ALTERNATOR
Misliti znanost.

Ultrahladni atomi – kvantni valovi za tehnologije prihodnosti

5. 3. 2020

Številka: 09/2020

Avtorji:

- Peter Jeglič
- Erik Zupanič
- Tadej Mežnaršič



Laboratorij za hladne atome na Institutu "Jožef Stefan", foto: Arne Hodalič

Kvantne pojave običajno opazimo pri posameznih delcih. Pri ekstremno nizkih temperaturah pa se to spremeni. Na tisoče, milijone, milijarde milijonov delcev se lahko združi v en kvantni val – pride do makroskopskih kvantnih pojavov, kot so supertekočnost, superprevodnost in Bose-Einsteinova kondenzacija.

Snov ohladiti pomeni odvzeti ji toploto, se pravi zmanjšati kinetično energijo njenih gradnikov, molekul oziroma atomov, iz katerih je sestavljena. Če se dovolj upočasnijo, jih lahko medsebojne interakcije uredijo v novo strukturo – fazo, ki se po fizikalnih lastnostih razlikuje od tiste pri višjih temperaturah. Plini se utekočinijo, tekočine se strdijo, v tekočih kristalih se molekule medsebojno poravnajo, v magnetnih snoveh se poravnajo spini (https://sl.wikipedia.org/wiki/Spin) , tekočina lahko postane supertekoča, kristal superprevoden … skratka, zgodi se fazni prehod. Če dovolj ohladimo plin atomov, ki je približno milijonkrat redkejši od zraka pri normalnem tlaku, kondenzira v t. i. Bose-Einsteinov kondenzat.

Bose-Einsteinov kondenzat je stanje snovi, v katerem so vsi delci (atomi) v istem, energijsko najugodnejšem stanju. Obnašajo se kolektivno, kot eno, in ne več kot skupek neodvisnih posameznikov, zato jih lahko v kvantnomehanskem opisu obravnavamo kot celoto. Atomi se ne obnašajo kot delci, temveč v skladu s svojo kvantno naravo kot makroskopski valovni paket, pri katerem opazimo običajne valovne pojave, kot so uklon (https://sl.wikipedia.org/wiki/Uklon) , interferenca (https://sl.wikipedia.org/wiki/Interferenca) in disperzija (https://sl.wikipedia.org/wiki/Disperzija_(optika)) . Podobno kot fotoni v laserskem žarku, ki so med seboj koherentni, so v tem primeru med seboj koherentni snovni delci. Obstoj takega stanja je prvič napovedal Albert Einstein leta 1925 na podlagi dela indijskega fizika Satyendre Natha Boseja, 70 let kasneje pa je uspela Bose-Einsteinova kondenzacija plina rubidija ter kasneje natrija, za kar je bila leta 2001 podeljena Nobelova nagrada za fiziko.

V zadnjih 25 letih je uspelo znanstvenikom po vsem svetu doseči Bose-Einsteinovo kondenzacijo s celo vrsto izotopov, večinoma elementov alkalijskih in zemljoalkalijskih kovin ter lantanidov. Za ohlajanje atomov do izjemno nizkih temperatur, ki so potrebne za prehod v Bose-Einsteinov kondenzat, se uporabljata dva osnovna načina hlajenja: lasersko hlajenje in hlajenje z izhlapevanjem. Pri laserskem hlajenju z absorpcijo svetlobe točno določene valovne dolžine (odvisno od izotopa) atomom predamo gibalno količino fotonov v nasprotni smeri njihovega gibanja ter jih tako upočasnimo. Pri hlajenju z izhlapevanjem v magnetni ali optični dipolni pasti (https://sl.wikipedia.org/wiki/Opti%C4%8Dna_pinceta) pa pustimo, da delci z največjo energijo pobegnejo iz pasti, kar zniža povprečno temperaturo v pasti. Na podoben način se z izhlapevanjem potu regulira temperatura človeškega telesa, ali pa ohlaja vroča juha, ko odpihujemo vročo paro. S kombinacijo obeh načinov hlajenja lahko atome ohladimo dovolj, da pride do faznega prehoda plina v Bose-Einsteinov kondenzat. Takrat termična de Brogliejeva valovna dolžina (https://sl.wikipedia.org/wiki/Uklon_elektronov) postane daljša od povprečne razdalje med atomi. Temperatura prehoda je odvisna od izotopa ter gostote plina in lahko znaša le nekaj milijardink stopinje Celzija nad absolutno ničlo. To je hladneje od katerekoli znane snovi v vesolju. Pri tako nizkih temperaturah se izrazi razlika med bozonskimi in fermionskimi delci; delci s celo- in polštevilskim spinom. Le bozoni lahko kondenzirajo, fermionom pa to preprečuje Paulijevo izključitveno načelo, ki prepoveduje, da bi se vsi nabrali v istem stanju. Fermioni lahko kondenzirajo le, če se med seboj povežejo v bozonske pare (npr. Cooperjevi pari elektronov v superprevodnikih). Danes raziskovalci po svetu poleg različnih atomskih ustvarjajo tudi molekulske in celo kondenzate fotonov.

