

中西 襄先生還暦記念シンポジウム

—場の理論の過去・現在・未来—

を始めるにあたって

ゲージ場／量子確率論／超準解析／…再び場の理論へ

京大数理研・小嶋 泉 (Izumi Ojima)

1. 回顧と展望のために

『場の理論の基礎的諸問題』というタイトルのこの研究会が開かれるようになって、今年で5—6年目になりますが、これは'70年代半ば、中西先生がはじめられた研究会を直接引継ぐものです。したがって、数研における場の理論研究会の歴史は、今回で15—16年の歳月を数えることになります。そして、今年はちょうど、先生の御還暦の年に当たります。そこでこの研究会では、中西先生の御還暦祝いに事寄せて、先生の御研究の歩みの中でこの15年間の素粒子論・場の理論の発展の意味を振り返りつつ、今後の場の理論発展の展望を探ることを目的に、以下のような内容のシンポジウムを開くことにしました。

シンポジウム—場の理論の過去・現在・未来—

- ・九後汰一郎先生：21世紀の場の理論？
- ・高橋 康 先生：場の量子論は理解できただろうか？
- ・西島 和彦先生：BRS変換，B場形式，そして不定計量
- ・中西 襄 先生：共変的場の量子論の新しい解法について

Up to date な中味を伴った具体的展望は、これらの御講演の中で提示して頂けることになっておりますので、私は少し回顧の方に重点をおいて、その前座を務めさせて頂きたいと思います。そのために、甚だ不完全ではありますが、まず先生の今日までの御足跡を年表形式でざっと簡単に見渡しておくことが好都合かと思えます。

【中西先生の足跡】

【素粒子論・場の理論に関する主な出来事】

1932 御誕生

Chadwick：中性子発見

1935

湯川中間子論

1943-1949

朝永, Feynman, Schwinger：量子電気力学

1955 大学院時代 at 湯川研究室

(→『科学』vol.52,123('82) 中西 襄：湯川研究室の思い出)

1956-57 Feynman 図形の位相公式	↓	Heisenberg 統一場理論
↓		→真空縮退, 不定計量
1958 赤外発散の研究		
1960 大学院修了		
1961-63 Institute for Advanced Study at Princeton		
1963-65 Brookhaven National Laboratory		
		散乱振幅の解析性
		Bethe-Salpeter equation
		Dipole ghost
	↓	
1966 京大数理解析研究所赴任		中西-Lautrup 形式
1973 第19回仁科記念賞受賞		
1976-77 数研・場の理論研究会 start		Becchi-Rouet-Stora symmetry
		重力場の共変的正準量子論
1992.11 御還暦 &		This Symposium

2. この15年間の個人的・主観的“回顧”

あまり客観性や公平さに拘ってみても、所詮「正確を期する」ということから程遠いようなお話しかできませんので、ここは開き直って、私個人の主観的な視点に限定した立場で、この15年間を少し振り返ってみたいと思います。

先生の「散乱振幅の解析性の研究」に対する第19回仁科記念賞授賞を伝えた1973年末の新聞報道で、そのご高名には接していましたが、実際に私が先生にお目にかかったのは、修士課程の学生向けに開講される“素粒子論ゼミナール III”で、2次元場の量子論をテーマとする先生の講義を聞き始めた'76年4月、私のマスター2回生の時が最初でした。博士課程に入って、私が先生から直接の研究指導を受けるようになったのは、その翌年'77年4月、そして、数研での場の理論研究会を先生が始められたのは、この年か又はその前年5月のことです。そこから今日まではほんの一跳びような気がするのですが、実はそれが15～16年の時間経過だということです。月並なようでもやはり「光陰矢のごとし」という言葉を口にしたくなります。そして、その15年間における素粒子物理学の歩みを振り返る時、その起伏に満ちた発展の豊かな内容には、今更ながら感慨を新たに思うがします。

