

Hlajenje z laserjem

Srečko Paskvale,

april 2003, optoelektronika

Povzetek

V tem seminarju sem opisal osnovno metodo ohlajanja atomov do temperature okoli sto mikrokelvina s pomočjo laserja. Ta in še drugi postopki so zelo uporabni na veliko področjih fizike, kot so Bose-Einsteinova kondenzacija, spektroskopija pri ultravisoki resoluciji, fiziki trkov, atomske ure, fiziki površin in raziskave kvantnih efektov.

Uvod

Zanimanje za intrinzične lastnosti izoliranih atomov je že dolga leta eno izmed najdejavnejših področij znanstvenih raziskav. V začetku prejšnjega stoletja so rezultati tovrstnih poiskov pripeljali do izoblikovanja kvantne mehanike, v novejšem času pa so natančna merjenja razložila nekatere pojave tudi na drugih področjih fizike, vključno z relativnostjo. Ko želimo natančno izmeriti lastnosti določenega atoma, pridemo slej ko prej v težave, ker ga ne moremo preprosto izolirati od okolice in se znebiti učinkov sosednjih atomov npr. v tekočinah ali posledic termičnega gibanja v plinih. Kako ohladiti atom in ga hkrati obdržati izoliranega od okolice pa ni enostavna naloga. Če se hlajenja lotimo tako, da plin atomov postavimo v stik s steno hladnega rezervoarja ali z drugim plinom hladnih atomov, pride do kondenzacije na stenah in nastajanja molekul zaradi trkov. Tako atomi niso več izolirani in merjenje ni več mogoče. Če hočemo doseči boljši način hlajenja je treba ubrati drugo pot – ena od možnosti je hlajenje z laserjem.

Svetloba nosi energijo in gibalno količino v obliki kvantov polja - fotonov. Med energijo in gibalno količino fotona velja zveza $p_0 = E_0/c = h/\lambda$; pri čemer je »h« planckova konstanta, »c« svetlobna hitrost, » λ « valovna dolžina svetlobe, » p_0 « gibalna količina in » E_0 « energija fotona. Svetlobni snop, ki v pravokotni smeri pada na črno ploskev površine S povzroči silo $F = dp/dt = d/dt (N \cdot p_0) = p_0 \cdot dN/dt = E_0/c \cdot dN/dt = P/c = j \cdot S/c$ pri čemer je »N« število fotonov v snopu, »j« gostota svetlobnega toka in »P« svetlobna moč. Efektivna sila s katero deluje en foton na atom je zelo majhna, a z uporabo laserjev jo lahko zelo povečamo. Da pri tem ostanejo atomi na izbranem mestu, jih zapremo v t.i. magnetno steklenico, kjer v celoti za prostorsko omejitev služi magnetno polje. Takšno past imenujemo magneto-optična past oz. MOT (Magneto-Optical Trap).

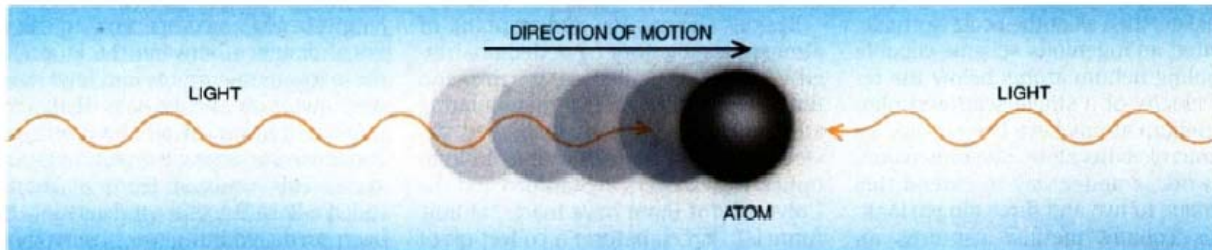
Hlajenje z laserjem

Pri hlajenju z usmerjenim laserskim snopom svetimo na atomski plin. Če atom absorbira ustrezeni foton in preide iz osnovnega v vzbujeno stanje prejme njegovo gibalno količino zato se mu spremeni hitrost v smeri svetlobnega snopa. Ko pa se atom vrne nazaj v osnovno stanje, izseva foton in izgubi gibalno količino. Ker se pri spontani emisiji foton izseva v poljubni smeri, je končni rezultat ta, da deluje na atom sila v smeri svetlobe. Tej sili rečejo razpršilna sila in je seveda sorazmerna gibalni količini in številu fotonov, ki jih atom absorbira na časovno enoto. Običajno je zelo majhna in prav tako tudi sprememba hitrosti atoma v primerjavi s povprečno hitrostjo atoma pri sobni temperaturi. Razpršilno silo je prvi zaznal Otto R. Frisch leta 1933, ko je z njeno pomočjo premaknil curek natrijevih atomov. Čeprav je v povprečju vsak atom absorbiral le po en foton, je opazil majhen premik. Sila, ki jo je preučeval Frisch, je mnogo premajhna, da bi znatno upočasnila in na ta način hladila atome, saj je kot izvor svetlobe uporabljal navadno natrijevo luč. Danes lahko s pomočjo laserja dosežemo bistveno večjo gostoto svetlobnega toka ($j \approx 10^{20} \text{ W/m}^2$) in s tem uspešnejše ohlajanje.

