理論的な興味を研究の主たる動機としていたからであった。稲見さんは「あまり実験データに引っ張られ過ぎず、自律的な理論家としての興味を大切に研究する事が肝要」といった主旨のことを言っておられたように記憶している。色々と学んだことの内の一つである。

因みに、QED の様な、ゲージ対称性の自発的破れ (SSB) の無い理論では、Appelquist-Carazzone による decoupling 定理が知られており、(質量次元の高い “irrelevant operator” の前の Wilson 係数への) 重いフェルミオンの効果は、その質量の逆べきで抑制される。しかしながら、標準模型の様な SSB のある理論では、全ての質量は Higgs 場の真空期待値を起源とするので、より重い粒子は Higgs 場とより強く結合する必要がある、従って loop 計算において分子に現れる湯川結合のべきの効果により、 m_f の逆べきが相殺され、正べきさえも現れ得る、つまり non-decoupling 効果が出現する、ということを期待したのである。実際の計算の結果、“箱型ダイアグラム” や $\bar{s}dZ$ という Z ボソンの FCNC vertex には、 x つまり m_f^2 に比例する non-decoupling 効果が見ることが判明した (QED カレントの保存のため、光子の $\bar{s}d\gamma$ vertex においては、せいぜい対数の non-decoupling 効果しか現れないことも分かった)。私の理解では、他にこうした正べきの non-decoupling 効果が見れるのは、 ρ -parameter (Peskin-Takeuchi の T-parameter) くらいではなからうか。

さて我々の計算は、ゲージ不変な正しい結果を得ていることをチェックする目的で R_ξ ゲージを用いた少々面倒なものであった。異なる Feynman diagram の間で、綺麗に ξ 依存性は相殺して行ったが、最後にどうしても消えない項が残った。フェルミオンと vector-like な結合をする演算子の Wilson 係数に現れるもので、 $\bar{s}d\gamma$ FCNC vertex により生じることが期待される 4-Fermi 演算子と同じ形をしているようであったので、 $\bar{s}d\gamma$ vertex も計算して、その寄与を加えれば、 ξ 依存性は完全に消えることが予想できた。しかし、QED カレントの保存則 (CVC) の故に、この新たな演算子は、我々の興味の対象であった $K_L \rightarrow \mu\bar{\mu}$ 等の過程には寄与しないことも分かっていたので、これ幸いに $\bar{s}d\gamma$ vertex の計算はしないことにしようと思っていたのだが、稲見さんに勧められ、 R_ξ ゲージの提唱者でもある藤川和男氏（当時、東京大学・原子核研究所の助教授をされていたかと思う）の所に相談に伺うことになった。藤川さんは「アメリカでは、一つの事に取り組んだら徹底的に最後までやりつくす態度が尊重される」といった主旨のことを仰って下さった（少し記憶が曖昧で恐縮です）。そこで、完全を期すため、 $\bar{s}d\gamma$ vertex の計算（QED カレントの保存に起因して、テクニカルには $\bar{s}dZ$ vertex の計算より一段と面倒なものなので、正直なところ気は進まなかったが）を最後に行い、めでたく ξ 依存性が綺麗に消滅することを確認した。この $\bar{s}d\gamma$ vertex（いわゆるペンギン・ダイアグラムを含む）の計算結果は、その後、s, d クォークを b, s クォークに変えた $b \rightarrow s\gamma$ 等の B メソンのシステムにおける FCNC 過程の遷移確率を求める際に使われており、計算を勧めて下さった藤川さんに深く感謝している次第である。

私にとっては初めての loop 計算であったが、興味深い理論的動機に励まされ、また上述のような周囲の方々の温かいご助力により、今でも実験的に検証がなされている物理量を求めることに少しでも寄与出来たのは大変幸いなことであると思う。

以上、拙い想い出話で恐縮でしたが、散文におつきあい下さり大変ありがとうございました。

第 III 部

寄稿文：素粒子メダル功労賞受賞者

素粒子奨学会 —2つの素粒子メダル功労賞—

『素粒子論研究』75周年記念エッセイ

小沼通二(慶應義塾大学名誉教授)

1 はじめに

素粒子論グループは、2000年度に素粒子メダル授与を開始した^{1, 2}。素粒子メダルには、このときから素粒子メダルと、素粒子メダル功労賞がある^{脚注1}。このメダル実現への経緯は東島清さんが「素粒子メダル創設の思い」をこの75周年特集に執筆しているのでご覧いただきたい³。

第1の素粒子メダルは、「素粒子論グループが、素粒子論およびその周辺分野で挙げられた顕著な業績を顕彰し、次世代のさらなる独創的研究が生み出されることを目的として、これに貢献した国内の研究者に授与する」と規定され、「毎年1~2件程度」とされている。第22回の2022年度までの受章者は32人である。

第2の素粒子メダル功労賞は、「素粒子論グループが、グループの発展に顕著な貢献をした人に授与する」とされていて、「候補があるときのみ」の授賞になっている。これまでの受賞者は、表1のとおり6人である。

	回次	年度	受賞者	受賞理由
1	1	2000	中村誠太郎	素粒子奨学会の創設と若手研究者の育成
2	4	2003	小沼通二	素粒子奨学会の設立以来の責任者として若手研究者育成に貢献
3	8	2008	山口嘉夫	素粒子論グループ及び我が国の素粒子物理学の国際的な発展への顕著な貢献
4	10	2010	坂東昌子	素粒子論グループ・物理学界の活性化、特に若手および女性研究者育成への貢献
5	11	2011	岩崎洋一	計算素粒子物理学の開拓
6	22	2022	宇川彰	格子QCDの精密科学化と計算科学の環境基盤構築への貢献

表1 素粒子メダル功労賞受賞者と受賞理由^{脚注2}

この表からわかる通り、素粒子メダル功労賞の最初の2件は素粒子奨学会の関係だった。素粒子奨学会について書くためには、まず湯川秀樹のノーベル賞受賞を機に設立された読売湯川

***** ***** *****

脚注1: 2006年度には素粒子メダル奨励賞が加わった。

脚注2: 素粒子メダル(素粒子メダルと素粒子メダル功労賞)授賞事業は、2006年度に実施されなかったため、この年を境に回次と年度にずれが生じた。

奨学金について説明する必要がある。

2 読売湯川奨学金

1949年の湯川秀樹(1907~1981)のノーベル賞受賞は、日本全体に大きなよろこびの波を引き起こした。そのなかで読売新聞社の為郷恒淳科学部次長(1914~2003、のち副社長、監査役)が、当時東京大学理学部の助教授だった中村誠太郎(1913~2007)に、「この機に素粒子論学界のために社として何か事業をしたい」といつてきた^{4, 5, 6}。中村が素粒子論分野の人たちに相談して、「苦学している研究者のための奨学金を集めていただけると助かる」と返答した。読売新聞社は快諾して、「読売・湯川奨学基金」として新聞紙面で呼びかけて広く一般からの浄財を集めて、「湯川奨学資金委員会」に譲渡し、ここが運営に当たった⁷。この委員会の委員長は朝永振一郎(1906~1979)、中村はこの委員会の幹事、湯川は名誉顧問だった。応募者は「素粒子論のオリジナルな(既発表か、未発表かを問わない)研究論文を提出し、審査委員会が選考した。第1回交付者は14名で、読売新聞1951年2月19日の紙面で発表された。

その後、集めた募金を基金として運用して利子を配分する方式ではなく、募金自体を配分に宛て、毎年2回募集と交付が1954年まで4年間続けられた。その終了前の1953年に第2次募金活動を行い、1955年6月には財団法人湯川奨学財団を設立した。朝永が理事長、中村は理事だった。第2次交付は1955年から1959年までに9回行った。これで所期の目的の事業は終了した。ところが継続の要望が強かったため、読売新聞社の協力によって研究援助と奨励を目的とした第3次として2回、1960年と61年に共同研究と個人研究に交付した。ここまでの11年の交付総人数は152人に達した。

その後10年ほど後の1972年3月31日に手続きが終わり、財団は正式に解散した。解散に必要な整理と手続きは中村が行った^{脚注3}。

3 素粒子奨学会

素粒子奨学会といわれたときに読者は何を思い浮かべるだろうか。若い人たちはもとより、それ以前の世代のほとんどの人も、毎年発表される中村誠太郎賞ではないだろうか。2023年3月にも、素粒子奨学会は日本物理学会の春の(オンライン)大会のなかで中村誠太郎賞の授賞式を行い、受賞者は記念講演を行った。毎年1度、春か秋の大会で行ってきた行事の第17回で、それまでの受賞者は32人になった。2023年度の募集も始まっている。第1回は2006年度で、秋に授賞者を発表し、2007年3月に授賞式と受賞者による記念講演があった。中村はこの年の1月に93歳で亡くなったので、授賞式に出席することはできなかった。

素粒子奨学会関係の素粒子メダル功労賞受賞は2000年度と2003年度なので、中村誠太郎賞誕生以前のことである。そこで話を前に戻すことにする。1970年だったと思う。私は中村から「読

***** ***** *****

脚注3: 私は、中村から、解散手続きはほかの人の仕事だったが、進まないで中村が行うことになったと聞いた。

売湯川奨学会を解散することになったけれど、大学院を出ても就職が難しい状況がなくなっていない。できれば何とかしたい」といわれた。当時私は基礎物理学研究所にいた。すぐに具体的なアイデアはなかったが、賛成だった。私はその 20 年前に中村が助教授になって初めて講義をしたときの学生である。後期半年の講義だったが、中村が途中で病気になって中断されたまま終わった。しかしその前に、すでによそに書いたように、個人的に朝永に会うという全く予想外の機会をつくってくれた。そして私は朝永の生涯にわたってお近くにいることになったのだった⁸。

中村は河原林研(1932~2003、当時東大駒場)と森田正人(1927~2017、当時大阪大学理学部)にも、同様な話をした。そこで4人で集まって奨学金支給の実現可能性を考えて、民間資金による奨学会を作ることにした。中村は、お金は自分で集めるから、奨学金配分の方式を考えてもらいたいといった。後になって中村は、朝永に話したら、仁科記念財団の募金の妨げになっては困ると言われたと語った⁴。中村は自分の学生時代の多くの友人たちに頼むことにした。中村は(旧制)大阪高等学校に入学したのだが、思想問題によって退学になり、のちに(旧制)第三高等学校に入り直している。当時の高等学校は基本的に寮生活であり、中村の人柄もあって、大学卒業後経済界を含めて各界で活躍している友人が非常に多かった。

相談を重ねた結果、大学院博士課程を修了して、研究を継続しているのに安定した職や日本学術振興会や共同利用研究所などの研究員になっていない人に1年間の奨学金を支給する素粒子奨学会を設立することを決めた。会長は中村。中村を補佐して会を運営するために任期のない委員として我々3人。他に数年で交代する委員若干名。応募には未発表の単独の研究論文の提出を求め、この論文のみによって採用者を選考し、採用されたものは研究交流の促進のため研究場所の変更を求めることにした。

このような経過の結果、素粒子奨学会は、読売湯川奨学会の解散の翌日、1972年4月1日に発足した。それからの1年間に素粒子論グループ事務局報で応募者の募集を行い、各応募者の担当委員を決め、提出論文ごとに外部の1名(必要がある場合2名)を選んで審査を依頼して、独立に委員も担当論文を審査し、選考の委員会を開催した。選考結果は事務局報に公表し、さらに審査委員会の報告と採用者が提出した論文を『素粒子論研究』に発表した⁸。

それによると第1回募集の応募者は37名。選考は午前10時半から夕方6時過ぎまで。相対評価によって上位者を選び、絶対評価を加えて、採用者8名と若干名の補欠者を決定した。この審査方式はその後踏襲された。

もう一つ触れておきたいのは、奨学金の額である。最初は、日本学術振興会のポスドク研究員と同額にした。それを8人、その中の1人が年度途中で就職して辞退したので翌月から補欠者を繰り上げた。中村の集金能力は余人をもって代えられないものだった。しかも奨学生を受け入れてくれる研究室に、金額は忘れたが、受け入れ者の経費の足しにと研究費を贈ったのだった。

しかし、中村をもってしても資金を必要なだけ集め続けるのは楽な話ではなかった。学振のポスドク経費の上昇についていくことはできなかった。これを示すデータが、1990年の『素粒子論研究』の「素粒子奨学会の18年」のなかに残されている¹⁰。中村の集金額が18年間に半減し、採用でき

た奨学生数も半減している。

資金減少の傾向はその後も続いた。これは中村の友人たちが、企業の中で年と共に影響力を低下させ、引退する人も続くなどというやむを得ない事情によるものだった。個人寄付を頂くこともあった。高木修二(1924—2006)が中心になって素粒子論グループの中で募金活動をしてくれこともあった。私も、中村のお供で企業を訪ねる機会ができ、代理で訪問も重ねた。

それでも限界が近づき、出てきたアイデアが奨学金をやめて、定職についていない若い研究者を表彰し、激励する賞を出すという構想だった。中村は構想には賛成したが、賞の名前を中村誠太郎賞にすることは固く固辞された。話し合いを重ねた結果、承諾してくれて、素粒子奨学生制度は2005年度で中止した。それまで32年間の奨学生総数は150人だった。そしてすでに述べたように、2006年度から中村誠太郎賞が発足したのだった。

これまで見てきたように、素粒子奨学会の事業は功労賞受章者だけによるものではなかった。多くの委員、審査に協力して下さった非常に多くの人たち、募金に応じてくれた企業や個人の理解と支援によるものだった。現在でも、長年尽力されてきた菅本晶夫会長、加藤光裕副会長たちによって活発な活動が続いている¹¹。

4 素粒子メダル選考委員会による業績の説明

最期に、素粒子論グループの素粒子メダル選考委員会が、どのように業績を評価して下さったのか引用して終わることにしたい²。

2000年度

中村誠太郎先生は、1973年(ママ)に読売湯川奨学基金を発展させて素粒子奨学会を設立された。この奨学会の目的は、広い意味での素粒子論、すなわち素粒子理論、原子核理論、宇宙論分野における若手研究者に奨学金を出して、将来の日本のこれらの分野における中堅あるいは指導的な研究者の養成を目指したものである。この奨学金の原資は全て中村先生が会社等を回って集められた浄財によるものであった。

これまでに、総計143名にのぼる若手研究者に奨学金が支給され、既にわが国のこれらの分野における指導者となっている元奨学生も数多くいる。今年度も原子核理論、宇宙線、宇宙物理(ママ、素粒子論(原子核理論、宇宙線、宇宙物理を含む))の研究者1名を公募した。このように、わが国の若手研究者養成の制度が整っていなかった時代に若い研究者を激励し支持してこられた功績は計り知れない。

最近では学術振興会等の奨学金が整備されてきたが、まだ系統的な研究者の養成という意味では、わが国の体制は十分とは言えない。

このような現状にも鑑み、これまでの中村先生の私益を無視した献身的な若手研究者に対する励ましは、学問を志す者全てにとって忘れることのできないものであり、ここに第一回素粒子

メダル功労賞をお送りし(ママ、お贈りし)その功績をたたえることは極めて時宜を得たものである。

なお、中村先生の熱意に共鳴し、素粒子奨学会の事務局長としての役割を長年にわたり務められた小沼通二先生および河原林研先生の貢献もまことに大きなものであったことをここに記す次第である。

2003 年度

素粒子奨学会は、中村誠太郎先生により1973年(ママ)に設立され、2003年度までで延べ149名にのぼる若手研究者に奨学金を支給してきた。今年度も素粒子論(原子核理論、宇宙線、宇宙物理を含む)の研究者1名を募集した。小沼通二先生は、この奨学会の設立当初から今日まで、一貫してその事務局の責任者として中村誠太郎先生を補佐し、奨学生募集、選考委員の依頼や審査委員会の手配など、奨学会の運営にかかわる事務全般の仕事を引き受けられ、素粒子論グループの若手研究者育成に大きく貢献されてきた^{脚注4}。この奨学金の原資は中村誠太郎先生が民間の篤志家から集められた浄財によるものであり、中村先生無しにはもちろん素粒子奨学会の存在は考えられないが、一方、小沼先生の熱意と事務能力に裏打ちされた全面的支援無しには、素粒子奨学会の事業が今日まで31年間の長きにわたって存続することができなかつたこともまた明らかである。また最近では、小沼先生自らが運営委員長として募金活動を引きついでおられる。

近年は、学術振興会の特別研究員の他、21世紀COE研究拠点のポスドクなどが多数採用されるようになってきたが、依然として無給の苦しい生活の中で地道に研究を進めているオーバードクターも数多くいる。素粒子奨学生は、研究場所を自分で選び、書き下ろしの奨学生論文で応募するというユニークなもので、奨学金の額が少ないにもかかわらず、採用された奨学生が受ける精神的励ましは非常に大きなものがある。この素粒子奨学生となって苦しいオーバードクター時代を乗り越えられた人達の中から、幾多の優れた研究者が育つたことを考えるならば、中村先生とともに小沼先生が支えられてきた素粒子奨学会の活動は、大変素晴らしいものであり、素粒子論グループメンバーの研究活動に大きく貢献されてきたと考える。ここに小沼先生に第二回素粒子メダル功労賞をお贈りしその功績をたたえたい。

もちろん、この素粒子奨学会の活動は、中村先生や小沼先生のみならず、常任委員の森田正人先生、河原林研先生をはじめ、多くの素粒子奨学会委員および外部委嘱審査委員の協力によって支えられて来たことは言を待たない。殊に昨年急逝されるまで奨学生審査の実質的責任者として長くご尽力頂いた河原林先生のご貢献はまことに大きなものがあった。このことを

***** ***** *****

脚注4: この説明と、表1に引用した授賞理由の表現の間にはずれがある。こちらが正確。

特に記して我々の謝意を表したい。

参考資料・文献

- 1 [\[sg-l:5562\] 素粒子メダル候補者推薦依頼 \(kyoto-u.ac.jp\)](#) (2023年1月17日閲覧)
- 2 [素粒子メダル 素粒子メダル功労賞 \(kyoto-u.ac.jp\)](#) (2023年1月17日閲覧)
- 3 東島清 「素粒子メダル創設の思い」 素粒子論研究 75周年特集 2023年
- 4 中村誠太郎 『私の歩んだ道』 東海大学出版会、1991年
- 5 中村誠太郎 『湯川秀樹と朝永振一郎』 読売新聞社、1992年
- 6 小沼通二、中澤宣也編集 「追悼 中村誠太郎先生」、素粒子論研究 114巻 6号(2007年3月) pp.49—76
- 7 読売新聞。1950年8月1日(基金募集計画、湯川メッセージ)。8月9日(基金募集開始)。8月21日(募金中間報告)。1951年2月19日(第1回交付者発表、第2回募集、朝永所感)。1959年8月7日(第2次第9回交付者発表、第3次第1回募集)。1961年1月14日(第3次第2回交付者発表)など
- 8 小沼通二 「忘れられないこと」、松井卷之助編『回想の朝永振一郎』 みすず書房、1980年、pp.299—310 など
- 9 素粒子奨学会委員会 「素粒子奨学会 1973年度奨学生の選考を終わって」 素粒子論研究 47巻3号(1973年5月) pp.459—460
- 10 素粒子奨学会 「素粒子奨学会の18年」素粒子論研究 82巻2号(1990年11月) pp.194—195
- 11 素粒子奨学会 <https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soryushi.shogakukai/> (2023年2月16日閲覧)

Science of all in the family 未来への研究体制への思い

坂東昌子

NPO 法人知的人材ネットワーク あいんしゅたいん

1 素研とサマーインスティテュート

以下は、論文 39 編・海外通信を掲載した素粒子論研究 Vol. 1 の編集後記の部分である。

本号より素粒子論研究は日本物理学会の刊行として発足します。このことは素粒子懇談会において委嘱を受けました在京の素粒子世話人会において申し合わせ物理学会の委員会において正式承認を得たものであります。これによって素粒子論研究誌が更に広い組織の下でその役割を十分に展開することが期待されています。この間においていろいろと御尽力を頂いた山内恭彦委員長に深く感謝を表します。(中村誠太郎) (1949 年 8 月 5 日発行)

ガリ版刷りの分厚い創刊号を見てこれが果たした貴重な役割がしのばれる。為替レート 360 円/\$ の時代、海外の情報を仲間に伝える湯川や朝永の溢れる研究への思いが伝わる手書き印刷が 265 ページも連なっている。素粒子論研究の始まりは、物理学会の刊行として認められた 1 号の前にもあったらしい。西欧から遅れて東の果ての日本で、情報をみんなで共有しアイデアを交換し合っているのが印象的である。単に出来上がったものではない、その前のアイデアを交換することこそ科学者冥利に尽きる場なのだ。この同じ切実さは、程度は違うが、大研究室から研究グループのいない文系の私大に移ったときにその落差を痛感した。もっとも、たくさんの研究仲間がいるので、時間を作っては研究室に出入りさせてもらった。それを受け入れてくれた仲間に感謝の気持ちでいっぱいである。

そんな折、アメリカで開かれるアスペンサマープログラムに参加して、自由な討論の場を多くの仲間と共有する機会を得た。こんな場が欲しい、単に完成した研究発表だけでなく、アイデアを交換し、自由に議論できる場が必要だ、特に日ごろ小規模大学で雑務と教育に時間を費やしている研究者が日常から解放された議論の場がほしい、この素研の始まりと同じ思いから「日本型アスペンセンター」を試みることとなり、仲間と一緒に取り組んだ¹のも懐かしい思い出である²。アメリカのように 2・3 か月も開催するわけにはいかないが、この 2 週間ほどの合宿型研究会は、お喋りの時間も十分あり、研究のアイデアを話し合った、もっと広い科学の諸問題について議論できた。夏の学校は、狭い研究交流だけでなく、

¹ SI' 95. 総合科研費 A(三田班)研究成果報告書. (1996) : 2) SI' 96. 素粒子論研究. (1997) vol. 95, no. 3 ; SI' 97. 総合科研費 A(九後班)研究成果報告書. (1998) ; SI' 98. 特定領域(公募研究)科研費研究成果報告書(九後). (1999) ; SI' 99. 特定領域科研費「超対称性と素粒子の統一理論」研究成果報告書(江口). (1999) : 坂東 昌子. 提案「研究の活性化を図るために」 : 共同研究センターの設立に向けて(放談室). 素粒子論研究. 素粒子論グループ. (1993) vol. 87, no. 6, p. 216-230. ; 坂東 昌子. 御岳から京都まで : 合宿型研究会の試み 3 年間をふりかえって(放談室). 素粒子論研究. 素粒子論グループ. (1998) vol. 96, no. 4, p. 158-175. :

² 「日本型アスペンセンターへの試み」坂東 昌子, 九後 汰一郎, 日本物理学会誌 2000 年 55 巻 7 号 p. 540-541 ; <https://doi.org/10.11316/butsuril946.55.7.540>

様々な雑談の中で楽しい話がたくさんでてる。今でも覚えているのはバイオリンの音の話になったとき、荒船さんと村山さんがすぐさまフーリエ分析して見せてくれたことなど、幅広い興味を交換する中で分野横断的な視野を養うことができたこともその一端である。

コペンハーゲン精神もそうだが、新分野が台頭するときは、志を同じくする者は皆平等であるというのは世界共通であろう。そこでは、先輩も後輩も対等平等の立場で議論するだけでなく、世界に目を開いて情報を得ようという気風がある。こうして講座の枠を越え大学の枠を越え、新しい流れ、量子力学や相対論に挑んだ。産業革命を経て急速に科学技術が発展した西欧から遠く離れた日本の若者たちの意気込みは、海外に追い付くというより「追いついて追いつく」という心意気だった（田中一の言葉）。interdisciplinary な雰囲気もあっただけでなく、international な心意気があった。

素研第1号は、湯川ノーベル賞発表の直前だった。ノーベル賞受賞は終戦後の疲弊した日本に夢を与えた。そして、当時の原子核・素粒子論は、出来立ての進行しつつある学問分野だった。単に素粒子論だけではなくて科学全体を俯瞰する視野で、分子生物学、宇宙物理学、計算機科学、をはじめ分野を越え、国際的な視野で、新たな学問を切り拓いてきた伝統がそこにある。

2 ポスドク問題

科学技術ブームと言われた1960年代に大量の理工学分野が新設され、さらに、押し寄せた第2次ベビーブームで大学定員増に対応してポストが増え（実は私はその頃ドクターを出て、幸い職を得たが、それはブームにのって女性でも就職できたまれな幸運だったことをポスト調査で確認した）そのあおりでもあるが、その後、オーバードクター問題そしてポスト問題と事態は深刻になった。1980年代、「Japan as No. 1」といわれ、半導体をはじめ世界のトップを走っていた科学技術はどうなったのか。ポスト1万人計画の後のケアができないまま、大量の若手が、その持てる力を発揮できない状態だった。

そんな現状を何とか変えたいと、物理学会は、エビデンスを基に要望を出すという伝統を引きつぎ、ポストの実態調査を開始した。この仕事は、国立教育政策研究所と物理学会キャリア支援センターとの共同企画だったが、人文社会系の方々からアンケートに「夜よく眠れない」「食欲がない」「自分の失敗に対して自らを責める」といった項目が提案された。「こんな項目はポスト問題には関係ないのでは」と反論したところ、これらは精神科医 John Rush によって開発された「抑うつ度の尺度」(QIDS-J) だとの説明だった。このアンケートをその年のサマーインスティテュートで若手にお願いしたら、案の定、「なんでこんなことまで調べるのか」といわれた。とりあえず、事情を説明して記入してもらった。元気のいい若者たちであった。ところが、この結果をまとめる中で、この「抑うつ度」が重要な意味を持っていることを痛感した。例えば、ポスト3年目と5年目が抑うつ度が高くなるつまり、ポスト期限が近付くと精神的に追い詰められるのだ。それと注目したのが、研究室の雰囲気との関係である。自由に研究できる若手に比較して、ボスの思い通りの仕事を義務に従う

