

令和 6 年 5 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14045

研究課題名（和文）強い電磁場における散乱・放射の素過程の定式化と高エネルギー現象論への応用

研究課題名（英文）Formulation of elementary processes in strong electromagnetic field and its application to high-energy phenomena

研究代表者

田屋 英俊 (Hidetoshi, Taya)

国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・基礎科学特別研究員

研究者番号：30807970

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：強い電磁場を系に印加すると系は非線形に応答する。強い電磁場中の非線形過程は、理論・実験ともに十分な理解のない未開拓領域であり基礎的な重要性がある。さまざまな極限状況で強い電磁場が現実生成され、それに伴う非線形過程が重要な現象論的役割も果たす。強い電磁場の非線形物理過程の解明を目的に、本研究では、強い電磁場中の散乱・放射の素過程の定式化を不安定真空中の散乱理論や半古典近似を活用することで完成させた。この定式化を、真空複屈折や誘電率やカイラリティ生成、また、宇宙の再加熱や重イオン衝突といった、非常に幅広い物理過程・系に適用し、高強度場が及ぼす非摂動・非平衡過程の現象論的な帰結を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電球や太陽など、私たちの周りは様々な光で満ちている。身近な光はただ眩しいだけだが、強度を強くすると、虫眼鏡で紙が燃えたりレーザー加工ができたり、非自明なことが起こり出す。すると「光を極限的に強くすると何が起こるのか？」という疑問が浮かぶ。本研究は、この疑問の理論的解明を目指した研究である。極限的に強い光は、従来理論では記述できない非線形な物理過程を引き起こす。この非線形過程は単なる学術の対象ではなく、宇宙などの現実の極限環境で重要な現象論的な役割も果たす。本研究によって、こうした非線形過程を記述する基礎理論が完成し、また、それにより現実の極限系で強い電磁場が果たす現象論的役割の理解が深まった。

研究成果の概要（英文）：A physical system exhibits intriguing nonlinear responses when exposed to a strong electromagnetic field. Such strong-electromagnetic-field processes are not well understood both theoretically and experimentally, and therefore are of fundamental importance. Strong electromagnetic fields are generated in actual physical systems under various extreme conditions, and the accompanying nonlinear processes play an important phenomenological role. To elucidate strong-electromagnetic-field physics, we have completed the formulation of elementary processes of scattering and radiation in strong electromagnetic fields by utilizing the scattering theory in unstable vacuum and the semiclassical approximation. We have applied this formulation to a broad range of physical processes and systems (including vacuum birefringence, vacuum permittivity, chirality generation, reheating in the early Universe, and heavy-ion collisions) and clarified the phenomenological consequences strong fields.

研究分野：原子核理論

キーワード：強い場の物理 非摂動効果 非平衡過程 量子電磁力学 Schwinger機構 Schwinger効果 粒子生成

1. 研究開始当初の背景

本研究は「極限的に強い電磁場の下では何が起こるのか？」という学術的問いに答えることが目的である。強い電磁場を系に印加すると、系は非線形に応答する。電磁場を支配する法則である量子電磁力学は、線形の範囲内では確立している一方で、こうした非線形領域は、理論・実験ともに十分な理解のない未開の領域として残されたままである。また、宇宙をはじめとしたさまざまな極限状況で強い電磁場が現実生成され、それに伴う非線形物理過程が重要な現象論的役割を果たすと考えられている。さらに、レーザーを筆頭に近年の実験的技術の進歩によって、強い電磁場の非線形物理過程を実験室でつぶさに調べる準備が整ってきている。

散乱・放射の素過程は、強い電磁場中の最も基本的な物理過程である。しかし、先行研究では強い仮定(特に、真空崩壊の無視と特殊な電磁場配位を仮定した計算)の下でしか素過程の定式化はない。この仮定は現実の物理系への応用の大きな障壁である。申請者はこれまでの研究において、この仮定を打破し得る理論の開発(Furry 描像の摂動論の不安定真空状況への拡張と完全 WKB 法の場の量子論への応用)を行っており、その知見を応用すれば、これまで未完成であった強い電磁場中の散乱・放射の素過程が定式化できるのではないかと着想した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強い電磁場中での非線形物理過程の解明を目指し、強い電磁場中の散乱・放射の素過程の定式化を完成させる。そして、その定式化をさまざまな物理過程・系に応用する。そうすることで、素粒子・原子核・物性・宇宙といったさまざまな極限物理系で強い電磁場が果たす現象論的な役割を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究内容は、次の2つに大別される。(1)先行研究の限界を打破するために、最近発展した数学的手法(完全 WKB 法)を、強い電磁場の素過程の基本的な理論的枠組みになっている Furry 描像の摂動論に応用する、という新しいアプローチを提案する。そうすることで、これまで重要ながら未完成だった素過程の定式化を確立させる。(2)次に、完成した素過程の定式化を、高強度レーザー・重イオン衝突・Dirac 電子系物質に応用することで、さまざまな極限状況における強い電磁場の非線形物理過程の現象論的役割および実験的シグナルを明らかにする。最終的には、(2)のそれぞれの物理系における現実的な電磁場配位を数値計算で求め、それを基にした定量的計算を実行するが、最初の2年度は、パルス電磁場などの簡単で、解析的な解析が可能な物理過程・系から解析を進める。

