

Kuo ypatingos labai šaltos atomų dujos?

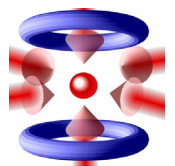
Gediminas Juzeliūnas,
LMA tikrasis narys

Didelio mokslinės visuomenės susidomėjimo labai šaltos atomų dujos sulaukė 1995 m., kai buvo sukurti pirmieji atomų Bozės ir Einšteino kondensatai (BEC). Už tai amerikiečiams E. Cornellui ir C. Wiemanui (Kolorado universitetas) bei vokiečiui W. Ketterle, dirbančiam Masačusetso technologijos institute, buvo paskirta 2001 m. fizikos Nobelio premija. Kita vertus, 1999 m. D. S. Jin laboratorijoje (Kolorado universitetas) buvo pirmą kartą sukurtos atomų išsigimusios Fermi dujos. Tiek atomų BEC, tiek išsigimusios Fermi dujos susidaro atšaldžius atomus maždaug iki 10^{-9} K = 0.000000001 K, o tai milijardą kartų žemesnė temperatūra už reikalingą skystajam heliui gauti.

Šaltųjų atomų tyrimai plečiasi, į juos įsitraukia vis daugiau mokslininkų, ne tik dirbančių atomo fizikos srityse, bet ir atėjusių iš kondensuotųjų medžiagų, elementariųjų dalelių bei atomo branduolio fizikos sričių, kurios, pasirodo, turi nemažai sąlyčio taškų su šaltųjų atomų fizika. Pavyzdžiui, neutroninės žvaigždės ir labai šaltos fermioninių atomų dujos yra modeliuojamos naudojant panašius metodus. Kita vertus, šaltuosius atomus paveikus stovinčia šviesos banga, suformuojamos optinės gardelės. Jose atomų energijos pasiskirsto juostomis, panašiai kaip elektronams kristaluose.

Taigi, šaltieji atomai yra sistemos, kuriose atomo fizika persikloja su kietojo kūno fizika. Skirtingai nei kietiesiems kūnams, šaltiesiems atomams galima gana lengvai keisti sistemos parametrus, pavyzdžiui, atomų skaičių, juos veikiančio potencialo formą, atomų tarpusavio sąveiką. Tai padeda geriau suprasti reiškinius, vykstančius kondensuotose medžiagose, ir numatyti naujus reiškinius. Tikimasi, kad šaltųjų atomų eksperimentai padės suvokti 1986 m. atrasto aukštatemperatūrio superlaidumo prigimtį. Šaltųjų atomų dujos taip pat yra svarbios atliekant labai tikslius matavimus bei kvantinius skaičiavimus.

Kuo ypatingos labai šaltos atomų dujos? Įprastomis sąlygomis (pvz., kambario temperatūroje) dujas sudarantys atomai elgiasi kaip klasikinės dalelės, t. y. lyg daugybė atsitiktinai judančių biliardo kamuoliukų, kurių vidutinė kinetinė energija yra proporcinga absoliučiajai temperatūrai T . Kambario temperatūroje atomų vidutinis greitis yra keli



KUO YPATINGOS
LABAI ŠALTOS
ATOMŲ DUJOS?

T	300 K (27 C)	0.03 K = 30 mK	0.000003K = 3μK	0.000000003K = 3nK
v	300 m/s	3 m/s	3 cm/s	1 mm/s

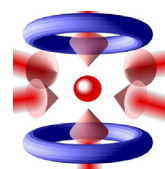


1 pav. ^{87}Rb atomų vidutinio greičio priklausomybė nuo temperatūros

šimtai metrų per sekundę, kas maždaug atitiktų kulkos greitį, kaip pavaizduota 1 pav. Dujas atšaldžius iki mikrokelvino eilės temperatūros, atomų greitis sumažėja iki kelių centimetrų per sekundę. Tada pradeda reikštis atomų judėjimo banginės (kvantinės) savybės. Remiantis 1924 m. suformuluotu Louiso de Broglie principu, atomas yra medžiagos banga, kurios ilgis λ yra proporcingas kvantinėje fizikoje labai svarbiai Planco konstantai h ir atvirkščiai proporcingas atomo masės ir greičio sandaugai: $\lambda = h/mv$. Todėl atomus galima įsivaizduoti kaip de Broglie bangų paketus, kurių plotis yra bangos ilgio eilės. Mažėjant temperatūrai, atomai lėtėja, o bangų paketai plečiasi. Kadangi Planco konstanta yra labai mažas dydis ($h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$), atomus reikia labai atšaldyti, kad imtų reikštis jų banginės (kvantinės) savybės.

