

Mätning av ljushastigheten

Arne Bengtson

"La Conférence Générale des Poids et Mesures" (CGPM) beslöt torsdagen den 20 oktober 1983 kl 15.17 i Paris att en meter skall definieras som följer:

*"Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde."*¹

Samtidigt beslöts att den tidigare definitionen (från 1960) av metern skall utgå. Genom dessa beslut är alltså mätning av ljushastigheten ett avslutat kapitel. Då det emellertid är den senaste utvecklingen som lett fram till en omdefinition av metern, är en historisk återblick befogad.

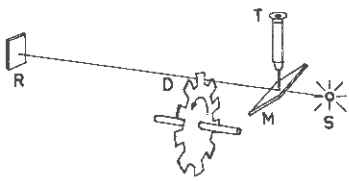
De gamla grekerna lär ha uppfattat ljusets hastighet som oändlig. Deras argument för denna uppfattning var följande. Om man en stjärnklar natt blundar och sedan hastigt öppnar ögonen så ser man stjärnorna omedelbart, "på nolltid", trots att stjärnorna är "oändligt" långt borta. Alltså måste ljusets hastighet vara oändlig. Så småningom uppstod dock tanken att ljuset färdas med ändlig hastighet. Den förste vetenskapsman som föreslagit en metod att mäta ljushastigheten verkar ha varit Galilei. Två personer utrustade med varsin lampa och skärm skulle ställa sig på varsin sida av en dalgång. Den förste skulle dra undan skärmen från sin lampa, den andre göra likadant så fort han såg ljuset och den förste skulle notera tiden från det han dragit undan skärmen till dess han fick syn på kollegans lampa. Det är inte känt om experimentet genomfördes, men det var naturligtvis dömt att misslyckas. I princip var dock Galileis idé sund, och den understryker hans storhet som vetenskapsman.

I och med fysikens utveckling under 1800- och 1900-talet har ljushastigheten i vakuum, c_0 , kommit att framstå som den viktigaste och mest fundamentala naturkonstanten. Den oerhörda forskarmöda som lagts ned på att mäta c_0 med allt högre noggrannhet kan ses mot bakgrund av detta

¹ Sv översättning: "Metern är den vägsträcka som ljuset tillryggaläger i tomrummet på 1/299 729 458 s."

Galileo Galilei, 1564–1642 italiensk fysiker och astronom

Innehåll	
Tidiga mätningar	118
Ljushastigheten – en universell konstant	118
Elektronikens intåg	119
Mätningar med radiovågor	120
Laserteknik	121



Figur 1 Enkel principskiss av Fizeaus apparatur för bestämning av c_0 . I praktiken måste spegeln R placeras flera kilometer från teleskopet. Mät-noggrannheten begränsas ytterst av osäkerheten i avståndet MR.

Ole Römer, 1644–1710 dansk astro-nom

Hippolyte Louis Fizeau, 1819–1896 fransk fysiker

Leon Foucault, 1819–1868 fransk fy-siker

Thomas Young, 1773–1829 engelsk fysiker

faktum. Den korta historik som presenteras i denna artikel gör inga som helst anspråk på fullständighet, då huvudsyftet är att presentera den senaste utvecklingen. Den intres-serade läsaren hänvisas till boken av K D Froome för vidare studier.

Tidiga mätningar

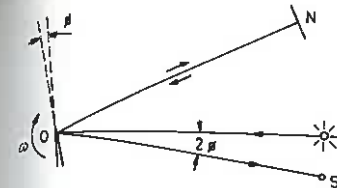
Den första kända någorlunda korrekta mätningen av c_0 gjordes av den danske astronomen Römer år 1675. Han studerade förmörkelserna av en av Jupiters månar och upptäckte en förskjutning i tidsschemat på 16.5 minuter beroende på om jorden och Jupiter befann sig på samma respektive motsatt sida av solen. Differensen är den tid det tar för ljuset att passera jordbanans diameter och Römer uppskattade därur c_0 till 214 000 000 m/s. Ungefär 50 år senare gjorde den engelske astronomen Bradley en ny uppskattning baserad på avlägsna stjärnors skenbara positionsförändringar fram och tillbaka under årets gång. Hans värde blev $c_0 = 301\,000\,000$ m/s, ett mycket rimligt resultat.