4. 研究成果

本研究の最大の目的であった、(1) 強電磁場中の散乱・放射の素過程の定式化は、Furry 描像を基礎にする不安定真空中の散乱理論と完全 WKB 法を活用することで完成させることができた。(2) この定式化の具体的な物理過程・系への応用も、真空複屈折やカイラリティ生成、あるいは、宇宙の再加熱や重イオン衝突など、非常に幅広い過程・系に対して実行でき、さまざまな興味深い結果を得ることができた。また、その他の成果として、(3) 強い電磁場に関する包括的な長編レビューも国際共同研究の下に完成させた。以下に詳しく(1)と(2)の成果を記す。

(1) 素過程の定式化: Furry 描像の摂動論による理論計算は、(i) 背景電磁場によって非摂動的にドレスされた波動関数および伝搬関数の計算、(ii) 波動関数と伝搬関数の適当な組み合わせの積分計算、の2ステップに分けることができる。本研究においては、(i)のステップに Schrodinger 型の常微分方程式の系統的な解法である完全 WKB 法を適用することで、任意の背景電磁場中における非摂動的な波動関数および伝搬関数の系統的な計算方法を開発した。先行研究では、局所的な一様電磁場近似(LCFA; Locally Constant Field Approximation)を(i)のステップに適用することで非摂動的な波動関数と伝搬関数を計算していたが、これはプランク定数が小さな断熱極限でしか正当化できないことを明白にした。(ii)の積分計算についても鞍点法を活用することで系統的に計算が実行が可能である。鞍点法の適用においては、寄与する鞍点の同定にしばしば困難が生じるが、強い電磁場におけるストークス図の構造を対称性に基づき一般的な分類を与えることに成功し、この困難を解決した。ところで、従来の Furry 描像の計算では、真空は時間に依らず安定であることが暗に仮定されているが、一般の強電磁場に対してはこの仮定は成り立たない。従来の Furry 描像を不安定真空中に拡張した場合も同様に完全 WKB 法を基礎にした解析を行い、積分の解析を行った。不安定真空中においては、場の方程式の正エネルギー解と負エネルギー解が交じり合うが、この効果によって、従来の Furry 描像では見逃されていた(運動学的に起きないと思われていた)散乱・放射過程が起こることを示した。

(2) 物理過程・系への応用: 物理過程への応用として、(a) 真空複屈折、(b) カイラリティ生

成で成果を挙げた。物理系への応用として、(c) 宇宙の再加熱、(d) 重イオン衝突を考察した。

(a) 真空複屈折: 強い電磁場を真空に印加すると、真空中の量子ゆらぎと電磁場が結合することで、真空は分極する。したがって、普通の物質中の光の伝搬が物質の分極によって影響を受けるのとまったく同じように、真空中の光の伝搬も真空分極によって変更を受ける。電磁場は方向を持ったベクトル量であるから、この真空分極による光の伝搬の変更も、方向依存性(光の伝搬方向や偏極)を自然に持つ。この方向依存性のことは真空複屈折と呼ばれる。先行研究では、一様磁場や弱く遅い電磁場などの簡単な状況における真空複屈折の解析は存在した。しかし、真空不安定性が重要になる強い電場や早く変調する電場の場合は、従来理論の適用限界を超えており、研究が存在しなかった。本研究で開発した新理論(1)をこの問題に適用することで、従来調べられていなかった真空複屈折の様子を調べた。その結果、早く変調する場合に特徴的な振動的スペクトルが発生することを見出し、それは固体物性における Franz-Keldysh 効果やの類似物として解釈できることを示した。また、真空複屈折のスペクトルと真空からの粒子生成、特に(動的にアシストされた)Schwinger 機構、のスペクトルとの関係性も明白にした。

(b) カイラリティ生成: 平行電磁場が真空に印加されると、量子異常(カイラルアノマリー)によって、カイラリティが非均等な(右巻きと左巻き粒子数が違う)粒子生成が起こる。カイラリティ生成は、微視的には磁場によるランダウ量子化と電場の Schwinger 機構による粒子生成の協奏として解釈することができる。Schwinger 機構は、まさに強い電磁場の非線形効果であるから、したがって、カイラリティ生成のより深い理解には Schwinger 機構の理解が重要である。一方で、カイラリティ生成は、これまでの研究では質量が 0 になるような特殊な粒子の場合が中心的に解析されていた。この場合は Adler-Bell-Jackiw によるアノマリー関係式から直ちに粒子数を計算することができる。これに対し有質量の場合は、計算が困難な疑スカラー凝縮が余分な寄与を与える。そのため、有質量粒子の場合のカイラリティ生成量は、これまで一様定常平行電磁場のような非常に簡単な場合にしか実行されておらず、また、この場合のカイラリティ生成は、質量によって指数関数的に強く抑制されることが知られていた。新理論(1)のステップ(i)を開発する過程において、別の方策として近年物性物理で発展したフロッケ理論を応用した波動関数や伝搬関数の計算法も開発した。この方法をカイラリティ生成に応用することで、これまでの研究で未開であった早く変調する電磁場におけるカイラリティ生成の解析に成功した。興味深いことに、電磁場が早く変調する場合は、遅い場合と対照的に、カイラリティ生成は指数関数的な抑制を受けず、したがって、より多くのカイラリティ生成が見込まれることを示した。

