

Atomure og deres anvendelser

Af Anders Brusch og Jan W. Thomsen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

De mest præcise målinger i fysikken laves i dag ved hjælp af atomure, hvor man kan undersøge atomers energistruktur i et meget kontrolleret miljø. De bedste af disse ure har i dag en nøjagtighed på 16 betydende cifre eller bedre, hvilket svarer til et ur der taber et sekund på omkring 300 millioner år. Igennem fysikkens historie har præcise målinger af atomer været vigtige for udviklingen af nye teorier og test af de eksisterende. Et klassisk eksempel er målinger af brints energistruktur og deres betydning for Bohrs udvikling af sin atommodel. I denne artikel vil vi beskrive hvordan atomure virker ved at fokusere på nogen af de tekniske fremskridt der er sket de sidste 10-20 år i dette felt. Desuden vil vi med nogle eksempler illustrere hvilke muligheder atomures utrolige nøjagtighed giver.

Atomure

I et atomur lader man et elektromagnetisk felt fra en lokal svingningskreds eller oscillator, f.eks. i form af mikrobølgestråling eller en laser, vekselvirke med en samling atomer i en velkendt tilstand, som har en egnet resonans imellem to energitilstande. Herefter undersøges det hvilken tilstand atomerne befinder sig i, hvorved der opnås information om forskellen imellem frekvensen af det anvendte felt og frekvensen af den atomare resonans som vi ønsker at undersøge. Denne viden kan bruges til at styre frekvensen af laseren med, så den bliver identisk med den atomare resonansfrekvens. Hvis man hele tiden gentager denne proces, vil laserens frekvens være meget stabil og kan bruges som en reference eller ur.

Specielt to parametre anvendes til at bestemme kvaliteten af et atomur, stabiliteten og nøjagtigheden. Stabiliteten er udtryk for de statistiske usikkerheder af frekvensen af atomuret. Denne afhænger specielt af to parametre, signal til støj forholdet i målingen af atomernes sluttilstand samt kvalitetsfaktoren $Q = \nu/\Delta\nu$ af den atomare overgang, hvor ν er resonansfrekvensen af den atomare overgang der anvendes og $\Delta\nu$ er den eksperimentelle liniebredde af overgangen.

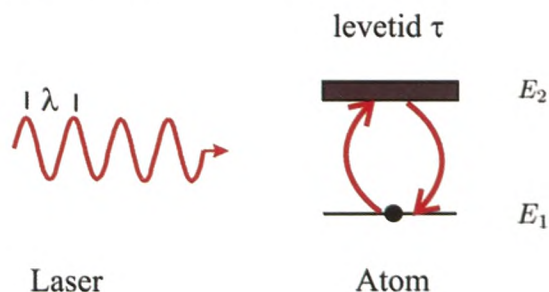
Nøjagtigheden er et mål for hvor godt man kontrollerer omgivelsernes påvirkning af den atomare resonans man benytter i atomuret. Der er mange forskellige effekter der kan påvirke atomet og resultere i et skift af resonansfrekvensen. Nogle af disse er det ikke muligt at fjerne helt, og det er derfor nødvendigt at måle hvordan de påvirker atomuret så man kan korrigere for dem. Nøjagtigheden udtrykker hvor præcist disse korrektioner er kendt.

Et eksempel er Zeeman skiftet der skyldes magnetfelters påvirkning af atomet. Ved at anvende strømførende spoler og magnetiske skjolde er det muligt at reducere magnetfeltet i eksperimentet så meget at den atomare resonans ikke bliver påvirket.

Sortlegemestråling er en anden kilde til skift af den atomare frekvens. Ethvert legeme udsender lys med et spektrum der afhænger af dets temperatur. Ved stuetemperatur er det udsendte lys i den infrarøde del af spektret hvilket kan give et betydeligt skift.