I mitten av 1800-talet gjorde två fransmän var för sig genialiska experiment som möjliggjorde mätning av c_0 på jorden. Fizeaus apparat baserades på ett snabbroterande hjul med tandad ytterkant (se fig 1). Ljus passerar periodiskt genom öppningarna, reflekteras mot spegeln R tillbaks mot hjulet och observeras i ett teleskop. Om hjulet roterar tillräckligt snabbt kommer varje ljuspuls att blockeras av en tand då den efter reflexion kommer åter till hjulet. Ljuset försvinner i teleskopet. Om man ökar rotationshastigheten ytterligare kommer ljuset åter, hjulet har då roterat ett hack under den tid det tar för ljuset att färdas fram och åter mot spegeln. Ur avståndet till spegeln och hjulets rotationshastighet kan c_0 beräknas. Fizeau erhöll vid upprepede experiment värden omkring 315 000 000 m/s.

Fizeaus landsman Foucault utvecklade en metod som är principiellt något annorlunda än Fizeaus, se fig 2. Ljus från S reflekteras mot spegeln M, därefter mot N och åter via M mot S. Om spegeln roteras med hög hastighet kommer den att ha vridits en mätbar vinkel under tiden ljuset rör sig sträckan MNM. I ett mätteleskop ser man att bilden av ljuskällan S förflyttats till S_1 . Ur sträckornas längd och spegelns rotationshastighet kan c_0 beräknas. Olika varianter av Foucaults och Fizeaus metoder har använts långt in på 1900-talet för att bestämma c_0 .

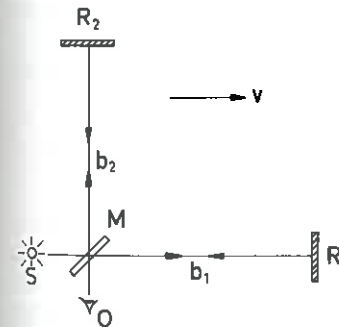
Ljushastigheten – en universell konstant

Redan i början på 1800-talet visade Thomas Young att ljus är ett vågfenomen. Då man ansåg att vågor kräver ett medium att fortplanta sig i, antogs tomrummet vara fyllt av en substans som kallades eter. Då jorden rör sig med avsevärd hastighet genom kosmos borde en fartvind, den



Figur 2 Principen för Foucaults metod för bestämning av c_0 . En fördel med denna metod är att hela apparaturen får plats i ett ordinarie rum. Det innebär att ljushastigheten i olika vätskor och fasta material kan mätas.

Albert A Michelson, 1852–1931 amerikansk fysiker. Nobelpriset i fysik 1907



Figur 3 Michelsons interferometer. Med denna lika enkla som genialiska konstruktion bevisade Michelson och Moreley att eter vinden inte existerar. Instrument av den här typen har fått stor användning inom andra områden, t ex Fourier-spektroskopi och bestämning av gasers brytnings-index.

sk eter vinden, kunna uppmätas. I ett berömt experiment från 1881 visade Michelson och Morley att någon sådan eter vind inte existerade. Deras resultat var vägledande för Einstein då han formulerade den speciella relativitetsteorin år 1905. Enligt Einstein existerar ingen eter – ljushastigheten i vakuum är en universell konstant, lika för alla observatörer oavsett deras rörelse i förhållande till ljuskällan. Denna tes är numera ett allmänt accepterat faktum och är viktigt att hålla i minnet för att förstå den betydelse som tillägs c_0 som fysikalisk konstant.

