

Bose Einstein Kondensation i atomare gasser – Når atomer bliver til kvantebølger

Af Kasper T. Therkildsen og Jan W. Thomsen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

En gas af atomer, der køles ned til næsten det absolutte nulpunkt opnår helt specielle kvanteegenskaber afhængig af atomernes spin (angulære moment). Atomer med heltalligt spin, såkaldte bosoner, vil ved meget lave temperaturer, typisk nogle få hundrede nanokelvin, smelte sammen til en ny tilstandsform man kalder et Bose-Einstein-Kondensat (BEC). I denne tilstandsform træder atomernes bølgenatur i karakter og giver forskere helt nye værktøjer til studier af kvantefænomener relateret til mange forskellige grene af fysikken.

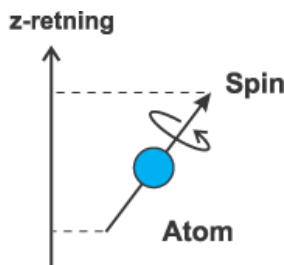
Indledning

Helt tilbage i 1924 udviklede en indisk fysiker ved navn Satyendra Nath Bose en statistisk teori for hvordan masseløse lyspartikler vil opføre sig. Han sendte sit arbejde til Albert Einstein, der straks så konsekvenserne af Boses geniale arbejde og udvidede teorien til også at omfatte massive partikler som f.eks. atomer.

Boks 1: Kvantestatistik – Bosoner vs. fermioner

I kvantemekanikken har partikler et kvantiseret impulsmoment (angulært moment) der kaldes spin. Spinnets størrelse kan antage værdier givet ved:

$$S = \frac{h}{2\pi} \sqrt{s(s+1)}, \quad s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$$



hvor h er Plancks konstant $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s. Længs en vilkårlig retning i rummet, f.eks. z-retningen, kan projektionen kun antage værdierne $(-s, -s + 1, \dots, s - 1, s)h/2\pi$. I kvantefysik deles partikler op efter om de har halvtalligt eller heltalligt spin s . Partikler med halvtalligt spin kaldes fermioner, som f.eks. elektronen eller protonen ($s = 1/2$). Partikler med heltalligt spin kaldes bosoner, f.eks. ^1H ($s = 1$), som er sammensat af to fermioner. Eksempler blandt neutrale atomer (sammensat af halvtallige fermioner) er ^4He , ^{23}Na , og ^{87}Rb , som er bosoner, mens f.eks. ^3He og ^6Li er fermioner.

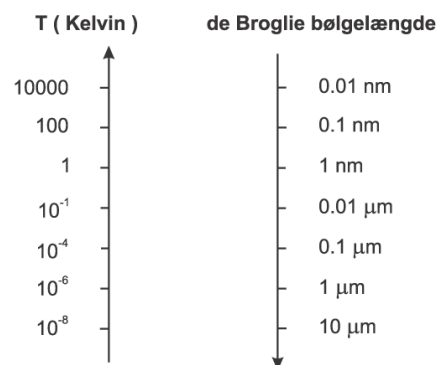
En af konsekvenserne af Bose og Einsteins arbejde er, at atomer med heltalligt spin spontant kan klumpe sig sammen, eller snarere kondensere, i systemets laveste energitilstand, hvis blot temperaturen er lav

nok. I den laveste energitilstand vil hastigheden have et minimum, hvor atomerne praktisk talt ligger helt stille. BEC er altså en kondensation i hastighedsrummet. Chansen for at et atom stimuleres ned i den laveste energitilstand under afkølingsprocessen er faktisk proportional med $(n + 1)$, hvor n er antallet der allerede befinder sig i laveste energitilstand. Denne egenskab er meget karakteristisk for bosoner og genfindes i f.eks. stimuleret absorption og emission, der danner grundlag for laseren. Under afkølingsprocessen går det således hurtigere og hurtigere med at få atomer kondenseret og man taler om en slags "lavine effekt" som oftest omtales "run away process".

