

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540302

研究課題名（和文） 加速度系の量子場とハドロン物理

研究課題名（英文）

Quantum fields in accelerated systems and hadron physics

研究代表者

矢崎 紘一 (YAZAKI KOICHI)

独立行政法人理化学研究所・橋本数理物理学研究室・客員主管研究員

研究者番号：60012382

研究成果の概要（和文）：

一様な加速度系を記述する Rindler 時空での量子場について、特に地平面近くでのその振舞いを研究した。スカラー場、ベクトル場（電磁場）およびテンソル場（重力場）の伝播関数を計算し、これらの場で記述される粒子の交換による力のポテンシャルの性質を調べて、その虚数部と Rindler 時空で知られている Unruh 効果との関係を明らかにするとともに、地平面付近での物質の安定性を考察した。この研究は Phys. Rev. D 誌に出版されている。さらにスカラー場の場合に、その熱力学的性質を調べた。固有モードのエネルギースペクトルに Rindler 時空特有の縮退があることにより、熱力学特性関数には空間 2 次元の特徴が現れることなどがわかった。この研究に関する論文は、現在準備中である。

研究成果の概要（英文）：

Quantum fields in Rindler space, which describes uniformly accelerated systems, are studied, with particular emphasis on their behaviors near the horizon. Propagators of scalar, vector (electromagnetic) and tensor (gravitational) fields are calculated and corresponding particle exchange potentials are examined. The relation between their imaginary parts and the Unruh effect known in Rindler space is clarified and the stability of matter near the horizon is discussed. This work has been published in Phys. Rev. D In the case of scalar fields, their thermodynamic properties are also studied. The energy spectra of the eigenmodes have degeneracies characteristic of Rindler space and the thermodynamic functions are found to have features of those for spatial dimension 2. A paper is now in preparation on this work.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	0	0	0
2009 年度	0	0	0
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：

Rindler 時空、地平面、粒子交換力、物質の安定性、熱力学特性関数

## 1. 研究開始当初の背景

この研究を始める少し前から、加速度系における Unruh 効果を高エネルギー重イオン衝突で観測されている非常に速い熱平衡への移行の説明として考察する研究が注目され、より一般的に地平面付近での量子場の振舞いがハドロン物理と結び付けて議論されるようになった。我々は以前から Unruh 効果に興味を持ち、Rindler 時空を含む一般の静的時空におけるスカラー場やゲージ場の量子化と真空の性質、粒子の吸収、放出に関する研究を行っていたが、ハドロン物理との関連も重要で魅力的なテーマと考え、この研究を開始した。

## 2. 研究の目的

通常の真空が加速度系では有限温度の熱浴として観測されるという Unruh 効果について、量子場の固有モード、伝播関数、熱力学特性関数などを計算して、特にそれらの地平面近くでの性質を詳細に調べ、地平面を持つより一般的な時空での量子場の振舞いに関する理解を深めるとともに、有限温度におけるハドロン物理についての知見を得ることが、この研究の目的である。

## 3. 研究の方法

この研究は、ドイツ、エルランゲン大学の Lenz 名誉教授、東京大学の太田名誉教授との共同研究として進めてきた。二人とは、この研究を始める前から、Unruh 効果に関連して、一様な加速度系を記述する Rindler 時空でのスカラー場やゲージ場の量子化について共同研究を行っていたが、その成果を踏まえて、量子場の伝播関数を計算し、それによって表される粒子交換相互作用の性質、特に有限温度であるための特徴を詳しく調べる。特に地平面付近での振舞いに注目し、加速度が及ぼす物質の安定性や相転移への影響を考察する。また、量子場の分配関数を計算して、Rindler 時空の熱力学的特徴を明らかにする。スカラー場の場合には固有モードが解析的に扱えるため、そのエネルギースペクトルも比較的容易に求められ、精確な数値計算も可能であるが、Rindler 時空の持つ特殊な対称性を活かした解析的な近似表式を得ることも試みる。さらに、Schwarzschild 時空や静的座標での de Sitter 時空など球対称な地平面を持つ時空への応用を念頭において、Rindler 時空の球対称版を考察する。この時空での伝播関数、固有モードのエネルギースペクトル、分配関数を計算し、通常の Rindler 時空でのこれらの量と比較して、球対称性がどのような場合に重要になるかを調べる。球対称な時空では、角運動量の固有状態である部分波に分解して議論すること