—この15年間における素粒子論・場の量子論の発展—

手短かに要約すると、70年代前半からの場の量子論・ゲージ理論の再興、それに基づいて、素粒子物理学の「標準理論」と呼ばれるに至った描像— $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ —が、理論・実験両面から確立されるのが70年代末から80年代初め。そこから更に、その昔、素粒子物理学の専門家からは素人好みの「思弁」とさえ蔑まれた一般相対論・量子重力理論が物理学理論としての市民権を獲得し、80年代に入ると、重力の作用を

も含めた自然・宇宙の法則・構造・歴史の統一的理解へ向けての強い志向が、物理学全般の中で基本問題の一つとして不動の地位を占めるに至った、ということになるでしょう。

その流れを自分自身の体験に重ねてみると、最初、場の理論の基礎に関わる研究を夢見て大学院に入ったばかりの '75 年当時、「素粒子をやるのに、場の理論は関係ない」という言葉を聞いてかなり衝撃を受けた記憶が、まず甦ってきます。暫くして、微分幾何学の中で、かつて強い興味を抱いて勉強したことのある「接続」の概念が、Yang-Mills 場という形で、ゲージ原理に基づく素粒子間相互作用の統一的理解という文脈で中心的役割を期待されていることを知り、大いに勇気づけられる思いがしたものでした。