Atomų debesėlį atšaldžius iki nanokelvino eilės, atomų greitis sumažėja iki milimetrų per sekundę, kas maždaug atitiktų sraigės greitį (žr. 1 pav.). Esant tokioms temperatūroms, dujas sudarančių atomų de Broglie bangų paketai išplinta tiek, kad ima persikloti, todėl atomai pradeda jausti vienas kitą, o dujų savybės priklauso nuo jas sudarančių atomų tipo. Jeigu atomų sukinio kvantinis skaičius yra sveikas, atomai vadinami bozonais, jeigu pusinis – fermionais. Pavyzdžiui, ^6Li atomai yra bozonai, o ^7Li – fermionai. Bozonai žemoje temperatūroje yra linkę kauptis ir būti vienos kvantinės būsenos. Todėl labai žemose temperatūrose susiformuoja milžiniška (kolektyvinė) atomų banga – Bozė ir Einšteino kondensatas, kurioje visi atomai yra tos pačios kvantinės būsenos. Kita vertus, fermionams galioja Pauli draudimo principas, neleidžiantis jiems užimti tą pačią kvantinę būseną. Esant pakankamai žemai temperatūrai, susidaro išsigimusios Fermi dujos, kuriose atomai užima žemiausius sistemos kvantinius lygmenis, panašiai kaip elektronai metaluose užima žemiausius laidumo juostos lygmenis iki vadinamojo Fermi lygmens.

Atomų BEC ir išsigimusios Fermi dujos yra naudojamos emuliuojant įvairius kondensutų medžiagų reiškinius, pavyzdžiui, šaltiesiems atomams buvo stebėtas kvantinis virsmas iš supertakios į izoliatoriaus fazę. Kadangi šaltieji atomai yra elektriškai neutralios dalelės, magnetiniame lauke jų neveikia Lorencio jėga. Todėl nėra tiesioginės analogijos su elektronų magnetinėmis savybėmis kristaluose. Magnetinis laukas yra būtinas daugeliui įdomių kietojo kūno reiškinių, pavyzdžiui, kvantiniam Holo efektui.



KUO YPATINGOS
LABAI ŠALTOS
ATOMŲ DUJOS?

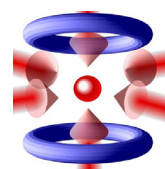


2 pav. Dalis Vilniaus universiteto Šaltųjų atomų ir kvantinės optikos grupės narių. Iš kairės: Rytis Juršėnas, Artūras Acus, Viktoras Novičenko, Julius Ruseckas, Algirdas Mekys, Gediminas Juzeliūnas, Nikola Filipović (Nišo universitetas, Serbija), Egidijus Anisimovas, Giedrius Žlabys, Hamid Reza Hamedi ir Mantas Račiūnas. 2018 m. lapkričio mėn.

Norint stebėti šių efektų analogus šaltųjų atomų dujose, reikia tam tikru būdu sukurti dirbtinį magnetinį lauką, veikiantį elektriškai neutralius atomus.

Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos instituto Šaltųjų atomų ir kvantinės optikos grupė (<http://www.quantum.tfai.vu.lt>) viena pirmųjų pasaulyje pasiūlė ir ištyrė galimybes sukurti dirbtinį magnetinį lauką šaltiesiems atomams, juos paveikus tinkamai parinkta elektromagnetine spinduliuote. Mūsų pirmieji šios tematikos darbai pasirodė dar 2004–2005 metais. Vėliau tyrimai buvo išplėsti nagrinėjant galimybes šaltiesiems atomams sukurti sukinio ir orbitos sąveiką, kai atomo masių centro ir vidinių laisvės laipsnių judėjimas priklauso vienas nuo kito. Nemažai mūsų idėjų buvo eksperimentiškai įgyvendintos įvairiose pasaulio laboratorijose. Vykdydami šiuos ir kitus šaltųjų atomų tyrimus, užmezgėme glaudžius ryšius su daugelio šalių mokslinėmis grupėmis, pavyzdžiui, prof. Iano Spielmano mokslinė grupe, dirbančia Nacionaliniame mokslo ir technologijų institute JAV (*National Institute of Science and Technology*). Šiais metais už iškilus darbus ir mokslinius ryšius su universiteto fizikais šaltųjų atomų ir kondensuatų medžiagų tyrimų srityje I. Spielmanui Vilniaus universitetas suteikė garbės daktaro vardą.

Vilniaus universitete atliekami šaltųjų atomų tyrimai neatsirado tuščioje vietoje. Lietuvoje yra stiprios atomo fizikos ir kondensuatų medžiagų mokyklos, kurias sukūrė akademikai Adolfas Jucys ir Povilas Brazdžiūnas bei vėlesni fizikai. Jų dėka buvo sudarytos palankios sąlygos pradėti darbus šaltųjų atomų fizikos srityje, esančioje atomo fizikos ir kondensuatų medžiagų sankirtoje.



KUO YPATINGOS
LABAI ŠALTOS
ATOMŲ DUJOS?