

宇宙地球フロンティア実地研修 報告書

Report for Onsite Training in Earth-Space Frontier Science

氏名/Name	和田淳太郎 Juntaro Wada
所属部局/ Affiliation	理学系研究科 物理学専攻 Department of Physics , Graduate School of Science
研究機関・企業名 /Hosting Institution	東京女子大学 Tokyo Woman's Christian University
期間/Period	2020年4月1日 ~ 2023年7月13日 *西暦で記入 04/01/2020 07/13/2023 mm/dd/yyyy

(English version is below)

修士1年から、東京女子大学の尾田欣也教授と共同研究を行った。内容としては、波束による場の量子論の記述である。自分は共同研究者として、アイデアの提案、具体的な計算、論文の執筆にわり大きく貢献した。

場の量子論とは、素粒子物理学を記述する理論の枠組みであり、素粒子物理学における波束の重要性は、特にニュートリノ振動の文脈などで指摘されてきた。実際、場の量子論の計算に波束による運動量の不確定性効果を取り入れることで、従来の始状態を運動量固有状態として近似する定式化では無視されてきた非自明な現象を予言できる。しかし、これまでの議論は主に具体的な現象論(例えばニュートリノ振動)を前提とした文脈に限られ、一般論として場の量子論そのものを波束によって記述する試みはほとんどない。

今回尾田教授と行った研究は、この一般論としてのローレンツ共変な波束による場の量子論の記述である。これは、これまで運動量固有状態によって展開されてきた場の量子論の記述を波束によって書き換える、という試みの一環である。特に、我々は先行研究で用いられていたガウス波束を、ローレンツ共変な波束に替えて議論し直すという方針で研究を進めた。ローレンツ共変性は、素粒子物理学において重要な対称性である一方、ガウス波束そのものはこれを明示的に破っているため、相性が悪いと言える。実際、具体的な計算において対称性がないことに起因する難しさが存在し、先行研究では積分計算を鞍点方に頼って近似していた。この点、理論形式をローレンツ共変な波束によって再定式化すると、この困難の一部ないしは全てが解決される可能性がある。

まず、修士一年の4月からスカラー場の場合について議論を開始した。場の量子論では、場は通常、運動量固有状態の展開によって表される。これを波束の言葉で書き換えるには、1粒子状態の部分空間における完全性を示す必要があった。尾田教授の元での議論の結果、完全性をローレンツ共変な形で示すことに成功し、これを使ってスカラー場をローレンツ共変な波束の生成消滅演算子で展開できることを示した。以上の結果を論文にまとめて、修士2年の4月に arXiv に投稿、同年に EPJC にて出版された。

その後、尾田教授と継続して今度はフェルミオン場の場合について議論を行った。ニュートリノはフェルミオン的一种であるため、現象論の観点から言えば、フェルミオンの重要性はスカラーと比較して高い。しかし、フェルミオンはスピンを持つため、ローレンツ変換に対する変換性(表現)がスカラー場と比較して非自明である。議論の結果、これまでニュートリノ振動の文脈で使用されてきた波束は、1粒子状態の表現としては不自然な(ウィグナー表現に従わない)ことが分かり、この点を解決する波束の表現を発見できた。また、この波束が満たす1粒子状態の部分空間における完全性を示し、それを用いてフェルミオン場がローレンツ共変な波束の生成消滅演算子によって展開できることを示した。さらに、場の量子論における零点エネルギーの表式を、波束基底を用いて導出し、フェルミオン場の零点エネルギーと、スカラー場の零点エネルギーは丁度符号が逆で出ることを再確認した。これはヒッグス質量の Naturalness 問題が超対称性模型によって、例え1粒子状態が波束であると解釈したとしても、解決できることの示唆を与える結果である。以上の結果を論文にまとめ、2023/7/12に arXiv へ投稿した。

