

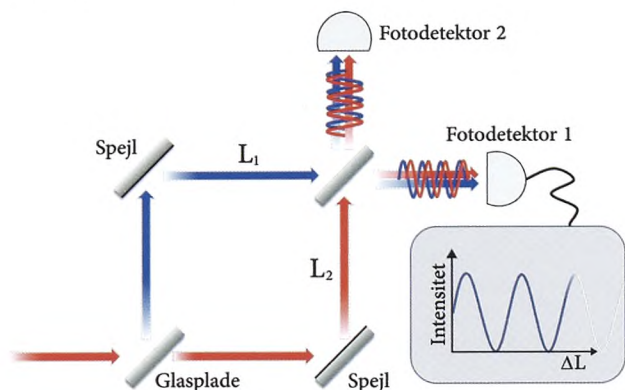
Interferometri med ultrakolde atomer

Sofus Laguna Kristensen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

De seneste årtiers landvindinger inden for køling og kontrol af atomer har banet vejen for en ny type eksperimenter. Interferenseksperimenter med kolde atombølger er en lovende metode til at detektere afvigelser fra vores nuværende teorier om universet, hvilket ultimativt kan resultere i formuleringen af “en teori om alting”. I vores laboratorium på University of California, Berkeley, har vi formået at øge følsomheden af vores atominterferometer ved at få vores atomer til at eksistere to steder samtidigt i op til 20 s, hvilket gør, at tyngdekraften efterlader et stærkt aftryk i atomernes interferensmønster.

Interferens og interferometri

Når to bølger passerer hinanden, lægges bølgerne sammen, således at de i overlappet kan beskrives som en ny bølge. Dette fænomen kaldes interferens, og det kan observeres med alle typer bølger, fx vand-, lyd- og lysbølger. Interferensen bliver bl.a. dikteret af fasen mellem de to bølger, altså hvor bølgetoppene og bølgedalene for den ene bølge placerer sig i forhold til den anden bølge. Resultatet vil enten være en stærkere eller svagere bølge, alt efter om bølgerne interfererer konstruktivt (bølgerne er i fase) eller destruktivt (bølgerne er i modfase).

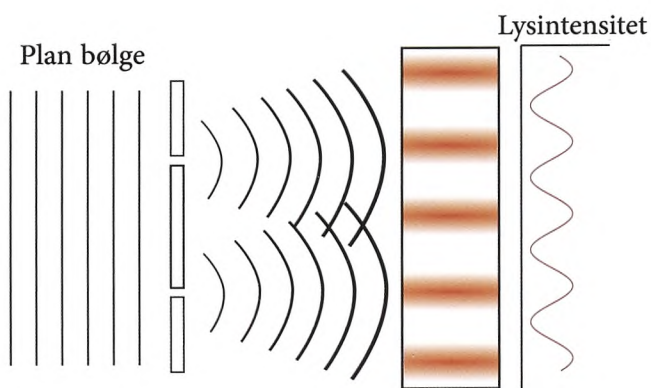


Figur 1. Et Mach-Zehnder-interferometer. En lysbølge bliver splittet i to og tager to forskellige veje til en anden glasplade, hvor lysbølgen bliver overlappet med sig selv igen. Mængden af lys på fotodetektor 1 og 2 fortæller, hvor stor forskellen er på L_1 og L_2 .

Et interferometer er et instrument, der benytter interferens mellem bølger til at lave ultrapræcise målinger. Et såkaldt “Mach-Zehnder”-laserinterferometer (figur 1) benytter en glasplade (en “beamsplitter”) til at splitte en lysstråle op i en reflekteret og en transmitteret del. Både den reflekterede og den transmitterede lysstråle bliver efterfølgende reflekteret af spejle, således at de kan kombineres igen på en anden glasplade. Når lysstrålerne fra de to interferometerarme kombineres igen, opstår der interferens mellem de to. Forskellen i vejlængde for de to lysstråler, $\Delta L = L_2 - L_1$, vil således afgøre, om bølgetop møder bølgetop, eller bølgetop møder bølgedal i de to udgangsporte. Denne interferens kan konverteres til en konkret længdeforskel ved at måle lysintensiteten i udgang 1 eller 2.

