

Mats Larsson

är professor i fysik vid Stockholms universitet och föreståndare för AlbaNova Universitetscentrum i Stockholm, vilket är en gemensam centrumbildning för Kungl. Tekniska Högskolan och Stockholms universitet. Han är ledamot av Kungl. Vetenskapsakademien och dess Nobelkommitté för fysik. Hans forskningsintressen är astrokemi och molekylär kiralitet.

Vi har bett Mats Larsson ta upp stafettpippen efter Sten von Friesen när det gäller en Kosmostradition som påbörjades redan 1936. Vi får en lägesrapport om värdena på några av de viktigaste naturkonstanterna och en fundering över vilken konstant som är mest fundamental.

Bilden: Sten von Friesen multiplicerar romerska siffror i "Fråga Lund" 1962. Lär vidare på sid 159.

Om värdena på c , e/m , e och h . III

Den första delen av rubriken erbjuder inga svårigheter för en som är fysikintresserad. Ljushastigheten c , kvoten mellan elektronens laddning och massa (specifika elektronladdningen), e/m , elektronens laddning e och Plancks konstant h , är alla fundamentala fysikaliska konstanter. Men var kommer den romerska trean in i bilden?

Sten von Friesen (1907-1996) disputerade i Uppsala år 1935 på en avhandling om precisionsmätningar av elektronens laddning och Plancks konstant. Det var alltså logiskt att han fick uppdraget som nybliven doktor att skriva en artikel i Kosmos 1936, med den rubricerade titeln [1]. År 1987, alltså drygt 50 år efter sin första artikel, bidrog von Friesen med en artikel i Kosmos med samma titel, åtföljt av en romersk tvåa [2]. Det känns naturligtvis hedersamt att få följa upp dessa två artiklar med en tredje.

Det kan inom parentes nämnas att Sten von Friesen blev en av "de lärde i Lund" i den svenska televisionens barndom i början av 1960-talet. Programmen finns enkelt tillgängliga på SVT:s "Öppet arkiv" (se vinjettbilden samt sid 159).

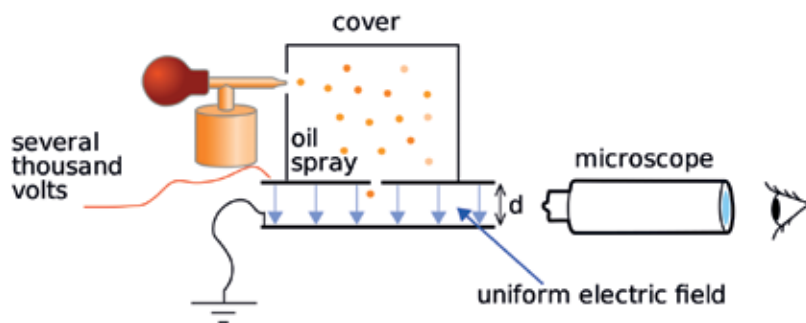


Sten von Friesen i "de lärde i Lund". Bild från Sveriges Television

Artikeln från 1936

Artikeln 1936 är av stort historiskt intresse. Eftersom den finns lätt tillgänglig i digitaliserad form, så tar jag bara upp två saker här.

Den första precisionsmätningen av elektronens laddning genomfördes av Robert Millikan 1913, som med oljedroppsmetoden



Figur 1. Millikans experiment med elektriskt laddade oljedroppar. Oljedropparna kunde bringas att sväva fritt genom att balansera gravitationskraften med det elektriska fältet, eller att falla med en hastighet som reglerades med det elektriska fältet. Eftersom oljedropparna rör sig genom luft, inser man lätt att luftens friktionskoefficient (viskositeten) spelar en viktig roll. (Bild från Wikimedia commons – <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14695366>.)

