

# Atomoptik

Klaus Mølmer og Uffe V. Poulsen

Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet  
DK-8000 Århus C

13. september 2002

## Resumé

I kvantemekanikken beskrives mikroskopiske partiklers bevægelse ved Schrödingers ligning. Dynamikken karakteriseres ved en bølgefunktion, som udviser interferens, og en lang række fænomener, kendt fra optikken, den ikke-lineære optik og kvanteoptikken, kan nu observeres med atomer.

## 1 Indledning

I 1927 viste Davisson og Germer at elektroner, der rammer en nikkelflader, spredes i et diffraktionsmønster. Dette fænomen, som blev eftervist året efter af Thomson ved transmission af elektroner gennem tynde krystallinske film, var en direkte eksperimentel bekræftelse af De Broglies bølgehypotese, som netop på det tidspunkt var blevet inkorporeret i kvantemekanikken vha. Schrödingers ligning

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r})\psi(\vec{r}, t). \quad (1)$$

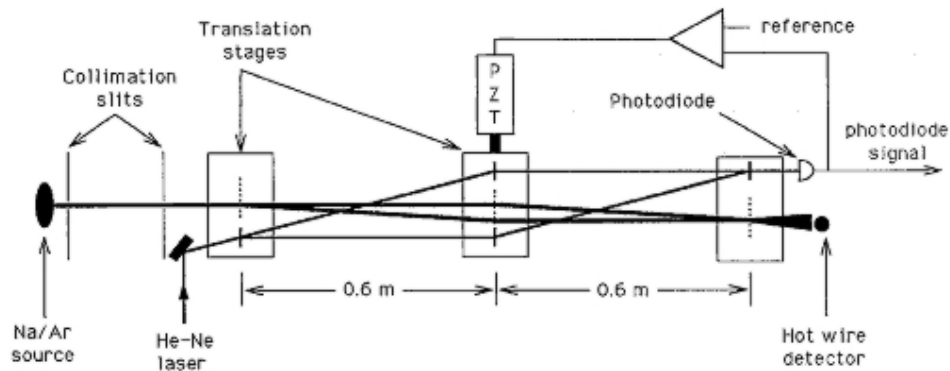
Her er  $\hbar = h/2\pi$  og  $h$  betegner Plancks konstant,  $m$  er partiklens masse, og  $\psi(\vec{r}, t)$  er partiklens bølgefunktion, hvis normkvadrat kan opfattes som en slags sandsynlighedsfordeling for partiklen. Schrödingers ligning er en differentiaalligning i lighed med Maxwells ligninger, og hvis partiklen ikke oplever noget ydre potential  $V(\vec{r}) = 0$ , har ligningen planbølgeløsninger, som vi kender fra optikken.

En stor del af moderne atom- og faststoffysik består i at løse Schrödingers ligning (ofte for flere

partikler samtidigt), og det er bl.a. herved at man kan bestemme gasser og faste stoffers optiske egenskaber. I denne lille artikel vil vi give et sammendrag af et forholdsvis nyt forskningsfelt, hvor man ser på og eksplicit udnytter neutrale atomers bølgeopførsel. I afsnit 2 introducerer vi lineær atomoptik, specielt atominterferometri. I afsnit 3 går vi videre til ikke-lineær atomoptik, hvor ikke-lineariteten fremkommer ved den kollisionelle vekselvirkning mellem atomerne, og hvor det har været muligt at observere både solitoner og vortices. Afsnit 4 omhandler kvanteoptik med atomer, hvor vi i analogi til den ikke klassiske optik vil se på muligheden for at frembringe tilstande af atomer med særligt fordelagtige støjsegenskaber.

## 2 Lineær atomoptik

I løbet af 1980'erne udvikledes eksperimentelle metoder til laserkoherens af atomer, og det blev muligt at danne velkollimerede monoenergetiske atomstråler. Atomerne i en sådan stråle er beskrevet ved en bølgefunktion, som over et vist område ligner en plan bølge, og ved passage gennem gitter ser man diffraktion ligesom Davisson, Germer og Thomson så det for elektroner [1]. Opsplitningen af strålen i forskellige diffraktionsordner kan både foretages ved passage af et materielt gitter og ved vekselvirkning med en lysstråle, idet atomerne kan vælge både at absorbere og ikke at absorbere lyset og derved splittes i forskellige impulskomponenter. De afbøjede stråler kan reflekteres ved hjælp af gitter, laserstråler eller ved passage af en magnetiseret overflade, og man kan observere interferens mellem de forskellige