Laserlyset, der bliver brugt i et interferometer, har typisk en bølgelængde på nogle få hundrede nm, og

derfor kan interferometri med laserlys benyttes til at lave ultra præcise målinger af forskelle i afstande. Laserinterferometri blev bl.a. benyttet i LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), da man i 2017 påviste eksistensen af gravitationelle bølger, som Einstein havde forudsagt for over 100 år siden [1].

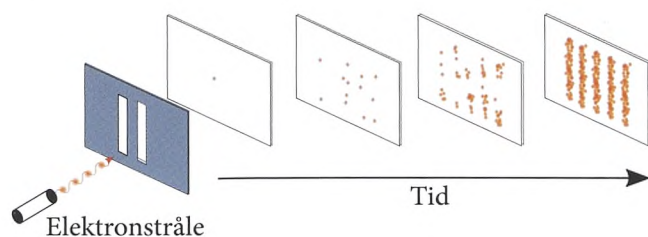


Figur 2. Youngs dobbeltspalteeksperiment for en klassisk bølge. En bølge rammer to snævre spalter. Bølgen passerer igennem disse to spalter, og der opstår interferens på en skærm bagved grundet forskellen i længde mellem hvert punkt på skærmen og de to spalteåbninger.

Atombølger, der interfererer

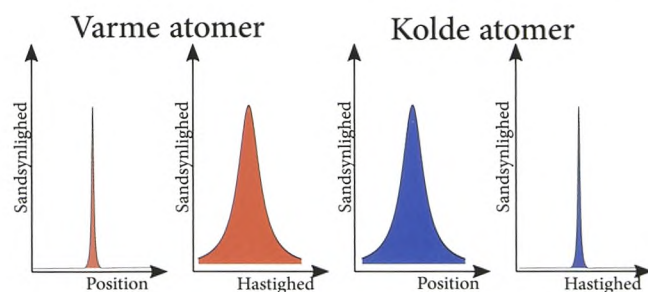
Interferens kan som sagt observeres med alle typer bølger – men derfor kommer det stadig som en overraskelse for de fleste, at det også kan observeres med stof, såsom elektroner, protoner og endda (under de rette forhold) hele atomer og molekyler. Dette er en konsekvens af den såkaldte “partikel-bølge-dualitet”, der foreskriver, at alt stof kan beskrives som både partikler og bølger. “Stofbølger” blev for første gang teoretiseret af Louis de Broglie i hans ph.d.-afhandling i 1924 [2], og teorien blev få år efter bekræftet af uafhængige eksperimenter. Konceptet partikel-bølge-dualitet bliver bedst forklaret ved hjælp af det såkaldte dobbeltspalteeksperiment, som først blev udført af Thomas Young i starten af 1800-tallet til at påvise bølgeegenskaberne ved lys [3]. I det originale dobbeltspalteeksperiment sendes lys igennem to tynde spalter for at interferere på en skærm bagved, som vist på figur 2. Lyset på den bagerste skærm viser karakteristiske interferensmønstre, fordi lyset, der skinner igennem de to spalter, har forskellig vejlængde til hvert enkelt punkt på skærmen.

Dette eksperiment kan også udføres med elektroner, som bliver skudt mod de to spalter enkeltvis. De første elektroner, der rammer den bagvedliggende skærm, vil ikke give nogen åbenlys indikation om elektronens bølgeegenskaber – det egentlige resultat af eksperimentet viser sig først efter mange gentagelser. De mange prikker fra elektronnedslagene vil langsomt forme et klassisk interferensmønster (figur 3), og siden elektronerne blev sendt afsted enkeltvis, er det en ikke-intuitiv, men logisk konsekvens, at hver elektron har eksisteret to steder samtidig, altså gået igennem begge spalteåbninger, for efterfølgende at interferere med sig selv og danne bølgemønstret på skærmen. Indtil en elektron rammer skærmen og tvinges til at antage en position, kan den beskrives som en bølge, der er gået igennem begge spalter.



