



Title	Towards Infrared Finite S-matrix in Quantum Field Theory
Author(s)	平井, 隼人
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/76372">https://doi.org/10.18910/76372</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名 ( 平井 隼人 )	
論文題名	Towards Infrared Finite S-matrix in Quantum Field Theory (場の量子論における赤外発散の生じないS行列の定式化の研究)
論文内容の要旨	

本研究の主な目的は場の量子論において赤外発散の生じないS行列を構成することである。場の量子論は素粒子の力学を記述する最も基本的な理論であり、S行列は量子論的な多体散乱現象において始状態がある終状態に時間発展する確率振幅として定義され、散乱現象を定量化する最も基本的な量である。しかし、4次元時空において光子や重力子のような質量が0のBose粒子を含む場の量子論では、エネルギーが低いBose粒子による相互作用の効果により、S行列が無限大になってしまることが知られている。この問題は赤外発散問題と呼ばれる。従来の解析法では、S行列の赤外発散は諦め、赤外発散が生じない散乱断面積を直接計算することでこの問題は避けられていた。これに対し、私達の研究は赤外発散の生じないS行列を構成し、より正確に素粒子の散乱現象を記述できる理論を模索するものと位置づけられる。そのためにはエネルギーが低いBose粒子の相互作用の性質をよく理解する必要がある。この論文の前半では、漸近対称性・軟光子定理・メモリー効果と呼ばれる赤外自由度の力学についての性質を表す3つの事柄についての様々な性質を明らかにした。より具体的には、量子電磁気学において、漸近対称性に付随する電荷の物理的状態空間における表現をBRST形式に基づいて明らかにし、その電荷に関する保存則を導出した。また、その電荷保存則と軟光子定理・メモリー効果が等価であることをsubleading orderまで含めて示した。

後半部では、素粒子の散乱現象における漸近状態に長距離相互作用の効果を取り入れることで赤外発散が生じないS行列の構成を図る方法について議論した。赤外発散が生じないS行列に対する正しい漸近状態の候補としてFaddeev-Kulish(F-K)のドレス化状態が知られているが、F-Kのドレス化状態はゲージ不変でないという問題があった。私たちは、従来のゲージ不変性の条件には相互作用の効果が正しく取り入れられていないことを明らかにし、相互作用の効果を取り入れた正しい条件の下ではF-Kのドレス化状態はゲージ不変であることを示した。さらに、F-Kのドレス化状態に対する漸近対称性の電荷の作用を調べることで、F-Kのドレス化状態は電子が相対論的クーロン場に囲まれた状態であることを明らかにした。

これらの研究結果はF-Kドレス化状態の物理状態としての性質の良さ、数学的な整合性を裏付けるものであり、今後の赤外発散が生じないS行列の構成の研究の基礎となるものと期待される。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( 平井 隼人 )		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	兼村 晋哉
	副査 教授	大野木 哲也
	副査 准教授	青木 正治
	副査 准教授	山口 哲
	副査 助教	田中 実

**論文審査の結果の要旨**

本博士論文では、量子電磁気学などの質量のない粒子を含む理論での赤外の問題を取り扱った。この種の問題は、非常に基礎的な理論の枠組みに関わる問題でありながら、実験にも関わる重要な問題である。本論文の主要な結果は次の二つである。

一つは、漸近対称性と呼ばれるものが、物理的な対称性であると示し、さらに漸近対称性の保存則がソフト光子定理と呼ばれている定理と同等であることを明らかにしたことである。漸近対称性は、一見すると物理的でない、つまり対応する保存量が状態によらず常に 0 である対称性のように見えてしまう微妙な「対称性」である。そのため、その取り扱いは論争的になっていた。本論文では、BRST 形式と呼ばれる標準的な定式化を用いて、漸近対称性が物理的な対称性であることを完全に明らかにし、さらに準主要項を含むソフト光子定理が、この対称性にともなう保存則であることを示し、この分野に大きな影響を与えた。

もう一つの結果は、Faddeev と Kulish によって提案された電子の漸近状態が物理的な状態であることを、BRST 形式を用いて示し、赤外発散のない S 行列理論への道を切り開いたことである。従来の定式化では、量子電磁気学の S 行列には赤外発散が生じる。この赤外発散の処理としては、通常「包括的定式化」(inclusive formalism)と呼ばれる定式化を用いる。これは観測装置の解像度という概念を導入し、散乱断面積としては有限の値を得るというものである。それに対して、Chung そして Faddeev と Kulish によって漸近状態の概念を変更し、赤外発散のない S 行列を得ようという試みがあった。しかし当時は BRST 形式が発達しておらず、Faddeev と Kulish の状態が「物理的状態」でないと思われていて、それを物理的な状態にするために迷走していた。本論文では、現在では標準的な手法である BRST 形式を用いて Faddeev と Kulish の状態が物理的状態であることを完全に明らかにした。これは、赤外発散のない S 行列理論を構成するのに大きな一歩であり、今後包括的定式化との比較、実験による検証などにつながり、この分野に大きな影響を与える結果である。

このため本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものとして認める。