Ker gre za redek plin, so interakcije med delci majhne in jih je mogoče uravnavati s spreminjanjem jakosti magnetnega polja, v katerem so atomi. Če kondenzat ujamemo v ustrezni (periodični) optični potencial, lahko služi kot simulator elektronov v trdnih snoveh, saj lahko oboje opišemo z istimi enačbami. Na ta način lahko preučujemo lastnosti in obnašanje trdnih snovi pod različnimi pogoji in z različnimi simetrijami, ne da bi potrebovali fizične vzorce. Nasploh je iskanje analogij z drugimi, težje eksperimentalno preverljivimi fizikalnimi pojavi pogosto, tako da znanstveniki skušajo s pomočjo hladnih atomov razumeti vrsto različnih fizikalnih pojavov, od topoloških lastnosti trdnih snovi do nastanka vesolja in črnih lukenj. Razvoj hladnoatomskih kvantnih simulatorjev je tudi ena od možnih poti, ki bi lahko vodile do kvantnega računalnika – univerzalnega kvantnega simulatorja, ki bi lahko reševal poljubne probleme iz kvantne fizike, kemije, biokemije in bi pomenil revolucijo na področju kriptografije.

Drugo pomembno področje, na katerem se hladni atomi izkažejo za posebno prikladne, so precizne meritve. Hladni atomi so osnova najnatačnejših atomskih ur. Ker se v primerjavi s klasičnimi atomskimi urami, kjer so atomi pri sobni temperaturi, mnogo počasneje razpršijo, omogočajo daljši čas posamezne meritve in s tem večjo natančnost. Zaradi njihove natančnosti je definicija sekunde vezana na frekvenco prehoda med najnižjima energijskima stanjema v cezijevem atomu, ki se uporablja v cezijevih urah. Poleg izjemno natančnih meritev frekvence (in s tem časa) se lahko hladne atome uporabi tudi kot senzorje pospeškov – akcelerometre. Uporabni so kot senzorji gravitacijskega pospeška, ki lahko zaznajo nahajališča rudnin, zemeljskega plina ali vode globoko pod zemljo, uporabljajo pa se tudi pri iskanju temne snovi. V konfiguraciji obroča so uporabni kot rotacijski senzorji, razvija pa se tudi atomska alternativa Observatoriju za gravitacijske valove z lasersko interferometrijo (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, okrajšano LIGO), trenutno najnatančnejši dvojici laserskih interferometrov, s katero so izmerili gravitacijske valove ob združitvi dveh črnih lukenj. V splošnem je prednost atomskih interferometrov pred laserskimi počasno premikanje atomov v primerjavi s svetlobo, kar pomeni, da je razdalja, ki jo morajo atomi prepotovati za enak fazni zamik, mnogo manjša in so lahko interferometri mnogo krajši.

Zaradi svoje vsestranskosti segajo raziskave s hladnimi atomi na mnoga področja fizike, jih povezujejo in nam s tem razkrivajo nova obzorja.

Bose Einsteinov kondenzat (MOV, 520 KB) (https://www.alternator.science/assets/Priloge-clankom/Bose-Einsteinov-kondenzat.MOV)

* Video prikazuje gostotni profil dveh oblakov cezijevih atomov – 65 ms po tem, ko jih izpustimo iz pasti – za različne čase hlajenja z izhlapevanjem (označeno v spodnjem desnem kotu). Po 3.1 s izhlapevanja, ko temperatura atomov pade pod 30 nK, se na sredini termalnega oblaka pojavi oster vrh, ki oznanja, da se je zgodil fazni prehod v Bose-Einsteinov kondenzat. Pri nadaljnjem ohlajanju se delež kondenziranih atomov povečuje (vrh na sredini se veča, okoliški oblak pa izginja), dokler na koncu ne ostane skoraj popolnoma čist Bose-Einsteinov kondenzat cezijevih atomov.