Figur 3. Youngs eksperiment udført med enkelte elektroner. Hver enkelt elektron går igennem begge spalter, interfererer med sig selv, og efter mange gentagelser ser man det samme bølgemønster, man ville se med en klassisk bølge.

Atomers position beskrives i kvantemekanikken med en bølgefunktion, der basalt set er en sandsynlighedsfordeling, der fortæller inden for hvilket område, det er sandsynligt at finde atomet ved en måling. Bølgefunktionen, der bestemmer, hvilke hastigheder et atom kan have, er fundamentalt bundet sammen med bølgefunktionen, der beskriver positionen – når den ene bliver bredere, bliver den anden mindre og omvendt. Dette er kendt som Heisenbergs ubestemthedsprincip.



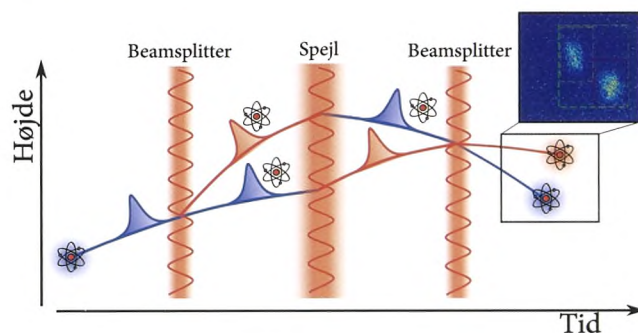
Figur 4. Bølgefunktioner for hastighed og position for enkelte atomer når atomskyen har høj og lav temperatur. Ved lave temperaturer eksisterer atomerne over et større område end ved høje temperaturer.

Ved at bruge laserkøling kan man tvinge atomer ned til temperaturer under få mikrokkelvin over det absolutte nulpunkt, hvilket komprimerer bølgefunktionen for atomernes hastighed (da temperatur er et resultat af atomernes hastighed). I dette regime bevæger atomerne sig langsomt nok, og deres bølgeegenskaber er udtalte nok til at udføre atominterferometri. For at undgå forstyrrelser fra omgivelserne foregår disse forsøg altid i et vakuumkammer. Et Mach-Zehnder-interferometer

som netop beskrevet kan således realiseres med en sky af atomer, da den samme type interferens som med lysbølger kan observeres.

Atominterferometeret

Et atominterferometer har nogle markante fordele over et laserinterferometer. Først og fremmest er bølgelængden på et atom meget kortere end på lysbølger, fordi et atom har væsentligt højere energi (og dermed højere frekvens) end en gennemsnitlig foton. Derfor kan man lave meget præcise målinger af forskelle i vejlængde. Derudover er atominterferometre meget sensitive over for tyngdekraft, da atomer har masse, i modsætning til lyspartikler (fotoner). Et atominterferometer har mange tekniske ligheder med et lysinterferometer. Idéen er grundlæggende set den samme, men laserlyset og atomerne har skiftet roller. I et lysinterferometer guides lyset ved at reflektere på spejle (der er lavet af atomer). Omvendt guides atomer i et atominterferometer ved hjælp af lysbølger. Atominterferometri bliver oftest udført, mens atomerne er i frit fald, for at atombølgerne ikke bliver forstyrrede af andet, end hvad man forsøger at måle.

