

Kryształy czasowe

Krzysztof Sacha
Instytut Fizyki UJ

Z kryształami spotykamy się na co dzień. Bizuterię wysadzaną diamentami każda z pań chciałaby mieć zapewne w swojej kolekcji. W szkole uczymy się jak „wyhodować” kryształy z roztworu soli kuchennej. Jednak nie wszystkie ciała stałe posiadają strukturę krystaliczną. Aby ciało można było nazwać kryształem musimy zajrzeć w jego głąb i sprawdzić, czy atomy poukładane są regularnie i ujawniają strukturę krystaliczną. Jeśli atomy nie wykazują uporządkowania, wtedy mówimy o takich ciałach: bezpostaciowe (amorficzne). Co ciekawe przedmioty wykonane ze szkła ołowiowego, bardzo modne w czasach mojego dzieciństwa, powszechnie nazywane kryształami, nie posiadają struktury krystalicznej – są ciałami amorficznymi.

Kryształy mają bardzo różne własności fizyczne. Mogą być izolatorami elektrycznymi, mogą przewodzić prąd elektryczny lub być nadprzewodnikami wykazującymi zupełny brak oporu elektrycznego. Fizycy nauczyli się wytwarzać kryształy, kontrolować ich własności i wykorzystywać w praktycznych zastosowaniach.

Kryształy, które opisałem powyżej, będę nazywał kryształami przestrzennymi, ponieważ ich struktury krystaliczne są trójwymiarowe. Jeżeli w pewnym momencie dokonamy pomiaru położenia atomów w przestrzeni zobaczymy ich regularne ułożenie. W 2012 roku laureat Nagrody Nobla Frank Wilczek [1] zadał genialne pytanie: czy struktury krystaliczne można również zaobserwować w czasie? Innymi słowy, czy istnieją takie układy wielu cząstek, które będą regularnie powracały w to samo położenie nawet w sytuacji, kiedy są w stanie najniższej energii? Mówiąc jeszcze inaczej, czy istnieją układy, które mogą same zorganizować swój ruch i zacząć poruszać się periodycznie (okresowo) w czasie? Szybko okazało się, że prawa fizyczne nie pozwalają na zrealizowanie oryginalnej propozycji Franka Wilczka [1], ale pytanie, które zadał, zainspirowało naukowców. Ruszyły badania w nowej dziedzinie tzw. „kryształów czasowych”.

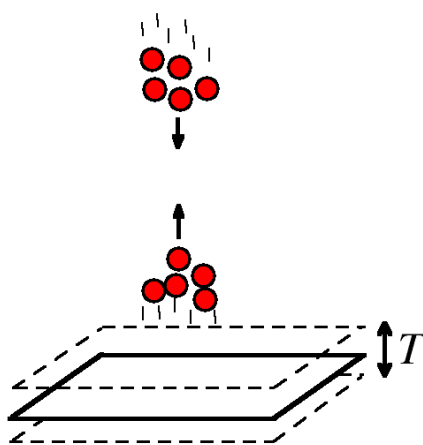
Zanim dowiemy się, jak zrealizować kryształy czasowe, powróćmy jeszcze na chwilę do kryształów przestrzennych. Powstawanie kryształów przestrzennych związane jest z ważnym zjawiskiem kwantowym zwanym spontanicznym łamaniem symetrii. Równania mechaniki kwantowej posiadają szczególne własności (symetrie) i spodziewamy się, że podobne własności posiadać będą stacjonarne rozwiązania tych równań. Okazuje się jednak, że w pewnych przypadkach rozwiązania równań mechaniki kwantowej spontanicznie przestają wypeł-

niać nakazy symetrii, co jest następstwem nawet dowolnie słabego zaburzenia układu. Z takim zjawiskiem mamy do czynienia np. w sławnym mechanizmie Higgsa, w ujawnianiu się własności magnetycznych ferromagnetyków lub właśnie w procesie powstawania kryształów przestrzennych. W tym ostatnim przypadku formowanie kryształów związane jest ze spontanicznym złamaniem symetrii ze względu na dowolne przesunięcia w przestrzeni. Z własności równań mechaniki kwantowej wynika, że stan ciała stałego o najniższej energii nie zmienia się, gdy przesuniemy wszystkie jego cząstki na dowolną, ale tę samą odległość. Jednak taki stan jest „nieposłuszny” w tym sensie, że przestaje wypełniać nakazy symetrii i bardzo szybko staje się stanem, który nie zmienia się, ale tylko, gdy przesuniemy wszystkie cząstki na ściśle określoną odległość. Odległość ta jest odległością między regularnie ułożonymi atomami w kryształce, który się właśnie wyłonił. Proces spontanicznego łamania tzw. ciągłej symetrii ze względu na przesunięcia (przesunięcie wszystkich cząstek na dowolną, ale tę samą odległość) i pojawienie się dyskretnej symetrii (przesunięcia tylko na ściśle określoną odległość) jest procesem odpowiedzialnym za formowanie kryształów przestrzennych. Można go opisać w następujący sposób: układ wielu cząstek, w wyniku oddziaływania między nimi, spontanicznie samoorganizuje rozmieszczenie cząstek w przestrzeni i formuje regularną strukturę krystaliczną.