1. Atomar resonans og overgangsfrekvens

Atomer har veldefinerede energiniveauer som vist på figuren nedenfor, hvor vi har tegnet grundtilstanden, den laveste energitilstand af atomet, og den første anslåede tilstand. Ved brug af elektromagnetisk stråling, som f.eks. lys fra en laser, kan elektronen drives mellem de to energiniveauer E_1 og E_2 . For at drive elektronen skal frekvensen være tilpasset Bohrs resonans betingelse som angivet, hvor $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js er Plancks konstant, ν_0 frekvensen af den atomare resonans, λ bølgelængden og c lysets hastighed. Frekvensen ν_0 er altså atomurets frekvens. Elektronen befinder sig kun i det øvre energiniveau et endelig tidsrum τ , kaldet for levetiden, før den spontant henfalder til grundtilstanden. Det giver anledning til en endelig liniebredde givet ved $\Delta\nu = 1/(2\pi\tau)$. Er lysets frekvens inden for intervallet $\nu_0 \pm \Delta\nu/2$ drives elektronen effektivt imellem de to tilstande. Nogle atomer har kort levetid og dermed stor liniebredde, andre atomer som f.eks. alkali-jord metallerne kan have meget lang levetid og tilsvarende smal liniebredde.



$$E_2 - E_1 = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda}$$

For cæsiumatomuret benyttes mikrobølger på 9.192.631.770 Hz til at drive elektronen med en Q -værdi på 10^9 . I moderne atomure benyttes optiske overgange som f.eks. 429.228.323.965.507 Hz i strontiumatomuret hvor Q -værdi er på ca. 10^{15} .

Den eneste måde helt at fjerne dette på er at køle eksperimentet ned til temperaturer i nærheden af det absolutte nulpunkt, hvilket ikke altid er teknisk muligt. I stedet kontrollerer man temperaturen af den eksperimentelle opstilling meget præcist, typisk bedre end $0,5^\circ\text{C}$.

Karakteriseringen af de forskellige systematiske effekter er eksperimentelt krævende, men kan også give ny indsigt i fundamentale atomare processer, f.eks. kollisioner imellem atomer ved lave temperaturer.

Atomure har i de sidste 10 år gennemgået en bemærkelsesværdig udvikling, der skyldes udviklingen af nye teknikker der har gjort det muligt at overkomme nogen af de største problemer der tidligere begrænsede atomure. Dette har medført forbedringer inden for de to kvalitetsparametre og betydet udvikling af atomure baseret på mange forskellige grundstoffer. I denne artikel vil vi fokusere på nogle af disse problemer og hvordan deres løsning har revolutioneret præcisions-spektroskopian.

Laserkøling

I de tidlige atomure brugtes gasceller med iod eller andre molekyler omkring stuetemperatur eller atomstråler med cæsium eller rubidium med en middelhastighed på flere hundrede meter pr. sekund. Selvom man i disse ure bruger teknikker der i høj grad er ufølsomme overfor Doppler effekten (se boks 2) er der stadig en stor usikkerhed forbundet med atomernes bevægelse. De bedste af denne type ure er de primære sekundstandarder der bruger en stråle cæsium (se figur 1). Man bruger dette grundstof da sekundet siden 1967 har været defineret som 9.192.631.770 svingninger af strålingen fra mikrobølgeovergangen i grundtilstanden af cæsium.



Figur 1. Primær sekundstandard baseret på en stråle af cæsiumatomer. Dette ur var den amerikanske tidsstandard fra 1975 til 1993.

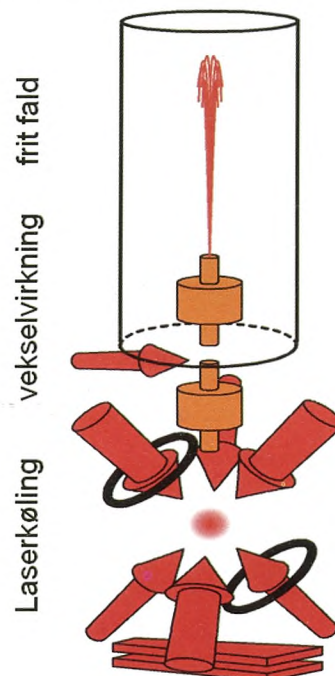
Denne type ure kan laves meget kompakte og kan køre kontinuert i meget lang tid og er i dag grundlaget for den internationale tidsskala. Denne type ure bruges også hvor der er behov for præcis synkronisering som f.eks. i telekommunikation og i navigationssatellitter som GPS og det kommende europæiske navigationssystem Galileo. De bedste af denne type ure har en relativ

unøjagtighed på omkring $5 \cdot 10^{-15}$ og en tilsvarende statistisk usikkerhed. Denne begrænsning skyldes primært brugen af varme atomer på grund af ikke kompenserede Doppler effekter.

