

SÄRTRYCK UR:

KOSMOS

ENHETER OCH NATURKONSTANTER

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2020



OPTISK TID – EN PÅGÅENDE REVOLUTION INOM TIDSMÄTNING

© MARTIN ZELAN



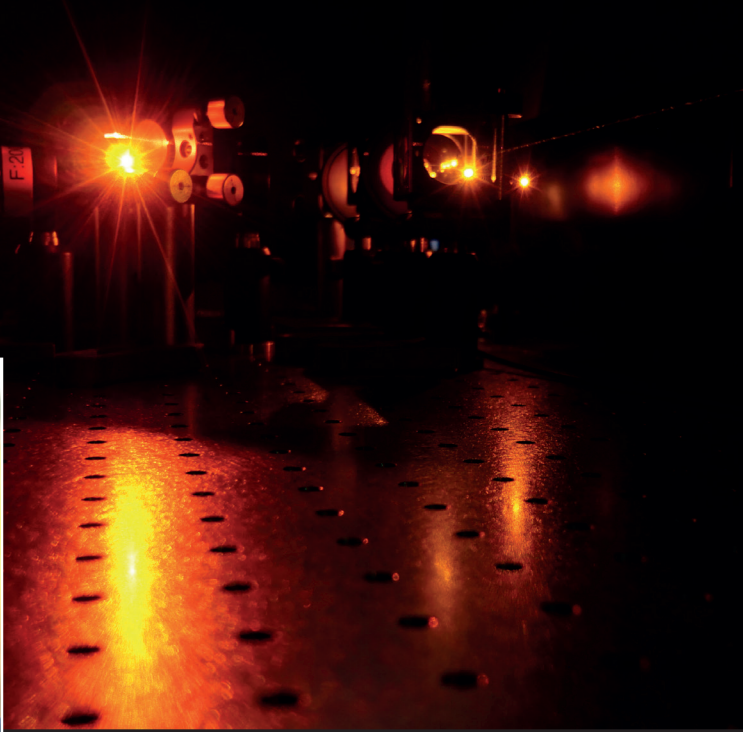
Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Martin Zelan

är senior forskare och verksam inom Sveriges Nationella Metrologiinstitut på avdelningen Mätteknik vid RISE, Research Institutes of Sweden. Martin disputerade 2011 vid Umeå Universitet inom experimentell atom- och laserfysik, specifikt inom laserkylning och Bose-Einstein kondensation. Efter en tid som post-doc vid NIST (National Institute for Standards and Technologies), har han sedan 2012 varit verksam vid RISE (tidigare SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut) där han bedrivit forskning inom olika optiska mätmetoder.



Definitionen av en sekund spelar en grundläggande roll också för definitionerna av många av de andra grundenheterna. Inte minst gäller detta metern. Martin Zelan förklarar för oss att bakgrunden till detta är extremt noggranna klockor. Dessa beskrivs, liksom koppningen till metern via ett fixt värde på ljushastigheten.

Laserljus från en optisk frekvenskam vid Sveriges riksmätplats för tid och frekvens. Frekvenskammen är central i del framtidens klockor baserade på optiska frekvenser.

Optisk tid – en pågående revolution inom tidsmätning

2019 var ett viktigt år för metrologin. Efter en lång tids strävan blev SI-systemet till slut av med sin sista artefakt och blev istället helt baserat på fundamentala naturkonstanter. Att detta till slut blev möjligt beror på att forskare arbetat ihärdigt med att utveckla nya metoder som kan realisera måttenheterna för kilogram och kelvin med samma noggrannhet som de tidigare definitionerna av dessa. Men samtidigt har det inom andra delar av metrologin gjorts än mer revolutionerande framsteg där nya metoder har gjort det möjligt att mäta långt bättre än vad dagens definitioner tillåter.

Inte helt oväntat har dessa framsteg skett inom tid- och frekvensmetrologi, vilka länge varit de storheter som människan kunnat mäta med högst noggrannhet. De nya framstegen kommer inte bara innebära att SI-enheten för sekunden i framtiden (troligen) kommer få en ny definition, utan också öppna dörrar för helt ny fysik och andra vetenskapliga upptäckter. Innan vi går in i detalj på dessa framsteg och vad de innebär är det värt att stanna upp och göra en snabb historisk återblick över hur tid mätts och definieras, samt hur definitionen på tid också är helt central för flera andra SI-enheter, däribland metern.