Eter vinden och Michelson – Morleys experiment

Om ljusvågorna fortplantar sig med en bestämd hastighet relativt ett stillastående eterhav, och jorden rör sig med tusentals m/s genom detta hav, så uppstår mätbara effekter. För att påvisa detta konstruerades den sk Michelson-interferometern, se fig 3. Ljus från ljuskällan S delas upp i två vinkelräta strålar av den halvgenomsnittliga spegeln M. Strålarna reflekteras tillbaka av speglarna R_1 och R_2 som befinner sig på samma avstånd l_0 från M. Strålarna sammanfaller och bildar ett interferensmonster vid observatören O. Antag att hela systemet rör sig med hastigheten v genom eter längs strålriktningen b_1 , och att ljushastigheten relativt eter är c_0 . Om t_1 och t_2 är tiderna det tar för ljusstrålen b_1 resp b_2 att färdas sträckan $2l_0$, finner man efter vektoraddition:

$$t_1 = \frac{2l_0}{c_0}$$

$$t_2 = \frac{2l_0}{\sqrt{c_0^2 - v^2}}$$

Strålen som rör sig vinkelrätt mot eter vinden går alltså något långsammare.

I experimentet vreds hela interferometern med ljuskälla och observatör runt, så att ljusstrålarnas riktningar relativt eter vinden ändrades. Om eter teorin stämmer borde då observatören O kunna se en förskjutning i interferensmonstret. Michelsons apparat var tillräckligt känslig för att upptäcka en bråkdel av den väntade eter vinden, men ingen effekt kunde ses.

Förutom det epokgörande experimentet med interferometern mätte Michelson c_0 ett flertal gånger med Foucaults metod.

Elektronikens intåg

De mätmetoder som hittills diskuterats, baserade på optik och mekanik, kan inte ge ett värde på c_0 med någon större grad av noggrannhet. Då ljuset hinner färdas 7,5 varv runt jorden på en enda sekund, inser man lätt svårigheterna att få speglar och hjul att rotera så snabbt att det överhuvudtaget uppstår en mätbar effekt.

År 1928 togs ett stort steg framåt då Karolus och Mittelstaedt utnyttjade en elektro-optisk slutare för första gången. De använde sig av en Kerr-cell i ett experiment liknande Fizeaus men med en modulationsfrekvens (svarande mot hjulets rotationshastighet) som var flera tiopotenser högre. Mätningar av c_0 med denna teknik har fortsatt till åtminstone 1950-talet, och det arbete som gjordes av svensken Bergstrand 1949–1957 stod på sin tid i särklass.

The work of Bergstrand (at the Geographical Survey Office, Stockholm) is outstanding amongst the optical determinations of the velocity of light. With great ingenuity he improved the Kerr cell method of Hüttel to the standard required of a commercial geodetic measuring instrument which is now manufactured by AGA of Sweden under the trade name of "Geodimeter"
K D Froome

Bergstrand, som arbetade på kartverkets geodetiska avdelning, utvecklade tillsammans med AGA den sk Geodimeter. Detta är en optisk avståndsmätare utrustad med en Kerr-cell som arbetar vid 30 MHz. Dagens geodimeter har en HeNe laser som ljuskälla, och den angivna mät noggrannheten är 5 mm på avstånd mindre än 1 km (Kosmos 1978, Idrottsmätningar).

