

5) 物理的概念と数学的言語との関連の深化、
等の特色を挙げれば十分だと思います。

ともあれ、このような特色につらぬかれつゝ「既知と未知との境界の移動にともなう」私共が創造的に解決して行かねばならぬ新しい課題がたえず生まれてきているのであり、それがとりもなおさず基礎物理学の新鮮な生命力を保証するものであると信じております。

本シンポジウムの成功を期待して、簡単な開会の辞に代えさせていただきます。

(追記)

なお、先生を追悼して書いた下記の記事をお読み下されば幸いです。

「湯川秀樹博士と基礎物理学研究所」(『科学』Vol. 52(1982) No. 2, p 107)

「基研時代の湯川先生」(『日本物理学会誌』Vol. 37(1982) No. 4, p 298)

素粒子物理学の現状と展望

京大・基研 益川 敏 英

所長より本日のシンポジウムについてお話がありました様に、基礎物理学の現状と展望についてのシンポジウムを行ない、先生無き後の基礎物理学研究所の舵をどの様にとり、研究所を更に発展させて行くかを考え決意を新たにす、そしてこの会と決意を湯川先生に捧げるのが本日のシンポジウムの主旨でした。当然この観点から私も素粒子物理学の現状と展望を語らなければなりません、私にはそれに応えるだけの能力が有りませんし、また偉い先生が行なっても予測と言うものは概ね外れる事が常でありましょう。しかし、予測は外れることを常としても、常にこれから生ずることに思いを馳せていることが、学問の大きな流れ変化発展に対し、常時先行とは言わないまでも大きく遅れることを無くす唯一の保障でありましょう。この意味からも常時行なっていなければならない行為の一つであり、予想の外れることを恐れず私の素粒子物理学の現状と展望を語って見たいと思います。予想を立てる時の常套的手段として過去のデータとを並べそれを外挿する手法を採用します。どのデータポイントを重視しどれを無視するかによって外挿曲線は大巾に変化します。ここに予想が外れる原因がありますが、ここでは私の主観に従って作業を行ないます。この意味で歴史の俯瞰から始めますが、外挿線を引くに必要なものだけに言及を限ります。例えば三点を通る直線はその直線の決定のためには中間点は必要ありません。しかし科学史から見れば中間点に相当する発見があつてはじめて第三点の発見が有るのであつて価値は等しいかもしれせん。この意味で以下に述べる事は科学史でないと言う事を御理解頂きたいと思ひます。

1. 素粒子物理学の歴史から何を学ぶか

素粒子物理学は19世紀末に始まります。それは真空技術の発達により、陰極線としての電子の発見であり、今日ワインバーグ・サラム以来相互作用の統一理論に注目が集まっていますが、その原初版であるマクスウェルによる電気力と磁気力の統一理論の完成であります。ここに実験を通じての自然への認識の深まりと概念の自己運動としての発達の二つのタイプが当初より有ったことは注目に値します。

1905年に相対論を発表したアインシュタインは1910年代（以下10年代と省略）中頃には一般相対論すなわち重力理論を完成し、続いてワイルは接続の概念を拡張して電磁相互作用も統一しようと試みます。この仕事を通じてゲージの概念が確立し、カルタンにより接続の幾何が発展させられます。20年代の初めにカルザとクラインが時空の次元を四から五にふやす事により電場磁場の自由度を作り出すことに成功します。次元を更に高くすれば非可換ゲージ理論も作れることが70年代の中頃に分り、今日注目を集めています。たとえ天才が為したとは言え、相対論から重力理論まで十年たらず、そして更に10年でカルザの理論が出ています。これが量子力学の完成の前です。量子力学完成の後三年でハイゼンベルグとパウリにより場の量子論が完成します。1928年にディラックにより陽電子が予言されます。これは理論的に存在が予想された最初の粒子であります。これより前に自然からの靈感として中性子の存在を予測する人は居ましたがこの二つが1932年にそろって発見され場の理論の正しさと原子核の構造が明らかと成ります。この時点で原子核物理と素粒子論が分化します。この時以前では中性子の存在の可能性はあるものの、一方では原子核の陽子電子複合系説も有力であり、この場合には電子は神秘的に振舞わねばなりませんでした。総じて原子核に対するイメージは不透明であり、原子核は陽子と同じく素粒子であったと言えましょう。これは70年代中頃における J/ψ 粒子の発見、ワインバーグ・サラムの理論を通じての場の理論の復権、その上に立ったクォーク閉じ込め機構への確信によって生じた、ハドロン物理学と基本構成子物理学（クォーク・レプトン物理学）の分化との対比で興味深いものがあります。

