



## Ośrodki z koherencją kwantową

Szymon Pustelny

Instytut Fizyki UJ

Istnienie diametralnie różnych praw rządzących światem w skali mikro i makro jest jedną z największych i wciąż nierozwiązanych zagadek przyrody. Makroświat jest intuicyjny (w nim przecież kształtuje się nasza intuicja), a ponadto deterministyczny. Modele tworzone do jego opisu pozwalają dobrze zrozumieć mechanizmy rządzące poszczególnymi jego elementami i w konsekwencji precyzyjnie przewidywać wyniki prowadzonych eksperymentów. Świat w skali mikro jest inny. W nim niczego nie da się powiedzieć z pewnością, a wyniki pomiarów mogą być przewidziane jedynie ze skończonym prawdopodobieństwem. Co więcej, wiele z dokonywanych w mikroświecie obserwacji stoi w jaskrawej sprzeczności z tzw. zdrowym rozsądkiem i makroświatową intuicją. Różny jest także język opisu obu światów. O ile w opisie makroświata używa się pojęć posiadających konkretne znaczenie fizyczne, takich jak siła, masa, temperatura, itd., o tyle pojęcia wykorzystywane w opisie mikroświata często nie mają swoich fizycznych odpowiedników. Przykładowo, *funkcja falowa* będąca podstawowym pojęciem wykorzystywanym w opisie mikroświata nie jest mierzalna, a więc takiego odpowiednika nie ma. Jednocześnie to właśnie funkcja falowa, a dokładniej jej kwadrat, determinuje wyniki prowadzonych pomiarów różnych wielkości fizycznych.

Ewolucja układu fizycznego w skali mikro matematycznie opisywana jest za pomocą *równania Schrödingera*. Równanie to jest równaniem różniczkowym ze względu na czas i współrzędne przestrzenne, i jest ono w swojej formie bardzo zbliżone do klasycznego równania falowego. Okazuje się, że analogia ta idzie dalej – funkcje falowe różnych obiektów mogą ze sobą interferować, a jak wiadomo interferencja jest zjawiskiem falowym. Interferencja ta może być zarówno konstruktywna – zwiększenie prawdopodobieństwa obserwacji jakiegoś efektu (np. wzrost prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w określonym miejscu w przestrzeni), jak również destruktywna – zmniejszenie tego prawdopodobieństwa (np. kompletne wykluczenie możliwości zarejestrowania cząstki w tym miejscu).

Poprzez funkcję falową demonstruje się jeszcze jedna fascynująca własność mikroświata tzw. *superpozycja kwantowa*. Okazuje się bowiem, że w skali mikro układ posiadający kilka tzw. *stanów własnych* nie tylko może znajdować się w tych stanach, ale może również być w ich dowolnej kombinacji (superpozycji). Choć w wyniku pomiaru stanu układu zawsze zmierzony zostanie tylko jeden ze stanów własnych (mówimy przy tym o tzw. *kolapsie funkcji falowej* na

jeden ze stanów własnych), to prawdopodobieństwo, który to będzie ze stanów determinowane jest właśnie przez sam stan superpozycji.

Aby lepiej zrozumieć to zagadnienie posłużmy się przykładem. Rozważmy elektron, który jest cząstką obdarzoną spinem<sup>1</sup> połówkowym  $\hbar/2$ , gdzie  $\hbar$  jest uniwersalną stałą natury, zwaną *stałą Plancka*  $h$  podzieloną przez  $2\pi$ . Z połówkowej wartości spinu elektronu wynika, że pomiar rzutu spinu na wybrany kierunek w przestrzeni zawsze zwróci jedną z dwóch orientacji przestrzennych (*rzutów*) spinu. Nazwijmy je umownie „spin w górę” i „spin w dół” i przyporządkujmy im dwa stany własne elektronu:  $|\uparrow\rangle$  i  $|\downarrow\rangle$ . Mimo, że w wyniku pomiaru zawsze zmierzony zostanie jeden z dwóch stanów własnych elektronu, to przed pomiarem elektron wcale nie musi znajdować się właśnie w tym stanie. Może on np. być w stanie superpozycji  $|i\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$ , gdzie  $a$ ,  $b$  są dwiema liczbami spełniającymi zależność  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ . Prawdopodobieństwo uzyskania na drodze pomiaru konkretnego wyniku determinowane jest przez kwadrat modułu odpowiedniego współczynnika. I tak w rozważanym przypadku prawdopodobieństwo zmierzenia orientacji spinu w górę równe jest  $|a|^2$ , a spinu w dół  $|b|^2$ .