Laserkøling, der er baseret på den udveksling af impuls der sker når atomer absorberer og udsender fotoner, løste dette problem. Metoden blev først demonstreret med ioner, og i midten af 1980'erne viste teknikken sit store potentiale med laserkøling af neutrale atomer i en magneto-optisk fælde [1].

For neutrale atomer betyder laserkøling at man uden de store problemer kan fange en samling af mange millioner atomer ved temperaturer fra få millikelvin til under en mikrokkelvin, en milliontedel grad over det absolutte nulpunkt. Ved disse temperaturer har atomerne en middelhastighed på få centimeter i sekundet, så Dopplerskiftet bliver drastisk reduceret. Da laserkøling endvidere kan anvendes til at køle mange forskellige grundstoffer, både ioner og neutrale atomer, åbner teknikken mulighed for præcise studier af atomer med vidt forskellige egenskaber.

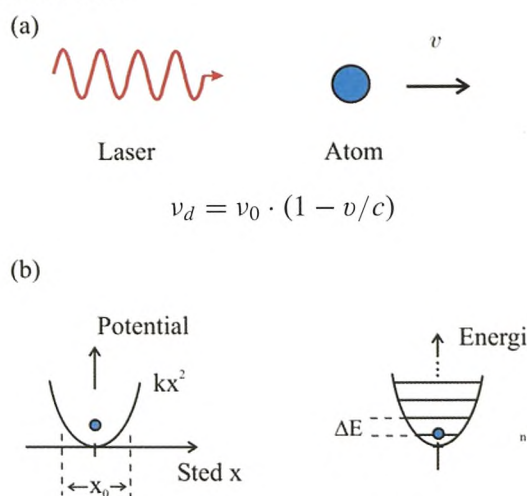
Den store forbedring af atomure, som laserkøling resulterer i, er tydelig når man ser på fontæneure baseret på cæsium (figur 2). I disse ure bliver en sky af 100 millioner atomer kølet ned til 1 mikrokkelvin. Herefter bliver de skudt en meter op igennem en mikrobølgekavitet, hvor de vekselvirker med et elektromagnetisk felt to gange, første gang på vej op, anden gang når de falder ned igen. Denne metode giver en markant forbedring af både præcisionen og stabiliteten, typisk mere end en størrelsesorden. De bedste af denne type ure har nu en relativ unøjagtighed omkring 10^{-16} og bruges blandt andet til præcis kalibrering af den internationale tidsskala og test af fundamental fysik.



Figur 2. Fontæneure baseret på cæsium. Atomerne køles til 1 mikrokkelvin og skydes ca. 1 meter op. På vej op og ned vekselvirker de to gange med et mikrobølgefelt i en kavitet.

2. Dopplereffekten og Lamb-Dicke området

Doppler effekten er navnet på den ændring i frekvens af f.eks. lyd og lys, der skyldes at observatøren bevæger sig relativt til kilden, f.eks. når en ambulance kommer kørende forbi og man hører sirenen ændre lyd. Denne effekt ændrer resonansbetingelsen angivet i boks 1 og kan udtvære urets resonansfrekvens betydeligt, selv ved meget lave hastigheder. For et atom med hastighed v er resonansbetingelsen ændret med $\nu_0 \cdot v/c$, hvor c er lysets hastighed. I mikrokelvinsområdet er atomernes hastigheder nogle cm/s og giver anledning til frekvensskift af optiske ure på kHz-niveau eller mere. Målet for disse ure er mHz forbredning og Doppler effekten må derfor elimineres.