30年代には β -崩壊時におけるエネルギー「非保存」の問題よりパウリによる中性微子の導入、引き続いてフェルミによる弱い相互作用の理論建設が行なわれます。一方ハイゼンベルグの核構造論の後三年で湯川の間接子論が生まれます。この時点で重力、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用の四つの相互作用の概念が確立します。

40年代の初めに宇宙線の分析より谷川、井上・坂田は二中間子論（ π の他に、 μ の存在を予言）を発表、そして40年代の終りに朝永とシュヴィンガーによるくりこみ理論の建設とフェルミとヤンによる π の複合粒子性の分析が行なわれます。

自然がわずかに示す徴候の背後に隠されたものを暴き出したり、物質の存在様式についての形式的可能性や一度獲得した理論の自己運動による発展は実に早く数年の時間尺度で進行している事は驚くべきことです。一方、ハイゼンベルグとパウリによる場の量子論が作られて20年後に朝永・シュヴィンガーのくりこみ理論がようやく出来たことは注目しておく必要があります。フェルミとヤンの π の複合模型も、その後宇宙線中に発見されたV粒子（ K , Σ , Λ 等）を契機として坂田によりハドロンを統一した視点から捉える複合粒子模型（1955年）にまで高められ、ゲルマンとツバイクによりクォーク模型（1964年）に発展さ

せられますが、これが素粒子物理研究者の共通の確信になるのは70年代の中頃であります。ここに一つの物質の存在様式の形式的可能性の発見からその確立へのドラマが有り、どの様な過程を経て進行するか教訓に富んでいます。

電磁相互作用の理論(以下 QED)が U(1)ゲージ理論であることはワイル以来知られていたことですが、50年代中頃にヤンとミルズは任意のリー群の基でのゲージ理論への道を開きました。ヤンとミルズの当初の目的はアイソスピンのゲージ化にあった分けですがこの意味ではヤンとミルズの仕事は失敗作と言えます。しかし、ゲージ理論は場の理論において非常に基本的な概念であったが故にこれは違った局面で再生するわけでここにも一つの教訓があります。何かに動機付けられなければ仕事は始まらないわけですが、新しい概念、より基本的なもの、については当面の成果だけからのみ判断してはならない事を示しており、概念の自己運動の重要性を示しています。また反対にヤンとミルズの理論はワイルより三十数年も遅れねばならなかったかと言う事でもあります。20年代にワイルとカルタンは正確に接続の概念を捉えています。彼等に SU(N) ゲージ理論を作れと言えば立ち所に作り上げたでしょう。研究者に何を考えさせるかという自然からの刺激の重要性がここにあります。

50年代にはもう一つの重要な発見があります。リーとヤンによる弱い相互作用(以下 W. I. と略称)の偶奇性の破れの発見であります。これは神様が左利きと言う鬼面人を驚かす事実によって重要なのではなく、この発見を通じて W. I. の構造が分って行ったことにあります。すなわち、ファイマンとゲルマンによる W. I. は弱荷電流の積として表わされると言う知見であります。これによって W. I. も QED と同じく、ベクトル媒介子・弱ボゾンにより相互作用が媒介されているとする考えが多くの人々の頭に浮びました。しかし、現象はそれほど単純ではなく、弱ボゾンは存在したとしても、W. I. が非常に短距離力であるためその質量は光子のゼロ質量と違い数 GeV 以上であることが要求されました。況やゼロ質量性がその本質と考えられていたゲージ粒子とこの弱ボゾンを考える人は一部の人を除いて居ませんでした。ゲージ粒子に質量を持たせる力学的機構の発見が必要であった分けです。ここに力学の示す多様な側面についての研究の重要性があります。場の量子論の示す物質の存在様式の奥の深さに留意せねばなりません。