(se figur 1) erhöll värdet $4,774 \times 10^{-10}$ e.s.e. (elektrostatisk enhet i cgs-systemet). En ny mätning av Millikan fyra år senare gav samma värde, men något mindre felgränser: $e = 4,774 \pm 0,005 \times 10^{-10}$ e.s.e. Sten von Friesen konstaterar att denna sifferkombination kom att under många år vara fysikens mest kända.

Det var emellertid inte bara precisionsbestämningen av laddningen som bedömdes viktig, utan också det faktum att Millikan kunde visa att värdet inte var ett statistiskt medelvärde av olika laddningar, utan laddningen för en enskild elektron. Francis Aston (Nobelpris i kemi 1922) hade visat att atommassor som varit välkända i många år, i själva verket utgjorde medelatommassan för blandningen av de förekommande isotoperna av ett grundämne. Det var alltså naturligt att fysikerna undrade om detsamma gällde för elektronen, men så var alltså inte fallet. I en utredning från 1923 för Nobelkommitténs räkning, skriven av Manne Siegbahn (Nobelpris i fysik 1924 och von Friesens handledare), konstaterade denne att ”Det ovederläggliga beviset för den atomistiska strukturen fordrade möjligheten att uppmäta laddningen hos en enda elektron i sänder, och konstaterandet, att denna laddning alltid är oföränderligt densamma.” Millikans precisionsmätning av elektrens laddning bedömdes så viktig, att han belönades med 1923 års Nobelpris i fysik.

Det är därför lätt att förstå att det måste varit en utmanande situation för von Friesens mentor Erik Bäcklin, när denne 15

år senare genom röntgenspektroskopiska undersökningar i Uppsala kom fram till ett värde som uppvisade en påtaglig avvikelse ($4,793 \pm 0,015$ e.s.e) från Millikans berömda värde. Detta omnämns i artikeln 1987, men varifrån det systematiska felet emanerade förklaras inte. Det framgår inte heller i den Kosmosartikel Erik Bäcklin själv skrev i ämnet 1930 [3], eftersom man då fortfarande inte kände till anledningen till diskrepansen. Sex år senare hade situationen klarnat [1]. Det visade sig att Millikan använt ett för lågt värde på luftens friktionskoefficient, och när man använde resultatet från nyare mätningar som gav högre värden, höjdes Millikans e -värde med 1 %. Som vi ska se senare, så har värdet aldrig senare sjunkit tillbaks till 4,774.

von Frisen konstaterade att trots olika sätt att mäta Plancks konstant h , så var detta den minst noggrant kända konstanten av de fyra. Han avslutar artikeln med att referera till en hypotes av den mycket kände brittiske astrofysikern Arthur Eddington, nämligen att det inverterade värdet av den dimensionslösa finstrukturkonstanten (i cgs-systemet) $\alpha = 2\pi e^2/hc$ är exakt 137. von Friesen konstaterar, att den uppsättning värden för c , h och e han anger, ger $\alpha^{-1} = 136,9$, ”och sålunda inom felgränserna stämmer med det teoretiska värdet”.

Eddington nominerades till Nobelpriset i fysik 1944 för sin ”teoretiska upptäckt” av finstrukturkonstantens exakta värde. I mars 1944 skrev Carl Wilhelm Oseen, ledamot av Nobelkommittén för fysik, en utredning om Eddington. Oseens omdöme var inte nådigt: ”Eddingtons atomfysiska forskning vilar på ett missförstånd av den teoretiska fysikens uppgift”, följt av en bestämd avrådan från att prisbelöna Eddington.

Märkligt nog avled såväl Oseen som Eddington i november 1944 inom loppet av två veckor, och därmed gick också ”teorin” om finstrukturkonstantens exakta värde i graven.

Artikeln från 1987

Uppföljningsartikeln uppehåller sig vid situationen 1936 och de olika metoder som då användes för att bestämma de fysikaliska konstanterna. De två sista sidorna i artikeln beskriver utvecklingen under perioden 1936-1987. von Friesen kommer endast kortfattat in på de viktiga effekter som gav helt nya möjligheter att förbättra precisionen i samstämda system av konstanter. Detta var något delvis nytt och ett resultat av genombrott inom fundamental fysik.

