

Det aktive atomur – en laser i sin reneste form

Af Mikkel Tang og Stefan Alaric Schäffer, Gruppen Ultrakolde Atomer ved Niels Bohr Institutet

Lasere anvendes i utallige teknologier og er siden de første realisationer i 1960'erne blevet en del af vores hverdag. På grund af laserlysets smalle frekvensspektrum er det særligt velegnet til at foretage præcise målinger af for eksempel længder og tidsforskelle. Det udnytter man især i atomuret, hvor atomers veldefinerede energiniveauer bruges til at bygge de mest nøjagtige ure, der nogensinde har eksisteret. I vores laboratorium udvikler vi en ny type laser, der gentænker atomurets konstruktion. Det er en laser, der dikteres af atomernes egne egenskaber, fremfor den mekaniske konstruktion af dens omgivelser – det aktive atomur.¹

Indledning

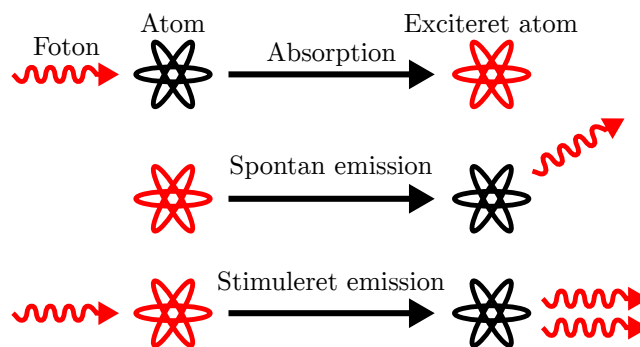
Når du åbner et kort på din mobiltelefon og ser, hvor du er, bruger du GPS-systemet. Det fungerer ved, at en række satellitter med atomure ombord udsender radiosignaler med information om deres lokale tid. Disse signaler rejser med lysets hastighed til telefonen, og den information bruger telefonen til at udregne dens position. Atomure er i dag de mest præcise måleinstrumenter, som menneskeheden har til rådighed. De anvendes både i teknologien og i grundforskningen, hvor deres særlige nøjagtighed kan tillade følsomme målinger af bl.a. tyngdebølger, som rejser tværs gennem Jorden.

Før man havde atomuret, var de mest præcise ure baseret på mekaniske vibrationer i krystaller af kvarts eller safir, og tidligere igen var det meget præcise mekaniske penduler, man udnyttede. Denne type ure har i modsætning til atomuret en tikkefrekvens, der er afhængig af den mekaniske udformning. Det betyder, at der vil være små afvigelser mellem hver enkelt ur, man bygger. Mikroskopiske ændringer i f.eks. krystallens størrelse eller pendulets længde vil ændre svingningsfrekvensen. Det gør det svært at definere sådan en ting som sekundet, der i stedet har været defineret ud fra langt større tidsperioder, som en brøkdel af en dag eller et år.

Atomuret fungerer fundamentalt anderledes end mekaniske ure. Det baserer sig i stedet på egenskaberne af atomer. Eftersom ethvert atom af samme isotop vil opføre sig identisk under identiske forhold, kan man derfor sikre sig, at to realisationer af et atomur altid vil have samme tikkefrekvens. Dermed hviler kvaliteten af ens ur ikke længere på de finmekaniske konstruktioner af en reference. I stedet kan man hvor som helst på Jorden – eller i rummet – konstruere et atomur, så længe man ved hvilken type atom og hvilken atomar overgang, man ønsker at bruge. Det var dette faktum, man tog konsekvensen af, da man i 1967 valgte at definere sekundet ud fra atomet cæsium-133.

Atomuret

I atomure udnytter man altså atomernes veldefinerede, kvantiserede energiniveauer. Det er de energiniveauer, som Niels Bohr i 1920'erne tolkede som diskrete omløbsbaner for elektronerne. Atomernes elektroner kan skifte energiniveau ved at absorbere lys (se Figur 1).



Figur 1. De tre mulige interaktioner mellem atomer og fotoner. Absorption, hvor energi tilføjes atomet fra lyset (foton). Spontan emission, hvorved atomets energi spontant udsendes som lys, og stimuleret emission, hvor atomet drives til udsendelse af lys identisk med det indkommende lys. Einsteins beskrivelse af stimuleret emission i 1917 dannede grundlaget for den første laser i 1960.