ヤンとミルズの仕事の直後に内山はアインシュタイン重力理論もまたゲージ理論として定式化出来ると言う大変優れた仕事を発表しました。

60年代の初頭南部は超電導理論にヒントを得て、ゼロ質量の核子に力学的に質量を持たせる事を考えました。ここで南部は対称性の自発的破れとゼロ質量の所謂南部ゴールドストーン粒子がそれに附随して現われる現象を確立し、ゴールドストーンがこれを定理として定式化しました。これはこれ以前には自由粒子描像しか知らなかった素粒子研究者に相互作用の結果としてまったく新しい粒子像が出現する可能性がある事を知らせました。この可能性は多くの研究者の関心を引き起しました。しかしその関心の方向は当時最大関心事の一つであったフレーバー SU(3) の近似的対称性の起源を自発的対称性の破れで説明しようとするものでした。この試で一番困る事は強い相互作用をする南部ゴールドストーン粒子の出現です。ゼロ質量の強い相互作用をする粒子が存在すれば発見されるはずですが、この世には存在していません。ここでゴールドストンの定理崩しが始まります。自発的破れは生じているが南部ゴールドストーンは出現しないように出来ないか?この大騒動の中でヒグス機構が64年に発見され共変的な形でキブルにより翌年定式化

されます。こうして我々はゲージ粒子に質量を与える機構を獲得します。しかし、これは当初の目的のために使われて成功を取めたのではなくて、ワインバーグとサラムにより電磁相互作用と弱い相互作用を統一してSU(2) × U(1)ゲージ理論として定式化し、弱ボゾンに質量を与える機構として採用され大成功をした分けです。力学の新しい機構の発見のためには何かに動機付けられた研究者の強い集中力が必要であり、またその成功を取める局面もヤン・ミルズ理論やヒグス機構の様にしばしば偶然的要素が多く絡みます。この意味から素粒子を記述する手段であり言葉である場の量子論、そして相対論的量子力学的物質の存在様式の多様性と奥の深さを反映している場の量子論の力学的側面の研究は、広い視野と課題意識そして長期的展望の上に立って行なわねばならない事を示しています。

ワインバーグとサラムの理論は発表頭初多くの素粒子物理研究者の確信には成りませんでした。実験手段の当時の到達度の問題も有りますが真剣に実験的に検証しようと言う強い動きも起きませんでした。背景には50年代中頃から60年代全般を覆った場の理論への不信が有ったと思います。チュー、ゲルマンを始め日本の研究者を含め大なり小なり全素粒子研究者をこの影が覆っていたと言えます。QEDはくりこみ理論で成功を取めているにもかかわらず、強い相互作用はくりこみ不可能の様に見えました。また、1925年の余韻が残っており、新しいレベルの物理では全く新しい法則が支配しているはずであり、ハドロンの内部構造を支配している法則は超量子力学に違いないとの考えが支配的でした。人間側の技術の問題を自然の法則の特徴にまで昇華してしまった分けであります。ここにも一つの教訓が有ります。技術面での楽天主義を保つにはどの様にすればよいか。

