

Aktualności (nie tylko) fizyczne

Jak co roku w grudniu wręczono Nagrody Nobla. Tym razem w dziedzinie fizyki nagrodzeni zostali **Steven Chu**, **Claude Cohen-Tannoudji** i **William D. Phillips** za rozwinięcie metod chłodzenia i więzienia atomów za pomocą światła laserowego.

Pomysł na pierwszy rzut oka wydaje się dziwny. Wydawałoby się, że światło znacznie lepiej nadaje się do ogrzewania niż chłodzenia. Dość łatwo jest znaleźć kota wygrzewającego się na słońcu, natomiast wyziębających się na słońcu kotów potoczny język nie przewiduje. Nasi świeżo „uziębieni” nobliści nie byli zresztą aż tak ambitni, żeby zamrażać od razu całego kota. Na zaproszenie do Sztokholmu wystarczyło kilka tysięcy atomów. Oziębienie wiąże się ze zmniejszeniem średniej energii molekuł. Fotony można wykorzystać do chłodzenia atomów, ponieważ niosą one nie tylko energię $h\nu$, ale również pęd $h\nu/c$. Cała trudność polega na tym, aby atomy absorbowaly tylko te fotony, które by je spowalniały, a nie te, które mogłyby je rozpędzać. Wyobraźmy sobie, że potrafimy dać atomom siatki na fotony, przy czym atom zamiast wymachiwać siatką, będzie ją trzymał prosto w taki sposób, że automatycznie ustawi się ona otworem w kierunku ruchu atomu (tak jak to się dzieje z luźno trzymaną siatką na motyle, gdy biegamy z nią po łące). Wtedy tylko fotony nadlatujące naprzeciwko atomu będą wpadały do siatki, a więc tylko te, których zaabsorbowanie zmniejsza pęd atomu.

Dla atomu siatką na fotony są jego elektrony. Jeżeli energia fotonu odpowiada energii przejścia elektronu ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego, to taki foton zostanie pochłonięty. Natomiast źle dostrojonego fotonu atom nie potrafi złapać. Pomysł polega na tym, aby użyć fotonów o trochę za małej energii $h\nu_-$. Wtedy, żeby złapać foton, atom musi poruszać się w jego kierunku z taką prędkością v , aby w wyniku efektu Dopplera częstota fotonu ν_v w układzie związanym z poruszającym się atomem odpowiadała energii E przejścia atomu do stanu wzbudzonego

$$E = h\nu_v = h\nu_-(1 + v/c).$$

Ograniczeniem na minimalną temperaturę (minimalną energię kinetyczną atomów), możliwą do uzyskania za pomocą opisanego wyżej „chłodzenia dopplerowskiego”, jest naturalna szerokość wykorzystywanej linii widmowej. Jeżeli przesunięcie dopplerowskie związane z ruchem atomów jest mniejsze od tej szerokości, to selektywne hamowanie przestaje działać.

Wnikliwe badania średniej prędkości atomów uwięzionych w tzw. optycznej melasie, utworzonej przez trzy prostopadle skierowane pary wzajemnie przeciwbieżnych wiązek laserowych (o parami przeciwnych skrętnościach), dały zaskakujący wynik. Eksperyment okazał się lepszy od przewidywań – uzyskano temperatury niższe o rząd wielkości od spodziewanych. Tak odkryto bardziej efektywny sposób chłodzenia. Można go przedstawić za pomocą następującej analogii. Wyobraźmy sobie niecierpliwego inwestora giełdowego zainteresowanego dwoma walorami $Zeeman^{-1/2}$ i $Zeeman^{+1/2}$, których ceny podlegają sinusoidalnym wahaniom, przesuniętym w fazie o $\pi/2$. Nasz niecierpliwy inwestor, obserwując, jak wartość posiadanych przez niego akcji np. $Zeeman^{-1/2}$ maleje, nie wytrzymuje i przerzuca się na rosnące akcje $Zeeman^{+1/2}$ po to tylko, żeby zobaczyć, iż trend się odwrócił. Postanawia więc naprawić swój błąd – oczywiście znowu w najmniej odpowiednim momencie. Takie

postępowanie musi wcześniej czy później doprowadzić go do bankructwa.

