

最近偶然目にした論文を読んで改めて感じたドレスト光子研究に 導かれた自らの研究人生の軌跡と意味について

ドレスト光子研究起点、佐久間弘文

June 23th, 2025

上記のタイトルの一部として「ドレスト光子研究に導かれた自らの研究人生の軌跡」という表現を使いましたが、実は、その様な軌跡について不思議な導きの様なものを感じたのは今回が二度目です。一度目は私が定年退職した2017年頃、小嶋先生より大津先生がドレスト光子研究起点(RODreP)を立ち上げるので参加してはどうかとのお誘いがあり、参加した事です。小嶋先生にはそれ以前から、自分が取り組んでいた流体に関してのある理論モデルの物理的意味を明らかにしたいという事で、色々なアドバイスを頂いていたという経緯があり、小嶋先生からその流体モデルはドレスト光子(DP)研究に役立つのではと言って頂き、すぐにRODrePに参加しました。RODrePのオフィスは自宅から電車で一駅の所にあり、天気の良い日には歩いて行きます。定年退職後すぐにこんな近くで自分の好きな研究ができる環境を頂き、何か“導き”の様なものを感じたのが一度目の体験でした。

当初は手探りの状態でしたが、現時点でここ数年の歩みを振り返ってみると、論文や書籍等の発表において自分が思っていた以上の成果を達成できた様に感じています。何故その様な事ができたのかとその原因を考えてみると、30代以降、定年退職までの研究人生で自分が取り組んで来た研究テーマに関わる重要な概念の幾つかがDP研究にそのまま応用できたという事ではないかと、そう感じています。20代後半から30代にかけて私は、当時世界的に盛り上がっていた非線形科学に関してのテーマの一つである、(1)「古典物理系のハミルトニアン(H)構造」を研究しました。40代以降は、大気や海洋の物理を扱う(2)「地球流体力学」界における「見果てぬ夢」として位置付けられたBjerknessの夢(物理法則に基づく天気予報を可能にする試み)をNeumannがコンピューターで実現しようとした試みを引き継いだ研究を、天気予報から気候変動予測へと大きく前進させる為に、1997年に日本が立ち上げた、地球フロンティア研究/地球シミュレータ計画に参画させて頂きました。上記の(1)と(2)に関する知見が、どの様な形でDP研究に役立ったのかを専門用語を用いて忠実に説明する事は、この短い記事では不可能なので、以下多くの非専門家にとっても馴染み深い天気(あるいは天候)に関する学問としての気象学や海洋学を「たとえ話」として用いて、その概要を説明したいと思います。

気象学も海洋学も流体に関する学問ですが、取り扱う流体の物性が異なるため、当初は別々に取り扱われて来た分野であったと思われます。しかし、地球環境というグローバルな視点で見ると大気と海洋は相互作用しており、それが気候変動に大きく関わっている事が20世紀に明らかになり、その結果「地球流体力学」という分野も生まれました。この事を少し大袈裟に言うなら、気象学と海洋学は統一され地球流体力学となったと言えます。ここで視点を更に広げ、現代物理では状況はどうであるのかを見た場合、20世紀に大きく発展した相対論と量子論は未だ統一されていない状態で、現代物理の最大の課題となっているようです。小嶋先生が提唱するマイクロ・マクロ双対(MMD)理論は、観測可能な物理量のみで量子場理論を構築しようとしたDHR理論を改良した野心的な(量子・古典)論で、それに付け加えて重要な事として、相互作用する量子場は必ずspacelike(超光速)な運動量成分を伴うというGR定理というものがあり、私の研究ではMMD理論とこの定理が重要な要素になっています。ここで、話が急に抽象的になったので、この事を以下に、上述の「たとえ話」に翻訳します。

私たちが日常的に目で確認できる（観測）できる「大気」が存在する領域をたとえ話としての“古典的領域”と呼ぶ事にします。これに対して量子論が支配している領域は一般的には観測不可能ですが、一部は観測可能なものがあります。この“量子的領域”を「海洋」にたとえば、「大気」と接している海面は観測可能な量子状態に対応していると思えます。何故なら、量子論における観測にはマクロ系に属する観測装置の介入が必須なので、ミクロ系とマクロ系の接点を海面にたとえたという事です。時々刻々変化している海面の物理的状態は、大気も影響を与えていますが、海洋内部の力学にも大きく影響されています。（ここでの「たとえ話」では潜水艇による観測は無いものと仮定しています）上述の超光速場の存在を示している GR 定理とは、（「たとえ話」に翻訳すると）海洋内部の力学的相互作用には、大気中で最も伝搬速度が大きい音波（これが光速に対応）よりも速く伝搬する物理現象が伴っているという事を主張している定理であるという事になります。（私のたとえ話では、大気と海洋とは物性が異なるため、海洋中の音速は大気中の音速より大きいといった事をイメージして頂ければよいのではと思います。）

非散逸系としての力学及び電磁気系は、前頁の (1) で触れた H 構造により記述できるので、私は (i) 亜光速の timelike 領域と (ii) 超光速の spacelike 領域における拡張された（物質－電磁）場のユニークな相対論的 H 構造を同定できました。大気の流れと海洋の流れはそれぞれの物性が異なる為にその熱力学的特性も異なります。地球流体力学の専門用語を用いると、（大雑把な表現として）大気は baroclinic 流体、海洋は barotropic 流体です。私の H 構造に関する研究が明らかにした事は、二つの領域 (i) と (ii) の数学的特性がそれぞれ baroclinic 及び barotropic 流体の特性と同型になるという事です。従って、私のたとえ話は単なる思い付きではなく、この同型の存在に裏付けられたものです。この同型を相対論が示す時空構造と結びつけると、現代物理学の未解明のテーマとして存在する dark energy 及び dark matter のモデルを自然な形で導けると同時に、重力エントロピーの新しい意味付け及び、宇宙は物質と反物質の双子構造からなるという宇宙論も dark energy の存在から直接的に導かれます。

