

Sztuczne pole magnetyczne

Już wyjaśniam, o co chodzi. Nie o sposób wytwarzania pola magnetycznego, tylko o wytworzenie czegoś, co polem magnetycznym nie jest, ale zachowuje się tak, jakby było. Niestety, potrzebne jest dość techniczne wprowadzenie, ale można je (czyli następny akapit) potraktować pobieżnie.

Indukcję pola magnetycznego \mathbf{B} można opisywać za pomocą zadania pola potencjału wektorowego \mathbf{A} w następujący sposób: $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, czyli indukcja pola magnetycznego jest równa rotacji potencjału wektorowego. Użyta symbolika, iloczyn wektorowy operatora nabra $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ i pola wektorowego, może być nieoczywista lub w ogóle niezrozumiała, ale w rozważaniach potrzebny jest nam tylko jeden z najprostszyc przypadków. Jednorodne pole magnetyczne o indukcji skierowanej wzdłuż \hat{z} , równej $\mathbf{B} = (0, 0, B)$, może być opisane np. za pomocą potencjału wektorowego $\mathbf{A} = B\left(\frac{y}{2}, -\frac{x}{2}, 0\right)$. Wektor takiego potencjału jest w każdym punkcie prostopadły do wektora $\rho = (x, y, 0)$, a jego wartość proporcjonalna do $|\rho|$, czyli pole wektorowe \mathbf{A} wygląda jak pole prędkości wiru (karuzeli), wirującego wokół osi z . Rotacja jest miarą „lokalnej wirowatości”: składowa B_z jest równa różnicy tempa zmian składowej A_x w kierunku \hat{y} i A_y w kierunku \hat{x} . W omawianym przypadku ta różnica jest wszędzie (poza samym centrum) taka sama (co można sprawdzić, jak ktoś umie i lubi różniczkowanie cząstkowe), a wkłady pochodzące od A_x i A_y są identyczne (gdyby A_x i A_y nie różniły się znakiem, to rotacja byłaby zerowa). Dlatego tę samą indukcję pola magnetycznego można uzyskać, przyjmując $\mathbf{A} = (By, 0, 0)$, choć „wirowatość” takiego potencjału nie jest aż tak oczywista na pierwszy rzut oka.

Użycie potencjału wektorowego, oprócz możliwych korzyści praktycznych, ma szczególne uzasadnienie w przypadku zjawisk kwantowych. Efekty magnetyczne można wtedy objaśniać za pomocą różnicy faz wywołanych różną sumaryczną wartością iloczynu ładunku i krążenia potencjału wektorowego dla różnych, interferujących trajektorii. Z formalnego punktu widzenia efekty magnetyczne mogą zostać sprowadzone do obecności wyrazu $q\mathbf{A}$ w hamiltonianie (czyli operatorze całkowitej energii) określającym funkcję falową cząstki o ładunku q . Oczywiście jest, że efekty te dotyczą tylko obiektów naładowanych.

Nie wszystkim się to podoba. W szczególności specjalistom od rozrzedzonych gazów, które w ultraniskich temperaturach stają się kondensatami Bosego–Einsteina (BEC). Ponieważ są one makroskopowymi obiektami kwantowymi, więc świetnie nadają się do badań podstaw mechaniki kwantowej. W szczególności pozwalają na badanie zjawisk analogicznych do występujących w fizyce fazy skondensowanej (dawniej fizyce ciała stałego). Tylko że nie tych związanych z ładunkiem, bo atomy w kondensatach BEC, jak to atomy, są neutralne [1].

Ale skoro magnetyzm można sprowadzić do obecności odpowiedniego wyrazu związanego z potencjałem, to co się stanie, jeżeli taki wyraz do hamiltonianu wprowadzimy? W myśl zasady, że identyczne równania dają identyczne rozwiązania, powinniśmy zaobserwować zjawiska magnetyczne.

To tyle teoria, ale czy to się da zrobić? Autorzy pracy [2] pokazali, że tak, czyli udało im się wytworzyć tytułowe sztuczne pole magnetyczne.

Osiągnięto to w następujący sposób. Próbkę atomów rubidu ^{87}Rb w stanie BEC oświetlono dwiema wiązkami lasera skierowanymi wzdłuż kierunków $\hat{y} \pm \hat{x}$ (czyli wzajemnie prostopadłych), spolaryzowanymi liniowo wzdłuż, odpowiednio, $\hat{y} \mp \hat{x}$, o częstości ω i $\omega + \Delta\omega$. Ponieważ $\Delta\omega$ została dobrana tak, żeby odpowiadać zeemanowskiemu rozszczepieniu poziomu energetycznego elektronu walencyjnego, wywołanemu zewnętrznym jednorodnym polem magnetycznym skierowanym wzdłuż kierunku \hat{y} (jak widać, do wytworzenia sztucznego pola magnetycznego potrzebne jest zwykle pole magnetyczne), więc dzięki nieelastycznemu rozpraszaniu fotonów na atomach BEC (rozpraszaniu ramanowskiemu) nastąpiło sprzężenie trzech zeemanowsko rozszczepionych stanów energetycznych elektronu, które można interpretować jako pojawienie się potencjału wektorowego wzdłuż kierunku \hat{x} . Potencjał ten jest związany z różnicą pędu fotonów obu wiązek, skierowaną wzdłuż tego kierunku. Potencjał ten jest jednak stały, więc jeszcze nie nadaje się do wygenerowania sztucznego pola magnetycznego. Żeby to umożliwić, wprowadzono gradient zewnętrznego pola magnetycznego wzdłuż kierunku \hat{y} , co spowodowało zależność wartości potencjału wektorowego od wartości współrzędnej y .

Jak się jednak przekonać, że ta inżynieria działa? Konfiguracja jest w sumie dość prosta, ale jej interpretacja, zawierająca wiele przybliżeń, już nie.

Atomy BEC są w stanie nadciekłym. Naszkicowana interpretacja dotyczy wolnego ruchu tych atomów. Jest to sytuacja podobna do stanu nadprzewodnictwa w ciele stałym. Jedną z cech charakterystycznych nadprzewodnictwa jest wypychanie pola magnetycznego z nadprzewodnika (efekt Meissnera). Po przekroczeniu granicznej wartości indukcji pola jedne nadprzewodniki wychodzą ze stanu nadprzewodnictwa, a inne wbudowują w siebie kwanty strumienia pola magnetycznego. Im większa indukcja pola, tym więcej takich przebijających nadprzewodnik kwantów.

W opisanym doświadczeniu zaobserwowano to samo, tylko zamiast kwantów strumienia indukcji magnetycznej, zarejestrowano kwanty momentu pędu, manifestujące się w postaci wirów, w liczbie odpowiadającej natężeniu sztucznego pola magnetycznego.

Opisane doświadczenie może i na pewno zostanie rozwinięte na wiele sposobów. Autorzy planują zaobserwowanie odpowiednika ułamkowego efektu Halla, a teoretycy proponują sztuczne wytworzenie pól o bardziej rozbudowanych grupach symetrii niż elektromagnetyczne $U(1)$.

Piotr ZALEWSKI

[1] M. Zwierlein, *Neutral atoms put in charge*, Nature **462** (2009) 584–585, wraz z referencjami.

[2] Y.-J. Lin i inni, *Synthetic magnetic fields for ultracold neutral atoms*, Nature **462** (2009) 628–632.