Tid genom tiderna

Tid är något som ända sedan de antika civilisationerna varit mycket viktigt för mänskligheten. Till att börja med för att kunna förstå årstider och på så sätt kunna bedriva lantbruk, till att senare vara centralt inom navigation till havs och viktigt för det moderna informationshället.

Att mäta tid har alltid byggts på principen att mäta frekven-

sen av en viss händelse. För antikens civilisationer handlade det om att mäta och förstå jordens rotation kring solen, månens rotation kring jorden och jordens rotation kring sin egen axel: år, månader, och dagar. Så småningom delades även dagar in i mindre enheter av Babylonierna, vilka räknade med 12 som bas, till timmar, minuter och sekunder. Detta ligger än idag till grund för våra tidsenheter. Problemet med att mäta tiden genom himlakroppars rörelse är att frekvensen för dessa händelser är låg vilket gör att det i princip är omöjligt att mäta sekunder med hjälp av ett solur. Även om det vid denna tid fanns en rad olika typer av vatten- och sandur dröjde det ända till år 1656, då Christiaan Huygens uppfann pendelklockan, innan sekunder kunde mätas med någon vidare noggrannhet.

En rad nya tekniska lösningar, motiverade av kraftigt ökande behov för precis navigation till havs, ledde därefter fram till nästa viktiga steg i tidmätning; utvecklingen av den marina kronometern på 1700-talet. Dessa kronometrar kunde stå för en stor del av ett skepps totala kostnad, men bidrog också starkt till att handel och utforskning tog fart på allvar, då longinutell (öst-västlig) navigationen inte längre var ett lika stort problem.

I början av 1900-talet, genom stora framsteg inom elektroniken och upptäckten av den piezoelektriska effekten, påbörjades en teknisk revolution och nya klockor, baserade på högfrekventa svängningar i kvartskristaller, kunde utvecklas. Dessa klockor medförde att frekvensen, jämfört med tidigare klockor, kraftigt kunde ökas och en förbättrad upplösning kunde erhållas.

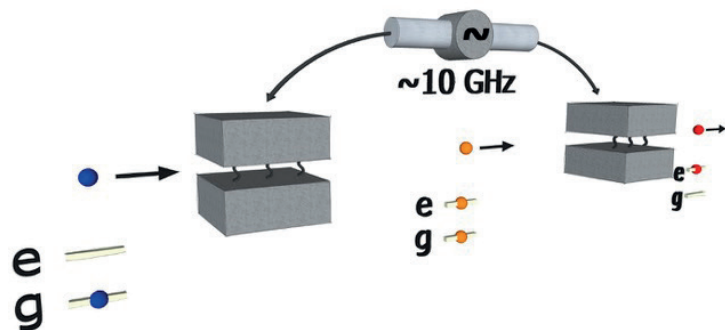
Trots att både pendelklockor och kvartoscillatorer används än idag har de påtagliga brister. Båda saknar nämligen en stabil referens; lämna dem utan uppsikt så kommer deras frekvens att gradvis ändra sig. Detta gjorde att definitionen av sekunden baserad på astronomiska relationer kvarstod ända fram till 1967, trots att precisa astronomiska mätningar sedan länge avslöjat att även jordens rotation kring sin egen axel och dess omloppsbanan runt solen var svåra att förutsäga exakt, samt att de tycktes ha systematiska skift (jorden roterar långsammare och långsammare). På den tiden ändrades helt enkelt tiden med tiden.

Atomklockan

En bra definition av tiden behöver baseras på en viss händelse som inträffar med en konstant frekvens. Frekvensen bör vara så hög som möjligt för att ge hög upplösning. Händelsen ska också vara av ett sådant slag att den är enkel att mäta noggrant och repeterbart, oberoende av var man befinner sig. Astronomiska relationer är förvisso enkla att mäta, men varken särskilt snabba eller helt oföränderliga.

I och med utvecklingen av kvantfysiken, tillsammans med de stora tekniska framstegen som skett med olika spektroskopiska metoder, blev det i början av 1900-talet möjligt att förstå och mäta en mängd egenskaper hos atomer. En central del av kvantfysiken är att energifördelningen är diskret för bundna tillstånd. När en elektron bunden till en atom ändrar tillstånd avges eller absorberas en foton, ett ljuskvantum. Energin hos dessa fotoner ges av Planck-Einsteins relation, $E = h\nu$, där h är Plancks konstant (som numera är fixerad) och ν frekvensen. Precis som frekvensen hos olika himlakropparnas rörelser, eller frekvensen hos pendelrörelsen av en pendelklocka, kan används för att mäta tid, är det denna frekvens som tar oss från den något abstrakta kvantfysiken till exakt tidmätning.

