

SVEUČILIŠTE U SPLITU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Završni rad

Mentor: prof. dr. sc. Ivica Aviani

Osnovni principi hlađenja - na putu prema apsolutnoj nuli

Juraj Novak

Split, rujan 2017

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Odjel za Fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Osnovni principi hlađenja - na putu prema apsolutnoj nuli

Juraj Novak

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika i informatika

Sažetak:

Cilj ovog završnog rada je prikazati razvoj tehnika hlađenja i niskotemperaturne fizike od samih početaka do današnjeg dana. Za magnetsko hlađenje je dan primjer adijabatske demagnetizacije paramagnetične soli te veza s Curievim zakonom. Lasersko hlađenje koristi apsorpciju svjetlosti uz Dopplerov efekt za hlađenje i usporavanje atoma u kombinaciji sa magnetskim poljem. Zbog pojava supravodljivosti i Bose-Einstenovog kondenzata koji su vrlo primjenjivi u modernoj tehnologiji, naglasak na ovom dijelu fizike je nikad veći. Stoga se u skoroj budućnosti očekuje značajni napredak u ovoj grani fizike.

Ključne riječi: Približavanje apsolutnoj nuli, Magnetsko hlađenje, Lasersko hlađenje

Rad sadrži: 18 stranica, 6 slika i 14 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivica Aviani

Ocjenjivači: izv. prof. dr. sc. Ivica Aviani
prof. dr. sc. Franjo Sokolić
doc. dr. sc. Bernarda Lovrinčević

Rad prihvaćen: rujan 2017.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno–matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Thesis

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Basic cooling principles - on the way to absolute zero

Juraj Novak

University undergraduate study programme Physics and Informatics

Abstract:

The goal of this thesis is to show the development of cooling techniques and low temperature physics from its beginnings to nowadays. Magnetic cooling is described in terms of adiabatic demagnetization of paramagnetic salt and related to Curie's law. Laser cooling uses light absorption with Doppler effect in combination with magnetic field. Because of superconductivity and Bose-Einstein condensate, which is very important in modern technology, this branch of physics is interesting more than ever before. A big step forward is expected in the near future.

Key words: Absolute Zero, Magnetic Cooling, Laser Cooling

Thesis consists of: 18 pages, 6 figures and 14 references.

Original language: Croatian

Supervisor: Asoc. Prof. Dr. Ivica Aviani

Reviewers: Asoc. Prof. Dr. Ivica Aviani

Prof. Dr. Sc. Franjo Sokolić

Doc. Dr. Sc. Bernarda Lovrinčević

Thesis accepted: September 2017

The Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

Popis slika	II
1 Uvod	1
2 Počeci niskotemperaturne fizike	3
3 Magnetsko hlađenje	6
3.1 Adijabatska demagnetizacija paramagnetske soli	7
4 Lasersko hlađenje	11
4.1 Lasersko hlađenje zrake atoma	11
4.2 Optičke melase	12
4.3 Magnetsko-optička zamka	13
4.4 Bose-Einsteinov kondenzat	14
5 Zaključak	16
Literatura	18

Popis slika

2.1	Cailletet-ov uređaj za ukapljivanje plinova	4
2.2	Skica aparature kojom je Kamerlingh Onnes ukapljio helij 1908. godine.	6
3.1	Primjer aparature kojom se postižu niske temperature uz pri- mjenu adijabatske demagnetizacije paramagnetičkih soli	8
4.1	a) Konfiguracija Helmholtzovih zavojnica te linije magnetskog polja B. b) Presjek kvadropola u xy ravnini te vrijednosti mag- netskog polja B izraženog u mT.	14
4.2	Prikaz nastajanja Bose-Einstenovog kondenzata.	15
4.3	Princip rada dipolne zamke.	16

1 Uvod

Od trenutka kada je francuski fizičar Guillaume Amontons 1702. godine predstavio svijetu ideju postojanja konačnog iznosa neke najniže moguće temperature, traje utrka čiji sudionici pokušavaju postići tu temperaturu koju danas zovemo apsolutnom nulom. Utrka u kojoj očito nijedan od natjecatelja neće stići do svoga cilja jer je sam taj čin u koliziji s trećim zakonom termodinamike koji nam govori da apsolutnu nulu nije moguće postići konačnim brojem koraka hlađenja. Unatoč tome mnogi su fizičari usmjerili svoja djelovanja i napore u smjeru, ako ne postizanja, onda što većeg približavanja toj asimptotskoj temperaturi.

Hlađenje možemo definirati kao odvođenje energije iz sistema u cilju smanjenja temperature. U početku se niskotemperaturna fizika temeljila na ukapljivanju različitih plinova te se najveći pomak događa otkrićem Joule-Thomsonovog efekta na čijem principu rade i današnji hladnjaci. Plin se komprimira te se tako komprimiran hladi u kontaktu sa hladilom, nakon čega ekspanzijom postiže još nižu temperaturu. Tako su plinovi sa višim temperaturama vrelišta služili kao hladilo onima nižih temperatura vrelišta te se tako došlo do ukapljivanja helija koji ima najnižu temperaturu vrelišta. Još neke tehnike su magnetsko i lasersko hlađenje koji su kasnije obrađeni u ovom tekstu.