Noterbart är att von Friesens artikel publicerades bara något år efter att ljushastigheten fått ett definierat, exakt värde: 299 792 458 m/s. Detta innebar ett trendbrott i och med att en fundamental konstant låstes fast vid ett värde för all framtid.

Utvecklingen efter 1987

Fyra upptäckter inom fundamental fysik, alla med en sådan vetenskaplig höjd att de kom att belönas med Nobelpris i fysik, har i stor utsträckning bidragit till att precisionen i mätningar av de fyra konstanterna c , m , e och h kunnat ökas väsentligt. Kvoten e/m , benämnd elektronens specifika laddning, är en historisk kvarleva från den tiden man extraherade hastigheten hos en elektron ur relationen $eV = mv^2/2$, där V är den elektriska spänning som accelererar elektronerna. Man får alltså $e/m = v^2/2V$.

Lasern

Det första genombrottet gällde upptäckten av laser-maserprincipen, som gjorde att man kunde konstruera ljuskällor i det optiska området med samma förnämliga egenskaper som radiovågor. Lasern är en ljuskälla med egenskaper som hög intensitet, koherens, frekvensskärpa och riktningsegenskaper. År 1964 belönades Charles Townes, Nikolaj Basov och Alexander Prokhorov med Nobelpriset i fysik för sina insatser. Som en kuriositet kan nämnas att lasern fick ett stort genomslag hos den breda allmänheten samma år. Den tredje James-Bond-filmen *Goldfinger* hade premiär bara någon vecka innan Nobelkommittén för fysik beslutade att prisbelöna laserprincipen. I *Goldfinger* har Auric Goldfinger skaffat sig en laser som kan skära genom metall, och även James Bond, som dock lyckas bluffa sig ur den prekära situationen. När Goldfinger beskriver lasern är det nästan ord för ord hur en laser beskrivs i den allra första populärvetenskapliga laserartikeln, skriven av Arthur Schawlow [4]: ”It can project a spot on the moon”.

Fysikerna fick nu tillgång till en oscillator i det optiska området med samma stabilitet som i mikrovågsområdet, och genom att mäta både frekvens och våglängd fick man fram ett noggrant värde för c genom relationen $c = f \lambda$, där f är frekvensen och λ våglängden. Mätningarna av f för en spektrallinje i rött blev så noggranna att det blev standarden för våglängdsbestämningen som kom att sätta gränsen för hur noggrant c kunde mätas (se Kosmosartikel 1984 av Arne Bengtsson [5]). Enligt den dåvarande definitionen

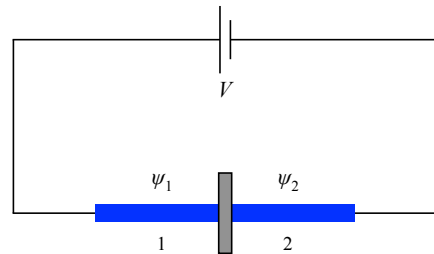
av enheten meter, var en meter ett visst antal våglängder av en spektrallinje i ädelgasen krypton. Istället för att försöka pressa precisionen i våglängd ytterligare, valde man att istället fixera c för all framtid. Vid den 17:e Allmänna konferensen för mått och vikt år 1983 bestämdes att ”en meter är längden av den sträcka som ljuset tillryggalägger i fria rymden på $1/299\,792\,458$ sekunder” (se också Martin Zelans bidrag i denna upplaga). Åtminstone för mig blev sifferkombinationen $299\,792\,458$ lika inarbetad som 4.774 för en tidigare generation fysiker.