—拘束系の量子化と BRS—

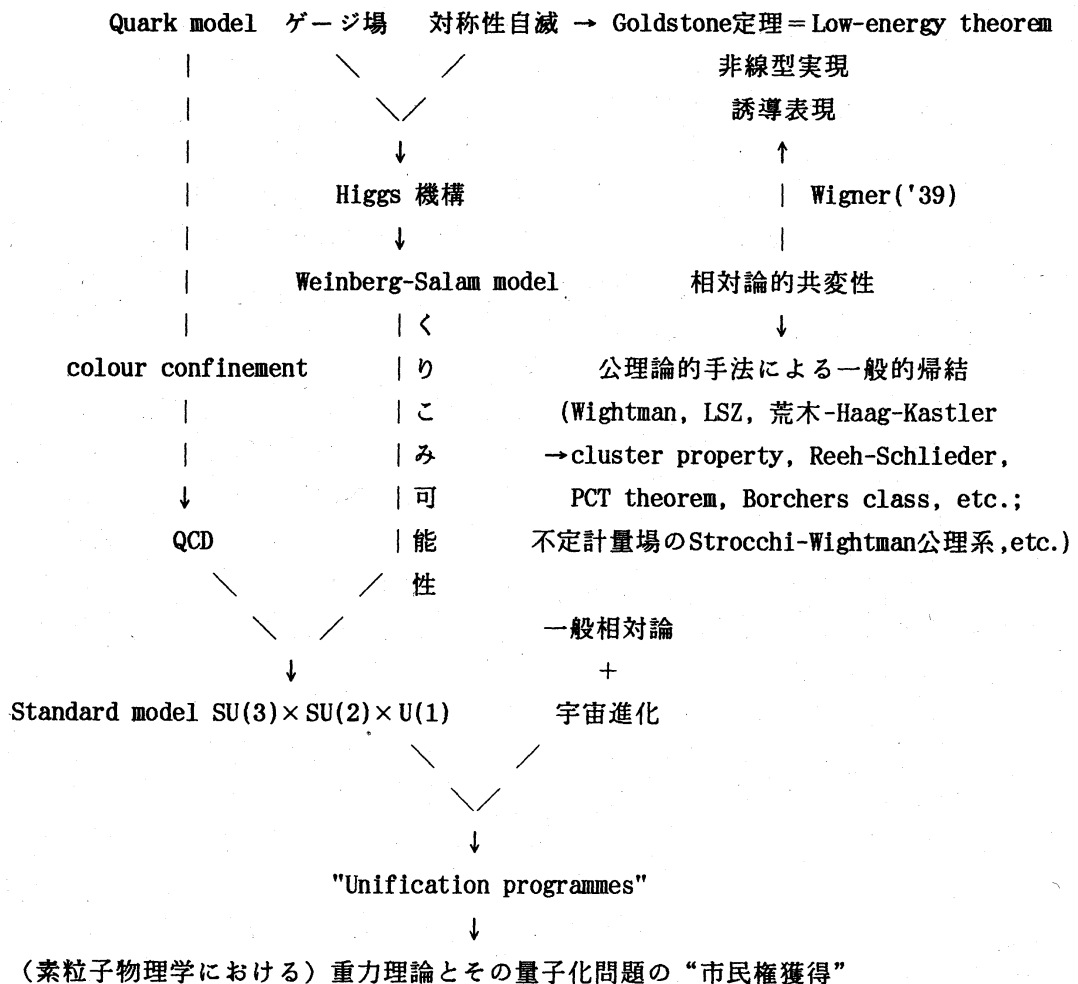
その Yang-Mills 場の量子論的扱いには、拘束系の量子化に関わる困難が伴い、同じ問題が、重力場の量子化や弦模型、当時話題になっていた null-plane 量子化等々でも重要な役割を演ずるということで、Dirac の量子化法やそれを symplectic geometry の立場から整備した Faddeev 理論や益川—中島理論などを懸命に勉強しました。'75 年初夏、物理教室でなされた吉川圭二先生の string に関する集中講義では、“ゲージ理論 = theories of constrained systems” という明快なスローガンが掲げられていたことを思い出します。確かに、拘束系に対するこの方法は、幾何学的には非常に美しいものに違いありません。ただし、相対論的共変性の問題では不満が残る、Faddeev 理論における Coulomb ゲージから共変ゲージへの移行に関する議論にも、疑問点を解消し切れませんでした。そこで、相対論的共変性を破らない 't Hooft(-Veltman) のダイアグラム法や Lee-Zinn-Justin のアプローチも勉強してみたのですが、私の頭には複雑過ぎて、そのエッセンスがどうしても見えてこない。丁度そんなフラストレーションに悩んでいた '76 年末の冬休みのこと、たまたま、汎関数微分を勉強し直すつもりで読み始めた Springer Lecture Notes in Physics No.37 ('75) 巻頭の Zinn-Justin による解説論文を読み進むうち、その前年 Becchi-Rouet-Stora が提出した BRS 変換に基づく Ward-高橋恒等式のきわめて簡明な取扱いに出会い、漸く霧が晴れていくような気分を味わったものです。とはいっても、その半年後、この変換が九後さんとの共同研究の中で演ずることになった本質的役割のことは、この時点では未だ予想もしないことでした。ただ振り返って後智恵でものを言うことが許されるなら、こういう「出会い」が理屈抜きに与える強烈な印象というものは、後々まで、思考の方向付けに極めて大きな影響を残すものだという気がします。

Yang-Mills 場の BRS 変換に加え、中西先生の著書『場の量子論』[培風館, 1975] で可換ゲージ場に関する中西—Lautrup 形式を勉強したことによって、ゲージ理論については、多少とも「安心立命」の気分になれた、ということなのか、しきりに、相対論的共変性、場の量子論の理論形式と不定計量の関わりについてもっと基本的な所から考え直したい、そのために公理的場の量子論をしっかりと勉強しておきたいという希望が、募ってきました。ちょうどドクター進学に当たって、中西先生からお声を掛けて頂いたのを「渡りに舟」とばかり、博士課程は数理解析専攻に籍を移させて頂くことにしました。それから、中西先生に漸近場に関する研究指導・議論をして頂くと同時に、荒木