Na jako niskim temperaturama dolazi do pojava koje se ne mogu objasniti klasičnom fizikom što je dovelo do uvođenja kvantne mehanike. Jedno od takvih otkrića je i pokus Heikea Kamerlingha Onnesa koji je proučavao ovisnost električnog otpora žive o temperaturi te je primijetio da otpor pada na nemjerljivo malu vrijednost pri temperaturi od 4.2 K. On je uspio u prstenu žive, ohlađenim pomoću tekućeg helija, održati tok struje i dvije godine nakon isključenja njenog izvora (prestanak struje se dogodio zbog štrajka koji je rezultirao prestankom isporuke helija [4]). Iako tada nije znao, Kamerlingh Onnes je otkrio potpuno novo stanje tvari zvano supravodljivost od koje se očekuje široka primjena. Supravodiči se danas uglavnom koriste u izradi jakih magneta koje koriste brojni uređaji kao na primjer uređaj za magnetska rezonancu (MRI) i LHC¹ akcelerator čestica. Oni se koriste niskotemperaturnim supravodičima jer visokotemperaturni nisu dovoljno isplativi i učinkoviti u stvaranju jakog i stabilnog magnetskog polja. Još jedna od potencijalnih

¹Large Hadron Collider

primjena supravodiča je u elektronici gdje bi integracija supravodiča u mikročipove znatno utjecala na brzinu računala gdje se ulažu golemo sredstva i vidi veliki prostor za napredak u budućnosti [10].

2 Počeci niskotemperaturne fizike

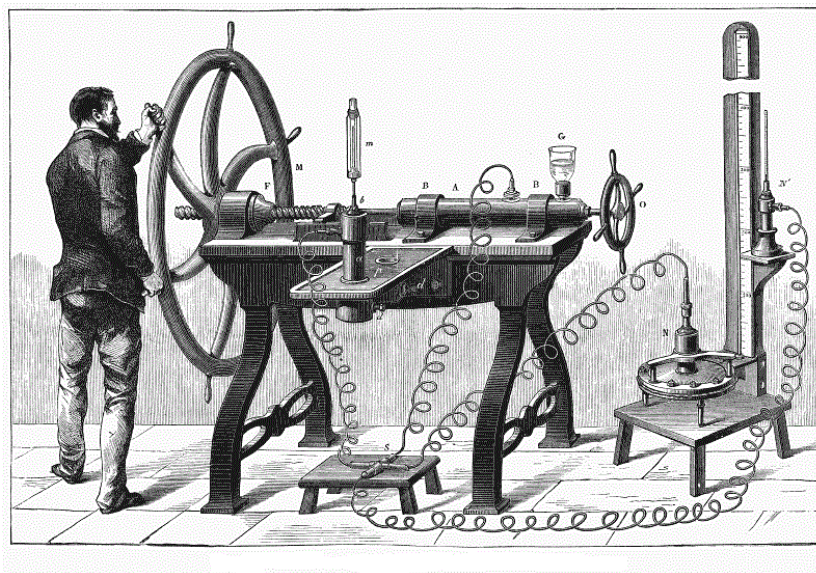
Drugu polovicu 18. stoljeća uzimamo kao vrijeme kada počinje intenzivnije zanimanje znanstvenika za razvoj tehnologija ukapljivanja plinova. Hlađenje plina postiže se u procesu koji uključuje kompresiju, izmjenu topline i ekspanziju, a hlađenjem ili kompresijom se ukapljuje. Samo ukapljivanje je izuzetno važno zbog latentne topline koja se tada oslobađa. U to vrijeme određeni plinovi, kao što su ugljikov dioksid, amonijak te sumporov dioksid, ukapljivali su se na visokim tlakovima². Ukapljivanje hlađenjem uvelike je olakšano otkrićem francuskog znanstvenika A. Thiloriera koji je 1834. godine uspio smjesom suhog leda i dietil-etera ("Thilorierova smjesa") postići temperaturu od $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Međutim, zbog eksperimentalnih nedostataka i nedovoljno razvijene teorije (koncept kritične temperature³ i tlaka) tog vremena određene plinove nije bilo moguće pretvoriti u tekućinu, te ih je engleski znanstvenik Michael Faraday nazvao "permanentnim plinovima". Naime, Faraday je do 1845. godine uz pomoć "Thilorier-ove smjese" uspio ukapljiti sve tada znane plinove izuzev šest "permanentnih plinova" u koje spadaju dušikov dioksid(NO_2), metan(CH_4), ugljikov monoksid(CO), kisik(O_2), dušik(N_2) i vodik(H_2). Međutim, teorijskim i eksperimentalnim radom Dimitrija Mendeljejeva i Thomasa Andrewsa definiran je pojam kritične temperature i time srušena teorija "stalnih" plinova. Naime, Mendeljejev je 1862. godine u svom radu definirao pojam apsolutne točke isparavanja, kasnije će taj pojam biti redefiniran kao kritična temperatura. Zaključak njegovih eksperimenata je bio da je pri određenoj temperaturi (eng. "absolute boiling temperature") moguć prelazak tekućine u plin bez isparavanja i prelazak plina u tekućinu bez kondenzacije, odnosno na datoj temperaturi briše se granica između tekućine i plina, pri čemu tekućina i plin imaju jednaka svojstva. Isparavanje i kondenzacija su pojave koje se javljaju na granici između dvije faze, stoga ako su to pojave koje se vežu za dvofazne sisteme iste su isključene u slučajevima iznad kritične temperature u kojima dvofazno stanje ne postoji. Potvrdu teorije kritične temperature donio je Andrews 1869. godine svojim eksperimentom s ugljikovim dioksidom u kojem je otkrio da ugljikov dioksid pri temperaturi od $30,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ i tlaku od 75 bara prelazi iz plinovitog u tekuće stanje. Nadalje, pri temperaturama višim od $30,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ primjetio je da se fazni

²Martinius van Marum je 1787. godine kondenzirao amonijak pri tlaku od 6 bara.

³Kritična temperatura je temperatura svojstvena svakom plinu iznad koje nije moguće ukapljiti plin bez obzira na tlak koji primjenjujemo

prijelaz ne događa bez obzira na tlak koji primjenjivao, dok na temperaturama nižim od $30,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ fazni prijelaz se odvija na određenom tlaku. Zaključak je takav da para pri višim temperaturama se ne može kondenzirati, dok ju je pri nižim uz određeni tlak moguće ukapljiti. Temperaturu od $30,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ Andrews je definirao kao kritičnu temperaturu za ugljikov dioksid.