Josephson-effekten

Den 1 juli 1962 publicerade den blott 22 år gamle Brian Josephson, fortfarande doktorand, en artikel i *Physics Letters* med titeln ”Possible effects in superconducting tunnelling”. Elva år senare belönades Josephson med Nobelpriset i fysik för denna artikel med motiveringen ”för hans teoretiska förutsägelser av egenskaperna hos en supraström genom en tunnelbarriär, särskilt de fenomen vilka allmänt benämns Josephson-effekterna”.

Tunnling är ett rent kvantmekaniskt fenomen, som saknar analogi i den klassiska fysiken. Tunneleffekten upptäcktes 1926 av Friedrich Hund redan i den nya kvantmekanikens barndom. Vad Josephson upptäckte teoretiskt var att tunnling kan förekomma mellan två supraledare separerade av ett tunt isolatorskikt [6]. Josephson-övergångar som den i figur 2 är högaktuella idag, efter-

Figur 2. Två supraledare separerade med ett tunt (ca 1 nm) isolatorskikt. I en supraledare är elektronerna parvis kopplade till Cooperpar och alla paren är starkt korrelerade, så att de rör sig i fas med varandra, beskrivet med vågfunktionerna ψ_1 och ψ_2 . När isolatorskiktet är tillräckligt tunt kopplas vågfunktionerna för de två supraledarna



samman, och faserna för de två vågfunktionerna låses fast. Cooperpar kan tunnla genom barriären, och man får en tunnelström som är en periodisk funktion av fasskillnaden. Om fasskillnaden inte är noll, kan en likström drivas utan spänningsfall. Läger man en spänning V över isolatorn, fås en växelspanning med frekvensen $f = 2eV/h$. Uttrycket är exakt och oberoende av valet av supraledare. Figuren visar alltså ett exempel på ett makroskopiskt kvantsystem, där varje supraledare kanske innehåller 10^{22} elektroner/cm³, men ändå medger mätning av laddningen för en enda elektron.

som supraledande kvantbitar är den kanske ledande kandidaten som plattform för en framtida kvantdator. Men det är inte om det denna artikel handlar, utan om fundamentala konstanter. Relationen som ges i texten till figur 2 är alltså

$$f = \frac{2eV}{h}, \quad (1)$$

där f är växelströmmens frekvens och V den pålagda spänningen. Mätning av dessa två storheter ger direkt e/h . Uttrycket för frekvensen f är exakt och helt oberoende av den exakta utformningen av Josephsonövergången.

Josephson-effekten i kopplade supraledare användes först för att bestämma e/h . Efterhand infördes Josephsonkonstanten som $K_J = 2e/h$ och sedan 1990 används konstanten för att definiera volt, enheten för elektrisk spänning. K_J sattes till 483597,9 GHz/V. Som vi snart kommer att se så har detta värde nyligen modifierats. För att gå vidare med bestämningar av e behöver vi introducera ytterligare en fundamental upptäckt inom fysiken.

Kvanthalleffekten

Nästa genombrott tidsmässigt kom sju år efter att Brian Josephson belönats med Nobelpriset, och kom helt överraskande som ett resultat av samverkan mellan grundläggande forskning i fysik och halvledarindustrin.

För drygt 140 år sedan publicerade Edwin Hall som doktorand vid Johns Hopkins University en artikel med namnet "On a New Action of the Magnet on Electric Currents". Han hade upptäckt Halleffekten, som man studerar i alla grundläggande kurser i klassisk elektromagnetism. En elektrisk ström skickas genom en metallplatta. Om metallplattan exponeras för ett magnetfält vinkelrätt mot plattan, uppstår ett elektriskt fält mellan plattans kanter. Styrkan av det elektriska fältet är direkt proportionellt mot magnetfältet, vilket gör att Halleffekten ligger till grund för mätinstrumentet av magnetfält – en Hallsensor. Den har som fördel att den direkt kan mäta styrkan hos ett statiskt magnetfält.

I en enkel, tredimensionell modell av elektronerna i metallplattan kan man beskriva elektronerna som en gas av "fria" elektroner. I en makroskopisk metallplatta vid rumstemperatur ligger elektronernas vågvektorer så tätt, att även om de i princip är kvantiserade, så utgör de i praktiken ett kontinuum.