Under några intensiva år i mitten av förra seklet utvecklades en rad olika tekniker och metoder för spektroskopiska högprecisionsmätningar av atomära egenskaper. Den för atomklockor mest



Figur 1. Illustration av tekniken bakom klassiska atomklockor. En stråle med atomer skickas genom en första mikrovågskavitet. Atomerna försätts i ett superpositionstillstånd. De propagerar därefter fritt till nästa mikrovågskavitet där de växelverkar för andra gången med ett mikrovågsfält. Därefter mäts hur stor andel av atomerna som nått det exciterade tillståndet och på så sätt kan mikrovågsfrekvensen stämmas av till atomövergången.

relevanta av dessa metoder var *Ramseys separationsmetod*. Idén med metoden, som är en vidareutveckling av *Rabis oscillationsmetod*, är att kontinuerligt styra en mikrovågssignal så den hela tiden är i resonans med en övergång hos en atom. Detta görs genom att låta en atomstråle passera en mikrovågskavitet (antenn), vilken försätter atomerna i ett superpositionstillstånd. Efter att ha propagerat fritt, växelverkar atomerna en andra gång med en identisk mikrovågssignal från en andra antenn. Genom att därefter mäta hur många atomer som exciterats går det att med en hög precision låsa, alltså styra, frekvensen så att den är resonant med energiövergången. På så sätt blir mikrovågssoscillationerna ”pendeln” i atomklockan, se figur 1 för en illustration av tekniken.

Med denna teknik kunde atomklockor baserade på cesiumatomen konstrueras med en noggrannhet på ungefär en del på 10^{12} . SI-sekunden definierades därför om år 1967 och definitionen gäller än idag:

Sekund, beteckning s, är SI-enheten för tid. Den definieras genom att det fastställda numeriska värdet av cesiumfrekvensen $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, frekvensen för övergången mellan de två hyperfinnivåerna i det ostörda grundtillståndet hos atomen cesium 133, antas vara 9 192 631 770, när den uttrycks i enheten Hz, som är lika med s^{-1} .

Att det blev just cesium som fick ansvaret att bli referens för SI-sekunden och ingen annan atom beror på flera faktorer. De främsta anledningarna är att cesiums hyperfinövergång har en relativt hög frekvens (9,19 GHz), att cesium har ett relativt lågt gastryck som gör att en relativt låg temperatur krävs för att förångas ämnet och skapa en atomstråle, samt att cesium endast har en stabil isotop.

Atommetern

Utvecklingen av atomklockan har haft en enorm påverkan på utvecklingen av SI. Exempelvis behövs sekunden för den nya kilogramdefinitionen. Faktum är att den gällande definitionen ligger till grund för alla SI-enheter utom den för molen (se Karin Cedergrens och Bengt Nordéns bidrag i denna upplaga av Kosmos). Även den kanske mest vardagliga måttenheten genom tiderna,

den för längd (metern) har numera en definition som direkt baseras på sekunden.

Att en meter är just en meter lång är en intressant historia som härrör från det så kallade *metersystemet* som introducerades efter franska revolutionen. Det beslutades att en meter skulle definieras som en del på tio miljoner av avståndet mellan ekvatorn och nordpolen, och att enheterna för volym och vikt skulle baseras på metern. (1 liter = 1 dm³, och 1 gram = 1/1000 av en liter vatten). Det minst sagt ambitiösa arbetet med att mäta avståndet mellan ekvatorns och nordpolen, beskrivet av Göran Grimvall i denna upplaga av Kosmos, ledde så småningom fram till en standardiserad *meterstav*, vars längd baserades på det uppmätta avståndet. Denna definition av en meter kvarstod i SI-systemet ändra fram till 1960. Värt att nämna är att den standardiserade metern faktiskt blev något för kort, ca 0,2 mm, på grund av ett räknefel, men då felet upptäcktes hade längden på metern börjat användas som standard och fick därför bestå.

1960 definierades metern om till att baseras på en orange linje i kryptons emissionsspektrum ($\lambda \approx 606$ nm) så att en meter definierades till att vara 1650763,73 våglängder av strålningen mellan energinivåerna $2p_{10}$ och $5d_5$ hos krypton 86. En intressant detalj är att detta också gjorde att metern i sig är en slags atomklocka, men istället för frekvensen, ν , hos strålningen används våglängden, λ , som standard.