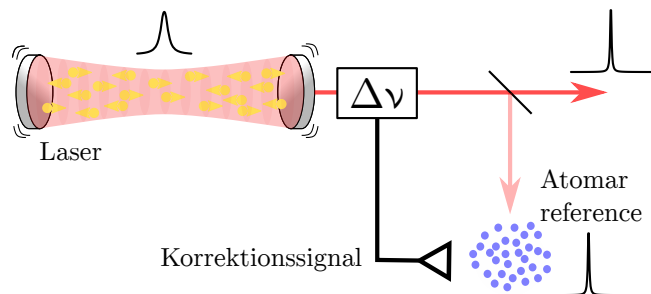
Når dette sker, vil en eller flere elektroner få en højere energi og efterfølgende befinde sig i en ny tilstand. Generelt vil denne tilstand være ustabil, hvilket betyder, at elektronerne igen vil henfalde til grundtilstanden, og lys vil blive udsendt. Dette kaldes spontan emission, og tiden, det typisk tager for henfaldet af en elektronisk tilstand i et atom, kaldes for tilstandens levetid. Lang eller kort levetid resulterer i en smal eller bred spektral linjebredde af det lys, der kan absorberes eller udsendes. Netop dette bliver interessant i forbindelse med atomuret. Det tillader, at man bruger overgangen mellem to energiniveauer som en rettesnor for frekvensen af lys og dermed som referencen i sit ur.

Atomuret består altså af to delsystemer (se Figur 2). Den første del er en laser, som agerer pendul, og hvis tikkefrekvens man kan tælle. Denne del af systemet er i sig selv et ur, men ikke et særligt præcist ur, da tikkefrekvensen varierer, og en laser typisk er følsom over for eksempelvis temperaturændringer, variationer i strøm og rystelser. Den anden del af atomuret er derfor den atomare reference, som sørger for, at laserens frekvens hele tiden kan korrigeres og forblive omkring den samme frekvens, hvilket gør uret reproducerbart.

Moderne atomure, der opererer ved optiske frekvenser, har stor fordel af at have meget høje tikkefrekvenser. Jo hurtigere uret tikker, jo bedre kan man karakterisere nøjagtigt hvor mange tik, der går på et sekund – som centimeterinddelingen på en meterstok. Tikkefrekvensen er givet af lysets frekvens, og for atomet strontium er den tikkefrekvens, man bruger,

¹Denne artikel var en af vinderne i DFS's posterkonkurrence på årsmødet i år.

på ca. 430 THz – altså 430 billioner svingninger per sekund, hvorimod det for cæsium ligger omkring 9.2 milliarder svingninger per sekund.² Sammenholdt med den veldefinerede energi af atomets tilstande har det ledt til ure med en relativ nøjagtighed på 10^{-18} i forhold til deres tikkefrekvenser. Det svarer til, at to moderne atomure ville stemme overens inden for et sekund, hvis de begge blev sat igang ved universets begyndelse for 14 milliarder år siden.



Figur 2. Princippet bag et atomur – her en såkaldt passiv frekvensreference: Noget af lyset fra en laser sendes gennem en sky af atomer. Bredden af laserens frekvensspektrum er relativt bredt. Ved at måle atomernes respons på lyset kan man korrigere laserens frekvens, her illustreret ved kassen $\Delta\nu$. Atomernes smalle frekvensspektrum bruges dermed til at gøre laserens spektrum smalt.

Laserens styrke og svagthed

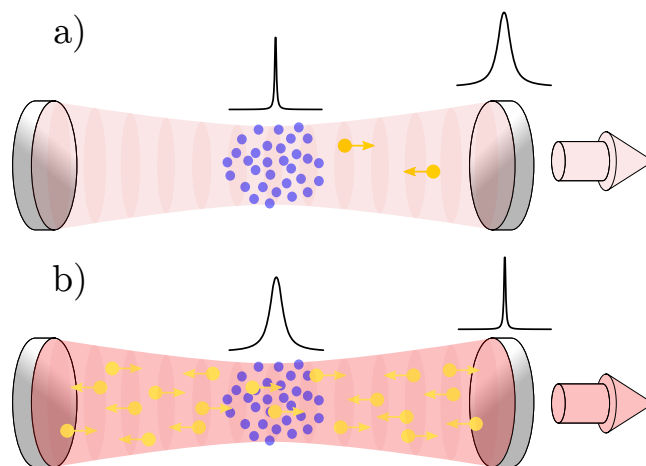
Laseren agerer altså pendul, og atomet bruges som en universel reference, der udnyttes til at rette på laserens frekvens hver gang den driver i den ene eller den anden retning. Hvis laseren er for støjet eller ustabil, begrænser det derfor også, hvor præcist et ur man kan få. For at forstå hvorfor laseren kan være upræcis, må man overveje, hvordan dens egenskaber er bestemt af dens mekaniske konstruktion.