Godina preokreta odnosno godina početka razvoja kriofizike označena je 1877., kada je francuski znanstvenik Louis Cailletet uspio ukapljiti kisik. Tim postupkom je postigao temperaturu nižu od $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ i ušao u domenu niskotemperaturne fizike ili kriofizike [2].



Slika 2.1: Cailletet-ov uređaj za ukapljivanje plinova. Louis Cailletet je 1877. godine uspio ukapljiti kisik te postigao temperaturu nižu od $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$. (slika preuzeta s <https://carnotcycle.wordpress.com> [11])

Iste te godine, neovisno o Cailletetu, Raoul Pictet također je ukapljio kisik pritom koristeći kaskadnu metodu. Ukapljivanje je proveo u dva koraka hladeći kisik uz pomoć sumporova i ugljikova dioksida, koje je ukapljio kompersijom. Ukapljeni kisik bio je pri stanju od 320 bara i $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Poljski znanstvenici Szymunt Wroblewski i Karol Olszewski nastavili su usavršavati stečena znanja, te su već 1883. godine uspjeli ukapljiti veće količine kisika i dušika. Wroblewski je 1885. definirao kritičnu temperturu za vodik koja iznosi 33 K i temperaturu isparavanja vodika od 23 K.

Carl Linde i William Hampson su 1895., neovisno jedan o drugome, patentirali sistem ukapljivanja atmosferskog zraka. Hampson-Linde kružni

ciklus počinje povećavanjem tlaka plina kompresijom nakon čega plin prolazi kroz prigušni element (Joule-Thomsonov efekt) te mu se pritom snižava tlak i temperatura. Međutim to uobičajeno nije dovoljno niska temperatura da bi se plin ukapljio, stoga se sad taj plin provodi kroz izmjenjivač topline. Izmjenjivač služi izmjeni topline između hladnog plina nastalog poslije prigušenja i onog toplijeg nastalog kompresijom. To u konačnici smanjuje temperaturu komprimiranog plina prije ulaska u prigušivač, a isto tako i nižu temperaturu prigušenog plina u odnosu na temperaturu plina prvog prigušenja. Kako ciklus napreduje tako se postepeno snižava temperatura plina sve do postizanja ukapljivanja. Hampson-Linde ciklus temelji se na Joule-Thomsonovom efektu ili izoentalpijskoj ekspanziji. Naime, ako plin⁴ ekspandira kroz prigušivač prelazeći iz stanja visokog tlaka u stanje niskog, pri čemu mu se ne mijenja entalpija H , plin obavlja rad (PV) rezultirajući smanjenjem unutarnje energije⁵ plina (U) odnosno temperature. Ovaj slučaj se odvija kada je temperatura plina niža od temperature inverzije⁶.

Vodik je ukapljen 1898. godine i to je pošlo za rukom Jamesu Dewaru koristeći Joule-Thomsonov iterativni postupak hlađenja, dok je helij, kao zadnji tada poznati plin, ukapljen deset godina kasnije od strane Heikea Kamerlingha Onnesa.

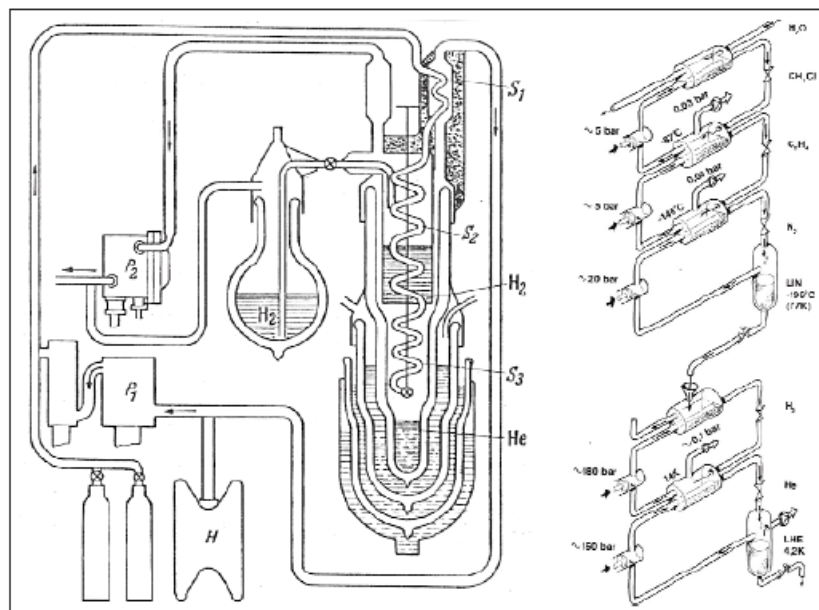
Georges Claude radio je na ukapljivanju zraka koristeći se adijabatskom ekspanzijom plina pomoću cilindra i klipa. On je uspio 1902. godine ukapljiti zrak pomoću uređaja koji se temeljio na osnovnom principu koji kaže da ako komprimiran plin koji se nalazi u izoliranom cilindru ekspandira i obavlja rad pomicanja klipa pri tom postupku plin se hladi.

Treća važna metoda uz adijabatsku ekspanziju i Joule-Thomsonov efekt je bila redukcija tlaka pare kojom se dobiva sniženje temperature tekućine uslijed njenog povećanja isparavanja [2], [4].