Vad Klaus von Klitzing upptäckte 1980 var, att för en två-

dimensionell elektrongas vid mycket låga temperaturer och starka magnetfält inträffar ytterligare en kvantisering av elektronerna, så att de rör sig i slutna cirkulära, kvantiserade banor. Han kunde härleda ett uttryck för relationen mellan spänning och ström:

$$V = \frac{B}{Ne} I \quad (2)$$

där V är spänningen, B magnetfältet, N antalet laddningsbärare, e elektronens laddning, I strömmen och B/Ne Hallresistansen. Elektronkoncentrationen n i varje kvantiserad nivå är beroende av magnetfältet:

$$n = \frac{eB}{b} \quad (3)$$

Magnetfältet kan anpassas så att $N = in$, där i är ett heltal. Ekvationerna (2) och (3) ger Hall-resistansen ρ (i enhet Ω):

$$\rho = \frac{b}{ie^2} = \frac{R_K}{i} \quad (4)$$

där R_K är von Klitzings konstant i enheten ohm. Vad som är ytterst anmärkningsvärt med ekvation (4) är att den kvantiserade Halleffekten kan uttryckas i fundamentala konstanter, oavsett den experimentella urformningen av den tvådimensionella elektrongasen. Redan i originalartikeln i *Physical Review Letters* 1980 kunde von Klitzing ange värdet på R_K till 25813 Ω .

Elektronens enhetsladdning e kan alltså uttryckas i de två konstanterna K_J och R_K som

$$e = \frac{2}{R_K K_J} \quad (5)$$

Jag har bara skissat kvanthalleffekten och dess konsekvenser för e ; en betydligt utförligare diskussion finns i Kosmos 1986 (av O. Beckman [7]). Klaus von Klitzing belönades med Nobelpriset i fysik 1985, endast 5 år efter sin upptäckt.

Rydbergs konstant och elektronens massa

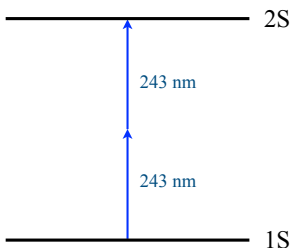
Johannes Rydbergs (1854-1919) stora insats inom fysiken var att han lyckades på basis av ett närmast oöverstigligt antal spektrallinjer från ett stort antal atomer, nå fram till en förbluffande enkel syntes i form av en formel som relaterade spektrallinjernas våglängder till en konstant och ett par parametrar:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(n + c_1)^2} - \frac{1}{(m + c_2)^2} \right], \quad (6)$$

där λ är det utstrålade ljusets våglängd, R är Rydbergs konstant, m och n är heltal så att $m > n$, och c_1 och c_2 är tal mindre än ett och specifika för en viss given serie spektrallinjer. Rydbergs arbete publicerades i Vetenskapsakademiens handlingar 1890, men det skulle dröja ända tills dess att Niels Bohr presenterade sin atommodell 1913 innan den fysikaliska innebörden av Rydbergs formel blev klarlagd. Bohr lyckades beräkna R utifrån storheter som e , h och väteatomens massa, och kom fram till ett värde som stämde inom någon procent med värdet bestämt av observationer av spektrallinjer. Detta imponerade på Nobelkommittén för fysik, som 1922 föreslog prisbelöning av Niels Bohr, en rekommendation som Vetenskapsakademien följde. Svante Arrhenius framhöll i sitt presentationstal den 10 december 1922 det teoretiska värdets överensstämmelse med det observerade värdet som särskilt betydelsefullt för att etablera Bohrs atommodell. (Trots att modellen för länge sedan är överspelad, så lever den kända bilden med elektroner som kretsar kring en kärna kvar i alla möjliga sammanhang.)