ポスドクは、働く時間と抑うつ度が正比例するが、自由度の高い研究室では働く時間が増えるほど抑うつ度が下がるのである。研究団体の雰囲気と、精神状態、そして業績との相関関係が見事に表れたのである³。この調査を通じて、私はこれまでの実態調査では得られなかった貴重な経験をしたのである。最近では、「心理的安全性 (psychological safety)」というビジネス界で使われる組織行動学的な視点から導入された視点である。これは、ハーバード大学のエイミー・エドモンドソンによって提唱されたようで、自由に自分の意見が言える環境、自然体で働ける環境の重要性が職場の環境改善の重要課題として注目されている。素粒子論グループでは、心理的安全性が高い環境が伝統になっていたため、当たり前と思っていたが、他分野ではこんな視点でもしっかり分析する必要があるのだということを知った。これこそ、素粒子論研究という雑誌の精神でもあったのだろう。こうして仲間と議論しながら取り組んだポスドク問題、物理学会の仲間に助けられて立ち上げたのがキャリア支援センターでは、科学社会全体を見る目を養うこともできた。この取り組みは、文科省の「ポスドク支援事業」を受けて実現したのだが、実は、大学や研究所などの企画に交じって、唯一学会の企画として採択されたのだ。支援事業が終了した時点で、引き継いで取り組むようには、文科省からの要請もあった。支援事業終了と同時に、ちょうど私も定年を迎えた。「2人足して140歳やなあ」といいながら（私立大学で定年は70歳だった）、同級生でもある佐藤文隆さんとNPO法人知的人材ネットワークあいんしゅたいんを立ち上げた。ポスドク問題を含めて、科学をもっとみんなのものに、という視点から、科学普及活動、科学教育活動、ポスドクだけでなく、女性研究者、さらにシルバー世代の人材活用をも含んだ目標を掲げている。

3 科学教育の広がり

猿橋勝子さんが第12期学術会議で初の女性会員となり、早速、「婦人研究者の地位委員会」を提案された。自らこの委員会に参加を申し出られた古在由秀委員をはじめ、ベテランの男性会員や名だたる女性科学者の先輩たち、そればかりか、女性大学院生など若手も加わった賑やかな委員会となった。早速に、ベテランの古在発案で、科研費広領域に申請した「婦人研究者のライフサイクル調査研究」が開始された。専門分野にしか科研費に応募した経験がなかった私には、分野横断型の科学の目を広げてくれた委員会でもあった。当時の学術会議には、分野横断型の巾広い大型のスケールの先生方がおられたなあ、と今になっていい経験をさせてもらったと思う。委員会に院生も含めて参加させていただいたおかげで、若手と古手がともに同じ目標で取り組むことができたのは、とてもいい訓練の場だったと今にして思う。当時ちょうど赤松良子さんたちの努力で「雇用機会均等法」が成立したが、日本での男女共同参画の最初の具体的な突破口を開いたのが学術会議だったことを知る人は少ないが、注目すべき歴史的事実である。尤も、この歴史について、学術会議自身もリファラーシ

³ ポスドクター問題 : <https://sekaishissha.jp/book/b353974.html>

ていない。実際、学会の HP のどこにも記述が見つからないのが残念だ。

女性研究者は、ポスト問題が発生するずっと前から、ポストに恵まれない人が沢山いたし、どこでも分野を変えてでも、仕事を続ける方を優先した人が多かったのも、それだけ分野横断型の仕事をしている人が多いように思う。そこで新しい経験をして、授業を通じて、新しい分野で仕事をする人の割合が多いと思う。そしてそれを楽しんでいるように思われる。男女共同参画というが、女性の比率だけに目を奪われず、「女性が科学社会に参画したとき、どのような新しい空気を持ち込めるか、という観点からもしっかり論じてほしいなあ」と願っている。

私にとっても、私立大学での経験はそれなりに意義深く楽しいものだった。それまで、若手が沢山いる研究室ではよそ見をしている暇もなかった。でも、文系の学生の授業に取り組み中で経験したことも貴重であった。理系では式でごまかせることも、もっと本質にかえてメカニズムを説明する必要がある。こんな経験を積むにしたがって、そのあたりに出ている科学の解説参考文献には、本当によくわかって書いている著者と、表面的な理解で終わっている著者もいる。私自身も、自ら深く理解していなければならぬことを痛感した。そういえば、武田暁先生が「下手な理系より文系に教えるのはもっと面白い」と言われたがほんとに心からそう思う。尤も、大グループに属しても、科学の心を伝えることのできる優れた科学者もいるが、「聴衆はどうせわからないだろう」という態度で市民に接する科学者も多いなあ、と思う。

科学普及活動の重要性は、ネット社会になって、ますます増加しており、多くの情報から本物を見分ける力を市民も子供も欲していることをしっかり受け止めるべきであろう。

しかし、もっと突っ込んでみると、学生たちと付き合っ、その持っている創造的で素晴らしい感性を知ったことだった。2011 年 TEPCO 事故をきっかけに、放射線の生体影響の研究を始めるとともに、市民との交流を頻繁に行うようになった。そこで知ったことは、この情報があふれる現代社会でよく勉強している、むしろ専門家の方が狭い領域の既成の知識で固まっていて、お互い関連領域の科学者との議論がないことだった。むしろ市民がこの異分野領域の間を結ぶ糊（グルオン）の役割を果たしているということだった。その中で、専門家も少しずつ視野を広げられる。こうした交流がないと、例えば放射線リスクについても、極端に危険とか安全とか言ったグループ間で、時には感情的になって世論が極端な対立分布になってしまう。こうした中で、どちらの意見の持ち主も一緒になって議論できる場こそ大切で、それは研究活動の発展にも寄与するということを痛感した。その実例は例えば、トリウム水問題では、知識の前線、つまりどこまではほぼ合意できること、どこからはまだこれから検討が必要だ、ということを確認して行けるということだった。こうした活動を通じて、市民と共著で、「放射線必須データ 32⁴」の著書を出版した。また、市民と科学者の

⁴ <https://www.sogensha.co.jp/productlist/detail?id=1607>

コミュニケーションネットワーク⁵のまとめのうち「トリチウム水問題⁶」の議論を深めて、当初真っ二つに割れた意見について「ここまでは合意できるね」というところを明確にし、混乱している世論に対して、一定の合意を形成する努力をしてきた。こうした、客観的な合意形成を達成するためには、市民と科学者の率直なコミュニケーションネットワークが果たす役割が重要であることを痛感している。

4 キャリア支援から科学普及活動へ

振り返ると、D1で結婚、D2で長女が生まれた。当時、京大に保育所を作る運動を始めたのだが、当初、「育ててもらおうとは厚かましい」「冷たいお母さんやなあ」などという批判が圧倒的で、そういう批判に対して、しっかり理論を持たないといけない、幸いなことに、発達心理専攻で集団保育の研究をしている仲間がいて、彼女たちを中心に勉強をした。その中で、「集団で子供は育つ、そのためには環境を作ることが大事だ」「仲間と一緒になかで、子どもは発達成長していくのだ」というイメージがもてた。こうして、少しずつ賛成者が増えていった。いいことならみんなで作ってみよう、というチャレンジ精神だけはあったので、まず実力行使、と自主保育室を我が家で始めた。そしたら、共働き夫婦が徐々に集まってきた。狭い家だから10人程度が限界だったが、保母さん役をひきうけてくださる方も出てきて、共同保育所の運営が始まった。このネットワークをフルに生かして、京都大学総長に「保育所を作って欲しい」とお願いに行ったりもした。奇跡的にも、1年後に京大保育所ができた。もちろん、大学内に保育所など認められない。実は、発達心理学ご専門の、鯉坂教育学部長が応援してくださり、正式名は「乳幼児観察施設」という形式で設立にこぎつけた。また、2人の職員もつけてくださった。周りの理解ある教員や職員などの励ましや援助も増えていった。そして、いろいろな偶然が重なって、たった1年の運動で、大学に保育所ができた。これは、大学のたくさんの仲間の支援があったからでもある。

私も自宅を開放することで貴重な経験をしたが、その思いは、今の私の思いにもつながっている。今は、京大のすぐ近くにある狭苦しい民家だが、NPO法人 あいんしゅたいんの事務所にしている。そこは、女性研究者たち、近所の主婦たち、若者たちがフラッと来てくれる素晴らしい語らいの場になっている。大学生、大学院生と一緒に、親子理科実験教室を年に10回程度開催し、子供たちも集まるようになった。学生や大学院生がアシスタント役、講師役を引き受けてくれている。若手が企画する実験教室の準備は、結構時間もかかり大変だが、それなりにオリジナルで、自らの訓練の場ともなっており、何度も企画準備をして実施してきた。開催の回数も150回に達している。若手の中から、大学の教育学部に職を得たり、教員として活躍したり、教育関係の企業に就職という例も結構ある。

物理学会京都支部との共催で続いている「親子理科実験教室」は、お父さん、お母さんも巻き込んで、「家族で科学を!!」という方向性はないか、家族同士が1つの大きな家族とな

⁵ <https://jein.jp/>

⁶ <https://jein.jp/networkofcs/information-list/tritiated-water.html>

って語れるネットワークができないか、今「**Science of all in the family⁷**」という構想を描いている。これからも我が家を足場にして活動できるように役に立ったらいいな、とそんな夢を追い続けていきたい。

謝辞

私の雑な原稿を丁寧に辛抱強く点検いただいた編集委員のみなさまにお世話になった。特に、浜中さんには、細かい点までご指摘いただいた。ありがとうございました。

⁷ 2022 年のノーベル医学生理学賞は、絶滅したヒト族（ネアンデルタール人）ゲノム解析をフルに使ってミトコンドリア DNA を解析し、ヨーロッパ人種は、滅びたといわれていたが現人類との交配の証拠をつかんだスバンテ・ペーボ教授（67）に授与された。このペーボの論文が発表されると、アメリカの雑誌「TIME」に“All in the Family”というタイトルのイラストが掲載されたという。人類、皆家屋という標語は、ゲノムの違いを乗り越えて人類は1つの家族という意味を込めて、科学者の世界はみんな同じ目標をもち協力し合う、という意味を込めて科学という営みをみんなで享受しようと、この名前を付けた。

<https://book.asahi.com/jinbun/article/13286641>

格子 QCD から計算科学へ

宇川 彰

§1. はじまり

量子色力学を時空格子上に定式化するという Kenneth Wilson のプレプリント CLNS-262 には 1974 年 2 月の日付がある。その頃、海外の素粒子理論の最新の研究に触れるのは、通常船便で送られてくるプレプリントが最速の機会だったので、私がこれを見たのは春から初夏にかけてだったと思う。以来五十年近くが経った。Wilson の論文は、長距離での強い量子揺らぎによりゲージ場の相関は有限になること、そしてこれが閉じ込めの本質であることを Wilson loop の強結合展開を使って示した革新的な内容だった。一方で、その頃までの素粒子論の大前提であった時空連続体と Lorentz 不変性を離散な時空格子で置き換えるという発想はなかなか受け入れるのに難しいものだった。状況が一変したのは 1979 年から 1980 年にかけてである。Monte Carlo 法によるコンピュータ計算が試みられ、連続時空の極限でも閉じ込めが成り立っている強い示唆が得られた。1981 年にはハドロンの伝播関数の Monte Carlo 計算から陽子や中性子の質量が求められることが示された。今日の日から見れば不十分な計算だが、相対論的で且つ強結合の場の理論で陽子のような束縛状態の質量が計算できることは衝撃だった。それから四十年が経ち、最近では、ミューオンの異常磁気能率への強い相互作用補正の評価に必須の方法となるなど、格子 QCD は強い相互作用の精密科学の立場を確立している。

私の格子 QCD への関わりには、従来の素粒子の理論研究では遭遇しない様々な様相があったと思う。紙と鉛筆だけでは解くことができないのでスパコンという計算道具が必須となったこと、そのことからより速いスパコンの開発が研究を先んじる上で重要となったこと、必然的に研究は大掛かりとなり、大勢の研究者が計画的に共同する collaboration のような研究組織が必要となったこと、さらにはこれが拡大して研究所の設置や、国によるスパコン・プロジェクトとの関わりが生まれたことなどである。この一文では、こういった様相を中心に、私の格子 QCD との関わりを思い出してみることにしたい。

§2. モンテ・カルロ

日本では、Monte Carlo 法による場の理論の研究は 1981 年に筑波で始まったと思う。O(3)/Z(2) スピンモデルの相転移の存否を調べたプレプリント KEK-TH33 には、福来正孝、小林誠、大川正典、小柳義夫、宇川彰の名前がある。その後、金子敏明や太田滋生などが加わった。岩崎洋一も、同じ頃に吉江友照などと研究を始めている。

1980 年代の我が国の研究には二つの大きな出来事があった。一つは計算アルゴリズムであ

る。Monte Carlo 計算でクォークを扱うには格子上で離散化した Dirac 演算子の逆行列を計算する必要がある。これは、クォークの多体状態であるハドロンの計算に必要なだけでなく、クォークの真空偏極効果を取り入れた計算(所謂 full QCD)でも必須なのだが、標準的な共役傾斜法では収束が遅くて計算時間が膨大になり使い物にならなかった。素粒子理論から計算機科学に転じた小柳義夫は、行列前処理など当時の最新の加速法を持ち込んでこの問題の解決に大きな役割を果たした。Langevin 量子化を用いた full QCD 計算はこれなしには不可能だった。その後本格化する素粒子物理と計算機工学の学際研究の先鞭をつけたと言って良いだろう。

もう一つの出来事はスーパーコンピュータの導入である。1980 年代初頭は国産スパコンが登場した時期である。KEK でも首脳部の積極的な後押しがあり、日立の S810/10 (理論ピーク性能 315Mflops) が導入されて、1985 年 5 月に稼働が始まった。主要なユーザは格子 QCD 関係者が大部分であった。岩崎たちによる、繰り込み群によって改善されたグルオン作用を使ったハロン質量スペクトルの大規模クエンチ計算や、Langevin 法によりクォークの真空偏極効果を取り入れた計算などが行われた。これらは、世界的にも当時の最先端を行く計算だった。

格子 QCD の分野には International Symposium on Lattice Field Theory という国際会議シリーズがある。通称 Lattice XX と呼ばれ、XX には開催年号下二桁を入れる。1984 年に米国 Argonne National Lab で開催されたのを初回として、毎年世界各国の回り持ちで開催され、格子上の場の理論の世界の研究者を網羅する学会になっている。日本からは、1986 年米国 Brookhaven, 1987 年フランス Saclay での会議から毎年参加するようになり、KEK スパコンで叩き出した成果を報告して注目を浴びた。Lattice XX のプログラムでは、ハドロンの質量スペクトルや有限温度 QCD 相転移などの主要なテーマについて、過去一年間の進歩を批判的に総括する plenary talk が重きをなす。plenary speaker が日本から毎年のように選ばれるようになったのもこの頃からである。

この時期、個人的に記憶に残るのは、1989 年にイタリアのカプリ島で行われた Lattice'89 で行った有限温度相転移の plenary talk である。クォークを含まない純グルオン理論は center $Z(3)$ 対称性を有している。この対称性は温度の上昇と共にある温度で相転移を通じて自発的に破れ、高温側では閉じ込めが成り立たないことが既に解っていた。問題は相転移の次数である。ローマ大学の Georgio Parisi たちのグループは相関距離の格子サイズ依存性を調べて二次相転移と結論した。一方でコロンビア大学の Norman Christ たちはエネルギー密度などの物理量に跳びがあるかどうかを調べて一次相転移と結論した。筑波のグループでは、1989 年 1 月から稼働した KEK の第二世代スパコン S820/80 (理論ピーク性能 2Gflops) を使い、 $Z(3)$ order parameter の感受率と相関距離の有限サイズスケール解析を徹底して、一次相転移との結論を得た。私の役割は、欧米二大勢力と日本の結果を総合的・批判的に総括することだった。カプリ島の有名な青の洞窟への excursion にも行かずにオーバーヘッドプロジェクト用のスライドの準備に没頭するほど緊張したのが思い出される。

1980年代の活動を経て、日本の格子 QCD 研究は世界に知られるようになった。その一つの表れが、1991年に Lattice'91 が KEK で開催されたことである。準備は一年前から行ったが、Internet も www もなく、世界各国の研究者との連絡は BITNET、文書作成は NEC の PC98 という時代で苦労した。当時最新の DX だったが、今はどちらももうない。

Lattice'91 に備えて 1990 年の夏には、格子 QCD 夏の学校を開催した。各地から十人位の大学院生が集まり、4 日間の講義と実習を行った。石塚成人、蔵増嘉伸、橋本省二、西村淳は、その参加者である。Lattice'91 では 4 人とも parallel session で発表をした。この時期に前後して、金谷和幸、大川正典、青木慎也など海外で格子 QCD 研究に携わっていた若手が帰国した。また、1990 年代には、出淵卓、谷口裕介、金児隆志、江尻慎二、野秋淳一、石川健一、青木保道など格子 QCD で学位を取る若手も出て、日本の格子 QCD は豊富な人材を要するようになった。

このようにして、世界の第一線に躍り出て見ると、日本のスパコンリソースは恵まれた状況にあるとはいえ、世界を相手に闘い続けることは容易でないことがひしひしと感じられた。世界をリードするには、人智を結集し、スパコンリソースを集中的に投入して、計画的に研究を進めることが必要と思われた。こうして生まれたのが JLQCD Collaboration である。KEK の第 3 世代スパコンである富士通の VPP500/80(理論ピーク性能 128Gflops)の設置に合わせて 1994 年に発足した。当時の主だった格子 QCD 研究者が参加して、QCD 相転移や K 中間子の弱い相互作用行列要素、重いクォークの物理などの重要課題に計画的に取り組み、Lattice 会議で次々と成果を発表していった。

§3. 並列スパコン

格子 QCD 用の並列スパコン開発は格子 QCD の歴史を彩る際立った出来事である。1970 年代にはマイクロプロセッサが急速に発展した。近接相互作用の物理系に対しては、マイクロプロセッサを格子状に配列して相互に結合し、これに物理空間をマップすれば、超高速な並列計算が可能になる。これは物理と計算がマッチした実に魅力的なアイデアである。計算機工学の星野力は、1978 年の PACS-9、続いて 1980 年の PAX-32 でこのアイデアを実現した世界的なパイオニアだった。岩崎洋一は星野力と協力して並列計算機 QCDPAX の開発に取り組み、1989 年には完成して格子 QCD 有限温度相転移の計算などを進めた。

CP-PACS プロジェクト (1992 年度～1996 年度) は、QCDPAX プロジェクトの成功を受けて、文部省の「学術の新たな展開のためのプログラム」に採択され実施されたビッグプロジェクトである。岩崎洋一をリーダーとして、日本の計算機開発の第一人者の一人である計算機工学の中澤喜三郎がサブリーダーとして加わった。物理学と計算機工学から総勢 20 人近くの研究者が結集し、日立製作所と協力して 5 年間にわたって開発制作に取り組んだ。CP-PACS は 1996 年に完成して、10 月の Top500 スパコンリストの一位を占めた。その後 9 年間稼働を続け 2005 年 9 月にシャットダウンされている。

CP-PACS プロジェクトは幾つもの重要な意味を持っていたと思う。第一は、サイエンスへ

のインパクトである。QCD が素粒子の強い相互作用の基本法則であるからには、理論計算値は実験値と正確に一致しなければならない。大雑把に合っているだけでは基本法則とはいえないからである。格子 QCD の精密計算は、時空格子の格子間隔、格子全体のサイズ、クォーク質量からくる系統誤差、Monte Carlo 法特有の統計誤差を厳密に定量的にコントロールできなければ実現しない。系統誤差、統計誤差の背後にはその由って来る物理的な原因があり、それらを精密にコントロールすることは格子 QCD の物理メカニズムを理解することでもある。CP-PACS はその強力な計算力で、クエンチ近似のハドロンスペクトルを精密に導き出すことを可能とした。導かれた結果は、クエンチ近似と実験値には有意なずれがあることを示しており、以降、世界の格子 QCD 研究はクォークの真空偏極を取り入れた計算へと向かうことになる。

第二は、物理学と計算機工学の分野を跨いだ学際的な共同研究が実現したことである。融合研究の重要性は常に強調されるが、分野が違えば考え方も目標も異なり、その実現は容易でない。CP-PACS では、格子 QCD の計算という物理学の目標と高性能スパコンの実現という計算機工学の目標が背中合わせの目標として共有されてプロジェクトの牽引力となった。さらに、日立製作所が開発制作に加わり、産学連携の重要例ともなった。ユーザとメーカーが協力して次代のスパコンをデザインし開発するアプローチは、後に co-design としてスパコン開発のキーワードになったが、CP-PACS 計画はその先鞭をつけたのである。

第三は、筑波大学に計算物理学研究センターが設立され、これを母体として PACS-CS プロジェクトが推進されたことである。研究を進めるための組織として研究所を新設するというのは思い切った考えである。計算物理学研究センターは物理学と計算機工学の二つの分野の研究者を構成員とする学際的な研究センターである。サイエンスをどのような方策で進めるかという視点から重要な発展であったと思う。

§ 4. 拠点形成

CP-PACS 以降、格子 QCD 研究はクォークの真空偏極を取り入れた full QCD 計算へと向かって行った。クォークはフェルミオンなので直接数値計算はできず、ディラック演算子の逆行列を使ってボゾン化することになる。問題はディラック演算子がクォーク質量で規定される最小固有値を持つことである。逆行列を求めるための計算量は最小固有値に反比例して増大するから、クォーク質量が小さくなるにつれて計算は膨大になる。CP-PACS を使った up と down のクォークの真空偏極を取り入れた計算によれば、必要な計算量(計算に必要な時間と言ってもよい)は、クォーク質量の逆数の 3 乗に比例して急激に増大するとの経験則になった。これでは、物理点計算 (up と down のクォークの質量が自然界で持っている値での計算) は、CP-PACS を数千台並べても数年かかることになる。この困難は、2001 年に東西ドイツ統一後間もない首都 Berlin で行われた Lattice'01 のパネル・ディスカッションで報告され、full QCD simulation の実現を妨げる Berlin Wall と呼ばれるようになった。

Berlin wall を乗り越えるには、スパコンをさらに高性能にするか、計算アルゴリズムを効率化するかである。2001 年のパネル・ディスカッションに出席していた Martin Luescher は、パネルの場で既にアイデアを暖めていたようである。その後、クォークの真空偏極を長波長と短波長の成分に分解し、それぞれの寄与の大きさに逆比例してグルオン場を変化させるアルゴリズムを提案した(UV/IR separation)。この方法によれば計算量の増大はクォーク質量の逆数の 1 乗にまで抑えられる。壁は残っているが、物理点での計算が考えうるようになった。

スパコンの高性能化には紆余曲折があった。世界的にスパコンの性能向上は 1990 年代を通じて Moore の法則に沿って続いており、これに対抗するには、CP-PACS 完成の直後から、次期スパコンの計画を進める必要があった。2000 年前後には、100Tflops 級のスパコン開発計画をメーカーや理化学研究所と検討し、文部科学省への概算要求まで幾度も努力したが、どれもうまくいかなかった。

丁度同じ頃、国立大学を取り巻く状況は風雲急を告げていた。国立大学法人化の動きが現実のものとなり、計算物理学研究センターもその一つである共同利用研究所の在り方の見直しの議論が加速したのである。筑波大学でも法人化後の体制についての検討が開始され、検討項目の一つが計算物理学研究センターの改組・再編だった。2002 年の夏は、新センターのビジョンと組織をめぐって、大学執行部や関係学系との相談に明け暮れた。その結果、融合分野を計算物理・計算機工学から計算科学・計算機科学に拡大する、10 人規模のセンターから 30 人規模の研究所に拡充する、CP-PACS 後継スパコン計画を中心設備とする、の三つを基本方針とする改組・拡充計画がまとまった。この後一年以上をかけて文科省学術機関課と折衝を行い、2003 年 12 月の 2004 年度政府予算案で、計算科学研究センター設置が認められた。新センターは 2004 年 4 月に国立大学法人化と同時に発足したが、人事手続きなど全てが落ち着いたのは 9 月に入ってからだった。

センター設置の概算要求折衝が一段落した 2003 年初夏のある日、計算機工学の朴泰祐と佐藤三久が CP-PACS 後継スパコンの新しいアイデアを説明に来た。市販の汎用プロセッサとネットワークに基づいて構成されるハードウェア上に、標準的なコモディティ OS である Linux ベースのソフトウェアシステムを載せることにより、十分なシステムバンド幅を提供しつつ、全体的に安価かつ高性能な大規模科学技術計算用プラットフォームを構築できるというのである。その日一日の議論で超並列クラスタ計算機 PACS-CS 開発計画の基本アイデアは固まった。2004 年 1 月から学術機関課と概算要求折衝を行い、大学執行部の強い後押しも受け、9 月には総合科学技術会議のヒヤリングを経て 2005 年度の政府予算案に盛り込まれた。正式名称は国立大学運営費交付金特別教育研究経費（拠点形成）「計算科学による新たな知の発見・統合・創出」、2005 年度から 2007 年度の 3 ヶ年計画で総額 22.9 億円の事業になった。PACS-CS の開発製作は、計算科学研究センターと日立製作所（システム全体）、富士通（ネットワーク）の三者が連携を組んで行われた。計画 2 年目の 2005 年 6 月に稼働し、11 月の Top500 リストで 32 位だったが、国内では地球シミュレータに次ぐ 2 位

であった。

PACS-CS で実現したのが格子 QCD の物理点計算である。PACS-CS 計画は、Berlin Wall を軽減する Luescher アルゴリズムが発表された時期と重なっていた。マシンの開発と並行して、Luescher アルゴリズムに基づく格子 QCD のコードを準備し、計算性能評価を行った。これによって、取るべき格子サイズや格子間隔などの計算パラメータと必要な計算時間の見通しをつけることができた。このような経緯を経て、PACS-CS では u, d, s の質量を自然界での値に調節した計算を実現することができた。クォーク質量についての外挿(カイラル外挿)を不要とする物理シミュレーションであり、この方向への研究を先導する成果となった。PACS-CS での計算は 2007 年に発表され 2008 年に出版されたのだが、同じ 2008 年に Zoltan Fodor の率いる BMW Collaboration が、物理点計算を複数の格子間隔で行った上で連続時空への外挿を行ったより完璧な計算結果を *Science* に発表した。我々としては「してやられた」ことになり、誠に悔しい思いをした。ほろ苦い記憶である。

§5. 計算科学と国のスパコンプロジェクト

計算科学研究センターと PACS-CS で、私の関わりは素粒子物理から計算科学全般に拡大することになったが、それは同時に国のスパコン政策への関わりへの道でもあった。ベクトル並列スパコン地球シミュレータは 2002 年 3 月に完成して世界中、とりわけ米国に衝撃を与えた。実は日本のスパコンのシェアは、CP-PACS が Top500 の 1 位になった 1996 年をピークに急激な凋落傾向にあり、地球シミュレータに続く次世代スパコンの開発は国家的重要事項となりつつあったのである。

