

Mått och vikt

»En kung, en lag, en vikt, ett mått» var ett uttryck som förekom i de franska riksständernas handlingar alltsedan dess tillkomst i början på 1300-talet. Försök att bringa reda i det virrvarr som rådde i Europa vad beträffar mått och vikt fram till den franska revolutionen var dömda att misslyckas. Ofta understöddes enhetssträvandena av monarker med vissa initialframgångar, t. ex. Charlemagne (Karl den store) 789 och Karl den skallige 864, som däri såg vissa möjligheter att befästa sin makt. Men de krafter som profiterade på den härskande oordningen — kommersiella och politiska — visade sig alltid vara de starkaste. Härtill kom folks ovilja mot nyheter som krävde vissa omställningar. Mått och enheter varierade inte bara länderna emellan utan t. o. m. mellan städer och mellan olika typer av handel och yrken. Att inte minst det vetenskapliga framåtskridandet i hög grad hämmades härav är lätt att inse.

Värst var situationen i Frankrike. En känd engelsk ekonom från 1700-talet, Arthur Young, talar om — kanske inte utan en viss nationell skadeglädje — »den obegränsade röra bland de franska måtten, som övergår allt man kan föreställa sig». Den franska revolutionen 1789 gav möjligheter till radikala reformer även på detta område och de franska vetenskapsmännen var inte sena att utnyttja tillfället. De insåg också att problemet skulle lösas på internationell basis. Talleyrand, som då var biskop, animerades och

i mars 1790 föreslog denne nationalförsamlingen ett samgående med England. I första hand gällde det längdenheten. Sir Riggs Miller hade strax innan föreslagit att längdenheten skulle baseras på längden av en sekundpendel, ett ur fysikalisk synpunkt intressant förslag som skulle ha sammankopplat tid och längd på ett mycket direkt sätt. Royal Society i London stod bakom detta förslag, som tidigare hade diskuterats av Picard (1671), Huygens (1673) och Römer. Talleyrand anslöt sig till detta förslag och i avvaktan på frågans vidare utveckling tillsatte franska vetenskapsakademien, Académie des Sciences, en kommitté som föreslog decimalsystemets införande för vikt, mått och mynt den 27 oktober 1790. Ytterligare en kommitté tillsatte akademien för att närmare utreda frågan om längdenheten och i denna ingick Lagrange och Borda. Denna kommitté rekommenderade — tyvärr kan man nog säga — en annan bas för längdenheten än det engelska förslaget. Den anslöt sig till en uppfattning som tidigare framförts av den franske astronomen och matematikern Abbé Gabriel Mouton 1670 att längdenheten borde vara fast förankrad i naturen — vilket i och för sig även det engelska förslaget var — men på sådant sätt att ett geografiskt avstånd utnyttjades, exempelvis en kvadrant av jordmeridianen. En tiomilliondel av denna var en lämplig längdenhet. Man förstår väl att denna propos inte vann större genklang i de anglosachsiska länderna, speciellt som den för

Fig. 1. Ur en sammanställning av mått och vikt från 1849.

Fig. 2. Meridianbågen mellan Dunkerque och Barcelona och uppmättes av Delambre och Méchain 1792-1798. Denna distans utgjorde grunden för meterdefinitionen fram till 1960 då den ersattes av spektrallinjen i ^{86}Kr vid $\lambda = 6\,056\text{ Å}$.

De oflast förekommande utländska måtts och vigters storlek.

Norrige och Danmark.

1	norsk eller dansk	Fod	=	1	svensk fot	$\frac{2}{3}$ tum.
1	"	"		Mill	=	$2\frac{1}{2}$ fjerdingsvag.
1	"	"		Tondeland	=	$35\frac{1}{2}$ kappeland
1	"	"		Korntonde	=	1 tunna $1\frac{1}{2}$ k.r i. m.
1	"	"		Pot	=	$\frac{1}{2}$ kan. = 2 quart. $3\frac{1}{2}$ jumfr.
1	"	"		Drickestonde	=	$50\frac{1}{2}$ kannor.
1	"	"		Pund	=	1 \mathcal{E} $5\frac{1}{2}$ lod.
1	"	"		Med.-Pund	=	$26\frac{2}{3}$ lod.
1	"	"		Kommerslast	=	$15\frac{1}{2}$ \mathcal{S} v. v.
1	"	"		Tradlast	=	$11\frac{1}{2}$ "

Hamburg.

1	Hamb. Fuss	=	$11\frac{1}{2}$ svensk tum.
1	Brabant-ala	=	1 ala $4\frac{1}{2}$ tum.
1	Hamb. Scheffel	=	23 kappar i. m.
1	"	Viertel	= $\frac{1}{2}$ Eimer = 2 kan. $24\frac{1}{2}$ jumfru.
1	"	Ahm	= 1 alm $2\frac{1}{2}$ kan.
1	"	Handelsfund	= 1 \mathcal{E} $4\frac{1}{2}$ lod.
1	"	Med. Pfund	= 1 Libra 1 ser 3 gr.
1	"	Selllast	= 21 tunol. 23 kr.

Preussen.

1	Rheinl. Verkfuss	=	1 fot $\frac{2}{3}$ tum.
1	Preuss. Meile	=	$2\frac{1}{2}$ fjerd.-vag
1	Geograph. "	=	$2\frac{1}{10}$ "
1	Preuss. Morgen	=	$16\frac{1}{2}$ kappland.
1	Rheinl. Kubikfuss	=	$1\frac{2}{3}$ sv. kub.-fot.
1	Preuss. Scheffel	=	12 kappar i. m.
1	"	Quart	= 14 jumfru.
1	"	Eimer	= 60 viert. = $26\frac{1}{2}$ kannor.
1	"	Handelsfund	= 1 \mathcal{E} $3\frac{1}{2}$ lod.
1	"	Med.-pfund	= $\frac{2}{3}$ sv. libra.
1	"	Normallast	= $17\frac{1}{2}$ \mathcal{S} v. v.

Frankrike, Holland och Belgien.

1	Fransysk	Metre	=	1	ala	$16\frac{2}{3}$ tum.
1	"	Myriametre	=	$3\frac{1}{2}$	fjerd.-vag.	
1	"	Decimetre	=	$4\frac{1}{2}$	tum.	
1	"	Lieue	=	$1\frac{1}{2}$	fjerd.-vag.	
1	"	Are	=	$\frac{2}{3}$	kappland.	
1	"	Litre	=	2	quart. $3\frac{1}{10}$	jumfru.
1	"	Hectolitre	=	$21\frac{1}{2}$	kapp.	
1	"	do	=	$38\frac{1}{2}$	kan.	
1	"	Kilogramme	=	2	\mathcal{E} $11\frac{1}{2}$	lod.
1	"	Gramme	=	$\frac{1}{10}$	quintin.	
1	"	Pied	=	1	fot $1\frac{1}{2}$	tum.
1	"	En Bordeaux Veltes	=	2	kann. 29	jumfr.

Britannien.

1	Engelsk	Foot	=	1	sv. fot	$\frac{1}{10}$ tum.
1	"	Yard	=	1	ala	13 tum.
1	"	Statute-mile	=	$\frac{2}{3}$	fjerd. vag.	
1	"	Sea-mile	=	$\frac{2}{3}$	"	
1	"	Square-foot	=	$1\frac{1}{10}$	quadr. fot.	
1	"	Acre	=	$26\frac{2}{3}$	kappl.	

Fig. 1

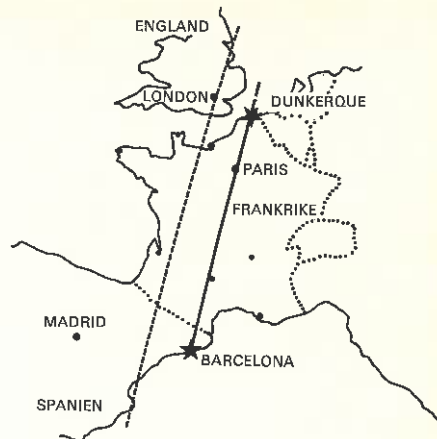


Fig. 2

uppmätning utvalda distansen föreslogs bli Dunkerque-Barcelona. Franska nationalförsamlingen accepterade emellertid planen den 26 mars 1791 och akademien trädde därefter omedelbart i funktion med Delambre och Méchain i spetsen för att planera precisionsmätningen av meridianbågen. Samtidigt utsågs Lavoisier att ta hand om enheten för vikt, som skulle utgöras av vikten av en känd volym vatten, vars dimensioner kunde återföras på längdenheten.