Boks 2: de Broglie-bølgelængde

Bølgelængden λ af en partikel er givet ved $\lambda = h/p$, hvor impulsen p er lig produktet af hastighed og masse, $p = m \cdot v$. Bølgelængden er omvendt proportional med impulsen, dvs. jo lavere hastighed jo større bølgelængde.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

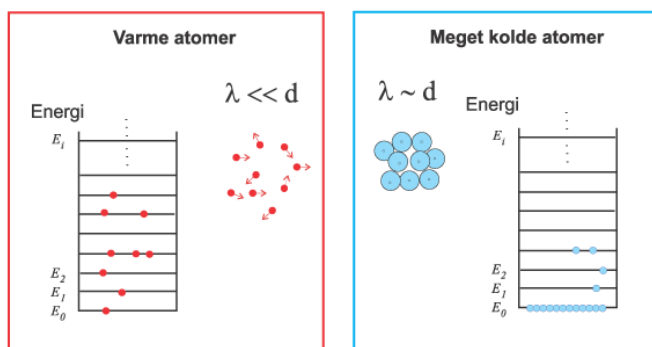


Omtrentlige de Broglie-bølgelængder for partikler med masse som brintatomer, når de danner en gas med de viste temperaturer. Ved daglige temperaturer er de Broglie-bølgelængden langt under en nanometer (10^{-9} m).

Ifølge kvantemekanikken kan massive partikler tilskrives en bølgenatur. Louis de Broglie indførte i 1924 den meget kontroversielle idé, at massive partikler kan beskrives med bølger (se boks 2). Typisk er de Broglie-bølgelængden for makroskopiske legemer meget lille, af størrelsesorden picometer eller mindre. For kolde atomer kan den antage værdier i mikrometer området.

Bose-Einstein-kondensation

Bose-Einstein-kondensation opstår ved ekstremt lave temperaturer, netop når atomernes de Broglie-bølgelængde bliver sammenlignelig med deres indbyrdes afstand, se figur 1. Typiske temperaturer er omkring 300 nanokelvin, dvs. 300 milliardtedele af en grad over det absolutte nulpunkt ($-273,15^\circ \text{C}$). Atomernes indbyrdes afstand er bestemt af densiteten, så umiddelbart skulle man tro at en meget høj densitet er ønskelig. Desværre vekselvirker atomerne for meget ved høje densiteter og disse effekter overskygger fuldstændigt BEC-fænomenet. Flydende helium var det første system, hvor man på indirekte vis kunne påvise BEC og nogle af de forunderlige fænomener, der er forbundet med denne tilstandsform. Men der skulle gå 71 år efter Bose og Einsteins forudsigelser før fysikere var i stand til at producere BEC og direkte undersøge dets egenskaber. For dette arbejde modtog de tre amerikanske fysikere C. Wieman, E. Cornell og W. Ketterle nobelprisen i fysik i 2001.



Figur 1. Figur 2. Atomer fanget i en fælde har kvantiserede energier $E_0, E_1, E_2, \dots, E_i, \dots$. Ved almindelige temperaturer (t.v.) er gassens atomer fordelt på mange forskellige energiniveauer, stige trin. Er temperaturen tilstrækkelig lav (t.h.) kondenseres atomerne i den laveste energitilstand E_0 .

Bose-Einstein-kondensation (se figur 1) indtræder, når de Broglie-bølgelængden bliver sammenlignelig med middelfrafstanden d mellem atomerne. Den kvantemekaniske sandsynlighed for at finde en bose-partikel med energien E_i , dvs. på stige trin i , ved temperaturen T er givet ved Bose og Einsteins formel:

$$n(i) = \frac{1}{e^{(E_i - \mu)/kT} - 1} \quad (1)$$

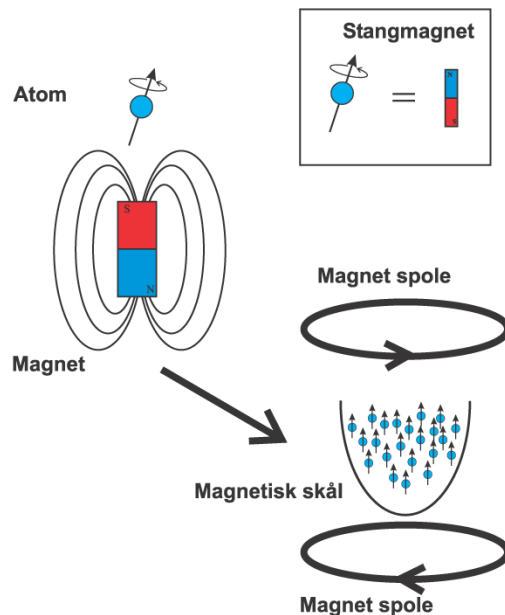
hvor μ er det kemiske potential, der beskriver hvor meget energi det koster at fjerne en partikel fra fælden.

Hvordan opnås temperaturer i nK-området?