Den nya definitionen av metern blev dock inte särskilt långvarig. Samma år som den nya definitionen trädde i kraft demonstrerades den första lasern. Det blev snabbt tydligt att lasern, med sitt koherenta ljus, är betydligt bättre lämpad för precisionsmätningar än kryptonlampor eller andra atomära emissionskällor. Lasrarna möjliggjorde mätningar på en helt ny precisionsnivå. Baserat på den dåvarande definitionen av metern kunde t.ex. ljushastigheten mätas med tio siffrors noggrannhet. Det föranledde en omdefiniering av metern 1983:

Meter, beteckning m , är SI-enheten för längd. Den definieras genom att det fastställda numeriska värdet av ljusets hastighet i vakuum c antas vara 299 792 458 när det uttrycks i enheten m/s , där sekund definieras med hänvisning till $\Delta\nu_{Cs}$.

Denna nya definition, förutom att vara direkt kopplad till tiden och definitionen av sekunden som är den enhet vi människor kan mäta med högst precision, är mycket elegant och ytterst praktisk. De bästa längdmätningarna bygger nämligen på interferometriska tekniker där antal våglängder hos ljus räknas. Genom att utnyttja att förhållandet $c = \nu\lambda$, där c är våghastighet, är giltigt för alla våglängder, samt att frekvensen är oberoende av vilket medium vågen färdas i, kan en ljuskällas våglängd bestämmas genom att mäta frekvensen hos ljuset. Detta gör att det relativt enkelt går att realisera måttenheten för längd från ljushastigheten.

Laserkylda klockor

Med den nya definitionen av metern hade lasern på allvar gjort sitt intåg inom metrologin och i SI-systemet. Den uppfinning som en gång kallades en lösning utan ett problem skulle visa sig bli ett centralt instrument i framtidens SI.

De första atomklockorna, som beskrevs ovan, baserade sina mätningar på en förlängd stråle av atomer. De relativt varma atomerna medför dock fundamentala begränsningar i prestanda. Dessa beror på att temperaturen, som är ett mått på rörelsen hos atomerna, ger en mycket kort integrationstid, och att de snabba atomerna medför systematiska och stokastiska felkällor från t.ex. *Dopplereffekten och energiskift* som uppkommer av att atomerna kolliderar med varandra.

Många av dessa begränsningar minskar drastiskt om atomerna kyls till extremt låga temperaturer, samtidigt som de fortfarande är i gasfas. Det dröjde därför inte länge efter de genombrott som skedde under 80-talet inom det helt nya forskningsområdet laserkylning innan laserkylda atomer blev grunden för nästa generations klockor.

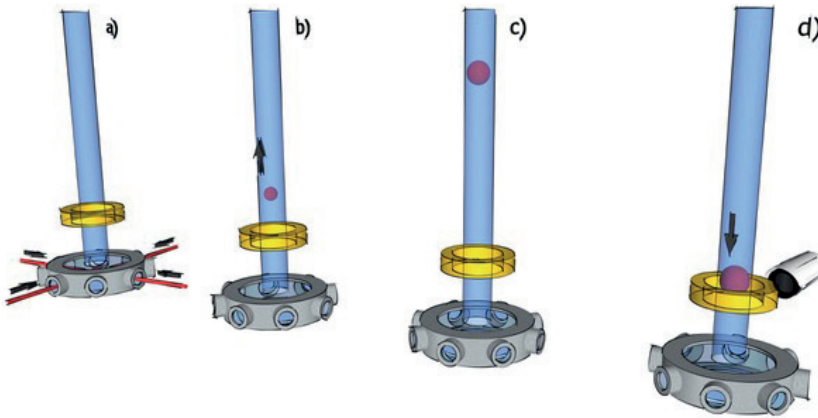
Enkelt uttryckt bygger laserkylning på ljusets förmåga att överföra rörelsemängd till materia. Vid första tanke kan det låta motsägelsefullt att kyla något med ljus, men idén är att utnyttja energi för att på ett kontrollerat sätt bromsa atomernas hastighetsspridning (minskad rörelse = minskad temperatur). Detta är möjligt genom att låta en uppsättning med motriktade laserstrålar, med en frekvens något under en lämplig atomresonans, riktas mot atomerna. I denna situation kommer atomerna att absorbera fler fotoner från den laserstråle de rör sig emot då laserljuset, på grund av Dopplereffekten, upplevs vara närmare övergångens resonans.



Figur 2. Schematisk illustration av en magneto-optisk fälla. Sex motriktade laserstrålar används för att kyla och fånga atomer. Laserstrålarna är noga justerade, både i intensitet och frekvens. Genom att laserljuset har en frekvens som är något under atomernas resonansfrekvens kommer atomerna att bromsas (kylas) när de rör sig emot laserstrålarna på grund av Dopplereffekten. För att också skapa en positionsberoende fälla används även elektriska spolar för att skapa ett inhomogent magnetfält.