En laser består i al sin simplicitet af to elementer. Det ene element er et medium, der kan forstærke lys, og det andet element er en optisk kavitet, bestående for eksempel af to spejle over for hinanden. Forstærkningsmediet (eller lasermediet) er i dag typisk en diode bestående af halvledere, men kan også være for eksempel krystaller eller gasser, som de kanoniske rubin- og helium-neon-lasere. Mediet skal kunne bringes i en exciteret tilstand – i nogle gasser kan man pumpe energi ind i systemet ved at lade det absorbere noget pumpe-lys. Efterfølgende kan der så ske spontan emission, som omtalt ovenfor, men også stimuleret emission. Ved spontan emission er lysets udsendelsesretning og fase tilfældig, men ved stimuleret emission vil en foton stimulere en identisk foton til at henfalde (se Figur 1). Den optiske kavitet sørger for, at udsendte fotoner passerer igennem lasermediet flere gange og dermed kan stimulere flere henfald. Det er denne proces, som kendetegner en laser – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Både lasermediet og den optiske kavitet har hver deres spektrale områder, hvor lyset er resonant. I klassiske lasere vil lasermediet typisk være ret bredt spektralt. Det betyder, at der ofte vil ske spontane henfald, som

kan igangsætte lasing-processen. Men det betyder også, at den optiske kavitet – med et smallere spektrum – ofte vil sætte en begrænsning på laserens spektrum. Og netop kavitetens resonans er meget afhængig af omgivelserne. Især temperatur og rystelser kan direkte påvirke længden af den optiske kavitet og vil dermed føre til variationer i laserens frekvens.

Hvis man kan konstruere laseren, så den ikke lænere påvirkes direkte af omgivelserne, kan det resultere i langt bedre frekvensstabilitet. En måde at gøre det på er at mindske laserens afhængighed af mekaniske konstruktioner – helt analogt med skridtet fra mekaniske ure til atomure. I stedet for at bruge atomerne passivt, som en korrigerende reference, kan man forsøge at konstruere laseren således, at den optiske kavitet ikke har nogen synderlig betydning for laserens frekvens. Det er en laser i sin reneste form, hvis egenskaber afhænger af atomerne frem for mekanikken, og den idé kaldes også et aktivt atomur (se Figur 3).



Figur 3. To eksempler på en laser. Et lasermedium befinder sig i midten, her illustreret som en gas af atomer (blå prikker). To spejle danner en kavitet, og lys, der lækker igennem spejlene, bruges efterfølgende. a: Bad cavity regime, hvor atomernes linjebredde er betydeligt smallere end kaviteten, og lysets frekvens derfor dikteres af atomernes egenskaber. b: Good cavity regime, hvor kavitetens linjebredde er smallest som i klassiske lasere.

Et aktivt atomur

Et atomur får sin helt enorme stabilitet og præcision fra atomernes exceptionelle egenskaber. Hvis man finder de helt rigtige atomare overgange, kan de have enormt smalle spektrale egenskaber, således at kun lys med den helt rigtige frekvens er resonant med overgangen. I moderne atomure betyder det, at linjebredden på en sådan overgang kan være nogle få mHz, svarende til en relativ usikkerhed på frekvensen i omegnen af 10^{-18} . Atomure, som opnår en sådan nøjagtighed, er så følsomme, at de kan bruges til at måle højdeforskelle på under en cm, udelukkende på grund af påvirkningen fra Jordens tyngdekraft [1]. For at kunne udnytte denne helt enorme præcision, må man dog have stor kontrol over atomerne, hvilket man opnår ved at fange atomerne i optiske fælder i vakuumkamre. Derudover har man brug

²Denne værdi er defineret og er derfor præcis 9.192.631.770 svingninger per sekund ved havets overflade. Sammen med definitionen af lysets hastighed på 299.792.458 m/s giver det en eksakt definition af meteren, som kan måles ved hjælp af atomure.

for en kavitet rundt om atomerne og en mekanisme til at få dem i den exciterede energitilstand. Befinder de sig først her, vil de kunne udsende lys i kaviteten, og stimuleret emission vil igen klare resten for os. Vi støder dog ind i nogle problemer.