Możliwość istnienia superpozycji stanów oraz fakt pomiaru jedynie stanów własnych jest dosyć problematyczna (była ona np. obiektem długiej i pięknej polemiki pomiędzy Einsteinem i Bohrem nad poprawnością mechaniki kwantowej). Czy rzeczywiście musimy odwoływać się do tak dziwnego pojęcia jak superpozycja kwantowa? Czy nie możemy mówić o pewnej statystycznej interpretacji funkcji falowej – elektron przy jednym pomiarze ma spin w górę a przy innym w dół?

Przez długi czas problem interpretacji funkcji falowej był jednym z najbardziej dyskutowanych problemów naukowych w fizyce (dziś jest on wciąż aktualny, choć obecnie jest to raczej dyskusja z pogranicza fizyki i filozofii). Duża grupa naukowców, w tym m.in. Albert Einstein, skłaniała się do tezy, że funkcja falowa jest wielkością statystyczną. W takim wypadku nie opisuje ona pojedynczych obiektów, jak np. cząstka, a jedynie zespół takich samych obiektów, np. grupę identycznych cząstek. W tym kontekście nie ma konieczności wprowadzania takich pojęć i zjawisk jak superpozycja kwantowa lub redukcja funkcji falowej, gdyż pojedyncze obiekty znajdują się w ściśle określonym stanie. Stan superpozycji zatem nie istnieje.

Choć interpretacja statystyczna jest kusząca, bo unika wprowadzania szeregu nieintuicyjnych pojęć, to jednak nie jest ona w stanie przetrwać konfrontacji z eksperymentem. Istnieje bowiem szereg zjawisk, których nie sposób wyjaśnić w ten właśnie statystyczny sposób, jak np. nielokalność mechaniki kwantowej (*paradoks EPR, kwantowa teleportacja*).

---

<sup>1</sup> Spin, naiwnie, choć nie do końca poprawnie, może być utożsamiony z wewnętrznym momentem pędu obiektu. W rzeczywistości spin jest fundamentalną własnością materii, która determinuje dodatkowy stopień swobody cząstki.

Możliwość istnienia superpozycji kwantowych w skali mikro nasuwa pytanie o to, dlaczego własność ta nie manifestuje się w makroświecie? Przecież ośrodki makroskopowe zbudowane są z atomów i cząstek, dla których superpozycje odgrywają kluczową rolę.

Odpowiadając na to pytanie należy zwrócić uwagę na dwa fakty. Po pierwsze, ośrodki makroskopowe zbudowane są z ogromnej liczby atomów lub cząstek. Jeżeli stany kwantowe poszczególnych elementów budujących takie ośrodki różnią się od siebie tylko nieznacznie, to uwzględnienie olbrzymiej liczby atomów lub cząstek sprawia, że informacja o kwantowych własnościach pojedynczych elementów mikroskopowych jest w ośrodku, jako całości, tracona. Po wtóre, istnieją procesy, które powodują bardzo szybką utratę informacji o stanie kwantowym całego układu. Procesy te noszą nazwę *procesów dekoherencyjnych* i jak wykazano są one tym szybsze, im większy i bardziej skomplikowany jest badany układ.

