

学位論文審査の要旨

学位申請者	金城 佳世 理学専攻2019年度生		論文題目	Controlling dark solitons in the one-dimensional bose gas: comparison between quantum and classical solitons
審査委員	主査:	曹 基哲 教授	インターネット 公表	学位論文の全文公表の可否 : 否
	副査:	番 雅司 教授		「否」の場合の理由
	副査:	河野 能知 准教授		<input type="checkbox"/> ア. 当該論文に立体形状による表現を含む
	審査委員:	北島 佐知子 准教授		<input type="checkbox"/> イ. 著作権や個人情報に係る制約がある
	審査委員:	出口 哲生 教授		<input type="checkbox"/> ウ. 出版刊行されている、もしくは予定されている
学位名称	博士 (理学)			<input checked="" type="checkbox"/> エ. 学術ジャーナルへ掲載されている、もしくは予定されている
(英語名)	(Ph. D. in Physics)			<input type="checkbox"/> オ. 特許の申請がある、もしくは予定されている
※本学学位規則に基づく学位論文全文のインターネット公表について				

学位論文審査・内容の要旨

(1) 質点粒子の量子力学系では、古典的な粒子に対応する量子力学的状態は波束状態すなわち局在する波動で与えられる、と解釈される。自由粒子の量子系を例に挙げると、波動の分散関係には分散があり、波束など局在波動状態は有限時間しか局在できない。波束と粒子の対応を量子多体系に一般化して、波束のような局在波動の量子多体状態を構築することは、一般に全く容易でない。しかし、もし量子多体系において局在する波動状態を構築し、さらに局在波動が複数個存在する量子多体状態を構築できれば、この系における局在波動間の相互作用の振る舞いが具体的に実空間で理論的に調べられ、将来的には冷却原子系など実験との比較から、量子多体系における多体効果の理解が急速に深まることが期待される。さらに、量子多体系における量子状態の新しい制御方法が導かれる可能性もある。(2) 量子多体系とは、非線形相互作用を持つ多自由度の量子系である。議論を分かり易くするため、最初に非線形性と量子性を分離して、非線形相互作用を持つ古典系を考える。ソリトンとは、非線形古典系において、衝突の際に安定性など粒子的な性質を示す局在波動である。本学位論文の研究の目標は、非線形系における局在波動としてソリトンに着目し、ソリトンの衝突等から局在波動同士の相互作用の特徴を解明することである。特に、非線形シュレーディンガー方程式という古典系の可積分偏微分方程式は、超流動やボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)などの低温物理や冷却原子系の分野ではグロス・ピタエフスキー方程式(以下、GP方程式と略記)と呼ばれ、1次元ではソリトン解を持つなど、非線形性に由来する顕著な波動現象を記述する。GP方程式の解から、例えばBECにおける多体効果が解明され、実験でも検証されると期待される。GP方程式の多ソリトン解を一般的に取り扱う手法として、逆散乱法が挙げられる。さらに準周期解のギャップソリトンが存在し、リーマン面の代数幾何学的手法で数学的に一般に記述される。これは数理物理で知られている。(3) 興味深いことに、一次元ボース気体を表す可解模型のリープ・リニガー模型を第二量子化すると、その量子場の生成演算子が従う量子ハイゼンベルグ方程式は、GP方程式と形が一致する。この結果、量子場の演算子の古典極限の存在を仮定すると、一次元ボース気体の量子状態からGP方程式の解としてのソリトン解が導かれる可能性が想像される。ただし、この対応関係の実現は全く自明でなく、そもそも場の演算子の古典極限の有無は未解明である。ところが弱結合の場合に、リープ・リニガー模型の固有状態からその密度プロファイルがダークソリトンと一致する量子状態が導かれ、場の演算子の古典極限が結果的に示唆されることが、本学位論文の先行研究により数年前に示された。ここで注意すると、リープ・リニガー模型の固有状態はベータ仮設法を用いて厳密に導かれる。(4) 本学位論文では、2個のダークソリトンで表されるような密度プロファイルを示す量子状態を、リープ・リニガー模型の固有状態から、はじめて構築した。次に、1個のダークソリトンの密度プロファイルを持つ量子状態でその位相場の境界条件が周期的でなくゼロでない巻き数を持つものを、はじめて導いた。GP方程式において相互作用定数が正で斥力的な場合、ダークソリトン解が出現し、相互作用定数が負で引力的な場合、ブライトソリトン解が出現する。後者は波動の存在領域が局在するが、前者は定数値の場が無限領域に広がり、通常の局在波とは異なる。このためダークソリトンの逆散乱法は技術的に難しく、Faddeev and Takhtajan (1987) で完全に定式化された。また、この結果は冷却原子系など物理分野では知られていない。補足すると、斥力の場合にはBECなど系のバルクな振る舞いと関係し、引力の場合よりも物理的に興味深いと思われる。本学位論文ではダークソリトンの逆散乱法とギャップソリトンの代数幾何学的方法も説明され、研究上便利である。(5) 2022年1月27日に開かれた審査委員会において、博士論文の内容の説明と質疑応答が行われた。同年2月15日に開催された最終試験では申請者が口頭発表し、関連する質疑応答が行われ、最終試験にも合格した。以上から、本審査委員会は金城佳世に博士(理学)、Ph. D. in Physics の学位を授与することが妥当であると判断した。