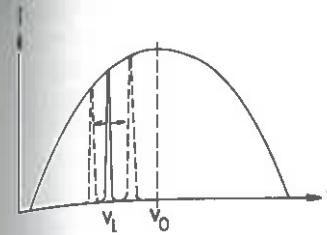
Mätningar med radiovågor

Då radiotekniken började utvecklas föddes en ny möjlighet att bestämma c_0 . Ur sambandet $c_0 = v \cdot \lambda_0$ där v är strålningens frekvens och λ_0 är dess våglängd i vakuum, inses att man genom mätning av radiovågors frekvens och våglängd kan bestämma c_0 . Redan 1923 genomförde Mercier en sådan mätning. På sätt och vis är en frekvensvåglängdmätning den mest fundamentala, eftersom den ansluter direkt till grundenheterna för tid och längd. Utvecklingen av stabila radiofrekvensoscillatorer innebar att man på 1950-talet överträffade de optiska mätmetoderna i noggrannhet. K D Froome genomförde 1958 en mätning på radiovågor vid 72 GHz eller 4 mm. Hans resultat blev $c_0 = (299792,50 \pm 0,10) \text{ km s}^{-1}$, ett värde som stod sig fram till 1973 som det av internationella organisationer rekommenderade värdet.

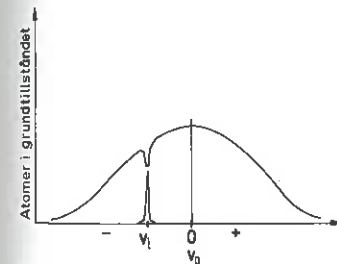
Vad är det då för faktorer som begränsar noggrannheten i en mätning av c_0 ? Det är väsentligen två, nämligen

- 1) oscillatorns stabilitet och
- 2) mätningen av våglängden.

I radiofrekvensområdet utgör punkt 1) inget problem och onoggrannheten i Froomes mätning kan helt tillskrivas våglängden. Den relativa onoggrannheten är $3 \cdot 10^{-7}$, vilket är två storleksordningar sämre än den gamla meterdefinitionen, den sk kryptonstandard. Denna standard är baserad på en optisk våglängd från kryptonatomen, varför en noggrannare våglängdsmätning kan utföras i den synliga delen av elektromagnetiska spektrum. Det stora tekniska problemet med att realisera en sådan mätning är att absolutmätta frekvenser i området 100–1000 THz, och det är först med sjuttioalets laserteknik som detta blivit möjligt.



Figur 4 Laserns förstärkningsprofil. Den breda kurvan är väsentligen Dopplerprofilen för den spektrallinje som alstrar laserljuset. Den smala toppen illustrerar den skarpt definierade frekvens som lasern avger i ett visst ögonblick.



Figur 5 Laserspektroskopisten eliminerar Dopplerbreddningen genom mättnadsabsorption. Den breda kurvan anger antalet atomer som funktion av hastigheten längs en godtycklig axel (Dopplerprofilen). En frekvensskarp laser som belyser atomerna längs denna axel "träffar" endast den hastighetsgrupp av atomer som befinner sig i resonans med laserfrekvensen. För dessa atomer mättnadsabsorptionen, lasern har "bränt ett hål" i Dopplerprofilen.

Laserteknik

I och med laserns intåg i laboratorier fick fysikerna tillgång till en oscillator i det optiska spektralområdet med en relativ stabilitet som kunde jämföras med en mikroavvägsgenerator. De noggrannaste mätningarna av c_0 har genomförts genom mätning av våglängd och frekvens av laserstrålning. Här följer ett försök att beskriva tekniken bakom en sådan mätning.

En laser som avger kontinuerligt ljus har i varje ögonblick en mycket skarpt definierad frekvens men frekvensen driver något pga att den optiska resonatorns längd (avståndet mellan laserns ändspeglar) inte kan göras helt stabil. Stabiliteten kan förbättras genom att "läsa" lasern på en molekylär spektrallinje. Frekvenslösningen bygger på det faktum att lasern kan avstämmas inom den sk förstärkningsprofilen genom att variera resonatorns längd, se fig 4. Den längdförändring som krävs är mycket liten ($< 1 \mu\text{m}$) och åstadkommes med en piezoelektrisk kristall. En cell med absorberande molekylänga placeras inne i resonatorn, varvid laserns uteffekt minskar. Molekylerna absorberar egentligen vid skarpt definierade resonansfrekvenser, men dessa är maskerade av den sk Dopplerbreddningen pga molekylernas värmerörelse. Om laserfrekvensen avstämms så att den *exakt* sammanfaller med en molekylär resonansfrekvens fås en liten förhöjning av uteffekten pga mättnadsabsorption (Kosmos 1977, Laserspektroskopi).