ができるが、特に S 波、P 波などの低い部分波を重点的に吟味する。また、静的座標での de Sitter 時空におけるスカラー場については、固有モードの解析的扱いが可能であることが分かっているので、伝播関数や熱力学的性質を調べ、上で述べた Rindler 時空の球対称版による地平面近傍の近似の有効性を定量的に検討する。

共同研究の進め方としては、日常的に電子メールの交換を行うとともに、Lenz 教授を理化学研究所へ招聘したり、研究代表者と太田教授がエルランゲン大学を訪問することにより、三人で顔を合わせて突き詰めた議論を行う機会を作った。具体的には、2010 年秋に 8 週間、2012 年秋には 6 週間 Lenz 教授を招聘、2011 年夏には 1 ヶ月半、2012 年夏には 1 ヶ月、研究代表者と太田教授がエルランゲン大学を訪問した。

## 4. 研究成果

上で述べた方法により、まず、Rindler 時空におけるスカラー場、ベクトル場（電磁場）およびテンソル場（重力場）の伝播関数を計算し、それぞれの場に対応する粒子の交換による静的相互作用のポテンシャルを求めて、その性質を調べた。ポテンシャルは非自明な虚数部を持ち、それは Rindler 時空の量子場に特有な 0 エネルギーの固有モードの存在によること、この固有モードは慣性系における加速粒子の放射に対応していることが分かった。ポテンシャルの長距離での振舞いは交換される粒子のスピンによって定性的に異なり、虚数部で見ると、スカラー粒子では減少、ベクトル粒子では対数的に増加、テンソル粒子ではさらに 1 次のべきが加わった増加となること、この振舞いはそれぞれの粒子が結合する源の Minkowski 空間での振舞いで決まっていることも分かった。この結果は、回転していないブラックホールを特徴づける物理量は質量と電荷だけであるという、いわゆる “no hair theorem” と関係している。電磁場（ベクトル場）の場合には、ゲージ場であることを用いて、Wilson ループや Polyakov ループの相関によるポテンシャルの計算を行い、両者の違いについて考察した。これは格子 QCD による重いクォーク間のポテンシャルの計算で現れる同様な違いの理解につながると考えられる。また、加速度による見かけの力は、束縛系において、電場中での原子に対する Stark 効果と類似の不安定性を生じることも分かった。この不安定性による寿命は地平面からの距離で決まるが、水素原子の場合、距離が 0.1 mm 付近で寿命は急激に短くなり、0.01 mm 程度の変化で、宇宙の年齢程度から束縛状態とは見なせなくなる程短くなるという結果を得た。同様な考察を他の束縛系に適用すると、例えば原子

核が不安定になるのは距離が 100 fm 程度であることも分かった。さらに、簡単な自己相互作用のあるスカラー場で、Rindler 時空での Higgs 機構を調べ、地平面付近では局所温度 (Tolman 温度) の上昇により、場の揺らぎが増加して、相転移ではないが、対称性の破れが見え難くなることも分かった。これらの結果は “Static interactions and stability of matter in Rindler space” と題する論文にまとめられ、Phys. Rev. D 誌に掲載されている。