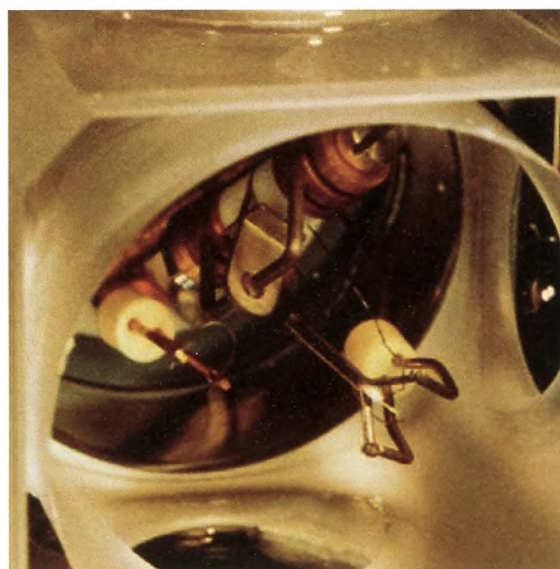


Kolde neutrale atomer eller ioner kan fanges og fastklemmes i dybe fælder ved brug af intense laserfelter eller elektriske felter. På den måde kvantiseres deres bevægelsesenergi så ikke alle hastigheder er tilladte, men kun bestemte værdier, se tilfældet (b) på figuren ovenfor. Er energigabet ΔE mellem to bevægelsesenergitilstande meget større end liniebredden $h \Delta \nu$ (boks 1) og forskydningen $h(\nu_d - \nu_0)$, elimineres Dopplereffekten fuldstændigt, idet der ikke er energi nok i lyset til at drive atomet til den næste bevægelsestilstand. Når dette er tilfældet siges atomet at befinde sig i Lamb-Dicke området. Generelt kan man vise at hvis det område x_0 man klemmer atomet eller ionen inde på er meget mindre end den bølgelængde λ , der benyttes for at drive uret så kan man se bort fra Dopplereffekten. I de potentialer der anvendes i atomure er x_0 typisk omkring 30-100 nm mens λ er ca. 600 nm.

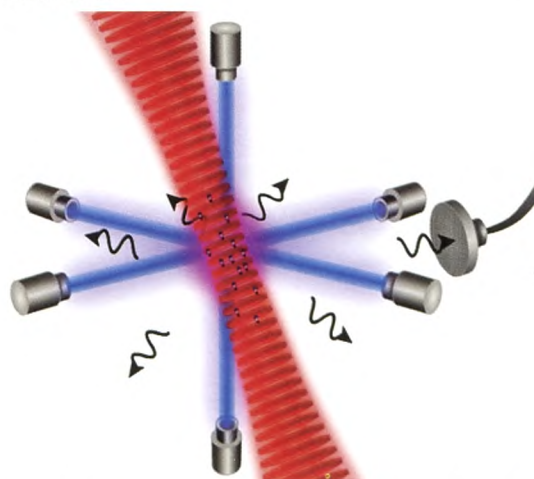
På dette niveau er der stadig bevægelseffekter der kan begrænse et atomurs præcision. Dette problem kan løses ved at fange atomerne i en fælde, der er så "snæver" at bevægelsesfrihedsgraden bliver kvantiseret. Dette såkaldte Lamb-Dicke område gør det muligt at undersøge atomer på en måde der sikrer at impulsen ikke ændres til første orden. Det betyder at

Doppler effekten og andre effekter relateret til atomernes bevægelse forsvinder (se boks 2).

Der findes to typer ure hvor man kan fange atomerne i Lamb-Dicke området. Den første er atomure baseret på enkelte ioner (figur 3). Ioner har, i kraft af deres ladning, en meget stærk kobling til elektriske felter og er nemme at fange i meget dybe fælder. Denne type ure kræver desuden ikke mere end 2-3 forskellige lasere, hvilket specielt havde stor betydning før udviklingen af kraftige diodelasere. Et godt eksempel på et sådant eksperiment er kviksølv-ion uret i Colorado, USA. Dette ur er i dag det mest præcise i verden med en relativ unøjagtighed på $2,4 \cdot 10^{-17}$, svarende til at måle afstanden til den nærmeste stjerne, Alpha Centauri, der ligger 4,4 lysår væk, med en usikkerhed på ± 1 meter. Grunden til at dette ur har så stor præcision er at hele ionfælden er kølet ned til 4 kelvin ved hjælp af flydende helium så sortlegeme strålingen er forsvindende lille.



Figur 3. Eksempel på en ionfælde. Det viste eksempel er en sfærisk Paul-fælde der er velegnet til indfangning af enkelte ioner. En sådan fælde kan fastholde den samme ion i op til flere måneder.