En af de store fordele ved de energiniveauer, man bruger i atomure, er deres smalle spektrale egenskaber – altså overgangens enormt veldefinerede frekvens. Men som en konsekvens af Heisenbergs usikkerhedsprincip betyder en meget veldefineret energiforskel også, at tidspunktet for et henfald har stor usikkerhed. Det betyder i praksis, at henfaldet sker meget sjældent, og at der derfor vil være meget lidt lys i en sådan laser.

Det næste problem, vi støder ind i, er, at den optiske kavitet, som sættes op rundt om atomerne, jo netop er et mekanisk, menneskeskabt element. Dette er, hvad vi ønsker at undgå. Problemet med denne del af systemet i klassiske lasere er, at det frem for alt er kaviteten, der bestemmer de spektrale egenskaber af lyset. Den opfører sig som et filter. Kaviteten har altså to egenskaber: Den sørger for at lyset cirkulerer og dermed passerer lasermediet mange gange, og så har den et spektralt bånd, hvor den tillader lyset at blive udsendt. Vi ønsker at bibeholde evnen til at cirkulere lyset, men er ikke interesseret i den spektrale filtrering.

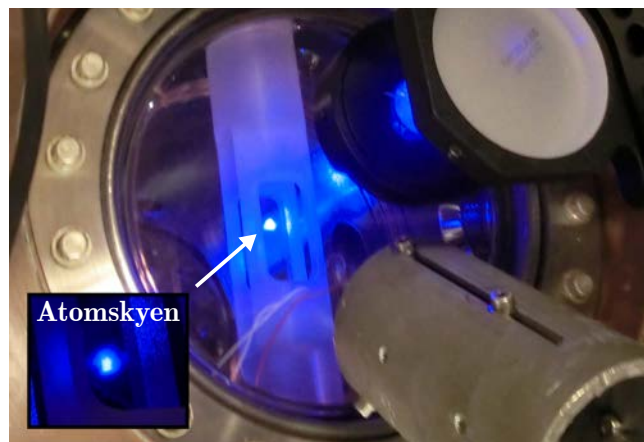
Ved at sørge for at kavitetsens spektrale krav – dens linjebredde – er meget løsere end renheden af det atomare spektrum – den atomare overgangs linjebredde – kan man sikre sig imod påvirkning fra kaviteten. Dette regime er et helt andet end der, hvor lasere traditionelt opererer, og resulterer i en forstærkning af lysintensiteten udsendt af atomerne, men undgår de påtrykte forstyrrelser, man kan få fra en optisk kavitet med vibrationer og temperaturændringer. Regimet er også kendt som *bad cavity regime* (se Figur 3).

Kolde atomer i laboratoriet

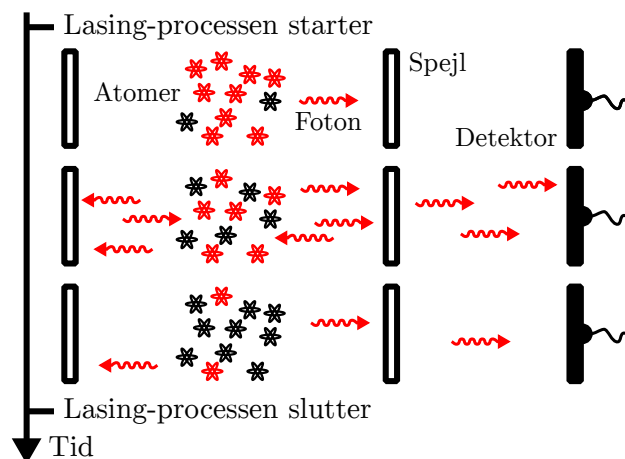
I vores laboratorium undersøger vi mulighederne for at bygge et aktivt atomur baseret på disse idéer. Vi fanger omkring 100 millioner ^{88}Sr -atomer i en optisk kavitet (se Figur 4). De fanges ved hjælp af laserlys i en såkaldt magneto-optisk fælde, hvorved de køles ned fra omkring $520\text{ }^\circ\text{C}$ til nogle få mK over det absolutte nulpunkt. Atomerne tvinges derefter op i den exciterede tilstand, hvorefter lasing-processen kan begynde: Et atom henfalder til grundtilstanden og udsender en foton. Denne foton stimulerer emission fra et andet atom i den exciterede tilstand, så vi ender med to fotoner og begge atomer i grundtilstanden. Det starter en kædereaktion (se Figur 5), hvor lyset bliver forstærket, så længe der er nok atomer i den exciterede tilstand. Spejlene reflekterer det meste af lyset, men en smule af lyset slipper ud, og vi kan måle på det.

