

„Nierównowagowa fizyka statystyczna układów kropek kwantowych: fluktuacje prądowe i termodynamika przepływu informacji” – opis popularnonaukowy

Termodynamika i fizyka statystyczna zajmowały się dotąd głównie analizą układów makroskopowych w stanie równowagi termodynamicznej lub bliskich równowadze. Jednak w ostatnich latach coraz większym zainteresowaniem cieszy się dynamika i termodynamika procesów zachodzących w układach o skali nanometrowej w stanach dalekich od równowagi termodynamicznej. Jest to istotne ze względu na znaczenie takich układów w przyrodzie, np. w funkcjonowaniu organizmów żywych, oraz z punktu widzenia zastosowań, np. w urządzeniach nanoelektronicznych. Do ich opisu stosowane są metody nierównowagowej fizyki statystycznej.

Procesy zachodzące w układach nanoskopowych, ze względu na ich niewielkie rozmiary, są z natury stochastyczne – obserwowane są znaczące fluktuacje obserwowanych wielkości fizycznych. Takie fluktuacje są istotne z kilku powodów. Po pierwsze, mogą one dostarczać cennych informacji o dynamice układu, np. o współwystępowaniu różnych kanałów transportu i ich wzajemnych korelacji. Większość badań dotyczących fluktuacji prądowych analizuje ich własności długoczasowe. W mojej pracy koncentruje się natomiast na zastosowaniu nowego i rzadziej stosowanego podejścia analizującego rozkłady czasów oczekiwania pomiędzy kolejnymi aktami tunelowania, które charakteryzuje procesy zachodzące w krótkich skalach czasowych. Pokazałem m.in., że korelacje takich czasów mogą dostarczać informacji o występowaniu przełączania pomiędzy różnymi kanałami przewodnictwa. Co więcej, rozkłady czasów oczekiwania mogą dostarczać informacji o procesach zachodzących w krótkich skalach czasowych, nawet gdy te nie mają wpływu na długoczasowe fluktuacje prądowe. Dalsze badania w tym zakresie będą dotyczyły zastosowania rozkładów czasów oczekiwania w celu charakteryzacji dynamiki układów w których istotny wpływ na transport ma interferencja kwantowa.

Z drugiej strony, choć fluktuacje prądowe zależą od szczegółów dynamiki układu, to okazują się również spełniać pewne uniwersalne prawa. Przykładem są twierdzenie fluktuacyjne, np. twierdzenie Gallavottiego-Cohena określające stosunek prawdopodobieństw dodatniej i ujemnej produkcji entropii. W mojej pracy wyprowadziłem uniwersalne związki pomiędzy momentami statystycznymi czasów pierwszego przejścia (uogólnienia czasów oczekiwania dla transportu dwukierunkowego) oraz długoczasowych fluktuacji prądowych dla przypadku, gdy kolejne czasy pierwszego przejścia są nieskorelowane. Badałem także zakres stosowalności tzw. termodynamicznej zasady nieoznaczoności wyprowadzonej dla układów klasycznych. Określa ona minimalną wartość fluktuacji prądowych związaną z produkcją entropii w układzie. Okazuje się, że w układach kwantowych fluktuacje mogą być zredukowane poniżej tej granicy, co pokazałem na przykładzie kropki kwantowej podłączonej do spinowo spolaryzowanych elektrod i umieszczonej w polu magnetycznym. Wynik ten, poza aspektem poznawczym, jest wartościowy z punktu widzenia zastosowań – pokazuje, że koherencja kwantowa pozwala na redukcję fluktuacji prądowych, co może być istotne dla projektowania urządzeń nanoelektronicznych, np. nanogeneratorów termoelektrycznych opartych o kropki kwantowe. Dalsze badania mają udzielić odpowiedzi na pytanie, czy taka redukcja fluktuacji może być osiągnięta dzięki zjawisku interferencji kwantowej.

Fluktuacje prądowe mogą też prowadzić do zupełnie nowych zjawisk fizycznych. Przykładem jest tu działanie tzw. demonów Maxwella. Są to układy, których dynamika jest kontrolowana przez układy sprzężenia zwrotnego w taki sposób, że energia fluktuacji termicznych zamieniana jest w pracę. Skutkuje to lokalnie ujemną produkcją entropii w danym układzie. Szczególnie interesujące są autonomiczne demony Maxwella, tzn. układy w których lokalnie ujemna produkcja entropii zachodzi na skutek przepływu informacji między dwoma podukładami stochastycznymi, bez konieczności stosowania zewnętrznych układów kontrolnych. Taki układ zrealizowano już eksperymentalnie w układzie dwóch tranzystorów jednoelektronowych. Termodynamika przepływu informacji w autonomicznych demonach Maxwella cieszy się dużym zainteresowaniem w ostatnich latach, m.in. ze względu na chęć głębszego zrozumienia procesów przetwarzania informacji w układach biologicznych. Dotychczasowe badania dotyczyły jednak układów niekoherentnych (klasycznych). W mojej pracy zaproponowałem natomiast fizyczną realizację autonomicznego demona Maxwella, którego działanie opiera się na koherentnych (kwantowych) oscylacjach między stanami spinowymi układu. Dokonałem również ilościowego opisu przepływu informacji w układzie stosując metody kwantowej teorii informacji. W ten sposób pokazałem spełnienie lokalnej wersji drugiej zasady termodynamiki wiążącej produkcję entropii w pojedynczym podukładzie z przepływem informacji. Jest to istotny krok ku stworzeniu bardziej ogólnego formalizmu opisującego przepływy różnych wielkości (informacji, entropii, energii) pomiędzy sprzężonymi układami kwantowymi, co będzie tematem moich dalszych badań.