

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博士（理学）	氏名	Ar Rohim
学位授与の要件	学位規則第4条第①・②項該当		
論文題目			
Relativistic Effects in Gravitational Quantum States (重力場中の量子状態における相対論的效果)			
論文審査担当者			
主査	教授	小寫 康史	
審査委員	教授	稲垣 知宏 (情報メディア教育研究センター)	
審査委員	教授	志垣 賢太	
審査委員	教授	山本 一博 (九州大学)	
〔論文審査の要旨〕			
<p>重力は時空の幾何学として重力を捉える一般相対性理論により記述される。その理論が予言する重力波は 2015 年に検証され、発生源であるブラックホール連星の観測的証拠が得られたことになる。また、銀河系中心のブラックホール天体現象の観測、その基礎となる、一般相対性理論に基づくブラックホールの研究も進み、それらの発見や貢献に近年のノーベル物理学賞が授与された。このように重力を記述する一般相対性理論は、数々の検証が重ねられ、理論の完成から 100 年を過ぎた現在でも一般相対性理論と矛盾する明確な実験や観測は報告されていない。</p> <p>一方、一般相対性理論はミクロの世界を記述する量子力学との融合がなされておらず、いわゆる量子重力理論は未完成であり、実験的な検証もほとんどない。重力に付随する量子力学の重要な実験として、1975 年の Collella-Overhauser-Werner の実験、すなわち、重力場中での中性子干渉実験がある。その実験は、重力場ポテンシャルの異なる経路を通過した中性子の物質波の干渉実験であり、量子力学の予言通り、重力ポテンシャルによる異なる位相を量子力学系に生じていることが確認されている。また、近年では冷却中性子の量子力学的な重力の束縛状態の検証実験が行われている。これらの実験は、重力と量子力学の理解や検証に今後、役立つと考えられ、重力相互作用が量子性を持つかどうか検証に向けた理論研究も行われている。これらの研究を通じて、重力と量子力学の融合研究に期待が寄せられている。</p> <p>Ar Rohim 氏の学位論文では、中性子の重力場中の束縛状態に着目し、その相対論的效果を研究した。論文の第 2 章では実験概要をまとめている。その束縛状態は、低エネルギーの中性子が床境界面でバウンスする状態のエネルギー固有状態に対応する。現在の実験では相対論的效果を考慮する必要はないが、ひとつの可能性として相対論的效果を研究した。その取り扱いのため、クライン-ゴルドン方程式、及びディラック方程式を用いた解析を行なっている。解析手法として、一様加速度系であるリンドラー空間が、等価原理から定常重力場と見なすことができるため、そのリンドラー空間に境界条件を導入し、クライン-ゴルドン方程式、ディラック方程式を調べた。定常状態でのエネルギー固有値を導出して、相対論効果とその起源に関する考察を行なった。</p>			

クライン-ゴルドン方程式に関しては、境界で波動関数がゼロとなるディリクレ境界条件を課することができる。一方、ディラック方程式に対しては、その境界条件を課すと自明な解しかなく、新たな境界条件が必要となる。その代わりとして、MIT bag 模型に基づいた境界条件、すなわち、粒子の確率流が消えることを境界条件として課している。これにより、非相対論的極限で、重力場中の束縛粒子に対してシュレーディンガー方程式を用いた結果に帰着する結果を得た。論文では、これらのシュレーディンガー方程式、クライン-ゴルドン方程式、ディラック方程式、さらに、マヨラナ粒子に対する場合に、エネルギー固有値を求め、それらの比較を行なっている。クライン-ゴルドン方程式による結果は、常に、非相対論的極限であるシュレーディンガー方程式の結果より大きくなることを示している。また、ディラック粒子とマヨラナ粒子は同じエネルギー固有値になることを示し、そのエネルギー固有値は、基底状態から初めのいくつかの準位状態では、非相対論的極限であるシュレーディンガー方程式の結果より小さくなるものの、より高い準位では、その関係が逆転することを示している。その理由についても、数学的に議論している。また、エネルギー準位間の遷移エネルギーは、相対論的取り扱いをした場合は、常に非相対論的の場合より大きくなることを示している。

また、上記の結果を得るのに境界条件が重要性も論じている。そこで、論文の後半では境界での反射におけるスピン状態に着目した解析を進めている。特に、MIT bag 模型に基づいた境界条件を拡張したカイラル MIT 境界条件を採用する際の任意性に着目した。カイラル MIT 境界条件を採用した、有限領域の1次元系に閉じ込めたディラック粒子のエネルギー固有値と固有状態を調べ、非相対論的極限での振る舞いや相対論的特徴を明らかにした。さらに、その境界条件の一般化、エネルギー固有状態ディラック粒子の閉じ込め問題において、境界でのスピン状態の変化について解析を行なっている。1次元系に閉じ込めたディラック粒子は一般的なカイラル MIT 境界条件に応じて、反射の前後でスピン状態の変化を明らかにした。また、粒子の確率密度分布への境界条件の依存性を調べている。

これらの成果は、学術専門誌に出版中であり、重力場中の束縛粒子状態の数学的な理解と、境界条件に起因するスピノル粒子の状態の理解に貢献する成果として評価できる。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

1. Ar Rohim, Kazushige Ueda, Kazuhiro Yamamoto, and Shih-Yuin Lin,
“Relativistic quantum bouncing particles in a homogeneous gravitational field”,
Int. J. Mod. Phys. D30 (2021) 2150098, doi:10.1142/S021827182150098X.
2. Ar Rohim and Kazuhiro Yamamoto,
“Effects of chiral MIT boundary conditions for Dirac particle in a box”,
Prog. Theor. Exp. Phys. (2021) in press, doi:10.1093/ptep/ptab122.