⁴Realni plin

⁵ $H = U + PV$

⁶Temperatura inverzije je temperatura ispod koje realan plin pri izoentalpijskoj ekspanziji doživljava pad temperature, a iznad koje mu se nakon izoentalpijske ekspanzije temperatura povećava



Slika 2.2: Skica aparature kojom je Kamerlingh Onnes ukapljio helij 1908. godine gdje je koristio iterativni Joule-Thomsonov proces hlađenja. (slika preuzeta iz članka The history of cryogenic technology [2])

3 Magnetsko hlađenje

Magnetsko hlađenje je tehnika koja se temelji na magnetokaloričnom efektu koji se koristi kako bi se postigle niske temperature. Magnetokalorični efekt, također poznat i kao adijabatska demagnetizacija u fizici niskih temperatura, je magnetno- termodinamički fenomen u kojem dolazi do promjene temperature izlaganjem odgovarajućih materijala promjenjivom magnetskom polju. Taj efekt su otkrili švicarski fizičari Weiss i Piccard krajem 19. stoljeca, iako je Thomson (poznat kao i Lord Kelvin) već prije ustanovio da feromagnetni gube svoja magnetska svojstva kada budu zagrijani na određenu temperaturu te da se isto događa kod hlađenja paramagneta (Curieva temperatura⁷). Također je predvidio da će se feromagnetni zagrijavati kada su magnetizirani i hladiti kada su demagnetizirani te će se taj efekt najviše očitovati oko Curieve temperature. Među prvima koji su patentirali toplinski stroj na temelju ovih principa su Thomas Edison (1887. godine) te Nikola Tesla (1890. godine),

⁷Nazvana po francuskom fizičaru Pierru Curieju; temperatura na kojoj dolazi do potpune promjene magnetskih svojstava odnosno do potpunog magnetskog uređenja što vodi smanjenju entropije

međutim jedini poznati feromagnetni među prijelaznim metalima, željezo i nikal, nisu bili previše upotrebljivi zbog previsoke Curieove temperature [1].

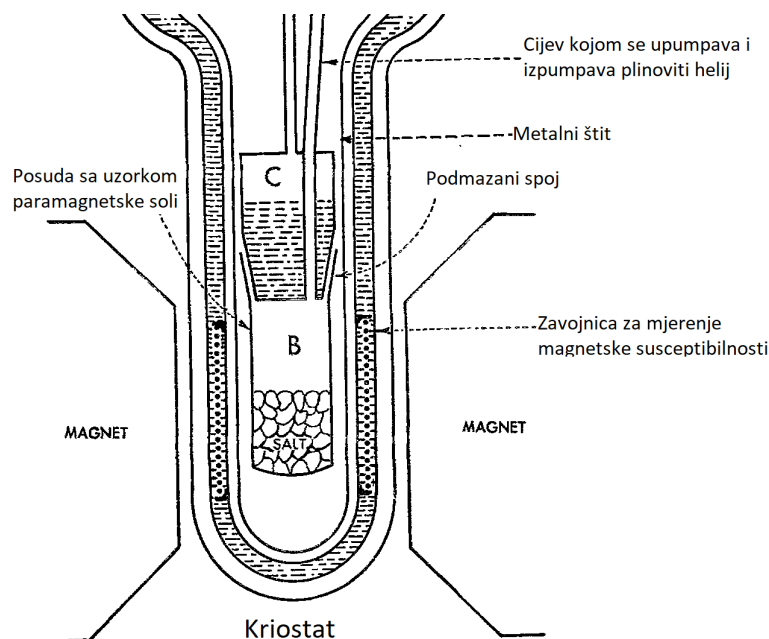
3.1 Adijabatska demagnetizacija paramagnetske soli

Paramagnetizam je svojstvo tvari koje se sastoje od atoma ili molekula čiji je ukupan magnetski moment različit od nule. Primjenom vanjskog magnetskog polja na paramagnet, magnetski moment svake čestice usmjerava se paralelno smjeru vanjskog magnetskog polja, rezultirajući pozitivnom magnetizacijom odnosno stvaranjem induciranog magnetskog polja u istom smjeru. Međutim, inducirano magnetsko polje ovisi o temperaturi jer kinetička energija gibanja čestica ometa usmjerenost magnetskih dipola, stoga je moguća veća magnetizacija paramagneta na niskim temperaturama. Nadalje, magnetska susceptibilnost je fizikalna veličina koja opisuje lakoću orijentiranja magnetskih dipola prilikom djelovanja vanjskog magnetskog polja. Time možemo zaključiti da su magnetska susceptibilnost i temperatura obrnuto proporcionalni. Pierre Curie je definirao Curieov zakon 1895. godine uspostavivši linearnu vezu između magnetske susceptibilnosti (χ) i temperature (T)

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (1)$$

gdje je C konstanta ovisna o materijalu. Pretpostavka je da Curieov zakon vrijedi za paramagnetske soli u blizini apsolutne nule. Pomoću Curieovog zakona određuje se temperatura paramagnetske soli, mjerenjem magnetske susceptibilnosti uzorka. Peter Debye je 1926. godine prepoznao potencijal paramagnetskih soli, koje imaju nasumičnu raspodjelu dipola na temperaturama ispod 1 K, kako bi se postigle jako niske temperature, blizu apsolutne nule. Primjenom magnetokaloričnog efekta na paramagnetske soli može se doći do vrlo niskih temperatura. Naime, uzmimo uzorak paramagnetskih soli i ohladimo ga pumpanim tekućim helijem koji isparava uslijed reduciranog tlaka na temperaturu od 1.4 K. Primjenom jakog magnetskog polja reda veličine 3 Tesla, pri čemu proces magnetizacije mora biti izoterman, dolazi do usmjerenja dipolnih momenata unutar uzorka u smjeru vanjskog magnetskog polja što povećava uređenje odnosno smanjuje entropiju uzorka. Uređenju uzorka odnosno entropiji pridonose raspored dipolnih momenata i kinetičko gibanje čestica. Stoga uslijed izotermne magnetizacije nema kinetičkog doprinosa entropiji što znači da entropija napušta uzorak u vidu topline kojom se zagrijava okolni tekući helij. Ako sada adijabatski demagnetiziramo uzorak,

magnetski dipoli vraćaju se u stanje nasumičnog rasporeda. To povećanje magnetskog doprinosa ukupnoj entropiji iziskuje smanjenje kinetičkog doprinosa jer ukupna entropija mora biti očuvana. Smanjenje kinetičkog doprinosa implicira smanjenje temperature uzorka.