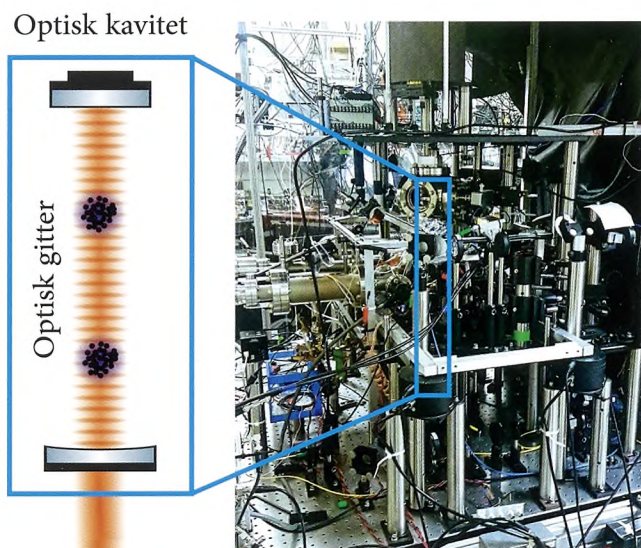


Figur 5. Et Mach-Zehnder-atominterferometer. Et atoms bølgefunktion splittes i to med en laserpuls, så det eksisterer to steder samtidigt. Atomets bølgefunktion samles igen med en anden laserpuls, hvorefter atomets tilstand afgør, hvor stor forskel i faser de to atombølger har oplevet. Til sidst tages et billede af atomerne, og en simpel optælling afgør, hvor stor faseforskellen er på den øverste og nederste interferometerarm.

Laserlys kan bruges til at få atomer til at skifte energitilstand, da en foton kan tilføje energi nok til, at en elektron vil skifte bane. Når et atom øger sin energi ved at optage en foton, siger man, at atomet er "exciteret". Fotoner har også en impuls – det vil sige, at når et atom absorberer en foton, giver kollisionen mellem fotonen og atomet et skub til atomet. Hvis man lyser med en laser på et atom, der befinder sig i sin grundtilstand, i præcis så lang tid, at atomet har 50% chance for at absorbere en foton fra laserlyset, vil man tvinge atomet til at have to lige sandsynlige tilstande. Kvantemekanikken foreskriver så, at atomet rent faktisk eksisterer i begge tilstande samtidig – men den ene tilstand har fået et spark af en foton og fjerner sig således rumligt fra den anden tilstand, som illustreret i figur 5. Dette scenarie beskriver en såkaldt rumlig superposition – en partikel, der eksisterer to steder samtidig. Den førnævnte laserpuls har således den samme funktion som den første glasplade i lysinterferometeret – den splitter en bølge op i to, så bølgen kan bevæge

sig to forskellige veje og senere kan interferere med sig selv. I atominterferometeret kan længden af laserpulsens bruges til at bestemme, om dine atombølger spredte sig eller samle sig. På den måde kan man få et atom til at tage to forskellige veje til det samme punkt, hvorefter endnu en laserpuls blander interferometerarmene, så der kan opstå interferens. Hvis atombølgerne er i fase, når de rekombineres, vil atomerne ende i samme tilstand, som de havde før interferometersekvensen. Hvis de er i modfase, vil atomerne alle være i den exciterede tilstand.

Det sidste skridt er således at tælle, hvor mange atomer, der nu findes i hver tilstand, ligesom at mængden af lys i hver udgangsport måles med fotodetektorer ved et lysinterferometer. Vi tæller atomer ved at skyde kraftigt laserlys på atomskyen og tage et billede, når atomerne igen afgiver energien som lys i alle retninger (fluorescens). Selvom hvert atom i princippet kun interfererer med sig selv og sin egen bølgefunktion, bruger man oftest 10 millioner atomer for hver interferometersekvens. Dette gør detektion og statistikken nemmere, når man finder forholdet mellem antallet af atomer i hver tilstand.

