

論文審査の結果の要旨

氏名 熊野 裕太

本学位論文は、新しい量子場の状態の構成法とそれによって構成された状態の性質について、場の理論の方法を用いて論じたものである。5章からなる。第1章はイントロダクションであり、本研究の背景・動機、直接の目的、および本論文の構成について述べている。第2章と第3章は本論文で利用する場の理論の方法論に関するレビューである。第2章は朝永・ラッティンジャー液体状態とボゾン化の手法、第3章は、ボーズ場の理論における境界場の取り扱いについての共形場理論の方法について述べている。第4章が本論文で初めて得られた結果について述べた中核部分である。ここでは、物性理論、とくに磁性体の理論において標準的に取り上げられるモデルである $S=1/2$ XXZ について、その基底状態を「レニー化」と呼ばれる手続きで変形した状態の性質を議論している。第5章は、全体の結論に充てられている。

本論文では、ある状態から展開係数を n 乗することで別の状態を作る操作をレニー化と呼び、この操作を1次元準長距離秩序状態である朝永・ラッティンジャースピン液体状態に対して施して得られる状態の性質を議論している。ハミルトニアンによらない量子状態の議論は分数量子ホール効果のラフリン状態などが有名であるが、本論文で扱われるレニー化の様な状態構成法は、 n 個のレプリカを虚数時刻 0 で束ねた数学的構造を持っており、これは、実空間における $2n$ 本量子ワイヤの接合系と数学的に同様の構造を持っている。また、ある種の可解モデルではレニー化のパラメータ n をハミルトニアンに含まれるパラメータとも関連づけることができ、その場合には、 n を変化させたときに生じる相転移は物理系の相転移に対応している。これらの背景や関連から本論文で議論されるレニー化された状態には、数理物理的な興味を持たれる。本論文第4章では、場の理論と、有限系の厳密数値対角化による数値計算の二つの手法を用いて、レニー化された朝永・ラッティンジャー液体状態の性質を議論している。

場の理論の方法に基づく議論では、まず、相転移の存在を理解するために、レニー化状態を表現する有効場の理論を構成している。そのために、基底状態が虚数時間 $\tau = \pm\infty$ から $\tau = 0$ への時間発展の結果であることから、 $1+1$ 次元時空で定義された場の理論のコピー（レプリカ）を複数考え、これらが時刻 $\tau = 0$ で共通の値をとるという構造を考えている。次に、時刻0では、すべてのレプリカが同じ状態をとることから、 n 個のレプリカの「重心」座標場と「相対」座標場に分解することによって、これらが分離して、重心座標場だけを

独立に考えることができる。重心座標場は元の場と \sqrt{n} 倍だけ違うが、これは、TLパラメータが n 倍だけ違うというのと等価である。TLパラメータが $1/4$ 以下のTL液体は存在しないので、 $K/n=1/4$ になるときの n 以上になるとTL液体状態ではなくなる、つまり、 $n_c=4K$ である、ということが本論文における場の理論的考察による第1の結論である。さらに議論を進めて、時刻0での境界条件を共形場理論の枠組みのなかで境界場として扱うことにより、 $n>n_c$ では、スピンの縦成分に相当する境界場がレレバントになってロックされ、横成分に対応する場だけが境界場として存在できることから、この状況では、スピンの縦成分は長距離秩序をもつ一方で、横成分は準長距離秩序を持つであろうという予測を引き出している。また、その際の横成分の減衰を特徴づけるスケーリング次元も評価している。これが場の理論による第2の結論である。

さらに本論文では、上述の様な場の理論に基づく議論の正しさを確認するために数値計算を行っている。具体的には、1次元 $S=1/2$ XXZ モデルの数値厳密対角化によってから得られた諸スケーリング次元と場の理論に基づく評価とを比較した。対角成分、非対角成分の相関関数で、それぞれ一様成分と交代成分のスケーリング次元の合計4種類のスケーリング次元の n 依存性を数値的に調べ、場の理論からの予測と比較した結果、 $n=n_c$ 近傍での一致はあまりよくないものの、転移点から離れるにしたがって、2つの評価が互いに一致する様子が確認された。転移点近傍での不一致は厳密対角化計算における有限サイズ効果であるとすると、場の理論からの予測を裏付ける結果である。

以上のように、論文提出者は本論文において、新しい量子状態を構成し、その特性を場の理論の方法によって解析的に評価することで転移点の存在やスケーリング次元を予測し、それを数値計算の結果と比較し、矛盾のない結果を得た。これらの結果は、ハミルトニアンのよらず、直接量子状態から出発する量子統計力学の新しい側面を一步進める成果であり、また、共同研究の成果である部分についても主として熊野氏の寄与によって得られたものと認められる。

これらの理由により、博士（理学）の学位を授与できるものと認める。