Den brittiska reaktionen uteblev inte. Förslaget till längdenheten avfärdades som »opraktiskt». Den amerikanska attityden var likartad. President Washington som anmodat kongressen att avge ett förslag i frågan fick av sin statssekreterare Jefferson beskedet att brittiska längdenheten (egentligen tre tiondelar av sekundpendelns längd) kunde accepteras under det att den franska — som, oavsett att den var opraktisk att realisera, ansågs göra uppmätningen och kontrollen av längdenheten till en fransk angelägenhet — måste förkastas. Härigenom omöjliggjordes en verkligt väsentlig internationell överenskommelse vid denna tidpunkt, vars konsekvenser säkerligen

var större än vad man i första ögonblicket föreställer sig. Ytterligare åttiofem år skulle det dröja innan frågan på nytt kunde tas upp på en internationell nivå.

Fransmännen arbetade nu ensamma oförtrutet vidare på sin linje. Den geodetiska uppmätningen av meridianbågen utfördes väsentligen genom ett trianguleringsförfarande jämte latitud- och azimuthbestämningar enligt en metod som uppfanns av Borda och som medgav en noggrannhet av en sekund i vinkelmätningarna. De svåra mätningarna ute på landsbygden komplicerades i hög grad av befolkningens misstänksamhet, ja fiendlighet mot de vetenskapliga assistenternas egenartade verksamhet och inte minst deras klädsel, som i det vita färgvalet påminde om de kungliga motrevolutionärernas. Lavoisier själv blev som bekant giljotinerad 1794. År 1798 kunde man emellertid ge ett värde på avståndet mellan polen och ekvatorn uttryckt i det tidigare officiella franska måttet Toise du Châtelet (1 toise = 6 pieds de roi, 1 pied de roi = 12 pouces, 1 pouce = 12 lignes, 1 ligne = 12 points). Avståndet blev 5 130 740 toises. Detta betydde att 1 meter var 3 pieds, 11,296 lignes. Omvänt var 1 pied de roi $\approx 0,325$ meter. Den av Lavoisiers kommitté samtidigt uppmätta viktsenheten 1 kilogram, som hänförde sig till vikten av 1 kubikdecimeter destillerat vatten vid 4°C (i vakum) visade sig vara 18 827,15 grains, där grains ingick i den tidigare franska viktskalan Pile de Charlemagne. Tidsenheten, sekunden, hade redan en klar förankring i naturen genom astronomiska data. Genom uppmätningen av längd- och viktsenheterna fanns nu i princip ett system av »naturliga, universella» enheter.

Närmast gällde det att åstadkomma lämpliga standarder. Meterstandardens utfördes som en platinastav med tvärsnittet 25 × 4 mm. Avståndet mellan dess båda plana ändtyor jämfördes i en speciellt konstruerad komparator med det forna

toisemåttet. Kilogrammet utgjordes av en platinacylinder, vars höjd var lika med diametern. Dess vikt jämfördes och justerades i förhållande till den nämnda vattenvikten i en noggrann våg. Prototyperna deponerades i Archives de la République den 22 juni 1799 av en vetenskaplig delegation. De har härigenom fått namnen *arkivmetern* och *arkivkilogrammet*.

Successivt blev behovet av internationella enheter alltmera uppenbart. Land efter land, däribland USA och England, medgav under artonhundratalets mitt de nya enheternas utnyttjande vid sidan om de gamla. 1870 tog franska regeringen initiativet till en internationell konferens bestående av vetenskapsmän från 24 länder. Denna s. k. Commission Internationale du Mètre fick ajourneras på grund av fransk-preussiska kriget 1870 men fortsatte 1872 med representanter för 30 länder. Vetenskapsmännen enades om 40 resolutioner i enhetsfrågorna, vilka

Fig. 3. Meter- och kilogramprototyper i naturlig storlek.

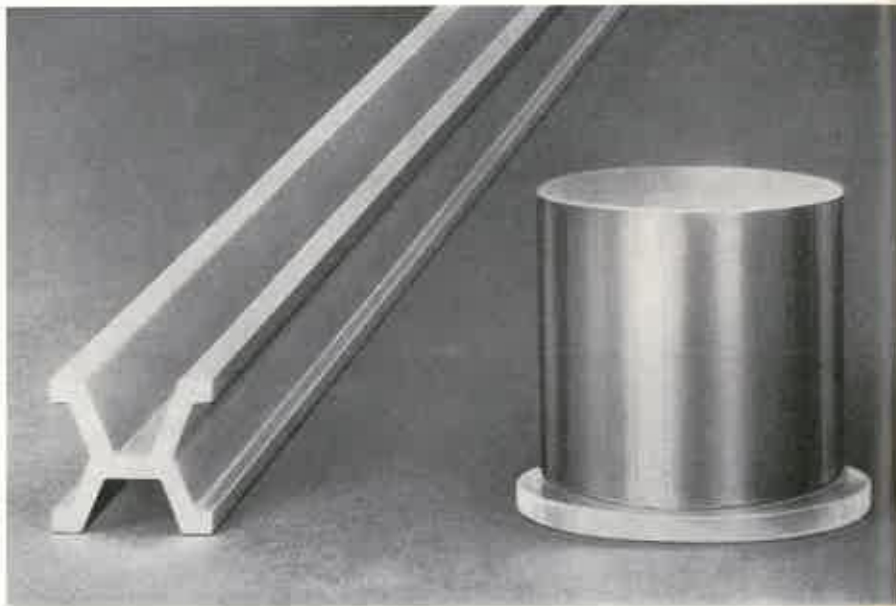


Fig. 4. Denna medalj skulle ha distribuerats till åminnelse av metersystemets införande. Händelseutvecklingen omintetgjorde emellertid utkomsten av medaljen, som återfanns av en slump först på 1920-talet. Helt nyligen har ett mindre antal av medaljen präglats i koppar.

Texten på medaljen lyder:
 A TOUS LES TEMPS.
 A TOUS LES PEUPLES.
 CONVENTION NATIONALE.
 DECRET DU 14 THERMIDOR AN 1.
 DE LA REPUBLIQUE FR. LOUIS
 PHILIPPE 1. ROI DES FRANCAIS.
 1. JANVIER 1840 USAGE
 EXCLUSIF DES MESURES
 DECIMALES. LOI DU
 4 JUILLET 1837.



därefter tillställdes respektive regeringar. Bl. a. föreslogs inrättandet av en internationell byrå för mått och vikt. Som en konsekvens av detta samlades den s. k. Conférence Diplomatique du Mètre i Paris 1875 och den berömda *Convention du Mètre* signerades av 18 stater den 20 maj 1875 (däribland Sverige). Dessa länder, som senare har kompletterats till sammanlagt 40, för-

band sig att gemensamt upprätta och underhålla en permanent byrå för mått och vikt, *Le Bureau International des Poids et Mesures*, och dess logiska placering var Paris som varit medelpunkten för dessa strävanden under så lång tid.

Fig. 5. Pavillon de Breteuil vid Sèvres i Paris med laboratorier tillhörande internationella byrån för mått och vikt (BIPM).



LE BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (BIPM)

Franska regeringen skänkte ett litet pittoreskt jaktstolt, *Pavillon de Breteuil*, med kringliggande parkområden, vackert belägna intill den kända porslinsfabriken vid Sèvres i utkanten av Paris med utsikt ner emot Seine. Genom en donation från Rockefeller Foundation 1930 uppfördes ytterligare en laboratoriebyggnad och 1964 tillkom ett särskilt laboratorium för mätning av joniserande strålning. Verksamheten har successivt ökat i omfattning och sysselsätter för närvarande ett trettio-tal fast anställda. Den årliga budgeten uppgår till 2 milj. kronor. Byrån ledes av en inter-

nationellt sammansatt permanent kommitté på 18 personer, *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM), som representerar olika geografiska och fackliga områden. Kommittén utser också byråns chef, som sedan 1962 är Dr. J. Terrien. Under åren 1915–35 var Nobelpristagaren Guillaume chef, känd bl. a. för uppfinningen av legeringen invar. *Comité International* utser också medlemmar av de subkommittéer, f. n. 7 stycken, som genom ingående utredningsarbeten förbereder alla kommitténs rekommendationer till den minst vart sjätte år inkallade *Conférence Générale des Poids et Mesures*. Den sistnämnda församlingen är mycket stor med flera representanter för vart och ett av de 40 deltagande länderna. Dessa utses för varje generalkonferens av respektive regeringar. Den elfte generalkonferensen var 1960 och den tolfte 1964. *Comité International* sammanträder varje år för att bl. a. diskutera subkommittéernas arbete. Som ett kuriosum kan nämnas att byråns arkivstandarder vid dessa tillfällen tas under okulär besiktning i byråns källarvalv, som är försett med 3 successiva järndörrar som endast kan öppnas med 3 olika nycklar som i sin tur förvaras av 3 olika personer. Hittills har ingen överraskning mött när sista förseglet öppnats!