Lasing-processen kan beskrives kvantemekanisk med en såkaldt Tavis-Cummings-model. Her opstiller vi ligninger for energien i systemet, og hvordan denne udvikler sig. En stor udfordring ved at tilpasse modellen til vores system er, at det kræver ekstremt meget regnekraft at lave beregninger med 100 millioner atomer. Hvert atom interagerer forskelligt med lyset alt efter dets position, hastighed, tilstand og lysets bølgenatur

på nanometer-skala. Derfor er vi er nødt til at bruge forskellige antagelser for at kunne regne på det. Derudover afhænger lasing-processen af mange parametre: Antallet af atomer, deres præcise temperatur og rumlige fordeling, påvirkninger fra magnetfelt og intensiteten af de laserstråler, vi bruger. Vores model er interessant, netop fordi den inkluderer de virkelige fysiske forhold i en ikke-idéal atomar gas. Så hvis modellen skal sammenlignes kvantitativt med eksperimenterne, kræver det, at vi kan måle alle disse parametre uafhængigt og med høj præcision.

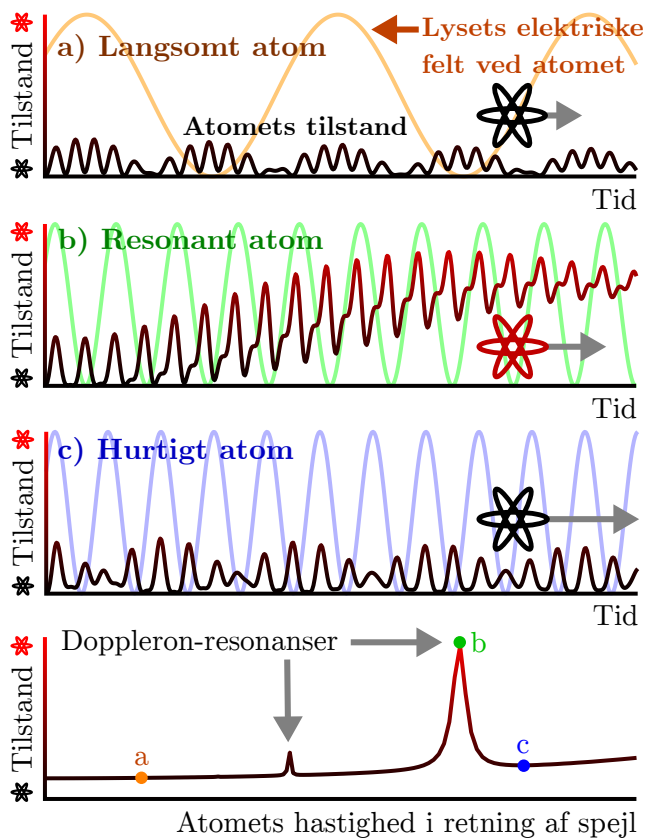


Figur 4. I vakuumkanteret i vores laboratorium kan man se de 100 millioner strontiumatomer lyse op, når vi fanger og køler dem med laserlys inden lasing-processen begynder.

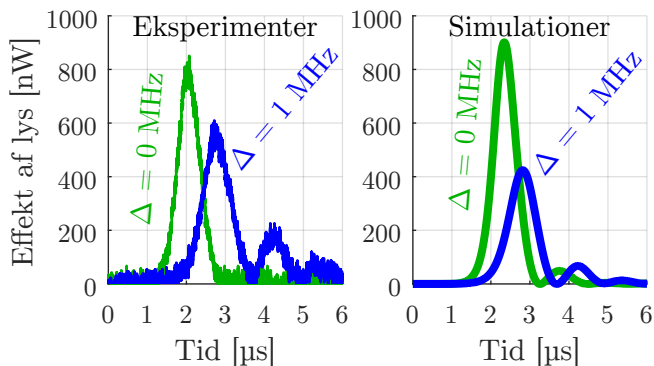


Figur 5. Lasing-processen starter ved, at et exciteret atom udsender lys imellem de to spejle. Ved stimuleret emission forstærkes det, imens atomer overgår til grundtilstanden. Til sidst er så mange atomer i grundtilstanden, at absorption foregår oftere end emission, og processen stopper.