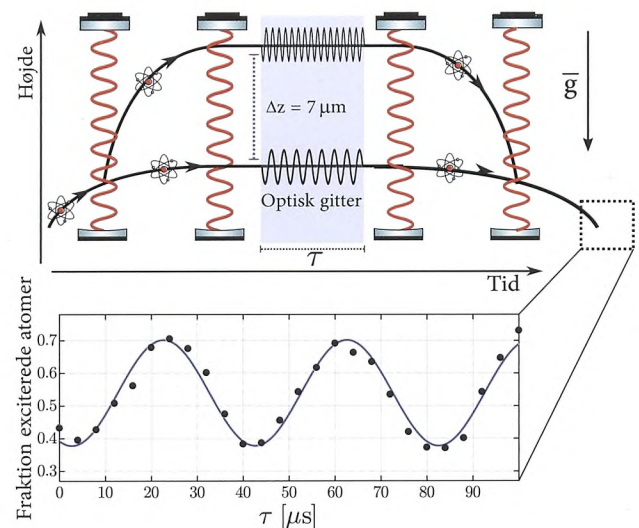


Figur 6. Den eksperimentelle opstilling på UC Berkeley. En atomsky i en optisk kavitæt bliver laserkølet til få hundrede nanokelvin i et vakuumkammer. De kolde atomer bliver brugt til at måle tyngdekraft ved at blive holdt i forskellige højder i et optisk gitter, før de interfereres.

Kolde atombølger i en optisk kavitæt

På UC Berkeley i Californien har jeg arbejdet på at realisere en ny type atominterferometri – atominterferometri med et optisk gitter inde i en optisk kavitæt. En optisk kavitæt er et arrangement af spejle, der “fanger” lys. Når en laser rettes mod en optisk kavitæt, bliver lyset reflekteret mange gange mellem spejlene, hvilket resulterer i, at lysstyrken mellem de to spejle bliver meget høj. De mange refleksioner af lysstrålen mellem spejlene interfererer med hinanden, hvilket resulterer i, at der opstår en stående lysbølge med en pæn og veldefineret bølgeprofil mellem de to spejle. Hele vores atomsky befinder sig inde i denne optiske kavitæt, således at vi kan fange atomerne i et optisk gitter under

interferometersekvensen. Et optisk gitter er en måde at fange atomer og holde dem fast mod tyngdekraften. På grund af den såkaldte AC-Starkeffekt, bliver atomers energiniveauer forskudt, når de befinder inde i en laserstråle. Hvis man vælger laserens frekvens, så den er en smule under resonans, vil atomer i grundtilstanden få sænket deres energi. Dette resulterer i, at atomerne oplever en kraft rettet mod der, hvor lyset er stærkest, nemlig bølgetoppene i lysintensiteten. Det optiske gitter kan bruges til at forlænge den tid, som atombølgerne er adskilte – jo længere tid atombølgerne er adskilte, jo mere præcist kan vi måle med vores interferometer. I vores eksperiment (figur 6) kan vi, grundet den optiske kavitæt og det optiske gitter, holde cæsiumatomer adskilt i en rumlig superposition i op til 20 s og stadig observere interferens, når atombølgerne rekombineres [4]. Geometrien af vores interferometer er illustreret på figur 7. Vi køler atomerne, sætter hvert enkelt atom i en rumlig superposition, guider denne superposition med lasere, og holder atomerne i to forskellige højder i $\tau = 20$ s. Efter dette guides atombølgerne således, at de igen overlapper, og vi observerer interferens.



Figur 7. Et eksempel på geometrien af optisk gitterinterferometri. Når atombølgerne er maksimalt separerede, holder vi dem mod tyngdekraften med en laser, der former et optisk gitter. Den øverste atombølge svinger hurtigere end den nederste, da den har mere potentiel energi. Ved at øge tiden, τ , hvor de holdes mod tyngdekraften, ændrer vi mængden af exciterede atomer efter den sidste laserpuls i interferometeret.