Niezależnie od istnienia dekoherencji oraz olbrzymiej złożoności układów makroskopowych istnieje pewna wąska grupa ośrodków, w których własności kwantowe, w szczególności własność superpozycji, manifestują się również na poziomie makro. Aby jednak było to możliwe, ośrodki takie muszą zostać przygotowane w specjalny sposób – większość z budujących je elementów mikroskopowych musi być w takim samym stanie kwantowym i stany te muszą podlegać identycznej ewolucji czasowej. Dzięki temu przyczynki pochodzące od poszczególnych elementów układu mogą się wzajemnie wzmacniać prowadząc do pojawienia się bardzo ciekawych własności fizycznych takich ośrodków. Jednak by własności te mogły zostać zaobserwowane, niezbędne jest spełnienie drugiego dodatkowego warunku, tzn. bardzo silne ograniczenie procesów dekoherencyjnych zachodzących w układzie. Dopiero połączenie tych dwóch warunków sprawia, że możliwe jest wytworzenie tzw. *ośrodków z koherencją kwantową* (ang. *coherently prepared media*) posiadających unikalne własności fizyczne. Wyjątkowe własności ośrodków z koherencją kwantową przedyskutujemy na przykładzie ich własności optycznych.

Własności optyczne ośrodków opisywane są makroskopowo przez dwie wielkości fizyczne: współczynnik absorpcji i współczynnik załamania. Pierwszy z tych współczynników determinuje ilość światła transmitowanego przez ośrodek, podczas gdy drugi określa, z jaką prędkością rozchodzi się w tym ośrodku fala elektromagnetyczna o określonej długości (*prędkość fazowa*) lub jak szybko propaguje przezeń impuls światła (*prędkość grupowa*). Tak więc, współczynnik załamania charakteryzuje dyspersję ośrodka. Oba współczynniki są w praktyce dwiema manifestacjami tej samej wielkości fizycznej zwanej *polaryzowalnością ośrodka*. Z tego właśnie powodu zmiana jednego ze współczynników zawsze wiąże się ze zmianą drugiego z nich. Co więcej, znajomość zależności jednego z nich w funkcji jakiegoś parametru fizycznego, np. długo-

ści fali światła, pozwala na obliczenie zależności drugiego współczynnika od tego parametru.

Polaryzowalność ośrodka, choć jest wielkością makroskopową, może zostać wyznaczona na podstawie znajomości stanów kwantowych atomów lub cząstek budujących dany ośrodek. W praktyce, polaryzowalność jest zdeterminowana przez tzw. *amplitudę koherencji* pomiędzy stanem podstawowym a stanem wzbudzonym, które oddziałują ze światłem<sup>2</sup>. Dla słabego światła amplituda ta zależy liniowo od natężenia pola elektrycznego propagującej fali. W takim przypadku zawsze ta sama część padającego promieniowania transmitowana jest przez ośrodek niezależnie od natężenia fali padającej. Z uwagi na brak zależności współczynników absorpcji i dyspersji od natężenia omawiany efekt nazywany jest *liniową absorpcją* (liniowa zależność amplitudy koherencji od natężenia pola elektrycznego fali świetlnej). Inaczej sytuacja wygląda, gdy wykorzystane zostanie światło o wyższym natężeniu. Światło takie może zmodyfikować własności ośrodka (amplituda koherencji zależy wówczas nieliniowo od natężenia pola elektrycznego fali świetlnej), a następnie te zmodyfikowane własności ośrodków decydują o samej propagacji światła. W takim przypadku ilość światła transmitowanego przez ośrodek zależy od natężeń padającego promieniowania. Zjawisko, w którym względna ilość światła transmitowanego przez ośrodek zależy od natężenia fali padającej nosi nazwę *absorpcji nieliniowej*. Nieliniowa absorpcja jest jednym z przykładów optycznych zjawisk nieliniowych.

Omówiony powyżej przypadek pokazuje, że absorpcja światła zależy od superpozycji (amplitudy koherencji) stanów, do których światło to jest dostrojone. Okazuje się jednak, że w pewnych ciekawych przypadkach amplituda koherencji zależy może nie tylko od natężenia samego światła, które ją wytwarza, ale również od superpozycji innych stanów, które istnieją w atomach lub cząstkach. Aby zobrazować ten efekt rozpatrzmy atom posiadający trzy stany kwantowe<sup>3</sup>: dwa poziomy podstawowe o niższej energii oznaczone przez  $|1\rangle$  i  $|2\rangle$  i jeden wzbudzony o wyższej energii oznaczony przez  $|0\rangle$  (patrz rys. 1a). Dwa stany dolne są *stanami długożyjącymi* tzn. atom, który znajduje się w takim stanie pozostaje w nim przez długi, w skali atomowej, czas<sup>4</sup>. Oznacza to, że raz wytworzona superpozycja pomiędzy tymi stanami będzie wolno zanikać. Jednocześnie atom będący w stanie wzbudzonym, dużo szybciej przechodzi do jednego ze stanów podstawowych, a co za tym idzie, czas życia superpozycji pomiędzy stanem podstawowym i stanem wzbudzonym jest zdecydowanie krótszy

