

# リサーチェンスを用いたアノマリー相殺構造の拡張と応用

所属：京都大学物理学・宇宙物理学専攻 博士前期課程 2年（助成時）

同上 博士前期課程 3年（現在）

氏名：世田 拓也

## 研究の背景

素粒子物理学は、物質の最小単位と相互作用を明らかにする学問である。この相互作用を実際に計算するには、よく摂動論の考え方が用いられる。摂動論では、まず粒子が相互作用をしない簡単な場合を考え、その上で相互作用によって生じる小さな補正を付け加えていくことで、物理量が計算される。

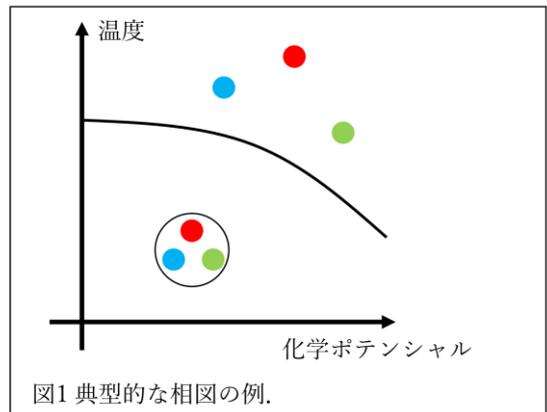
しかし一般には、この摂動論の考え方が破綻する場合もある。典型的には、小さいと考えていた相互作用の補正が次々に大きくなってしまい、有限であるはずの物理量が発散してしまう。このような事態の背後には、摂動論では記述しきれない非摂動効果の存在がある。非摂動効果の解析は容易でないが、物理的に極めて重要である。実際、素粒子の性質から陽子など複合粒子の大きさや質量を第一原理的に導出するとき、非摂動効果は密接に関わってくる。

非摂動効果の解析には、摂動論を超えた特別な理論的枠組みが必要になる。特に強力なものの一つとして、系のアノマリーと呼ばれるものに注目する考え方がある。アノマリーとは、物理系のある対称性が量子効果によって破れてしまう現象のことである。アノマリーが理論の中で無矛盾に相殺すると考えると、実は、素粒子の系の相図に強い制限がかけられる。このような相殺の機構はアノマリー相殺構造と呼ばれ、典型的には[図1]のような相図が議論される。

アノマリー相殺構造の議論の長所は、相図の議論に適用しやすいという点にある。しかし短所もあり、現実世界のように適当な対称性が存在しない場合に用いることは難しい。

他方、非摂動効果の解析に強力な別の理論的枠組みとして、理論のリサーチェンスに注目する考え方がある。リサーチェンスとは、破綻してしまった摂動論を復活させる手法のことである。この手法では、破綻してしまった摂動級数の和を取り直すことで、有限の結果を得る。実はこの有限の結果には不定性が生じてしまうが、これは背後にある非摂動効果の寄与と丁度相殺すると予想されている。このような相殺構造は、理論のリサーチェンス構造と呼ばれる。この構造を逆手に取れば、一見破綻した摂動論から非摂動効果を解析することができるようになる。

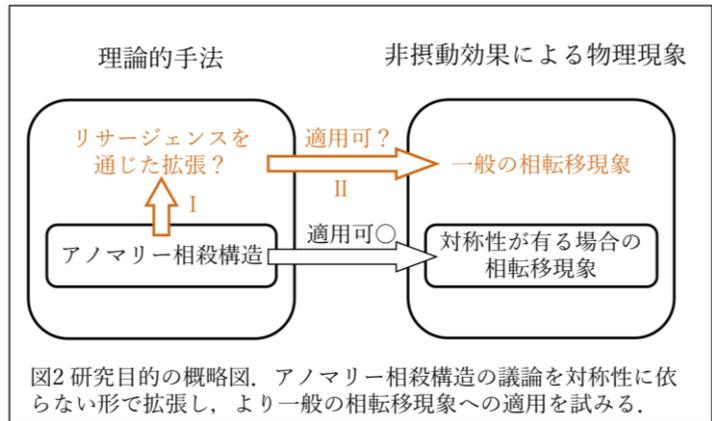
リサーチェンス構造の議論の長所は、系の対称性に依存しないという点にある。しかし短所もあり、与えられた特定の相転移に寄与する非摂動効果を解析するには、実際どのように摂動級数を調べれば良いかが明らかにされていなかった。



以上の理由から、適当な対称性の存在しない系における非摂動効果による相転移は、解析的にはほとんど理解されていなかった。

## 研究概要

本研究は独自に、アノマリー相殺構造とリサージェンス構造の議論の、長所と短所が相補的になっていることに注目した。もし両者の関係を明らかにできれば、リサージェンス構造の議論の対称性に依らない性質を用いてアノマリー相殺構造の議論を拡張し[図2内I]、アノマリー相殺構造の議論の応用性の高さをを用いて相転移を記述することで[図2内II]、問題が解決できると期待される。そこで本研究では、リサージェンスを用いてアノマリー相殺構造の議論を拡張し、実際の応用手法を確立することを試みた。



## 研究成果

### 課題 I

研究では目的を達成するための新たな理論模型を考案した。この理論模型を調べて見ると確かに、アノマリー相殺構造を記述しつつもリサージェンス構造も備えたものになっているようであった。しかし、その結果を厳密に正当化する際に困難が生じたため、その困難を別の観点から見直すための補助的な研究を行った。この成果は、国際論文誌 *Journal of High Energy Physics* へ掲載され[1]、日本物理学会 2021 年秋季大会学生優秀発表賞を授賞するなど[2]、高い評価を得ている。

### 課題 II

研究ではリサージェンス理論が相転移現象の記述に有用であることを具体的に示す、ある理論模型に注目した。その結果、リサージェンス理論の手法が良く機能しているだけでなく、より一般の理論においても同様に機能することが見出された。この成果は、論文誌 *Progress of Theoretical and Experimental Physics* へ掲載された[3]。更に Editor's Choice に選ばれ[4]日本物理学会の注目論文として紹介動画が掲載されるなど[5]高い評価を得ている。

[1] T. Onogi, T. Yoda, "Comments on the Atiyah-Patodi-Singer index theorem, domain wall, and Berry phase", JHEP 12 (2021) 096

[2] [https://www.jps.or.jp/activities/awards/gakusei/2021\\_student\\_presentation\\_award.php](https://www.jps.or.jp/activities/awards/gakusei/2021_student_presentation_award.php)

[3] T. Fujimori, M. Honda, S. Kamata, T. Misumi, N. Sakai, T. Yoda, "Quantum phase transition and Resurgence: Lessons from 3d N=4 SQED", Prog. Theor. Exp. Phys. (2021) 103B04. (研究助成への申請期間と助成開始期との間で論文が公開され論文中に研究助成への謝辞を掲載することができなかったため、恐縮ですがここで謝意を示させていただきます)

[4] 日本物理学会誌 2022 年 2 月号

[5] <https://jpsht.jps.jp/article/1.063.html>