

「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) に載っているのです、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 個当たり最大で 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増え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。この情報をとり込むためには、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論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な証明を与えた。

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. Theor. 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。この論説を書いてから 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。