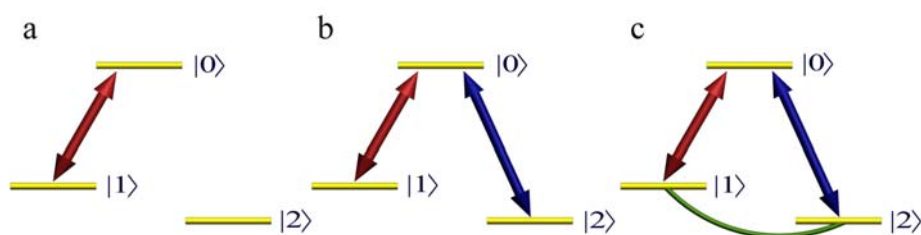
---

<sup>2</sup> W rozważanym powyżej przypadku elektronu amplituda koherencji zdeterminowana jest przez  $|ab^*|$ , gdzie symbol \* oznacza sprzężenie zespolone.

<sup>3</sup> Identyczne rozumowanie można przeprowadzić dla jonów lub cząstek posiadających trzy lub więcej stany kwantowe.

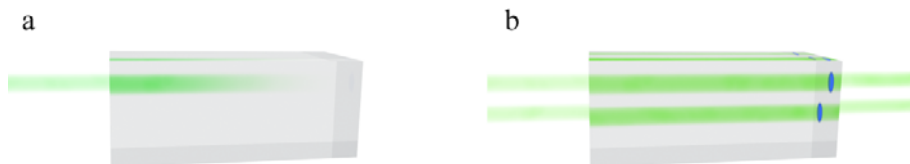
<sup>4</sup> W rozważanym przypadku zakładamy, że atom nie oddziałuje z żadnymi polami zewnętrznymi, w tym polem elektrycznym, magnetycznym i elektromagnetycznym.

niż czas życia superpozycji dwóch stanów o niższej energii. Rozpatrzmy teraz sytuację, w której przez ośrodek propaguje wiązka światła dostrojona do przejścia pomiędzy poziomem energetycznym  $|1\rangle$  i poziomem  $|0\rangle$  (rys. 1b). Przypadek ten jest identyczny jak omawiany wcześniej przypadek absorpcji w układzie dwupoziomowym – za absorpcję odpowiada tylko superpozycja pomiędzy stanami  $|0\rangle$  i  $|1\rangle$  wytworzona przez samą wiązkę. Włączenie drugiej wiązki światła dostrojonej do poziomów  $|0\rangle$  i  $|2\rangle$  sprawia, że w atomach pojawi się również superpozycja poziomów  $|0\rangle$  i  $|2\rangle$  oraz, co nie jest oczywiste, superpozycja stanów  $|1\rangle$  i  $|2\rangle$  (rys. 1c). To właśnie ta ostatnia superpozycja sprawia, że absorpcja i dyspersja pierwszej wiązki zależy m.in. od natężenia i długości fali drugiej wiązki światła, tzn. tej oddziałującej na przejściu pomiędzy stanami  $|2\rangle$  i  $|0\rangle$ . Efekt ten jest tym silniejszy im wyższe jest natężenie światła drugiej wiązki (aż do osiągnięcia tzw. *nasycenia*) oraz im różnica energii obu wiązek bliższa jest różnicy energetycznej pomiędzy stanami  $|1\rangle$  i  $|2\rangle$ . Ze względu na zależności superpozycji poziomów  $|1\rangle$  i  $|0\rangle$  od parametrów drugiej wiązki, własności optyczne ośrodka dla pierwszej wiązki mogą być w dynamiczny sposób kontrolowane.