先生には observable algebras と超選択則に関する Doplicher-Haag-Roberts の論文を読むセミナーで毎週2時間、レポーター役の私をみっちり絞って頂く一方、物理教室では非可換ゲージ理論のユニタリー性・補助条件の問題について九後さんと議論させて頂く、という形で、緊張感・充実感に満ちた「三正面作戦」の研究生活が始まることになりました。数研でのセミナーが小休止した '77 年の夏休み、九後さんとの集中的な共同研究に入り、中西先生から数々の有益な御助言を頂く中で、Yang-Mills 場の共変的演算子形式の定式化へ向けての骨格ができ上がって行きました。

ちょっと個人的な回想に入り込み過ぎてしまいましたが、ともかくこうした研究を通じて私の目に映るようになった、当時の場の量子論と素粒子論の論理的関係を、大まかに図式化すると次のようになるでしょう。

Keywords : 構成子模型, (非可換) ゲージ理論 / 対称性の自発的破れ, 相対論的共変性



—量子重力から時空の起源へ—

BRS の視点から量子重力をどう扱うかという問題には、Yang-Mills の目途が立った直後から私たちも取り組んでいました。しかし、中西先生のスタートダッシュの早さ

には到底太刀打ちできず、'77年秋から、先生の life work となった "Indefinite-metric quantum field theory of general relativity" の長大連作の幕が切って落とされることになりました。これは、[中西-Lautrup の B-field] と [不定計量の場の理論] に、[BRS 変換] や [quartet mechanism] 等の概念・手法を総動員し、中西先生のみが成し遂げ得た膨大な計算と卓抜なアイデアに基づいて、先生の物理学者としての全情熱が傾注された、文字通りの大作です。その詳しい中味をじっくり味わってみたいとお考えの方は、是非、N.Nakanishi & I.O.: "Covariant Operator Formalism of Gauge Theories and Quantum Gravity" (World Scientific Publ.Co.,1990) の第5章を読まれることをお勧めします。

さて、こういう研究の流れから次第に鮮明になって行った先生の研究のライトモチーフは、“量子重力から時空起源の問題へ”というスローガンに集約されるでしょう。その先駆性は、これに遅れること数年、漸く '80年代に入ってから同様の志向が“素粒子宇宙物理学”の中でも前面に出てきたことを振返れば十分と思われれます。

3. 学恩と "stray sheep" の遍歴記

こうした先生の壮大な量子重力理論の展開において、大変ささやかながら私もそのお手伝いをさせて頂きましたが、何分不肖の弟子ゆえに、膨大な計算を要した先生の理論の骨格部分に関しては何のお役に立つこともできず、また、その後の研究の方向性についても、今日まで随分と私の勝手気ままを許して頂きました。そんな「自己主張」に値するだけの内容が果たしてあったのか、振返るとただただ赤面するばかりですが、恥を承知でこの際、これまで何を求めて研究してきたか、自分なりに反省しておくのも後学のためかと思われれます。

— "visible" subsystem ⇄ "invisible" total system —

そこで、中西・荒木両先生から私が受けた研究指導や有形無形の学恩の中から、その後の研究生活において有力な指針を与えてくれた理念や思考の枠組を取り出して見ると、何よりもまず、B場および補助条件を用いて physical subspace と unphysical total space の関係を control する中西先生の一貫した方法論、そして、荒木先生が創められた(場の)量子論の代数的定式化、そこでの observable algebra と (unobservable) field algebra とを媒介する superselection rule の概念などが浮び上がってきます。そのどちらも、観測可能な物理的対象・物理的世界、および、それを包含しつつ直接観測にはかからない非物理的対象を含めた非物理的「全体世界」との間の相互関係、という類似の本質を有する問題に、各々、状態ベクトルおよび物理量に重点をおいた観点からアプローチするものであったということに気づきます。同様のことを、加速器実験等、散乱事象の実験的検証という文脈で input→output の時間軸に沿って考えれば、観測と直結した(自由)粒子描像を与える漸近場と、粒子間相互作用の包括的記述に必要な Heisenberg 場との間の相互関係の問題として、散乱理論という形を取ることになります。抽象的・一般的にいうと、直接「目で見える」現象を記述する概念と、その背後に

