



Kraków, 13 listopada 2020

dr hab. Marek Rams
Uniwersytet Jagielloński
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
ul. prof. Stanisława Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
marek.rams@uj.edu.pl

Recenzja pracy doktorskiej pana magistra Krzysztofa Chabudy pt.
“Sieci tensorowe w metrologii kwantowej”

W przedłożonej rozprawie doktorskiej pan Krzysztof Chabuda mierzy się z problemem znajdowania fundamentalnych ograniczeń na możliwą precyzję pomiaru narzucanych przez mechanikę kwantową, oraz strategii pozwalających takie granice osiągać. Metrologia kwantowa, bo o niej mowa, niewątpliwie święci w ostatnich latach wielkie sukcesy zarówno na poziomie eksperymentalnym jak i teoretycznym. Szczególnie w tym drugim przypadku coraz wyraźniej mierzy się jednak ona z typowym problemem dla kwantowych układów wielu ciał, gdzie eksponentyjalny wzrost rozmiaru przestrzeni Hilberta z ilością elementarnych składowych w praktyce ogranicza możliwości symulacji do bardzo małych albo wysoce symetrycznych układów (nie mówią nawet o niezwykle cennych ale wyjątkowych przypadkach dla których da się znaleźć rozwiązanie analityczne). Realistyczne modele, uwzględniające lokalne korelacje w układzie, często nie spełniają tych założeń i wymagają rozwinięcia nowych klas metod do rozważania problemów kwantowej metrologii. Przedstawiona rozprawa doktorska wprowadza właśnie taką, bardzo precyzyjną i elastyczną metodę twórczo adaptując narzędzia tak zwanych sieci tensorowych. Sieci tensorowe, które rozwinęły się do rangi jednego z najbardziej precyzyjnych podejść do symulacji kwantowych problemów materii skondensowanej, bazują na istnieniu kompaktowej reprezentacji kwantowego problemu wielociałowego w przypadku – fizycznie istotnym jak się okazuje – gdy występujące w układzie splątanie ma odpowiednio lokalny charakter. Praca doktorska pana Krzysztofa Chabudy pokazuje, że eksperymentalnie istotne problemy metrologiczne także mają tę własność, otwierając tym samym dziedzinę metrologii kwantowej na sieci tensorowe, a środowisko sieci tensorowych na metrologię kwantową.

Przedstawiona praca bazuje na dwóch artykułach, jednym opublikowanym w *New*

Journal of Physics, a drugim w prestiżowym *Nature Communications*. W szczególności za kluczową należy uznać tę drugą pracę która de facto wprowadza sieci tensorowe do świata kwantowej metrologii. W obu tych pracach pan Krzysztof Chabuda jest pierwszym autorem co świadczy o kluczowej roli jaką odegrał w ich powstaniu. Ponadto pan Krzysztof Chabuda jest też współautorem dwóch innych artykułów opublikowanych w cenionych czasopismach: *Physical Review A* i *Organic and Biomolecular Chemistry*. Nie wchodzi one bezpośrednio w tematykę rozprawy, ale pokazują wszechstronność doktoranta. Uważam taki dorobek za bardzo dobry na tym etapie kariery naukowej.

Praca liczy sobie 100 stron, jest napisana po polsku w sposób niezwykle staranny. Poza pojedynczym przypadkiem nie udało mi się nawet dostrzec literówek. Poza wstępem i podsumowaniem składają się ona z cztery rozdziałów. W pierwszych dwóch autor zamieszcza wyczerpujące wprowadzenie odpowiednio do metrologii kwantowej i sieci tensorowych. Rozdziały te przy pierwszym czytaniu mogą się wydawać długie ale kompozycja jest dobrze przemyślenie, a wszystkie wprowadzone elementy okazują się z czasem potrzebne. Rozdziały te z jednej strony służą nakreśleniu problemu, wprowadzając pojęcia takie jak kwantowa informacja Fishera która charakteryzująca czułość układu na mierzone zaburzenie, a z drugiej strony dyskutują naturę narzędzi numerycznych wykorzystywanych w kolejnych częściach. Autor, podobnie jak w całej pracy, znajduje bardzo dobry balans między szczegółowością i dokładnością opisu, a przekazaniem stojącej za nim intuicji. Świadczy to o dobrej znajomości literatury oraz o głębokim zrozumieniu przedstawianej tematyki.