しかし、60年代の終りには場の理論に対する不信も徐々に回復して行きます。対称性の自発的破れにともなう南部・ゴールドストーン粒子に関係した低エネルギー定理を通じての(群作用の非線型表理による有効)ラグランジアンへの接近、深非弾性散乱の分析によるクォークのハドロン深部での自由粒子性等を通じて場の理論は徐々に復権して行きます。この頂点に立つのが非可換ゲージ理論(ワインバーグ・サラム理論の様な)のくりこみ可能性の証明です。これをトーフフトが70年代の初頭に行ないます。それが契機となってワインバーグ・サラムの理論にも関心が高まり、実験的検証を得て70年代中葉に確立し、時を同じくして強い相互作用もSU(3)ゲージ理論(量子色力学;QCD)で記述出来ることがほぼ確かとなり、ワインバーグ・サラムとQCDを一つのゲージ理論で記述しようとする大統一理論(GUT)をジョージとグラッショが提唱して今日のゲージの時代に一挙に突入します。

一方64年にゲルマンとツバイクによって導入されたクォーク模型はバリオンのスペクトラムの分析からハンと南部により「色」の自由度を獲得し、アドラーのアキシャル流の保存則に関係した異常項の分析により「色」の自由度は検証されます。この異常項は40年代の終りに福田と宮本が発見したアキシャル流の保存の異常現象に端を発するもので非常にアカデミックな問題でしたが、今日の場の理論におけるアドラーの異常項の重要さを思うとき、場の理論の研究において、理論の枠内で生じた諸々の「現象」はそれ自身が基本的な事柄に関わるものであるかぎり重要であり研究する価値があることを教えています。

60年代の終りのハドロン像は非常に混乱したものでした。非相対論的クォーク模型(軽い有効質量のクォーク、しかし未発見)、散乱振巾の二重性より得られたハドロンの糸描像、南部ゴールドストーン粒子としての π 、深部でのクォークの自由粒子性、どれ一つを取ってもそれは他の描像を一見否定しているように見

えました。正しくファストレーションの時代でした。しかし、一つ一つは実験事実の分析を通じて得られたものであり、どれ一つとして捨てることのできないものでした。結果から見れば欠けていたのは局面局面で一旦違った顔を見せるクォークの性質を一つの描像から自然に導びけるその様な視点の発見でした。これが漸近自由性（短波長の現象ほど相互作用が弱くなり最後はゼロとなる）を持った QCD によるクォーク閉じ込めであった分けです。

70年代初頭にトーフトによりゲージ理論のくりこみ可能性が証明されるや、強い相互作用をゲージ化するには「色」の自由度に関する対称性、SU(3)、をゲージ化すれば良い事は誰にも自明であったが、「色」、SU(3)対称性は自発的対称性の破れをしておらずゲージ粒子に質量を与えることが出来ないので、観測事実と矛盾し、これを信ずるには二の足をふまざるを得なかった。確信を得るためには「色」を持った粒子の閉じ込めへの確信が必要でありました。

クォークの閉じ込めのアイデアはクォーク模型の発見とほぼ同時に発想されたが、空想的閉じ込めでなく場の理論に基づいた科学的閉じ込めとも呼べるものが着想され始めるのは1973年であった。それには二つの事実の発見が必要でした。一つは QCD の漸近自由性であり、これは我々の真空が「色」、電場に関して反誘電的であることを示す。もう一つはギンツブルグ・ランダウの理論の素粒子論的再発見です。これによりクォークから出た電場は糸状にしぼられ閉じ込めが完成する。両者は73年に同時に行なわれました。前者はグロス・ウィルチェックとポリッツァーによって、後者はニールセン・オルセンによって発見されました。翌年 J/ψ 粒子が発見されてクォーク模型に対する信頼が不動のものとなる中でクォークの閉じ込めと QCD への確信は深まって行った。これがワインバーグ・サラム理論の様に QCD には特定の発見者が居ない理由でもあります。そして70年代後半になって QCD の予言が次々と実験的に確証されて行くなかで QCD は強い相互作用の理論としてほぼ間違いない理論と考えられるに至ります。ここにも一つの教訓がある。正しい理論に到達していても、その理論が力学系としてどのような世界を用意しているかについての知見が無ければ確信出来ないと言う事であり、その時期他の立場が共存すると言う事です。当然理論的実験的検証の努力は弱くなる。