Mättnadsabsorption (saturated absorption)

Då en gas av atomer (eller molekyler) träffas av en ljusstråle, vars våglängd är i resonans med en tillåten energiovergång i atomerna, absorberas en del av ljuset. Graden av absorption är för lägre ljusintensiteter direkt proportionell mot intensiteten. I varje ögonblick befinner sig endast en liten bråkdel av atomerna i det övre energitillståndet, då detta snabbt "avfolkas" genom spontan emission. Om ljusstrålen är tillräckligt intensiv för att hålla en avsevärd population i det övre (exciterade) tillståndet börjar absorptionsprocessen få konkurrens av stimulerad emission. Absorptionsökningen avtar och för mycket höga intensiteter fås en jämvikt då förhållandet mellan atomer i det lägre resp övre energitillståndet är 1:1. Någon ytterligare absorption kan då inte ske, man säger att övergången är mättad. Detta fenomen utnyttjas på ett finurligt sätt för att få mycket hög upplösning i optiska spektra. En laser med mycket skarpt definierad våglängd får belysa en gas av atomer. Absorptionslinjen är breddad pga atomernas oordnade värmerörelse till en sk Dopplerprofil, se fig 5. Den frekvensskarpa lasern är endast i resonans med en del av atomerna under Dopplerprofilen. I denna hastighetsgrupp är övergången mättad, man säger att lasern bränner ett hål i Dopplerprofilen. Om en andra laserstråle sveps över Dopplerprofilen kommer transmissionsen att öka då "hålet" träffas. I praktiken används oftast en laser, vars ljus delas upp i två strålar som genomkorsar provet i motsatta riktningar. De två strålarna växelverkar samtidigt endast med atomer som står stilla relativt strålarna, alltså mitten på Dopplerprofilen. Den upplösning som kan erhållas begränsas endast av den sk naturliga linjebredd. För t ex I_2 -molekyler kan man upplösa spektrallinjer med en bredd av $< 1 \text{ MHz}$ eller 10^{-6} nm . Som jämförelse kan nämnas att med vanliga ljuskällor och högupplösande spektrometrar kan man i bästa fall upplösa ca 1000 MHz eller 10^{-3} nm .

För utveckling av laserspektroskopiska metoder, bl a mättnadsabsorption, belönades A. Schawlow (Stanford, USA) med nobelpriset i fysik 1981.

Om laserfrekvensen sveps samtidigt som uteffekten registreras fås alltså en skarp topp för varje molekylär resonanslinje. Dessa toppar, som inte längre maskeras av Dopplerbreddningen, är typiskt ca 0,5 MHz breda. För tex HeNe-lasern (6328 Å) kan detta omvandlas till $6 \cdot 10^{-6}$ Å, ca 1000 ggr skarpare än upplösningsförmågan för en god optisk spektrometer. Lasern kan nu låsas fast på en av molekylresonanserna med en teknik som kallas fastlåsning. En liten modulation (periodisk variation) av laserfrekvensen åstadkommes med piezokristallen. Modulationen syns som en variation av intensiteten, och denna signal registreras av en sk lock-in förstärkare. Förstärkaren kan via en återkoppling till piezokristallen stabilisera lasern mitt på molekylresonansen. Laserfrekvensens resterande oskärpa blir mindre än resonansens bredd, och vissa stabiliserade lasrar når en relativ frekvensstabilitet på $< 10^{-10}$. Detta kan jämföras med en vanlig HeNe-laser för undervisning, vars frekvensstabilitet är ca 10^{-6} .