W naszym przypadku giełdą jest optyczna melasa, a dokładniej periodyczna zmienność polaryzacji światła od lewo- do prawo-skrętnej (z okresem równym połowie długości fali świetlnej). Zmianie wartości akcji odpowiada zmiana energii potencjalnej związanej z (zależnym od skrętności światła) oddziaływaniem atomu z falą elektromagnetyczną, a nerwowym decyzjom inwestora – pompowanie optyczne z jednego zeemanowskiego podpoziomu stanu podstawowego do drugiego podpoziomu. Atom wspinając się na „wzgórze” energii potencjalnej traci swój pęd. Na szczycie ma największą szansę „przepompowania się” do stanu, dla którego w tym miejscu jest „dolina” potencjału, a wtedy musi rozpocząć wspinaczkę od początku. Nic dziwnego, że mechanizm ten nazwano „chłodzeniem syzyfowym”. W odróżnieniu jednak od niezmordowanego Syzyfa atom grzęźnie w końcu w jednej z dolin potencjału.

Atomy oddziałują z melasą poprzez ciągły proces absorbowania i reemitowania fotonów. Wydawałoby się więc, że energia odrzutu, związana z emisją pojedynczego fotonu, jest nieprzekraczalną granicą spowalniania atomów za pomocą światła laserowego. A jednak nie.

Proces pochłaniania-emisji fotonów w optycznej melasie można rozpatrywać jako błędnie przypadkowe w ograniczonej przestrzeni pędów. Schwytyany atom ma skończone prawdopodobieństwo znalezienia się dowolnie blisko punktu o zerowym pędzie (odpowiadającym zerowej temperaturze). Kolejna absorpcja fotonu wyrzuci go jednak z tego miejsca. Okazuje się, że (przy odpowiednim dobraniu parametrów wiązek laserowych) atom emitując foton może wpaść w stan będący superpozycją fal de Broglie’a (fal materii) propagujących się w przeciwnych kierunkach, dla których amplitudy prawdopodobieństwa absorpcji fotonów interferują destruktywnie. W takim „koherentnym ciemnym stanie” atomy mogą przebywać stosunkowo długo bez absorbowania fotonów. Ich temperatura może być dowolnie bliska zera bezwzględnego i zależy tylko od całkowitego czasu przebywania atomów w optycznej melasie. Im ten czas dłuższy, tym niższa końcowa temperatura.

Za cenę całkowitego wyzbycia się energii atomy przestają „wiedzieć, co się z nimi dzieje”. Już tylko po chłodzeniu dopplerowskim długości fal materii są dla tych atomów porównywalne z długością fali świetlnej używanej do chłodzenia, czyli trzy rzędy wielkości większe niż rozmiary atomu w normalnych warunkach. Natomiast atomy w koherentnym trójwymiarowym ciemnym stanie Cohen-Tannoudji porównał do „sześciokrotnego kota Schrödingera” (a jednak kota!), gdyż stan taki jest superpozycją sześciu paczek falowych poruszających się każda w inną stronę („zwykły” kot Schrödingera jest tylko „podwójny”: jednocześnie żywy i martwy).

Rozwinięte metody chłodzenia i pułapkowania atomów mają cały wachlarz zastosowań. Od badania podstaw mechaniki kwantowej, przez studia własności atomów do budowy superprecyzyjnych zegarów atomowych, czy wreszcie produkcji nowej generacji układów scalonych. Udało się już uzyskać fontanny atomowe, atomowe zwierciadła, stojące fale materii i wiele innych przekraczających makroskopową wyobraźnię efektów. W najbliższych numerach wrócimy jeszcze do tego gorącego (brrrr!) tematu.

Piotr ZALEWSKI

na podstawie *Physics Today*, *Physical Review Letters* i *La Recherche*