1 頁の後半において、20 世紀には大気海洋相互作用の研究が盛んに行われた事に触れました。気候変動の中で最大のエネルギーを伴うものは、社会的にもよく知られている熱帯太平洋で起こるエルニーニョ現象 (ENSO) です。似た現象はインド洋領域でも発生し、こちらは IOD (Indian Ocean Dipole) と呼ばれます。1 頁の中頃に触れた私が参画していた地球フロンティア研究では、ENSO と IOD のどちらも研究の中核的テーマで、日本の研究者が大きく貢献した研究分野です。量子場の相互作用（あるいは量子場と古典場の相互作用）という現代物理学における重要な未解明のテーマを考える際に、私が最も興味を惹かれるものは、熱帯域で生じる大気・海洋相互作用において重要な役割を果たす赤道ケルビン (equatorial Kelvin) 波の存在です。これは地球フロンティア研究システムの長を務められた松野先生が若い頃に発見した特殊な重力波（相対論における重力波ではなく、地球流体力学の枠組みの中で定義される波）で熱帯域における大気と海洋の運動を結合する上で重要な働きを担う存在です。一般に大気海洋の力学において（力学的に定義される）“large scale” の波は回転成分が卓越する Rossby 波と呼ばれるものですが、Kelvin 波は発散性の波動です。

二つ前の段落で、私は相対論の様な古典場を記述する timelike 領域と超光速の spacelike 領域にまで及んでいる量子場の事に触れました。それと同時に、前者は大気のような baroclinic 構造を持つ力学で記述されるのに対して、後者は海洋のような barotropic 構造を持つ力学で記述される事にも触れました。7月に投稿予定の論文で、私は timelike(T) と spacelike(S) 領域間で起こる相互作用には、（未だ実験的には確認されていませんが）理論物理学者が gauge graviton (gg) と呼ぶ massless

な場の存在が関わっている事を議論しています。光に関しての DP 研究が通常の光学と異なる重要な点は、光の場には物理的に意味を持つ縦波成分が存在し、それが DP の力学には必須な存在となっているという事です。それと同様に、T-S 間相互作用に関与する gg もその 4 元ベクトルの発散がゼロではない発散性の成分を持つ事が示されると同時に、それは intrinsic spin と共に軌道角運動量を同時に持つ「光渦」と同様な力学構造を持っている事も示しています。

以上の内容の論文を作成していた二、三か月前に、偶然、極低温の超流動ヘリウム中の量子渦を揺さぶる事で、螺旋状に動く「ケルビン波」を実験的に生み出す事ができたという論文 (Y. Minowa et al.) が今年の 1 月に Nature Physics に掲載された事を知り、衝撃を覚えました。すぐ上の gg に関する記述で、それは軌道角運動量を持つと書きましたが、その様な運動はまさに螺旋運動です。私が自分の論文で議論したものは T-S 間相互作用で、それは思いがけずに螺旋運動を伴っている事がわかりました。しかし、その段階ではケルビン波の事など全く私の考えの中にはありませんでした。しかし、その論文を読んで、私はすぐに 2 頁で触れた大気海洋相互作用における赤道ケルビン波の事を思い出しました。この私の報告で、T-S 間相互作用のたとえ話として大気海洋相互作用の事を持ち出した理由は、まさにここにあります。このような文脈におけるケルビン波の事は、まだまだ研究すべき事は沢山あると思いますが、定年退職後に始めた DP 研究という見かけ上は地球流体力学とは全く異なるテーマの研究が、自分をこのような現実に導いたという事に、不思議な導きを再び感じた次第です。

2017 年にスタートした RODreP での研究活動も来年 3 月で大きな一区切りを迎えます。従って、私からのこの様な形での研究に関する自由な投稿もこれが最後のものになると思います。私が RODreP で DP 研究に貢献できるような成果を生み出す事ができたのは、小嶋先生から先端的量子場理論の事を色々と教えて頂いたお陰であると同時に、大津先生が全体の研究を導いたそのリーダーシップのお陰であるとそう感じております。今年の春には、これまでの私の研究の全体像を、大津先生の DP 研究と共に、Springer Nature から以下の書籍として出版いたしました。

主題：Dressed Photons to Revolutionize Modern Physics

副題：Exploring Longitudinal Electromagnetic Waves and Off-Shell Quantum Fields

by Motoichi Ohtsu & Hirofumi Sakuma

今回、この報告を書くに当たり、地球フロンティア研究でお世話になった松野太郎先生（赤道ケルビン波の先駆的研究）や山形俊男先生（IOD の先駆的研究）の事を懐かしく思い出しました。量子場理論の小嶋泉先生、ナノ光学分野を創設した大津元一先生をはじめとして、DP 研究の推進に積極的に協力して下さった九大 IMI (Institute of Mathematics for Industry) の福本康秀先生、落合啓之先生と、上記二名の地球流体力学分野の先生との出会いに感謝致します。