Właściwe wyniki znajdują się w następnych rozdziałach. W trzecim rozdziale autor rozważa modele z lokalnie skorelowanym szumem o jednowymiarowej strukturze, reprezentując je w formalizmie macierzowych stanów produktowych. W celu wyznaczenia kwantowej informacji Fishera kluczowe okazuje się staranne wybranie reprezentacji problemu (spośród kilku matematycznie równoważnych podejść opisanych we wstępie) w taki sposób żeby reprezentująca go sieć była wystarczająco prosta by pozwolić na efektywne i stabilne numeryczne manipulację. Informacja Fishera znajdowana jest tutaj jako wynik globalnej procedury maksymalizacyjnej, która pozwala jednocześnie na szukanie optymalnego stanu początkowego i bazy pomiarowej. Problem taki wydaje się na pierwszy rzut oka niezwykle złożony, ale rozbicie go na elementarne podproblemy które optymalizuje się iteracyjnie okazuje się być skuteczną strategią. W przypadku translacyjnie niezmienniczym algorytm jest rozszerzony tak żeby zwracał wyniki od razu w granicy termodynamicznej. Pragnę tutaj podkreślić, że implementacja algorytmów opartych na sieciach tensorowych wymaga typowo znacznego nakładu czasu. Jest to szczególnie prawdziwe w przypadku rozwijania nowych algorytmów, co typowo wymaga przetestowania szeregu różnych rozwiązań

oraz wyrobienia odpowiedniego doświadczenia numerycznego. Autorowi niewątpliwie udało się skutecznie przejść przez ten proces. Pierwsze trzy rozdziały stanowią doskonały przewodnik dla osób które chciałyby same zaimplementować przedstawiony algorytm, albo dalej go uogólniać usuwając pewne założenia upraszczające problem, a nie miały wcześniej kontaktu z metodami opartymi na sieciach tensorowych. Co wyjątkowo warte pochwalenia autor udostępnił swój kod w otwartym repozytorium.

Szczególnie cenny jest rozdział czwarty który pokazuje zastosowanie rozwijanego formalizmu do konkretnych problemów fizycznych, pozwalając na uzyskanie dokładnych wyników dla modeli które były poza zasięgiem istniejących dotychczas metod. Przykłady obejmują pomiar indukcji pola magnetycznego które wykazuje przestrzenne, lokalnie skorelowane fluktuacje, oraz problem stabilizacji zegara atomowego z fluktuacjami skorelowanymi w czasie. Co warte podkreślenia autor nie ogranicza się tutaj tylko do pokazania wyników numerycznych, ale prowadzi pełną dyskusję porównując z ograniczeniami – jak się okazuje dalece nieoptymalnymi – które da się uzyskać innymi sposobami, oraz rozwijając kompleksowe zrozumienie fizyki problemu. Przy kompleksowości całego opisu zaprezentowanego w tej rozprawie, brakuje mi tylko odrobinę krótkiego komentarza który tłumaczyłby jak formalizm który w przypadku przestrzennym nie wyróżnia kierunków, pozwala na zachowanie przyczynowości w modelu stabilizacji zegara atomowego. Jako ostatni przykład, autor pokazuje że wprowadzony formalizm można także wykorzystać do liczenia podatności kwantowej wierności (której rozbieżności dają informację o punktach krytycznych w modelach materii skondensowanej) dla przypadku stanów mieszanych. Jest to wielkość której uzyskanie było dotychczas poza zasięgiem standardowych manipulacji na sieciach tensorowych.

Podsumowując, z całym przekonaniem stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska pana Krzysztofa Chabudy spełnia wszystkie wymogi ustawowe i zwyczajowe stawiane tego typu pracom i tym samym wnioskuje o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania w procesie o nadanie stopnia naukowego doktora. Przedstawione wyniki tworzą nową metodologię i otwierają szereg zupełnie nowych możliwości zarówno w dziedzinie metrologii kwantowej jak i sieci tensorowych. Nie mam żadnych wątpliwości że rozwinięte podejście przetrwa próbę czasu i tym samym chciałbym złożyć wniosek o wyróżnienie rozprawy.

Z poważaniem,

Marek Rams

dr hab. Marek Rams