在って「目に見える」現象を統一的・法則的に支配する「目に見えない」本質概念との相互関係に関わる問題であり、数学的構造としては、環や体のガロア拡大と共通の本質を持つものと考えられます。例えば、単離可能なハドロンと単離不能なクォークとの関係を明らかにするカラー (or クォーク) 閉込め問題や、ミクロの量子論的世界とマクロの古典的世界の関係等々、現代物理学で重要な位置を占める問題は殆どすべて、この範疇に入ってしまうような気もしてきます。

—"BRS cohomology" for states & observables—

具体的なレベルで言うと、非可換ゲージ場の共変的演算子形式に関する九後さんとの共同研究は、中西先生の方法論に従って不定計量空間における $\langle\langle \text{physical subspace} / \text{unphysical total space} \& \text{subsidiary condition} \rangle\rangle$ の問題を、BRS変換の導入によって解決しようとするもの。同じく '79年のカラー閉込めに関する共同研究では、この枠組での observable の特徴付けと量子論的 Maxwell 方程式についての '78年の仕事および Goldstone 定理を方法論的武器として、QCDにおける superselection 構造の解明を目指したということになると思われます。このようにして、非可換ゲージ場の共変的演算子形式の枠内での、"visible" subsystem $\rightleftharpoons$ "invisible" total system の問題は、結局、"BRS cohomology" for states & observables という形に整理されることが次第に明らかになってきました (→ '82 名古屋大学集中講義 & 数研講究録469, pp.1-14; 前掲書 N.Nakanishi & I.O. 参照)。

—より現実的な状況の理論的記述を目指して—

この頃の時期までは、 $\langle\langle \text{真空上に定義された相対論的場の量子論こそが、自然そのものの「本当」の姿を記述している} \rangle\rangle$ と信じ、散逸的・熱的效果を伴って不可逆に進行する現実世界の諸現象を、 $\langle\langle \text{人間の眼・感覚・測定装置の不完全さに由来する「見掛けの像」に過ぎず、「本物」の理論に「粗視化」の人為的操作を施して導かれた「近似的」描像} \rangle\rangle$ と見做すオーソドックスな考え方に、それほど深い疑問を感じてはいませんでした。しかし、量子論の代数的定式化の立場から見れば、真空表現における場の量子論とは、せいぜい、物理量の代数の非常に多様な (ユニタリー非同値な) 表現の中から、エネルギー正のスペクトル条件 (および既約性) で特徴付けられた特殊状況を選び出したものに過ぎない；しかるに、この現実世界は、物質の存在しない真空状態にあるわけでは決してなく、また、真空状態からの少数粒子の励起だけで記述される散乱状態でもない。むしろ、莫大な個数の「粒子」の集積によって熱的・散逸的現象が生起するこのマクロ世界の只中に加速器が設置されているにもかかわらず、我々の注目する素粒子反応が起こるミクロ領域では bulk matter effects が十分良い近似で無視可能なため、「理想化」= 近似概念としての「真空」= 「絶対零度」を基準にして素粒子世界が記述されるに「過ぎない」、というのが事の「真相」ではないか？更に、このマクロ世界自体、熱力学・統計力学の熱平衡概念で記述し切れるものでないことは、熱伝導・対流・相転移、等々、もろもろの非平衡過程に満ち溢れた自然現象や、宇宙的規模での重力作用による「時空の歪み」、宇宙の歴史的進化 (の「状況証拠」) などから、明らかなことでしょう。そうだとすると、特定の理想化された理論的概念だけを用いて、森羅万象すべ