Prvi večji uspeh je bil poskus, ki sta ga l.1985 izvedla Phillips in John L. Hall, ko sta upočasnila curek atomov in zmanjšala temperaturo iz sobne do 0,1 K.

Dopplerjevo hlajenje

Rešitev, ki je poznana kot Dopplerjevo hlajenje, so predlagali leta 1975. Princip Dopplerjevega hlajenja za proste atome lahko predstavimo z dvonivojskim atomom in šibkim laserjem, katerega frekvenca ω_L je malo pod resonančno frekvenco atoma $\omega_A = (E_e - E_g)/h$. Z E_e označimo energijo vzbujenega (ex cited) in z E_g energijo osnovega (ground state) atoma.



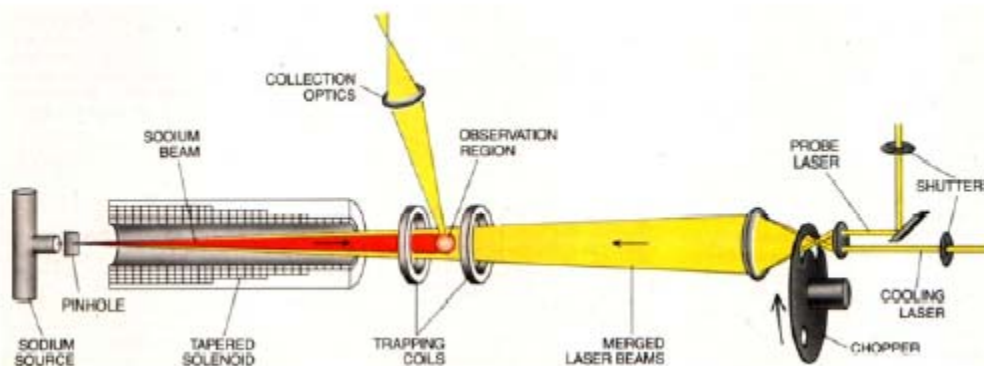
Slika 1: Atom obsevamo z dvema žarkoma, katerih frekvenca je malo pod absorpcijsko frekvenco atoma.

Atom postavimo med dva laserska curka, ki potujeta v nasprotnih smereh (slika 1). Če bi atom miroval, bi bili sili obeh žarkov nasprotno enaki. Ko pa se atom giblje, zazna zaradi Dopplerjevega efekta nekoliko spremenjeno frekvenco svetlobe: $\omega = \omega_L \pm kv$

Tako se frekvenca žarka, proti kateremu atom potuje, približa resonančni frekvenci ω_A , frekvenca nasprotnega žarka pa se od ω_A oddalji. S tem dosežemo, da na atom deluje sila v nasprotni smeri gibanja ne glede na to v katero smer se giblje, kar pomeni, da jo lahko opišemo kot: $F = -\alpha v$, kjer je α koeficient 'trenja' (zveza velja za $v \ll c$).

Opisana sila trenja je povprečna sila preko več fluorescenčnih ciklov. V vsakem ciklu pa dobi atom tudi povratni sunek zaradi izsevanega fotona. Ker je število ciklov v določenem časovnem intervalu spontano in smer izsevanega fotona naključna, je temperatura omejena (za natrij $240\mu K$, za cezij $125\mu K$). Ko se atomu hitrost manjša, frekvenca laserja ne ustreza več ω_L zato jo je potrebno ustrezno zvišati, kar pa dosežemo tako, da pošljemo curek skozi nehomogeno magnetno polje.

Energijski nivoji atoma se zaradi vpliva magnetnega polja spremenijo, čemur pravimo Zeemanov pojav. Energija je sorazmerna jakosti magnetnega polja. Polje nastavimo tako, da je ob vstopu najmočnejše in potem pada in tako dosežemo, da se atomi ustavljajo po celotni dolžini. Takšno postavitvev sta uporabila denimo Phillips in Metcalf (glej sliko 2)



Slika 2: Skica naprave, ki sta jo skonstruirala Phillips in Metcalf. Natrij izhaja iz rezervoarja na skrajni levi in gre skozi t.i. Zeemanov upočasnjevalec. Atome nato ujamemo v magnetno past z dvema tuljavama. Tako postavljen eksperiment lahko razširimo tudi iz ene na dve ali tri dimenzije, če žarke ustrezno prerazporedimo. V tem primeru, močno dušenje zaradi Dopplerjevega hlajenja ne povzroči le hlajenja, temveč tudi efekt viskoznosti. Zaradi sile trenja, ki sem jo opisal se povprečna pot močno zmanjša. Tako se čas da atom difundira en centimeter podaljša na več kot sekundo, medtem ko bi v primeru normalnega - balističnega gibanja potreboval 20 milisekund.