Figur 1: Principskitse af et af de tidlige forsøg ved MIT i USA [1], hvor de enkelte atomer i kvantemekanikkens ånd er beskrevet ved en tilstand, hvor de både følger den øvre og den nedre bane i det skitserede interferometer, og bl.a. altså samtidigt bevæger sig på begge sider af et tyndt metallisk folie skitseret i opstillingen.

strålekomponenter ligesom i et optisk Mach-Zender interferometer.

Et atominterferometer benyttes på samme måde som et optisk interferometer: man kan indsætte et objekt i den ene optiske vej og observere et faseskift (vejlængdeforskel) ved en forskydning af interferensmønstret af de kombinerede stråler. Da atomer vekselvirker med andre objekter end fotoner, opstår der en række nye tekniske muligheder med atominterferometeret. Lad os blot nævne nogle få eksperimenter, der allerede er udført:

- et pålagt elektrisk felt på den ene side af metallfoliet i opstillingen vist i Fig. 1. opleves af de passerende atomer som et energiskift, og det giver anledning til et måleligt faseskift, som med hidtil uset præcision angiver atomets polariserbarhed.
- hvis en gas lukkes ind på den ene side af foliet, vil elastisk spredning af de passerende atomer føre til et faseskift, som kan detekteres og give detaljerede oplysninger om de atomare vekselvirkninger.
- hvis opstillingen stilles på højkant i tyngdefeltet, vil der opstå et faseskift, som kan måles og dermed føre til en meget præcis registrering

af tyngdekraften (et projekt vedrører måling af lokale variationer til detektion af olie- og mineralforekomster).

- roteres opstillingen opstår et faseskift, som grundet atomernes meget lille De Broglie bølgelængde er meget større end det man ser ved den optiske Sagnac effekt. Målinger er foretaget på jordens rotation, og muligheden for atomare gyroskoper er et aktivt forskningsområde.

Foruden enkelte atomer har man foretaget interferometriske målinger med molekyler og med kulstof-60 og kulstof-70 klynger [2], og det diskuteres intetst hvor den øvre grænse er for størrelsen af partikler, der udviser kvantemekanisk interferens (proteiner, bakterier ...?). Vi skal ikke fortabe os i en opremsning af mulige teknologiske og videnskabelige eksperimenter, eller i en nøjere gennemgang af de mange elegante forslag til styring af atomerne. Blot skal det nævnes at der arbejdes med produktion af chips, hvorpå magnetiske eller elektrisk ledende strukturer giver anledning til et felt, som kan styre atomers bevægelse umiddelbart over chippens overfladen [3]. En sådan chip kan altså fungere som 'router' med mulighed for styring, opsplitning og midlertidig lagring af atomer, og vil kunne indgå i en atomar kvantecomputer.

### 3 Ikke-lineær atomoptik

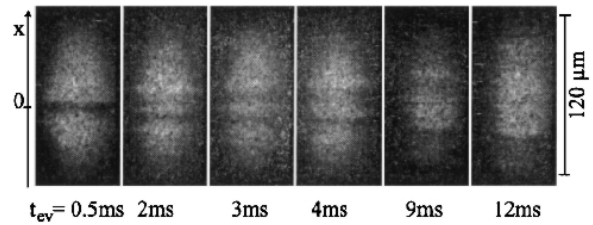
Interferensfænomenerne beskrevet ovenfor opstår fordi hvert enkelt atoms sandsynlighedsfordeling indeholder interfererende bidrag. Da hvert atom kun 'interfererer med sig selv' er det ikke nødvendigt, at atomerne er i eksakt samme tilstand, ligesom Youngs optiske interferens kan detekteres med fotoner i mange forskellig modes. Ved undersøgelser af højereordenseffekter er det derimod relevant, og så sent som i 1995 lykkedes det at preparere de første makroskopiske samlinger af atomer, hvor alle atomer er beskrevet ved samme bølgefunktion: Bose-Einstein kondensatet [4]. I Bose-kondensatet er det muligt at beskrive tilstanden af samtlige atomer ved en makroskopisk bølgefunktion, som i mange henseender antager samme betydning som den klassiske elektriske feltamplitude i optikken, der på sin side beskriver et felt bestående af mange fotoner i samme optiske mode.