Figur 4. Ur baseret på strontiumatomer fanget i en optisk fælde. De blå lasere bruges til at køle atomerne til lave temperaturer så de kan fanges i den optiske fælde der er en stående laserbølge. Detektoren til højre anvendes til at måle sluttstanden af atomerne efter de har vekselvirket med laserlyset fra den lokale oscillator.

Den anden type ure er baseret på neutrale atomer fanget i en optisk fælde. I en optisk fælde fanges atomer i en laser med høj intensitet. Hvis man laver en stående bølge, f.eks. ved at reflektere laserens, varierer intensiteten med halvdelen af laserens bølgelængde hvor atomerne er fanget i "pandekager" med høj intensitet (figur 4).

Ure baseret på denne metode kan laves med grundstofferne i den anden hovedgruppe, alkali-jord metallerne, da man kan fange disse atomer på en måde der ikke påvirker den atomare resonans. Det bedste af denne type ure er baseret på grundstoffet strontium, hvor man i Colorado, USA har opnået en nøjagtighed på 16 betydende cifre. Begrænsningen for dette ur er sortlegeme stråling fra vakuumkammerets vægge, og en forbedring forudsætter en meget præcis opmåling af atomets energiniveauer og meget præcis kontrol med temperaturen af de forskellige dele af eksperimentet. En anden mulighed er at benytte et grundstof hvor den atomare resonans er mindre følsom overfor sortlegeme stråling, hvilket er tilfældet for magnesium og kviksølv.

Stabilitet

Stabiliteten af et atomur har stor betydning, da den afgør hvor lang tid man skal måle for at opnå en tilpas lille statistisk usikkerhed i bestemmelsen af en frekvens. Stabiliteten skalerer typisk med $t^{-1/2}$, hvor t er måletiden, så en forbedring af stabiliteten med en faktor 5 afgør om man skal måle i 2 timer eller to dage.

Stabiliteten afhænger i høj grad af kvalitets faktoren $Q = \nu/\Delta\nu$ af den atomare resonans man bruger. Da der er grænser for hvor lang tid det er praktisk muligt at vekselvirke med atomerne i et atomur, sætter Heisenbergs usikkerheds relationer en nedre grænse for hvor snæver en liniebredde man kan opnå. Den eneste mulighed for at forbedre Q er derfor at bruge en overgang med en højere frekvens ν , hvilket i praksis betyder at man skifter fra at bruge en atomar overgang i mikrobølgeområdet, som i cæsiumuret, til at bruge overgange i den synlige del af spektret.

Skiftet fra mikrobølger til synligt lys medfører en del tekniske udfordringer, hvoraf den største er måling af frekvenser i det synlige område.

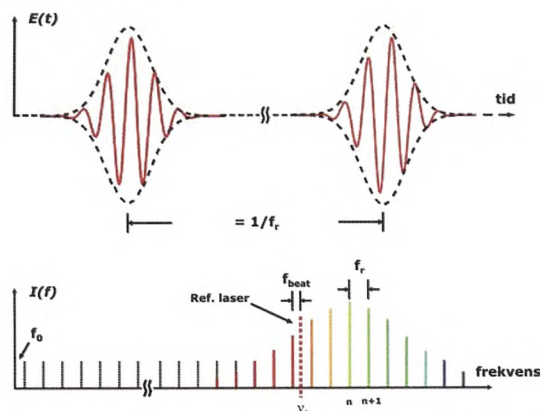
Frekvenskammen

En præcis måling af en lasers frekvens forudsætter en direkte sammenligning med en eksperimentel realisering af sekundet, der er defineret som 9.192.631.770 svingninger af strålingen fra mikrobølgeovergangen i grundtilstanden af cæsium. For at foretage en måling i det synlige område omkring 1000 THz er det nødvendigt at bygge bro over 5 størrelsesordener i frekvens fra atomure baseret på cæsium, som f.eks. et fontæneur. Indtil år 2000 blev dette gjort ved at faselåse en kaskade af mikrobølgeoscillatorer og lasere i det dybt infrarøde og infrarøde frekvensområde til hinanden ved hjælp af forskellige ikke-lineære processer. Disse systemer var ikke bare store og komplicerede, men var også kun designet til at måle en enkelt eller to frekvenser i det synlige område. Kun tre laboratorier i verden havde den kapacitet der krævedes for

at levere denne eksperimentelle kraftanstrengelse, og kun frekvensen af enkelte atomare og molekulære resonanser var derfor præcist kendt.