Vi förflyttar oss nu drygt 80 år framåt i tiden. Vi såg tidigare hur såväl våglängd som frekvens kunde mätas för en spektrallinje i krypton, något som ledde till en ny meterdefinition. Detta var en mycket komplicerad mätning, med en lång kedja av högstabiliserade och faslåsta lasrar kombinerad med mikrovågskällor. Endast ett fåtal optiska frekvenser kunde mätas med denna metod, och endast i ett mycket begränsat antal laboratorier. Uppfinningen av den optiska frekvenskammen förändrade situationen dramatiskt [8], och John Hall och Theodor Hänsch belönades gemensamt med ena halvan av 2005 års Nobelpris i fysik för sin uppfinning.

Väteatomen är den atom som beskrivas noggrannast med teoretiska beräkningar. Figur 3 visar övergången 1S–2S i väte och



Figur 3. Energinivåer i atomärt väte. Den övre nivån exciteras genom absorption av två ultravioletta fotoner med våglängden 243 nm.

hur den övre nivån kan exciteras genom tvåfotonabsorption. 2S nivån är så långlivad att dess naturliga linjebredd är endast 1 Hz, vilket är idealiskt för precisionsspektroskopi. I synnerhet Hänsch och hans forskargrupp ägnade decennier åt att öka precisionen i mätning av våglängden för 1S–2S. Uppfinningen av frekvenskammen gjorde att de kunde mäta den optiska frekvensen till $2\,466\,061\,102\,474\,851 \pm 34$ Hz.

Precisionsmätningarna med atomärt väte medförde att Rydbergs konstant kunde bestämmas med allt högre precision. Följande relation gäller för R_∞ , där kärnmassan är oändlig:

$$R_\infty = \frac{me^4}{8\varepsilon_0 h^3 c}, \quad (7)$$

där ε_0 är den elektriska konstanten (permittiviteten för vakuum). En omskrivning av (7) ger ett uttryck för m , där noggrannheten för h var den begränsande faktorn.

26:e Allmänna konferensen för mått och vikt

Vid den 26:e konferensen i november 2018 bestämdes att den gamla kilogramprototypen, ”Le Grand K”, som utgjort standarden för enheten massa i SI-systemet sedan 1889, skulle pensioneras och ersättas av en ny definition baserad på Plancks konstant (se artikel av Karin Cedergren). Nu fick våra konstanter e och h exakta värden, precis som c fick det 35 år tidigare. I SI-enheter fick e värdet $1,602176634 \times 10^{-19}$ C och h värdet $6,62607015 \times 10^{-34}$ J·s. Därmed försvann också större delen av osäkerheten i m , eftersom noggrannheten för h inte längre är en begränsande faktor.

Med ”facit” i hand (Tabell 1) kan vi nu jämföra hur bra värdena för våra fyra konstanter var 1936.

Konstant	1936 (konverterat till SI-enhet)	2019
c (m/s)	$(2,99780 \pm 0,00020) \times 10^8$	$2,99792458 \times 10^8$ exakt
e (C)	$(1,601 \pm 0,002) \times 10^{-19}$	$1,602176634 \times 10^{-19}$ exakt
h (J·s)	$(6,610 \pm 0,015) \times 10^{-34}$	$6,62607015 \times 10^{-34}$ exakt
e/m (C/kg)	$(1,7585 \pm 0,002) \times 10^{11}$	$(1,7588200108 \pm 0,0000000005) \times 10^{11}$

Tabell 1. Jämförelse mellan konstanterna 1936 [1] och konstanterna från maj 2019

Vi ser här att de nya värdena, som togs i bruk i maj 2019, ligger inom felgränserna för de värden som ges i von Friesens artikel, utom h som hamnar något utanför. Man kan notera att Millikans $4,774 \times 10^{-10}$ e.s.e inte inkluderar det exakta värdet ens om man lägger till det uppskattade felet: $e_{\text{Millikan}} \leq 1,594 \times 10^{-19}$ C. Som tidigare nämnts så var Millikans värde behäftat med ett icke försumbart *systematiskt* fel.