以上素粒子物理研究者以外の人にとっては良いとしても、長々と良く知られた事柄をそれも偏見に満ちて語って来たのは次の事が言いたいからであります。

今まで見て来たように自然界（実験事実）からの、また理論の内からのものでも良いが、インパクトが有れば、それが比較的弱いものであっても形式的可能性の発見は早い速度で行なわれる。物質の存在様式に対する力学的可能性多様性の認識の深まりは遅く、新しい機能現象の発見は偶然性に依る所が多い。実際ニールセンとオルセンの糸模型は散乱振巾の二重性による糸描像を説明する目的のためであり、閉じ込めとは関係なかった。また QCD の漸近自由性もクォークの閉じ込めの課題意識の基での研究から生れたものでもなかった。次に物質の運動形態の可能性に関する知見の重要さです。これなくして描像はえがけない。（実体論を作るにあたって物質に付与することの出来る属性の可能性について知見の重要さのことである。）最後に困難な課題の前に人々はしばしば神秘主義に落いる。

以上のことを確認した上で数十年先の素粒子物理学を考えた場合何が必要でしょうか。物事の進展の為には自然からのインパクトが不可欠であったが、ワインバーグ・サラム理論の物理を越えて先に進むほど

実験が困難になり（大大加速器が必要となる）、自然から得られる知見は数少なくなる事を覚悟せねばなりません。GUTの物理（ 10^{15} GeV）や量子重力の物理（ 10^{19} GeV）ともなれば陽子崩壊よりのデータ、宇宙論からの情報等に限られて来ます。唯一の他の可能性はGUTモノポールの対消滅による 10^{15} GeVでのGUT低エネルギー現象についての知見でしょう。実験からのインパクトの欠如を補うものとしては、数値実験以外に無いでしょう。これは実験の果している役割を肩替わりするものではなく、まったく別の種類のインパクトを与えることと成るでしょう。数値実験は新しい力学現象についての空想に素粒子研究者、場の理論研究者を駆り立てることでしょう。また神秘主義から発生する日和見主義を排し、どの様な事でも可能だとするオブスキュランテストをやっつけるに役立つでしょう。また石も大変安くなって来ており、汎用型でない新しいタイプの数値実験装置も可動しているでしょう。これが私の想像する十数年先の素粒子物理学を規定するものであります。

2. 素粒子物理学の課題

素粒子物理学の課題は次の四つが考えられます

- i) ハドロン物理学 クォークの運動としてハドロンの諸特徴を説明する。
 - ii) 基本構成子物理学（クォーク・レプトン等の物理学）
粒子の種類、相互作用についての知見、内部構造があればそれも含めて研究する。
 - iii) 量子重力 重力の量子現象の研究
 - iv) 場の量子論 i) ~ iii) と共通する部分を多く含むが、独自の課題意識からの自己運動も同時に必要である。
- i) ハドロン物理学

中心課題は当然クォークの閉じ込めであり（ハドロン化の問題を含め）カイラル対称性の自発的破れの問題である。最近モンテカルロによる格子ゲージ理論により、興味深い結果が得られているが、最終的に理論として満足のゆく理解が得られるまでには時間を必要としても、閉じ込めの機構に対する描像に大きな変化は必要ないであろう。畢竟技術の問題であり時間の問題である。個々のハドロンの属性を説明する問題が残るが、物性物理や原子核物理の様な多様性は期待出来ないと考えられる。10 GeV位のウラン衝突はクォーク多体系として新しい質を我々に与えるか？