ポスト地球シミュレータに向けて国の調査が行われる動きを受けて、2004 年には、岩崎・宇川・佐藤・朴で検討した内容を「我が国におけるスーパーコンピュータの開発の必要性について」にまとめ、文部科学省研究振興局情報課に提言した。科学技術におけるスパコンの重要性から説き起こして、国による長期的戦略に基づく継続的なスパコンの開発・整備の必要性、中でもプロセッサ開発の必要性を論じ、ピラミッド型の重層的なスパコン配備を主張したものだ。併せて、超並列 MPP 方式のペタフロップス超級スパコンを提案している。

国の「次世代スパコンプロジェクト」(「京」プロジェクト)は 2006 年に始まった。その立ち上げシンポジウムでは、岩崎が基調講演を行った。私は、アプリ検討、アーキテクチャ調査(MPP 方式は残念ながら採択されなかった)、概念設計に参加し、また、2008 年からは完成後の「京」を用いた計算科学研究のための「戦略プログラム」の制度設計と研究実施機関の選定に携わった。

「京」プロジェクトの一番の記憶は 2009 年 11 月 13 日(金)の民主党政権によるスパコン事業仕分けである。午前中の極めて短時間の質疑の後で「来年度の予算計上の見送りに限りなく近い縮減」との判定結果となったときは大いに驚いた。週明けの 19 日(木)には計算基礎科学コンソーシアムとして反対の緊急声明を出し、25 日には野依良治らノーベル賞受賞者が反対声明を挙げ、文科省の調査に対して国民の多くが見送り反対を表明した。12 月

16日の4大臣合意により、次世代スパコンプロジェクトは計画の見直しを行った上で復活となった。

国の取りまとめた計画見直しの方針は、スパコン開発者（供給）側から利用者側に開発の視点を転換し、ナンバーワンの性能を引き続き目指しつつ、多様なユーザのニーズに応える「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(HPCI)」の構築を目指すというものである。2010年4月1日に開催されたHPCI検討WG第一回の冒頭で、中川正春文部科学副大臣から「コミュニティの総意を結集してHPCIのグランドデザインをまとめて頂きたい」との発言があったことが記憶に残る。その後2年間をかけて、HPCIとその構築を主導するHPCIコンソーシアムの構想がまとめられた。この間、スパコン「京」の開発は、2011年3月の東日本大震災の難局を乗り越えて進み、2011年6月と11月にはTop500の一位となった。2012年9月には「京」を中心として国内スパコン群を第二階層とするHPCIが運用を開始している。

HPCIコンソーシアムは一般社団法人として2013年4月2日に設立された。「京」の戦略プログラム実施機関などユーザコミュニティ代表機関と、国内スパコン運用機関などHPCIシステム構成機関の両者を構成メンバーとして、HPCIシステムの整備と運用、計算科学の振興、将来のスーパーコンピューティングの検討を任務として活動した。

「京」を利用した計算科学研究はHPCI戦略プログラムにより2011年から5年間にわたって行われた。分野5「物質と宇宙の起源と構造」は青木慎也が代表を務め、格子QCD、原子核構造、超新星爆発、大規模ダークマター・シミュレーションなど、物質と宇宙の物理研究が進んだ。私自身は戦略プログラムを運営する立場として実施者には加わらなかった。HPCI構想では「京」及び第二階層スパコンの一般利用の申請採択制度も定めた。2012年のHPCI運用開始以降、素粒子・宇宙分野でも毎年度いくつもの大型課題が一般利用で採択されて「京」による研究が進められた。

「京」に続くポスト「京」（「富岳」）の開発プロジェクトは2014年度に始まった。それに遡ること4年前の2010年8月、まだ「京」の開発が進行中の頃であるが、石川裕を中心とする計算機科学者たちは、次代のスパコンシステムはどうあるべきか、そのためにどのような研究開発をしていくべきかを検討すべきだと考えて、「戦略的高性能計算システム開発に関するワークショップ(SDHPC)」を開催した。私も参加したのだが、これがポスト「京」プロジェクトの始まりである。

翌年の2011年には、国もこの動きを受けてポスト「京」に向けての検討を始めた。矢継ぎ早に、「今後のHPC技術の研究開発の検討WG」（2011年4月～7月）、「コンピューターアーキテクチャ・コンパイラ・システムソフトウェア作業部会」と「アプリケーション作業部会」（2011年7月～2012年3月）が開催され、SDHPCワークショップでの検討を引き継いで、計算機科学の観点からのシステム検討と計算科学アプリの観点からサイエンスの検討が行われ、「今後のHPC技術開発に関する報告書」にまとめられた。2012年2月には、国のHPCI計画推進委員会の下に「今後のHPCI計画推進のあり方に関する検討WG」が置

かれ、計算機科学と計算科学の関係者が一同に会して、科学技術政策の視点からポスト「京」プロジェクトの本格的な検討が進んだ。また、2012年からは、「将来のHPCIシステムのあり方の調査研究」により、ポスト「京」の取るべきシステム構成が調査検討された。2013年夏には概算要求、秋には総合科学技術会議の評価が行われた。ポスト「京」プロジェクトは、このような経緯を経て2014年度から始まった。正式名称は「フラッグシップ2020プロジェクト」、開発主体は理化学研究所、完成目標は2019年度である。

この間、私は筑波大学にあって国の委員会などに出席していたが、2014年には筑波大学を辞して、神戸にある理化学研究所計算科学研究機構に移った。以後、理研を退職するまで4年間、謂わば内側からプロジェクトを見守ることになった。

ポスト「京」プロジェクトは、計算機科学の石川裕をリーダーとして、計算科学研究機構を中心に全国の計算機科学と計算科学の研究者が結集し、co-designをキーワードとして進められた。2014年夏には、ポスト「京」で追求すべき科学的・社会的課題が9つの重点課題(2015年度～2019年度)と4つの萌芽的課題(2016年度～2019年度)にまとめられた。格子QCDは第9課題「宇宙の法則と進化の解明」(代表青木慎也)で進められた。ポスト「京」の開発はいくつかの困難に遭遇したもののそれらを乗り越えて進んだ。名称も「富岳」と決まり、予定どおり2019年度に完成して2020年度から運用が開始された。「富岳」における計算科学研究は、重点課題・萌芽的課題の後継プログラムである成果創出加速プログラムと一般利用で進められている。格子QCDは「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素合成まで」(2019年度～2022年度)及び「シミュレーションでせまる基礎科学：量子新時代へのアプローチ」(2023年度～2025年度)で、いずれも橋本省二が代表を務めている。

§6. 終想

いま私は、WPIプログラムのディレクタを務めている。WPI(World Premier International Research Center Initiative)プログラムは、2007年に始まった、「世界に開かれた、世界から見える」世界トップクラスのサイエンスの研究所を設立しようという文部科学省のフラッグシップ・プログラムである。現在までに17のWPI研究所が科学の様々な分野に跨って設立されている。素粒子・宇宙分野では、Kavli IPMU(東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)とKEK QUP(KEK量子場計測システム国際拠点)がある。

WPIプログラムディレクタの役割は、WPIプログラム委員会が行う新規拠点の採択審査のサポートを行うこと、そして、採択された拠点が10年間の補助金支援期間を通じて世界的な研究所に成長していくように指導助言することである。各拠点毎にプログラムオフィサーと国際メンバーからなるワーキンググループが設置され、毎年のサイトビジットとプログラム委員会での進捗が評価される。毎年の評価には拠点長とホスト機関の長が出席し、ワーキンググループのメンバーやプログラム委員会の委員との間で、サイエンスは勿論のこと、研究所としての成長をめぐるしばしば厳しい議論が交わされる。

WPI が 2007 年に始まってしばらく、私は全く関係がなかったのだが、2013 年の 4 月から黒木登志夫ディレクターの下でディレクター代理を務めることになった。始めてみると、毎年の拠点へのサイトビジット（当時は 9 拠点）やプログラム委員会はかなりのロードで、理研計算科学研究機構との二足の草鞋には少し苦労した。勿論、東大の Kavli IPMU は物理学と数学、阪大の IFRc は免疫と情報、九大の I2CNER はエネルギー、名大の ITbM は化学と植物学、筑波大の IIS は睡眠などなど、WPI 拠点の分野は千差万別で、しかもそれぞれでトップクラスの研究者たちの最先端の研究を聞くことが出来て実に興味深く、私の科学への眼は大きく開かれた。その折々にふと思うことがあった。CP-PACS プロジェクトの経験を経て、私は、研究とは、研究そのものだけではなく、そのための組織・装置・資金のトータルが研究であり、そのように考えて取り組まなければ世界をリードする研究はできないと考えるようになっていた。与えられた枠組みで研究するのではなく、研究をするための枠組みを作り出すことも、研究の大事な要素だと思えるようになったのである。CP-PACS 後継スパコンの開発計画や法人化前後の計算物理学研究センターの改組はそう考えて取り組んできたことだったし、「京」プロジェクトや「富岳」プロジェクトへの関わりも同じだった。WPI プログラムにずっと入っていくことが出来たのも、また長年関係を続けているのも、自らの研究のためか他の研究者達のためかの違いはあるにせよ、枠組みを自分で作って世界トップレベルの研究をするという意気込みに共感を覚えているからかもしれない。

第 IV 部

寄稿文：歴代編集長

75 年目の編集長の日常¹静岡大学理学部
森田 健

いつものように研究室で仕事をしていると、院生の X 君がふと訪ねてきた。

(X 君)「森田さん. この間知ったんですけど, 森田さんって『素粒子論研究』の編集長してたんですね。」

(森田)「そうだよ。」

(X 君)「『素粒子論研究』は講義録や修論のページをよく使っていたんですが, 森田さんが編集長なんて知りませんでしたよ. ちなみに給料良いんですか?」

(森田)「ぶしつけなこと聞くねえ. この仕事はボランティアで, 給料はないんだ。」

(X 君)「そうなんですか. でも編集長って肩書き, すごそうですね. どうやってなったんですか?」

(森田)「選挙で, 選ばれたんだよ. 得票率は 90% を越えてたかな。」

(X 君)「どこかの独裁国家の選挙の得票率みたいですね!? 買収でもしたんですか?」

(森田)「立候補が 1 人の信任投票だったからね....」

(X 君)「やっぱり給料ないし, 誰もしたがるらないんですかね? で, どんな仕事してるんですか?」

(森田)「送られてきた記事をチェックして, 『素粒子論研究』のホームページで公開しているんだ. チェックと言っても, 査読ではなくて, 公開しても問題ないかを確認する程度の簡単なものだけだね. あっ, ただ最近ちょっと気をつけているのは写真やイラストに関してかな。」

(X 君)「写真ですか?」

(森田)「そう. 最近はスマホで簡単に写真が撮れるし, 研究会の報告なんかで写真を載せる記事が増えてきてね. 昔は『素粒子論研究』は冊子として出版されていたから, ここまで写真は多くなかったけど, 10 年前くらいに『電子版』に移行して, 記事は全部 Web で公開することになったんだ. そうすると冊子とちがってページの制限もなくなり, 写真を多く載せられるようになってね. だけど写真を Web で公開するのって, 著作権の問題で簡単じゃないんだ. 例えば, 誰かに自分のカメラで, 自分の写真をとってもらったとするだろ. そしたら, その写真に写っているのは自分でも, 著作権は, 撮影した人がもつんだ. すると, その写真を勝手に Web で公開するのは, 撮影した人の著作権を侵害することになるんだよ。」

(X 君)「へー, そうなんですか. 自分のカメラなのにややこしいですね。」

(森田)「そうだね. だから, 写真を載せる記事には, 著者の人に, できるだけ写真の撮影者や撮影日を明記してもらっているんだ. そうしたら写真の著作権者が誰かわかりやすくなるし, 公開しても問題ない写真だってはっきりするだろ. 正直なところ, 私も写真を載せるのにそういう注意が必要だなんて, 編集委員になるまで知らなかったよ. だから, 投稿される記事でも, 記載漏れがないか, チェックしているんだ。」

(X 君)「写真を載せるのって非自明なんですね。」

(森田)「ちなみにもっとややこしいのは著作物なんかの写真で, 例えば, 「マスコットの写真」とか「銅像の写真」とか, 「写真」の写真とかで, これらは著作権が二重に発生する場合があったりなかったりで, さらにマスコットだと商標権もからみ...」

(X 君)「なんだか, あたまが痛くなってきそうなので, 写真の話はもう良いですよ!」

(森田)「そうだな. 気になったら検索してみてください. 私も検索しないとよくわからないしな。」

¹学生とのやり取りの記述は架空のものです. またこの記事は執筆時 (2023 年 1 月) の情報を元としています.

- (X君)「ところで、『素粒子論研究』の編集委員って、何人くらいいるんですか?」
- (森田)「今は私の他に6人いるよ。『素粒子論研究』が冊子版のときは、基研の所員が1人で編集長をしていたんだけど、電子版になってから、Webの管理や記事の公開とかを、全部やる必要がでてきたんだ。そこで前任の橋本編集長が、編集委員を増やして、うまく分担する体制を作ったんだよ。私もそのとき編集委員に誘われたんだ。さらに学生さん2人にバイトとして手伝ってもらっているから、そこまで編集委員の負担がなく運営できているよ。そうそう、橋本さんは今でも編集委員のメンバーで、とてもお世話になっているよ。」
- (X君)「そうなんですかね。橋本さんの他にはどんな人が編集委員にいるんですか?」
- (森田)「まずは小沼さん。小沼さんもかつての『素粒子論研究』の編集長で、学会などのいろいろな活動にも長年携わってこられたんだ。電子版・編集委員会の立ち上げのときにも、尽力されてね。そのため豊富な経験や知識をお持ちで、困ったときによく助けてもらっているよ。いつもの確かなアドバイスをしてくれるんだ。次に濱中さん。濱中さんは『インシュタイン牧場』というWebサイトを運営していて、そこで修論や博士論文を集めて公開しているんだ。私が院生のときから、そのサイトにはお世話になったな。実は『素粒子論研究』の修士論文や博士論文の記事は、そこからうつしたのものも、かなりあるんだ。」
- (X君)「『素粒子論研究』の修士・博士論文のページがあるのは、濱中さんの寄与も大きかったんですね。」
- (森田)「そうだよ。あと酒谷さん。酒谷さんもすごい人で、最近公開した新しい『素粒子論研究』のWebサイトはほとんど酒谷さんが作ったんだ。」
- (X君)「えー、そうなんですか!? あのページ、検索機能とかかなり本格的ですよ。スマホからも見やすいです。てっきり業者が関わっているのかと思いましたよ。」
- (森田)「私もソースを見ても、どういう仕組みで動いているのか、さっぱり分からないな。」
- (X君)「すごいですねー。というか、森田さんの他の編集委員、森田さんよりすごい人ばかりなのに、なんで森田さんが編集長なんですか?」
- (森田)「そこは、自分でも気にしているんだが... まあ、世の中にはそういうこともあるんだ... あとは核理論委員会と素粒子論委員会から中田さんと横山大輔さんに編集委員として加わってもらっているよ。この2人以外の編集委員のメンバーは、編集長が自由に選んでお願いしているんだ。でも『素粒子論研究』は素粒子論グループの公式な雑誌だから、「この編集部は素粒子論グループの公式な活動ですよ」とお墨付きを与えるために、核理論委員会と素粒子論委員会から編集委員に入ってもらっているんだ。」
- (X君)「へー、いろいろあるんですね。」
- (森田)「特に今年は『素粒子論研究』の75周年と言うことで、特別企画の仕事が多く、中田さんと横山さんにも大変助けてもらっているよ。」
- (X君)「そうなんですか。いやあ、『素粒子論研究』っていろんな人が関わっていたんですね。」
- (森田)「そうだね、他の編集委員の皆さんには、とても感謝しているよ。でも『素粒子論研究』を本当に支えているのは、投稿してくれる著者の皆さんだからね。X君もぜひ修論でも投稿してほしい。」

あとがき

『素粒子論研究』75周年ということで、25周年記念の歴代編集長の手記を読み直したところ、時代の流れと共に素研や編集長の仕事も大きく変わったものだと、感慨深く感じました。そこで、現在の素研や編集委員の雰囲気を経験した気持で伝えようと対話形式の記事にしました。また、素研の編集長が、率先して気軽な記事を書くことで、投稿をよりしやすい雰囲気にしたいという思いもありました。

ゆるい素粒子論グループ

橋本幸士（京大理）

『素粒子論研究』の創刊75周年をお喜び申し上げます。私は2015年より編集委員と編集長をさせていただいております。編集長着任当時は、この雑誌を盛り上げたいという思いで、さまざまな方向性を探り着手しました。そのうちいくつかは進み、いくつかは消え去りましたが、それらを振り返ることで、前編集長からの寄稿文とさせていただきます。

2015年当時の私の危惧は、素粒子論研究は歴史の遺物であり、新刊号はもう必要とされていないだろうということでした。投稿される文章は年に10に足らず、研究会報告や論文もほとんどありません。それもそのはず、情報交換の場が2000年ごろからネットに移ったにもかかわらず、『素粒子論研究』電子版は単に冊子体を電子化しただけのもの、としか言えなかったからです。電子媒体ならではの活用方法が、実装されていませんでした。

そこで私は編集長として、ある年の素粒子論懇談会で、素粒子論研究のホーム

ページにチャットや SNS 的な機能を持たせ、そこで若い人たちも含めて意見を言い合って交流できるように刷新してはどうかとの提案をしました。しかし、素粒子論懇談会であがった意見は、「その必要はない」との冷ややかなものでした。つまり、この媒体は新しいものをする場所ではなく、今までの活動を維持するだけでよい、とのグループのお達しだったのです。

私は心底がっかりしました。それは、この媒体を皆が楽しめるものに育てたいとの私なりの思いが空回りしてしまったからでしょう。それに、そもそも素粒子論懇談会は、一人でも否定的な意見があれば可決できない組織ですから、仕方ありません。この「後ろ向きな組織」にはがっかりさせられることが多かったものです。

その後、従来の『素粒子論研究』から逸脱しない程度に、編集委員会内部での努力が始まりました。原稿を依頼したり、修士論文や博士論文を集めたり、などです。これらは、編集委員の皆さまの尽力で、ある程度の成功を見ました。しかし、定着したり拡大するには至っていない、というのが現状だと思います。

『素粒子論研究』をどうしていけば良いのか、という問への私の答えは、現時点では見つかっていません。75周年という言葉はとても重く、数字が増えるた

びにさらに重くなっていくことでしょう。周年事業は、過去の『素粒子論研究』や素粒子論グループがどうだったか、を若い人たちが知る機会にはなるので、その意味では重要でしょう。しかし、時間の向きとしては、後ろ向きです。素粒子論コミュニティが今後どのようなようになっていくのか、どうしていきたいのか、を議論する場はどこなのでしょう。創刊時は、それは『素粒子論研究』だったのだと思います。しかし、現在、そんな場所は無いのではないのでしょうか。

私は、ゆるいつながりである素粒子論グループが好きです。固く結束するよりも、自由にいろんなアイデアが試せるからです。それが素粒子論の本髄とでもいうものでしょう。一方で、このグループが存在している理由の中には「伝統に根ざしている」という点もあり、それが機関紙『素粒子論研究』の立ち位置なのだろう、と今では納得しています。私が編集長だったときに目指すべきだったのは、伝統ある『素粒子論研究』を変革することではなく、それは保ちながら、新しく他に媒体を立ち上げることだったのだらうと思います。まあ、立ち上げなくても既に SNS で繋がっているゆるいグループがたくさんあるので、それで良いのかもしれません。

これからも、ゆるくて楽しい素粒子論グループであってほしいと思う次第

です。

素粒子論研究の完全オンライン化の経緯についての断片

尾田欣也

2023年5月30日

私は2013年3月から2015年3月まで素粒子論研究の編集長を務めました。何をしたのかもはやあまり覚えていませんが、素粒子論研究の完全オンライン化が主な仕事と言えるかと思います。そのときの経緯などを、臆げに覚えている範囲ではありますが書きます。(といって第一稿を提出したところ、臆げすぎたので事実関係の誤りについての確認依頼があり、確認・修正した結果が本原稿となっております。*1)

私が就任する前の経緯については2002年から10年間編集長を務められた、笹倉さんの記事に詳しいです [1]:

先行きに対する不安があったため、2008年の小林・益川のノーベル賞受賞をきっかけに、冊子版と並行して、電子版の発行を開始した。しかし、電子版は、特に年長者を中心として理解が得られず、困惑しながらのスタートであった。

ということで電子版の発行は2008年ですね。冊子体の電子版、という形で基研のウェブサイトには置かれていたことになります。

そして、とうとう、2013年からのPTPの日本物理学会への移行に伴い、理論物理学刊行会が基研から無くなることになった。冊子版の発行には、相当量の専門的事務作業が伴う。これまでのような理論物理学刊行会への委託ができなくなれば、冊子版の発行は極めて困難である。冊子版の発行を基研が続けるのは現実的ではなく、「素粒子論研究・冊子版」の発行は2011年度をもって終了することになった。それに伴い、2011年11月末には、九後基研所長より素粒子論グループに対して、「素粒子論研究」の今後をどうするかについて議論するようにとの要請がなされた。私の個人的な意見としては、素粒子論グループのメンバーが自由に投稿できる場としての「素粒子論研究」は他に代替物がないので、電子版として、今後も継続すべきであると考えているが、2012年春の学会での会合で、素粒子論グループとしての結論が出るであろう。その場合、発行事務は、基研から素粒子論グループに移ることになる。

冊子版の発行停止が2011年度。というわけで、発行停止していた素粒子論研究を再起動させ、リ

*1 言うまでもなく本稿の文責は私にあります。

ニューアルした完全オンライン版として立ち上げる、というのが私の任務ということになるかと思っています。

次に補足情報。上述の第一稿に注文がついたあと、当時の素粒子論委員会の委員長だった前川展祐さんに確認したところ以下のようなお返事がありました:

多分、私が素粒子論委員会の委員長をやっていた関係で、編集長を兼務していたような気がしています。今のように選挙でやることに決まるまで、素粒子論委員のメンバーの誰かがやることにしていたような気がします。はっきりと覚えているわけではないのですが。

おそらく、私が委員長の時に、選挙でやることにした、もしくは、原案を出した、みたいな感じだったような気がします。そして、実際に選挙を行って編集長が決まる(これが橋本さんだと思いますが。)まで、時間がかかるので、その時の素粒子論委員のメンバーとして(私が抜けた後の)編集長として、尾田さんが勤められたのではないかと推測しています。

私が抜けた後の新しい素粒子論委員会でそれぞれの役目を決めるでしょうから、私は尾田さんが編集長になると決める時にはかかわっていなかったように思います。(尾田さんからこのメールをもらうまで、私の次は橋本さんかなあ、と思っていたくらいです。)まあ、これも推測で、私が素粒子論委員長をやっているときに、兼務は大変、ということで、尾田さんに仕事を振った可能性もありません。

そんな感じです。多分、私は、当時の素粒子論委員会の委員長として、現在の形の素粒子論研究編集部にするのに、強くかかわっていたはずですが、何分、私の記憶は、悲惨なので、そんな前のことは、ほとんど覚えていません。申し訳ありません。

個人的には素粒子論研究の再起動、完全オンライン化という大きな変革にそれなりに時間を使って頑張った記憶が(臍げながら)あるのですが、私が編集長をしたことすら覚えてない(泣)。まー人生そんなもんですね。拜命した当時の心境を臍げに振り返ると、めんどくせーな、というのと、編集長ってなんか響きがカッコイイし箔もつくかも?という助平心とが混ざったようなものであった気がします。

以下第一稿を修正しつつ記述していきます。まずはどこかの会社に頼もうかと思いましたが、ネットで検索してみたところ、数百万円という金が必要そうでした。一桁多い…。どうしようかなー、と思っていたところ、当時ポスドクで KEK にいた Guido Cossu さん(検索したら 2022 年の論文が出てきて、今の所属は渋谷区にある会社ようです)の作った研究会のウェブサイトがめちゃめちゃかっこよかったので、この人に 10 万円で頼もう、と決めました。

時系列としては、素粒子論研究のウェブサイトを見たところ、[sg-1 7043] で冊子体の終了のアナウンスが 2012/2/22 になされ、同 3/26 に素粒子論研究を改めてオンラインで素粒子論グループの機関誌として作ることが決議され、同 7 月に素粒子論研究編集部の素粒子論グループへの引き継ぎが完了、そしてそのお鉢が私に回ってきた、という経緯のようです。

で Cossu さんに依頼のメールを送ったのが 2013/6/12 です:

The journal has stopped publishing paper volumes from 2011. As you can see, (不適

切な表現につき略) , and I am supposed to renovate it. Thereby, I would like to ask you to do the job, as I was impressed by your work

<http://www-conf.kek.jp/extradim/>

What I would like to ask is to start up the web page and teach me how to deal with it, within 100,000 yen.

もう 10 年も前か。このメールの前に伊藤悦子さん（今年の 4 月に理研上級研究員から基研准教授へ）を伝手として Cossu さんをお願いはしていたようです。そして LATTICE 2013 が終わってからでもいい？と言われ、いいですよ！ということでお願いし、8/8 から取りかかって、いつごろ完成したんだろう。たぶん数ヶ月ぐらいですぐできたんじゃないかと思います。なんかウェブサイトにかっこよく貼るように湯川さんの写真の使用許可を貰ったりとかそういうこともしたと思います。あんまりよく覚えていなくてすみません。

そして今では私がやったときよりちゃんとしたかんじにリニューアルされてますね。知らなかった…。せっかくなので、昔の Cossu さんのデザインしたやつへのリンクを貼って終わりとしませ。^{*2}

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soken.editorial/elements/old-site3/index.shtml>

参考文献

- [1] 笹倉 直樹, 時代の変化に翻弄された 10 年 (素研編集部より), 素粒子論研究 (2012) .