てを一挙に解き明し尽す「窮極理論」なるものを求める乾坤一擲のファウスト的願望は、きわめて非現実的な「無い物ねだり」ということにならないでしょうか？我々に可能なことは、対象とする自然の領域・aspects と記述精度を限定し、まずその範囲内で「最も正確」な理論的記述を目指すということ。次いで、得られた諸理論相互の繋がり具合・移行の仕方の理論的解明を通じて、記述された領域相互の関連・移行を明らかにし、そのようにして理論的記述の範囲を広げつつ、一步一步、自然の重層的・歴史的な構造に迫るよりほかに手はないように思われます。そういう視点で量子物理学の理論体系を眺める時、まず気になるのは、「真空」＝「絶対零度」における素粒子世界を記述する相対論的場の量子論、有限温度における熱平衡状態を記述する量子統計力学、熱平衡からはずれたところで生起する動的な熱的・散逸的現象を記述すべき非平衡統計力学、さらには、そうした動的諸過程を包括して不可逆・不均一に進行する自然・宇宙の歴史的進化を記述する理論的枠組、等々、が相互にどう関係づけられるのか？という問題です
[ただし、あとの二つについては、一般的・整合的な理論の枠組そのものが未だ出来上がっているというわけではない]。

— (ゲージ) 場の量子統計力学 at $T \neq 0^\circ \text{K}$ —

勿論、最初から上のような視点に従って研究を進めていたわけではなく、偶々、実時間と温度の両方を含んだ量子場の統計力学 (thermo field dynamics) を、Alberta 大学の高橋 康先生から教えて頂いて興味を持ったのが発端です。そこで、この理論形式と久保-Martin-Schwinger (KMS) 条件に基づく Haag-Hugenholtz-Winnink による統計力学の代数的定式化との相互関係を考えながら、これをゲージ場の場合に拡張することを試みました。ここで面白いのは、その数学的基礎としての「冨田-竹崎理論」が教える理論の特徴的な構造です：熱平衡を記述する KMS (=Gibbs) 状態は混合状態であり、対応する Hilbert 空間での表現は可約で、物理量の代数の commutant (即ち、表現空間において、物理量を表わす演算子と可換なすべての演算子) はスカラー倍演算子以外に非自明な演算子を含みますが、対象系の代数とこの commutant は、 $\langle\langle$ 粒子/空孔 $\rangle\rangle$ のような鏡像関係になっています。エネルギー・スペクトルも丁度、符号が反対であり、この「空孔」は、対象系から熱浴に吸収される「粒子」を記述するものと解釈されます。この解釈の妥当性は、Minkowski 空間中を等加速度運動する観測者が静止系の真空状態において観測する (Planck 分布に従う) 「熱的」粒子生成 [Unruh 効果] やブラックホール周囲での粒子生成 [Hawking 効果] において、event horizon のこちら側と向こう側の領域での物理量の間に同様の関係が見出されることによって支持されるでしょう。ただ、「熱浴」が対象系と瓜二つの mirror image になるというのは、普通の「熱浴」のイメージからすると不自然に見えるかも知れませんが、その根拠は熱力学第0法則に求めることができます。第0法則は、物体Aと物体B、物体Bと物体Cが、各々「熱平衡的」に接触していれば、物体Aと物体Cの接触関係も熱平衡的である ($\rightarrow$ 推移律) という経験的事実によって、2物体間の「熱平衡的接触関係」が一つの「同値関係」であることを保証し、そこから熱平衡状態の概念を導き出すもので、その同値関係に伴う同値類のパラメータが「温度」ということになります。したがって、同一温度下での「熱平衡的接触関係」を保つ限り、対象系に接触させる相手の物体、即ち「熱浴」には、ど