Der skal en helt speciel type fryser til at stoppe atomernes bevægelse og køle dem ned til nanokelvin-temperaturer. Konventionelle metoder, der benytter kompressorer, mekaniske beholdere og lignende kan ikke anvendes. Dels fordi temperaturen man her opnår kun er i millikelvin-området, og dels fordi de atomer man benytter, hurtigt vil sætte sig fast på siden af beholderen. Helt andre teknikker må tages i brug. Nedkøling udføres normalt i to trin. Det første trin involverer laserkøling af atomerne til ca. 100 mikrokkelvin eller mindre. Derefter overføres atomerne til en magnetisk fælde. Atomer med et spin opfører sig som små stangmagneter, der kan fanges i snedigt designede magnetfelter, som udgør en magnetisk fælde.

Boks 3: Magnetiske fælder for atomer

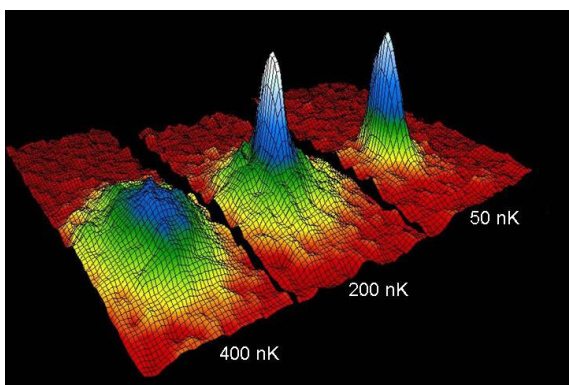
Atomer med et spin opfører sig som små stangmagneter, der roterer om deres egen akse. Man siger de har et magnetisk moment, der bestemmer styrken af stangmagneten. Ved at overlappes magnetfeltet fra to eller flere spoler kan atomer med et magnetisk moment fanges i en usynlig fælde. Der kræves kraftige magnetfelter idet atomernes magnetiske momenter er meget små. Typiske strømme er flere hundrede ampere og giver en del tekniske udfordringer.



Varme atomer har høj bevægelsesenergi og befinder sig højt oppe i fælden, kolde atomer tættere ved bunden, se boks 3. Man kan selektivt vende de atomare stangmagneter med radiofrekvensfotoner. Frekvensen af fotonerne, typisk mellem 0,5 og 100 MHz, bestemmer hvor i fælden man vender atomets spin, dvs. stangmagneten. Straks efter forlader atomet fælden, idet det ikke er fanget mere. Man starter med høje radiofrekvenser, der vender spinnets på de varme atomer og tuner derefter frekvensen langsomt til mindre og mindre værdier. På

den måde skummer man de varme atomer af og beholder de koldeste. Sammenstød mellem de tilbageblevne atomer sikrer hurtig termalivering til lavere og lavere temperaturer. Denne proces tager typisk 50 sekunder afhængig af startdensitet og -temperatur.

Når temperaturen når den kritiske værdi af ca. 300 nanokelvin, hvor atomernes indbyrdes afstand er sammenlignelig med deres de Broglie-bølgelængde, begynder de at kondensere i den laveste energitilstand. Den effekt kan observeres ved at måle atomernes temperatur. Typisk udføres dette ved at slukke for magnetfælden og løslade atomerne i fri bevægelse et stykke tid, omkring 30 millisekunder, hvorefter et billede af atomernes skygge tages med en kort laserpuls. Stedfordelingen af atomerne afslører deres temperatur. Kolde atomer vil ikke have bevæget sig langt og fordeler sig i centeret, mens de varme, hurtige atomer har bevæget sig væk fra centeret. På figur 2 er vist et sådant billede som funktion af temperaturen.



Figur 2. Billede af atomernes hastighedsfordeling ved tre forskellige temperaturer. (a) 400 nK: gassen beskrives ved termisk fordeling hvor atomerne er fordelt på mange forskellige energiniveauer i fælden, se figur 1. (b) 200 nK: en del af atomerne er kondenseret til den laveste energitilstand karakteriseret ved asymmetriske spidse fordeling. (c) 50 nK: alle atomer er kondenseret i den laveste energitilstand. Dette viser de første BEC frembragt i Rb atomer ved JILA, University of Colorado, 1995.

Den asymmetriske spidse fordeling vist på figur 2 er faktisk et direkte billede af Heisenbergs ubestemthedsrelation for impuls og sted. Atomerne i fælden er oprindeligt fastholdt i en asymmetrisk meget langstrakt fælde. Når atomerne frigives for at måle deres hastighed vil ubestemtheden i hastigheden i den ene retning være væsentlig større sammenlignet med retningen vinkelret på. Derfor fremkommer den meget asymmetriske hastighedsfordeling set på figur 2.