I materialer med ikke-lineær optisk susceptibilitet bliver den optiske bølgeligning ikke-lineær, og en række velkendte fænomener fremkommer: vortices, solitoner. I tilfældet med atomer findes ikke-lineariteten i den kollisionelle vekselvirkning mellem atomerne, beskrevet ved et meget kortrækkende tiltrækkende eller frastødende potential. Da styrken af potentialet afhænger nøje af de atomfysiske egenskaber, kan man med påtrykte felter justere denne styrke, og specielt kan man i omegnen af kollisionsresonanser tune vekselvirkningsparameteren over både positive og negative værdier [5]. Da hvert enkelt atom vekselvirker med alle de øvrige, som derved giver anledning til en slags potential, og da de alle er beskrevet ved samme bølgefunktion  $\psi(\vec{r}, t)$  (tæthed  $|\psi(\vec{r}, t)|^2$ ), omskrives Schrödingerligningen til den ikke-lineære Schrödingerligning, også kaldt Gross-Pitaevskii-ligningen:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r})\psi(\vec{r}, t) + Ng|\psi(\vec{r}, t)|^2\psi(\vec{r}, t), \quad (2)$$

hvor  $N$  er antallet af atomer.

Denne ligning er velkendt også i optikken, hvor den giver anledning til solitoner ('bright solitons', hvis



Figur 2: Tæthedsfordelingen i et Bose-Einstein kondensat med en 'dark soliton'. Figuren viser snap shots til forskellige tider og udover den meget langsomme mørke soliton ses også en normal tæthedsbølge udbrede sig med lydhastigheden i gassen mod toppen af kondensatet [6].

vekselvirkningsparameteren  $g$  er negativ, og 'dark solitons', hvis  $g$  er positiv). I kondensater er tilfældet med negativ  $g$  ustabil, fordi den tiltrækkende vekselvirkning vil føre til et kollaps af kondensatet, men de mørke solitoner er blevet studeret eksperimentelt i flere grupper. Eksperimentelt kan solitonen dannes ved at man belyser et cigarformet kondensat i den ene halvdel, således at der sker et skift af bølgefunktions fase svarende til et abrupt fortegnsskift af bølgefunktionsamplituden, som man netop forventer i en soliton [6]. Hvis solitonen dannes i et fanget Bose-kondensat, kan den bevæge sig frem og tilbage i kondensatet, som et partikelagtigt fænomen. Der kan også dannes flere kolliderende solitoner, og kollisioner mellem solitoner og lydbølger kan studeres i kondensatet.

Lene Hau, som jo er kendt for at have nedbremset og helt stoppet en lyspuls i en kold atomar gas, har for nyligt vist at den nedbremsede puls er så rumligt skarp, at den ideelt kan benyttes til at danne en soliton i et kondensat, idet en vellokaliseret gruppe af atomer absorberer lyset og overføres til en anden atomar tilstand, hvorved et hul opstår i kondensatet [7]. Med udgangspunkt i denne type forsøg, må vi imødesee et frugtbart kommende samspil mellem ikke-lineære atomoptiske effekter og lys-atom vekselvirkningen.

Fra optikken kendes også vortices, hvirvler i den transversale struktur af laserstråler i ikke-lineære me-



Figur 3: Vortices frastøder hinanden, og vil derfor danne et regulært gitter (Abrikosov lattice) i Bose-Einstein kondensatet. Figuren viser tæthedsfordelingen i kondensater med 7, 8 og 11 vortices [8].

dier. En vortex er et hul i intensitetsfordelingen, hvorom bølgefunktionens fase vokser med  $2\pi$ , hvis man følger en cirkelbane omkring hullet. Vortices kendes også fra forsøg med flydende helium, og de kan frembringes i atomare Bose-kondensater ved at røre rundt i dem med en laserstråle [8].

Ikke-lineariteten, d.v.s. vekselvirkningen, er bestemmende for kondensatets form og størrelse. Hvis man frigiver atomer fra det indfangende potential (ved at ændre deres indre atomare tilstand), vil de ikke blot forlade kondensatet ballistisk, de vil typisk frastødes af de tilbageblivende atomer. Det har konsekvenser for den rumlige mode af de undslippende atomer, som ellers kan sammenlignes med fotonerne i en laserstråle. Et virkelig aktivt forskningsområde er studiet af kvasi-kontinuerte atom-lasere [9].