Rys. 1. Struktura energetyczna atomu trójpoziomowego oddziałującego z jedną wiązką (a) oraz dwiema wiązkami światła (b). Jednoczesne oddziaływanie z dwiema wiązkami światła może doprowadzić do wytworzenia superpozycji stanów kwantowych  $|1\rangle$  i  $|2\rangle$  (c)

Możliwość modyfikacji własności optycznych ośrodka za pomocą superpozycji innych stanów stoi u podstaw wielu ciekawych efektów obserwowanych w ośrodkach z koherencją kwantową. Pierwszym z nich jest elektromagnetycznie indukowana przezroczystość, czyli efekt polegający na zmniejszeniu absorpcji światła w ośrodku oddziałującym jednocześnie z dwiema wiązkami światła o różnej długości fali (rys. 2). Efekt ten można zaobserwować w omawianym powyżej układzie trójpoziomowym. W takim przypadku amplituda koherencji  $|1\rangle$ - $|0\rangle$ , a więc superpozycji odpowiedzialnej za absorpcję pierwszej wiązki, może zostać zmniejszona przez superpozycję stanów  $|1\rangle$  i  $|2\rangle$  wytwarzanych za pomocą drugiej wiązki. Zmniejszenie amplitudy koherencji stanów  $|1\rangle$  i  $|0\rangle$  objawia się przez wzrost transmisji pierwszej wiązki przez ośrodek.



Rys. 2. Ośrodek, który w normalnych warunkach absorbuje światło (a), może stać się ośrodkiem przezroczystym, jeżeli wytworzone w nim zostaną określone superpozycje stanów kwantowych – elektromagnetycznie indukowana przezroczystość (b)

Jak wyżej wspomniano, własności absorpcyjne i dyspersyjne są ze sobą nierozdzielnie związane. Dlatego możliwość zmiany absorpcji ośrodka naturalnie implikuje zmianę jego dyspersji. Tak więc w ośrodkach z koherencją kwantową muszą również być obserwowane zjawiska, w których fundamentalną rolę pełni nie zmiana współczynnika absorpcji, a zmiana współczynnika załamania. I rzeczywiście, możliwość modyfikacji współczynnika załamania światła dla ośrodków materialnych stoi u podstaw dwóch ciekawych efektów zwanych „wolnym światłem” i „szybkim światłem”. Oba te zjawiska polegają na drastycznej zmianie prędkości grupowej impulsu światła rozchodzącego się w ośrodku. I tak w „wolnym świetle” prędkość grupowa impulsu propagującego się przez dany ośrodek zmniejszana jest nawet o kilka rzędów wielkości w porównaniu z prędkością światła w próżni. Ta modyfikacja związana jest z istnieniem superpozycji w atomach lub cząstkach budujących ośrodek. W szczególności, to właśnie superpozycje długożyjących stanów podstawowych doprowadziły do zaobserwowania najwolniejszych impulsów światła, jakie kiedykolwiek udało się zarejestrować ( $v_{gr} = 8 \text{ m/s}$ ). Co więcej, prędkość grupową światła można nie tylko zmieniać, ale można ją również dynamicznie modyfikować. Pozwala to na spowolnienie lub przyspieszenie impulsu propagującego w ośrodku, co może mieć bardzo ciekawe zastosowania. Przykładowo, trwają obecnie prace nad wykorzystaniem tego efektu w tzw. *optycznych liniach opóźniających*, w których prędkość propagacji impulsów światła przez światłowód ma być regulowana. Pozwoli to na kontrolowanie ilości informacji docierających do urządzeń optoelektronicznych zajmujących się obróbką impulsów (detekcją, przełączaniem, multipleksowaniem, itd.). Ma to uniemożliwić „zapychanie się” tych urządzeń, co w konsekwencji wielokrotnie poprawi przepustowość istniejących już sieci światłowodowych.