För att absolutmätta laserljusets våglängd kan man relativt enkelt göra en direkt jämförelse med den nuvarande längdstandarden, spektrallinjen vid 6058 Å från ^{86}Kr . Laserljus och ljus från spektrallampan får belysa en högupplösande Fabry-Pérot interferometer. En sådan interferometer består av ett rör (av tex kvartsglas eller invar) med motstående speglar i ändarna. Speglarna är justerade så att ljus kan reflekteras fram och tillbaka längs samma axel upprepade gånger. Ljusvågorna interfererar med varandra på liknande sätt som ljudvågor i en orgelpipa, och endast ljus av bestämda våglängder passerar interferometern utan att dämpas. Genom att använda speglar med hög reflektans ($R > 99,9\%$) blir dessa våglängder mycket väldefinierade.

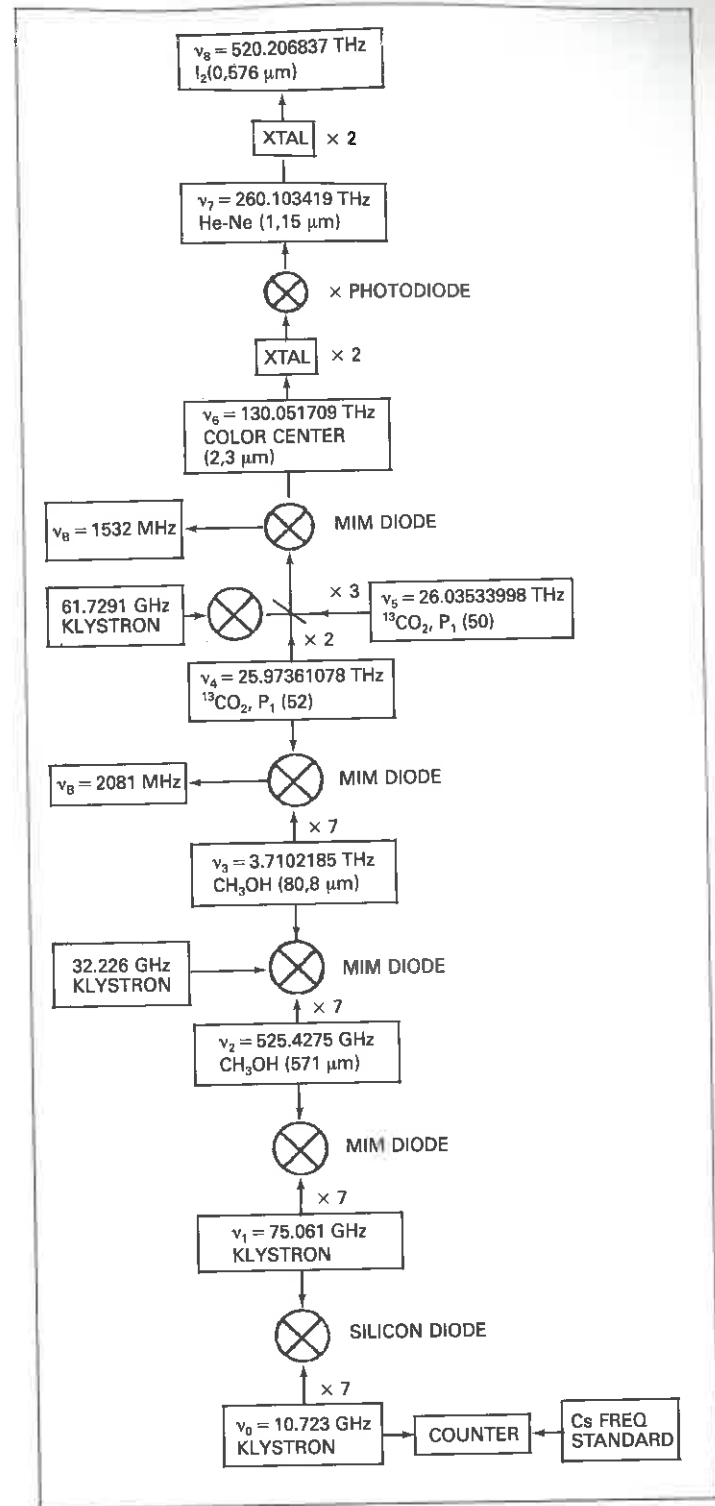
Antag att laservåglängden är λ_1 och kryptonvåglängden är λ_{ref} . Låt oss vidare anta att för avståndet l_0 mellan interferometerens speglar sammanfaller interferensmaxima för λ_1 och λ_{ref} . För en *konfokal* Fabry-Pérot interferometer gäller nu sambanden