Man kan naturligtvis fråga sig om inte den dimensionslösa finstrukturkonstanten också blivit exakt, den kan ju uttryckas i e , c och h , som vi såg under rubriken "Artikeln från 1936". Nej, det har den inte; uttrycket gällde för konstanterna uttryckta i cgs-systemet. I SI-systemet finns även den elektriska konstanten ϵ_0 med i uttrycket, och även om den är behäftad med ett mycket litet fel så är den inte exakt. Det rekommenderade värdet från den 26:e konferensen 2018 är $\alpha^{-1} = 137,035999084(21)$. Eddingtons "teoretiska värde" 137 ligger alltså långt utanför felgränserna. Däremot har såväl Josephson-konstanten ($483597,8484 \dots \times 10^9$ HzV⁻¹) som von Klitzings konstant ($25812,80745 \dots \Omega$) fått om inte exakta värden i strikt bemärkelse, så i alla fall värden som kan anges med ett godtyckligt antal decimaler.

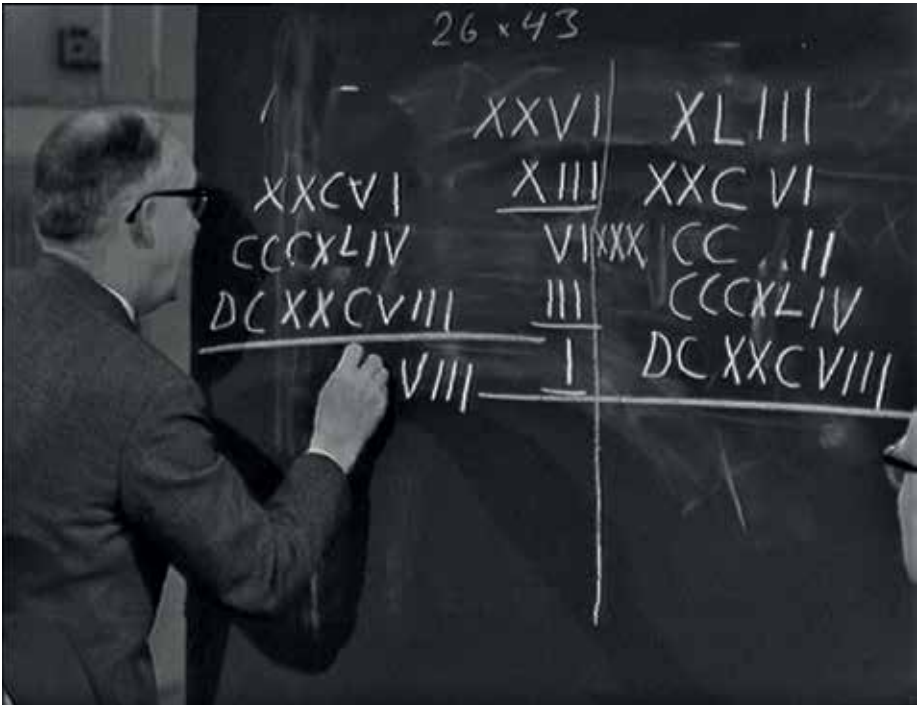
Vem är mest fundamental?

Man kan fråga sig vilka konstanter som är mest fundamentala. Förutom c , e , m och h , så skulle Boltzmanns konstant, k_B (se artikel av Matti Krusius och Gösta Enholm), och Avogadros tal, N_A (se artikel av Bengt Nordén), kunna vara med och konkurrera. De båda senare åtnjuter också exakta värden sedan maj 2019. Konstanterna c och h är nyckelkonstanter för att beskriva rumtiden och kvantmekaniken, så de får nog anses ha ett visst försteg framför de andra. Tillsammans med e utgör de kopplingskonstanten (finstrukturkonstanten) för elektromagnetisk växelverkan, så e kan väl få komma in på en hedersam tredjeplats. Men konkurrensen från k_B , som knyter ihop entropin för ett slutet termodynamiskt system med logaritmen för antalet möjliga mikroskopiska tillstånd, är naturligtvis skarp!