Slika 3.1: Primjer aparature kojom se postižu niske temperature uz primjenu adijabatske demagnetizacije paramagnetskih soli. Uzorak se stavlja u posudu B, dok se tekući helij nalazi u posudi C. Između posuda se u fazi magnetizacije nalazi plin helij koji služi kao vodič topline. (slika preuzeta iz članka Temperatures near the absolute zero [9])

Da bi se uspila provesti izotermna magnetizacija uzorka paramagnetske soli aparatura mora biti izvedena u takvom obliku u kojem će biti moguć prijenos topline sa soli na posudu sa tekućim helijem, a isto tako kasnije pri adijabatskoj demagnetizaciji se treba ukloniti mogućnost prijenosa topline. To se uspijeva pomoću plinovitog helija koji služi kao kontakt između soli i posude s tekućim helijem za vrijeme magnetizacije, dok se kasnije uzorak izolira od okoline ispumpavajući helij stvarajući vakuum. Ako pogledamo sliku 3.1 uzorak paramagnetske soli nalazi se u posudi B, koja se prilikom magnetizacije dodatno ispuni helijem koji služi kao prijenosnik topline između soli i tekućeg helija u posudi C. Nakon toga se plin ispumpa i uspostavi se vakuum, a onda se isključi vanjsko magnetsko polje što rezultira hlađenjem

uzorka.

Magnetokalorični efekt možemo opisati pomoću sljedećih formula. Prvo krećemo od formule

$$TdS = C_p dT - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dP \quad (2)$$

gdje je T temperatura, S je entropija, C_p je toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, V je volumen, a P je tlak. Da bi prethodnu jednadžbu primjenili za slučaj magnetokaloričnog efekta na paramagnetskim solima zamjeniti ćemo tlak P sa veličinom $-H$ (snaga magnetskog polja), a volumen V sa intenzitetom magnetizacije M .

$$TdS = C_H dT + T \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (3)$$

Curieov zakon možemo primjeniti u području malih vrijednosti H/T .

$$\chi = \frac{C}{T} = \frac{M}{H} \quad (4a)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{C}{T} \right) = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{M}{H} \right) \quad (4b)$$

$$-\frac{C}{T^2} = \frac{1}{H} \frac{\partial M}{\partial T} \quad (4c)$$

$$T \frac{\partial M}{\partial T} = -\frac{CH}{T} = -M \quad (4d)$$

Ako sada izraz 4d zamjenimo u jednadžbi 3 dobivamo

$$TdS = C_H dT - M dH \quad (5)$$

Znajući da je u slučaju izotermne magnetizacije promjena temperature dT jednaka nuli i uz korištenje jednadžbe 4a dobivamo

$$TdS = -\frac{CH}{T} dH \quad (6a)$$

$$\Delta S = -\frac{C}{T^2} \int_{H_i}^{H_f} H dH \quad (6b)$$

$$\Delta S = -\frac{C}{T^2} (H_f^2 - H_i^2) \quad (6c)$$

Zadnja jednadžba pokazuje da dolazi do smanjenja entropije uslijed izotermne magnetizacije. Nadalje, definirat ćemo i relaciju za toplinu⁸

$$Q = -\frac{C}{T^2} \int_{H_i}^{H_f} H dH \quad (7a)$$

$$Q = -\frac{C}{2T^2} (H_f^2 - H_i^2) \quad (7b)$$

iz koje se vidi da toplina napušta uzorak (ima negativan predznak) pri pozitivnoj magnetizaciji. Što se tiče adijabatske demagnetizacije, promjena entropije dS je jednaka nuli stoga primjenom na jednadžbu 3 dobivamo

$$C_H dT = M dH \quad (8a)$$

$$dT = \frac{1}{C_H} \left(\frac{CH}{T} \right) dH \quad (8b)$$

$$\Delta T = \frac{C}{TC_H} \int_{H_i}^{H_f} H dH \quad (8c)$$

$$\Delta T = -\frac{C}{2TC_H} (H_f^2 - H_i^2) \quad (8d)$$

pritom uzimajući uzimajući pretpostavku da je toplinski kapacitet C_H konstantan. Jednadžba 8 pokazuje temperaturni pad uslijed demagnetizacije.

Rezultati prvih ovakvih pokusa dobiveni su 1932. godine kada su znansvenici uspjeli postići temperaturu od 0.25 K, pri jakosti magnetskog polja od 0.8 Tesla. Kasnije su otišli na još niže temperature koristeći cerijev etilsulfat, te uz polje od 2,7 Tesla, došli do 0.085 K. Najniža postignuta temperatura je 0.0044 K. Nju su postigli W.J.De Hass i E.C.Wiersma 1935.godine [9].

⁸ $TdS = dQ$

4 Lasersko hlađenje

Lasersko hlađenje je jedno od najbrže rastućih područja niskotemperaturne fizike koje je doživilo znatan razvoj u posljednjih 20 godina. Ta tehnika uključuje sposobnost hlađenja atoma do veoma niskih kinetičkih temperatura. Molekule plinova na sobnoj temperaturi se gibaju brzinama reda veličine 300 m/s, približno brzinama zvuka. Ta brzina se može smanjiti hlađenjem plinova, ali čak i na temperaturi od svega 4 K⁹, atomi helija imaju brzinu od 90 m/s. Na temperaturama na kojima te brzine padaju ispod 1 m/s, sve molekule u ravnoteži bi bile kondenzirane, s tlakom pare toliko niskim da ne bi bilo molekula plina u plinovitom stanju.