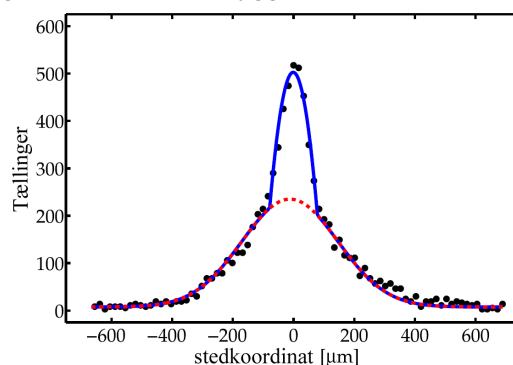
I W. Ketterles laboratorium ved MIT, Boston har man opnået en rekordlav temperatur på ca. 500 picokelvin. Det er den laveste temperatur nogensinde observeret af frie atomer og det udgør måske det koldeste sted i Universet. Tekniske begrænsninger som vibrationer sætter den nedre grænse for hvor kolde atomer der kan fremstilles i laboratoriet.

Studier med kolde kvantegasser

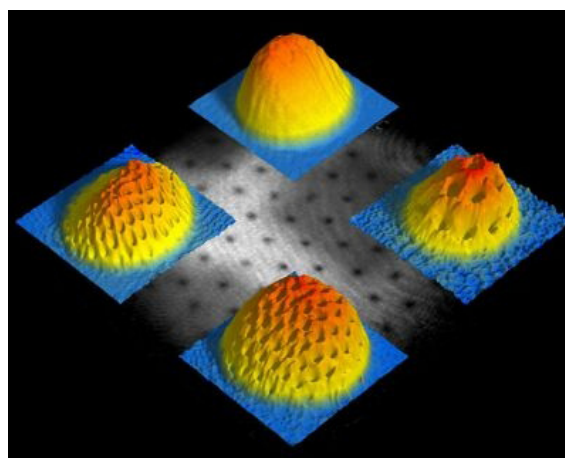
Realiseringen af BEC i kolde atomgasser har medført en revolution af kolde atomers fysik og tilført en række nye

muligheder for detaljerede studier af bose- og fermi-kvantegasser. Den grundlæggende fysik kan genfindes i mange forskellige grene af fysikken, men kan vanskeligt dyrkes i den rene form kvantegasserne tillader.

En af de helt unikke egenskaber ved BEC tilstanden er at den har superflydende væskeegenskaber. En superflydende væske kan flyde uden modstand ligesom elektroner i en superleder kan bevæge sig uden modstand. Superflydende væsker kan klart skelnes fra almindelige væsker blot ved at sætte dem i rotation. En normal væske roterer ligesom et fast stof, men en superflydende væske kan kun rotere, hvis der dannes små vortex (hvirvler) i væsken, en slags små minitornadoer. Det fascinerende er, at i en given radius fra vortex centeret er kun ganske bestemte rotationshastigheder tilladte. Der er en minimal hastighed samt et helt antal gange den minimale værdi. Ingen rotationshastigheder imellem er tilladt! Ved hjælp af laserlys som blandepind har man kunne sætte et superflydende BEC i rotation. På figur 4 ses et skyggebillede af et superflydende BEC i rotation. De små mini-tornadoer ses klart som mørke huller på skyggebilledet af atomskyggen.



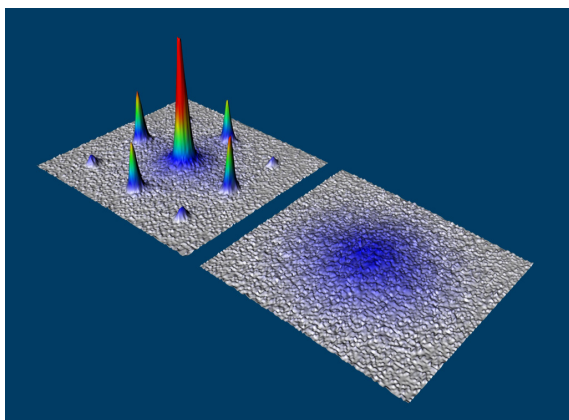
Figur 3. BEC i natriumatomer opnået på Niels Bohr Institutet, som det femte laboratorium i verden. Bemærk den dobbelte hastighedsfordeling, spidsen angivet med blåt stammer fra atomer i laveste energitilstand (BEC), mens den brede røde fordeling er termiske atomer fordelt på mange forskellige energiniveauer (ikke BEC). Denne form er et karakteristisk fingeraftryk for BEC tilstanden.



Figur 4. Billedet viser kvante-vortex-formation i et BEC af natriumatomer frembragt ved MIT. Kondensatet var 60 mikrometer i diameter og 250 mikrometer i længden. Det blev sat i rotation af et roterende laserlys brugt som blandepind. De fire eksempler viser eksperimenter der har henholdsvis 0, 16, 70 og 130 vortex-formationer.