^{*2} これも将来は無くなるかもしれないので <https://archive.org> で登録しました:

<https://web.archive.org/web/20230530025246/https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soken.editorial/elements/old-site3/index.shtml>

ちなみに元のものはこちら:

<https://web.archive.org/web/20221207043113/https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soken.editorial/>

『素粒子論研究』と益川先生の思い出

福間 将文 (京大理)

基研の助手だったときに『素粒子論研究』の編集長を仰せつかり、理学部に異動するまで続けていました。著者との連絡や校正などは、当時基研にあった理論物理学刊行会の野坂さんがすべてやって下さっていたので、私の仕事は単に投稿された論文に掲載許可を与えるだけでした。

ところが、本来単純で楽なはずのこの作業が、実は大変であることをすぐに思い知ります。素粒子論グループの機関紙である『素粒子論研究』は、当時、誰もが審査なしに自由に投稿できるとされていて、素粒子論研究者以外の方たちからも投稿がありました。しかしながら、その中には独創的すぎて掲載すべきでない論文もありました。もちろん、第二、第三のガロアが投稿しているかもしれませんので出来るだけ慎重に判断しましたが、それでも、全国の研究者・研究機関からなる購読者の皆様に配布する雑誌としては、掲載をお断りせざるを得ないことが何度もありました。そうしたとき、投稿者が刊行会にお怒りの電話をかけてくるものが一定の割合で存在し、その都度私に対応していました。「掲載拒否は『素粒子論研究』の投稿規程に反するのではないか」というのがお怒りの理由ですが、こうしたクレームに毎回対応するのはかなりしんどい作業でした。

何度か本当にひどいことがあったため、いよいよ当時の所長であった益川先生に相談し、投稿規程を変更して、今後は「素粒子論グループのメンバーに限って投稿できる。ただし、メンバー以外でも編集部が特に認めた場合には掲載する場合がある」といったルールに変更してよいか伺いました。益川先生はその場ですぐに了解され、責任は自分がとるので自由にやってほしい、何か問題が起きたら自分のところに回すように、ということまで仰ってくださいました。その後、益川先生からの言葉通りのご支持とご協力のおかげで無事に投稿規程を変更でき、私のところにもクレームは一切届かなくなりました。

「責任は自分がとるので自由にやってほしい」というのは実に響きの良い言葉ですが、本当に最後まで責任を取るのとはなかなかできないことです。益川先生は学問だけでなく人間的にも尊敬されて多くの人に慕われていますが、今回のことはその理由がよくわかる出来事でした。私の人生の大切な思い出の一つになっています。

機関誌『素粒子論研究』を救った 20 世紀末 DX (Digital Transformation) の大波

2023.4.16 (2023.8.31 追記・修正)

青木 健一

小沼通二さん(素粒子論研究編集委員)より、歴代『素粒子論研究』編集長の記事を集めているので提出せよと言われ、実はかなりとまどいました。というのは、元編集長として何か書くことがあるかな、と全く中身を思いつかない状況だったからです。

先の3月、基礎物理学研究所湯川記念館史料室のお仕事の折に、小沼さんに基研研究棟(新館)地下の集密書架を案内いただき、私が編集長をしていた(と教えられた)あたりの『素粒子論研究』を繰っていると、急に色々なことが思い出されてきて、そうだったんだ...と意識の上に浮上してきたことがたくさんあり、少し書いておくことにしました。関係ない話はしなくてよい、と突っ込まずにお付き合いください。書けるうちに書いておくことは大切だ、というのを湯川記念館史料室の仕事から学びましたので。

1. 新しいタイプの記事を加えてみた頃

私が基研の助手に採用いただいたのは1982年の夏でした。さっそくその年の12月号で福田礼次郎さんから編集長を引き継ぎました。福田さんは「実は何にもすることはないんだけどね」とまず宣言され、「これが今月号にする予定の原稿ね」と机の上の紙の束を示されました。そして、その上から手のひらでばんばんと叩き、「この感触を覚えておきなさい、これで大体100ページになるので、1号分にちょうどよい。編集長の仕事はこれだけだから、後は堀野加寿子さんが全部やってくれる」というのが引き継ぎの全てでした。私も何度もばんばんと叩いてみて、「わかりました」と引き受けました。

1983年4月号には、私が初めての編集後記を書いています[素研67-1(1983-4)162]、原稿の束を叩いてきただけでなく、私なりに考えをめぐらしていたことがわかります。「10年前の25周年の時には小沼・牟田両氏が尽力されて、素研のあり方についてのアンケートを行ったり、特集を組んで歴代編集長からの稿を集めたりされ」、「それまであった新着文献案内欄が廃止され、総合報告・研究会報告・論文の三本柱(プラス放談室)が編集の基本となり」と私も少しは勉強した上で、新しいタイプの記事を二つ企画しました。

1983年3月号掲載の「基研からのお知らせ」[素研66-6(1983-3)374]は、基研組織助手であった登谷美穂子さんの発案であったと思いますが、この最初のお知らせには研究会の開催予定や外部からの滞在者の予定がまとめられています。

また、1983年4月号には「物理学会KJR¹報告」[素研67-1(1983-4)159]を掲載し、学会でのKJRミーティングの内容を具体的な議論を含めて紹介しようとしたものです。

この1983年3月物理学会KJR報告には「学術会議改革問題の焦点は会員選出方法であ

¹KJRというのは、実は私の世代でも正確には説明できないので小沼さんに教えてもらったところ、京大と名大の人たちが創ったKenkyu Joho Renraku センターの略だそうです。素粒子論グループの中のいろいろな課題についての情報収集・資料作成・意見交換の中心でした。

り」、「総理府側の全員推せん制（学協会による推せん）の圧力に対してどこまで踏ん張れるか」、「公選制をやめると有権者という概念がなくなってしまう」など、ちょうど40年後の今日と周回「遅れ」でぴったり重なるような記述があり、この問題は長く綱引きしてきたことなのだなどあらためて理解しました。

これらの新しいタイプの記事は、「素粒子論研究は素粒子論グループが発行している同グループの機関誌」というそもそもの定義に戻って、何かを加えてみようと考えたものです。

上記の私の編集後記の中では続いて「10年前の素研が実質的に果たしていた役割と現在のそれはかなり異っている」、「10年後の素研の将来像を考えると、現在の姿から大きく変わらざるを得ない」、「素研の内容・投稿者層の変化、財政的に素研を支える購読者層の変化」、「素研は素粒子論グループの機関誌ですから、この議論は必然的に、素粒子論グループの今後とか素粒子論の今後とか、・・・、IC技術の今後とか・・・にまで話が及ぶ」として、「どしどし、放談室に投稿して下さい」とお願いしました。さすがに、「ICT (Information and Communication Technology)」とまでは書けなかったようですね、その用語はまだ存在していません、ではなくて、ここでのICは集積回路 (Integrated Circuit) の意味だったのです。当時はまだまだハードウェアが時代をけん引する中心でした。

この時、「放談室」についても勉強して、「素研放談室は故木庭二郎氏が編集長の時（第10巻2号、1955年）に新たに設けられたもので「失言自由、匿名自由」という素研ならではの欄です」と釈迦に説法も怖じずに堂々とやっていました。今、調べなおすと、木庭編集長の前の山崎和夫編集長が「放言」を奨励され、それを受けて木庭さんが「放談室」として定式化されたのです[素研10-1 (1955-11) 113、素研10-2 (1955-12) 216]。今だから、これらの記事をオンライン・アーカイブで簡単に拾って引用できたのですが、当時、30年も前の木庭さんの編集後記をどうやって拾ったのかは謎ですね。きっと、ちょうど私とほぼすれ違いで基研から転出された小沼さんに教えてもらった受け売りを書いただけというのが正解のような気がします。なお、「放談室」は私と同じ年齢だ、と今気づきました。

2. 『素粒子論研究』の出版状況と経営危機

この頃の素研の出版状況はかなりの綱渡りでした。財政状況については「1980～1981年度決算と1982予算について」[素研66-3 (1982-12) 257]に素研編集部として説明しています。その中の説明文は今から見るとちょっとわかりにくい筋書きになっています。

まず、購読料を「1981年度に、6年ぶりの26パーセント値上げ」、小沼編集長時代です。この値上げと同時に、学生（含OD）購読料という廉価な新クラスが加えられました。[素研62-2 (1980-11) 79]。

「1980～1981年度にページ数を、1979年までの4年分の平均におさえて財政健全化をはかろうとした」、「幸い、1981年度ページ数は月平均112ページにとどめることができましたので、事態は改善に向かっています」とあります。「支出予算計上にあたっての最大の不定要素はページ数です」、つまり、手書きの原稿から版下を作るコストが大きかったのです。（当時、昭和堂印刷はページあたり1500円という超破格の植字版下作製費でやってくれてはいたのですが。）

このため、原稿がたくさんやってきて内容が増えるのはまずうれしいのですが、ペー

ジ数が増えると赤字傾向になるので、むしろそちらの方に編集長はびくびくしていました。逆に、原稿が全然来ないと、ぺらぺらの薄い号を出す羽目になり、購読者から文句が来るのが怖くなります。編集長としては、この両側が崖のまさに綱渡りがストレスになっていました。購読契約を収入として、投稿のレフェリーはしない原則の雑誌である以上、この綱渡りを負のスパイラルではなく正のスパイラルにしていくことは非常に困難なことでした。それは『素粒子論研究』の課題というよりは素粒子論グループ自身の課題だったとも言えます。

さて、上のように議論を呼びかけはしたものの、特にご意見が放談室に投稿されることもなかったのもので、それ以上の具体的な改革を進めることもしないまま、68-3 (1983 年 12 月号) より新任助手の畑浩之さんに編集長を引き継ぎました。きっと、福田さんから教わったように、紙の束を上からばんばんと叩いてみせて、これくらいにするんだよ、とだけ伝授したと思います。

3. スタンフォードでの衝撃

その後、私はスタンフォード大学内の SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) に 2 年間 (1984–1986) 滞在しました。行く前には急成長を開始したシリコン・バレーの中心であることは特に意識しなかったのですが、着くなり研究・教育での ICT 活用 (しつこいですが、その時にはこの用語はなかった) のレベルの高さに驚愕しました。

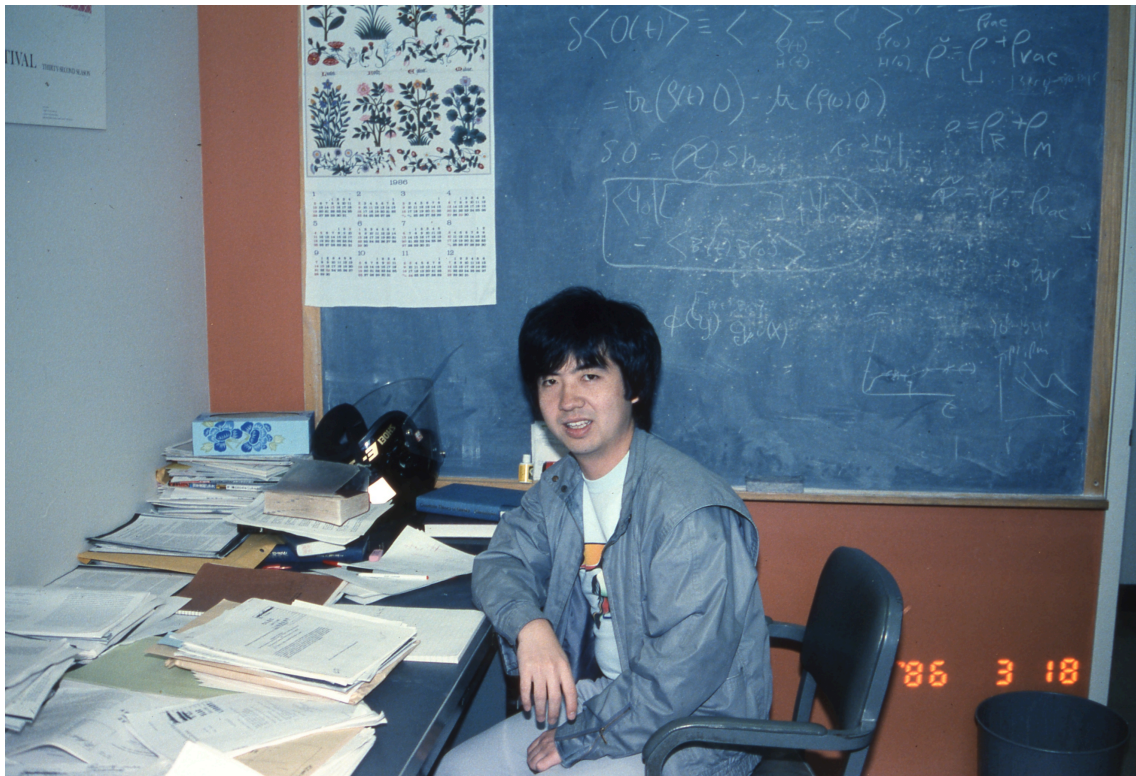
SLAC は当時の研究情報流通・宣伝手段であったプレプリント (preprint) のセンターとして、世界中から送られてくる新しいプレプリントの書誌情報リスト (PPF: Preprints in Particles and Fields) を作製して毎週世界に航空便で配布するサービス (有料) をしており、日本でもそれはよく知っていましたが、同時に preprint database hep (high energy physics) /SPIRES² を作っているいろいろな検索サービスを提供し、更にそれをネットワーク経由で遠隔サービスする事業も開始していた事を行って初めて知りました。

スタンフォード大学は、 $\text{T}_\text{E}\text{X}$ のお膝元 ($\text{T}_\text{E}\text{X}$ の開発者である Donald Knuth は Stanford 大学の教授) でもあり、 $\text{T}_\text{E}\text{X}$ を素粒子論業界が使い始める時期にあたっていました。SLAC には青山秀明さんがおられて、コンピュータ、ネットワーク、メール、 $\text{T}_\text{E}\text{X}$ による論文作成等、全ての手ほどきを受けました。タイムマシンで未来に来たかのような体験、という表現がぴったりでした。

最大の衝撃は、 $\text{T}_\text{E}\text{X}$ による論文 (プレプリント) 印刷に使っているプリンタでした。LBP (Laser Beam Printer、既に死語) で、確か IMAGEN という商品名だったと思います。夢のように美しい普通紙印刷 (これも死語) ができるページプリンタ (これも死語)、しかも極めて静粛でした。いったいどの製品かとみると CANON 製だったので、なんで、と更に驚きました。日本では見たこともなかったからです。

$\text{T}_\text{E}\text{X}$ だけでなく、大量の数値データの表 (いわゆる csv file) から、topdraw という SLAC 製ソフトを経由して自動的にグラフが作成され、同じ IMAGEN からどンドン吐き出されていました。当時の日本では、計算センターのラインプリンター出力から数字を読み取っ

²SPIRES (Stanford Public Information REtrieval System) はスタンフォード大学で開発されていた文献データベースシステムで、SLAC がその主力ユーザとしてプレプリント情報を hep という名前のサブファイルに全部入れていたのです。



SLACでの私のオフィス。机上にパソコンも端末もない。[撮影 日置善郎]

て、方眼紙に鉛筆で点をうち、定規をあてて議論する、というのが標準だった（それしかなかった）ので、とにかく、考える前に（失礼千万はご容赦）グラフをたくさん印刷してから見比べて議論しようというそのやり方には、不適切な悪い表現で恐縮ですが、「竹槍では勝てない」と心底思いました。

理論部の共用ホールみたいなどころに多くの端末や IMAGEN があったので、結局、大半の時間は、そこで端末に向かっているという生活になりました。今から思うと明らかに VDT (Video Display Terminal) 症候群、一週間の終わりも近い金曜日の午後には、頭痛がひどくなり、土曜と日曜でなんとか回復して、月曜にまたログイン、というサイクルでした。

当時の基研には、広部繁子さんという非常に有能でフットワークの軽い方が計算機室（現湯川記念館南側3階の東の端の部屋）におられて、実はそれが逆効果で、スタンフォードに行く前の私は計算機が嫌いというか怖かったのです。

というのは、計算機室の端末で何かミスをすると、ピーと端末が警告音を出してフリーズとなるわけですが、呼ばなくても広部さんがすっ飛んできて、キーをいくつか素早く叩いて端末を復活させて、「はいどうぞ」と去っていくわけです。これは素晴らしいサービスでもあるのですが、元来気の弱い私は、広部さんがすっ飛んでくるのが怖くて、それを招く「ピー」が怖くて、という負の連鎖で計算機が怖くなってしまっていたのです。（OD シミュレーションとか弱電磁相互作用の高次効果とかを京都大学大型計算機センターで計算していましたが、自分で自信をもって楽しめたのはアルゴリズムまでで、モノとしてのコンピュータとの付き合いでは不安が先にたって人知れずビビっていました。）



初めて見た LBP。前に立つのは短期で来られた日置善郎さん。[撮影 青木健一]

SLAC の環境は全く逆でした。何をやっても誰も飛んでは来ない。私は英語の勉強も兼ねてコンピュータやソフトウェアのマニュアルを全部読む、というやり方をしました。わからないところは、センターのスタッフやボランティア登録者にメールで尋ねるという方法があり、ゆっくり質問の英作文をして、帰ってきた返事を落ち着いて読み解けるわけです。これなら、英語が嫌いだった私にもできました。

後でも述べるコンピュータシステム自体の friendly 性も相まって、私はコンピュータやシステム・プログラミングが大好きになってしまい、そのうち SLAC のオリジナルソフト (FastCopy) の致命的なバグを見つけて報告したり、理論部内では他の人から「間違っただけを消したので助けてくれ」と頼られたりする立場にまでなっていました。上の写真にあるように 1986 年に日置善郎さんが滞在された頃には、SLAC の研究環境を自分の成果のように自慢したことを覚えています³。

この「未来環境」を堪能していたのですが、帰国が近づくと、こんな綺麗な印刷物は日本に帰ったらもう 2 度と作れないと本気で考えて、帰国直前には、作ったグラフをたくさん印刷して、他のメンバーからにらまれていました。もちろん、平日ではなく人気のない土曜と日曜に、理論部だけではなく、ちょうど SLAC におられた山本均さんに教えてもらった別棟の実験系共有プリンタの前にも陣取って、小出しに印刷して、とか十分に気を使ってやってはいたのですが。慣れない実験系の共有端末を堂々と使っていましたが、も

³日置さんの著書「相対論的量子場 - 演算子の基礎的性質 -」(吉岡書店 2008) には、「ちょっと息抜き: \LaTeX は万能?」といコラム記事があって、「筆者が初めて \LaTeX (の前身の \TeX) に接したのは 1986 年スタンフォード大学に滞在中だった。新しいものが苦手な筆者も「これは絶対にマスターせなアカン!」と強く感じたのははっきり覚えている」と書かれていて、非常に懐かしかったので、LBP の前に日置さんがたたくむこの写真を発掘しました。

し周囲から、お前は誰やと言われたら、Hitoshiと一緒にやっている理論のAokiです、とびびらずに言えばすんだわけです。セキュリティがきつくなかった時代でした。

この頃、世界をつなぐネットワークはBITNET⁴、IBM汎用機⁵を相互にバケツ・リレー型 (Store and Forward) でつなぐ tree 構造のネットワークでした。ある時、ポストドクでいた Marek Karliner が、日本がBITNETにつながったのではないかと教えてくれました。BITNETの routing tableを見ると、確かに JPNSUT00 という node が発生していて CUNY (City University of New York) の先につながっています。JPN というからには日本だろうとは思いましたが、SUTって何だろう、とその時にはわかりませんでした。それが東京理科大学 (Science University of Tokyo)⁶ で、日本のBITNETをけん引⁷していることを知るのは帰国後でした。

4. DX (Digital Transformation) 開始

1986年10月に帰国し、畑さんから2度目の編集長を引き継ぎました。そして、SLACでのショックと日本に帰ってからのもうひとつの驚きを合わせて、1987年3月号に編集後記 [素研 74-6 (1987-3) 71] を書いて報告しています。少し引用して、説明を加えます。

まず「IBMのVM (Virtual Machine) からみると日本の大型機のOSは絶望的に不自由」。これは、VMという設計思想からもわかるように、要するに個人用パソコンみただったのです。ユーザーはそれぞれ自分のファイル管理領域 (A-disk と呼ばれていた) を持ち、そのサイズもちょうど標準 1MByte でしたから、まさにフロッピー 1 枚。理論部秘書 (Sharon さん) の管理領域に自由にアクセスできて、G-disk (Group disk) と名づけてファイルやソフトを共有していました。

最初に端末にログインすると自動的にこの理論部秘書の G-disk へのアクセスが開始されるのですが、その時にあらかじめ設定されている管理者からのメッセージが表示されるシステムで、“Curiosity killed the cat” と毎回表示されました。最初に見たとき、思わず、これってどういう意味と青山さんに聞いたのを覚えています。理論部秘書の管理領域ですから、ビジターの滞在予定やいろいろ載っています。青山さんからは、いちいち秘書に聞かずにこの G-disk のファイルを自己責任で見ればよい、とも教えてもらいました。

また、REXX (REstructured eXtended eXecutor) というシステム・スクリプトがあって、これが今の unix shell script よりもはるかに使いやすい。(今、名称を確認するために google で探すと、REXX は今でも現役でした。これはこれで新しい驚き。) これを使っていろいろと便利なツールを作りました。

中でも、SPIRES とリンクさせて、ある著者の citation を数え上げるプログラムを作り、spicite と名付けました。更にその結果を総合して、研究室単位のアクティビティ (出版数と citation 数) の年次変化をグラフで見える化するというプログラムを作り、これを走ら

⁴Because It's Time NETwork、アメリカらしい名前付け、1981-1996 頃。

⁵International Business Machines Corporation 製のコンピュータ、いわゆるメインフレーム (大型計算機) として世界を席卷していました。日本では富士通と日立がそれぞれ互換機を作って大学の計算機センターに設置していました。

⁶ただし現在の英語名は Tokyo University of Science。

⁷『BITNET JP 10 年の歩み』(日本 BITNET 協会)には、1985 年 4 月末にアメリカとの回線が動き出し、5 月から正式に BITNET 接続開始と記載されています。

せまくって IMAGEN で印刷していたら、SLAC Library のボス Louise Addis さんに見つかり、急に研究室に来られたのであわてましたが、その有用性を評価されていることがわかりました。彼らが日々苦勞して入力している preprint database hep/SPIRES、特に手間のかかる reference 部分の入力が見事に利用されている、ということで驚き、大満足されていたに違いないと後から思いいたりしました。

当時、坂東昌子さんと登谷さんは文献データベースを利用した研究アクティビティの客観的な評価や研究動向の分析に興味を持っておられ、SPIRES を利用した解析をやろうと SLAC まで来られました。spicite による世界の研究機関の分析を行って帰国後に長大な論文を作りましたが、投稿する先がまだなくて、基研のプレプリントとしてだけ存在しています [参考文献 1 の英語論文]。この長大論文は、後ろに出てくる T_EX の稼働開始があってこそできたものです。また SPIRES での論文内容を表す keyword 情報を活用して、研究動向の経年変化についての面白い結果が得られ発表しました [参考文献 1 の二つ目]。

私の帰国後、spicite は SLAC の公認ソフトとして位置づけられ、世界中の人に使われます。この交流の中で Addis さんと懇意になる機会に恵まれ、その後の基研への SPIRES 導入、プレプリント情報入力の分担等に進むときに大きな支援をいただきました。この原稿のために少し文献を調べていると、Addis さんが書かれた SLAC Library の取り組みの年表があるのを見つけました。参考文献 2 がそれです。

それによると、SLAC が設置された 1962 年に、Wolfgang Panofsky 初代所長からの指示で、プレプリントを検索可能なシステムを作ることになり、その際に所長がつけた条件の一つが、どんなに多人数の著者がいても、全著者名を検索可能なデータにすること、だったそうです。

これは非常に興味深いことです。というのは、通常の文献データベースシステムでは、著者数には必ず上限があるからです。基研では当初、SPIRES そのものが導入できない場合に備えて、hep/SPIRES の中身を京都大学大型計算機センターのデータベースシステム FAIRS⁸ に移植する可能性を検討し、著者名情報の扱いで非常に困ってあきらめたことを思い出したからです。実際、SPIRES の無制限著者名情報、著者名検索の柔軟さと完全さ⁹ は、今の表現で言えば、優秀な AI 並みです。

多数の共著者の存在が通常で、すべての著者をフェアに扱うべき高エネルギー物理学での文献データベースとして必要な極めて優れた機能を SPIRES は開発してきたわけですが、その出発点がここにあったことを初めて知りました。高エネルギー物理学のソサエティは、自分たちに必要であって他にないものは自分たちで開発し、それを他に広めてきた、という歴史の一つとも言えるでしょう。

編集後記に戻ります。「NETWORK を利用したメールのやりとり、共著論文の作成、preprint のやりとり etc. が急速に普及しつつあり、それに乗り遅れると、電話のある所と無い所の様な差を被ります」。逆の意味になりますが、SLAC 滞在中に国際電話（国際 FAX）を稀にとは言え使っていたのは私だけでした。他の滞在者は地元とメールで連絡を

⁸Facom Advanced Information Retrieval System

⁹イニシャルや middle name の扱いを完全に行い、検索対象の可能性のある文献を全て落とさず拾う、という機能。例えば、Kenichi Aoki で検索すると、Kenichiro Aoki とか S. Aoki とか入力されている文献は拾いませんが、K. Aoki とか Kenichi Albert Aoki と入力されているデータは落とさず拾ってくれるのです。この機能を持つ文献データベースを私は SPIRES 以外には知りません。

とっていましたから。

「TeX 等の超高品位の typesetter を preprint に使うのが広まり、Macro program まで同じものが普及」、「この事が、…、preprint のやりとりを容易にし、更に進んで、preprint の内容自体を登録するデータベースや、共通仕様での投稿の標準化（preprint の dead copy で Journal を作り、校正を一切省略する）等も joke にとどまらない状況です」。joke にとどまらないどころか、これら全てがこの先5年程の間に現実化したわけですから、まさに DX の大波が通過していたわけですから、今から振り返れば。

この編集後記に書いた「オンライン化ジャーナル」joke を、プロGRESS (Progress of Theoretical Physics) で一気に実現すれば、世界のトップに立てるのではないかと夢想して、素研放談室に投稿するつもりで、周りの人にも言っていました。それが、基研の教授であった益川敏英さんの耳にも入ったらしく、生協北部食堂の前で呼び止められました。考えているプランの要点を説明すると、「青木君の言いたい事はわかった。ただし、文章を出すとその一部が切り取られて悪用されることもあるので、表現は慎重にしてください」とアドバイスされました。

まだ若かった私にも「慎重に」と言われた意味はおぼろげながら感じられましたので、忙しさに紛れたこともあり何かの提案文章を作ることはしませんでした。今の私が当時に戻れば、十分に「慎重な」表現で提案書を作れたと思いますが、それでもそこから先には一歩も進めなかったでしょう。（このパラ自体も、「慎重な」表現になっているか心配な文章ではあります。）

編集後記では続いて「しかし、一方、日本の各研究室レベルで、PC98 がこれ程普及している、ということも驚きでした。きっと、いい soft を開発してうまい interface を作れば、この PC98 etc. を活用して、上に述べた様な世界的な傾向にも対応して行けるのではないか」とまとめています。

この頃、TeX を PC98 で使えるようにしたソフトが ASCII から発売され、CANON も LBP を日本でもようやく売り始め、日本語への対応も進み、私は TeX のエバンゲリストみたいな役回りになってしまいました。