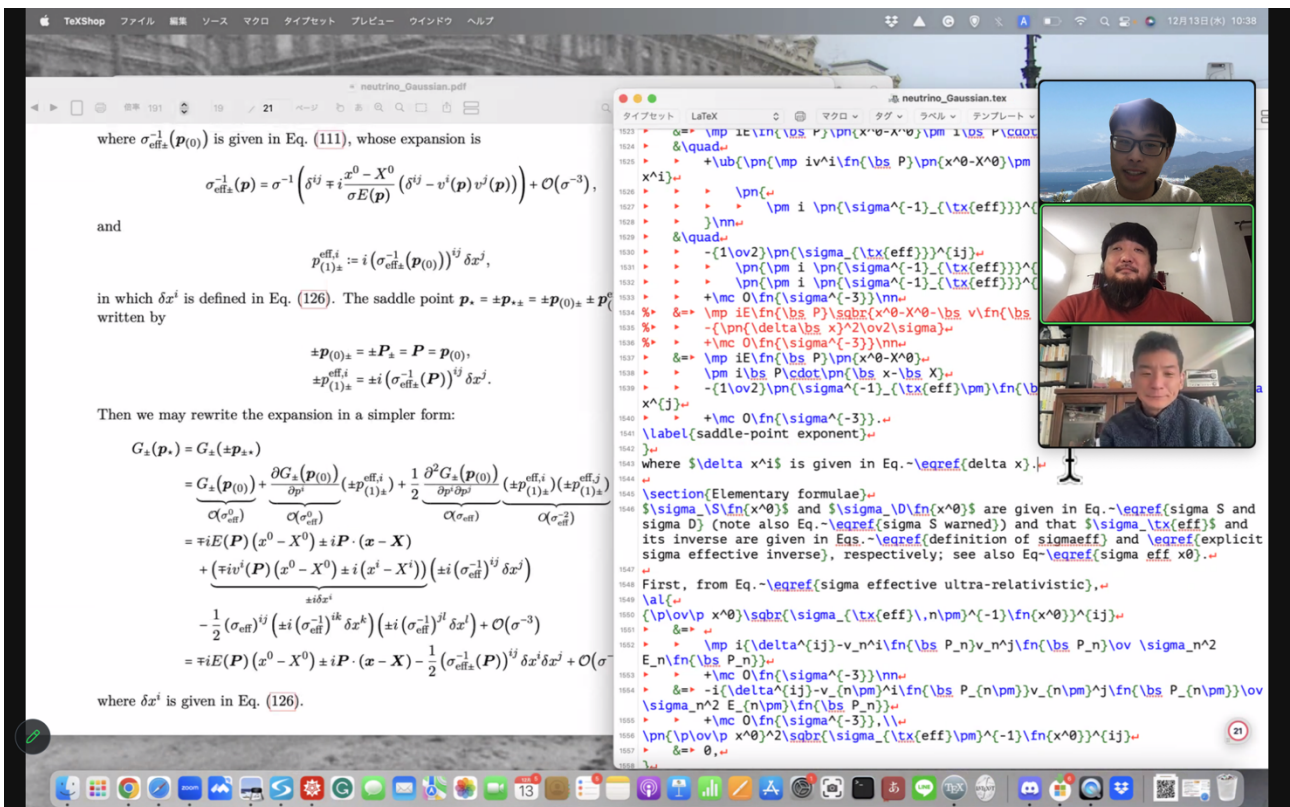
現在も尾田欣也教授との共同研究は継続しており、Shiv Nadar University (インド)の西脇助教を迎え、波束の研究の現象論的応用として、ニュートリノ振動の波束効果の研究を行っている。(2023/12/14 現在)

From the first year of my master's program, I collaborated with Prof. Kinya Oda in Tokyo Woman's Christian University. Our research is based on the description of quantum field theory using wave packets. As a co-researcher, I contributed greatly to the proposal of the idea, the specific calculations, and the writing of the paper.

The quantum field theory is a theoretical framework for describing particle physics, and the importance of wave packets in particle physics has been pointed out, especially in the context of neutrino oscillations. In fact, the incorporation of momentum uncertainty effects due to wave packets into the calculations of quantum field theory can predict nontrivial phenomena that have been neglected in the conventional formulation that approximates the initial state as a momentum eigenstate. However, the discussion so far has been mainly limited to the context of specific phenomenology (e.g., neutrino oscillations), and there have been few attempts to describe quantum field theory itself in general terms in terms of wave packets.

The research that I have done with Prof. Oda is a general description of quantum field theory in terms of Lorentz-covariant wave packets. This is part of an attempt to rewrite the description of quantum field theory, which has been developed using momentum eigenstates, using wave packets. In particular, we have replaced the Gaussian wave packets used in previous studies with Lorentz-covariant wave packets. Lorentz covariance is an important symmetry in particle physics, while Gaussian wave packets themselves explicitly break this symmetry, making them incompatible. In fact, difficulties due to the lack of symmetry in concrete calculations exist, and previous studies have relied on the saddle point method to approximate integral calculations. In this respect, reformulating the theoretical formulation in terms of Lorentz-covariant wave packets may solve some or all of these difficulties.

We have been collaborating for nearly three years. Recently, as one of the applications of wave packets to field quantum theory, we invited Assistant Professor Kenji Nishiwaki of Shiv Nadar University to calculate neutrino oscillations using the wave packet formalism.



尾田教授(東京女子大)、西脇助教(Shiv Nadar. U, インド)との共同研究の様子