ii) 基本構成子物理学

どの様な群で統一されるかは別として、大統一理論のシナリオは正しいであろう。この意味で陽子崩壊とモノポールは発見されねばならない。これが発見されないとコペルニクスの大転回が必要となる。GUTエネルギー尺度（ 10^{15} GeVか）までにレプトン・クォークに構造が見えるか、これは意見の分れる所である。今の所色々調べられたが構造があると好ましい等の兆候は無い。超ポアンカレ対称性が重要な役割を果していればそれは超重力まで行くであろう。ヒグス粒子は何者か。`くりこみ不可能、相互作用による点状束縛状態は魅力ある考え方である。他にどの様な可能性があるか、GUTには 10^2 GeVと 10^{15} GeVの様な極端に尺度の違う量が共存する。これはセツ動的描像で理解出来るか、非セツ動的な効果によるとするとかかなりの研究が必要となろう。（閉じ込め問題のような）機構の推定と数値実験のつみ上げ

の様な。クォーク・レプトンの質量は。またなぜ GUT のエネルギー尺度はプランク質量に近く、また微妙に小さいのか。そして統一された結合常数が約 50 分の 1 と 1 に比して小さいのか。分からない事が多く発展の目が豊富である。

iii) 量子重力

重力、電磁相互作用、弱い相互作用そして強い相互作用全てゲージ理論であった。ゲージ理論は接続の幾何学として捉えることが可能である。ここにアインシュタインの夢「全ての相互作用を幾何学の力学として捉える」の可能性がある。この時フェルミオンの自由度をどうするか。超重力か。また他の可能性はあるか。重力まで含めた超大統一理論としてカルザ・クラインの理論はスーパー対称性化の可能性まで含めて魅力がある。しかし、この理論は全て古典的な取り扱いから出発する。プランク質量位の尺度では運動エネルギーに作用する重力ポテンシャル(引力)が等しくなる。(打ち消し合ってゼロ)当然この尺度では古典論的描像では想像も出来ない激しい運動が有るはずである。それはどのような物理を用意しているのか。また誘導重力も興味深い。重力まで含めれば場の理論に発散は無くなるというパウリ、ランダウの予言がある、これは本当か。リーマンはリーマン幾何は大域的には良いであろうがマイクロへ行けば変更を受けるかもしれないと言う。ではどのような可能性があるのか。超対称性の θ 座標はその様なものに関係するのか。量子重力を考えると宇宙の生成消滅まで考えるのか一体問題に限定すべきか。弦模型の理論からの類推を借りれば両方の立場が有りうる。

iv) 場の量子論

くりこみ可能性は技術的側面が強い。技術革新によりくりこめる相互作用の枠は広がるか(非代数和的引き算項)。くりこみ可能性は原理でなく結果か。低エネルギー固定点相互作用はくりこみ可能な相互作用であるという予測は証明出来るか。「くりこみ不可能」な相互作用は点状束縛状態の結合系を作るか。未知の機構、新しい場の理論における現象を発見するにはどのような研究方法があるか。フェルミオンが存在すると五次元以上では相互作用はくりこみ可能性の立場からは許されない。カルザ・クラインの理論との関連でこれをどう考えるか。ランダウの言うようにくりこみ理論は不完全か。しかし QED において CPT 定理は十の十何乗の精度で成立っている。場の量子論を越えた理論は存在するか。それは何をテコとして到達出来るのか。

以上四つの課題について気付くままに問題点を羅列^{*)}しましたが、十数年先にこれ等の問題がどれほどの意味を持って残っているかはなはだ疑問の多い所ですし、また予測もしなかった問題が主要な課題となっているでしょう。恥かしい思いを抑えてこの様な作業をしたのは i) の課題は今までの研究方法と手段の延長線上の物理として見る事が出来るが、ii) 以後の研究は自然からのインパクトの少ない所で進めねばならず新しい方法と手段が必要と成るであろうと思われるからです。それを示そうとしての悪戦苦斗であると御諒解頂ければ幸いです。

*) 筆者の怠惰の為原稿の締め切り日を過ぎてしまい、各項目についての十分な理論的展開を書く時間的余裕を無くしてしまいました。御容赦下さい。