3. Femtosekundlaser og frekvenskam

Optiske ure er baseret på meget høje frekvenser af størrelsesorden 10^{14} Hz. Intet instrument kan imidlertid måle denne frekvens direkte. For at danne bro mellem frekvenser i mikrobølgeområdet, der let kan måles og tælles og høje optiske frekvenser blev der i 1995 udviklet en såkaldt frekvenskam. En frekvenskam er et optisk gearværk, der sammenkæder de meget hurtige svingninger omkring 10^{14} Hz med frekvenser i MHz-området som benyttes i bla. elektronik. Det optiske gearværk udgøres af en femtosekund laser der periodisk udsender laserpulser med en længde på ca. 100 femtosekunder ($100 \cdot 10^{-15}$ s) og med en repetitionsrate f_{rep} på typisk 100 MHz.



På figuren herover er vist de elektriske pulser samt det tilsvarende spektrum i frekvensområdet. I frekvensområdet udgør spektret en kam, en frekvenslineal med ækvidistante afmærkninger i det optiske område 500 - 1100 nm. Afstanden mellem to frekvensmarkører ved tallene n og $n+1$ er givet ved repetitionsraten f_{rep} . Tallet n har typisk en værdi i størrelsesordenen 60.000. En optisk frekvens med ν_0 (angivet ved den stiplede linje under f_{beat} på figuren ovenfor), kan udmåles mod 100 MHz kilden. Det gøres ved at overlape lys fra kammen og reference laserens ν_0 således at der opstår en beatfrekvens, f_{beat} , lig forskellen mellem de to optiske frekvenser, kammens ved markørtallet n , $\nu_n = n f_{\text{rep}}$ og referencen ν_0 . Beatfrekvensen er også i MHz-området og kan nemt måles. Således kan frekvensen af en laser i det optiske område måles med Hz nøjagtighed ved at referere f_{rep} til et cæsiumatomur eller ved at låse kammen til en anden kendt optisk standard. Tilsvarende kan kammen også låses til den optiske reference hvorved f_{rep} låses til det optiske ur. Dette giver kolossalt stor nøjagtighed i det optiske frekvensområde som også kan overføres til MHz-området hvor det kan anvendes til forskellige formål.

Alt dette ændrede sig drastisk med udviklingen af titan-safir baserede pulsede lasere med meget brede frekvensspektre for ca. 10 år siden. Disse lasere udsender meget korte pulser med en gentagelsesrate der kan styres meget præcist.

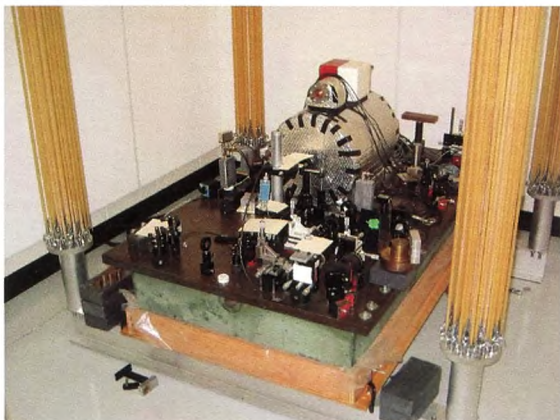
En laser der udsender præcist timede pulser vil have et spektrum bestående af diskrete linier med en indbyrdes afstand i frekvens givet ved gentagelsesraten f_{rep} . Dette spektrum, kaldet en frekvenskam, kan bruges som målebånd til at bestemme optiske frekvenser, da alle de parametre der bestemmer de enkelte liniers frekvens kan vælges i mikrobølge området og derfor refereres direkte til sekunddefinitionen.

Til denne type måling kræves at den pulsede laser har et meget bredere spektrum end de typiske 50 nm centreret omkring 800 nm. Dette kan skabes ved hjælp af en ikke-lineær blandingsproces i specielle fotoniske krystalfibre der blev udviklet i slutningen af 1990'erne. Disse gør det muligt at opnå spektre der spænder fra den grønne del af spektret ved 500 nm til omkring 1100 nm i den infrarøde del. Dette brede spektrum består af titusindvis af linier med en veldefineret frekvens. Ønsker man at måle frekvensen af en laser i dette område kræves blot at man sammenligner frekvensen af laseren og en af linierne i frekvenskammen.