んな物体を選んでも、その「個性」が熱平衡の本質を左右することなく、他の物体と常に置き換え可能であり、本来、熱平衡状態の概念にはこういう意味の *universality* が備わっているのです。そこで、「熱浴」として接触させる物体を常に同じ種類の物体に固定（＝標準化）し、例えば「理想気体」を用いることにすれば、周知の「絶対温度」による熱平衡状態の規定づけが再現されます。上に述べた対象系と「熱浴」との鏡像関係は、これとは正反対に、できる限り対象系に相似な「熱浴」を想定することに対応します。何れにせよ、対象系の熱平衡状態を支配しているのは、対象系と「熱浴」との「接触面」におけるエネルギー授受のプロセスであり、それは「熱浴」内部の物理的構造の詳細には殆ど無関係に決まるということでしょう。統計力学における<<対象系とその Gibbs 状態>>という定式化によって、一旦捨て去られてしまったかに見えた「熱浴」という不可解にして重要な熱力学的描像は、こういう抽象的な形ではあれ、統計力学の代数的・一般的定式化の中にちゃんと生き残っていたのです。こうして、我々は熱平衡領域でも再び前と同じ図式、（目に見える「部分系」としての）対象系 $\rightleftharpoons$ 「全体系」＝対象系＋「熱浴」、に出会うことになったわけです。

こういう定式化から得られるもう一つの教訓は、純粋状態としての真空上の既約表現の理論から統計的混合という「粗視化」によって熱平衡状態が導かれるという通常の理解と逆に、真空概念とは、対象系の外に実在する「外界・環境・熱浴」を無視し、対象系にのみ注意を向けることによって、「近似的に」得られるものに「過ぎない」、という認識が成立し得るということです。即ち、上記の理論形式で有限温度の理論から出発して、ミクロ領域に向かって時間尺度を *scale up* すると、それに対応して温度が下がり $T=0^\circ\text{K}$ に近づくと同時に、 $T\neq 0^\circ\text{K}$ の Gibbs 状態での期待値を通して *couple* していた対象系とその *commutant* としての「熱浴」が、 $T=0^\circ\text{K}$ の真空上で *decouple* してバラバラになってしまう状況を見ることができます。勿論、この「現実世界」が温度一定でない以上、熱平衡状態も限定された適用範囲の中で意味のある一つの近似に過ぎないのですが、熱的・散逸的なマクロ領域の概念・理論のみが一方的に「近似」なのではなくて、真空表現に基づくミクロ世界の記述にも、本来あるはずの対象系と「外界」との相互作用・相関が、ミクロ系の記述に際して十分良い精度で無視可能という事情に基く「近似」が入り込んでいるということの、正当な認識は重要と思われます。

—非平衡定常状態とエントロピー生成—

既に述べたように、「現実の」自然現象の殆ど全ては熱平衡から外れた所で生起し、非平衡性・不可逆性が本質的な役割を演ずる過程から成っているように思われます。しかるに、量子論とのつながりを保った系統的な理論が存在するのは、量子統計力学による熱平衡領域、および、線型応答理論によるそこからの微小なズレの領域の扱いまでに留まり、ミクロの量子物理学とマクロの非平衡・不可逆現象を橋渡しする理論的枠組の整備は、重要な未達成の課題です。

ただし、単に非 Gibbs 状態を「非平衡状態」と呼ぶだけでは中味の無い話であり、まず重要なのは、熱機関の定常回転や、レーザーの発振現象、動的平衡＝非平衡の中での化学反応系の安定的回転を特徴とする生物の自己組織化現象や「ホメオスタシス」、等々に見られるような、非平衡《定常》状態の概念と思われれます。エントロピー増大過

程の「終着点」として、エントロピー極大の条件で特徴付けられた熱平衡に対し、非平衡過程では「終着点」からずれた所でエントロピーが絶えず増え続けるため、非平衡定常性の理論的定式化において重要なのは、エントロピーの増加率としての「エントロピー生成」の概念です。しかし、[増大し続けるエントロピー]と[状態の定常性]とは、互いに相反する二つの要求です。そこで、microphysics とのつながりでエントロピー生成の定義付けを試みると、定常性の定式化にはマクロ時間とマイクロ時間の区別が重要であることがわかります。散乱理論での「無限の過去」・「無限の未来」が、現実のマクロ的な時間尺度では、高々、実験開始の初期時刻と終了の時刻に対応した有限の時間間隔に過ぎないように、ここでも、エントロピー増大過程を測るマイクロ時間と状態の定常性を論ずるマクロ時間とは、無限大・無限小を含む尺度変換によって換算可能な2つの時間と見る必要があります。定義されたエントロピー生成は、この尺度変換を実現する van Hove 極限で、熱平衡状態のまわりの微小なズレに限定した線型応答理論が与える輸送係数等の結果を再現することが確かめられます。

