(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	Joshi Ashish
論文題目	Neural network quantum states and quantum skyrmions (ニューラルネットワークの量子状態と量子スキルミオン)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>ジョシ・アシシ氏は博士課程で、新規のニューラルネットワーク量子状態を用いて、大きな2次元格子における量子スキルミオンについて研究した。磁気スキルミオンとは、MnSi、FeCoSi、FeGeなど様々な物質で発見された、渦のような構造を持つトポロジーに保護されたスピン構造である。スキルミオンに関する研究のほとんどは、古典的な領域でのみ行われており、「量子スキルミオン」の性質は、それを記述するのに必要なヒルベルト空間が指数関数的に増大するため、まだ十分に理解されていない。</p> <p>博士課程でジョシ・アシシ氏は、量子スピン系を記述し理解するために、ニューラルネットワークという新奇な手法を用いた。近年、量子多体問題への取り組みとして、機械学習技術の利用が進んでいる。その中でも特に有効なのが、人工ニューラルネットワークを用いて量子波動関数を近似する方法であり、ニューラルネットワーク量子状態として知られている。様々な普遍的近似定理により、人工ニューラルネットワークは、十分なパラメータがあれば、どんな滑らかな関数でも記述できることが保証されている。変分モンテカルロ法と組み合わせることで、ニューラルネットワーク量子状態は、既存の方法では困難な、2次元や3次元の量子スピン系の基底状態や時間発展の研究に有効な手法として登場した。学位論文の第一部では、強磁性境界を持つDzyaloshinskii-Moriya相互作用(DMI)の存在下における2次元量子ハイゼンベルグ模型の基底状態の性質を研究した。彼は、基底状態が、特にDMIが大きい場合に、大きなパラメータ範囲に対して量子スキルミオンが存在することを示した。これらの量子スキルミオン中のスピンは弱くもつれ、そのもつれはDMIが小さくなるにつれて大きくなる。また、スキルミオンの中心のスピンが格子の他の部分とはもつれず、完全に分離していることも発見し、局所磁化測定によってこのタイプのスキルミオンを非破壊的に検出する方法を確立した。また、ニューラルネットワークは、DMIが大きい弱くもつれたスキルミオンの検出には適しているが、DMIが小さい領域では、基底状態がほぼ縮退しており、強いもつれがあるため、スキルミオンの記述に苦勞することを発見した。この問題を克服するために、彼はこの領域を特定する方法と、問題を緩和する技術を提案した。最後に、学習されたウェイトの分析によってニューラルネットワークの働きを解析し、プルーニングによってその限界を探った。彼の研究は、ニューラルネットワーク量子状態が、厳密対角化で扱えるサイズをはるかに超える大規模系の量子磁性を記述するために効率的に使用できることを示した。</p> <p>学位論文の第2部では、ジョシ・アシシ氏はニューラルネットワーク量子状態を用いて、磁場勾配下における量子スキルミオンのダイナミクスを研究した。2次元のDzyaloshinskii-Moriya相互作用を持つ量子ハイゼンベルグ模型に対して、ニューラルネットワーク量子状態を使用した変分モンテカルロ法を用いて、量子スキルミオン格子の基底状態を得た。次に、時間依存変分原理を用いて、不均質な外磁場によるハミルトニアンクエンチ後の量子スキルミオンの時間発展を研究した。磁場勾配が量子スキ</p>			

(続紙 1)

ルミオンの効果的な操作方法であることを示した。さらに、量子スキルミオン同士が相互作用すると減衰することも示した。この研究は、ニューラルネットワーク量子状態が、厳密対角化の領域から外れた量子スピン系のリアルタイム進化を研究する有望な方法であることを示している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

ジョシ・アシシ氏は博士課程在学中、新しい数値計算法を用いて、これまで知られていなかった量子スキルミオンの性質を解析した。彼は、従来の手法では解析できなかった量子系について、素晴らしい研究を行った。これらの成果は、Phys. Rev. B誌に掲載済み、あるいはPhys. Rev. Bに投稿中である。

更に、論文発表では、磁気スキルミオンについて丁寧に紹介し、ニューラルネットワークとニューラルネットワーク量子状態について詳しく説明した。特に、2次元のもつれた量子状態を記述するためにニューラルネットワークを用いる動機について説明した。

その後、磁気スキルミオンの基底状態の性質と、磁場勾配によってクエンチされたときの時間発展に関する結果を丁寧に発表した。

発表中および発表後には、聴衆からのいくつかの質問に的確に答えた。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年7月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降