Slutord

Förbättringen av precisionen för de fysikaliska konstanternas numeriska värden har genom decennierna sedan 1930-talet inte drivits av experimentella och/eller ingenjörsmässiga förbättringar av de metoder som användes av den tidens fysiker. Istället har utvecklingen drivits av genombrott i fundamental fysik; genombrott som var långt ifrån intuitiva. Kvantmekaniken har levererat (lasern, Josephoneffekterna, kvanthalleffekten) på ett sätt som pionjärerna knappast kunnat föreställa sig och de främsta aktörerna i denna utveckling har belönats med Nobelpris i fysik.

Vilken fysikalisk konstant står på tur för att få en ny definition? Jag har länge förväntat mig att enheten för tid, sekund, skulle ändras, men så har inte skett (se artikel av Martin Zelan).



Vinjettbilden: Sten von Friesen i "Fråga Lund" 1962. Han har här genomfört en multiplikation 26×43 med romerska siffror. von Friesen börjar till synes seriöst, men efter ett tag inser studiapubliken (och även TV-publiken, kan man gissa) att han driver med den på ett mycket humoristiskt sätt. Ingen har såvitt känt ens till denna dag lyckats avkoda vad han egentligen gjorde. Men rätt blev det: slutresultatet MCXVIII är ju onekligen 1118!

<https://www.oppetarkiv.se/video/1529067/fraga-lund-sasong-1-2511-1962>

Bild från Sveriges Television.

En sekund är *exakt* 9 192 631 770 cykler (enhet $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$) av hyperfinstrukturövergången i 133-cesium, vilket betyder att de cesiumbaserade atomklockorna fortfarande är arbetshästarna i laboratorierna. Atomklockor baserade på optiska frekvenser har överträffat cesiumklockorna i noggrannhet, men har ännu inte resulterat i en ändring av definitionen av sekund. Det finns flera anledningar till det. Redan 1967 övergavs sekunddefinitionen baserad på rörelsen hos jorden runt solen och fick en atomärt baserad definition. Cesiumklockan är robust och även om optiska klockor kan göras noggrannare så är de också mer komplicerade. Gissningsvis så kommer i alla fall en sekund inom högst ett decennium att baseras på en optisk frekvens.

Precisionsfysiken har ett mycket bredare arbetsfält än att förbättra fysikaliska konstanter. Om man deltar i laser- och atomfysikkonferenser, märks hur många unga forskare använder den enorma precision som dagens instrument erbjuder, för att söka avvikelser från förväntade resultat som skulle kunna vara tecken på ny fysik. Det är en mycket spännande utveckling. ❖

För vidare läsning

- [1] S. von Friesen, "Om värdena på c , e/m , e och h ", Kosmos 1936, sid. 107 (<http://runeberg.org/kosmos/1936/>)
- [2] S. von Friesen, "Om värdena på c , e/m , e och h ". II. Kosmos 1987, sid. 177
- [3] E. Bäcklin, "Absolut mätning av röntgenstrålarnas våglängd", Kosmos 1930, sid. 27. (<http://runeberg.org/kosmos/1930/>)
- [4] A. L. Schawlow, "Optical Masers", *Scientific American* **204**, (6) 52 (1961)
- [5] A. Bengtsson, "Mätning av ljushastigheten", Kosmos 1984, sid. 117
- [6] T. Claeson och S. Lundquist, "Kvantmekaniska tunnlar i fasta ämnen", Kosmos 1969, sid. 127
- [7] O. Beckman, "Nobelpriset i fysik 1985. Den kvantiserade Halleffekten", Kosmos 1986, sid. 7
- [8] <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popular-physicsprize2005.pdf>

