

NOBEL: Nieliniowe zachowanie częstości Rabiego w układach polarnych

Dziesięciolecia badań nad oddziaływaniem światła z materią zaowocowało powstaniem wielu teorii i przeprowadzeniem wielu eksperymentów. Niejednokrotnie doprowadziły one do przełomowych odkryć, nie tylko umożliwiając podstawowe zrozumienie elementarnych składników przyrody, ale także ich praktyczne zastosowania, takie jak: komunikacja światłowodowa, wykorzystywana w wielu domach do zapewnienia łączności z Internetem, LASER-y (wzmocnienie światła przez stymulowaną emisję promieniowania) wbudowywane w różnego rodzaju urządzenia, np. w odtwarzacze CD i DVD, czy czujniki odległości, albo OCT (optyczna koherentna tomografia) wykorzystywana w medycynie do wykonywania trójwymiarowych obrazów tkanek biologicznych (np. siatkówki oka czy tętnic wieńcowych).

Zrozumienie mechanizmów leżących u podstaw tych najnowocześniejszych technologii jest możliwe dzięki uproszczonym modelom fizycznym, które reprezentują rzeczywiste, niezwykle skomplikowane układy, takie jak atomy, cząsteczki, kryształy itp. Takie podejście jest często wystarczające do zrozumienia mechanizmów fizycznych efektów obserwowanych w przyrodzie oraz do przewidywania nowych zjawisk w niestandardowych warunkach. W mechanice kwantowej jednym z takich uproszczeń jest szeroko stosowany model dwupoziomowy, w którym złożona struktura obiektu fizycznego (np. atomu) sprowadzana jest do układu o tylko dwóch możliwych stanach - podstawowym i wzbudzonym. Takie podejście pozwala na ilościowy opis wielu zagadnień, szczególnie jeśli interesują nas oddziaływania ze światłem. Jednym z najważniejszych efektów, które można opisać za pomocą modelu dwupoziomowego, istotnym zwłaszcza w kontekście projektu NOBEL, są oscylacje Rabiego.

Aby zrozumieć ideę tego procesu, wyobraźmy sobie, że nasz układ (na przykład atom) jest na początku w stanie podstawowym i chcemy go wzbudzić. Wzbudzenie oznacza, że musimy dostarczyć do niego porcję energii, aby mógł zmienić swój stan. Można to zrobić oświetlając go laserem o ściśle dobranej częstotliwości. Gdy nam się to uda, atom jest w stanie wzbudzonym, jednak jeśli nie wyłączymy lasera, atom będzie "chciał" wrócić do stanu podstawowego i w końcu to robi. Kończymy w punkcie wyjścia, skąd atom ponownie "chce" przejść do stanu wzbudzonego. To przechodzenie pomiędzy stanami nazywane jest właśnie oscylacjami Rabiego i trwa tak długo, jak długo dostarczamy energię do układu, a częstotliwość tych przejść zależy od natężenia lasera - jaśniejsze światło daje szybsze oscylacje.

Różne układy różnie oddziałują ze światłem - niektóre wymagają niewielkich natężeń, podczas gdy inne wymagają znacznie silniejszego światła, aby osiągnąć tę samą częstość Rabiego. Mimo to, reguła jest zwykle taka sama - częstość oscylacji Rabiego jest proporcjonalna do amplitudy pola lasera nawet dla bardzo dużych wartości. Istnieją jednak przypadki szczególne, w których reguła ta nie obowiązuje dla wszystkich amplitud - są to układy polarne. Na przykład, w wielu cząsteczkach średnie położenie dodatnio naładowanych jąder atomowych i średnie położenie ujemnie naładowanych elektronów są rozdzielone. Ta polaryzacja ładunków, będąca cechą wewnętrzną cząsteczki, prowadzi do powstania trwałego elektrycznego momentu dipolowego i czyni taką cząsteczkę układem polarnym. Pod wpływem oświetlenia układy takie również wykonują oscylacje Rabiego, jednak dla bardzo silnych natężeń światła zaczynają zachowywać się w sposób nieliniowy, przeciwnie do układów niepolarnych. Nasze wstępne wyniki sugerują, że zwiększenie natężenia światła może już nie zwiększać częstości oscylacji Rabiego. Możliwe scenariusze zakładają istnienie zakresów intensywności, w których oscylacje Rabiego w ogóle nie zmieniają swojej wartości lub nawet zmniejszają ją i ostatecznie wygaszają.

Zbadanie takich nieintuicyjnych zakresów oddziaływań jest głównym celem projektu NOBEL. Jak na razie wąskim gardłem, które uniemożliwia eksperymentalne zbadanie tych efektów i zastosowanie ich, jest fakt, że dla typowych układów korekty pochodzące z geometrii układów polarnych są stosunkowo słabe. Nieliniowa zależność częstości Rabiego od natężenia światła byłaby znacząca w specyficznej realizacji warunków silnego sprzężenia światło-materia. Ta unikalna kombinacja układów polarnych i silnego sprzężenia została do tej pory słabo zbadana. Chcielibyśmy dostarczyć wyczerpujący teoretyczny opis tych efektów, a przy wsparciu obliczeń numerycznych znaleźć realnych kandydatów do obserwacji opisanych efektów. Byłby to punkt wyjścia do zaprojektowania przyszłych eksperymentów.

Poza fundamentalnym charakterem tego projektu, dobre zrozumienie oscylacji Rabiego w opisanym reżimie może prowadzić do kilku potencjalnie użytecznych zastosowań. Można pomyśleć o czułym pomiarze pola, gdzie niewielkie zmiany natężenia światła prowadzą do znaczącej różnicy w dynamice układu. Inny możliwy scenariusz zakłada znaczną zmianę pola, która nie wpływa na częstość Rabiego, czyniąc dynamikę bardziej stabilną, co może stanowić podstawy fizyczne długotrwałych pamięci kwantowych, które mogą być wykorzystane np. w realizacjach komputerów kwantowych.