Byråns första uppgift vid starten 1875 var att ersätta de ursprungliga arkivstandarderna från 1799 med nya, framställda så att största möjliga permanens garanterades samt så att jämförelser med substandarder kunde göras med betydligt ökad noggrannhet. Efter grundliga studier framställdes 30 meterstandarder samtidigt (vikten 3,3 kg). Legeringen bestod av 90 procent platina och 10 procent iridium, vilken uppvisade särskilt förmånliga egenskaper avseende beständighet, homogenitet och hårdhet. Hög elasticitetskoefficient och tämligen liten utvidgningskoefficient var andra egenskaper. Profilen var x-formad och meterlängden var markerad med fina streck längs

centrum av x:et. De olika längderna jämfördes ytterst noga med varandra med en 100-faldigt stegrad precision och en av de nya längderna, som kom närmast den tidigare arkivmetern, övertog rollen av meterprototyp. Övriga meterlängder fördelades mellan olika länder och tjänstgör sedan dess som riksprotyper i respektive länder. På samma sätt förfors med kilogramprototypen. Den första inkallade generalkonferensen 1889 godkände dessa åtgärder.

METROLOGI

Exakta mätningar av fysikaliska storheter kräver exakta definitioner av de enheter i vilka storheterna mäts. Hela detta omfattande och praktiskt betydelsefulla problemkomplex behandlas inom den moderna och aktuella vetenskapen *metrologi*. Dess innehåll belyses kanske enklast av den internationella kommitténs sju olika subkommittéer:

1. Meterdefinitionen, bildad 1952
2. Sekunddefinitionen, bildad 1956
3. Termometri, bildad 1937
4. Elektricitet, bildad 1927
5. Fotometri, bildad 1933
6. Joniserande strålning, bildad 1958
7. Enheter och det internationella enhetssystemet (SI), bildad 1964.

Arbetena redovisas successivt i följande publikationsserier: *Comptes Rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*; *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*; *Sessions des Comités Consultatifs*; *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures*. Sedan 1965 utkommer dessutom en tidskrift *Metrologia* (Springer) som innehåller översiktsartiklar och

vetenskapliga undersökningar inom metrologien.

Internationella kommittén och dess subkommittéer samarbetar med andra internationella vetenskapliga organisationer bl. a. genom att vissa medlemmar i subkommittéerna företräder dessa. Särskilt kan nämnas de fysiska och astronomiska internationella unionerna (IUPAP¹ och IAU,² respektive). De vetenskapliga unionerna har ett samlande organ kallat ICSU.³ En särskild kommitté för enheter, kallad SUN,⁴ är representerad i den sjunde subkommittén. Den sjätte subkommittén över joniserande strålning har ett starkt inslag av medlemmar från den internationella kommissionen för radiologiska enheter (ICRU)⁵ etc. En annan sammanslutning i dessa sammanhang är den internationella standardiseringsorganisationen ISO,⁶ som också står i kontakt med CIPM. Flera större länder har särskilda centralinstitut för metrologi som åläggs viss kontroll- och serviceverksamhet för statens och näringslivets räkning. De mest kända är National Bureau of Standards (NBS) i Washington, National Physical Laboratory (NPL) i Teddington, England, Physikalisches Technische Bundesanstalt (PTB) i Braunschweig och Mendelejevinstytutet i Leningrad. De är samtliga mycket stora institut med tusentals eller ännu flera anställda. Andra länder har liknande institut. I Sverige är verksamheten uppdelad på flera håll: Meter- och kiloprototyperna förvaras f. n. av Kungl. Mynt- och Justeringsverket. Standardiseringsverksamheten ombesörjes av Sveriges Standardiseringskommission. Den metrologiska forskningen och serviceverksamheten är utspridd på skilda universitets- och högskoleinstitutioner, Statens Provingsanstalt och Försvarets Forskningsanstalt.

Låt oss nu ta en överblick av metrologiens aktuella fält, skärskåda mätnoggrannheten och sammanfatta de gällande definitionerna i de olika fallen.

LÄNGDMÄTNING

Strax efter byråns start blev A. Michelson 1892-93 inbjuden att tillsammans med byråns chef R. Benoit bestämma normalmeterns längd uttryckt i våglängder av den välkända röda Cd-linjen vid 6438 Å. Tack vare Michelsons just då uppfunna interferometer som han medförde till Paris från Chicago (originalinstrumentet användes fortfarande på byrån) visade det sig möjligt att bestämma denna våglängd med ca 100 ggr större noggrannhet än tidigare. Mätningen upprepades något senare (1906) av Benoit, Fabry och Perot som fick samma värde, nämligen $\lambda = 6438,4696 \times 10^{-10}$ meter (i torr luft vid 15°C och 1 atm samt 0,0003 delar CO₂). Detta värde stämmer inom 0,0001 Å med alla senare erhållna! Vid den sjunde generalkonferensen 1927 bestämdes att den röda Cd-linjen med det värde som sålunda fastställdes skulle få användas som standard vid längdmätningar vid sidan om meterstandarden. Man hade därmed i princip accepterat två olika längddefinitioner, varav den sist införda samtidigt definierade Ångströmenheten inom spektroskopien. Det steg man tog var i själva verket nödvändigt med hänsyn till den snabba mättekniska utvecklingen och det faktum att meterprototypen trots allt kunde tänkas förändras i tiden. Prototypens längd kunde heller inte definieras bättre än avläsningsnoggrannheten mellan de två ändstrecken. Strecken är några μm breda och den V-formade skåran kan f. n. uppmätas med en precision av ca 0,1 μm . Den relativa noggrannheten i uppmätningen av metern är sålunda ca 1:10⁷. Detta förutsätter att extraordinära åtgärder vidtages beträffande temperaturkonstans (10⁻³°C) etc. Vid längdkomparationer användes givetvis interferometriska standardmetoder och dessutom fotoelektrisk registrering av avläsningsmikroskopets inställning på strecken.

¹ IUPAP, International Union for Pure and Applied Physics.

² IAU, International Astronomical Union.

³ ICSU, International Council of Scientific Unions.

⁴ (SUN, Symbols, Units, Nomenclature.)

⁵ ICRU, International Commission on Radiological Units and Measurements.

⁶ ISO, (International Standard Organization.)

Den röda Cd-linjen hade utvalts på grund av sin stora skärpa. En spektrallinjes bredd är ytterst satt av eventuell ouplöst hyperfinstruktur till följd av isotopieffekt och kopplingen mellan kärnans elektriska kvadrupolmoment eller magnetiska dipolmoment och höljjet. Linjen kan deformeras till följd av självabsorption. Linjebreddningar och förskjutningar kan inträffa till följd av Stark-effekt och Doppler-effekt. Med den Cd-lampa som Michelson införde är den röda Cd-linjen vid högsta upplösning symmetrisk med en relativ linjebredd (satt av symmetrisk termisk Doppler-breddning) på $2 \cdot 10^6$. Linjens läge kan anses vara definierad på $2 \cdot 10^8$, dvs. nästan 10 gånger bättre än meterprototypen. Utgående från Heisenbergs osäkerhetsrelation $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$ kan man räkna ut en fotonens ungefärliga »längd». Om den relativa »naturliga» linjebredden för en viss spektrallinje är $\Delta\lambda/\lambda$ kan man tänka sig att atomerna håller på att stråla ut fotonen under tiden Δt i form av ett vågpaket vars längd är $l \approx \Delta t \cdot c$. Eftersom $\Delta E = h\nu$ och $c = \lambda\nu$ får man $l \sim \lambda / d\lambda/\lambda$. För en spektrallinje i det synliga området, som har en naturlig linjebredd av t. ex. $1 \cdot 10^6$, blir tydligen fotonens längd, uträknad på detta sätt, ca en halv meter. Detta är den s. k. koherenslängden för strålningen ifråga.