Denne teknologi er hovedårsagen til at man i dag ser en eksplosion af forskellige laboratorier der arbejder med atomure. Betydningen af dette blev anerkendt med Nobelprisen i 2005 til John L. Hall og Theodor W. Hänsch.

Imod højere stabilitet

Med overgangen til synligt lys er det potentielt muligt at lave atomure med meget lille statistisk usikkerhed. For at opnå dette er det nødvendigt at bruge en meget stabil laser til at undersøge atomerne med. Denne laves ved at låse laseren til en resonans i en optisk kavitet bestående af to højrefleksive spejle.



Figur 5. Den ultrastabile laser fra kviksølvionuret i USA. Her er hele kaviteten samt det optiske bord den er monteret på, som har en masse på omkring 500 kg, ophængt fra loftet i 5 meter lange elastikker.

De krav der stilles til stabiliteten af denne laser svarer cirka til at afstanden imellem de to spejle ikke må variere med mere end en atomar diameter. På det

niveau er kaviteten utrolig følsom overfor vibrationer hvilket stiller store krav til den eksperimentelle opstilling. Et eksempel på hvordan kaviteten kan isoleres fra vibrationer er ved kviksølv ionuret i USA (figur 5).

Da der er en betydelig interesse i udvikling af meget kompakte atomure, er denne form for løsning ikke holdbar i længden. I stedet er det muligt at designe en kavitet med en geometri der gør den ufølsom overfor vibrationer til første orden. Teknologi til at lave denne type design er blevet udviklet i de seneste 5 år og mange forskellige geometrier er under test.

Kompakte atomure med en nøjagtighed på 16 betydende cifre vil i første omgang kunne bruges til sammenligninger imellem laboratoriestandarder rundt omkring i verden. På lidt længere sigt er det interessant at montere meget præcise atomure på satellitter, bl.a. for at teste Pioneer anomalien, der har navn efter rumsonderne Pioneer 10 og 11, der bremser mere op end forventet, eller for at lede efter gravitationsbølger.

Atomuret som sensor

Atomure er meget følsomme overfor ydre påvirkninger af forskellig slags. Det betyder på den ene side at man skal kontrollere omgivelserne meget præcist for at lave et godt atomur. På den anden side betyder det at et atomur kan betragtes som en utrolig følsom sensor overfor de selv samme påvirkninger. Denne sammenhæng bruges f.eks. i dag til udvikling af meget præcise og kompakte magnetometre, baseret på teknikker fra atomure, der er konkurrencedygtige med superledende sensorer (SQUIDs) samt ultrapræcise gravimetre baseret på atomer i frit fald ligesom i atomare fontæner.

Det er et af grundlagene indenfor fysik at naturlovene er de samme til alle tider og alle steder (ækvivalensprincippet). Dette princip er i overensstemmelse med Standardmodellen, som dog er under pres da der er mange fænomener den ikke kan forklare. Mange af de teorier der er foreslået som afløser enten til-lader eller direkte forudsiger en afvigelse fra Einsteins ækvivalensprincip. En sådan afvigelse vil manifestere sig ved at resultatet af et eksperiment afhænger af dets placering i universet eller tidspunktet for målingen og da atomure er de mest præcise måleinstrumenter i fysikken, er det oplagt at bruge dem til at lede efter sådanne afvigelser.

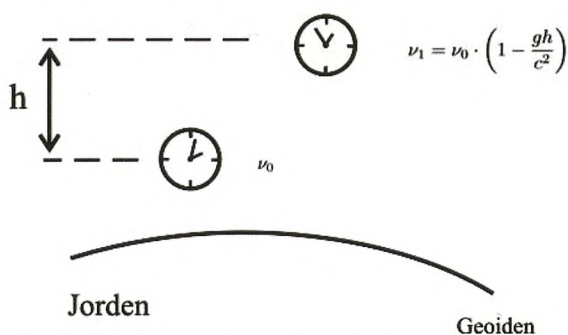
Et af de bedste eksempler på en sådan måling er sammenligningen imellem de to mest præcise atomure i verden med en relativ unøjagtighed på $5,2 \cdot 10^{-17}$ (omtalt i KVANT nr. 2, 2008 [1]). De atomare resonanser i disse ure har forskellig afhængighed af værdien af finstrukturkonstanten α (se boks 4) og en sammenligning imellem de to ure over tid gør det derfor muligt at lede efter en eventuel variation. Målingen viste ikke nogen signifikant variation, men vil naturligvis blive gentaget over flere år for at mindske usikkerheden. Specielt finstrukturkonstanten er interessant at undersøge, da astronomiske observationer af spektre fra fjerntliggende objekter antyder at α har ændret værdi i takt med udvidelsen af Universet.