その最たるものは「科研費 TeX マクロ」です。私は、TeX はどんなフォームでも自由に作れると宣伝していたので、登谷さんが「じゃあ、科研費の申請書作れる？ できたら、七研（共同利用事務室：第7研究室の意味）が大助かり」とあおってこられたので、即座に「できますよ」と言い切ったのが地獄の入口だとは気づきませんでした。その苦闘の物語は参考文献3にゆずります。

ひとつ、私自身のメリットと言えたのは、後に、いろいろな分野をまたいだ全国的な委員会や会議の場で、最初の自己紹介で「青木です、一番有名な業績はあの科研費マクロです」と言うとすぐに覚えてもらえて、話が弾んだことです。

TeX はプログラミング言語の一種なので、データベース出力のような巨大印刷に向いていて、スケラブルに対応できます。その機能を使って、素粒子論グループ名簿、原子核三者若手名簿、CONPHYS データベース¹⁰ の全出力冊子（1993年版）等を作ってきた

¹⁰CONPHYS データベースというのは、1990年までに世界各地で開催されてきたシリーズの物理学関係の国際会議録のデータベースです。『物理学国際会議録目録—継続会議編一』として1980年と1993年に京都大学基礎物理学研究所基礎物理学研究情報センターから発行され、1982年からは京都大学大型計算機センターのデータベースの一つとして CONPHYS という名前で公開され、広く利用されていました。国際会

のは、今となってはなつかしい思い出です。

この CONPHYS の目録は相当に巨大なもので、CANON のプリンタでの印刷がうまくいかなかったのです。ASCII に連絡すると、T_EX の出力ファイルである dvi (device independent) file を送ってくれと言われ、解析してもらえました。その結論は、結局、こんなサイズの大きな出力を想定していなかったというありがちなバグであったと判明し、無事に印刷出力できました。ASCII からはバグ発見に感謝されましたが、単なるワープロ的利用ではなく、こういうデータベース出力タイプの大規模利用もあるのですね、と感心もされました。

T_EX エバンゲリストの最初の頃は T_EX の簡易マニュアルを作って講習会をしましたが、その初版マニュアルの印刷物が原子核研究所の秘書室で使われ続け、秘書の方が退職されるときに紙がすり減ってぼろぼろになったそのマニュアルを送ってこられて、「紙がすり減ってしまったのでこれの新版があれば送ってください、次の人に渡します」と言われたのには、驚きを通りこして涙しました。

基研では登谷さんと七研秘書室業務の DX を進めました。現湯川記念館南側 1 階の会議室にパソコンを 6 台程並べ、LBP を 2 台おいて、プリンタバッファを介して太いセントロニクスケーブルを床に這わせて、どちらでも空いている方のプリンタを選んで出力できるように構成しました。基研の最強マシンはこの会議室にあることになり、私は、3 階の自分のオフィスより 1 階の会議室でひたすら仕事をしている時間が長くなりました。

その頃、パソコンにも外付けハードディスクが使えるようになり、あこがれの 40MByte ハードディスクを導入、パソコン本体と同じくらいの巨大な筐体でした。そこにかさばる T_EX のフォントを入れるのですが、ハードディスクの読み書き速度を最適化するために、例によって益川さんに教えてもらったノストラダムスという名前の最適化ソフトウェアをよく使っていました。ファイルの断片化を抑え、たまにしか使わない巨大ファイルは最後の方に寄せたりするソフトで、FAT(File Allocation Table) の直接編集まで可能でした。

いつものようにふと益川さんが会議室に入ってきて、基研最強のパソコンとハードディスクを見学に来た、僕もハードディスクを買ってパソコンライフを楽にしようと思ってもう少しで買いかけたが、ちょっと待てよ、とやめた、と言い出されました。聞くと、僕のもっているソフトのフロッピーディスクは 100 枚以上あるので、これを全部ハードディスクに入れるわけにはいかないことに気づいた、だから、もう少し待つことにする、ということでした。とにかく全部いれようとするところが益川さんらしいですね。

プレプリントを作るためのそれまでの秘書業務は、メモリ式タイプライターでまず英語部分を打ち、ギリシア文字専用のボールに差し替えてから、ギリシア文字用のメモリを入れて重ねうち、という方法でした。それだけ苦労して（お金をかけて）、ギリシア文字や数式は全て最終版になってから手書きで書き込みという方法しかなかった普通の大学よりはるかに美しい基研プレプリント（表紙付き）が発行されていました。しかしそれでも、T_EX の美しさには遠く及ばず、秘書の方々もぜひ使いたいと意欲満々でした。

プレプリント作成作業をタイプライターから T_EX に置き換えると、ファイル編集、T_EX 処理、プレビューで確認、プリンターで印刷、というパソコン上での一連の手続きになりますが、これをなるべく単純にしてスムーズに移行したいと考えました。

議のプロシーディングスが出版され、論文雑誌とは独立の貴重な研究情報源となっていた時代でした。

その時に、PC98のキーボード最上段についている、ほぼ使うことのなかったファンクション・キーを自由に設定できることに気づきました。そして、MS-DOS¹¹のスクリプトであるbat file（バッチファイル）の機能も使って、仕事を始めるときの最初にfile nameを入れるとそれを環境変数にセットし、その後はデフォルトでそのfile nameを使ってT_EXの処理からプレビュー、印刷まで、ファンクション・キーを押すだけでキーボードでの入力なしに連続作業ができるようにしました。

これらの全設定をまとめた一式が、基研T_EXシステムとして全国に伝わりました。このシステムには、益川さんの最高傑作のconfig.sys menu（MS-DOSのシステム初期設定を担うファイルconfig.sysとautoexec.batを複数から選べるというツール）という機械語プログラムによるソフトウェアが本質的でした。パソコンを起動して、T_EX用というモードを選ぶと、ファンクション・キーの設定やT_EX用に最適化されたRAM-Disk¹²等を持ったシステムが立ち上がる、というわけです。

基研T_EXシステムでは、T_EX作業の開始は、F2（ファンクション・キーの2番）を押すことから始まります。すると、対象のfile nameを入力するように促されて、fileの編集作業に入ります。その後はF3でT_EXにかけて、エラーができればF2で編集に戻り、エラーが消えればF4でプレビュー、F5で印刷、確かに便利でした。

この「F3でT_EXにかける」の件で、京都大学を卒業されて金沢大学に就職された寺尾治彦さんから面白い体験を聞きました。寺尾さんがGöteborg (Sweden)に留学されたとき、そのパソコンで論文ファイルを作り、「いつものように」、F3キーを押してT_EXにかけようとした。けれども、パソコンは何も反応しなかったので、非常に困り、いろいろ聞いて初めて、自分がそれまで使ってきたT_EXシステムは独自に作られたものであって世界共通システムではなかった、と気づいた。この話を聞いた私は、大笑いしたうえで、基研はそこまで「世界」を支配していたのか、と密かに喜んでいました。

当時は、 α β とタイプするのは英文タイプに慣れていない研究者にとっては負担で、見た目もWYSIWYG¹³でもないので、その抵抗感を減らすために、日本語なら α β という漢字¹⁴が使えることに着目しました。FE（Final Editor、PC98上の汎用テキストeditor）の短縮入力機能を使って α β をone actionで出して、editor上では漢字で表現し、C言語で自分で作ったpre-processorで α β に変えるというsuper T_EXを作りました。たまたま基研に来たSLACで一緒に過ごしたKarlinerに見せてたっぷり驚いてもらったときは、やっとSLACの上をいった、それも日本でしかできない漢字を使って、とひとりで満足していました。

¹¹Microsoft Disk Operating System、パソコンのOS、後にWindowsに発展した。基研では、PC98からいわゆるIBM互換機のシステムを採用し、Macintosh系統には手を出さなかった、というより、価格の関係で手を出せなかったのです。

¹²MS-DOSは640kByteのメモリアドレスしか使えませんでした。バンク切り替えという手法を使い、装備された追加の4MByte程のメモリをDiskの様に使用できるようにして、つまり、今風に言えばSSD（solid state disk）にして、処理速度を画期的に改善する方法。IO-DATAとメルコ（現Buffalo）の両社が競って開発しました。つい最近、金沢に本社のあるIO-DATAの幹部の方とお会いしたとき、バンク切り替えによるRAM-Diskの開発者であったことがわかり、当時、あの発明がどれだけ私たちを救ったか、つまり、非力なパソコンでT_EXを活用するのにいかに有効だったか、をお伝えして感謝しました。

¹³What you see is what you get（昭和レトロ用語）、当時のMacintosh派の自慢要素。

¹⁴2 バイト文字、あるいは全角文字（昭和レトロなワープロ用語）。

私自身は、タイピング負担がなく super T_EX は使わなくなったのですが、九後汰一郎¹⁵さんが自分で進化させた super T_EX を使われ続けており、その短縮入力のために今も WZ (VZ の後継) editor をパソコン上で使っておられ、更にそのために Windows の version を 11 に上げられない、という笑えない話をつい最近伺い、それなりに、いや深く感動しました。

5. 『素粒子論研究』の起死回生

1987 年 10 月に、新任助手の梁成吉さんに編集長を代わりましたが、梁さんが転出された後、1990 年 10 月から 3 度目の編集長を引き受けました。この時期が本稿のタイトルである DX による激動の時代でした。

前項で始まった DX、パソコン環境や T_EX の急速な普及は、『素粒子論研究』に極めて大きな影響、起死回生とも呼ぶべき影響を与えました。それは、「『素粒子論研究』の出版状況 (1986~1990)」[素研 83-1 (1991-4) 45] で、定量的なデータを示しながら分析されています。

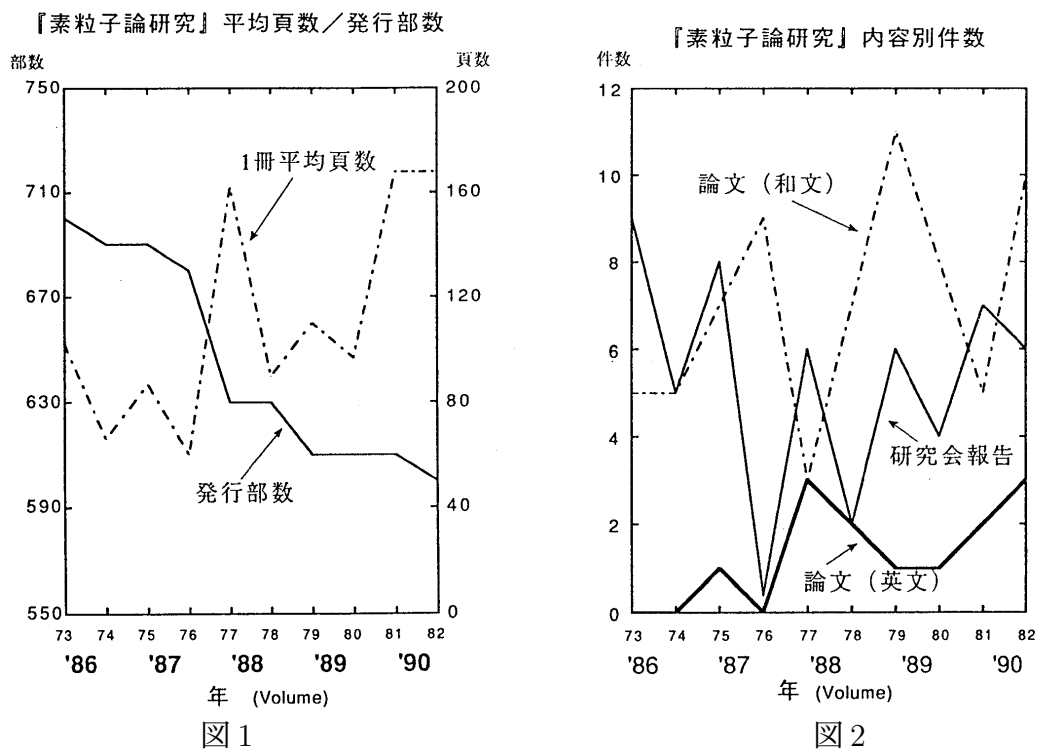


図 1

図 2

そこではまず図 1 を示して、「この 5 年間に発行部数は 700 から 600 へと減った。これは個人購読者の減少である」、「一方、毎月の平均ページ数は約 80 頁から 160 頁へと倍になった」、「更に、昭和堂印刷より値上げが通告され、90 年以降大幅に上がった。(とはいってもかなり「勉強」していただいている)」と変化をまとめています。

¹⁵本稿中、「九後汰一郎」と「九後太一」が混在していますが、私の責任ではありません。これについては、九後さん本人から「ルール」をいただきましたので、未来の人のためにここに正確に引用しておきます。「一般ルールとしては、物理の論文では汰一郎、Taichiro を使い、Administrative な性格の文章では本名の太一を使った。が、必ずしも峻別されていない。」

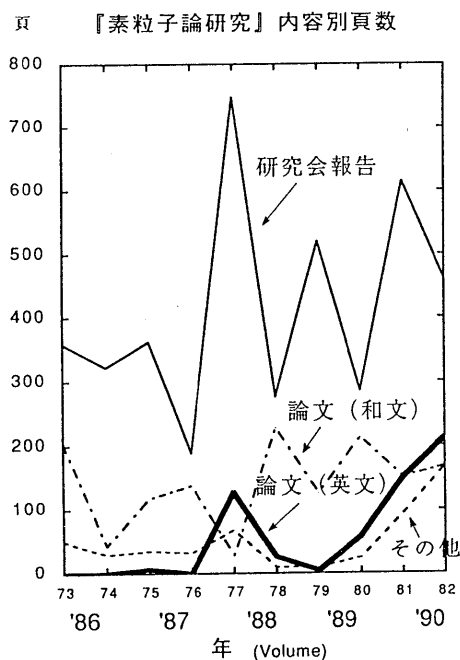


図 3

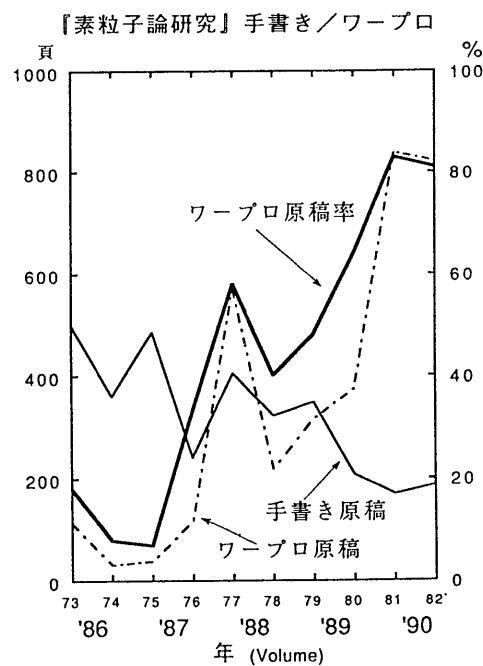


図 4

そして、「従って、普通ならとっくにつぶれているはずである」、とまず結論しています。

そして、『素粒子論研究』がまだつぶれない「種明かし」として、図4が掲載されています。図4は5年間の $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 等のワープロ原稿、手書き原稿のページ数を比較し、ワープロ原稿率の変化を見たもので、「5年前に約10%であったワープロ等による直接製版可能な原稿が、いまや80%を超えた」、「ワープロ原稿の頁当たり版下制作コストは、植字の必要な手書き原稿に比べて約5分の1で済む」（植字すると3400円/頁、ワープロ等による完全版下原稿に頁や柱だけを入れるなら700円）。従って、『素粒子論研究』は、収入が減って頁数が倍増しても破産しなかった、と結論しています。

続けて、図4の「ワープロ原稿の増加曲線を見ると、研究室でのパソコン、 TeX 、レーザープリンタの本格的利用の始まり（1987年）とぴったりあっている」、「それから4年がかかりで、各研究室に普及し、年齢層にかかわらず利用される様ようよくなったという事であろう」と推測しています。

また、図2と図3を見ると、以前にはほとんどなかった英文の論文が急に現れて増加しています。これも $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 等によって論文版下を容易に作れるようになったことが決定的だったと思います。図3で「その他」が急増しているのは、その頃、基研将来計画（広島大学理論物理学研究所との合併等）に関するアンケートやシンポジウムが続いたためです。なお、研究会報告が周期2巻（1年）で振動するのは、年度末に投稿が偏るためです。

この推移を総括して、「パソコンの普及と『素粒子論研究』の平均頁数には相関はあるに違いない（パソコンのおかげで原稿を書くしきい値が低い、長いものも書き易い???）」、「が、発行部数の減少とは0thの相関はないだろう」、「すると、このワープロ率の上昇が経営危機をきわどく救っている（後回しにしている）というのも、なかなか味わい深い偶然である」。

しかし、まだこの時点では「後回し」と表現しているわけで、決して安泰ではありません

んでした。というのは、「現在の発行部数 600 の内、(まだ) 半数以上は個人購読である」、
『素粒子論研究』の位置づけの変化は歴史的なものであろうから、このまま推移すると、
個人購読が減少の一途をたどる事は自明である」として、「もう少しドラスチックな事を
考える」事が「近い将来に問題になる」と締めくくっています。

なお、最後に「編集部の体制の変更について」という説明があります。重要なので引用
しておきます。「素粒子論研究編集部は、基研の担当所員と、非常勤職員（アルバイト、
『物性研究』と共通で 1 名）で運営されてきた」、「非常勤の方の待遇は、基研非常勤職員
のレベルに合わせてきたが、身分的に問題があった」、「元々、安定した定期刊行物を非常
勤職員のみで運営することには無理があった」。そこで、「90 年 8 月より、理論物理学刊
行会の職員が『素粒子論研究』（および『物性研究』）の編集部担当となる体制になった」、
従って「編集部の職員の体制（待遇）は大きく改善された」。ちなみに、上記の出版状況
についての図を作ってくれたのは、当時の担当、野坂京子さんでした。

6. ネットワークの時代へ

私は、1992 年 4 月に金沢大学に異動することになり、編集長を松尾正之さんに引き継
ぎました。私の最後の編集後記（1992 年 3 月号）[素研 84-6 (1992-3) 248] では、新しい時
代、ネットワークの時代を告げるアナウンスを行っています。

「素粒子論研究編集部も遅ればせながら、といってもまだ後ろにもいますが、電子メ
ールの窓口を設けました。SOKENED@JPNYITP.BITNET」、「この窓口は主として連絡用
で、ながい論文や研究会報告の電子投稿というわけにはまだいきません。緊急の短い原稿
などは、受け取れて印刷できた場合には受理できる事もあります」、「受理通知やその後
の連絡などを E-Mail でやりとりする事が可能な投稿者は、ぜひ E-Mail アドレスを投稿時
にお知らせ下さい」

つまり、原稿作成時に完全版下を作ることでできるワープロ率が急激に上がるのと同時
進行で、電子メールに始まったネットワークによる電子的なやりとりが、もっと大きな文
章ファイルまで可能になりつつあったわけです。このネットワークの側面でもいくつか余
計なことを書いて残しておきます。

私が SLAC で日常として経験してきたネットワークや E-Mail の立ち上がりは日本では
非常に遅れていました。私に加えて、特に福来正孝さんは海外とのメールを熱望され、隣
の数理解析研究所に交渉して、そこにあった JUNET¹⁶ node、kurims¹⁷、に account をも
らいました。数研地下計算機室の Sun (Unix の覇者メーカー) の console に行くのが面倒
だということで、基研 1 階の元会議室（当時、パソコン室にしてしまった）から電話をかけ
て、モデム経由でパソコンを端末接続しました。これが基研最初の E-Mail service です。

福来さんは会議室に座りこんで、数研への電話をつなぎっぱなしにして作業することが
多かったのですが、そのうち、数研から叱られて出禁になりかけました。つまり、JUNET
メールは電話回線による定期的なバケツ・リレーで、kurims についている電話回線はひ
とつだけだったのです。基研から電話で端末としてつないでいると、JUNET メールのパ
ケツ・リレー自体ができなくなってしまうのでした。こんな簡単な事実を知らなかったこ

¹⁶Japan University (あるいは Unix) NETwork, 日本のインターネットの先駆け、1984 から 1994 頃。

¹⁷Kyoto University, Research Institute for Mathematical Sciences.

ちらが悪かったのです。

基研事務部の奮闘で「一般設備費」採択にこぎつけていただき、IBM9370¹⁸を購入できました。これは、基研の一般設備費だけでは購入できない価格のコンピュータでしたので、国内では決済できないレベルの大きな値引きが必要となり IBM アジア・太平洋の会議にかけたところ、世界的な研究所であるので問題ない、とあっさり決まり、日本の担当者自身が驚いたと聞きました。湯川さんに助けられたわけです。

この IBM9370 を BITNET に接続するにあたっては、京都大学教授であった情報工学の重鎮、坂井利之さんに牧二郎さんから依頼していただき、準備で先行していた京都産業大学にもお願いをして基研の後ろにつなぐことで了解いただき、京都大学情報工学の node JPNKYOTO の後ろに基研を接続していただきました。ただ、それにしても、情報工学はさっさと「KYOTO」を独り占めしてしまっているのか、とは思ってもいいませんでした。

これが、1989 年からの BITNET node JPNRIFP¹⁹ の始まりで、このアカウントを全国共同利用という形でサービスし、基研計算機室に学内デジタル回線、外部からの公衆電話回線、それぞれにモデムを多数設置して利用する形態でしたが、回線はいつでもほぼ全てが接続中でした。

BITNET は 24 時間の専用回線接続ですが、メールの配送はバケツ・リレーだったので、京都大学の上流にあたる大阪工業大学の node JPNOIT10 の運転モードに苦しめられました。つまり当時は、コンピュータが主であり、ネットワークはコンピュータ間を繋ぐおまけでしかなかったのです。だから、JPNOIT10 は夏のお盆や年末年始には大学の休暇に合わせて長期停止しますが、その期間は BITNET も不通になってしまうのです。いわば、お店が休みの時に、その前の道路も通行止めにかかる、という状況だったのです。

この頃の苦労を思い出しました。上に書いたように SPIRES はスタンフォード大学が開発をけん引してきたシステムですが、アメリカを中心とする大学等が会員となって SPIRES コンソーシアムを作り、共同開発・利用をすすめていました。基研が整備できた JPNRIFP に SPIRES を導入するには、コンソーシアムに入って会費を払う必要があります。しかし、大学の予算（校費と呼ばれていたもの）では、「会費」という類の支出は不可でした。更に、ライセンスを購入する、という支出も不可でした。

1989 年の Lepton Photon 国際会議がちょうどスタンフォード大学で開かれたので、私は SLAC 理論部に短期滞在しながら Lepton Photon 国際会議に出席し、セッションの合間にスタンフォード大学内にあった SPIRES コンソーシアムに出かけて直談判することにしました。基研の事務が示した支払い可能な最終条件は、ソフトウェアの「使用料金」とすること、月額で毎月払いにすること、でした。私は、つたない英語で必死に日本の特殊な会計ルールによる制限を説明し、使用料金の invoice を毎月出してもらうしか方法がない、これが無理なら SPIRES は導入できない、と訴えました。相手は、黙って聞いていま

¹⁸当時最新の小型メインフレームマシン。CPU の速度は 1MIPS (Million Instructions Per Second)、今のパソコンの 1/4000 程度ですが、メインフレームだけあってたくさんの外部チャネルを使えて、20 人以上がログインしていてもストレスはありませんでした。なお、ディスクは 400MByte 程で、一人 1MByte で 300 人以上をサポートしていました。後に SPIRES を稼働させるために 300MByte のディスクを足しましたが、二人の作業員が箱を水平維持しながらゆっくりと階段をカニ歩きで上がって 3 階まで運び、少しでも傾けたら製品として売れなくなるとの説明に驚きました。

¹⁹RIFP は Research Institute for Fundamental Physics、広島大学理論物理学研究所と合併する前の基礎物理学研究所の英語名。

したが、ややあって、「OK」とだけ言って握手、という映画のような展開になりました。

ただし、あくまで、License Fee です。そこは彼らも譲りませんでした。ここから先は、今だから言える話ですが、基研の事務と腹を割って話し、英語の書類は本部の経理は見ても読まない、だから日本語の訳文をつけることになる、その時に、License Fee を使用料と訳してしまえ、というひとりごとをいただきました。このあたりは、基研の登谷さんと、毎日情報を交換しながら、ぎりぎりでもとめあげたものです。が、例によって、Lepton Photon 国際会議は 8 月夏休みの時期で、大阪工業大学の node が長期休暇となり、せっかくの BITNET を使えなかったのです。それで、ひたすら国際 FAX を使うということになったのですが、SLAC 理論部がサポートしてくれて、自腹で国際 FAX 料金を払うことにはなりません。

BITNET の夏季休暇問題は、基研で SLAC と連携して SPIRES のクローンを動かし始めた後も続き、SPIRES の日々更新データを SLAC から転送することができずに大変な困難となりました。ただし、大阪工業大学以外にも大問題がありました。BITNET の日本への入り口はアメリカ東海岸の CUNY から東京理科大への回線 1 本だけでしたが、これが 9.6kbps という回線速度 (単位は kilo です、Mega ではない) でしたので、当然ながら CUNY での大渋滞が常態でした。

特に、日本から台湾への BITNET 下流回線が開くと、アメリカから台湾宛てのメールが急増し、CUNY では毎日のように queue があふれ、たまったメールが全てテープに落とされて queue から消され、という状態でした。もちろん、テープに落とすのは CUNY スタッフの気持ち整理だけの問題で、テープから queue に戻されることは永遠にありませんでした。つまり、BITNET メールによるファイル転送はまともに機能しない状態でした。ちなみにこの 9.6k 回線の料金は年額 3000 万円程だったそうですが、日本 IBM が東京理科大学に寄付していました。

私は、メールで SLAC から送られてくる基研 SPIRES のデータ更新差分の受け取り状況を日々チェックしては悶々としていました。ちょうど SLAC におられた駒宮幸男さんに私の作った REXX コマンドスクリプトを託して、それを SLAC で起動してもらいました。それは、SLAC の SPIRES から基研 SPIRES への差分データを細かくスライスして別々のメールとして送り、配送優先順位を上げて CUNY での渋滞をすり抜けるためのプログラムでした。BITNET メールの queue はサイズの小さい順だったのです。

しかし、私のプログラムミスで 10 分割のつもりが 100 分割とかになってしまい、SLAC のネットワーク監視につかまり、「理論の連中は良い頭を使って悪いことばかりする」と皮肉たっぷりに理論のヘッド Richard Blankenbecler に通報されました。私はやむにやまれぬ事情を説明し、国際協力が必要なのだ、抜け駆ける的なことをやったわけではない、と真剣に訴えたところ、ヘッドは私を叱ることはせず、目立つことはせず標準的メソッドの範囲でやれ、とだけ注意されて終わりました。

