

論文審査の結果の要旨

氏名：神 田 直 大

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：衝撃波型背景時空における Bi-local 場

審査委員：（主査） 教授 藤 井 紫麻見
（副査） 教授 出 口 真 一 准教授 二 瓶 武 史
助教 三 輪 光 嗣 特任教授 仲 滋 文

素粒子物理学において現在確立されている標準模型は、物質的粒子としてのクォークとレプトン、物質的粒子間に介在して力を及ぼすゲージ粒子、さらに粒子に遍く作用して質量を付与するヒッグスから構成されている。発見の遅れたヒッグス粒子も 2013 年に存在が確認され、標準模型の構成表が確立されるに至った。ところでこの表に含まれるゲージ粒子は、強い力の粒子（グルーオン）、電磁力の粒子（光子）、及び弱い力の粒子（ウィークボソン）からなり、人類に古くから知られている重力の粒子（重力子）は、通常は表の枠外に補足的に配置されている。これは、万有引力が上の 3 つの力に比べて 35 桁以下の弱さであることに起因する。一般に、物理現象を特徴づけるエネルギーの大きさや相互作用の広がり、その現象に関与する物理定数を組み合わせて作られる次元（単位）の大きさから決まる。素粒子の世界では、自然定数として光速とプランク定数が関与しているが、さらに万有引力定数が関与するならば、これらの自然定数により 10^{-35}m 程度の極めて小さな広がり、エネルギーに換算して 10^{19}GeV （＝プランクエネルギー）と言った途方もなく大きなエネルギーの尺度が導かれる。逆に言えば、プランクエネルギー程度の大きなエネルギーがなければ、重力の素粒子相互作用への寄与は無視できることになり、重力子が表の枠外に置かれるのである。しかし、素粒子の基礎理論と期待される弦理論には重力子が自然に含まれ、またビッグバン膨張機構で形成される宇宙の最初期はプランクエネルギーの世界であり、これが現在の宇宙に繋がっている。従って、重力子の関与する素粒子物理の探求は、超高エネルギー物理の本質を理解する上で、現実的で意義のある課題である。

さて、超高エネルギーの粒子は、静止質量によるエネルギーが無視できるため、あたかも質量 0 の粒子のようにふるまう。1971 年に P.C. Aichelburg と R.U. Sexl は、このような粒子のエネルギー運動量テンソルが衝撃波型重力場の源となることを証明した。この結果、超高エネルギー粒子同士の相互作用では、一方の粒子が生成する衝撃波型重力場、あるいは対応する衝撃波型背景時空の歪みにより他方の粒子が散乱される過程が、主要な反応であることが明らかになった。この背景の下に、T. Dray と G. 'tHooft は 1985 年に超高エネルギー粒子の散乱過程を解析し、特徴的な構造をもつ散乱振幅を導いた。その散乱振幅は、プランクスエネルギーの逆数中に比例するきわめて小さな値であり、現時点でそれが表す物理現象を検証することはできないが、'tHooft に引き続いて入射粒子の扱いを場の理論にしたもの、弦模型に置き換えたものなど、多くの試みがなされた。また、1997 年に J.Maldacena により提案され、近年の素粒子物理の中心課題の一つとなった AdS 双対ゲージ理論のある種の極限が衝撃波型背景時空と関係する可能性もあり、衝撃波型背景時空の研究は素粒子基礎理論の観点からも興味を持たれることになった。

さて申請者は、'tHooft を含む一連の研究が本質的に局所場の散乱を扱ったものであり、弦模型の場合もこのような時空での弦の散乱自体は議論されていないことから、弦模型や束縛された多粒子系のような非局所構造を持つ系の散乱問題が、重要な課題であることに注目した。非局所構造を持つ系は、弦模型や bi-local 場模型のばね定数のように、模型自体に広がりやエネルギーに換算できる固有の物理定数を含んでいる。bi-local 場模型は、湯川により提案された非局所場理論の現代的解釈に基づく力学的模型であり、相対論的なばねにより束縛された 2 粒子系である。ばね定数をハドロンの束縛エネルギー程度に選べば、bi-local 場模型は中間子系の有効理論となるが、プランクエネルギーに近い大きさとすれば弦模型に類似した模型になる。本論文の目的は、弦模型に近いばね定数を持つ bi-local 場模型の衝撃波型背景時空における散乱過程を解析し、プランクエネルギー以下の運動エネルギーをもつ系であっても、ばね定数の効果として比較的大きな散乱振幅を導く可能性を調べようとするもので、先行研究の無い興味深い研究課題である。

論文は、全 7 章とその内容を補足する補遺 4 節からなり、その概要と評価は以下のとおりである。第 1 章は導入部であり、Aichelburg-Sexl の重力理論を背景として始まる'tHooft の超高エネルギー粒子の散乱