Fermioner kan også bliver superflydende under specielle omstændigheder. For at det skal kunne ske skal de "gå sammen" to og to for på den måde at danne en boson. Ved at køle en gas bestående af ${}^6\text{Li}$ (fermioner) og kontrollere deres indbyrdes vekselvirkning har man for nylig observeret en fermion-superflydende tilstand. Netop denne type eksperimenter med fermioner har tiltrukket sig stor interesse, idet disse systemer opfører sig som elektronerne i en superleder. Her går to elektroner med modsatrettet spin sammen og danner par - de såkaldte "Cooper-par". Den superflydende tilstand af disse par bestemmer så materialeegenskaber såsom den elektriske ledningsevne uden modstand. Det er et vigtigt gennembrud at disse systemer nu kan studeres i atomfysiske eksperimenter, hvor mange forskellige parametre kan varieres med stor nøjagtighed.

En stående bølge frembragt af laserlys overlejret et BEC kan frembringe et periodisk potential for atomerne. Dybden af potentialet kan varieres ved at ændre på lysintensiteten. Anvendes tre ortogonale stråler frembringes et gitter, et såkaldt optisk gitter, af små optiske fælder, hvor atomerne kan fanges. Tænk på en æggebakke, hvor æggene er udskiftet med atomer. Hvis atomerne frastøder hinanden, er det muligt at fremtvinge to forskellige tilstande af de kolde atomer. I det første tilfælde er fælden ikke voldsom dyb og atomerne har bølgenatur, hvor de kan bevæge sig frit omkring, indtil en vis kritisk hastighed. Her er fasen af den totale atombølge bevaret (veldefineret) og systemet opfører sig som en superflydende væske. Det andet tilfælde er karakteriseret ved en stærk frastødende vekselvirkning mellem atomerne og en dybere optisk fælde. Her vil der fortrinsvis kun sidde ét atom per optisk fælde svarende til ét æg per plads. Bevægelsen fra en plads til en anden er blokeret af atomernes stærke repulsive vekselvirkning. Derfor kalder man denne tilstand for en Mott isolator (Nevill Mott). I denne tilstand har atomerne mistet deres bølgenatur og opfører sig nu som partikler, hver med sin tilfældige fase.



Figur 5. Skygge billede af atomer i den superflydende fase (venstre) og Mott-isolatorfasen (højre) første gang observeret ved Mainz Universitetet i Tyskland. Bemærk interferensen mellem atombølgerne, der giver det karakteristiske billede vist til venstre. Til højre er fasen tilfældig hvilket udvasker interferensmønsteret.

I den superflydende tilstand har atomerne en kohærent bølgenatur. Ved at slukke for det periodiske potential, blot ved at slukke lyset, vil alle de små fælder virke som kohærente atomkilder der nu kan interferere. Dette interferensmønster kan observeres ved at optage et skygge billede af atomerne. I Mott-isolator tilfældet er dette interferensmønster fuldstændigt tabt idet fasen er tilfældig.

I faste stoffer ses Mott-isolator overgangen også. Her er det elektroner, der oplever et periodisk potential skabt af atomer, der sidder i bestemte krystalstrukturer. Den repulsive vekselvirkning er Coulomb-frastødningen mellem elektronerne. For kolde atomer i optiske gitter kan man få fuldstændig kontrol over det periodiske potential og atomernes vekselvirkning. Man kan derfor langsomt, og endda reversibelt, tune frem og tilbage fra den superflydende fase til Mott-isolator fasen. Dette illustrerer en af de mange fordele ved detaljerede studier af denne art.

Den fysiske forståelse af kvantegasser har været accelereret i de sidste år. Her bidrager Danmark med både eksperimenter og teori. Ved Niels Bohr Institutet er der et teoretisk center og to eksperimenter, det ene med BEC i natrium det andet med BEC i rubidium. Ved Århus Universitet er der en eksperimentel aktivitet med BEC i rubidium og ligeledes et teoretisk center.

Litteratur

- [1] Nobelforelæsninger, links fra http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/press.html
- [2] <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/>
- [3] J.R. Abo-Shaeer, C. Raman, J.M. Vogels, and W. Ketterle (2001), Observation of Vortex Lattices in Bose-Einstein Condensates. *Science* **292**, 476-479.



Kasper T. Therkildsen,
ph.d-studerende ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, arbejder til dagligt med kolde magnesium-, natrium- og rubidiumatomer.



Jan W. Thomsen, lektor ved Niels Bohr Institutet, forsker i kolde og ultrakolde atomer og deres anvendelser.