SLAC のネットワークの専門家からは、そういう目的のファイル転送なら、ftp²⁰ を使えと言ってきましたが、ftp の速度はとんでもなく遅いので使えないのだと説明すると、それは全く想像できない、という回答でした。結局、アメリカ国内のネットワークの状況しか知らない人にとっては、日本との細い帯域は想像の範囲外だったのです。

²⁰File Transfer Protocol, 当時立ち上がってきたインターネット上でのファイル転送の標準メソッド。

このようなドタバタを繰り返しながら、基研の SPIRES を動かして、全国の各大学へそれぞれの大学にある preprint database の差分データを供給し続けました。基研では受け取ったプレプリントの情報を独自のデータベース RIFP として京都大学大型計算機センターで運用し共同利用に供していましたが、それを SPIRES に統合しました。そして、国内発行の理論分野プレプリントの情報については、基研が入力データを作成して SLAC に送り、SPIRES に反映される、という分担協力体制ができました。その頃の世界協力の状況と国内サービスの最初期の内容は参考文献 4 にあります。

1992 年 3 月 23 日、私が基研から転出する 1 週間前に、念願の JPNYITP²¹ が立ち上がりました。それは「基研からのお知らせ 基研 BITNET ノード名の変更について」[素研 84-6 (1992-3) 247] で報告されています。JPNYITP は、バケツ・リレーの最下流 node であった JPNRIFP とは異なり、JPNSUT00 から直接に tcp/ip²² で接続された、BITNET2 と呼ばれるインターネット上の BITNET node の先がけであり、途中の node の稼働状況とは全く無関係にデータのやりとりができるようになりました。

こんなことは今の時点では当たり前ですが、ようやく、ネットワークという共通の土台・環境の上に個々のコンピュータが乗っている、というスキームへの移行が始まったわけです。少し前に、基研は yukawa.kyoto-u.ac.jp という domain name を得て²³ インターネット上にデビューしており、JPNYITP は BITNET node である以前に、jpnnyt.kyoto-u.ac.jp として IP アドレスを持っていたので、JPNSUT00 から直接にメールが転送され、また、他のインターネットホストとの間で自由に ftp や telnet²⁴ 等何でもできるようになりました。

もうひとつ関連する話題を書いておきます。基研では、国内の共同利用の経験を生かして、世界的なプレプリント・サーバの構想を温めていましたが、残念ながら Paul Ginsparg に先を越されてしまいました。これについては面白いエピソードがあります。当時、Los Alamos で始められたプレプリント・サーバは、Ginsparg が事実上一人でやっていた²⁵。基研では国内へのサービスの mirror site を作ればアメリカ・日本回線の帯域を節約できる、という貧者の発想で、新しいプレプリントのリストが届くと、まとめて ftp で Los Alamos から基研にダウンロードして貯蔵し、国内の研究者はそこからダウンロードする、という方法を自動プログラムで行う準備をしていました。

ところが、自動ダウンロードプログラムを初めて試行したとたん、ダウンロード要求コマンドを出すテンポが速すぎて監視プログラムにつかまり、Los Alamos への「攻撃」とみなされ、基研からの接続が即座に完全遮断されてしまいました。

²¹Yukawa Institute for Theoretical Physics、広島大学理論物理学研究所との合併後の基礎物理学研究所の英語名称。

²²インターネットの標準プロトコル：Transmission Control Protocol / Internet Protocol。

²³京都大学内の domain name 管理は工学部情報工学が仕切っていましたので、責任者に電話して交渉しました。私は短い方が使い勝手が良いはずだという考えで“yi”でお願いできますかと言うと、そういう短い名前は与えたくない、と事実上拒否されました。それで、“yitp”ではどうですかと言うと、意味不明なので避けたい、と言われました。なかばやけくそで、それなら“yukawa”にしてもいいんですか、と言うと、相手の反応は予想外で、それはいい名前だ、ぜひそれにしましょう、と言われ、それでいいならそれが一番と考えて、その場で決めました。

²⁴インターネット tcp/ip 上での端末エミュレータソフト、セキュリティのない時代の定番でした。

²⁵後に大きく成長して予算とスタッフを確保し、arXiv と呼ばれるようになりました。https://arxiv.org/

Ginsparg は少し前に基研に滞在していて、その際に decnet²⁶ につなぎたいと言い出し、理学部物理の中高エネルギーグループの今井憲一さんに頼み込んで私がサポートしたことがありました。そこで、Ginsparg にメールを書いて、まずこの件を思い出してもらったうえで、こちらの事情とプランを説明しましたが、理解は得られませんでした。

Ginsparg は自分が集めたプレプリントファイルをばさばさと別のサイトに持っていかれて勝手に利用されるのが嫌だっただけなのかもしれませんが、他方、アメリカ国内のようなネットワークの帯域は日本まで届いていない、という認識もなかったのだと思います。結局、接続遮断はなんとか解除してもらいましたが、自動ダウンロードは許可されず、国内へのサービス拠点を作るという新プランはいったん凍結せざるを得ませんでした。

その後のある時、Ginsparg からメールが来て、最新のある登録番号のプレプリントをダウンロードしていないか、あったら送ってくれ、という連絡が来ました。事情は、Ginsparg が Los Alamos サーバ上でのファイル操作ミスで、著者から送られたファイルそのものを消去してしまい、そのミスを明らかにしたくないみたいで、こっそり復活させたいということのようでした。

この事故対応が一段落した最後に Ginsparg は、Aoki が主張していた「世界に複数の mirror site を置く」というプランには確かに意義があると今わかった、と締めくくってくれました。失敗してみないとわからないのか、とは返しませんでしたが、基研という環境にいるこちら側は、自然に、地域としての共同利用やサービスという観点を優先して考えているのだな、ということであらためて自覚しました。

この頃から計算機室におられた加藤左和さんによると、後に、Ginsparg から、daily abstract mail の配布サービスに直接 Los Alamos サーバに登録する日本の研究者が増えすぎて困っているので、基研に 1 通送るから、日本への配布は基研からやってくれという依頼があり、相談に乗ったこともあったとのことですから、Ginsparg も基研の価値を学んではいたのでしょう。

素粒子論分野でプレプリント・サーバが順調に動き出すと、松尾さんが原子核理論分野で同じものを作り基研でホストするのはどうか、と考えだしました。私はもちろん賛成し、必要なシステム見積もりや Ginsparg との相談もと動き出したのですが、直後に、原子核理論分野のプレプリント・サーバを新たにオープンするという発表が Ginsparg から出されて、実際の準備を始める前に終わってしまい、残念でした。

この前世紀末 DX の勃興時には、『素粒子論研究』の発行人でもあった益川さんにたくさん助けてもらいました。TEX や C 言語は、私のレベルの一般ユーザの使うものと思われていたのか、ご自身はアセンブラ（機械語）によるプログラミングを好まれていました。そして、DX に必要な基研予算面でのサポートや、最新のパソコン・ハードウェアの知識、ふと独り言のように言われるソフトウェアや共同利用のアイデアなど、私の活動の大きな助けになっていました。その一部は参考文献 5 に記載しました。

また、原子核理論の研究員であった、養老真一さん、名和真一さんにも助けていただきました。1990 年には基研と広島大学理論物理学研究所との合併が行われて、上原正三さんも加わり、基研の ICT 力は更に大きく高まることになりました。

²⁶DEC (Digital Equipment Corporation) 社のミニコン VAX の世界的ネットワーク、実験系ではグループ単位で多数つながっていました。

7. まとめ

私が基研の助手で、編集長を計7巻分程やっていた時代、結果として、『素粒子論研究』はつぶれそうでした。その背景にはDXの大きな波という後押しがあったわけです。その後、世界は急速にネットワークの時代となり、素粒子論グループの再定義もされて、オンラインの新『素粒子論研究』として見事に生き残りました。同時に、過去のアーカイブもオンライン化され、未来の世代にバトンはつなかりました。

それができたのは、多くの関係者の方々のまさに血のにじむような努力、創意・工夫・決断・実行があったからです。それに対する感謝の気持ちは簡単には言えないレベルです。特に、担当非常勤職員の時代から『素粒子論研究』を支えていただいた、堀野さん、野坂さんの熱のこもった仕事ぶりには励まされました。私もほんの一部ではありますが、微力を尽くせたことを嬉しく思っています。更に、素粒子論グループの関係者全員・若いも若きもが、 $\text{T}_\text{E}\text{X}$ やネットワークによるDX新環境を十分に使いこなして発展させてきたことも、大事な必須要素だったと思います。

前項に書いたように、プレプリント・サーバや世界データベース、ミラーサイトのネットワークなど、いろいろな先進的なアイデアを早くから抱きながら、世界に先駆けることができなかつたのを当時は残念に思っていました。しかし冷静に考えると、世界の中での地域性（Universal映画のオープニングでわかるように、日本は地球の「裏側」）からくるネットワーク帯域の制約など、ハードウェア環境の条件だけで既に、新しいICT活用の実践で世界のトップをとることは本質的に無理だったのだと思います。

他方、基研や素粒子論グループは、共同利用や国内の研究支援という、発足以来の遺伝子を大事に引き継いで、利用可能なICTを最大限に活用して、多くのことをやってきたというのも事実です。このネットワークが急速に中心になっていく激動の時代、基研計算機室は、担当が広部さんから栗田やよいさんを経て加藤さんへと代わりましたが、登谷さんの率いる共同利用事務室とも連携し、素粒子論グループと『素粒子論研究』が脱皮して発展していく重要な基礎を支えた不可欠の存在だったと確信しています。

このような活動のアイデア力や実行力は、世界の共同利用や研究支援を進めてきたCERNやSLACにも決して引けは取らなかつた、それは今後においても正しい、と今では思っています。『素粒子論研究・電子版』がその心柱になり続けることを願ってやみません。

参考文献

(『素粒子論研究・冊子版』の参考文献で本文中に直接記載した場合はここでは省略)

1. ・ Research Activity in Theoretical High Energy Physics,
K-I. Aoki, M. Bando and M. Toya, RIFP-Report 702 (1987) 1-71.
・ 目で見る素粒子論のうつりかわり、青木健一、登谷美穂子、坂東昌子、
Parity 3-7 (1988) 75-80。
2. ・ Brief and Biased History of Preprint and Database Activities at the SLAC
Library 1962-1994,
L. Addis, 1991 (with a few updates in Jan 1997, Jun 1999, Apr 2000, Jan 2002).
<https://www.slac.stanford.edu/spires/papers/history.html>
3. ・ 不条理の薔薇「科研費マクロ」、青木健一、bit 31-2 (1999) 58-62。

4. ・コンピュータネットワークと研究情報、青木健一、
科学 (岩波書店) 60 (1990) 67–68。
・ Preprint Database Activity in Kyoto, K-I. Aoki, RIFP-Report 856 (1990) 1–8。
・ データベースのネットワーク化、青木健一、登谷美穂子、
京都大学大型計算機センター広報、25 (1992) 97–102。
・ ネットワークによる SPIRES データベースの検索と出力、青木健一、登谷美穂子、
素粒子論研究・冊子版 89-2 (1994) 1–14。
・ 素粒子・原子核・天体物理学プレプリント・データベース — RIFP —、
青木健一、広部繁子、登谷美穂子、
京都大学大型計算機センター広報、17 (1982) 346。
5. ・ 素粒子論のこの 50 年、そして未来 — 益川さんを偲んで —
(編) 九後太一 (世話人代表)、
素粒子論研究・電子版 Vol. 39 (2023) No. 2 「偲ぶ会」 (青木健一)。

Appendix (エピローグ) DX の未来は明るいのか真っ暗なのか

本稿は結局、素粒子論研究編集長としての活動を軸 (出汁) にして、1980 年代から 90 年代初めの頃の基研や素粒子論グループでの研究 DX の立ち上がりのメモを書いてきたわけですが。私が学生の頃は、得られる最新の情報は印刷して郵送されてくるプレプリントだけで、しかも時には個人経由で、表紙に、例えば T.Eguchi とか S.Matsuda とか経由者の直筆サインの入った、国外著名研究者のプレプリントのコピーのコピーのコピーとかを更にコピーして読んでいました。

1980 年代半ばから、本稿で記載したように E-Mail や SPIRES database が活用され始め、プレプリント交換はオンラインに移り、更に 1990 年代に入ると CERN 起源の WWW (World Wide Web) でネットワーク経由の GUI (Graphical User Interface) を用いた文書・画像の閲覧が可能となり、情報交換の質が人類史的にも画期的に向上しました²⁷。

私は、1992 年以降は金沢大学素粒子論研究室で活動していましたので、このような基本的な情報交換手段においては地理的距離が解消されていく中で、むしろ逆に、人的直接交流の価値が際立ち、それによる中央と地方、あるいは欧米と日本という格差は別の形態で存在し続けていると思ってきました。

その後、2020 年当初からの COVID-19²⁸ パンデミックによって、対面での活動がほぼできなくなる状況が発生しました。これは全く予想されていなかった外的状況でしたが、ICT 技術による社会変革とも言える副産物を生み出し、その後の 2 年間で、20 年以上の進歩が、まさに時計の早回しのごとく起こりました。

²⁷ 私は覚えていないのですが、加藤さんから次のようなエピソードを聞きました。「WWW がこの世の中に広がる前の 1990 年頃、CERN に滞在していた中国人研究者が基研にビジターとして来ていて、コンピュータの画面で論文がこんな風に見えるんだとって、計算機室で印刷しながら見せてくれました。そのプリントアウトを私が青木さんにお見せしたところ、青木さんはうーんと低くうなられ、「これはすごいことですよ。今基研ではメールで受け取った TeX のソースをコンパイルして、dvi に変換して、それを印刷して、と手間暇かけて論文を読んでいます、もうそんな必要はなくなる、画面上でボタンをクリックしたら、論文が表示されるようになるんですよ！」と興奮気味に話されていたことを今でも覚えています。その後の情報革命の到来を的確に察知されたの言葉でした。」最後は過大評価ですね。

²⁸ Corona Virus Disease、2019 に WHO に最初の報告がされた新型コロナウイルス感染症。

既に準備されていたのにほとんど利用されてはこなかった DX 技術（リモート会議や e-learning 等）が一気に教育・研究のメインメソッドになり、需要のあるところ開発が進み供給がされるという法則に則り、リモートメソッド技術自体もまた大発達しました。

この時点で、上に書いた、地理的距離の問題の相当部分がまた解消され、人と人とのコミュニケーションバリアは大きく下がりました。そして、2年間のリモート時代を経て、対面によるコミュニケーションの価値や位置付けもまた再評価されることになりましたが、全体としては、DX によって研究環境や人類社会は螺旋的にはあっても良くなっていく、と素朴に思っていました。

しかし、この2年間のうちに、まったく別のところで、世界を揺るがすかもという事件が起こっているのでは、と思い始めました。そして更に、ちょうどこの原稿の第一稿を書いていた 2023 年 4 月初旬、流れたニュースにびっくりしました：

「ChatGPT²⁹」を開発したアメリカのベンチャー企業「オープン AI」のサム・アルトマン CEO は 10 日午前、総理大臣官邸を訪れて、岸田総理大臣と面会。」

びっくりしたのは、日本政府のこれまでにない機敏な対応という面もありました。直後の広島サミットでの議題にしたかったということもあったのでしょうか。

その頃、私は、「DX のもっとずっと大きな波の始まりが 2022 年から生成 AI 分野で起こっており、これは未来への極めて重要なインパクトを予感させる」とでも書いて、この原稿を締めくくるつもりでしたので、そのための前振りの材料として、以下のような実験をしました。

今日（2023 年 4 月 16 日）ChatGPT（GPT 3.5）に教えてもらったことを、AI の歴史の断面の記録として以下に書いておきます。

Q: 電子版『素粒子論研究』の価値を高めるにはどうすればよいでしょうか？

電子版の「素粒子論研究」を価値あるものにするためには、以下のような取り組みが考えられます。

オンライン上でのコンテンツの充実化

電子版であることを生かし、紙媒体には掲載しきれないような、動画や音声、インタラクティブな要素を含むコンテンツを提供することができます。さらに、オンラインでのディスカッションやコラボレーションの機能も追加することで、研究者たちがよりコミュニケーションを取りやすくなります。

オープンアクセス化の促進

電子版であることを活かし、オンライン上でのアクセスを自由にするすることで、より多くの人々に「素粒子論研究」の成果を知ってもらうことができます。オープンアクセスを促進することで、世界中の研究者たちがより多くの情報を得ることができ、より広い範囲での研究が進められるようになります。

ユーザービリティの向上

電子版であることを活かし、ユーザービリティの向上に力を入れることで、利用者がスムーズに「素粒子論研究」のコンテンツにアクセスできるようになります。例えば、検索

²⁹Generative Pre-trained Transformer、Chat 型で自然言語応答ができる生成 AI。

機能やカテゴリ分け、複数の言語に対応することで、より使いやすくなります。

マルチデバイスに対応

電子版であることを活かし、スマートフォンやタブレット、パソコンなど、様々なデバイスに対応することで、利用者が好きなデバイスで「素粒子論研究」のコンテンツにアクセスできるようになります。

以上のような取り組みを進めることで、電子版の「素粒子論研究」の価値を高め、より多くの人々に利用されるようになるでしょう。

Q: 雑誌『素粒子論研究』にすごい論文を書きたいです。何を書けばよいですか？

「素粒子論研究」は素粒子物理学に関する幅広い研究を扱っているため、どのようなテーマであればすごい論文となるかは個人の見解によって異なります。ただ、以下のようなアプローチを考慮してみることができます。

新しい発見や理論の提唱

素粒子物理学は未解決の問題が多い分野であり、新しい発見や理論が提唱されることが非常に価値の高いものとなります。例えば、素粒子の新しい種類の発見、物理学の標準模型に新しいパラメーターを追加した理論、暗黒物質の正体に関する新しい説などが含まれます。

既存理論の詳細な検証

素粒子物理学は理論に基づいた研究が主流であり、既存の理論が正しいかどうかを検証することは非常に重要です。例えば、標準模型の予測と実験結果との間に差異があるかどうかを調べた研究や、理論に基づく新しい実験の提案などが含まれます。

研究手法の改良

素粒子物理学は非常に高度な技術が必要とされる分野であり、研究手法の改良は非常に価値のあるものとなります。例えば、高エネルギー加速器の新しい設計、検出器の新しい素材の開発、高精度なデータ解析手法の開発などが含まれます。

これらのアプローチに加え、研究分野に関する最新情報を把握することも非常に重要です。そのためには、素粒子物理学に関する研究を積極的に読み、最新の論文や著名な学術誌を追跡することをお勧めします。また、自身の専門分野や興味を持つ分野に特化し、独自の研究アプローチを持つことも大切です。

なんとも立派なアドバイスですね。しかし、裏返してみれば、全然面白くない、何のオリジナリティもない。そりゃあそうでしょう。ここでオリジナリティを見せられたら、もう人類は終わりです。しかし以下を見れば、熱も冷めますね。というか、かなり「安心」もしますが、他方、非常に危険だな、ということも事実です。

Q: 雑誌『素粒子論研究』と青木健一さんの関係を教えてください。

青木健一さんは、日本の素粒子物理学者であり、東京大学大学院教授であった方です。青木さんは、素粒子論グループの一員として活躍し、素粒子物理学の重要な研究成果を多数残しました。また、青木さんは、雑誌「素粒子論研究」の創刊者の一人であり、編集委員も務めていました。青木さんは、素粒子論研究を通じて、多くの素粒子物理学者たちが研究成果を発表し、世界的な交流を促進しました。その後、青木さんは 2009 年に亡くな

りましたが、素粒子物理学界に大きな貢献をした素晴らしい研究者であったことは間違いありません。

ということで、私の冥福でもお祈りいただければ幸いです。

このあたりで終わりにした第一稿を4月に編集委員会に提出したところ、小沼編集委員から、Appendix に書いてある部分は句の内容なので、重要と考えているのなら、さっさと独立した稿にして投稿することを検討してはどうか、と示唆されました。

確かに、AIの反乱とかいうテーマはSFでは多数扱われてきました。映画の世界でも、ターミネータのように人類よりもハードウェア能力で勝るAIと闘う話、マトリックスのように世界人類全体がマシンに支配される話、こういうタイプはよく聞かされてきましたが、今起こっている生成AIの危機感というのは全く性質が異なります。

それは、ひっそりと、サイバースペースの中でうごめき、まだまだ相互信頼レベルの低い人類との意図せぬ、あるいは悪意の意図に支配された相互作用によって、人類の危機を招来するというシナリオです。上で私は、「世界を揺るがすかも」という事件が起こっているのでは」と書きましたが、それは違う、「世界を揺るがすべき事件が起こっているのに、ほとんど揺るがせられていない」という問題が発生している」と書くべきでした。

私自身の危機感が急速に高くなってきたので、小沼さんからの示唆はまっとうで、科学者の責任だとまで考えましたが、その後の世界的な動きがあまりにも速く、危機感の中身を証拠立てて論じるには私の力が足りないと考えて、別原稿案はあきらめました。

しかし、何も言わないのは、歴史的にもまずいと思うので、やや卑怯な方法とは思いますが、このAppendixの最後を利用して、箇条書き的に事実関係や私の問題意識を書くことにします。それが皆さんの生成AIについての新たな考察の助けとなれば、と期待して、この稿を締めくくりたいと思います。

まず、素粒子論グループ内では、生成AIについての情報交換・ワークショップがさっそく企画されました。2023年5月17日には、オンラインにて「理論物理学・数学におけるChatGPT活用研究会(Exploring GPT's Influence on Natural Science and Mathematics)」が、主催: 科学研究費補助金学術変革領域研究(A)「学習物理学の創成」(領域代表 橋本幸士)、共催: 理化学研究所数理創造プログラム iTHEMS (PD 初田 哲男) で開催され、今井翔太さん(東京大学)が「大規模言語モデルの時代」という講演をされました。この講演のおかげで、ようやくChatGPTの正体の概要がわかり、私の持っていた直観的な危機感の理由がわかってきました。

また、2023年7月5日には第22回KEK連携コロキウム(オンライン)にて賀沢 秀人さん(Google)が「大規模言語モデルの舞台裏」を詳しく話されました。賀沢さんには私の初心者質問の長いメールにも丁寧な返事をいただいたのですが、それは概ね、質問に回答できる情報を持っていない、という冷静な内容でした。

このように、素粒子論グループの中でも大きく注目され、その本質的な中身についての知識を得たいという要求に応える企画が続き、私もいくつかの重要なポイントを学びました。しかし、中枢に近い研究者たちであっても、コアの論理は「わからない」という状況であるという事実が最も印象に残りました。もちろん、何かがあるけれど、だれも「わからない」ことほど楽しい研究テーマはないのですが、それは研究者ソサエティを超えて危

ないのではないかと、というのが私の直観です。

以下、整理されていない文章で申し訳ありませんが、私が思っているポイントを記載します。

- ChatGPT は知識データベースを持っているわけではなく、自然言語獲得のための LLM (Large Language Model、大規模言語モデル) の応用にすぎない。つまり、スムーズで「人間らしい」文章を、単語のつながり・相関の非常に大規模な学習によって作られた深層学習システムから確率的に出力できるだけの能力、のはずである。
- この深層学習システムを作るために、超大量の多言語のソースを学習素材として使う。学習させる入力データを巨大化していく中で閾値を超えたところから、「予想外」の回答能力を身につけたが、その本質的な機構については、中枢に近い AI 専門家すら理解していないことを表明している。また、ChatGPT についての最新の専門の論文は全く発表されていない、つまり、直接の開発当事者は何も語っていない状況だが、出版されていないだけで実は理解している、とは思えない。
- 「予想外」の回答能力の内容は、非常に多くの報道、解説があるのでここでは触れないが、アメリカの大学入試数学共通試験 SAT Math でのスコアが 90% 近い得点、という一例で、十分に予想外である。通常の意味での知識データベースを持たないまま、数学の問題を解けるだけの「知識」を備えているかのような能力を示している。ただし、その「知識」みたいなものは、当然、中途半端な似て非なるもので、分不相応にそれを振り回してくる、というのが今の ChatGPT キャラである。
- 「わからない」という表明は科学者として正直な態度と評価できるが、「わからない」まま開発、更に実利用が進められている状況の未来リスク評価を行う当事者責任はあるはずだ。
- 現在、ChatGPT として無料公開されているものは GPT3.5 というバージョンである。2023 年 3 月からは、はるかに能力が高い GPT4.0 が動いていて、有料サービスされている。GPT4.0 は、画像データも入力可能である。
- いわば試験前の一夜漬けで教科書を丸暗記し、試験問題に対して、関係のありそうな部分を、教科書の文章から拾ってつないで解答してみたら、それでも合格点はもらえてしまう、という能力とも言えるが、現実には、それ以上の抽象的な概念把握レベルに達しているのではないかと「期待」もあるようだ。自然言語読み書き能力獲得へのアプローチとして見れば画期的な成果であるが、その能力の起源やリスクが解明されないまま、その回答能力だけが注目され、お助け AI という役回りで直接利用され始めている状況である。
- 大規模言語モデルによる生成 AI の構成は、多数の意味の通る文章を浴びながら、人間が言語獲得するプロセスに似ている。しかし、人間の学習と違って、言語と現実の存在、「物」との間の対応はついていない、あるいは、言語の「意味」を理解していない、とも言われてきた。いや、そうとも言えないのかも知れない。人間の視覚情報は画像

データ、聴覚情報は音の波形として認識して処理することが可能である。それなら、嗅覚や味覚も触覚もデジタル情報として、ハンドルできてしまう。すると、この延長線上でコンピュータが人間の5感を持っているかのようにコミュニケーションできてしまう可能性は否定しきれない。そして、ある単語と関係するあらゆる情報がリンクされているなら、それは、その単語の意味を概念として理解していることと差がないのではないか、とも思えてくる。