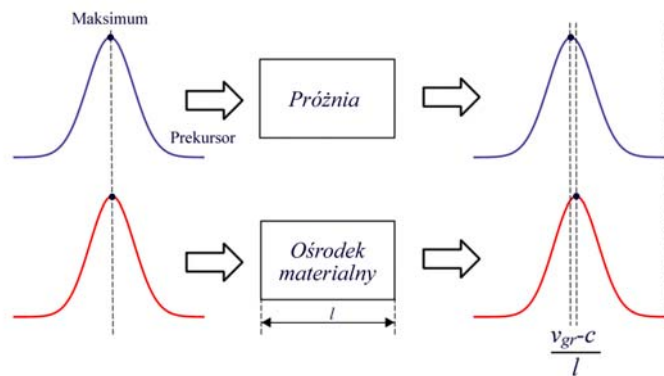
Impuls światła propagujący przez ośrodek materialny nie tylko może zostać spowolniony, ale może on nawet być w tym ośrodku kompletnie zatrzymany. W takim przypadku, możliwe jest „zapisanie” impulsu na żądanie w postaci tzw. *wzbudzenia spinowego*, czyli w postaci odpowiedniej orientacji przestrzennej momentów pędu atomów lub cząstek budujących ośrodek. Impuls ten może zostać później „odczytany” z atomów „na rozkaz”. Bardzo ważne jest to, że podczas „zapisywania” i „odczytywania” impulsu pomiędzy światłem i ośrod-

kiem przekazywana jest całkowita informacja o impulsie, w szczególności, o kwantowych własnościach światła i atomów. Możliwość transferu kwantowej informacji pomiędzy światłem i ośrodkiem jest niezmiernie ważna, ponieważ o ile fotony są dobrymi nośnikami informacji kwantowej, to nie nadają się one do jej przetwarzania. Jednocześnie zmiana stanu kwantowego atomów lub cząstek może być zrealizowana stosunkowo łatwo, chociażby poprzez oddziaływania z zewnętrznymi polami (polem elektrycznym, magnetycznym i elektromagnetycznym), podczas gdy atomy nie nadają się do przekazywania informacji między dwoma punktami. Połączenia ze sobą zalet atomów i fotonów otwiera możliwość przesyłania informacji kwantowej na duże odległości (*kwantowe sieci telekomunikacyjne*), jak również przetwarzania tych kwantowych informacji (*kwantowe bramki logiczne*).

Równie, a może nawet bardziej intrygująca, co możliwość spowolnienia czy zatrzymania światła w ośrodku materialnym, jest umiejętność jego przyspieszania. W eksperymentach z „szybkim światłem”, w których efekt ten był obserwowany, prędkość grupowa impulsu światła propagującego przez ośrodek była większa od prędkości światła w próżni. Oznaczało to, że z dwóch impulsów, z których jeden rozchodził się w próżni, a drugi w ośrodku materialnym, do detektora docierało wcześniej maksimum tego drugiego (patrz rys. 3). Możliwość uzyskania prędkości grupowej impulsu większej od  $c$  może stawiać pytanie o poprawność Szczególnej Teorii Względności. Czy możliwe jest przesłanie informacji z prędkością większą od  $c$ ?! Okazuje się że nie. Pomimo, że prędkość grupowa impulsu „szybkiego światła” jest większa od prędkości światła impulsów rozchodzących się w próżni, to jednak informacja, którą niesie taki impuls nie może dotrzeć do detektora szybciej. Dzieje się tak dlatego, że w obu przypadkach pierwsza część impulsu zwana prekursorem dociera do detektora dokładnie w takim samym czasie albo nawet później w ośrodku materialnym. Ponieważ to właśnie prekursor decyduje o tym jak szybko może być transmitowana informacja, zasada przyczynowości pozostaje nienaruszona<sup>5</sup>.

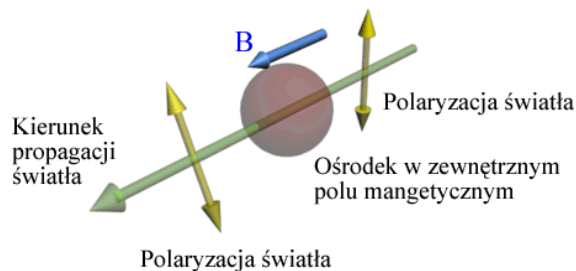
---

<sup>5</sup> Warto zwrócić uwagę, że wielu naukowców twierdzi, że możliwa jest transmisja informacji w ośrodku materialnym szybciej niż w próżni. Swoją hipotezę opierają oni na obserwacji, że współczesne detektory, aby wykryć impuls muszą zaabsorbować pewną ilość promieniowania (niezbędne jest, aby pole pod obwiednią impulsu osiągnęło odpowiednią wartość). Ponieważ warunek ten jest spełniany wcześniej w ośrodkach materialnych z prędkością grupową większą od  $c$ , to detektor umieszczony za ośrodkiem materialnym zarejestruje impuls szybciej niż ten umieszczony w próżni. Należy jednak zwrócić uwagę, że ograniczenie to nie jest ograniczeniem fundamentalnym, a wynika ono ze stosowanej technologii.