4.1 Lasersko hlađenje zrake atoma

Princip hlađenja je sljedeći: zraka atoma se usporava i hladi prijenosom momenta kada atom apsorbira foton. Zraka atoma brzine v je ozračena laserskom zrakom koja dolazi iz suprotnoga smjera te za svaki foton kojeg atom u osnovnom stanju apsorbira, njegova se brzina smanji za $v_{rec} = \hbar \frac{k}{m}$. Da bi atom ponovno apsorbirao foton, kako bi mu se dodatno smanjila brzina, mora se vratiti u početno stanje koje postiže emisijom apsorbiranog fotona. Fotoni se emitiraju u nasumičnim smjerovima, ali s prosječno simetričnom raspodjelom što rezultira ukupnom doprinosu momentu jednakim nuli. Primjerice, zraka atoma natrija brzine 10⁵ cm/s je ozračena žutom rezonantnom svjetlosti ($v_{rec} = 3$ cm/s) što znači da bi se proces apsorpcije i emisije trebao dogoditi 3 x 10⁴ puta kako bi se atom Na doveo u stanje mirovanja. Pošto se taj proces može ponoviti svake 32 ns¹⁰, ukupno vrijeme zaustavljanja bi iznosilo 1ms. Lasersko pobuđivanje atoma iz jednog od energetskih nivoa u pobuđeno stanje može rezultirati prelaskom u drugi energetski nivo što prekida apsorpciju laserske svjetlosti. Ovaj problem se rješava uvođenjem nove laserske frekvencije, koja vraća atome iz "pogrešnoga" u "pravo" stanje u kojem se hlađenje može nastaviti. Uvođenjem nove frekvencije dolazi se do drugog problema – Dopplerovog pomaka. Apsorpcija samo 200 fotona te usporavanje za 6 m/s pomiče atom iz rezonancije što rezultira značajnim padom brzine apsorpcije te usporavanjem samo malog dijela atoma za malu brzinu, ali i sužavanjem spektra raspodjele brzina. Jedno od rješenja je

⁹Temperatura kondenzacije helija

¹⁰Vrijeme koje atom natrija može provesti u pobuđenom stanju

promjena frekvencije lasera ("chirping") kako bi ostala u rezonanciji sa hlađenim atomima. Drugi način uključuje korištenje Zeemanovog efekta tako da se atomska zraka pušta kroz zavojnicu čije je magnetno polje jače na kraju te se time učinci Zeemanovog i Dopplerovog efekta poništavaju. Pošto se atomi nalaze u jakom magnetskom polju, postoji dobro definirana os kvantizacije koja omogućava primjenu selektivnih pravila za radijacijski prijelaz te izbjegava nepoželjno optičko "pumpanje"¹¹.

4.2 Optičke melase

Ideja ovog načina je postaviti atome između dvije koaksijalne suprostavljene laserske zrake na prostornoj x osi. Atomi koji se kreću ulijevo vide da fotoni koji se suprostavljaju njegovom gibanju imaju Dopplerov pomak prema njihovoj rezonantnoj frekvenciji, dok fotoni koji se kreću u njegovom smjeru imaju Dopplerov pomak koji se udaljava od njegove rezonantne frekvencije te on apsorbira samo one fotone koji mu dolaze ususret. Analogno tome, isto se događa i sa atomima koji se kreću u desno. Dodavanjem još 2 para lasera na y i z osima dobivamo hlađenje u 3 dimenzije. Zbog uloge Dopplerovog efekta, ovaj način hlađenja se još zove i Dopplerovo hlađenje. Ovaj proces rezultira temperaturama reda $\hbar\Gamma$ ¹² koje su postignute ravnotežom između laserskog hlađenja i zagrijavanja zbog nasumične prirode apsorpcije i emisije fotona. Grijanje i hlađenje atoma dolazi do ravnotežnog stanja na temperaturi koja definira ovaj način hlađenja te iznosi

$$mv_i^2 = k_b T = \frac{\hbar\Gamma}{4} \left(\frac{\Gamma}{2\delta} + \frac{2\delta}{\Gamma} \right) \quad (9)$$

gdje je δ frekvencija lasera, a v_i brzina duž neke osi. Minimalna se temperatura dobiva za $\delta = -\Gamma/2$ i naziva se Dopplerova temperatura:

$$T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_b} \quad (10)$$

Dopplerovim hlađenjem postizemo temperaturu od 240 μK za atome natrija. Suprostavljene koaksijalne laserske zrake u jednoj dimenziji djeluju na atome ukupnom silom koja iznosi $F_{om} = F_+ + F_-$. Za male brzine i

¹¹Dodavanje laserskih zraka s ciljem poništavanja Dopplerovog efekta

¹² Γ je brzina spontane emisije pobuđenog stanja

negativne pomake frekvencije lasera ($\delta < 0$) sila usporava atom te je proporcionalna brzini kao da na atome djeluje viskozno trenje. Analognim djelovanjem ostala dva para lasera dobivamo to "ljepljivo" svojstvo koje je razlog zašto se u nazivu koristi riječ melasa¹³ [12].

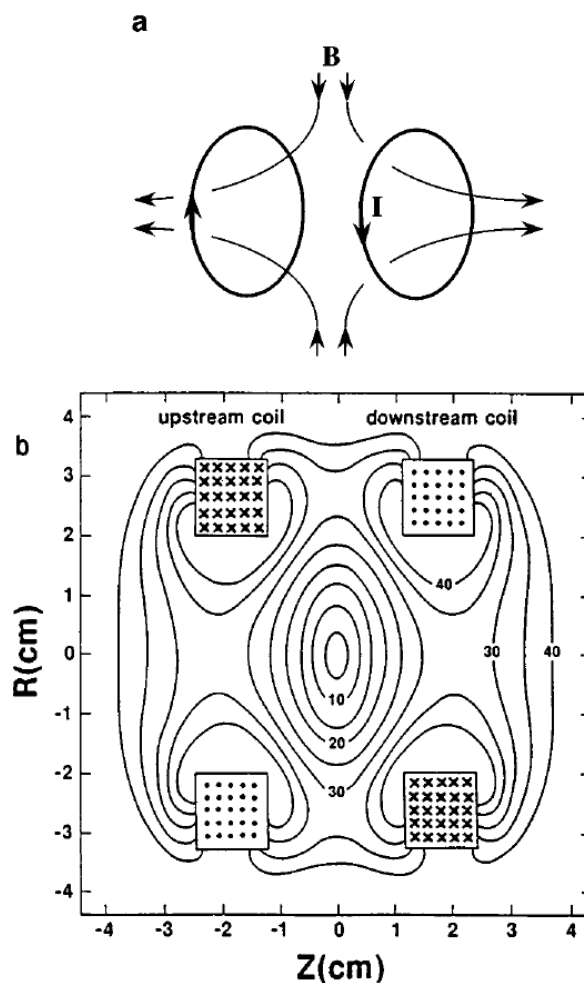
Eksperimentalno se danas postižu i niže temperature od onih određenih Dopplerovom granicom kao što su $40 \mu\text{K}$ za natrij do $2 \mu\text{K}$ za cezij. Očito se javlja potreba za novim i boljim modelima opisa realnih atoma i molekula te se tako dolazi do modela sub-Dopplerovog hlađenja [3], [5].