もう一つ概念的に重要だと思われる問題は、対象系と「熱浴」が鏡像関係にある熱平衡領域では、熱平衡状態の universality のお陰で、「熱浴」の「個性」を問題にする必要がなかったのに対して、例えば、最も単純な熱機関の循環運動の例ですでに明らかのように、非平衡性の定常的維持には最低限、高温熱源・低温熱源という「複数の熱浴」が不可欠なことです。これは非平衡領域にいたって初めて、「熱浴」・「環境」のもつ非自明な「内部構造」が効き始め、マイクロから熱平衡領域にいたるまで、ただ「空間並進不変性」としての抽象的な意味しか持たなかった「空間的自由度」が、＜熱浴の空間的温度分布＞という明確な物理的な意味合いをもって「顕在化」するということでしょう。時空構造を決める Einstein 方程式の右辺をマイクロの物質運動に繋げるに際して、こういう非平衡統計力学的な問題の関与は、本来避けて通れないのではないのでしょうか？

—マイクロ・マクロ変換—

宇宙の進化、銀河・恒星・太陽系の進化、地球の進化、生物の進化、…、等々という多様な形態での、自然の歴史的進化の諸過程とそれらが形成してきた階層的構造という問題に、反復事象の法則的認識に基づく自然科学が統一的な視点を持ってアプローチしようとする時、上述のような、真空 → 温度平衡 → 非平衡定常 → 断続平衡的進化過程 → …、という一連の移行系列の論理的関連を解明する作業は、まだ抽象レベルのものに過ぎないとはいえ、理論の枠組に関わる基本的な課題と思われます。そこで常に見出されたのは[部分系 ↔ 全体系]というお決まりのシェーマですが、それを取扱う有効な手法を求めて隣接分野を眺めてみると、こういう問題構造は、観測過程論、量子確率論、量子推計理論、量子情報論、光通信理論、等々、工学領域にもわたって広く共通するものであることがわかります。

そこで重要な役割を演ずるものの一つに、無限大・無限小を含む尺度変換によってマイクロとマクロの橋渡しをするマイクロ・マクロ変換の方法論があります (I.O.-M.Ozawa, '92)。その technical detail は省略しますが、[部分系 ↔ 全体系]というシェーマが、ここでは論理学のレベルに拡張され、標準的世界 ↔ 非標準的世界 という形をとります。それによって後者に「無限大数」や「無限小数」を取り入れると共に、後者

から前者へ戻る時、「標準部分を取る」という代数的な操作によって極限操作を実現することができます。

—再び場の理論へ—

この方法を用いると、

formally

非標準的世界：QFT with cutoff= ∞ ~ (超)有限自由度の cutoff theory

U

標準的世界：QFT without cutoff

というシェーマが成り立ちます。こういう見方で、私自身の“母港”ともいうべき場の量子論へ立ち戻った時、何が見えてくることになるのか？そこからもう一度再出発した時、進化する自然の multi-level な統一的記述に向かって新しい一步を踏出すことが、果たして可能になるのか？こう自問しながら、過ぎ去ったこの15年間を振り返ってみると、丁度、重力場の量子論のライフワークに着手された頃の先生と、少なくとも年齢に関しては、同じ地点に私自身近づきつつあるということに思い至りました。師の偉さと迫力には遠く及ぶべくもないとしても、凡人は凡人なりに師を見習って、ともかく前に一步を踏出し、息長く歩き続けなければと、初心に還る思いがします。