Idea Franka Wilczka dotycząca powstawania kryształów czasowych wiąże się ze spontanicznym wprawieniem w ruch periodyczny układu wielu cząstek przygotowanych w stanie najniższej energii. Ruch periodyczny oznaczałby, że mamy do czynienia z dyskretną symetrią przesunięcia w czasie, a nie ciągłą. Jak już wspomnieliśmy, oryginalna idea Franka Wilczka nie może być zrealizowana, ale pojawiła się inna.

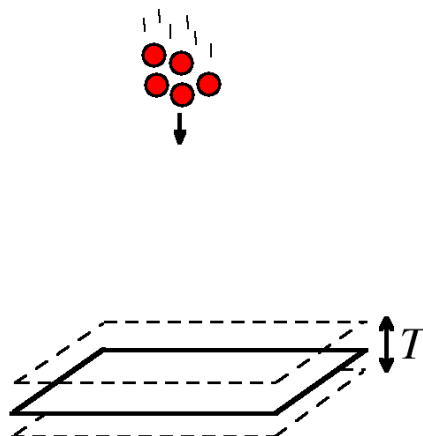
Nowy pomysł został opublikowany w 2015 roku [2] i dotyczył ultra zimnych atomów odbijanych przez regularnie drgające, poziomo zorientowane podłoże (drgające lustro atomowe) na wzór piłeczki pingpongowej podbijanej periodycznie przez raketkę tenisową. Regularnie poruszając raketką jesteśmy w stanie utrzymać piłeczkę w ruchu periodycznym. Łatwo wyobrazić sobie, że jeżeli będziemy poruszać raketką dwa razy szybciej, to wprawny tenista stołowy będzie w stanie odbijać dwie piłeczki pingpongowe, które na zmianę będą uderzać w raketkę. Wyobraźmy sobie podobną sytuację, ale z dwiema chmurami atomowymi, które na zmianę odbijane są przez regularnie oscylujące podłoże (rys. 1). Jeżeli oddziaływania między atomami będą bardzo słabe, to niczego ciekawego nie zaobserwujemy, tzn. zobaczymy podobny ruch jak w przypadku dwóch piłeczek pingpongowych. Jeśli jednak oddziaływania między atomami będą wystarczająco silne i będą miały charakter przyciągający, to energetycznie korzystne stanie się zgromadzenie wszystkich atomów w jednej z chmur. Dzieje się rzecz zdumiewająca – tworzy się bardzo specyficzny stan kwantowy: wszystkie atomy są zarazem w jednej

z chmur atomowych i równocześnie w drugiej. Powstaje stan, który fizycy często nazywają „kotem Schrödingera”. W oryginalnej wersji kot Schrödingera zostaje zamknięty w pudełku, gdzie w wyniku kwantowego procesu może zostać uśmiercony lub nie. Kwantowy opis kota prowadzi do stanu, w którym kot zarazem żyje i nie żyje. W praktyce nigdy nie zaobserwujemy takiej sytuacji, bo dowolny pomiar powoduje, że kot momentalnie „decyduje” czy jest żywy czy martwy.



Rys. 1. Dwie chmury atomowe odbijane są na przemian przez regularnie drgające podłoże z okresem T . Jeżeli oddziaływania między atomami są bardzo słabe, nic ciekawego się nie dzieje, tzn. sytuacja niewiele różni się od sytuacji, kiedy odbijamy na przemian dwie piłeczki regularnie poruszając raketką do tenisa stołowego

Z bardzo podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku oddziałujących atomów w dwóch chmurach atomowych – wystarczy spojrzeć na jeden atom i momentalnie jedna z chmur znika, ponieważ atomy „podejmują decyzję”, w której z chmur się znajdują (rys. 2). Innymi słowy atomy spontanicznie reorganizują swój ruch i zaczynają uderzać dwa razy rzadziej w podłoże. Mówimy, że nastąpiło spontaniczne złamanie początkowej dyskretnej symetrii przesunięcia w czasie i wyłoniła się nowa, inna dyskretna symetria odpowiadająca dwa razy dłuższemu okresowi ruchu atomów. Opisana samoorganizacja ruchu atomów nazwana została dyskretnym kryształem czasowym, ponieważ podobnie jak w kryształach przestrzennych nastąpiło regularne przeorganizowanie ułożenia atomów tylko nie w przestrzeni, ale w czasie.