Elementære processer som 4-bølge mixing og fasekonjugering er blevet studeret med kolliderende kondensater, og der er stor aktivitet med henblik på stimuleret emission og absorption af atomer mellem forskellige modes. To af de mere overraskende analogier mellem ikke-lineær optik og ikke-lineær atom-optik er 2.-harmonisk generation og nedkonvertering. I optikken er disse processer, hvor to fotoner omsættes til en enkelt foton med den dobbelte energi, og hvor en enkelt foton splittes i to. Uden at bevæge sig ind på kernefysikkens område er det naturligvis ikke muligt at smelte atomer sammen eller splitte et atom i flere nye, men med passende lasere til rådighed er det forholdsvis enkelt at binde to atomer sammen til et molekyle eller at splitte et diatomart molekyle i to atomer. Man arbejder i øjeblikket på at forfine denne

teknik, så den anvendes på et Bose-kondensat vil bevare single-mode karakteren af systemet og dermed konvertere et helt kondensat af atomer til et kondensat af molekyler [10]. Når først et molekyllært kondensat er til rådighed, kan næste skridt være at vende processen og nedkonvertere molekylerne til atomer. Udover det fascinerende ved en gas, der oscillerer mellem at bestå af atomer og af molekyler, er det velkendt fra forsøg med lys, at nedkonvertering fører til en kvantemekanisk *squeezed state*, som beskrevet i [11], og en tilsvarende atomar tilstand vil have flere anvendelser [12].

## 4 Kvanteoptik med atomer

Eksemplet med nedkonvertering illustrerer meget godt, hvordan den ikke-lineære optik bringer kvanteoptikken med sig. Kvanteoptikken beskæftiger sig især med tilstande, der ikke kan beskrives som klassiske felter. Der er specielt tale om at betragte antallet af fotoner i en given mode som en kvantemekanisk variabel og at se på superpositionstilstande af forskellige antaltilstande. Klassiske felter har særligt simple egenskaber i denne sammenhæng, mens fx. et felt skabt ved nedkonvertering nødvendigvis kun indeholder antaltilstande med et lige antal fotoner. Kvanteoptikken har stor fundamental interesse men er også et vigtigt felt i praksis, idet antalsvariationer er intimt knyttede til variansen på måleresultater ved detektion af systemerne. Den velkendte *shot noise* i optikken hænger fx. sammen med en Poisson fordeling af fotonantallet i en laserstråle. Man kan reducere på støjen ved at konstruere *squeezede* tilstande, og derved kan man altså foretage mere præcise målinger [11].

Præcist det samme spil kan gennemføres for atomer, og det er der flere gode grunde til at gøre. Perspektivet for *squeezing* af atomare tilstande er meget lovende, da de fornødne ikke-lineariteter er tilstede gennem atomernes naturlige vekselvirkninger, og da atomerne kan lagres og bringes til at vekselvirke over meget længere tidsskalaer end man kan arbejde med et optisk signal. Atomar *squeezing* er tilmed yderst relevant, da man jo benytter atomer i atomure og i atominterfer-

ometri, hvor høj præcision har prioritet, og hvor det typisk ikke er muligt at forbedre statistikken ved at medtage flere atomer.

For at kunne detektere squeezeede atomare tilstande skal man kunne tælle atomer med en bedre præcision end inden for standard shot noise, men en sådan præcision er faktisk demonstreret i flere laboratorier, bl.a. i kvanteoptiklaboratoriet i Århus. Her er man iøvrigt også med fremme mht. til udnyttelsen af yderligere en finesse i kvantemekanikken: det er nok at tælle atomerne for at skabe en meget attraktiv ikke-klassisk tilstand, hvis man vel at mærke kan gøre det uden at fjerne atomerne! Sådanne ikke-destruktive målinger er meget lettere at udføre på atomer end på lys [13].

Den teoretiske beskrivelse af systemerne er noget kompliceret, da såvel antallet af atomer som deres rumlige tilstande er kvantemekaniske frihedsgrader, men der findes glimrende tilnærmelser, som kan benyttes til at teste grundliggende ideer [14], og kvanteoptikken udstyrer os med numeriske metoder, der også har vist sig brugbare til netop dette problem [12].