Atomerna kommer således bromsas (kylas), och värmeenergi från atomerna överförs till ljusfältet. Läger man också till ett magnetfält går det att skapa en positionsberoende kraft som gör att atomerna inte bara bromsas, utan också fångas i vad som kallas en magneto-optisk fälla (se figur 2 för en förenklad illustration). Med denna teknik går det att kraftigt minska rörelsen hos atomerna och temperaturer så låga som en mikrokkelvin (en miljondels grad över den absoluta nollpunkten) går att uppnå. Mer om laserkyllning går det också att läsa om i Kosmos 1996.

Med laserkyllningens förmåga att kyla ner atomer till nära den absoluta nollpunkten har det varit möjligt att konstruera en ny typ av atomur, med längre integrationstid och mindre systematiska fel. Dessa så kallade atomfontäner, se figur 3 för en illustration, bygger på att man först kyler och fångar atomerna i en magneto-optisk fälla, för att sedan avfyra dem vertikalt. På vägen upp passerar atomerna en mikrovågskavitet som exciterar atomerna. Därefter vänder atomerna nedåt på grund av gravitationen, och passerar samma kavitet igen. Detta gör att själva integrationstiden kan vara upp till ett par sekunder, och den osäkerhet som uppkommer ge-



Figur 3. Illustration av en atomfontänklocka. a) Atomer fångas och kyls med hjälp av en magneto-optisk fälla. b) Atomerna kastas upp och passerar en mikrovågskavitet som försätter atomerna i en superposition. c) Atomerna påverkas därefter av gravitationen och vänder nedåt. d) När atomerna återigen når mikrovågskaviteten slutförs excitationen. Genom att mäta hur många atomer som exciteras kan mikrovågssignalen justeras så att den är resonant med atomerna.

nom att man använder sig av två olika kaviteter, som i traditionella cesiumklockor, försvinner. Denna teknik har varit mycket framgångsrik och har gjort det möjligt att bygga världens noggrannaste cesiumklockor med en noggrannhet på ungefär en del på 10^{16} .

Även om det någonstans här är lockande att stanna upp och fascineras över prestandan på dessa atomfontäner, som gör att klockor baserade på den tekniken varken går en sekund för fort eller för långsamt under 300 miljoner år(!), finns det fortfarande utrymme för kraftiga förbättringar. En bra frekvens- och tidsstandard kräver att osäkerheten av alla systematiska effekter är liten och att en hög precision kan uppnås i mätningen under en praktisk tid. Just ”praktisk tid” är den stora begränsningen hos klockor som baseras på mikrovågsövergångar. För att atomklockor ska kunna nå den absolut bästa prestandan, dvs. mäta frekvensen hos den aktuella övergången hos atomen med maximal noggrannhet, repeteras mätningarna kontinuerligt och resultatet medelvärdesbildas. För de mikrovågsbaserade atomklockor som bygger på en relativt långsam frekvens kring 10 GHz krävs flera månader av kontinuerliga mätningar utan påverkan av yttre faktorer för att nå ner till en noggrannhet på en del på 10^{16} .

Optiska klockor

För att ytterligare förbättra prestandan hos klockor är huvudidén att basera mätningen på en referensfrekvens från en energiövergång som ligger i det högfrekventa optiska området (10^{15} Hz) istället för mikrovågsområdet (10^{10} Hz). Denna betydande, ca. fem storleksordningar, högre frekvens gör att det tar mycket kortare tid för samma antal svängningar att ske. Därmed ökas den högsta möjliga precisionen på klockan, då tiden det tar att medelvärdesbilda fram ett noggrant värde kraftigt reduceras.

Det huvudsakliga problemet med att skapa en bra optisk klocka, med en prestanda som kan överträffa cesiumklockors, bestod länge i svårigheten att enkelt mäta optisk frekvens med hög noggrannhet. Även om det varit möjligt att konstruera stabila lasrar med smal bandbredd, har det inte tidigare gått att enkelt mäta laserns, och följaktligen klockans, absoluta frekvens.