Eftersom en foton normalt endast kan inferera med sig själv inser man att en skillnad i våglängden mellan de två strålgångarna i en interferometer (t. ex. av Michelsons typ) ej får överstiga koherenslängden, ty då kommer de två vågpaketerna efter varandra vid sammanstrålningen, utan möjlighet att påverka varandra. Avståndet mellan speglarna i interferometern bör tydligen ej överstiga koherenslängden. Genom de extremt smala linjebredder som förekommer hos laserljus uppnås här avsevärt större koherenslängder, i själva verket åtskilliga tiopotenser större än för vanligt ljus.

Subkommittén för meterdefinitionen utförde

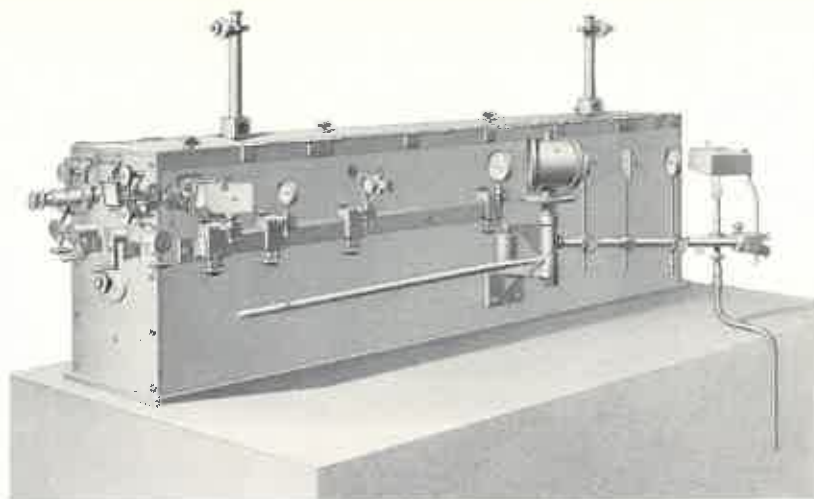


Fig. 6a

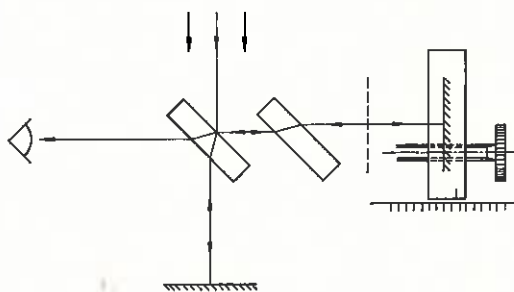


Fig. 6b



Fig. 6c

Fig. 6a. Michelsons interferometer. Bilden hämtad ur Michelsons originalavhandling, »Détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueurs d'ondes lumineuses.» Gauthier-Villars et Fils, Paris, 1894.

Fig. 6b. Michelsons interferometer; principskiss.

Fig. 6c. Michelsons interferometer med vakumtank som användes 1892 av denne och Benoit vid precisionsmätningen av den röda Cd-linjen vid $\lambda = 6\,438 \text{ \AA}$. Detta instrument är fortfarande i bruk vid BIPM.

Fig. 7. Kr-86 lampa för produktion av den orange-färgade strålningen ($\lambda = 6\ 056\ \text{\AA}$) som sedan 1960 utgör den optiska meterstandard.

Fig. 8. Kr-86 lampan tillsammans med sin flytande kväve kryostat. För att få en exakt definition av denna optiska meterstandard är noggranna föreskrifter angivna rörande urladdningsström, temperatur och lampans dimensioner.

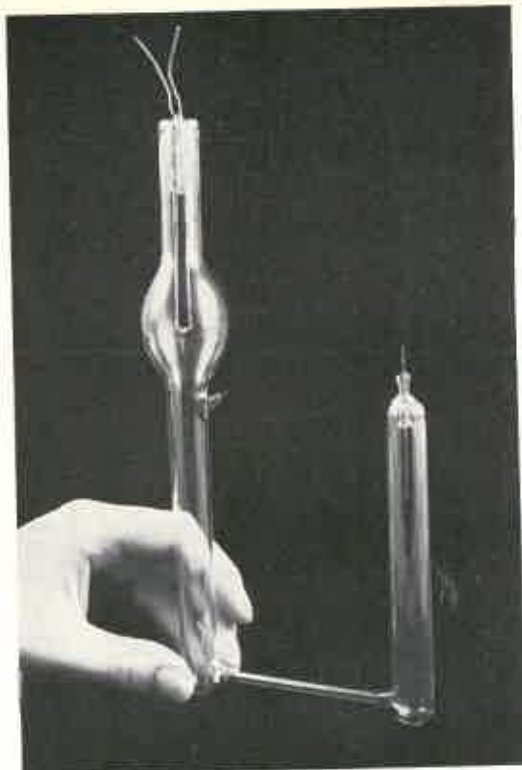


Fig. 7



Fig. 8

under en följd av år och under anlitande av vår tids mest förstklassiga spektroskopiska sakkunskap synnerligen ingående undersökningar över andra olika tänkbara våglängdsstandarder och ljuskällor. Man stannade slutligen för en linje i ^{86}Kr spektrum vid $6\ 056\ \text{\AA}$, som vid lämpligt val av ljuskälla har exceptionellt goda förutsättningar att tjänstgöra som en särskilt väldefinierad längdstandard. 1958 accepterade den internationella kommittén subkommitténs rekommendation och förelade den för den 11 generalkonferensen 1960. Denna fastställde den 14 oktober den nya längddefinitionen, som därmed definitivt ersatte den gamla meterprototypen som längdstandard. Meterkonventionens offici-



Fig. 9. Fotoelektrisk, interferometrisk komparator vid BIM för precisionsmätning av längdstandarder och direkta jämförelser mellan dessa och den nya optiska meterstandard.