理論の発展経過が、要領よくまとめられている。第2章は、衝撃波型背景時空そのものの解説であり、この時空の計量と時空を生成するエネルギー運動量テンソルとの関係が、過不足なく論じられている。また関連する補遺において、超高エネルギーの点粒子を源とする衝撃波型背景時空では、万有引力定数をプランクエネルギーに書き変えた定数が、計量の δ 関数型の特異性と一体となって現れることを示している。

第3章は、平坦な4次元 Minkowski 時空における bi-local 場模型の紹介である。湯川により提唱され、多くの日本の研究者により発展させられた bi-local 場模型は、ハドロンの有効理論の性格を持つ非局所場理論の一つである。この模型は弦模型に類似しているが、より簡単な構造で臨界次元の制約もない。衝撃波型背景時空は、光的時間に現れる特異性を除けば殆ど平坦な Minkowski 時空であり、平坦な時空の bi-local 場模型の特性が本質的に曲がった時空にも引き継がれる。申請者は、このような bi-local 場模型を定式化する作用積分を与え、それから得られる拘束条件が系の波動方程式と非物理的状態を取り除く補助条件に帰着することを、丁寧に説明している。

引き続き第4章と5章が、本論文の中心となる衝撃波型背景時空にある bi-local 場模型の古典論であり、未踏の新しい試みである。bi-local 場模型を曲った時空で定式化する際、最も問題となるのが2粒子間の相互作用の設定である。平坦な時空では、通常は粒子間の距離の2乗に比例するポテンシャルで設定されるが、曲がった時空では一般座標変換で不変な2粒子の位置の関数で設定しなくてはならない。申請者は、B.S.DeWitt が曲がった時空の場の理論で用いた測地的距離を基に粒子間ポテンシャルを設定し、bi-local 場模型の作用積分を与えた。この作用積分には、衝撃波型時空の特異性と共に、プランクエネルギーの2乗に逆比例する微小なゆらぎが含まれている。申請者は、測地線の方程式を巧みに利用してゆらぎを落とす近似を行い、bi-local 場模型を単純な外部ポテンシャル場の問題に帰着させた後に正準形式の理論に移行した。そこで、量子論でユニタリ変換となる巧妙な正準変換を行い、正準変換に相互作用の一部を担わせる形で模型から特異性を取り除けることをしめた。これは、次章で散乱振幅を計算するための布石ではあるが、曲がった時空で bi-local 場模型を定式化する際の重要な手法の発見とも言える。

第6章は本論文の主題であり、衝撃波型背景時空の下での bi-local 場模型を入射粒子とする散乱振幅の解折である。申請者は、正準変換後の bi-local 場模型が光的時間に依存することから、波動方程式を光的時間の Schrödinger 型波動方程式に変形し、時間に依存する摂動の手法で散乱行列を求めた。こうして得られる S 行列は、始状態・終状態での正準変換と、中間状態の光的時間発展から構成されている。申請者によって得られた強調すべき結果の一つは、正準変換後の外部ポテンシャルが0であっても、始状態・終状態の正準変換が S 行列の一部となり、'tHooft が点粒子に対して導いた散乱振幅を正確に導くことである。'tHooft 振幅の一般的な導出の多くはアイコナール近似等の手法で導かれており、ある種の正準変換から近似によらぬ手法で求まることを示したのは、本論文が最初である。申請者はさらに、bi-local 場模型の幾つかの始状態・終状態の下で散乱振幅を計算し、プランクエネルギー以下の運動エネルギーをもつ bi-local 場模型では、大きなばね定数の散乱振幅への影響は比較的小さいことを結論している。この結果は本来の狙い通りではないものの、逆に小さなばね定数が比較的大きな散乱振幅を導くことが示唆され、bi-local 場模型の励起で生成される高階スピン状態が基底状態に縮退して、高階スピン重力場理論に繋がる可能性が浮かび上がった。第7章はまとめと今後の課題であり、得られた結論の詳細な分析と、これに基づく今後の発展の展望が要領よくまとめられている。

以上、本論文は超高エネルギー粒子の相互作用で支配的な衝撃波重力による散乱過程において、粒子の非局所構造が散乱振幅にどのように影響するかを調べた、現代の先端的な研究分野での興味深い試みである。本研究において示された模型の定式化や散乱振幅の導出の手法、また'tHooft 振幅の本質がある種の正準変換にあることの証明などは、何れも今後の超高エネルギー粒子の散乱研究で役立つ重要な知見であり、本研究が素粒子物理学の発展に寄与するところが少なくない。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するために必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

平成27年2月19日