4.3 Magnetsko-optička zamka

Ideja magnetske zamke je da u magnetskom polju, atom sa određenim magnetskim momentom će biti u kvantnom stanju čija se Zeemanova energija povećava sa povećanjem polja. Atomi u tim energijskim stanjima, tzv. tražitelji niskog polja, se mogu uhvatiti u zamku u konfiguraciji magnetskog polja u kojoj postoji lokalni minimum vrijednosti.

Da bismo dobili veću gustoću atoma te ih zarobili u manji volumen, koriste se optičke melase zajedno sa magnetskim poljem čiju kombinaciju nazivamo magnetsko-optičkom zamkom. Za stvaranje magnetskog polja se koriste dvije paralelne zavojnice kroz koje struja teče u suprotnim smjerovima te se tako formira magnetski kvadropol (slika 4.1.). Konfiguracija zavojnica se postavlja tako da je u centru sjecišta laserskih zraka magnetsko polje jednako nuli te se ono povećava sa udaljavanjem od centra. Atomi apsorbiraju lasersku svjetlost te kao posljedicu osjećaju silu prema centru, tako da utjecaji Dopplerov i magnetskog pomaka zajedno guraju hlađene atome prema centru zamke [3], [12].

¹³Gusta, ljepljiva i viskozna tekućina



Slika 4.1: a) Konfiguracija Helmholtzovih zavojnica te linije magnetskog polja B. b) Presjek kvadropola u xy ravnini te vrijednosti magnetskog polja B izraženog u mT.(slika preuzeta iz članka Laser cooling and trapping of neutral atoms [3])

4.4 Bose-Einsteinov kondenzat

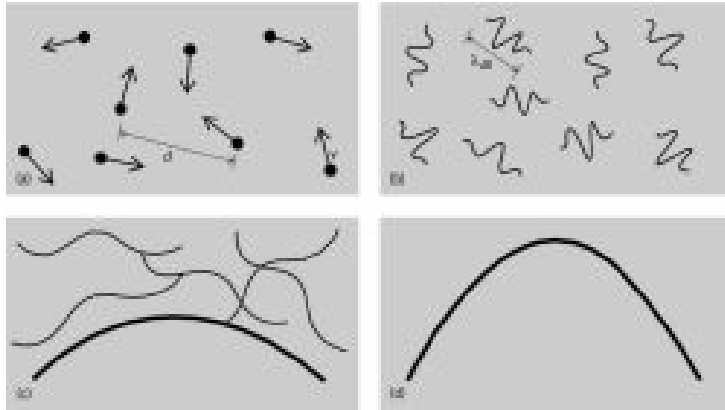
Bose-Einsteinov kondenzat je stanje materije u kojem se sve čestice nalaze u osnovnom, najnižem energetsom stanju. Iako su Satyendra N. Bose i Albert Einstein pretpostavili njegovo postojanje već 1924. godine, on je eksperimentalno dobiven tek 1995. godine hlađenjem plina rubidijevih atoma na 170 nK. On nastaje pri određenoj gustoći

$$N = \frac{2.6}{\lambda_{dB}^3} \quad (11)$$

gdje je λ_{dB} de Broglieva valna dužina definirana kao

$$\lambda_{dB} = \frac{\hbar}{\sqrt{2\pi M k_b T}} \quad (12)$$

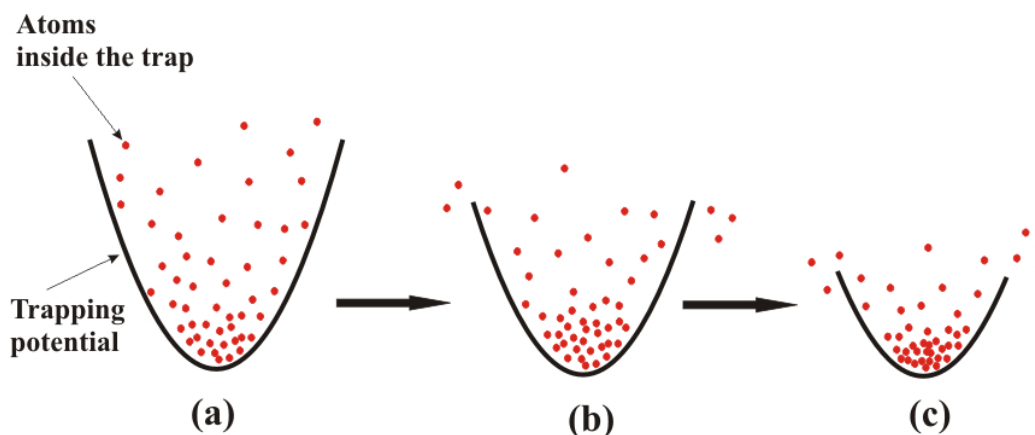
gdje je M masa atoma, a T je njegova temperatura. De Broglieva valna dužina predstavlja neodređenost položaja atoma te definira volumen u kojem se taj atom vjerovatno nalazi. Kada taj volumen postaje dovoljno velik, λ_{dB} postaje usporediva sa udaljenosti među atomima, događa se Bose-Einsteinova kondenzacija te sustava postaje jedan veliki val materije (slika 4.2.).