(c) 宇宙の再加熱: ビッグバン宇宙論によれば、私たちの宇宙はインフレーションによって始まった。インフレーションは、インフラトン場と呼ばれる非常に高強度の場によって駆動される。同じ「高強度場」であることを思えば、「強い電磁場」の理論が「インフラトン場」の物理の議論に応用できると期待できる。この類似性に基づいた研究を推進し、特に、インフラトン場がどのように現在の宇宙を構成する物質粒子に転換されたのか、という宇宙の再加熱問題を調べた。(1)で開発した理論を、インフラトン場の場合に書き直すことで宇宙の再加熱を議論し、その結果、従来理論では運動学的に不可能だと思われていた物理過程が可能であることを示し、しかもその過程が従来の物理過程よりも指数関数的に効率的であることを示した。

(d) 重イオン衝突: 今後の実験の進展が期待される中間エネルギー帯における重イオン衝突実験での強い電磁場シグナルの定量的な提案を目指した研究を行った。(1)の理論の適用の前に、まずは重イオン衝突系で実現される電磁場の時空間配位を具体的に推定する必要がある。そのために、ハドロン輸送模型を用いた微視的な数値計算を実行した。結果、宇宙で最強クラスの電磁場が大きな時空間体積で実現され、中間エネルギー帯の重イオン衝突は、強い電磁場の非線形効果を見るのに最適な物理系であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Fukushima Kenji, Hidaka Yoshimasa, Shimazaki Takuya, Taya Hidetoshi	4. 巻 458
2. 論文標題 Chiral anomaly in a (1+1)-dimensional Floquet system under high-frequency electric fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 169494 ~ 169494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2023.169494	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taya Hidetoshi, Ironside Charlie	4. 巻 108
2. 論文標題 Kramers-Kronig approach to the electric permittivity of the vacuum in a strong constant electric field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.096005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hidetoshi Taya, Toru Nishimura, Akira Ohnishi	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of the electromagnetic field in intermediate-energy heavy-ion collisions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 arXiv: 2402.17136	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 田屋英俊	4. 巻 51
2. 論文標題 高エネルギー重イオン衝突における強い場の物理	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 313 ~ 318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fedotov A., Ilderton A., Karbstein F., King B., Seipt D., Taya H., Torgrimsson G.	4. 巻 1010
2. 論文標題 Advances in QED with intense background fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Reports	6. 最初と最後の頁 1~138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physrep.2023.01.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Cao Zheng, Hattori Koichi, Hongo Masaru, Huang Xu-Guang, Taya Hidetoshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Gyrohydrodynamics: Relativistic spinful fluid with strong vorticity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Taya Hidetoshi, Yamada Yusuke	4. 巻 2023
2. 論文標題 QFT approach to dressed particle processes in preheating and non-perturbative mechanism in kinematically-forbidden regime	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1~31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2023)048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 田屋英俊
2. 発表標題 電場中の摂動的および非摂動的粒子生成過程における協調現象に関する基礎研究
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田屋英俊
2. 発表標題 中間エネルギー重イオン衝突でどういう物理系が実現できるのか? : JAMに基づく推定
3. 学会等名 J-PARC-HIの物理を語る夕べ (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hidetoshi Taya
2. 発表標題 Opportunities of strong-field physics in middle-energy heavy-ion collisions
3. 学会等名 Sixth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (Hawaii2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田屋英俊
2. 発表標題 強い電磁場の物理の最近の発展: Schwinger機構の研究を中心に
3. 学会等名 KEK研究会 「熱場の量子論とその応用」 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidetoshi Taya
2. 発表標題 Strong-field physics in heavy-ion collisions
3. 学会等名 The 79th Fujihara Seminar: Prospects for High Field Science (PHFC2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidetoshi Taya
2. 発表標題 Electric permittivity of the vacuum in a constant electric field
3. 学会等名 LPHYS '23 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidetoshi Taya
2. 発表標題 Initial state and thermal equilibrium (Theory)
3. 学会等名 The 9th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田屋英俊
2. 発表標題 「無」から「有」をつくる：素粒子物理学の視点から
3. 学会等名 武蔵野大学数理工学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hidetoshi Taya
2. 発表標題 Strong-field physics in heavy-ion collisions
3. 学会等名 Reimei Workshop "Polarization phenomena and Lorentz symmetry violation in dense matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hidetoshi Taya
2. 発表標題 "Enhancement of chirality production from the vacuum by time-dependent electromagnetic fields"
3. 学会等名 LPHYS '22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田屋英俊
2. 発表標題 「無」から「有」をつくる
3. 学会等名 数理で読み解く科学の世界2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
オーストラリア	Curtin University		