Rys. 3. Dwa impulsy promieniowania propagujące przez próżnię i ośrodek materialny, w którym obserwowane jest „szybkie światło”. Pomimo, że prędkość grupowa w impulsie w drugim przypadku jest większa od prędkości światła w próżni to i tak prędkość, z jaką możliwe jest przesłanie informacji (prędkość prekursora) jest co najwyżej równa prędkości  $c$

Ostatnim ciekawym, choć na pierwszy rzut oka mniej spektakularnym efektem związanym z istnieniem superpozycji stanów kwantowych jest nieliniowy efekt Faradaya. Zjawisko to polega na zależnym od natężenia światła skręceniu płaszczyzny polaryzacji światła liniowo spolaryzowanego podczas jego przejścia przez ośrodek umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym (rys. 4). Ponieważ za kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji odpowiedzialne są superpozycje poziomów energetycznych w stanie podstawowym, efekt ten stał się dobrym narzędziem do badania szeregu mechanizmów tworzenia, ewolucji i wykrywania tego typu superpozycji. Jest to o tyle ważne, że superpozycje kwantowe są podstawowym elementem, w oparciu o który funkcjonują kwantowe bity informacji tzw. *qubity*. Możliwość kontrolowanego wytwarzania określonych stanów kwantowych (wytwarzanie qubitów w konkretnym stanie) ma fundamentalne znaczenie dla rozwoju praktycznych zastosowań *kwantowej teorii informacji*.



Rys. 4. Nieliniowy efekt Faradaya polegający na zależnym od natężenia światła skręceniu płaszczyzny polaryzacji światła spolaryzowanego liniowo podczas jego przejścia przez ośrodek umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym



Okazuje się, że nieliniowy efekt Faradaya może mieć również bardzo ciekawe zastosowania. Ze względu na istnienie zależności pomiędzy kątem skręcenia płaszczyzny polaryzacji a polem magnetycznym, zjawisko to może zostać wykorzystane do pomiarów pola magnetycznego (mierząc kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji uzyskujemy informację o natężeniu pola magnetycznego). Metoda ta jest tym bardziej dokładna, im dłuższy jest czas życia superpozycji w stanie kwantowym. W pewnych specjalnych warunkach superpozycje te mogą „żyć” setki milisekund (jest to bardzo długi czas na skalę atomową), a więc możliwe są pomiary pola magnetycznego z czułością porównywalną z najbardziej znanymi obecnie metodami magnetometrycznymi. Wielką zaletą tej metody jest jej prostota, dzięki czemu z powodzeniem może ona konkurować z innymi metodami magnetometrycznymi. Z tych właśnie powodów w wielu ośrodkach na świecie trwają obecnie prace, których celem jest opracowanie praktycznych zastosowań nieliniowego efektu Faradaya. Są to zarówno zastosowania z pogranicza nauki i techniki, jak np. w badaniach biomagnetyzmu (magnetycznej aktywności organizmów żywych), w pomiarach sygnałów magnetycznego rezonansu jądrowego czy w archeologii, jak również zastosowania czysto użytkowe np. do wykrywania min głębinowych czy materiałów wybuchowych na lotniskach.

Powyżej omówiliśmy ogólne warunki, jakie muszą być spełnione, aby możliwe było wytworzenie ośrodków z koherencją kwantową. Otwarte wciąż pozostaje jednak pytanie o to, w jakich ośrodkach materialnych jest to możliwe.