Detta problem löstes på ett mycket elegant sätt kring millennieskiftet av den optiska frekvenskammen. I praktiken finns det två olika typer av lasrar; den mer bekanta kontinuerliga lasern som producerar ett oavbrutet flöde av koherent ljus, samt den pulssade lasern. Genom att pressa lasertekniken till sin absoluta spets är det möjligt att konstruera en pulsad laser där varje laserpuls är oerhört kort, i storleksordningen femtosekunder, samtidigt som upprepningsfrekvensen mellan varje puls är i storleksordningen GHz. Detta kan ses vara, via Fourietransform från tidsplanet till frekvensplanet, identiskt med att ha tusentals individuella kontinuerliga lasrar med en frekvensskillnad i storleksordningen GHz. Då alla dessa individuella laserfrekvenser uppkommer från en och samma laser blir följderna att avståndet mellan varje frekvens blir exakt den samma. Genom att noggrant stabilisera dessa laserpulser kan en så kallad ”kam” av laserfrekvenser skapas, där varje individuell ”kamtand” får en bestämd exakt frekvens.

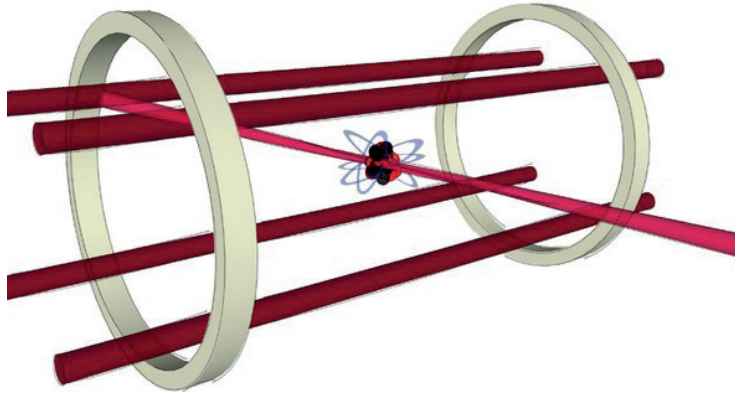
Storheten med frekvenskammen är att det blir möjligt att mycket noggrant mäta optiska signaler. Detta görs genom att mäta frekvensskillnaden mellan en lasersignal med okänd frekvens (exempelvis en laser som mäter atomernas övergång) och någon av frekvenskammens diskreta och kända frekvenser. Då det alltid finns en frekvens hos kammen som ligger nära (inom någon GHz) lasern som ska mätas kan skillnaden enkelt mätas med konventionell elektronik. Utöver att enbart kunna mäta frekvensen hos en annan laser, kan frekvenskammen tack vare sitt breda spektrum

jämföra frekvensen hos olika lasrar, till exempel från flera optiska klockor baserade på olika atomreferenser. Utvecklingen av frekvenskammen öppnade alltså upp för helt nya klockor, där begränsningen att mäta optiska signaler inte längre var ett problem. Som ett bevis på frekvenskammens betydelse belönades också tekniken med Nobelpris 2005.

Även om tillgången till ett instrument som gör det möjligt att mäta optisk frekvens var avgörande är detta långt ifrån det enda som krävs för att bygga en optisk klocka. Själva hjärtat och referensen i de optiska klockorna är, precis som i mikrovågsklockorna, ett noga förberett kvantsystem baserat på atomer. Skillnaden är att systemet i de optiska klockorna måste vara lämpliga för mätningar av energiovergångar i det optiska spektret (därav namnet optisk klocka). För att en atom ska vara lämplig, och kunna fungera som en bra referens, krävs det att den så kallade klockövergången hos atomen (övergången som fungerar som referens) är extremt smal och välbestämd. Därför är lämpliga typer av övergångar så kallade *dipolförbjudna* övergångar (se artikel av Sven Mannervik om förbjudna tillstånd i Kosmos 2002). Dessa övergångar är enligt elektriska dipolapproximationen förbjudna i första ordningen, vilket innebär att livtiden för en atom som befinner sig i motsvarande exciterade tillstånd är extremt lång. I enlighet med Heisenbergs osäkerhetsprincip leder detta till en smal linjebredd (välbestämd energi).

För att det ska vara möjligt att mäta dessa smala övergångar med en så hög precision som möjligt, potentiellt bättre än en del på 10^{18} , krävs att lasern som ska mäta övergången också har en smal bandbredd. Typiska avstämbbara lasrar har en frekvensbandbredd på omkring en megahertz eller mer. Genom att stabilisera lasern till en extern kavitet är det dock möjligt att få ner bandbredden till under en hertz. Dessa lasrar gör det då möjligt att mäta och låsa till den smala atomövergången hos atomen. Följaktligen kommer denna stabiliserade laser, med sin extremt smala och väldefinierade frekvens, att fungera som den optiska klockan.

