



Warszawa, 4 marca 2025

Od hydrodynamiki klasycznej do kwantowej i z powrotem – jak równania Naviera-Stokesa opisują układy kwantowe

Choć równania Naviera-Stokesa to fundament współczesnej hydrodynamiki, jednak zastosowanie ich do układów kwantowych stanowiło dotąd duże wyzwanie. Badacze z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego mgr Maciej Łebek i dr hab. Miłosz Panfil, prof. UW wykazali, że równania te mogą być uogólnione na układy kwantowe, a konkretnie ciecze kwantowe, w których ruch cząstek jest ograniczony do jednego wymiaru. Odkrycie to otwiera nowe możliwości badań nad transportem w jednowymiarowych układach kwantowych. Praca opublikowana w prestiżowym "Physical Review Letters" została wyróżniona przez wydawcę jako „editors' suggestion”.

Ciecze należą do podstawowych stanów materii i odgrywają kluczową rolę w przyrodzie oraz technice. Ich ruch i oddziaływania z otoczeniem opisują równania hydrodynamiki, zwane równaniami Naviera-Stokesa. Rozwiązania tych równań pozwalają przewidywać zachowanie cieczy w różnych warunkach, od ruchu oceanów, przez przepływ krwi w naczyniach krwionośnych, po dynamikę plazmy kwarkowo-gluonowej w skalach subatomowych. Równania Naviera-Stokesa, sformułowane w XIX wieku na podstawie zasad zachowania masy, pędu i energii, należą do fizyki klasycznej. Jednak ruch cząstek podlega prawom mechaniki kwantowej, co rodzi pytanie, czy można wyprowadzić te równania z zasad fizyki kwantowej.

Związek między hydrodynamiką a mikroskopowym opisem ruchu cząstek składających się na ciecz ma nie tylko znaczenie teoretyczne, ale i praktyczne. Równania Naviera-Stokesa zawierają pewne wielkości tzw. współczynniki transportu, które określają, jak szybko zaburzenia w cieczy zanikają, czyli jak szybko układ powraca do równowagi. Ich wartości nie da się wywnioskować bez znajomości mikroskopowych oddziaływań między cząsteczkami. Wyprowadzenie tych równań z praw mikroskopowych umożliwia określenie związku współczynników transportu z oddziaływaniami pomiędzy cząsteczkami.

Równania Naviera-Stokesa w układach kwantowych

Zastosowanie równań Naviera-Stokesa do układów kwantowych stanowiło dotąd duże wyzwanie. Badacze z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego mgr Maciej Łebek i dr hab. Miłosz Panfil, prof. UW zajęli się tym zagadnieniem w kontekście cieczy kwantowych, w których ruch cząstek jest ograniczony do jednego wymiaru. W szczególnych warunkach takie układy wykazują kwantową całkowalność, czyli obecność wielu praw zachowania. Ta cecha ma istotne konsekwencje – umożliwia dokładne opisanie stanu cieczy również w przypadku silnych oddziaływań między cząstkami. – W połączeniu z licznymi prawami zachowania pozwoliło to sformułować równania opisujące hydrodynamikę tych układów, zwane uogólnioną hydrodynamiką. Równania uogólnionej hydrodynamiki są znacznie bardziej skomplikowane niż równania Naviera-Stokesa. Pomimo swojej złożoności, zostały potwierdzone eksperymentalnie w doświadczeniach z ultrazimnymi gazami kwantowymi i stanowiły punkt wyjścia naszej pracy – wyjaśnia mgr Maciej Łebek, pierwszy autor pracy,

opublikowanej w prestiżowym czasopiśmie „Physical Review Letters”

Kolejna różnica między równaniami Naviera-Stokesa a równaniami uogólnionej hydrodynamiki polega na zakresie stosowalności. Równania Naviera-Stokesa są słuszne dla większości cieczy, natomiast równania uogólnionej hydrodynamiki są słuszne tylko dla układów całkowalnych. – W naszych badaniach uwzględniliśmy wpływ dodatkowych oddziaływań między cząstkami, które łamią całkowalność. Jeśli są one odpowiednio słabe, dynamikę układu można nadal opisywać równaniami uogólnionej hydrodynamiki, uzupełnionymi o dodatkowy człon opisujący niecałkowalne oddziaływania. Prowadzi to do równań, które strukturalnie przypominają równanie kinetyczne Boltzmanna – wyjaśnia dr hab. Miłosz Panfil, prof. UW.

W pracy opublikowanej „Physical Review Letters” badacze z UW wykazali, że z uogólnionej hydrodynamiki z dodatkowym członem Boltzmanna wynikają równania Naviera-Stokesa oraz wyprowadzili wzory na współczynniki transportu, takie jak lepkość i przewodność cieplną. – Co ciekawe, uzyskane wartości tych współczynników mają dwa wkłady – jeden od oddziaływań całkowalnych, a drugi od oddziaływań łamiących całkowalność. Klasyczna teoria kinetyczna dla słabo oddziałujących cieczy przewiduje zerową lepkość, co jest sprzeczne z wynikami eksperymentalnymi. Nasza metoda natomiast dostarcza wartości lepkości różnej od zera, co wynika z subtelnej współpracy obu rodzajów oddziaływań – wyjaśnia badacz.

Transport w układach kwantowych

Wyniki badaczy z UW pokazują, że idee hydrodynamiki znajdują zastosowanie również w kwantowych warunkach. Są przykładem mikroskopowego wyprowadzenia współczynników transportu w silnie oddziałujących układach. Mają także praktyczne znaczenie dla współczesnych eksperymentów nad ultra-zimnymi atomami prowadzonych w laboratoriach na całym świecie. Odkrycie to otwiera nowe możliwości badań nad transportem w jednowymiarowych układach kwantowych. W przyszłości naukowcy planują rozszerzenie teorii na bardziej złożone układy oraz eksperymentalne testowanie przewidywań modelu.

Badania zostały wsparte grantem Narodowego Centrum Nauki, NCN OPUS 2022/47/B/ST2/03334.

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzi Instytut: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych Fizyki oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 250 nauczycieli akademickich. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ponad 1100 studentów i ok. 170 doktorantów. Uniwersytet Warszawski w rankingu szanghajskim dla poszczególnych dziedzin (Shanghai's Global Ranking of Academic Subjects) znajduje się wśród 300 najlepszych na świecie jednostek, kształcących w dziedzinie fizyki.

PUBLIKACJA NAUKOWA:

Maciej Łebek, Miłosz Panfil, Navier-Stokes Equations for Nearly Integrable Quantum Gases, Phys. Rev. Lett. 134, 010405 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.010405>

KONTAKT:

Maciej Łebek
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
maciej.lebek@fuw.edu.pl

Miłosz Panfil
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
miłosz.panfil@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

<https://www.fuw.edu.pl>

Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

<https://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html>

Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW250304b_01.jpg

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2025/FUW250304b_01.jpg

Na zdj. Wiry wodne. Rozwiązania równań Naviera-Stokesa pozwalają przewidywać zachowanie cieczy w różnych warunkach, od ruchu oceanów, przez przepływ krwi w naczyniach krwionośnych, po dynamikę plazmy kwarkowo-gluonowej w skalach subatomowych (fot. Maciej Łebek, Wydział Fizyki UW).