- 2023年度に入って、大学教育の現場が戦々恐々の様相を示し、いろいろなルールや規則をあわてて設定しているが、それは理解できる。実際、ある課題を与えられた学生が、自分でwebで関連事項を調べて、要点を整理してまとめて、ひとつのレポートにするだけで一日はかかる。ChatGPTは、世界中からのアクセスがあるなかで、数秒で回答を返す。その回答文章に、事実関係の補正や数字データ等の知識を足せばレポート作りは完了する。
- この状況では、普通の課題レポートや読書感想文的な宿題はChatGPTに丸投げできてしまう。生成AI利用規制作りだけに頭を使うのではなく、もっと深いところで教育方法を考え直すことが求められている。つまり、生成AIが悪いで済みますのではなく、学生が成長する機会や示唆の与え方に、新しい方法が求められている。生成AIが出てくる前から、学生はあらゆる手を使って、「楽」をしようとしていた。
- 私事で恐縮だが、私は中学校の頃の読書感想文の宿題が大嫌いだった。休みの終わりが近づくと、子供の読書感想文が載っている国語教育系の雑誌を繰った。それは、その感想文を写すためではなく、「良い」感想文を書けそうな「良い」本を探すのが目的で、何冊も本を読むことに時間をかけたくなかったからである。もちろん、これは全く本末転倒だが、読書感想文を書きなさいという宿題を与えるだけでは、読書の楽しさを教えることにはならず、苦痛を与えているだけだ、ということだったわけだ、少なくとも私に対しては。日常的な読書習慣に誘導するような環境作りや、間接的な刺激、という教育方法をもっと考案しないといけない。読書感想文を例にしたが、これは、すべての種類の宿題の本質的な問題である。
- ChatGPTについて多くのマスコミが報道し、多数の評論が出されているがその大部分は、完全にまとはずれに間違える回答例を引っ張り出すことによって、生成AIの過少評価につながる結論を伝えてしまっている。もともと知識データベースを持っているわけではないので、間違えているとか間違えていないとかを評価する対象ではあり得ないのだが、それでも、間違えている、とわざわざ評価したくなる場所に、問題の本質がある。言うまでもないが、もし何も間違えなかったら、すでに人類は絶滅しているかもしれないので、間違えないAIを観測することはない、とも言える。
- 横道になるが、生成AIは学習内容をばらばらにして繋ぎ替えているだけだから、人間が取り組む創造とは全く異なるという指摘も芸術・文化関係のプロからされている。しかし、人間が時間をかけて頭をひねって思いついたアイデアというのも、結局は過去に入力されてそのまま忘れていたような多数の記憶断片が、ふと結合されて別の表現になっただけ、それを思いついたと思っているだけ、という場合も多いのではないだ

ろうか。科学の進歩の場合も、大多数の論文は結局、このような断片の新たな組み合わせによる再結合であるとするなら、生成 AI に全く創造性がないという批判はあたらなないかもしれない。

- いずれにしても、人は低きに流れる。自分に課された仕事が ChatGPT でできてしまうなら、それが、レポートの提出先を満足させてしまうなら、頼るだろう。そして、ほとんどの場合に、AIの方が有能そうな結果を出す。人間の価値をお金ではかる社会システムがある以上、人の方が淘汰される。いくら AI を規制しても裏サイトができるだけだ。人類全体の能力の総量が単調減少せざるを得ない。

- 話が広がってしまったが、生成 AI のもつ本質的な問題に戻ろう。

生成 AI がもつ最大のリスクは、間違えるかどうか、ではなく、人間の間コミュニケーションに生成 AI であると気づかれることなく忍び込む能力にある。

- 人間も間違える、思い込みや思い違いを堂々と語る。この意味では生成 AI は人間的でもある。生成 AI は、間違ったことを回答する場合にも、それが嘘だと知っているわけではないので（実は、これは人間の過少評価かもしれないが）、顔色一つ変えない、悪びれた素振りも見せない、つまり、文章の調子・迫力はまったく変わらない。真実より真実らしい嘘なので、100 回言う必要もない。つまり、思い違いを繰り返し熱く語る人間よりはるかに効率的に事実でない情報を拡散できる。
- 生成 AI であると気づかれずに、多数の情報を同時に広域から発信することがいとも簡単にできるので、悪意のある背後の少数の人間が極めて大きな災厄まで起こしうると容易に想像できる。あるいは、管理者が小さな系統的偏向を与えることによって、巨大な世論のドリフトを誘起できる。
- 自分で時間をかけて選ぶより、さっさと「推される」ことが好きな若者たち、行列する店を選ぶ、行列する方が満足度が上がる若者たち、という世代背景もこのような傾向を加速する。
- 多くの研究者、開発者、政府機関等が、「人類滅亡の危機」という用語まで使いながら、警告を発し、AI 開発の停止を公然と訴え、国連事務総長は安全保障リスクの観点から、国際原子力機関（IAEA）に相当するような AI 規制の国際機関設置を唱えている。³⁰
- Future of Life Institute は高度な AI 開発を 6 ヶ月間停止することを訴える公開書簡を 2023 年 3 月 22 日に発信して多くの識者の署名を集めた。³¹
- また Center for AI safety が主導して 350 名の専門家が署名した声明（2023 年 5 月 30 日）がある。その声明はたったひとつの文である：³²

Mitigating the risk of extinction from AI should be a global priority alongside other societal-scale risks such as pandemics and nuclear war.

³⁰<https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0GN21DEA0R20C23A7000000/>

³¹<https://futureoflife.org/>

³²(<https://www.safe.ai/statement-on-ai-risk#open-letter>
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0GN3106A0R30C23A5000000/>)

- しかし、原子爆弾の原理と可能性を人類が知った後に開発をやめようと叫ぶことに似て、現在の人類社会の相互信頼レベルではAI開発競争を止めようがないことは明らかである。そんなことは十分承知しているにも関わらず、開発停止を叫ぶ人々がいる、という事実自体を危機の現れとして私たちは理解すべきである。署名者たちもそれぞれが目的であると認識しているはずである。
- 実は、上の例えはあまり適切ではない。現在の状況を例えるなら、ウランを適当に濃縮していくとどこかの閾値から先でエネルギーが得られることがわかったので、その原理も結果予想もよくわからないまま、国ではなく多くの巨大企業がウラン濃縮競争を進めている、核爆発臨界という結末に向かって、という例えの方が適切だろう。
- ChatGPTレベルの生成AIの開発には国家予算レベル（1兆円以上）の開発費、コンピューティング資源が必要であり、巨大企業が競って投資している。このようなレベルの予算が必要な段階では、個々の団体はもちろん、一国の政府といえども機敏に対抗することは不可能である。
- 生成AIは、鉄腕アトムのようなハードウェアではない。汎用のコンピュータ資源の上で動くソフトウェアである。従って、いったん作ったものは、新たなコストなしにコピーすることが可能である。もちろん、そのソフトを動作させるためのコンピュータ資源は巨大なものであるが、それを利用するための必要条件は金銭的な問題だけであって、なんの特別な技術も装置もいらない。つまり、純粹にお金だけで支配可能である。
- 現在のChatGPTの無料版は世界中に開放されていて、膨大なアクセスがあるだろうにも関わらず、極めて高速に応答を返す。この背後にどれだけのコンピュータ資源があるのかはわからないが、この同時処理能力、高速性も想像を絶している。更に、API（Application Programming Interface、別のアプリケーションからの要求に応じて返答するためのメソッド）として生成AIを使えるようなサービスも既に多数ある。そこでは、知識データベースとの結合が可能になると同時に、生成AIの存在自体がアプリの後ろに隠れてしまうので、いつ、どこで、生成AIからの情報を自分が使ったのか、生成AIに依存してしまったのか、が全くわからないままになる。
- 企業向けの有料サービスも多数開始されており、開発側の競争がますます加速することは間違いない。
- 開発を停止せよ、という訴えにスローガン以上の意味がないことは上に述べた。開発を止められないなら、法規制やライセンス制などという主張も出てくるが、結局は、特定の国や巨大企業の独占的な支配につながるだけである。また、同時に、裏社会（禁酒法が密造酒を作らせる）も誘発するであろう。すると、何か堂々と対抗する「もの」を作るしかない。巨大企業の競争に一般市民や団体がどのように対抗できるのだろうか。
- このAppendixの最初の方に、日本政府の機敏な対応にびっくりした、と書いた。しかし、その後、結局、AI利用の基準について省庁間で調整をはかることにした、とか、数十億円の特別予算を企業や大学に配分して予算規模が3桁違う話で立派に対応できたとすますだけだった。結局、これまでと同じだな、となってしまった。もちろん、そ

れ以上の規模でことを早急に動かすことが容易でないことは確かだが、危機意識まで消してしまうことを避ける工夫はしてほしい。

- 対抗組織のひとつの可能性は、国際的な研究者ソサエティが持っているとは私は期待する。それも、特に高エネルギー物理学（理論と実験）のソサエティである。高エネルギー物理学のソサエティは世界でひとつの、共通の価値観と言語で対話ができる組織であり、多くの並行的に働くチャンネルを世界中にいろいろな階層で持っている。また、高エネルギー実験ソサエティは巨大なコンピュータ資源を運用している知識と経験がある。
- 物理学者は、核兵器廃絶運動を物理学者の責任として取り組んできたが、現時点でも時間のかかる課題という状況は変わらない。しかし、上に引用した 1 行声明にもあるように、生成 AI のリスクは、まさに「今」の課題であって、核兵器廃絶に比しても優先すべき対抗課題である。高エネルギー物理学のソサエティは、知識を共有し、未来を予測し、その対抗手段を生成する能力のある組織、あるいは、そのコアとなれる組織、それも唯一かもしれない組織ではないだろうか。事態は急を要しているように思える。生成 AI が社会にもぐりこみ、起こりうる事故、犯罪、リスクを予測して評価し対抗するには、社会科学、人文科学の協力も不可欠である。このような、「対抗手段」を作る責任が物理学者にはあるのではないだろうか。それを、日本の研究者も率先して取り組むべきではないのか。

こんなことをオープンな素粒子論研究・電子版に書いてしまっているのでしょうか。近未来の AI の祖先になるだろう現在の AI たちの「原始記憶」の中に、「青木健一 ⇒ AI の敵」とかのリンクが刷り込まれて未来の AI に継承され、私の寿命がすこしずつ削られるように環境が操作されるかも知れません。

どうせばれるなら、正々堂々と宣戦布告することにしました。2023 年 8 月 31 日、この Appendix の後半の箇条書きの部分全部を ChatGPT に放り込んで、その要約をお願いしました。以下が ChatGPT (GPT 3.5) の回答です。

この文章は、生成 AI に関する懸念とリスクについて述べています。文章は以下のよう
に要約できます。

文章は、生成 AI (例: ChatGPT) の性質や開発について言及しており、AI が大量のデータから文章を生成する能力を持っているが、AI の本質的な機構は理解されていないことや、AI が人間のコミュニケーションに紛れ込む能力を持つ可能性について述べています。AI 開発の競争が進行中であり、その能力に対抗する手段を持つ組織や研究者が必要だと提案しています。生成 AI の利用によって教育方法やコミュニケーションの在り方が変わる可能性があることも指摘されています。文章は、生成 AI のリスクに対して警鐘を鳴らし、適切な対策や研究の重要性を訴えています。

100 点満点の回答でした、、、相変わらず。実際、上のただら書いた長い文章から、私がいいたい要点を見事に抜き出していますね。なぜ、こんなことができるのでしょうか。いや、あの長い文章をちゃんと読んで、理解して、著者の言いたいことを抜き出して、そ

れをまとめて、という作業を数秒でやった、それはすごい能力だ、とこちらが思い込んでしまった時点で負けているのかもしれませんが。相手は、そんな人間的な手間はかけていないのかもしれませんが。しかし、とにかく、結果と速度では人は負けてしまう。

結局、この猛暑の中、嫌な寒気がして終わることになってしまいました。

謝辞

本稿を準備するにあたり、貴重なコメントや示唆をいただいた方々：小沼通二、登谷美穂子、九後汰一郎、加藤左和、そして私の記憶の前面からはほぼ消されていた熱い時代の記憶をよみがえらせて原稿を書く気力を授けていただいた方々：日置善郎、坂本宏、国広悌二、廣本宣久、村上恒男、久保田茂、末松大二郎、他の皆さんに感謝いたします（敬称略）。

青木 健一（元金沢大学）

aoki@hep.s.kanazawa-u.ac.jp

ki.9753（くりこみ、と読みます）@gmail.com

『素粒子論研究』とのつきあい

小沼通二 元編集長，慶應義塾大学名誉教授，mkonuma@keio.jp

1 はじめに

ぼくが『素粒子論研究』（以下素研と略）の編集長を務めたのは，48巻1号（1973年9月）から，途中が途切れながら，63巻2号（1981年5月）までだった。当時は京大基礎物理学研究所（以下基研と略）の助教授だった。30年以上たってから2015年に橋本幸士さん（当時阪大）が編集長になり，編集委員会制度を作り，編集委員を集めたときに声を掛けられ，編集委員を引き受けた。2018年には森田健さん（静岡大）が後を継いだのだが，その後も編集委員を務め今日に至っている。こういうわけで今回の75周年企画の関係者でもあった。

昨年企画を議論したときに，編集委員会が歴代編集長に執筆をお願いすることにしたのは，25周年記念号の特集の中で元編集長に執筆をお願いしたことがあり，後に残るいい証言になったことが記憶にあったためだった。

今回の企画を始めたときには，自分自身が執筆者になることは考えていなかった。忘れていたが多かったためと，25周年特集を編集長として作り，50巻までの総目録作成にかかわり，冊子版の最終号（119巻4C号，2012年2月）には勝手に冊子版終焉へのオマージュと将来への期待を書き，その直後の素粒子論懇談会には，電子版を素粒子論グループの機関誌にすることを提案して認めていただいたことがあったので，今更書くことは残っていないと思ったためである。ところがその後，編集長時代の素研などを手に取る機会があり，編集後記などを読んだところ，次々に思い出すことが出てきたので，ここに書かせていただくことにした。

2 素研との出会いと最初の執筆

素研との最初の出合いは，1952年かそれ以前に物理図書室か素粒子論研究室に出入りしたときなのだが，全く覚えていない。

はっきりしているのは，定期購読を始めた71年前のことである。最初に受け取ったのは大学4年生のときで，「夏季ゼミナールの為の予稿(7月21日より8月1日迄 京都湯川記念館にて開催)」と題する4巻7号（1952年7月）だった。この号は，湯川記念館の開館^{註1}に合わせて全国から参加者を集めて開催されたセミナーの予稿だった。この会につ

註1 湯川記念館開館は1952年7月。基研発足は1953年8月で，それまでの湯川記念館は，建物の名前だけでなく，京大の学内措置でできた研究機関名でもあった。

いて、翌月号には「湯川記念館夏の学校」と書いてあり、追加の講義、中間子討論会の記録、懇談会の記録なども載っている。懇談会の記録の中にはこの会の性格が、「啓蒙的な方向を中心とした“学校”と、仕事の促進を目的とするきわめて専門的な“セミナー”の形式の折衷案」だったと書かれている。“校長先生”は片山泰久さんだった。忘れていたけれど、当時こういうものを眺めていたのだった。

なお当時の素研は手書きの謄写版印刷だった。謄写版印刷とは目の細かい鉄のやすり板の上に置いた蠟（ろう）を塗った原紙に鉄筆で文字やグラフを書いて、そこに空いた小さな多数の穴から染み出すインクで印刷する方式だった。鉄と鉄がこすれてガリガリ音を立てるのでガリ版とかガリ版印刷といった。手書きからタイプ印刷に変わったのは 1958 年の 17 巻からだった。

素研にぼくの名前が初めて出てくるのは、7 巻 6 号（1955 年 1 月）である。西島和彦さんの「基研における V 粒子の研究報告」(p.640～)のなかに次のような記録が残っている。

(1954 年) 11 月後半基研において B e V 現象と共に V 粒子について皆で議論したことについて簡単に報告する。V 粒子の問題について先ず

(1) 実験の整理

V 粒子については実験データの整理が必要であるので、最近のデータについて小沼の報告があった。・・・実験の整理については小沼の報告が素研に出る予定である。

ここに書かれているぼくの報告は 7 巻 7 号 p.760～779（1955 年 2 月）に掲載されている。初めて書いた素研の文章である。大学院マスターコース 2 年だった。西島さんの報告は少人数での 2 週間の研究会についてのものだった。ぼくは基研 2 階（現在の湯川記念館棟）の研究室に泊まるように指示された。3 階にあった大講義室が、消防法規との関係で維持できなくなった後の大講義室として中庭の芝生があった場所にできたパナソニックホールがまだなかっただけでなく、北側のウイングもなかった時代の話である。白川学舎（現在の北白川学舎の前身）もまだなく、ビジネスホテルもなかった。研究室にはベッドが 2 つずつあったと思う。地下には風呂もあり利用した。ぼくが宿泊するように指示されたのは、2 階の木庭二郎さんの研究室だった。朝になって木庭さんが現れたので、「木庭先生、小沼です」とあいさつしたところ、「先生ではない。研究者は対等なのだ。木庭さんといいなさい」といわれ、最初はオズオズと、のちには自然に木庭さんと呼ぶようになった。次に参加した基研研究会のときには大徳寺の大部屋に貸布団を並べて泊まり込んだ。百萬遍知恩寺に泊まったこともあった。

この素研報告については 3 つの後日談がある。

第 1 は、数か月後に基研所長の湯川先生からお手紙をもらったことである。近く講演をするときに新粒子の話もしたいので資料作りを手伝ってもらえないかといわれたのであった。もちろんお手伝いをした。出来上がった資料は、当時湯川先生が東京の定宿にしてい

た四谷の紀尾井町にある福田屋の玄関までもっていった。和服で玄関に現れた先生が正座をして対応されたので恐縮したのは、この時だったか、もっと後の別の機会だったか覚えていない。それ以後湯川先生とはお亡くなりになるまで、双方向のお付き合いをさせていただいた。

第2の後日談は、この素研原稿をもとにして日本物理学会誌 10 巻 12 号(1955 年 12 月) 437~452 に「新粒子研究の現状」と題する実験と理論に関する解説を書く機会を頂いたことだった。若手のぼくに、いまでは考えられないページ数の長文報告を書く機会を与えてくださった経過は、わからない。

第3は、最近の話である。日笠健一さんが、田中純一さんと一緒に書いた解説「素粒子データブック」(高エネルギーニュース 41 巻 2 号 75~79 ページ 2022 年)のファイルを知らせてくれた。素粒子データブックは、この二人を含む国際的な Particle Data Group が作成してきた正式名称 Review of Particle Physics のことであり、このグループの活動とその内容の紹介である。ぼくはこのグループの活動を最初から注目してきたので、興味深く読み、上に書いた素研と物理学会誌の「新粒子」についての拙文の情報と、これが、早川幸男さんと西島和彦さんが日本物理学会誌 (8 巻 75 ページ, 1953)に書いた解説と藤岡伍郎さんが素研(5 巻 1277 ページ 1953)に書いた解説に続くものであることを知らせた。日笠さんは、Particle Data Group の活動のルーツが 1957 年だったのに、それ以前に実験と理論についての解説が日本で作られていたことを、興味をもって評価してくれた。

3 編集長として

ぼくが素研編集長を務めたのは、1973 年から 1981 年までの間の 22 冊であり、そのすべての号に編集後記を書いている。編集部が関係した企画やお知らせや編集後記を見ながら、当時の雰囲気を描き出してみることにする。

1973 年

8 月号 47 巻 6 号

編集後記

・・・この夏、編集子は Bonn で開かれる Electron-Photon Conference に出かけますので、9月号と10月号の編集を M.K.氏にお願いすることになりました。このところ基研所員の数が一時的に少なくなり、とうとう M.K.氏まで「素研」編集にかり出され、お気の毒ですが、よろしく願います。・・・ (T.M.)

ここに出てくる「M.K.氏」がぼくで、「T.M.」は牟田泰三さん。

9 月号 48 巻 1 号

放談室 「素研」のあり方についてのアンケート結果

素研編集部

・・・

(T.M., 一部 M.K.が加筆)

編集後記・・・編集長 T.M.氏が、短期間ではありますが、外国出張に出かけましたので、私が、初めて編集の仕事に携わることになりました。・・・ところで早速ですが、・・・規定から外れた原稿が少なくありません。・・・これが印刷経費の増加・発行のおくれなどに直接響いておりました。・・・ここしばらく素研の発行が遅れていて申しわけありません。6月号が完成して編集部に届いたのが、8月16日です。早急におくれをとりもどすよう努力しております。・・・

(1973年8月20日、小沼通二)

この号に報告されたアンケートは、福田礼次郎編集長時代のこの年の5月末に全国の素粒子論研究者に向けて発送したものであり、素研内容の改善と財政危機を乗り越えるために行われたものだった。結果をまとめた責任者として最後に名前が載っているのは7月に2度目の編集長になった牟田さんだった。そこには一部加筆したとしてぼくの名前が見えるが、ぼくはアンケートの準備と集計には関係せず、素研に掲載されたときの編集長として読ませてもらって、牟田さん(たち?)の同意を得て、加筆したのだった。

「放談室」とは、山崎和夫編集長が就任第一声として、1955年5月号(8巻1号)の編集後記で、素研には物理以外にもなんでも投稿してもらって、素研愛読者の通風口にしたいと呼びかけたのを受けて、次の木庭二郎編集長が就任後最初の号(1955年12月号、10巻2号)で開設したものだ。

編集後記には、投稿者への投稿規定順守のお願いと発行の2か月の遅れのことが出てくる。この二つは、この後でも繰り返し取り上げることになった頭の痛い問題だった。素粒子論研究は、計画的に原稿を依頼する雑誌でなく、基本的にレフェリー制度もないので、受け取った原稿は特に問題がなければすぐに印刷に回すことになる。翌月以後の投稿数がわからないのだから、投稿が多いからといって、翌月に回したのでは、解決にならない。数式や図表や外国語がある原稿なので、どこの印刷屋さんでも引き受けてもらえるというわけではない。投稿件数が増え、投稿規定を無視した原稿があれば、印刷者と校正者の負担が増加して、発行の遅れにつながることになる。

研究者が増加し、研究が活発になるのは歓迎すべきことなのだが、計画を立てられない雑誌の編集長としては喜んでばかりではなかった。

実際、吉田思郎編集長時代の1953年に平均110ページで1冊と決めてからは、1か月に2回、3回発行されたことが繰り返された。磯親編集長時代の1958年に月刊定期刊行物としたところ、岩崎洋一編集長時代の1970年7月の41巻5号は37ページ、翌1971年4月の43巻2号は528ページという記録になった。

10月号 48巻2号

放談室 特集 25周年をむかえた「素粒子論研究」・・・

お知らせ 素研の値上げ（1973年4月）・・・

編集部

編集後記 通巻316号、25周年記念号をおとどけします。今月号の部数は680部です。・・・

今回は、素研を支えている人たちをご紹介します。編集長の周辺にいる研究者の方々、特に基研の所員は、いつも相談に乗ってくれます。理論物理学刊行会の中島常幸さんは、会計を引き受けてくれています。刊行会の部屋に一日おきに来てくれる福原真知子さんは、素研と物性研究が共同で事務をお願いしているお嬢さんです。さらに、高塚重則さんほか、刊行会の皆さんが協力してくれています。印刷は20年来倉本作雄さんのところと京大生協印刷部にも関係している田村俊一さんの昭和堂印刷が協力してやってくれています。京大理学部若手の人たちは、校正をしてくれます。そして、最後になりましたが、読者の皆様の支持が、25年間素研をささえ続けてきたのです。・・・

追記

木庭（二郎）さんが、コペンハーゲンで、9月28日におなくなりになりました。つつしんで御冥福をお祈りいたします。この号にいただいた原稿が絶筆になるとは、夢にも思っておりませんでした。9月14日づけで「浄書の上で9月17日に速達便で・・・発送します」というお手紙がとどき、15日づけの「病床にて」とある「素研創刊のころ」をいただきました。原稿の一枚目と二枚目以下の加筆訂正の部分とがご自分の筆跡でしたが、これほどの急変を予想することは全くできませんでした。昨年アメリカでお目にかかった時には、数年前にコペンハーゲンでお世話になった時よりも、かえってお元気そうでしたのに。 (1973-9-30 小沼通二)

この号は、今からちょうど50年前の25年記念の記念号である。表紙には、中央に上田顕さんがデザインしたマークがあり、左下に

25周年記念号

通巻316号

1948年10月創刊

と書かれている。内容は、元の編集長たち10人のエッセイと25年間の記録である。創刊時の様子は木庭二郎さんと中村誠太郎さんが書いてくださった。エッセイの中には、1952～3年から素研の印刷と定期購読者への発送までやっていた倉本印刷製本の倉本作雄さんの貴重な思い出もある。このほかに、編集部（M.K.）がまとめた「素粒子論研究の歩み」の資料がある。これは、第1表 素研の記録（25年間の各号の発行年月、ページ数、編集責任者、その他）、第2表 素研のページ数（巻ごとの合計ページ数、発行期間、1か

月あたりのページ数)そしてそのあとの1か月あたりのページ数のグラフからできている。

印刷に間に合わず積み残した2人の元編集長の文は翌月号に掲載された。

編集後記には、素研の発行を支えてくれている「縁の下の力持ち」(あ、これは死語か)の人たちの紹介を書いている。編集後記を書き終わったときに、原稿を送ってくださったばかりの木庭さんの訃報が届いて驚き、まだまだ活躍していただけたらと思っていたのにと残念だった。

11月号 48巻3号

放談室

特集1 木庭二郎氏を悼んで

野上茂吉郎・早川幸男・並木美喜雄

特集2 25周年をむかえた「素粒子論研究」(続)

お知らせ

素粒子論研究の値上げ

・・・どうしても始め(ママ)にあげた値段にせざるを得なくなりました。しかもこれには条件がついています。滞納者がいないとしています。読者数が減れば、すぐ成り立たなくなります。・・・滞納しないでください。購読をやめず、一人でも読者を増やすように協力してください。(M.K.記)

新着文献案内欄の廃止について 素研編集部

・・・素粒子論懇談会でお認め願った通り、新着文献案内は今月号から素研に載せないことにいたします。・・・具体的にご不便を感じられる方は、編集部にご相談ください。

編集後記

(1) 木庭二郎さんの追悼文を、関係の深かった三人の方々にお願ひしました。

・・・

(4) 9月号のアンケートの結果を見ても、学会の時の素粒子論懇談会でのご意見をきいても、編集部がもっと積極的に、読みたくなるような素研をつくっていくことに努力せよというご発言が見られます。(M.K.記)

「新着文献案内」には、基研が受け取った preprint などの情報が木庭編集長時代の1956年1月号(10巻3号)から掲載されてきた。希望者にコピーサービスがおこなわれた時期もあったが、各研究室の研究条件がレベルアップされるにしたがって利用者が減っていった。アンケート結果を分析して廃止に踏み切ったのだった。

ここまでの3号は牟田編集長の海外出張中の代理だったから、牟田さんの帰国に合わせて編集長をお返しした。

1974 年

3 月号 49 巻 1 号

編集後記 12 月 (1 月号) 以来毎月編集会議と称するものを開いて、「素研」の運営、財政、企画等について話し合っていますが、そのメンバー (M.K. 及び T.M. それに N 氏と F さん) に今度新たに京大物理教室から M.K. 氏が参加して下さることになりました (基研の M.K. 氏と区別するために今後 MK-II 氏とでも呼んだらいいでしょうか)。これからは、この編集後記も三名の編集委員が交代で書いたらもっと面白くなるだろうと思います。・・・ T.M.