4. Atomure i gravitationsfelter

Atomure har i kraft af deres nøjagtighed et stort potentiale som sensorer. Eksempelvis kan man direkte måle Einsteins forudsigelse at ure der befinder sig forskellige steder i tyngdefeltet går forskelligt, se figuren nedenfor.

Med de nøjagtigheder moderne atomure har, kan dette faktisk være en væsentlig effekt, specielt hvis man sammenligner ure der er langt fra hinanden. Et eksempel er de løbende sammenligninger imellem to cæsiumure, det ene i Colorado i USA, det andet i Tyskland, hvor højdeforskellen er omkring 1,6 km.

Einsteins almene relativitetsteori foreskriver, at ure der befinder sig højere i tyngdefeltet går langsommere, se figuren herunder.



Her er g tyngdeaccelerationen og h er højdeforskellen mellem to ure. Geoiden, er den lokale højdereference for tyngdefeltet.

Optiske atomure benyttes i dag til at undersøge om naturkonstanterne ændrer sig med tiden. Det drejer sig bla. om finstrukturkonstanten α og forholdet mellem protonens og elektronens masse. Finstrukturkonstanten spiller en meget vigtig rolle idet den karakteriserer den elektromagnetiske vekselvirkning. Finstrukturkonstanten er givet ved

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \cong \frac{1}{137}$$

Atomers energiniveauer er bestemt af α , og generelt er frekvensen af optiske overgange en funktion af α og atomnummeret Z , $\nu_0 = f(\alpha, Z)$ for et givet atom. Denne funktion indeholder en korrektion der afhænger af hvilket grundstof og hvilken atomar resonans der benyttes. For at teste om α ændres i tid kan vi måle frekvensforholdet mellem to ure med forskellige følsomheder overfor en drift af α , og se om det ændrer sig med tiden.

Målinger foretaget i laboratorier på Jorden har endnu ikke kunnet se relative ændringer udover detektionsgrænsen på 10^{-17} per år. Astronomiske data tyder på små ændringer i løbet af Universets levetid. Denne type måling er langt fra så præcis som målinger med atomure, men ser til gengæld langt tilbage i tiden.

Ved at sammenligne atomure er det også muligt at søge efter variationer der enten afhænger af jordens position i solens gravitationsfelt eller retningen af kvantiseringsaksen i forhold til Universet. Denne type forsøg er i en fase hvor en mindre række eksperimenter er blevet lavet, men som atomurene bliver bedre vil denne type test af fundamentale fysiske love blive mere og mere præcis.

Konklusion

I denne artikel har vi forsøgt at give et overblik over hvordan atomure virker og hvordan de har ændret sig i de sidste 10 år. De atomure der bliver forsket i i dag er meget komplekse eksperimentelle systemer bestående af mange forskellige lasere til at manipulere atomerne med. Udviklingen af disse komplekse systemer har drevet en betydelig teknologisk innovation indenfor spektroskopiske metoder der i dag betyder at "værktøjsskassen" til at undersøge atomer med er meget varieret. Dette er ikke bare til gavn for atomurene, men også indenfor andre felter af atomfysikken hvor præcision er af betydning.

Litteratur

- [1] Kasper T. Therkildsen og Jan W. Thomsen (2008), Bose Einstein Kondensation i atomare gasser – Når atomer bliver til kvantebølger, KVANT bind 19, nr. 2, s. 20-23 (2008).



Anders Brusch er ph.d. i atomfysik fra Paris VI, hvor han arbejdede med udvikling af et atomur baseret på strontium. Efter et ophold ved kviksølv-ion uret i Colorado, USA, er han i dag ansat som post doc. ved NBI hvor han arbejder på udvikling af et atomur baseret på magnesium.



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