Rys. 2. Jeżeli oddziaływania przyciągające między atomami są wystarczająco silne, tworzy się bardzo specyficzny stan kwantowy, w którym wszystkie atomy są zarazem w jednej chmurze i zarazem w drugiej – powstaje kot Schrödingera. Wystarczy wówczas spojrzeć na jeden atom i momentalnie wszystkie atomy „decydują”, w której z chmur się znajdują. Jedna z chmur znika i następuje przeorganizowanie ruchu atomów, zaczynają poruszać się z okresem dwa razy dłuższym niż okres ruchu podłoża (tzn. dwa razy rzadziej uderzają w podłoże) – tworzy się nowa struktura w czasie, powstaje dyskretny kryształ czasowy

Rok później to samo zjawisko zostało przewidziane w układach spinowych [3] i bardzo szybko zaobserwowano je w dwóch laboratoriach Uniwersytetów Maryland i Harwarda [4,5]. Spiny to najprościej mówiąc pewne „wektory”, które charakteryzują na przykład atomy lub jony. Za pomocą pola elektromagnetycznego fizycy są w stanie zmieniać kierunek spinów. We wspomnianych eksperymentach periodycznie zaburzano spiny, zmieniając ich kierunek na przeciwny, a następnie włączając oddziaływania między nimi i znowu zmieniając kierunek spinów na przeciwny i znowu włączając oddziaływania, i tak dalej periodycznie z tym samym okresem. Równanie mechaniki kwantowej przewiduje w takiej sytuacji stan o własnościach kota Schrödingera, gdzie wszystkie spiny mają zarazem kierunek np. do góry i zarazem w dół. Taki stan jest oczywiście szalenie czuły na dowolne zaburzenie – wystarczy dokonać pomiaru kierunku jednego ze spinów i momentalnie wszystkie spiny „decydują”, czy są skierowane w górę czy w dół. Od momentu pomiaru ewolucja w czasie układu spinów przebiega z okresem dwa razy dłuższym niż okres periodycznego zaburzenia, ponieważ dwa razy trzeba zmienić kierunek spinów, aby powrócić do początkowej sytuacji – spiny spontanicznie przeorganizowały swój ruch, nastąpiła nowa, dyskretna krystalizacja w czasie.

Eksperymenty przeprowadzono w ten sposób, że na początku wyłączono oddziaływania między spinami. Wówczas, ze względu na to, że w warunkach

laboratoryjnych zmiana kierunku spinów na przeciwny nie była perfekcyjna, obserwowano nieregularny ruch spinów. Jednak, gdy włączono oddziaływania między spinami, okazało się, że ruch spinów porządkuje się i zaczynają się one poruszać regularnie z okresem dwa razy dłuższym niż okres zewnętrznego zaburzenia. W wyniku oddziaływania między spinami nastąpiło formowanie dyskretnego kryształu czasowego. Określenie „dyskretny” wiąże się z faktem, że spontanicznie łamana jest dyskretna (nie ciągła) symetria przesunięcia w czasie.

Wyniki eksperymentów ogłoszono w prestiżowym czasopiśmie naukowym „Nature”. Spotkały się one z żywym zainteresowaniem mediów, które pytają o konsekwencje nowych odkryć i perspektywy ich wykorzystania w praktyce. Mamy niewątpliwie do czynienia z odkryciem i eksperymentalną demonstracją nowego zjawiska: spontanicznego łamania symetrii ze względu na przesunięcia w czasie. Uzmysławia nam ono, że nierównowagowa fizyka wielu ciał może skrywać nieznanne i ciekawe zachowania, o których do tej pory nic nie wiedzieliśmy.

Kryształy przestrzenne wykorzystywane są w praktycznych zastosowaniach powszechnie. Czy podobnie będzie z kryształami czasowymi? Trudno w tym momencie prorokować, ale idea Franka Wilczka zainicjowała również nową gałąź badań kryształów czasowych: poszukiwania zachowań znanych z fizyki ciała stałego, ale w domenie czasu [6]. Okazuje się, że można przygotować układy, które podobnie jak kryształy przestrzenne będą miały własności izolatorów bądź przewodników, ale w czasie. Czy będziemy w stanie budować „czasowe urządzenia” – to się okaże. Na pewno czas staje się nowym nie do końca dotąd docenionym „stopniem swobody”, który może być naszym sprzymierzeńcem, jeśli będziemy potrafili go odpowiednio wykorzystać.

[1] F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. 109, 160401 (2012).

[2] K. Sacha, Phys. Rev. A 91, 033617 (2015).

[3] [V. Khemani, A. Lazarides, R. Moessner, and S. L. Sondhi, Phys. Rev. Lett. 116, 250401 (2016).

[4] J. Zhang, P.W. Hess, A. Kyprianidis, P. Becker, A. Lee, J. Smith, G. Pagano, I.-D. Potirniche, A. C. Potter, A. Vishwanath, N.Y. Yao, and C. Monroe, Nature 543, 217 (2017).

[5] S. Choi, J. Choi, R. Landig, G. Kucsko, H. Zhou, J. Isoya, F. Jelezko, S. Onoda, H. Sumiya, V. Khemani, C. von Keyserlingk, N. Y. Yao, E. Demler, and M.D. Lukin, Nature 543, 221 (2017).

[6] K. Sacha, Sci. Rep. 5, 10787 (2015).