$$l_0 = n_1 \cdot \frac{\lambda_1}{4} \text{ och } l_0 = n_{\text{ref}} \cdot \frac{\lambda_{\text{ref}}}{4}$$

där n_1 är n_{ref} är heltal som kallas *ordningar*. Det följer att

$$\lambda_1 = \frac{n_{\text{ref}}}{n_1} \cdot \lambda_{\text{ref}}$$

Genom ett speciellt kalibreringsförfarande är det möjligt att exakt fastställa i vilka ordningar, n_1 resp n_{ref} , som dessa interferensmaxima inträffar. Den lilla korrektion som i praktiken måste göras pga att interferenserna inte sammanfaller exakt påverkar inte mätnoggrannheten. Det är i absolutbestämningen av λ_1 som problemet med meterdefinitionen kommer in. Då laserns relativa frekvensstabi-



Figur 6 Exempel på en frekvenskedja från cesiumklockan (mikrovågor) till en frekvensfördubblad HeNe-laser (gult ljus). Vissa oscillatorer i kedjan kan numera användas som sk sekundär standard i mätningar där man önskar absolutbestämma höga frekvenser.



Metern

Det var en gång, som alla minns, när metern var en meter. Tung vilade dess stav nästan bland andra absoluta. Nu är den ljuset från en lins i en förtunnad eter, en strimma ljus av sällsam glans som likt en klinga skjuter igenom tomrummets provins. Och fast den nästan inte finns är meter vad den heter.

KAJENN

(Dagsvers från Sv. D. 83 10 07. Författare: Caj Lundgren. Tecknare: Fibben Hald)

NBS = National Bureau of Standards

CCDM = Comité Consultatif pour la Définition du Mètre

litet är 10^{-10} , kan i princip λ_1 mätas med samma noggrannhet. Kryptonstandarden i sig har dock en relativ onoggrannhet på $3 \cdot 10^{-9}$ beroende på spektrallinjens ändliga bredd och den tekniskt betingade reproducerbarheten.

En absolutbestämning av den stabiliserade laserns frekvens måste naturligtvis baseras på vår tidsstandard, den sk cesiumklockan (Kosmos 1978, Från urtid till atomtid). Cesiumklockan är en mikrovågsoscillator stabiliserad på en resonansfrekvens i cesiumatomen. Den relativa onoggrannheten är 10^{-13} vilket gör sekunden till den bäst definierade grundenheten. Om två cesiumklockor synkroniserades i dag skulle de efter 1 000 år fortfarande visa samma tid inom ca 1 ms.

Cesiumklockans frekvens är 9,3 GHz och steget till 500 THz (rött ljus) är långt. Tekniken som används vid absolutmätning av höga frekvenser är att man bygger upp en sk frekvenskedja, se fig 6. I en sådan kedja börjar man med cesiumnormalen och går uppåt mot oscillatorer med allt högre frekvenser. Strålning av känd frekvens ν_0 får belysa någon icke linjär komponent som genererar en högre överton $n \cdot \nu_0$. Övertonen subtraheras från en närliggande okänd frekvens ν genom att blandas med denna varvid svävfrequensen $\nu_B = \nu - n \cdot \nu_0$ bildas. Svävfrequensen är vanligen en direkt mätbar radiofrekvens. Moderna elektroniska räknare klarar upp till 500 MHz med hög noggrannhet. Som bekant är ingen kedja starkare än dess svagaste länk, och alla ingående oscillatorer måste vara låsta på en atomär eller molekylär resonans, med en relativ onoggrannhet $< 10^{-10}$.