I modellen kan vi se, at specielt atomernes hastigheder har en stor indflydelse på dynamikken, når de interagerer med lyset i kaviteten. Lyset kan opfattes som en stående bølge, og for nogle atomer med helt bestemte hastigheder passer bevægelsen med lysbølgen sådan, at de interagerer særligt kraftigt. Disse resonanser kaldes dopplersoner og er en af de eksotiske processer, som, vi kan se, bidrager til dynamikken i systemet, når vi beskriver det kvantemekanisk (se Figur 6).



Figur 6. Når et atom rejser gennem lysbølgen i kaviteten (her med forskudt frekvens ift. atomerne) ændrer det tilstand afhængigt af dets hastighed imod et af spejlene. Ved bestemte hastigheder (b) interagerer atomet særligt kraftigt.



Figur 7. Laserlyset udsendes i eksperimentet som en enkelt puls, der kan være efterfulgt af oscillationer. I både eksperimenter og simulationer finder vi, at en forskudt kavitetsfrekvens kan fremprovokere oscillationer i det lys, som går igennem spejlene under lasing-processen.

Vi kan også undersøge atomernes afhængighed af kaviteten ved at bevæge spejlene, så kavitets og atomernes frekvenser ikke længere er helt ens. I Figur 7 viser vi et eksempel på de laser-pulser, vi ser fra vores system, sammenlignet med vores simulationer. Her kan man se den korte puls af lys, der udsendes under normale omstændigheder (grøn), og hvordan ændringer i kavitets frekvens influerer lysets opførsel. Fremfor alt viser denne sammenligning, at simulationerne i høj grad kan forudsige opførslen af vores system. På grund af kohærens i systemet kan vi se oscillationer efter den første puls. Energien i systemet opfører sig som en

bølge, der plasker frem og tilbage mellem atomerne og lyset. Når energi fra atomerne udsendes som lys i kaviteten, vil noget af den energi blive genabsorberet af atomerne og kan så igen udsendes som lys. Det resulterer i den oscillation, vi ser i lypulsen.

Målet – det kontinuerte atomur

Målet med disse undersøgelser er på sigt at bygge et atomur, hvor lasing-processen bliver kontinuert og stabil fremfor i pulser. Vores nuværende system er således et første skridt på vejen mod det fuldt funktionelle atomur, hvor vi undersøger hvilke problemer, man støder på, og hvilke forbehold vi skal tage for at minimere indflydelsen af andre elementer på atomernes tilstande. Det hjælper os altså med at forstå de tekniske krav, når vi skal bygge det kontinuerte atomur, og modellen kan hjælpe os med at forudsige, hvad vi kan forvente af en given opbygning af vores aktive atomur.

Litteratur

- [1] W. F. McGrew, X. Zhang, R. J. Fasano, S. A. Schäffer, et. al. (2018), *Atomic clock performance beyond the geodetic limit*, udgives i Nature <https://arxiv.org/abs/1807.11282>
- [2] H. Metcalf og P. van der Straten (1999) *Laser Cooling and Trapping*, Springer (dækker laserkøling og -trapping).
- [3] J. Ye og T. W. Lynn, *Applications of Optical Cavities in Modern Atomic, Molecular and Optical Physics* https://jila.colorado.edu/yelabs/sites/default/files/uploads/4101-Bederson-001_corrections.pdf (dækker optiske kaviteter, atomfysik og optik).



Mikkel Tang er PhD-studerende på Niels Bohr Institutet. Han blev for nylig færdig med sit speciale, hvor han specielt beskæftigede sig med den teoretiske beskrivelse af lasing-processen.



Stefan Alaric Schäffer er PhD-studerende på Niels Bohr Institutet og forsker i systemer af kolde atomer i optiske kaviteter og brugen af disse i metrologiske sammenhænge.