

MERIT 海外長期派遣報告書

工学系研究科 物理工学専攻 博士 1 年 MERIT 12 期生
求研究室 小林海翔

派遣先：Technical University of Munich

受け入れ先研究室：Frank Pollmann Group

派遣期間：2024 年 9 月 29 日～12 月 6 日

概要

ドイツのミュンヘン工科大学に約二ヶ月間滞在し、Frank Pollmann 教授と共同研究を行った。量子多体系の近似手法であるテンソルネットワーク法を拡張し、従来手法の限界を超えた高いエンタングルメントを有する量子状態を効率的に表現する手法開発に取り組んだ。

研究内容

量子多体系のシミュレーションには指数関数的に増大する計算コストが必要であり、現在の計算機をもってしてもごく小さな系しか扱えない。この問題を解決するべくこれまで様々な近似手法が提案されてきたが、中でも大きな成功を取ってきたのがテンソルネットワーク法である。ここでは、量子状態を「分解」することでネットワークを構成し、寄与の少ない成分を切り捨てることで、量子多体系を効率よく取り扱うことを目指す。例えば行列積状態（MPS）への分解は、エンタングルメントが小さい（=面積則に従う）量子状態を効率良く表現できる。多くの低エネルギー状態は面積則に従うため、MPS は強力なツールであるが、エンタングルメントが大きい（=体積則に従う）一般の量子状態には適用できない。

本研究では、体積則に従う量子状態まで効率的に表現可能なテンソルネットワーク法の開発に取り組んだ。もちろん、テンソルネットワーク法は量子多体系の近似手法であるため、対象に何らかの制約を課す必要がある。そこで我々は、複雑性とエンタングルメントに着目し設計指針を構築した。複雑性とは、あるテンソルネットワーク状態に対しどのような処理を行うかという観点であり、例えば時間発展などゲートを繰り返し作用させるような処理は複雑性が高い。高いエンタングルメントを有する状態に複雑性が高い処理を行うには、量子コンピュータの登場を待つ必要があるが、MPS を用いると、エンタングルメントは面積則に制限されるものの、複雑性の高い処理が効率的に実現できる。そこで我々は逆に、対象とする処理の複雑性を制限することで、高いエンタングルメントを有する状態を表現可能なネットワークの設計に取り組んだ。その典型的な性質を評価するために、ネットワークをランダムに初期化した状態を評価したところ、狙い通り体積則のエンタングルメントを有するを見出した。一方で、複雑性の高い時間発展処理では数ステップ程度での破綻が見られた。このように、複雑性が制限され適用可能な処理は限られているものの、従来手法では扱えなかった高いエンタングルメントを持つ量子状態を効率的に表現可能なネットワークの構成に成功した。今後は、多様なベンチマークタスクを通じて、どの程度複雑な処理まで実現可能かを評価し、多彩な量子状態の解明へ向けた応用手法の開拓に取り組む。

現地での生活

ミュンヘン工科大学は、ドイツ第三の都市ミュンヘンの中心部から地下鉄で約 30 分離れた郊外に位置している。ミュンヘンでは交通網が非常に発達しており、10 分に 1 本程度の頻度で走る地下鉄を乗り継ぐ感覚は、(遅延が非常に多いことを除けば) 東京とあまり変わらない。週末にはキャンパス内の滞在施設から電車を乗り継ぎドイツ各都市を巡り、10 月にはオクトーバーフェスト、12 月にはクリスマスマーケットを訪れた。研究室にはアウトドア派が多く、週末に晴れたら一緒にハイキングに行こうなどと話していたが、秋冬のミュンヘンはほぼ毎日どんよりとした曇りか雨で、遂にハイキングに行くことは叶わなかった。代わりに毎週ボルダリングジムに通い、曇り続きで溜まったストレスを発散した。Max-Planck 研究所の学生など、なぜか多くの物理関係者がそのジムの常連であり、マットに座り込み腕の疲労回復を図りつつ、サイエンスの雑談に花を咲かせるひとときが毎週の楽しみだった。

ミュンヘン工科大学の物性理論グループでは複数の研究室が密接に連携しており、例えば学生に Pollmann Group かどうか質問すると「多分？」という曖昧な答えが返ってくる。全体で 50~60 人規模の大所帯ではあちこちの黒板で日々活発な議論が繰り広げられており、筆者も滞在中の交流を通じて多様な分野の見聞を深めることができた。また、それを通じて多くのかげがえのない友人を作ることができた点も本滞在の大きな収穫の一つである。Pollmann 氏とは毎週じっくりと議論を行い、挑戦的なテーマであったが順調に研究を進めることができた。常に笑顔でポジティブで楽観的な氏の姿勢は自分も見習っていきたい。

謝辞

この度、滞在を快諾してくださいました Frank Pollmann 教授に心より御礼申し上げます。また、本滞在の機会をくださった指導教官の求幸年教授、副指導教官の関真一郎准教授、MERIT プログラムに感謝申し上げます。今回の滞在にあたっては、工学系研究科の主催する海外武者修行プロジェクトに経済的支援をいただきました。深く感謝申し上げます。



図 1：物理系の建物と 11 月の初雪。想像以上の寒さで、薄いダウンで来たことを後悔した。



図 2：ジムの様子。ドイツではボルダリングが人気なのか尋ねたところ、「少なくとも物理学者にはね」とのこと。