

Kwantowa nieodwracalność

Nieodwracalność procesów makroskopowych jest ewidentna. Z jajek łatwo zrobić jajecznicę, a odwrotnego procesu jakoś nie udało się dotąd zaobserwować. Z drugiej strony nieodwracalność jest jednym z najbardziej zastanawiających fenomenów fizycznych, bo mikroskopowe prawa fizyki, tak klasycznej, jak kwantowej nie wyróżniają strzałki czasu.

Zgodnie z drugim prawem termodynamiki kierunek upływu czasu jest wyznaczony przez wzrost średniej entropii. Otwartym pytaniem pozostaje, kiedy i jak mikroskopowa odwracalność przechodzi w makroskopową nieuchronność.

Jedną z dróg prowadzących do odpowiedzi jest badanie (nie)odwracalności procesów zachodzących w układach coraz bardziej „kwantowych”. A pierwszy prawdziwie kwantowy pomiar został właśnie przeprowadzony [1].

Badanym układem kwantowym był qubit (połówkowego) spinu jądra atomu węgla ^{13}C ciekłego chloroformu (CHCl_3). Próbka była umieszczona w bardzo silnym jednorodnym polu magnetycznym i jednocześnie wewnątrz cewki umożliwiającej sterowanie i pomiar metodą NMR (jądrowego rezonansu magnetycznego).

Stan początkowy był przygotowywany poprzez odpowiednią sekwencję pulsów radiowych ustalających temperaturę na $T = (75 \pm 3) \text{ nK}$ (co odpowiada częstości $k_B T/h = (1,56 \pm 0,07) \text{ kHz}$). Następnie układ wytrącano z równowagi poprzez impuls o zmieniającej się liniowo amplitudzie i fazie o całkowitym czasie trwania τ od 100 do 700 mikrosekund, czyli dużo krótszym niż charakterystyczne czasy relaksacji badanego układu (nie mniejsze niż 1/3 sekundy). Po osiągnięciu równowagi, ale już ze zmienionym ustawieniem kierunku średniej magnetyzacji, był ponownie wytrącany za pomocą odwróconego w czasie impulsu.

Średnią zmianę entropii określano na dwa sposoby.

Po pierwsze, trajektoria średniej magnetyzacji była mierzona (21 pomiarów pokrywało czas trwania pojedynczego impulsu) za pomocą tzw. tomografii stanu kwantowego, co pozwoliło na określenie przebiegu względnej entropii Kullbacka–Leiblera między odpowiadającymi sobie chwilami procesu i jego odwróconej w czasie wersji.

Po drugie, mierzona była średnia zmiana entropii poprzez pomiar interferometryczny możliwy dzięki wykorzystaniu pomocniczego qubitu spinu jądra wodoru tej samej cząsteczki chloroformu. Detale tego pomiaru zostały szczegółowo opisane w obszernym dodatku do publikacji [1]. Dzięki temu, że częstość precesji Larmora jest cztery razy większa dla jądra wodoru niż dla jądra węgla, możliwe jest niezależne obracanie obu spinów pozwalające na dobieranie czasu, w którym przez oddziaływanie spin-spin informacja jest przekazywana z badanego qubitu do qubitu pomocniczego, a następnie odczytywana.

Wyznaczona w ten sposób średnia wartość entropii dla danego czasu trwania impulsu τ zgadza się z odpowiadającymi mu pomiarami przebiegu względnej entropii Kullbacka–Leiblera. Zgodnie z oczekiwaniem największy poziom wzrostu entropii jest widoczny dla najkrótszego czasu trwania takiego (wytrącającego ze stanu równowagi) impulsu. Dla τ powyżej 300 μs obserwowany jest zanik zależności – wzrost średniej entropii ustala się (w granicy niepewności pomiarowej) na poziomie około pięciokrotnie mniejszym niż dla najkrótszego z badanych czasów.

W podsumowaniu pracy [1] autorzy interpretują zgodność pomiaru dodatniej średniej entropii produkowanej w trakcie całego cyklu z pomiarem odległości między stanami obserwowanymi w trakcie trwania wymuszonego procesu oraz jego odwróconej w czasie wersji, jako pojawianie się strzałki czasu w procesie zrealizowanym w ramach nierównowagowej termodynamiki kwantowej.

W dyskusji fizycznych podstaw obserwacji nieodwracalności w zamkniętym układzie kwantowym autorzy wskazują na niezbędność uwzględnienia w opisie nie tylko odwracalnych równań ruchu (równania Schrödingera), ale również postaci konkretnego stanu początkowego.

To właśnie wybór stanu początkowego prowadzi do nieodwracalności, która jest tym wyraźniejsza, im bardziej nierównowagowy jest wymuszany proces. Zerowy średni wzrost entropii mógłby być obserwowany tylko w przypadku przejścia idealnie równowagowego.

W wywiadach autorzy jednak przyznają, że choć wykazali „wylanianie się strzałki czasu na poziomie kwantowym”, to nie oznacza to uchwycenia, na poziomie doświadczalnym, tego, co ją wywołuje.

Piotr ZALEWSKI

[1] B. Batalhão, A.M. Souza, S. Sarthour, I.S. Oliveira, M. Paternostro, E. Lutz, oraz R.M. Serra; *Irreversibility and the arrow of time in a quenched quantum system*; PRL **115**, 190601 (2015).