Rindler 時空における量子場の熱力学については、スカラー場に対する分配関数を計算した。固有モードのエネルギースペクトルには Rindler 時空特有の縮退があり、加速度方向の運動モードの励起は抑えられて、熱力学的性質は空間 2 次元の特徴を持つことが分かった。固有モードは解析的に扱える部分が多いので、分配関数をはじめ熱力学特性関数を数値的に求めることも困難ではないが、上の特徴を用いると、これらの物理量に対して簡単に精度のよい近似表式が得られた。同様な計算はこれまでも行われたが、上述の加速度方向の固有モードの抑制を考慮しない近似が用いられていたために、分配関数などを過大評価していることが分かった。また、現実存在するスカラー粒子 (擬スカラー粒子も含む) は有限な質量を持つが、熱力学的性質への影響は、粒子の Compton 波長と地平面からの距離の比で決まり、この比が 100,000 程度までは質量 0 の場合と区別できないが、10,000 程度で無視できなくなり、1,000 以下では定性的な違いをもたらすことも分かった。さらに質量が大きく (上の比は小さく) になると、分配関数は指数関数的に減少する。Minkowski 時空でも同様な減少が見られるが、Rindler 時空ではその減少がさらに早まることも分かった。このような結果は現在論文としてまとめる作業を進めている。Rindler 時空の球対称版としては、1+1 次元の Rindler 時空の空間部分を動径座標とし、これと角度部分を記述する 2 次元球面 (S<sup>2</sup>) との積空間を考察した。球対称な時空では、角運動量が保存するので、部分波に分解した議論が可能である。各部分波での固有モードは、通常の Rindler 時空の場合と同様に解析的な扱いが可能で、球対称な地平面を持つ時空の近似として有効であること、その際スカラー場の質量に元の時空に依存する付加項が加わることなどが分かった。この時空におけるスカラー粒子の伝播関数、粒子交換による相互作用ポテンシャル、熱力学分配関数などを計算し、通常の Rindler 時空でのものと比較した。地平面の近くで、多くの部分波が寄与する場合には、両者は本質的に同等であること、球対称性が重要になるのは、S 波、P 波などの低い部分波が主要になる場合で

あることが分かった。また、静的座標での de Sitter 時空を球対称な地平面を持つ時空の例として取り上げた。この時空におけるスカラー場の固有モードや伝播関数は、各部分波については解析的な扱いが可能で、熱力学分配関数なども比較的簡単に計算できる。こうした物理量は、それら自身興味あるとともに、その地平面付近での振舞いは、上で述べた Rindler 時空の球対称版による近似の試金石となると考えられるので、比較検討を行っている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Multi-quark hadrons from heavy ion collisions,  
S. Cho, T. Furumoto, T. Hyodo, D. Jido, C. M. Ko, S. H. Lee, M. Nielsen, A. Ohnishi, T. Sekihara, S. Yasui and K. Yazaki (ExHIC Collaboration),  
Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 212001 査読有

2. Static interactions and stability of matter in Rindler space,  
F. Lenz, K. Ohta and K. Yazaki,  
Phys. Rev. D83 (2011) 064037 査読有

3. Structure of  $\Lambda(1405)$  and threshold behavior of  $\pi\Sigma$  scattering,  
Y. Ikeda, T. Hyodo, D. Jido, H. Kamano, T. Sato and K. Yazaki,  
Prog. Theor. Phys. 125 (2011) 1205 査読有

4. Big-bang nucleosynthesis with a long-lived charged massive particle including  ${}^4\text{He}$  spallation processes,  
T. Jittoh, K. Kohri, M. Koike, J. Sato, K. Sugai, M. Yamanaka and K. Yazaki,  
Phys. Rev. D84 (2011) 035008 査読有

5. Studying exotic hadrons in heavy ion collisions,  
S. Cho, T. Furumoto, T. Hyodo, D. Jido, C. M. Ko, S. H. Lee, M. Nielsen, A. Ohnishi, T. Sekihara, S. Yasui and K. Yazaki (ExHIC Collaboration)  
Phys. Rev. C84 (2011) 064910 査読有

〔学会発表〕（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

矢崎 紘一 (YAZAKI KOICHI)

独立行政法人理化学研究所・橋本数理物理学

研究室・客員主管研究員

研究者番号：6 0 0 1 2 3 8 2

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者