Interessen i kvanteoptiske tilstande af atomare gasser stimuleres yderligere af perspektiverne for kvantecomputing, data-overførsel og lagring i disse systemer [15, 13, 16], men det er en helt anden historie.

## 5 Afslutning

Der er sket meget siden Davissons og Germers første observation af elektronens bølgeopførsel. Som beskrevet ovenfor ser vi nu rutinemæssigt atomer og molekyler, der udviser interferens i overensstemmelse med kvantemekanikkens forudsigelser. Atomar interferens har en række praktiske anvendelser, og man ser en tydelig progression i forskningen som et ekko af udviklingen af optikken fra lineære komponenter: spejle, beamsplitters, gitre, over ikke-lineære studier: solitoner, 4-bølgemixing, vortices, til kvanteoptikken: squeezing, bunching, målingsinduceret præparation af tilstande. Atombølger indgår allerede i flere teknologiske sammenhænge, og der arbejdes meget med brugervenlighed, fx. i forbindelse med atomare chips

med nano-fabrikerede bølgeledere for atomer. Man er netop ved at tage hul på et ekstremt lovende forskningsfelt over de mange facetter af vekselvirkninger mellem atombølger og lys. Vi tør roligt forudsætte at den forskning vil bibringe både optikken og atomoptikken mange nye muligheder.

## Litteratur

- [1] D. W. Keith et al, Phys. Rev. Lett. **66**, 2693 (1991). En god oversigtsartikel om atominterferometri: C. S. Adams et al, Phys. Rep. **240**, 143 (1994). [1](#), [2](#)
- [2] M. Arndt et al, Nature **401**, 680 (1999). [2](#)
- [3] R. Folman et al, Phys. Rev. Lett. **84**, 4749 (2000); J. Reichel et al, Phys. Rev. Lett. **83**, 3398 (1999). [2](#)
- [4] M. H. Anderson et al, Science **269**, 198 (1995); K. B. Davis et al, Phys. Rev. Lett. **74**, 5202 (1995); C. C. Bradley et al, Phys. Rev. Lett. **75**, 1687 (1995). [3](#)
- [5] S. Inouye et al, Nature **392**, 151 (1998). [3](#)
- [6] S. Burger et al, Phys. Rev. Lett. **83**, 5198 (1999); J. Denschlag et al, Science **287**, 97 (2000) [3](#)
- [7] Z. Dutton et al, Science **293**, 663 (2001). [3](#)
- [8] K. Madison, Phys. Rev. Lett. **84**, 806 (2000). [4](#)
- [9] E. W. Hagley et al, Science **283**, 1706 (1999); I. Bloch et al, Phys. Rev. Lett. **82**, 3008 (1999). [4](#)
- [10] D. J. Heinzen et al, Phys. Rev. Lett. **84**, 5029 (2000). [4](#)
- [11] E. S. Polzik og K. Mølmer, DOPS-NYT **3**, 4 (1997). [4](#)
- [12] U. V. Poulsen og K. Mølmer, Phys. Rev. A **63**, 023604, (2001); *ibid* **64**, 013616 (2001). [4](#), [5](#)
- [13] A. Kuzmich et al, Phys. Rev. Lett. **85**, 1594 (2000); B. Julsgaard et al, indsendt til publikation. [5](#)

- [14] A. Sørensen et al, Nature **409**, 63 (2001) 5
- [15] A. Kuzmich et al, Phys. Rev. Lett. **79**, 4782, (1997); J. Hald et al., *ibid* **83**, 1319 (1999); A Kozhokin et al, Phys. Rev. A **62**, 033809, 2000. 5
- [16] U. V. Poulsen og Klaus Mølmer, Antaget til publikation i Phys. Rev. Lett. (2001). 5

**Klaus Mølmer** er professor ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Hans forskning omhandler atomfysik, kvanteoptik, Bose-Einstein kondensater og kvanteinformatik.

**Uffe V. Poulsen** er Ph.D. studerende ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Han har arbejdet med teorien for refleksion og diffraktion af atomer med magnetiske spejle, kvanteoptiske beskrivelser af Bose-Einstein kondensater og samspillet mellem atomar og optisk squeezing.