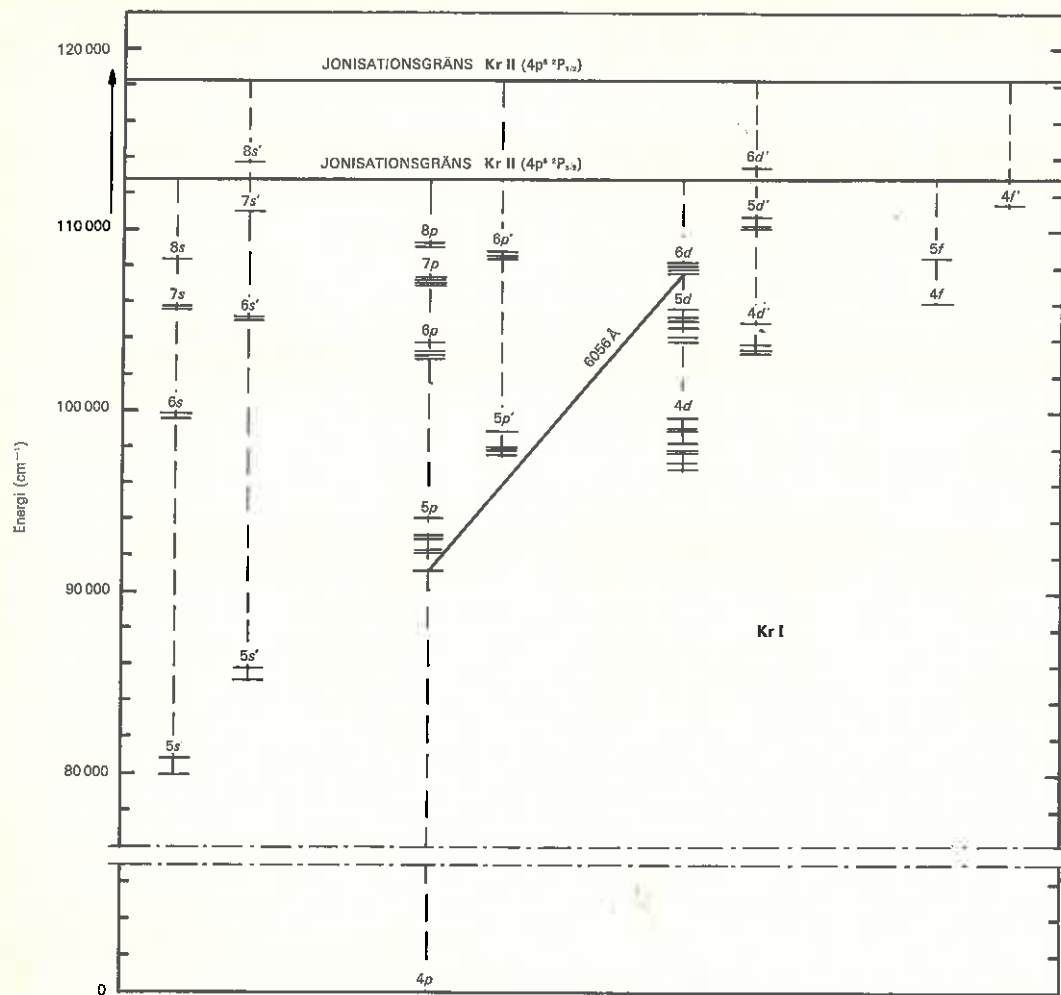


Fig. 10. Termschema för Kr I. Över varje grupp av energinivåer anges lyselektronens bana. De övriga elektronerna befinner sig i sina lägsta banor. Atomrestens konfiguration är alltså $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6$. Meterdefinitionen bygger på den i termschemat markerade övergången $5p[\frac{1}{2}]_1 - 6d[\frac{3}{2}]_1$. Beteckningarna hänför sig till s. k. parkoppling eller $J_c L$ -koppling, som beskriver konfigurationer, där lyselektronen ligger långt utanför atomresten. Atomrestens totala impulsmoment J_c (i detta fall 3/2 eller 1/2) och lyselektronens L -kvanttal adderas vektoriellt till ett K -kvanttal, som placeras inom klammer. Som index anger man sedan nivåns totala impulsmoment J , som man får genom vektoraddition av K och lyselektronens spin. Med äldre beteckningssätt skrevs samma övergång $2p_{10} - 5d_5$.

ella språk är franska. Översatt lyder den på följande sätt: »Metern är längden av 1650763,73 våglängder i vakuum av strålningen, svarande mot övergången mellan nivåerna $2p_{10}$ och $5d_5$ i krypton-86 atomen.»

Följande praktiska instruktioner utfärdades samtidigt: »I enlighet med paragraf 1 av resolution 7 som beslutats av den elfte generalkonfe-

rensen för mått och vikt (oktober 1960) rekommenderar den internationella kommittén för mått och vikt att strålningen från krypton-86, som utsetts som fundamental längdstandard, skall realiseras med hjälp av en varm-katod urladdningslampa, som innehåller krypton-86 med en renhet som inte understiger 99%, i en tillräcklig kvantitet för att fast krypton skall vara närva-

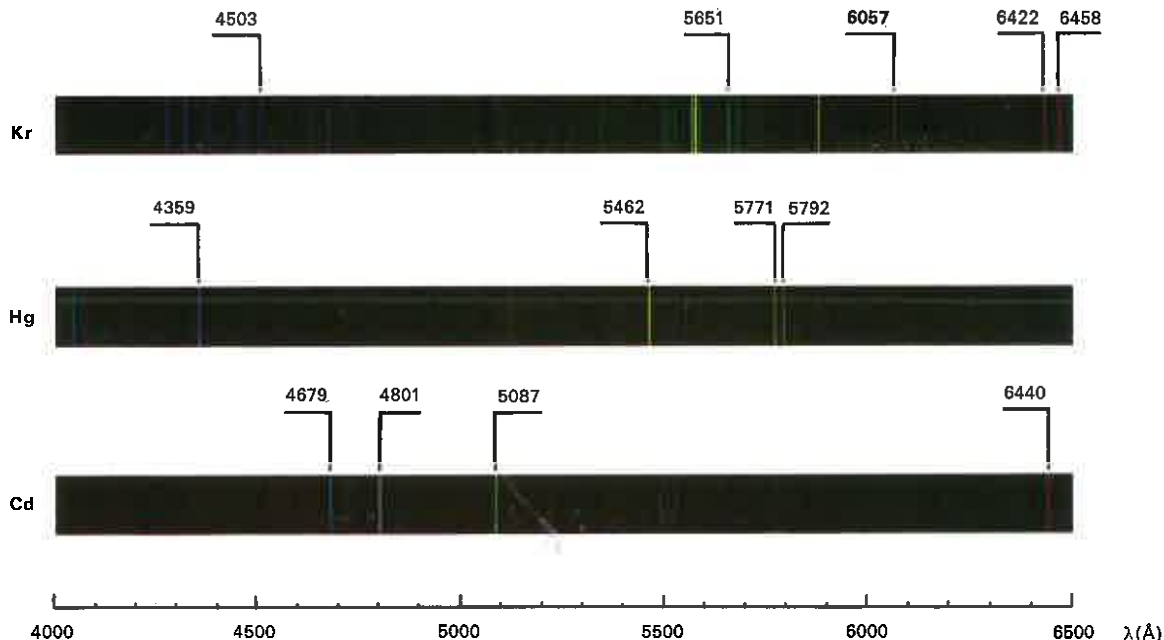


Fig. 11. Spektrogram av krypton, kvicksilver och kadmium.

På spektrogrammen anges heltaisdelen av vakuumväglängderna för primärnormalerna i krypton: 6 057, 8 021 Å samt sekundärnormalerna i krypton: 6 458, 0720; 6 422, 8 006; 5 651, 1 286 och 4 503, 6 162 Å, kvicksilver: 5 792, 2 683; 5 771, 1 983; 5 462, 2 705 och 4 359, 5 624 Å och kadmium: 6 440, 2 480 (den berömda röda kadmiumlinjen), 5 087, 2 379; 4 801, 2 521 och 4 679, 4 581 Å. Generalkonferensen för mått och vikt har angett väglängderna för primär- och sekundärnormalerna i vakum. Vanliga väglängdstabeller anger istället väglängder i luft. Omräkning mellan de båda systemen sker

med den formel för luftens brytningsindex som uppställdes av B. Edlén 1953.

Upptagningarna har gjorts med Philips spektraliampor och en 2 m gitterspektrograf i Ebert-montering. För att göra linjerna tydligt synliga har en spaltbredd av 0,1 mm använts. Till följd av de stora intensitetsskillnaderna mellan linjerna i samma spektrum är en del linjer över- eller underexponerade. Så är t. ex. de kraftigaste linjerna i krypton ca 50 gånger intensivare än primärnormalen.

Film: Kodak Ektachrome, Daylight-type. Exponeringstider: Kr 16 h, Hg 4 s, Cd 8 s. Foto: Gruppen för optisk spektroskopi, Fysikum, Uppsala.

rande vid en temperatur av 64°K, och som har en kapillär med följande karakteristika: inre diameter 2 till 4 mm, vägg tjocklek 1 mm.»

Vidare: »Det kan förutsättas, att våglängden för strålningen som emitteras av den positiva pelaren är lika med, till ca 1:10⁸, våglängden som motsvarar övergången mellan de ostörda nivåerna, om följande villkor är uppfyllda:

1. Kapillären observeras från änden på ett sådant sätt att den utnyttjade strålen går från katod- till anodändan.

2. Den lägre delen av lampan, inkluderande kapillären, är nedsänkt i ett köldbädd, som hålles vid en temperatur motsvarande kvävetrippelpunkt inom 1 grad.

3. Strömtätheten i kapillären är $0,3 \pm 0,1$ ampere per kvadratcentimeter.»

Alla dessa försiktighetsmått är nödvändiga att iakttaga ty härigenom kompenseras exakt rödförskjutningen till följd av Starkeffekt och blåförskjutningen till följd av Dopplereffekt, förorsakad av elektronstötter mot atomerna i det emitterade ljusets riktning. Rekommendationerna är grundade på experimentella undersökningar och är inte svårare att följa än att vilket normalt utrustat laboratorium som helst i världen i fortsättningen kan hålla sig med en egen meterprototyp.

Precisionen, som uppges till 1:10⁸, är konservativt uppskattad; i själva verket har man senare vid mätningar på byrån uppnått en precision av ca 1:10⁹, vilket följaktligen med två storleksordningar överträffar den som kunde uppnås med den gamla meterprototypen. Den internationella kommittén har efter ytterligare utredningar funnit, att inga andra metoder såsom atomstrålar och laserstrålar är bättre än kryptonlampan enligt de givna specifikationerna. Såsom sekundära spektroskopiska standarder har kommittén 1963 utvalt ytterligare fyra linjer i krypton-86, fyra i kvicksilver-198 och fyra i cadmium-114. Dessa linjers våglängder kan med liknande specifika-

tioner erhållas med en noggrannhet av 2:10⁸ för ⁸⁶Kr, 5:10⁸ för ¹⁹⁸Hg och 7:10⁸ för ¹¹⁴Cd.