Slika 4.2: Prikaz nastajanja Bose-Einsteinovog kondenzata. Smanjenjem temperature se prelazi iz stanja sa više pojedinih valnih paketa (gore desno) u stanje jednog velikog vala (dolje desno). (slika preuzeta s <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com> [13])

Sama tehnika laserskog hlađenja, koja dovodi do temperatura reda μK , nije dovoljna za dobivanje Bose-Einsteinovog kondenzata te se ona koristi u kombinaciji sa tehnikom hlađenja isparavanjem. Dipolna zamka se stvara kombinacijom dviju ukrštenih laserskih zraka te jakog magnetskog polja kojeg stvaraju tri odvojene zavojnice (od kojih su dvije koaksijalne te istih dimenzija). Najbrži atomi "bježe" iz ove zamke, dok oni sa manjom energijom tonu dublje u zamku (slika 4.3.).

Ukupna temperatura takvog sustava je manja nego prije "bijega" atoma sa najvećim energijama. Mijenjanjem frekvencije lasera te struja u trima zavojnicama čime se mijenja i magnetsko polje, dubina zamke se smanjuje, a samim time i ukupna temperatura sustava. Najniža izmjerena temperatura postignuta ovom tehnikom iznosi $450 \pm 80 \text{ pK}$ [6].



Slika 4.3: Princip rada dipolne zamke, od početne (a) do krajnje (c) konfiguracije gdje u zamci ostaju samo najhladniji atomi. (slika preuzeta s <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com> [14])

5 Zaključak

U ovom radu je dan kratki opis razvoja fizike hlađenja, počevši od druge polovice 18. stoljeća te ukapljivanja različitih plinova pomoću hlađenja i kompresije. Unatoč eksperimentalnim nedostacima i nedovoljno razvijenoj teoriji, u tom se periodu dolazi do znatnih postignuća kao što su Mendeljejeva definicija kritične temperature i Cailletetovo ukapljivanje kisika na temperaturi od -150°C . Kasnije istraživanje na tom području se uglavnom temeljilo na interpretaciji Joule-Thomsonovog efekta koji opisuje adijabatsko širenje plinova.

Magnetsko hlađenje je tehnika koja se temelji na magnetokaloričnom efektu te koristi termodinamička svojstva magnetskih tvari. Opisana je adijabatska demagnetizacija paramagnetske soli na koju se djeluje magnetskim poljem što rezultira povećanjem uređenjem i smanjenom entropijom koja napušta uzorak u obliku topline koja zagrijava okolni tekući helij. Uslijed demagnetizacije, magnetski dipoli se vraćaju u stanje nasumičnog rasporeda što iziskuje smanjenje kinetičkog doprinosa ukupnoj entropiji (implicira smanjenje temperature uzorka).

U lasersko hlađenje je veoma važna uloga Dopplerovog efekta koji se koristi kako bi se hlađenom atomu smanjila kinetička energija, a samim time i temperatura bombardirajući ga fotonima. U ovom se načinju hlađenja koriste tehnike koje imaju široku primjenu i u drugim područjima kao što

su magnetska zamka i optička melasa. Također se koristi u kombinaciji sa hlađenjem isparavanjem gdje se postižu temperature od oko 500 pK. Od svih opisanih tehnika lasersko hlađenje je doživjelo najveći napredak u zanjih pola stoljeća se od te tehnike očekuje najveći daljni napredak.

Otkriće faznih prijelaza drugog reda na niskim temperaturama, supravodiča i supratekućina, te široki spektar njihove primjene u modernim tehnologijama opravdava sav napor uložen u ovu granu fizike. Također potiče na daljnje istraživanje i ulaganje u "plodnu" granu niskotemperaturne fizike.

Literatura

- [1] Bertram M. Schwarzschild, *Magnetic refrigerator-heat pump*, Physics Today, 32, 18-20, (1979).
- [2] Ebbe Almqvist, *The history of cryogenic technology*, CrioGas International, 48-51, (2007).
- [3] William D. Phillips, *Laser cooling and trapping of neutral atoms*, Rev. Mod. Phys., 70(3), 721-741, (1998).
- [4] Dirk van Delft, *Little cup of helium, big science*, Physics Today, 36-42, (2008).
- [5] R. Wynands i S. Weyers, *Atomic fountain clocks*, Metrologia, (2005).
- [6] A. E. Leanhardt i T. A. Pasquini, *Cooling Bose-Einstein condensates below 500 picokelvin*, Science, 301, 1513-1515, (2003).
- [7] Robert J. Soulen Jr. i William E. Fogle, *Temperature scales below 1 kelvin*, Physics Today, 50, 36-42, (1997).
- [8] Dragia Trifonov Ivanov, *Experimental determination of absolute zero temperature*, The Physics Teacher, 41, 172-175, (2003).
- [9] Simon A. Weissman, *Temperatures near the absolute zero*, American Journal of Physics, 15, 451-457, (1947).
- [10] Ivica Aviani, *Apsolutna nula*, Universitas, 29, 20-21, (ožujak 2012).
- [11] Carnotcycle.wordpress, URL: https://carnotcycle.wordpress.com/tag/louis_cailletet/, (21.7.2017.).
- [12] N. Nekić, diplomski rad: *Dinamika hladnih atoma rubidija zatočenih u magneto-optičkoj stupici*, 2014.
- [13] The free dictionary, URL: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Bose-Einstein+Condensation>.
- [14] Cold-atoms.physics, URL: <http://cold-atoms.physics.lsa.umich.edu/projects/bec/evaporation.html>.