Przez długi czas jedynymi tego typu ośrodkami były rozrzedzone gazy. W ośrodkach takich atomy lub cząstki bardzo słabo oddziałują ze środowiskiem zewnętrznym, więc ich kwantowa ewolucja może być dobrze kontrolowana. Dodatkowo, jeśli gazy takie zostaną umieszczone w specjalnie przygotowanych pojemnikach lub gdy ich temperatura zostanie znacząco zmniejszona, to czas życia superpozycji w stanie podstawowym może dochodzić nawet do setek milisekund. To właśnie sprawia, że w gazach możliwa jest obserwacja elektromagnetycznie indukowanej przeźroczystości, „wolnego” lub „szybkiego światła” i nieliniowego efektu Faradaya.

Pomimo wielu prób, przez długi czas nie udało się zaobserwować omawianych powyżej zjawisk w ośrodkach stałościowych. Wiązało się to przede wszystkim z drganiami sieci krystalicznej ciał stałych. Drgania te sprawiają, że w ośrodku pojawiają się *fonony*, czyli kwazicząstki, które mogą oddziaływać z atomami w podobny sposób jak fotony. Ponieważ mogą one powodować przejścia pomiędzy różnymi poziomami kwantowymi w atomach lub jonach sieci krystalicznej, to są one odpowiedzialne za zanik superpozycji pomiędzy poziomami energetycznymi w tych obiektach. Drugim czynnikiem również związanym z drganiami jest lokalna zmiana otoczenia, w szczególności pola elektrycznego i magnetycznego, wokół atomów lub jonów sieci krystalicznej. Prowadzi ona do zmiany ewolucji stanów kwantowych poszczególnych atomów

lub jonów, a w konsekwencji do utraty informacji o kwantowym stanie całości układu.

Naturalnym sposobem na ograniczenia relaksacji w ciałach stałych jest zmniejszenie drgań sieci przez obniżanie temperatury tych materiałów. Okazało się jednak, że w wielu przypadkach ochłodzenie ich nawet do temperatur kriogenicznych nie ogranicza dekoherencji w sposób wystarczający do obserwacji efektów dyskutowanych powyżej. Dopiero wytworzenie specjalnych matryc krystalicznych, do których domieszkowane są jony pierwiastków ziem rzadkich albo wygenerowanie w kryształach diamentów centrów barwnych pozwoliło na zaobserwowanie niektórych z tych efektów. Dzięki zastosowaniu specjalnych materiałów, które cechuje wysoka przerwa energetyczna pomiędzy stanem podstawowym i wzbudzonym oraz ograniczeniu istniejących w nich drgań sieci krystalicznej możliwe stało się znaczące wydłużenie czasu życia superpozycji stanów kwantowych, a w konsekwencji wytworzenie ośrodków z koherencją kwantową.

Badania nad ośrodkami z koherencją kwantową są ciekawym i zarazem dynamicznie rozwijającym się kierunkiem badań współczesnej fizyki. Łączą one ze sobą takie dziedziny jak fizyka atomowa, fotonika, fizyka ciała stałego, inżynieria materiałowa, itd. Badania te z jednej strony dostarczają ważnych informacji o oddziaływaniu światła z materią na poziomie mikroskopowym, ale również pozwalają na szukanie efektywnych sposobów wykorzystania kwantowych własności materii w makroskali. Dzięki swojej specyfice wpisują się one również w nurt prac aplikacyjnych. W oparciu o ośrodki z koherencją kwantową możliwe jest np. skonstruowanie ultraczułych mierników pola magnetycznego, optycznych linii opóźniających czy optycznych przełączników światła.

We wrześniu 2009 prof. dr hab. Wojciech Gawlik z Zakładu Fotoniki Instytutu Fizyki UJ uzyskał grant z Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, którego celem jest badanie ośrodków z koherencją kwantową. W ramach projektu prowadzone będą badania nad omawianymi w artykule zjawiskami w takich mediach jak rozrzedzone gazy, ultrazimne gazy, światłowody fotoniczne oraz kryształy diamentów z centrami barwnymi. Oprócz badań podstawowych nad tymi ośrodkami rozwijane będą również ich zastosowania. W ramach projektu fundowane są corocznie stypendia dla młodych doktorów, doktorantów i studentów. Więcej informacji na temat tego projektu można znaleźć na stronie [www.if.uj.edu.pl/team](http://www.if.uj.edu.pl/team).