MASSMÄTNING

Massenheten är fortfarande den kilogramprototyp av platina-iridium ($l=d=39$ mm) som den första generalkonferensen beslöt 1889 och som förvaras vid BIPM. Det förefaller inte möjligt att ersätta den — liksom normalmetern — med en atomär, oförstörbar prototyp. Till skillnad från längd, där mikroskopiska och makroskopiska storheter kan jämföras med en utomordentlig precision med interfotometriska metoder, är det inte möjligt att slå en praktiskt brukbar brygga mellan atomära och vägbara massor som medger tillräckligt hög noggrannhet. För närvarande kan arkivkilot jämföras med andra prototyper, t. ex. dess sex *témoins* och tre arbetsprototyper vid byrån eller olika länders prototyper, med en noggrannhet av ca 0.01 mg, dvs. 1:10⁸. En nyligen införd förbättring synes ge möjligheter till en framtida precision av några tusendels mg. Luftens upptryck utgör den största korrektionen och beror på luftens densitet och massornas volymer. Densiteten fås från lufttrycket, temperaturen och luftfuktigheten; volymen från upptrycket i vatten, som kan bestämmas på ca 1:10⁵. Vid precisionsvägningarna är det väsentligt att vikternas ytor äro synnerligen väl putsade. Ett främmande skikt över viktens yta på endast 10 Å ändrar massan med 0,01 mg! Man har funnit att den mest effektiva rengöringsmetoden är att spruta en ångstråle av dubbelt destillerat vatten över ytan. Själva kilogramprototypen har endast använts två gånger, nämligen 1889 och 1946, för att inte utsätta den för onödig påverkan. T. o. m. prototypens 6 »temoins» används endast i undantagsfall. Helt nyligen togs dessa fram för en

kontroll av byråns 3 arbetsvikter som vid sista interkomparationen visade en inbördes skillnad på ca 0,030 mg. Orsaken visade sig vara ytskikt.

»Massa» och »vikt» är i svenska språket samma begrepp. »Tyngd» å andra sidan är den *kraft* varmed kroppen dras mot jorden och fås följaktligen genom att multiplicera massan med tyngdkraftens acceleration g vid orten i fråga, varvid tyngden blir uttryckt i newton. Då det kan vara onödigt att använda två olika ord för samma begrepp bör ordet vikt som synonym till ordet massa helst undvikas, i all synnerhet som det likartade ordet »weight» på engelska betyder tyngd. g ingår i definitionen av olika fysikaliska storheter och speciellt är definitionen på amperen, som realiseras i en strömvåg (se nedan), direkt beroende av g . Vid den tredje generalkonferensen (1901) beslöts att för g använda värdet 9,80665 ms^{-2} . En särskilt noggrann absolut bestämning av g gjordes 1906 i Potsdam och denna har därför fått tjänstgöra som bas i det g -system som senare upprättats över olika geografiska platser. För nybörjarna på 2-betygslaboratoriet kan det vara tankeväckande att höra att denna verkligt noggranna mätning av g gjordes med hjälp av den för alla nutida laboranter så fruktade prøvostenen reversionspendeln! Emellertid visar nyligen gjorda mätningar vid BIPM samt vid NBS och NPL att Potsdamvärdet måste sänkas något, ca $18 \cdot 10^6$. För närvarande pågår en nybestämning av g på byrån med hjälp av en ny metod som är ca 100 ggr noggrannare, dvs. $1 \cdot 10^7$, eventuellt ännu bättre. Metoden grundar sig på



Fig. 12

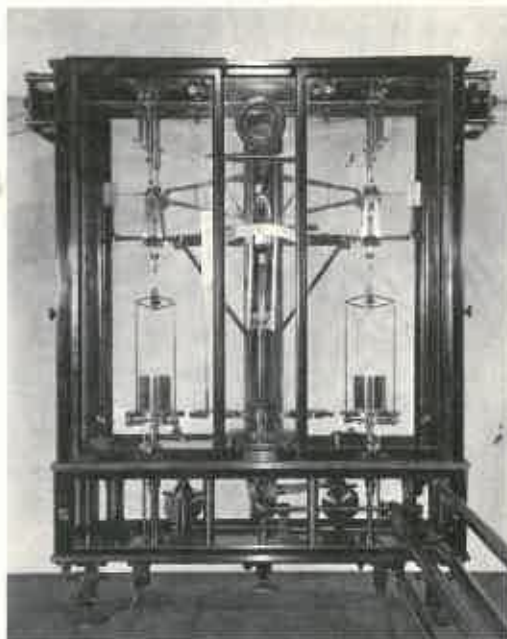


Fig. 13

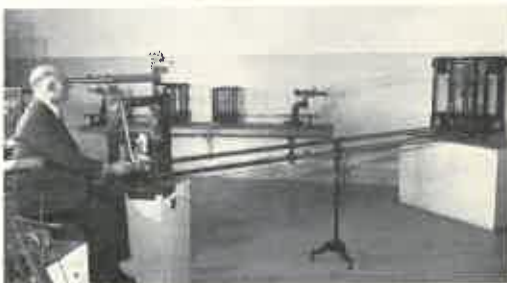


Fig. 14

Fig. 12. Kilogramprototyper, som de förvaras i källarvalvet vid BIPM (till vänster) och som de monteras vid transporter till andra metrologiska institutioner (till höger).

Fig. 13. Rueprecht's våg för vägning av kilogramprototyper. Precisionen är ca $1:10^6$ vid 1 kg.

Fig. 14. Precisionsvägningar kräver stor mätteknisk skicklighet och förutsätter omfattande arrangemang.

ytterst noggranna interferometriska mätningar av en spegelförsedd mätkropp, som kastas uppåt i vakum och därefter får falla. Tidpunkterna för kroppens passage av några horisontella lägen kan härigenom göras med en noggrannhet som ligger omkring 5 ns. Totala kasttiden rör sig om 0.6 s.

Principen för interferometrisk precisionsmätning av g framgår av fig. 15. Mätkroppen kastas i vakum uppåt och får sedan falla. Tiderna T och T' då kroppen passerar de två horisontella lägena mätes interferometriskt med hjälp av en fotomultiplikator. Höjdskillnaden l utgöres av en längdetalong, som likaledes uppmätts interferometriskt. g erhålles ur

$$g = \frac{8l}{T^2 - T'^2}$$

$$\text{Mätvärdena är: } \begin{cases} l = 40 \text{ cm} \pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ cm} \\ T = 0.6 \text{ s} \pm 2 \cdot 10^{-9} \text{ s} \\ T' = 0.2 \text{ s} \pm 5 \cdot 10^{-9} \text{ s} \end{cases}$$

Fig. 16 visar det experimentella arrangemanget. De två horisontella planen i föregående figur definieras av speglarna M_1 och M_2 som genom Michelsoninterferometerens stråldelare svarar mot samma avstånd i strålgången nedåt. Ljusstrålen som går genom stråldelarna reflekteras mot innerväggen av mätkroppen. Denna är en trieder, bestående av tre ortogonala speglar. Den uppi från inkommande vertikala ljusstrålen lämnar av geometriska skäl triedern efter tre successiva reflektioner mot dess väggar i en vertikal riktning uppåt och reflekteras sedan mot en fast spegel N . Den återvänder sedan samma väg och bringas att interferera med strålen som reflekterats mot spegeln M_1 respektive M_2 . Interferensen iakttages med fotomultiplikatorn till höger. Interferometern belyses med vitt ljus. Fotomultiplikatorn mottar en akromatisk vit ljusfrans endast när vägddifferensen mellan de två strålgångarna i