De senaste årens utveckling har dominerats av i huvudsak två olika typer av optiska klockor. Båda använder sig av frekvenskammor och ultrastabila mätlasrar, men de baseras på olika typer av atomära system och olika tekniker för att kontrollera dessa.



Figur 4. Illustration av en Paulfälla. En (eller högst ett fåtal) atomer fångas med hjälp av elektriska och magnetiska fält. En jon kan i dessa fållor hållas fångad i princip hur länge som helst och atomens frekvens kan mätas med en väl avstämmd laser.

Jonklockan

Den första, och länge den dominerande typen av optiska klockor, var så kallade jonklockor. Som namnet antyder baseras de på ett system som består av en, eller ett fåtal, laddade atomer som laserkyls och fångas i en jonfälla, se figur 4 för en illustration.

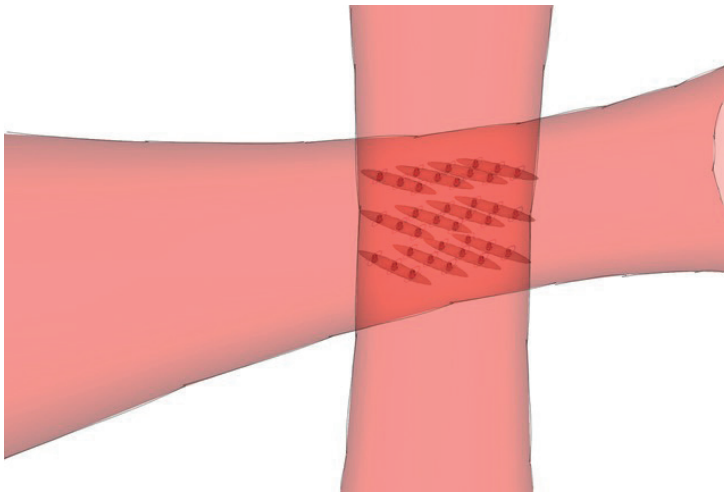
Det finns flera olika typer av jonfällor. Grundidén är att med en kombination av laserkyllning och magnetiska och elektriska fält fånga och kyla enstaka laddade atomer (joner). Med denna teknik är det möjligt att med hög precision mäta en smal atomövergång med en stabiliserad klocklaser. Denna teknik att fånga och manipulera joner innebär också att klockans osäkerhet kan göras mycket okänslig för magnetiska och elektriska bakgrundsfält, samt bakgrundstemperatur, som annars kan skapa stora systematiska och slumpmässiga fel. Jonklockans främsta nackdel är att mätningen endast görs på ett fåtal joner, vilket i sin tur är nödvändigt på grund av en kraftig sinsemellan växelverkan mellan laddade partiklar. Detta leder till att det krävs många mätningar och medelvärdesbildande under en lång tid för att nå upp till den potentiella noggrannheten. Dock tillåter tekniken att samma jon hålls fångad länge (upp till flera månader). Vilket under optimala omständigheter gör det fullt möjligt att köra dessa klockor under lång tid.

Latticeklockan

Den andra typen, den så kallade *latticeklockan*, bygger på att man fångar ett stort antal neutrala atomer i ett periodiskt mönster. Fördelen med att använda neutrala atomer är att de, till skillnad från joner, växelverkar mycket lite med varandra. Detta gör det möjligt att i en relativt liten volym fånga ett stort antal atomer utan att de påverkar varandra. Det fungerar genom att man fångar atomerna i det interferensmönster som skapas då två eller flera laserstrålar med olika riktning sammanfaller. Detta mönster kallas *optical lattice* (på svenska optiskt kristallgitter), se figur 4 för en illustration.

Länge ansåg man att denna teknik var omöjlig att använda för att bygga atomklockor, då laserstrålarna som används för att fånga atomerna också medförde stora fluktuationer i atomernas frekvens från ofrånkomliga variationer i intensiteten hos laserstrålarna. Detta visade sig dock ha en synnerligen elegant lösning. Genom att välja en specifik våglängd på lasrarna, en så kallad ”*magisk våglängd*”, kan effekterna från intensitetsvariationerna ta ut varandra. Följaktligen blir det då möjligt att fånga tusentals atomer på ett sätt som gör att kollisioner mellan atomerna förhindras, och systematiska skift hos atomens energinivåer elimineras.