På NBS i Boulder lyckades det K M Evenson mfl år 1972 att absolutmäta frekvensen för en infraröd HeNe laser, stabiliserad på en CH_4 -linje. Deras resultat blev (CH_4) = (88376181627 ± 50) kHz med den relativa onoggrannheten $5 \cdot 10^{-10}$. I och med denna mätning nåddes kryptonstandarden som begränsning för bestämning av c_0 . Det blev därmed möjligt för CCDM att rekommendera värdet $c_0 = 299792458$ m/s exakt, utan att riskera någon framtida revision av längdskalan. Sedan 1972 har absolutmätningar av laserfrekvenser upp till 520 THz genomförts och värdet på c_0 har bekräftats i ett flertal oberoende mätningar.

Rent experimentellt kan man säga, att det är förhållandevis enkelt och billigt att skaffa sig ett stabiliserat lasersystem och en högupplösande interferometer för absolutmätning av våglängder. Forskningsgrupper världen över kan alltså skaffa sig en utomordentlig meterstandard för precisionsmätningar. Med frekvenskedjan i fig 6 förhåller det sig annorlunda. Det är ett otroligt komplicerat system som upptar en mindre fabriksfabrik och tar åratals tid att bygga upp.

Fastställandet av ljushastigheten till ett exakt värde kan sägas innebära slutpunkten för ett forskningsarbete som pågått i över 300 år. Ur estetisk synpunkt är det också

Tabell. Ljushastigheten i vakuum 1676–1973

År	Författare	Metod	Resultat [m/s]	Felgränser [m/s]
1676	Römer	Jupiters månar	214 000 000	
1726	Bradley	Stjärnors aberration	301 000 000	
1849	Fizeau	Tandat hjul	315 000 000	
1862	Foucault	Roterande spegel	298 000 000	$\pm 500\,000$
1882	Michelson	Roterande spegel	298 853 000	$\pm 60\,000$
1908	Perrotin & Prim	Tandat hjul	299 901 000	$\pm 84\,000$
1923	Mercier	Radiovågor	299 795 000	$\pm 30\,000$
1926	Michelson	Roterande spegel	299 796 000	$\pm 4\,000$
1928	Michelson & Mittelstaedt	Kerrcell	299 778 000	$\pm 20\,000$
1940	Hüttel	Kerrcell	299 768 000	$\pm 10\,000$
1949	Bergstrand	Kerrcell (Geodimeter)	299 796 000	$\pm 2\,000$
1951	Bergstrand	Kerrcell	299 793 140	± 420
1957	Bergstrand	Kerrcell	299 792 850	± 160
1958	Froome	Radiovågor	299 792 500	± 100
1972	Evenson	HeNe/ CH_4 laser	299 792 457.4	± 1.1
1973	BIPM	Rek värde	299 792 458	

tillfredsställande att en fundamental naturkonstant har kunnat tillordnas ett exakt numeriskt värde som inte längre behöver verifieras experimentellt.

Litteratur

- E Bergstrand, Kosmos Bd 27 (16) 1949, "Om ljushastighet och avståndsmätning".
K D Froome, L Essen, Academic Press (New York) 1969, "The velocity of light and radio waves."



ARNE BENGTON föddes i Sundsvall 1950. Han kom till Uppsala universitet 1970 och disputerade år 1979 på en avhandling om laserspektroskopi vid snabba jonstrålar. Under 1980–81 arbetade han som gästforskare i Heidelberg på ett laserspektroskopi projekt. År 1981 anställdes han på Institutet för Metallforskning i Stockholm där han arbetar med utveckling av spektrokemiska analysmetoder.