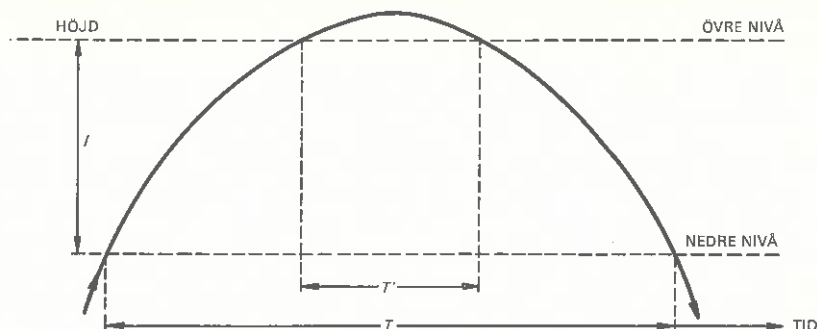


Fig. 15

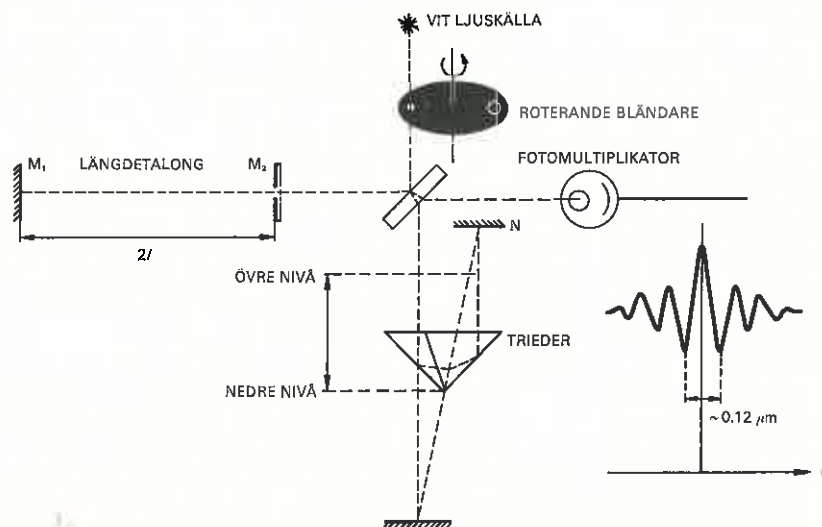


Fig. 16

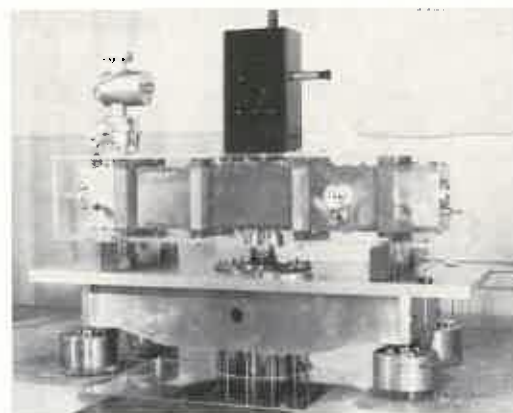


Fig. 17

Fig. 15, 16. Principen för interferometrisk precisionsmätning av g .

Fig. 17. Den interferometriska apparaturen för uppmätning av g vid BIPM.

interferometern är noll, dvs. när symmetrilinjen från N genom triederns spets är optiskt konjugerad till M_1 (respektive M_2) i förhållande till stråldelaren. I detta ögonblick visar strömmen i fotomultiplikatorn en variation som framgår av den infällda kurvan. Toppen på linjen svarar emot det ögonblick då triederns spets passerar det ena av de två horisontella lägena i föregående principfigur. M_1 respektive M_2 mottar ljus separat genom att den roterande skivan mellan den vita ljuskällan och stråldelaren är försedd med dels ett enkelt hål som ger reflektion vid M_1 , dels ett ringformigt hål som ger reflektion vid M_2 . Skivans rotation synkroniseras med mätkroppens rörelse så att M_1 respektive M_2 belyses ungefär i de undre respektive övre lägena. Mätprecisionen i distansen M_1M_2 , dvs. $2l$ är lika med precisionen i längdets definition $\sim 1:10^8$. Precisionen i tidsmätningen är ungefär lika god. Efter korrektion av vissa systematiska fel, särskilt på grund av mikroseismiska störningar, torde felet i g ligga mellan $1:10^7$ och $1:10^8$. Metoden har föreslagits av BIPM:s förre chef Dr. Ch. Volet och den första precisionsmätningen genomfördes nyligen på byrån.

TIDSMÄTNING

Den tredje grundstorheten i mks-systemet — sekunden — har haft en särskilt stark förankring i naturen redan på ett tidigt stadium, eftersom all tidsmätning på ett naturligt sätt baserats på astronomiska data, som med skäl kunde förutsättas vara oföränderliga. Tidsdefinitionen var ursprungligen baserad på jordrotationen kring den egna axeln och ända fram till 1956 var det »medelsoltiden», dvs. den genomsnittliga tiden för solpassagen vid Greenwichmeridianen, som utgjorde grunden för den s. k. »universella» tiden.

Sekunden definierades som $1/86\,400$ av längden av ett medelsoldygn. Den celesta mekanikens lagar angav att jordrotationen borde vara utomordentligt konstant; endast en miljondels sekund kunde medelsoldygnen ändras per århundrade enligt teorin. Mycket noggranna observationer som företogs under en följd av år av jordens, månens och Merkurius' banor visade att den ideala teorin slog slint: dygnet ökade i själva verket i genomsnitt $0,00164$ sekunder per århundrade på grund av den energiförbrukning som tidvattensfenomenet kräver av jordrotationen. Härtill kommer emellertid också oregelbundna variationer, vars orsaker inte är klarlagda, och ytterligare säsongvariationer av meteorologiskt ursprung. Totalt kan dygnsvariationerna under en följd av år uppgå till $1:10^7$. De oregelbundna variationerna kräver korrektioner på omkring ± 30 sekunder under ett decennium.

1960 beslöt den 11:te generalkonferensen för mått och vikt på förslag av den internationella kommittén att överge den tidigare sekunddefinitionen och i stället basera den på jordens rotation omkring solen, som kan förutsättas vara en avsevärt noggrannare tidsmätare. Definitionen blev följande: »En sekund är bråkdelen $1/31\,536\,925,9747$ av det tropiska året vid tidpunkten årsskiftet 1899/1900, efemerid tid.» Det »tropiska» året avser den tid det tar för solen att röra sig ett varv i förhållande till vardagjämningspunkten. Det tropiska årets längd minskar med $0,53$ sekunder per århundrade och kan beräknas enligt en enkel formel. Dess längd vid den i definitionen nämnda tidpunkten är 365 dygn, 5 timmar, 48 minuter, $45,9747$ sekunder, vilket motsvarar ovannämnda bråkdelen. Precisionen i sekundsangivelsen enligt 1960 års definition är väsentligen beroende av själva observationsnoggrannheten. Genom att observera månens ställning under något år kan noggrannheten i tids-

mätningen drivas så långt som till $3 \cdot 10^9$, vilket ju är en avsevärd förbättring i förhållande till den tidigare definitionen.

Många skäl, bl. a. rent praktiska, talar trots allt för att denna i och för sig noggranna astronomiska tidsdefinition snarast bör ge plats för en annan, atomär sådan. Under de senaste åren har de s. k. atomklockorna visat sig besitta utomordentliga förutsättningar att överta rollen som tidsstandarder. Redan ett kvartsur, som baserar sig på en kvartskristalls egenfrekvens och följaktligen inte är något atomur i egentlig mening, kan under gynnsamma yttre betingelser (konstant temperatur etc.) få en frekvensstabilitet på $5 \cdot 10^9$ under perioder på dagar eller någon månad. Efter denna tid kan frekvensen råka ändras något beroende på åldringsfenomen i kristallen. Annorlunda förhåller det sig med atom- eller molekylklockor. Deras frekvenser är absoluta och oföränderliga och följer strikt kvantmekanikens enkla och oåterkalleliga lagar.

Utvecklingen började med ammoniaklockan omkring 1945. Molekylen NH_3 är uppbyggd som en pyramid och om molekylen tillföres en strålning med frekvensen 24 000 MHz börjar kväveatomen att oscillera genom det plan som definieras av de tre väteatomerna, ungefär som man bucklar till ett burklock i två lägen, ett konvext och ett lika konkavt. Denna s. k. inversionsfrekvens får styra en sändare, som härigenom stabiliseras till denna frekvens. Noggrannheten beror givetvis på linjebreddens, som i sin tur är beroende av en lång rad faktorer, såsom Dopplerbreddning etc. Av olika orsaker var det inte möjligt att driva noggrannheten med den ursprungliga ammoniaklockan längre än till ca $1 \cdot 10^9$, och eftersom andra atomur ger avsevärt högre precision är det ursprungliga ammoniakuret inte längre av intresse som tidsstandard.