När man likt metoden med jonfällan undersöker frekvensen hos de fångade atomernas förbjudna övergång kommer det stora



Figur 4. Illustration av en latticeklocka. Med hjälp av två eller flera laserstrålars interferensmönster kan tusentals atomer fångas utan att de nämnvärt växelverkar med varandra. Därefter kan atomernas resonans mätas med en väl avstämd laser.

antalet fångade atomer göra att endast en mätning kan generera ett mycket noggrant värde. Detta gör att den optiska latticeklockan når en mycket hög noggrannhet på kort tid. Dock påverkas latticeklockorna mer av omgivningen än vad jonklockan gör, framförallt från svartkroppsstrålning. För att nå maximal prestanda ställs det därför höga krav på utrustning och kontroll av omgivningen, speciellt temperatur, samt magnetisk och elektrisk avskärmning.

Tillämpningar av atomtid

Såväl jonklockor som latticeklockor har demonstrerat fantastiska resultat med uppskattade relativa osäkerheter kring en del på 10^{18} ; något som innebär att dessa klockor inte går en sekund fel på hela universums livstid(!). Att mäta universums livslängd inom en sekund är såklart fascinerande, men knappast särskilt praktiskt eller relevant. Så vad har dessa atomklockor för användningsområden, och varför har många Nobelpris delats ut till upptäckter relaterat till området genom historien?

Atomtid, redan på de *relativt dåliga* osäkerhetsnivåerna på en del på 10^{12} , har faktiskt direkt revolutionerat vårt moderna samhälle utan att alla har insett det. Den första stora tillämpningen var inom navigation. Vid tidpunkten för utvecklingen av de första atomklockorna var det inte möjligt att förutse utvecklingen av den framtida rymdindustrin.

När satelliterna utrustades med atomklockor var det möjligt att genom noggrann triangulering av tidssignaler bestämma en position mycket noggrant, vilket markerade starten för globala positioneringssystem (GPS m.fl.). Initialt var systemen ämnade exklusivt för militära tillämpningar, men de har kommit att bli en självklar del av det civila samhällets navigation och positionering. Atomklockan och dess betydelse för synkronisering och tidsstämpling av information har också varit kritisk för vår moderna kommunikation. Även om internet kanske skulle varit fullt möjligt utan atomklockor, har till exempel utvecklingen av trådlösa höghastighetsnätverk inte varit tänkbart utan dem.

De optiska klockorna är fortfarande under snabb utveckling och ännu är användande utanför specialiserade laboratorier begränsande. Dessa klockor har likväl redan börjat hitta nya tillämpningar. Kanske lite oväntat, i alla fall för den som inte är bekant med Einsteins allmänna relativitetsteori, är ett potentiellt revolutionerande tillämpningsområde inom höjdmätning. Faktum är

att en noggrannhet på en del på 10^{18} motsvarar en gravitationell höjdskillnad på endast en cm. Detta har direkta tillämpningar och skulle bland annat kunna mäta geopotentiella förändringar från aktiva vulkaner och från jordskorpans kontinuerliga deformation.

Dessutom finns det en rad intressanta förslag, vars detaljer ligger bortom denna artikel, att använda sig av optiska klockor i sökandet efter mörk materia och för att undersöka tidsvariationer i fundamentala konstanter, något som ironiskt nog skulle kunna visa att det nya SI-systemet inte alls är konstant.

En del på 10^{18} innebär också att dessa klockor redan idag potentiellt är mer än två storleksordningar mer noggranna än nuvarande definitionen av sekunden. Så varför fick sekunden inte en ny definition när SI-systemet reformerades?

Svaret på den frågan är att det fortfarande råder oklarheter om vilken av de tänkbara nya definitionerna som är den bästa. De klockor som idag utvecklas och påvisar bäst resultat använder sig av flera olika atomer, bland annat kvicksilver, strontium, och ytterbium, som alla har olika för- och nackdelar. I dagsläget är det helt enkelt långt ifrån klart vilken atom som är bäst lämpad att ersätta cesium. Det enda man kan säga klart är att en ny definition av sekunden kommer, förr eller senare. Hur den kommer se ut får tiden utvisa. ❖

För vidare läsning

- A.D. Ludlow, M.M. Boyd, Jun Ye, E. Peik, P.O. Schmidt, "Optical atomic clocks", *Rev. Mod. Phys.* **87**, 637 (2015)
- F. Riehle, P. Gill, F. Arias, L. Robertsson, "The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures", *Metrologia* **55**, 188 (2018)
- A. Kastberg, "Laserkylning och Bose-Einsteinkondensation", Kosmos 1996, sid. 31
- S. Mannervik, "Förbjudna processer är också viktiga – om atomära metastabila tillstånd", Kosmos 2002, sid 45