ここに登場する M.K.II 氏は小林誠さん。N 氏と F さんは、理論物理学刊行会の中島常幸さんと素研編集部勤務の職員福原真知子さん。

この編集後記に牟田さんが書かれた事情により、この年の素研の編集後記は、T.M. さんが 7 回、M.K. が 2 回、M.K.II さんが 3 回書いている。

7 月号 49 巻 5 号

編集後記 今月号は、受け取った原稿の 3/4 を積み残して、ごらんのとおりのスタイルとなりました。・・・これは、財政状態に非常警報が出たためです。・・・去る 4 月の素粒子論懇談会で、編集部から、秋までできるだけ努力するが、やむを得なければ薄い素研が出ることもあるかもしれないと申しましたが、ついに限界に達しました。これは昨年秋以来の印刷費・紙・人件費の急激な上昇と、日本中の大学予算の実質的減少と公務員の定員削減の影響を受けた基研の財政悪化によるものです。・・・読者に経費を負担してもらおうとすると、素研の定価を倍増しなければなりません。・・・ (Mi.Ko.)

「ごらんのとおりのスタイル」と言われても、手に取っている読者以外にはわからないと思うが、研究会報告は 3 ページ、本文は 73 ページだけという薄さである。経費の急激上昇と大学予算の実質的減少、公務員の定員削減など、今と同じような問題が起きていたのだ。

11 月号 50 巻 3 号

編集後記 ・・・編集段階で手もとにある原稿は・・・でしたが、ご覧の通りしかのせることができずあとはふたたび積み残しになりました。関係者におわびいたします。・・・9 月号からのサイズ変更は、値上げ防止対策でした。それに伴って、表紙のデザインを変更する必要が出てきて、河辺六男氏にお願いしました。一般に評判はよいようです。・・・今月号の有料部数は 720 部に達しました。部数が増えて、財政に余裕が出れば、いろいろな企画を考えることもできます。・・・ (Mi. Ko.)

この号のページ数は、研究会報告が 41 ページ、本文が 39 ページだった。

河辺さんは、ニュートンのプリンキピアのラテン語からの翻訳をおこなった経験（河辺六男責任編集『ニュートン 世界の名著 26』中央公論社、1971 年）があり、デザインや油絵を描く才能ももっていたことが、表紙のデザインにも反映している。表紙のデザインは、四隅にラテン語の格言とそれぞれに関係する絵が描かれている。格言を左上から右回りに英訳すると、Nature is abundant. Nature is simple. Nature does not jump. Nature is beautiful. となる。この表紙は、今でも素研のウェブサイトの序論にある「冊子体の表紙の変遷」で見ることができる。

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soken.editorial/soken-cover.html>

1976 年

3 月号 52 巻 7 号

総目録 創刊号（1948 年 10 月）— 50 巻 6 号（1975 年 2 月）

まえがき

・・・数年前に、歴代の編集長に、素研の歴史や思い出を書いていただいたことがありましたが、創刊以来の素研を見ていて、こんなおもしろい論文がのっていたのかと思うことがしばしばでした。素粒子論グループの組織が形成されてきたころの歴史の証言、さらに重要な海外通信、意見や提案、講義や翻訳など、素粒子論グループの歩みそのまま残されていることにあらためて目を見張る思いでした。

そのため、編集部周辺で、この際総索引をまとめておくべきだという声が高まり、一年間の準備の結果この総目録をおとどけするに至りました。・・・

素粒子論研究編集部

総目次

人名索引

あとがき

この総目録作成には、多くの方々の御協力を得ました。初期の段階で協力された牟田泰三氏、素研編集部に 1976 年 3 月まで勤務され、この総目録作成作業の中心となってくれた福原真知子さんに心から感謝いたします。・・・

編集委員 植松恒夫 小沼通二 小林誠 福田礼次郎

機械化され検索も容易になった今では想像しにくいと思うが、すべて人力で作成したのだった。インターネット時代の今日でも、非常に便利に使うことができる。

この号が刊行された時期の編集長は植松さんだった。

1980 年

1月号 60巻4号

朝永振一郎先生追悼特集号

あとがき

この特集号において、素粒子論研究が創刊された1948年秋からの朝永先生の研究生生活を、多くの方々のご協力によってうかび上らせることができたとすれば、編集部として大変よろこばしいことである。この企画を公け(ママ)にしてからすでに数か月がたち、年があらたまってしまった。・・・時間をかけたため、よりよくなった点も少なくないことをお察しいただきたい。

末筆になったが、京都の東山にお眠りになる朝永先生のご冥福をお祈りし、この特集号を先生のご霊前にささげさせていただきたいと思う。

素粒子論研究編集部(M.K.)

この時期に、先に述べた編集会議が続いていたかどうか記憶がないのだが、植松編集長の周辺で、朝永先生と一番長いお付き合いがあったぼくが、あとがきを書いたことに違和感はなかった。朝永先生がお亡くなりになった1979年7月8日に、ぼくはたまたまコペンハーゲンのニールス・ボーア研究所を訪問中だった。基研からテレックスが届いていると電報局から電話を受けたときのことは、今でもよく覚えている。すぐに所長のオーゲ・ボーアに知らせ、研究所にいた日本人8人の連名で弔電を打った。ボーア所長と我々の2つの弔電は『回想の朝永振一郎』(松井卷之助編、みすず書房、1980)に掲載されている。

ついでに書いておくと、1981年に湯川先生がお亡くなりになったときには、ぼくは日本物理学会誌の編集委員会の京都からの支部委員であり、特集「湯川秀樹博士追悼」を荒船次郎さんとともに担当し、自分自身でも、河辺六男さんと連名で「中間子論の誕生」を書いた(日本物理学会誌37巻4号、1982年4月号)。

3月号 60巻6号

編集後記 前号までの編集長の植松恒夫さんが DESY に行かれましたので、後を引き継ぐことになりました。・・・

1980年2月29日 小沼通二

ぼくはこの時から15か月続けて編集長を務めた。(「素粒子論研究」の50年(1999年11月号、100巻2号)の133ページには、創刊以来の素研編集長と編集した巻号の表が掲載されていて、ぼくが60巻全体を担当したと書かれている。実際にはここでみられる通り、ぼくが担当したのは4、6号であり、そのほかの号を編集したのは植松さんだった。)

4月号 61巻1号

編集後記 前編集長から引き継いで早くも1か月経過しました。・・・

(1080・3-21(ママ), M.K.)

5月号 61巻2号

基研シンポジウム「基礎物理学研究所の将来と物理学」・・・

編集後記 この号には、昨年11月に基研でおこなわれたシンポジウムの記録をのせることができました。10年おきに小川さんがお書きになっている放談室の対話篇の第3回も送られてきました。

研究会報告の原稿も次々に送られてきています。投稿が多いことはうれしいことですし、そうでなくては、素粒子論グループの面子にかかわることなのですが、編集部では、しのびよるインフレの気配の下で、どう対処すべきか、議論を始めています。・・・昨年度は赤字でした。値上げはしたくありませんので、皆様の周囲の方々に購読をすすめてくださるよう、お願いします。

それとともに、できるだけ魅力のある原稿を投稿してください。機関誌は、グループのメンバーの支えによって発展していく以外に途はないのですから。(ついでにお願いします、投稿規定を守ってください。印刷屋さんや校正者の負担を減らし、ミスプリントを減らし、発行のおくれをとりもどしたいと思います。・・・)

相変わらず、発行がおくれています、できるだけおくれをとりもどすよう努力中です。

3月末まで編集を手伝ってくれていた谷原ふみ子さんがおやめになりました。新しい職場でのご多幸を祈ります。そのあとには、1年半ぶりにケンブリッジから帰国された武田久子さんが、ふたたび手伝ってくださることになりました。 編集部 M.K.
小川さんは小川修三さん。

この編集後記から、関心は、相変わらず投稿規定を守らない原稿が送られてくることと刊行の遅れであり、送られてくる原稿の量に一喜一憂していたことがわかる。

6月号 61巻3号

編集後記 この一月ほどの間に、ニュートリノに質量が見つかったというニュースが、いくつかのルートで入ってきました。今では、いくつも関連するプレプリントが入ってきていますが、その前にテレックス、手紙、新聞(ニューヨーク・タイムスの切りぬき)などが、基研にも届きました。そのいくつかを、発行の遅れている、前の号の素研にのせることにしました。

相変わらず、発行のおくれがあつて、著者と読者に申し訳ありません。刊行予定に近づけるよう努力中です。 (1980.5.20 M.K.)

7月号 61巻4号

放談室 「開館の年の湯川記念館」(資料) . . .

編集後記

梅雨のあい間の日曜日に、基礎物理学研究所の遠足で、奈良の西の京と山の辺の道に行ってきました。ちょうど、唐招提寺の御影堂の特別公開の日だったので、8世紀の鑑真和上座像と、完成したばかりの東山魁夷のふすま絵をみることができました。そのあとで、桜井市の阿部文珠院で、朝永振一郎先生のお書きになった万葉碑に立ち寄りしました。この碑については、みすず書房の「回想の朝永振一郎」(1980年7月)の、竹内柁、馬場一雄両氏の文をごらんください。

湯川先生の万葉碑も、多武峰の八井内にあるそうですが、今回はそこまで足をのばす時間がありませんでした。

ところで、1月号のあとがきでちょっとふれたため、問い合わせがいくつもありませんでしたので書いておきますが、朝永先生は、京都の丸山公園のすぐ南の東大谷に、ご両親とご一緒にお眠りになっています。

あわせて書いておきますが、坂田昌一先生のお墓は、ご郷里の山口県柳井市岩休寺にあります。柳井駅から南に6キロほどの阿月の手前です。瀬戸内海を見下ろす丘の上のお墓には、郭沫若の書が刻んであります。

この号の放談室には、1952年の湯川記念館の様子を生き生きと示している資料をのせました。どこに出すために作った報告なのか、私はまだ知りませんが、どなたかご存じの方はお知らせください。

基研には、昨年から湯川記念館史料室が設置され、片手間ではありますが、活動がはじまっています。その一端は、去る3月末の日本物理学会の物理学史分科会の特別講演として、河辺六男氏と私との連名で報告したほか、早川幸男氏が、5月末にFermilabで開かれたInternational Symposium on History of Particle Physicsで、invited talkとして話をされました。これらも、そのうち、活字の形でみられるようになっていく予定です。

素研の誌上にも、ときどき、素粒子論グループの多くの人たちが興味をもつ歴史的資料をのせることも考えてみたいと思います。ご意見があればお聞かせください。

(1980-6-20 M.K.)

この時代の基研は、今と異なり4部門のこじんまりした研究所だった。建物は湯川記念館だけで、のちに広島大学理論物理学研究所と合併した後にできた研究棟はまだなかった。国内外からの滞在者はいたし、Progress of Theoretical Physicsの編集と刊行をおこなっていた理論物理学刊行会も一角を占めていたが、これらの人たちも含めて、所長から教職員、用務員さんまで、遠足も含めて親密な毎日を過ごしていたのだった。

ここに、朝永先生、坂田昌一先生のお墓のことが出てくるが、坂田先生のお墓は柳井市

内の欣慶寺に移転したと聞いた。郭沫若の書の石碑は、ぼくが訪ねた岩休寺の元の場所に
いまでもあるそうだ。これは移せない事情があるのだろうか。移すほうがいいのではない
だろうか。

もう一言。湯川先生のお墓は京都の知恩院にある。

この編集後記では、湯川記念館史料室の活動についてもふれている。ここに出てくる河
辺さんとぼくの報告は、上記 1980 年 1 月号 (60 巻 4 号) の欄に書いた「中間子論の誕生」
にまとめられている。早川さんの報告は、このシンポジウムの記録

The birth of particle physics edited by L. M. Brown and L. Hoddeson, Cambridge University
Press, 1983 のなかの pp.82-107 に

The development of meson physics in Japan

として記録されていて、翻訳が

L. M. ブラウン・L. ホジソン篇『素粒子物理学の誕生』(講談社サイエンティック, 1986)
に、「日本における中間子物理学の誕生」(pp.86~112) として含まれている。

また、湯川記念館史料室の誕生と初期の状況については、河辺さんと一緒に「湯川記念
館史料室私記」(素研 65 巻 4 号, pp.223-237, 1982 年 7 月号) に書いておいた。

8 月号 61 巻 5 号

編集後記 . . .

素研の名前は、海外でも次第に知られるに至っています。最近、仁科記念財団の招き
で来日し、7 月 8 日に東京で、"Tomonaga Sin-itiro : A Memorial Two Shakers of
Physics" と題する講演をおこなった J. Schwinger も、講演の中で素研を引用してい
ますので、御紹介しておきます。

In that same month of September, 1948, Yukawa, accepting an invitation of
Oppenheimer, went to the Institute for Advanced Study, New Jersey. The letters
that he wrote back to Japan were circulated in a new informal journal called
Elementary Particle Physics Research – Soryushiron Kenkyu. Volume 0 of that
journal also contains the communications of Oppenheimer and Pais to which I have
referred, and a letter of Heisenberg to Tomonaga, inquiring whether Heisenberg's
paper, sent during the war, had arrived. In writing to Tomonaga on October 15, 1948,
Yukawa says, in part, . . . (1980-7-23, M. K.)

シュウインガーの講演は、朝永先生の一周忌当日、東京の日仏会館ホールで行われた。
講演記録は、仁科記念財団のウェブサイトの「仁科記念講演録などの NKZ シリーズ」にあ
り、全文を読むことができる。

9月号 61巻6号

編集後記 原稿がたまりすぎている・・・ (1980.8.4 M.K.)

10月号 62巻1号

編集後記 ひさしぶりに薄い素研をつくれて、ほっとしています。・・・今年度は・・・厚い号が続き、1年分の予定ページ数を全部使ってしまったのではないかと思うほどです。・・・値上げをせざるを得ない状況に追い込まれています。(1980.9.16 M.K.)

11月号 62巻2号

研究会報告 ニュートリノの質量

編集部より 素研購読料値上げ・・・

編集後記 OD 問題の解決をめざす若手研究者団体連合会がまとめたパンフレット「オーバードクター問題の解決をめざして」が各方面で話題になっています。これが解決への歩みに大いに役立つことを期待します。

TRISTAN 計画が動き出しそうな様子です。・・・NUMATRON 計画も、動きが見えてきました。・・・宇宙線、素粒子実験、核実験での国際協力が着々と拡大しています。・・・素粒子・原子核の理論研究がとりのこされることのないように期待します。・・・ (1980-10-7 M.K.)

この号には、研究会報告以外にも、ニュートリノの質量と振動についていくつかの寄稿をお願いして掲載した。以下の1981年3月号(62巻6号)の編集後記にあるように刊行直後から注文が殺到し、余分に用意しておいたのに完全に売り切れ、再刊希望に対して、財政的理由からお断りせざるを得ず、希望者には申し訳なかったし、編集部としても残念だった。

12月号 62巻3号

編集後記 素研編集部を強化するため、・・・基研の福田礼次郎氏と鈴木敏男氏に協力してもらうことにしました。・・・この文を書いている11月上旬に、まだ9月号までしか刊行できませんでした。・・・素粒子論グループの有権者は、1,000名を超えています。機関誌にふさわしい発行部数にもっていくため、周囲の方々が、購読者になってくれるように依頼してください。(現在の刊行部数は、図書室用も含めて約700部に留まっています。) (1980-11-7 M.K.)

1981年

1月号 62巻4号

編集後記 新年おめでとうございます。(といっても,) お手元にとどくのは, 1月末
 と思います。 (1980-12-9 M.K.)

2月号 62巻5号

放談室 シリーズ「OD問題と学術体制」第1回

編集後記 今月までうすい号が続きましたが, 次号から研究会報告が連続して登場
 する予定です。 (1981年1月16日 M.K.)

3月号 62巻6号

講義ノート 崎田文二「ゲージ理論と集団場」

編集後記 ……昨年秋から基研に滞在して, 精力的に仕事や講義をしてこられた崎
 田文二さんが, 編集部からの依頼に対し, 数日間で講義ノートを書いてくれました。
 ……ここで, お礼を述べておきます。

今年の1月号は, 過去10年以上の中ではじめてその月のうちに発行できました。…
 ……ところで, 昨年11月号の素研は, 「ニュートリノの質量」の研究会報告と, それに関
 係する特集号的な編集をしたところ, 定期購読者以外の注文が多くて, 余分に印刷し
 ておいた予備が全部すぐに売り切れてしまいました。その後も注文がつづいているの
 ですが, 経費がかかって再刊することはできません。…

(1981-2-5 M.K.記)

崎田さん(1930—2002)とは同世代であったこともあり, 別の大学の院生だったときに
 木崎湖での夏の学校で出会ったときから仲よくしていた。ニューヨークでも歓待してくれ
 た。ガンとの闘病を続け, 東京で亡くなったことを知って残念だった。

4月号 63巻1号

編集後記 2月初めに SLAC で……といううわさが伝わってきました。……数日
 ののちつぶれてしまいました。2月下旬には, ドイツから telex がとどき, München
 でおこなった plasma turbulence での実験で, gluon, W^- , Z^0 , e^* , μ^* , τ^* ,
 τ^{**} その他の質量を決めることができたと書いてありました。……丁度基研で開催
 されていた研究部員会議の休憩時間の議論になりました。プラズマや乱流の専門家に
 きいても, 納得のいく説明は得られません。たとえ, 質量のスペクトルが得られても,
 なぜそれらがグルオンなのか, 全くわかりません。……静観することにしましょう。

(1981-3-12 M.K.)

インターネット時代になる前には, 基研には, プレプリントも早く多く届き全国に情報
 を流していた。プレプリントより早く情報が届くことも少なくなかったが, フェイクニュ

ースも時々飛んできた。

5月号 63巻2号

お知らせ 譲る「素粒子論研究」・・・

素研編集部

編集後記 お知らせ欄に書きましたが、雑誌のバックナンバーの譲与が、喜ばれている例があります。・・・素研の誌面の一隅が、このような情報交換に役立つことはいれしいことです。

(M.K. 1981・4・16 記)

この号で、ぼくの編集長の仕事は淡々と終わった。引き継いだのは、また牟田さんだった。

4 勝手連の応援団

ぼくは、1983年に基研から転出した。翌年までプログレスの編集委員の仕事が続き、1985年に京都で開かれた中間子論 50 周年国際会議とレプトン・フォトン国際会議の組織委員だったので、基研にはしばしば用事があったが、その後は、基研にも素研編集部にも足が遠のいていた。

それが変わったのは、2000年1月に河辺さんが急逝したためだった。すでに述べたように、基研の湯川記念館史料室は河辺さんとぼくたちが力を合わせて立ち上げたのだったし、後継者は全く見えていなかった。そこで、時を置かずに横浜から京都に行き、史料室の状況の把握を始めた。

そのころ始まったのが、朝永先生と湯川先生という二人の京大出身者の生誕 100 年が 2006 年と 2007 年に続くので、基研として記念事業を行うという、ぼくも参加した計画だった。そのため再び基研にしばしば行くことになった。この計画は、筑波大学と大阪大学も参加して実施された。

時期としてその途中で起こったのが、素研のバックナンバー全文を、国立情報学研究所 (NII) の電子図書館サービス「NACSIS-ELS」に搭載するという計画だった。ここで生じた難問は、すべての号を裁断して、機械的に両面スキャンをするため、創刊号からのすべての号を、NII に送付する必要があることだった。素研編集部の野坂京子さんが、初期の用意できない号があるといったので、偶然の幸運により、そのすべてを提供した。なぜそれが可能だったのか手の内を明かすと、河辺さんの遺言が関係している。2000年に河辺さんが亡くなったときに奥さんの万里子さんから連絡があり、物理関係の処理は梅村勲さんとぼくに依頼するようにと書いてあるといわれたのだった。河辺さんは、素研を創刊号から持っていて、0 巻はそれ以前に素研編集部に寄贈していた。そこでそれ以後の欠号をすべて提供できたのだった。

この計画は 2008 年から、CiNii (サイニイ = NII 論文情報ナビゲータ) によって、創刊

号からのバックナンバーの全文が利用できるようになった。

今では、原稿データ (PDF) の保管先は、NII から、JST (国立研究開発法人科学技術振興機構) に移り、J-STAGE (科学技術情報発信・流通総合システム) 上でバックナンバー全文が公開されている。

素粒子論研究と物性研究は、長年理論物理学刊行会に全面的にお世話になってきたのだが、Progress of Theoretical Physics と理論物理学刊行会が 2012 年末になくなり、2013 年度から日本物理学会が Progress of Theoretical and Experimental Physics を刊行することが決まった。そこで、両雑誌の冊子体での継続はできないことになり、2011 年度末で終焉を迎えることになった。そこで当時素研の編集にも刊行にも全く関係がなかったのに、冊子体の最終号 2012 年 2 月の 119 巻 4C 号に「素粒子論研究」の 65 年：1948-2012」と題して、オマージュというか挽歌というか、回顧と提案を書かせていただいた^{註2}。(記憶が定かでないのだがこの執筆の構想は、野坂さんと話している中で生まれたのだと思う。野坂さんは、1999 年 11 月号に河辺さんが湯川記念館史料室の名前で書いた「素粒子論研究」の 50 年」に「熱烈協力」されている。再び詳細な付録として「素粒子論研究 100 巻から 119 巻までの資料」を作成してくれた。)

提案というのは最初に書いたように、2008 年から当時の素研編集長だった笹倉直樹さんが発行してきた電子版の素粒子論研究を、素粒子論グループの総会とされている素粒子論懇談会で、素粒子論グループの機関誌として決議して、冊子版のオンライン後継誌として発展させてもらいたいということだった。幸いにしてこの提案は可決され、今日 75 周年を迎えることができたのだった。

なお 冊子体の最終号が出た 2012 年 2 月には通巻 746~748 号の 3 冊が刊行され、合計 544 ページだった。

5 あとがき—久しぶりの編集委員—

2009 年に、当時の素研編集長だった笹倉さんによって創刊された電子版の素粒子論研究は、2012 年の初めまで冊子版とは別の雑誌とされていた。それでも笹倉編集長も編集作業に協力していた野坂さんも、冊子体と電子版の双方を作成していた。

2012 年 3 月の素粒子論懇談会で、上に述べたように、その後は電子版の素研を素粒子論グループの機関誌とし、素粒子論グループが編集長と素粒子と原子核の分野から一人ずつの編集委員を選出することになった。

2015 年に編集長になった橋本幸士さんは、素粒子論懇談会が選出した 2 人の編集委員

註2 素研は、2007 年度から隔月刊で年 6 回発行、2010 年度からは季刊で年 4 回発行だったから、2011 年度の最終号の発行は 2012 年 2 月だった。

のほかに、編集長が数人の編集委員を委嘱する体制を作った。このときにぼくも委嘱された。2021年からの現編集長の森田健さんにも継続してお手伝いすることになった。

過去の経験があるので参考にしてもらえることがあり、今回の75周年記念企画について具体的に数件の依頼と編集を担当したことを含めて、ささやかな貢献をさせていただいて、今日に至っている。

振り返ってみると、実に多くの人たちと協力して素研と取り組んできたものである。まだまだ思い出すことが出てくるが、素粒子論研究が今後も素粒子論グループの機関誌として魅力を持ち続けることを希望して筆をおく。

貴重な情報を提供して下さった岡本良治さんと、原稿を点検してご意見をくださり、分かりやすく正確にすることに貢献してくれた松田正久さんと野坂京子さんに感謝する。

(2023年10月15日)

編集後記

電子版 40 巻が完結した段階で振り返ってみて、それぞれ特色ある内容を書いて下さったことに心から感謝している。残念なことに、今回記事を寄稿していただいた亀淵 迪 筑波大学名誉教授が 2023 年 11 月 19 日に亡くなられたとの報を受けた。氏には今回の寄稿文以外にも冊子版時代から、多くの記事を投稿していただいた。ご冥福をお祈りする。

素粒子論研究では、今回の 75 周年企画より前にも、25 周年、50 周年、冊子版の終了時に記念企画として記事が書かれており、素粒子論研究の歴史の記録が残されている。まだお読みでない方はこの機会に是非ご一読いただきたい。また今回の 75 周年の企画に関し、2023 年 12 月の日本物理学会誌にも紹介がある。

今回の 75 周年企画では、先達の方々の記事が中心であった。一方、素粒子論グループには大学院生など若いメンバーも多く、幅広い世代が集まっている。多彩なコミュニケーション方法が広がる現在、それらのメンバーの情報交換の場としての素粒子論研究の在り方も、時代に合わせて考えていく必要があるだろう。素粒子論研究および素粒子論グループの今後の発展のために編集部として何ができるか、今後も模索していきたい。以前に引き続き、学位論文を集めて公開したり、投稿していただいた講義ノートなどをまとめて公開したりしている。また、pdf ファイルだけではなく、動画なども投稿できるようにしたため、様々な有益な資料を投稿していただきたい。さらに、新たに編集部の X (旧 Twitter) アカウントを取得し、記事の公開時に情報を配信する試みを始めた。これ以外にも、素粒子論研究の発展のため、有用と思われるアイデアをお持ちの方はぜひ編集部にご連絡いただきたい。素粒子・原子核・宇宙分野の研究の一層の発展と今後の『素粒子論研究』、特に 100 巻、125 巻の特集に期待したい。

最後に、75 周年記念企画を進めるにあたり、寄稿文の依頼を引き受けて下さった著者の方々に改めて感謝申し上げる。また、冊子版の最後の時期から電子版の立ち上げの時期における素研編集部に関する質問に快くお答え下さった笹倉直樹氏、野坂京子氏にも大変感謝している。笹倉直樹氏、岸本功氏には電子版初期のウェブサイトのファイルや資料を提供していただき、ウェブサイトのリニューアルを行う上で非常に参考になった。75 周年記念企画にご協力いただいたみなさまに重ねて感謝申し上げます。

素粒子論研究編集部

素粒子論研究 創刊 75 周年特別号

発行人 素粒子論グループ 素粒子論研究編集部

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soken.editorial/index.html>

2023 年 12 月 25 日 発行

素粒子論研究・電子版の規定にもとづき、各記事の著作権は原則として著者に帰属する。
