

Konsekwencje prawidziwej statystyki ultrazimnych atomów

Krzysztof Pawłowski

Rzucamy dwiema monetami. Jakie jest prawdopodobieństwo wyrzucenia reszki i orła? Każdy może wykonać ten eksperyment samodzielnie – wystarczy rzucić wiele razy monetą podzielić liczbę wyników orzeł i reszka przez liczbę wszystkich rzutów i w ten sposób oszacować to prawdopodobieństwo. W ten sposób przekonamy się, że wyrzucenie na jednej monecie orła, a na drugiej reszki zdarza się w 50% przypadków. Wynika to z tego, że rzut dwoma monetami ma cztery możliwe wyniki: orzeł-orzeł, orzeł-reszka, reszka-orzeł, reszka-reszka. Rzeczywiście połowa to „nasz” wynik. Gdybyśmy jednak uznali obie monety za nierozróżnialne to wynik orzeł-reszka i reszka-orzeł potraktowalibyśmy jako jedną możliwość. Wtedy musielibyśmy uznać, że mamy 3 możliwe wyniki, a to zmieniałoby odpowiedź na pierwotnie postawione pytanie.

W XIX wieku, Leibnitz stwierdził, że obiekty nierozróżnialne nie mogą istnieć. W naszym przykładzie z monetą – zawsze można uznać, że jedna jest z lewej, druga z prawej i w ten sposób je rozróżnić. Lokalizacja, to dodatkowa cecha, czyniąca obiekty rozróżnialnymi. Podążając tym torem myślenia, nawet przedmioty identyczne, są rozróżnialne.

Rzeczywistość okazała się bardziej zaskakująca niż „śniło się filozofom”. Hinduski fizyk S. Bose, zauważył, że zakładając nierozróżnialność cząstek światła, czyli fotonów, można wyjaśnić prawo Plancka. A. Einstein zainspirowany pomysłem Bosego rozwinął teorię gazów, zakładając, że również atomy są nierozróżnialne. Jego sposób liczenia prawdopodobieństw wywołał szok i krytykę w środowisku naukowców, ale wkrótce okazało się, że idea nierozróżnialnych atomów jest poprawna. Porządne matematyczne sformułowanie mechaniki kwantowej pozwoliło zerwać z myśleniem w kategoriach położeń cząstek – tym samym zmieniając podstawy, na których opierał się Leibnitz.

Jedną z konsekwencji nierozróżnialności cząstek i nowej statystyki jest zjawisko kondensatu-Bosego-Einsteina. Zjawisko polega na tym, że po schłodzeniu gazu poniżej pewnej temperatury, znaczna część atomów nagle przechodzi w ten sam stan, prawie nieruchomych atomów tworzących falę materii. W przypadku gazu doskonałego w granicy temperatury dążącej do absolutnego zera, średnio wszystkie cząstki tworzą kondensat. Kluczowe jest słowo średnio – formalizm A. Einsteina doprowadziłby nas do konkluzji, że nawet w temperaturze zera kondensat albo w ogóle się nie pojawia, albo często wręcz przeciwnie – pojawia się z liczbą cząstek większą niż średnia liczba cząstek w układzie. Te olbrzymie fluktuacje, nazywane katastrofą fluktuacji, wskazał E. Schrödinger, krytykując formalizm Einsteina. W istocie, lepsze zrozumienie mechaniki statystycznej pokazuje, że fluktuacje kondensatu silnie zależą od przyjętego modelu. Ostateczny głos należy do doświadczenia – w 2019 roku po raz pierwszy udało się tak zwiększyć precyzję, że pomiar fluktuacji kondensatu Bosego-Einsteina stał się możliwy [1]. Kolejny, dokładniejszy pomiar przeprowadzony na większej liczbie przypadków pokazał, że fluktuacje są mniejsze niż przewidywania w zespole kanonicznym [2]. Oba pomiary zostały wykonane w grupie Jana Arlta z Uniwersytetu w Aarhus i zinterpretowane w ramach wspólnych prac z grupami z Warszawy.

W niniejszym projekcie chciałbym zbadać statystyczne własności ultrazimnego gazu, analizując sam proces chłodzenia. Oczekuję, że w zależności od doświadczalnej procedury możliwe jest wygenerowanie gazu o różnych własnościach statystycznych. Badanie statystyki będącej pochodną metody chłodzenia gazu porównam z modelami typowymi dla kwantowej mechaniki statystycznej. Zamierzam zbadać, jak szczegóły statystyki odbijają się na kwantowych korelacjach między atomami, w szczególności na fluktuacjach gęstości oraz kwantową spójność w układzie. Korelacje w połozeniach cząstek przekładają się z kolei na tempo strat cząstek oraz na dokładność estymacji parametrów charakteryzujących gaz, takich jak jego temperatura. W ostatnim etapie projektu zamierzam zbadać jak zmniejszenie fluktuacji kondensatu przekłada się na jego praktyczne zastosowanie w metrologii.

[1] M. Kristensen et al. Phys. Rev. Lett. 122, 163601 (2019).

[2] M. Christensen et al. Phys. Rev. Lett. 126, 153601 (2021).