Da hvert atom bliver holdt i to forskellige højder, typisk separeret med nogle få μ m, er der en forskel i potentiel energi for de to interferometerarme på

$$\Delta E = mg\Delta z. \quad (1)$$

hvor m er masse af et cæsiumatom, g er tyngdeaccelerationen og Δz er højden. Frekvensen af en atombølge er givet ved energien af atomet, så når den ene del af atomet har højere energi end den anden, vil de to atombølger have forskellig frekvens, når de bliver holdt fast mod tyngdekraften. Forskellen i atombølgernes frekvens kan findes ved at dividere forskellen i energi

med Plancks konstant, h ,

$$\Delta f = \frac{mg\Delta z}{h}. \quad (2)$$

Dette er frekvensen, hvormed atombølgerne i to forskellige højder svinger ind og ud af fase. Siden massen af et cæsiumatom og højdeforskellen mellem de to atombølger er velkendt, kan en måling af denne frekvensforskel benyttes til at bestemme tyngdeaccelerationen, g . I figur 7 er også vist et konkret eksempel på data, der er taget ved gradvist at øge hvor lang tid, τ , vi holder atomerne i et optisk gitter. Antallet af exciterede atomer efter interferometersekvensen svinger således proportionelt med hvor stor en tyngdekraft, atombølgerne oplever. Ved at kunne øge τ til 20 s kan vi måle frekvensforskelle på atombølgerne ned til få mHz. Tidligere atominterferometre, uden optiske gitre, har været begrænset til interaktionstider på størrelsesorden med, hvor hurtigt en atomsky falder. Hvis man således vil lade en rumlig superposition eksistere i 1 s, men ikke bruger et optisk gitter, skal man have et 5 m højt vakuumkammer, for at atomerne kan falde uforstyrret. For 20 s skal man have et 2.000 m højt vakuumkammer, hvilket er ekstremt svært at realisere.

På jagt efter ny fysik

I fysikken har vi to meget succesfulde teorier, kvantemekanik og generel relativitetsteori. Kvantemekanikken har de sidste 100 år været brugt til at beskrive, hvordan partikler såsom atomer og fotoner opfører sig, mens den generelle relativitetsteori har dikteret, hvordan masse og energi på en stor skala krummer tiden og rummet og resulterer i tyngdekraft. Et af de absolut største nuværende problemer i fysikken er at forene de to teorier til én samlet teori. Nøglen til at kæde disse to ting sammen kan være gemt et sted i en komplet forståelse af tyngdekraften, og hvordan den opfører sig på en ekstremt lille skala. Derfor er det vigtigt at kunne måle tyngdekraften præcist nok til at detektere ekstremt små afvigelser fra vores etablerede teorier. Sådanne afvigelser kunne være forårsaget af ukendte effekter og måske endda uopdagede naturkræfter. Ved at have ultrakolde cæsiumatomer inde i et vakuumkammer, simulerer vi også forholdene i det ydre rum, hvor disse ukendte kræfter kan herske. Den vigtigste og mest søgte kraft er den såkaldte "mørke energi", der tilskrives ansvaret for, at hele universet udvider sig – det er muligt, at dette mysterie kan afdækkes ved at lave præcise målinger af tyngdekraften i vores vakuumkammer.

Litteratur

- [1] B. P. Abbott m.fl. (2017) "GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star

Inspiral", *Physical Review Letters*, bind **119**, nr. 16, DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.161101.

- [2] L.-V. de Broglie (1927) "On the Theory of Quanta", PhD thesis.
[3] T. Young (1801) "On the Theory of Light and Colours".
[4] V. Xu, M. Jaffe, C. Panda, S. L. Kristensen m.fl. (2019) "Probing gravity by holding atoms for 20 seconds", *Science*, bind **366**, nr. 6466, side 745–749, DOI: 10.1126/science.aay6428.



Sofus Laguna Kristensen er ph.d.-studerende på Niels Bohr Institutet, hvor han forsker i kolde atomer i optiske kaviteter, og hvorledes disse kan udnyttes til at udforske fundamental fysik.

PFEIFFER  **VACUUM**

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708

Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com