Subkommittén för tidsmätning inom internationella kommittén för mått och vikt har sär-

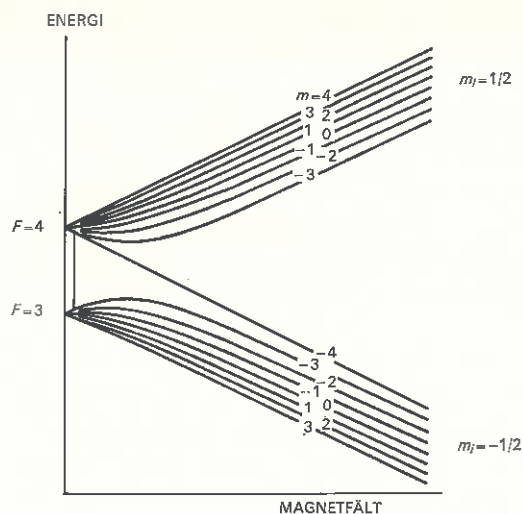


Fig. 18. Energivådiagram för cesiumatomen ($I = \frac{1}{2}$, $J = \frac{1}{2}$) i ett yttre magnetfält. På grund av växelverkan mellan kärnans och elektronernas spinn fås utan yttre fält en uppdelning i två tillstånd med totala spinnet $F=4$ resp. $F=3$. Dessa nivåer delas upp ytterligare i ett yttre magnetfält. I svagt fält är dock energien för atomer med $m=0$ nästan oberoende av fältstyrkan. I cesiumklockan utnyttjas just en övergång mellan dessa båda nivåer och övergången är i figuren utmärkt med en pil. Energin i ett starkt yttre fält beror nästan helt av m_j . Detta förklarar varför en atomstråle i ett starkt yttre inhomogent fält delas upp i två komponenter.

skilt rekommenderat studiet av tre andra typer av atomur som möjliga tidsstandarder, nämligen cesium-, tallium- och väteuren. Läget just nu är sådant att cesiumuret har fördelar framför talliumuret men att väteuret kommer att bli det helt överlägsna — när det är helt färdigutvecklat. Detta kan möjligen ta ytterligare något år. Inom den fysikaliska mätforskningen är den precision som utvecklats under detta arbetes gång något tämligen enastående och det är därför värt att beröra dessa frågor närmare här.

En atoms grundtillstånd och olika exciterade nivåer karakteriseras som bekant av ett antal kvanttal. För t. ex. Cs (analogt gäller detta också för H och Tl) är det grundtillståndet och dess hyperfinstruktur som utnyttjas i atomuret. Hyperfinstrukturen är förorsakad av valenselektronens växelverkan med atomkärnan på sådant sätt att dess magnetiska dipolmoment (eller spinn $= \frac{1}{2}$) antingen är parallellt eller antiparallellt med kärnans magnetiska dipolmoment (eller spinn =

7/2). Det resulterande kvanttalet F för hela atomen blir då $7/2 \pm 1/2 = 3$ eller 4. I ett yttre pålagt magnetfält delar vart och ett av dessa atomära subtillstånd upp sig i flera komponenter beroende på atomens orientering i fältet. Kvanttalet m_F

redogör för denna inställning. För inställningen $m_F = 0$ är atomens energi för *svaga* fält oberoende härav.

För de tre olika atomuren är det följande hyperfinstrukturövergångar som utnyttjas:

Fig. 19. Principskiss av cesiumklockan. Från ugnen sändes en stråle av cesiumatomer med termisk hastighet genom ett starkt inhomogent magnetfält. Där delas strålen upp i två komponenter, av vilka den ena, som bl. a. innehåller atomer i tillståndet $(F, m) = (4, 0)$ fortsätter in i ett mycket svagt homogent yttre fält. I de båda kaviteterna som matas i fas från samma oscillator introduceras övergång till tillståndet $(3, 0)$. Atomerna passera ytterligare ett inhomogent magnetfält där de som undergått den radiofrekventa övergången böjs mot det starka fältet och träffa detektor. En signal från denna får stabilisera oscillatorn som kommer att ge cesiumklockans frekvens.

Fig. 20. Det första cesiumuret, konstruerat vid NPL i England. Man utnyttjar en atomstråle av cesium som får passera ett radiofrekvent fält. Vid en frekvens på ca 9 192 MHz kastar valenselektronen om sin spinnriktning och denna »resonans» får i sin tur styra radiofrekvensen. Frekvensstabiliteten är ca $1:10^{11}$.

	J	I	$(F; m_F) \rightarrow (F; m_F)$	Frekvens (MHz)	Energi (eV)	Våglängd (cm)
Cs ¹³³	1/2	7/2	(4; 0) → (3; 0)	9192	$3,8 \times 10^{-5}$	3,3
H ¹	1/2	1/2	(1; 0) → (0; 0)	1420	$5,9 \times 10^{-6}$	21,1
Tl ²⁰⁵	1/2	1/2	(1; 0) → (0; 0)	21310	$8,8 \times 10^{-5}$	1,4

I Cs-uret åstadkommer man först en atomstråle av Cs-atomer, som får passera ett inhomogent magnetfält. Här delas atomerna upp i olika komponenter och får sedan passera ett högfrekvensfält där övergångar mellan $F=4$ och $F=3$ induceras. Ett avslutande inhomogent fält insamlar de atomer som erfarit sådana övergångar, varefter de uppfångas i en detektor. Vad som registreras är sålunda frekvensen av det fält som exakt motsvarar energiskillnaden i Cs-atomer

när valenselektronen kastar om sin spinnriktning i förhållande till sin kärna. Intensiteten av den genomsläppta strålen är ytterst känsligt beroende av en liten frekvensändring i fältet. Man ställer in på intensitetsmaximum och detta får sedan styra frekvensen av sändaren, som härigenom kan stabiliseras till en noggrannhet som sättes av ifrågavarande övergångs linjeskärpan är beroende av osäkerhetsrelationen $\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$ på så sätt att ju längre tid atomen till-

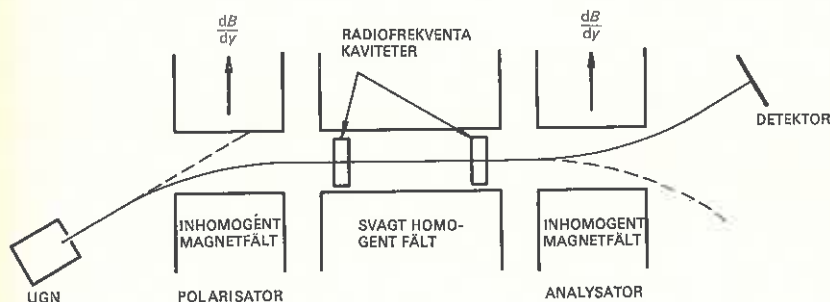


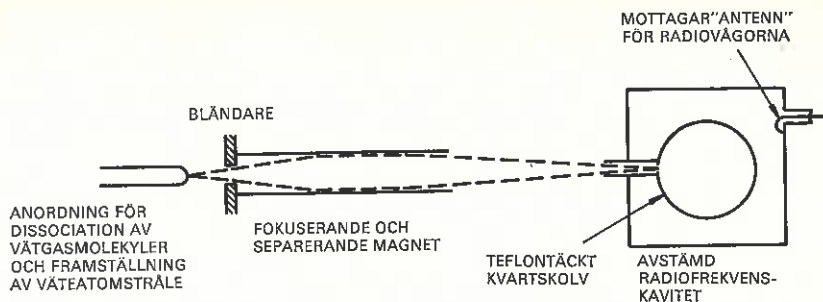
Fig. 19

Fig. 20



bringar i högfrequensfältet ju smalare blir linjen. Om detta göres 1 m (i själva verket använder man två högfrequensspolar på 1 meters avstånd) blir linjebreddens ca 200 Hz. Eftersom resonansen inträffar vid ca 10^{10} Hz har man en relativ linjebredd på $2:10^8$. Tack vare ett gott signal-brusförhållande kan toppen bestämmas på ca $1:1000$ av linjebreddens och Cs-uret kan därför ge en precision på ca $1:10^{11}$.

I Cs-uret åstadkommes således övergångarna mellan de två energinivåerna (4;0) och (3;0) med ett yttre pålagt rf-fält. I ett väteur arbetar man med en självsvängande kavitet, vilket åstadkommes genom att väteatomer i det *högre* energitillståndet passerar ett inhomogent magnetfält (av sexpolstyp) och fokuseras in i en kvartsbehållare inuti kaviteten, där de övergår till det lägre energitillståndet genom stimulerad emission. Man har med andra ord en *maser*. En förutsättning för att denna skall självsvänga är att tillförd energi är \geq avgiven energi, vilket ställer vissa krav på bl. a. atomstrålens minimiintensitet (ungefär 10^{12} atomer s^{-1}). Minimiintensiteten beror bl. a. på *relaxationstiden* för en atom i behållaren, dvs. tiden innan atomens tillstånd i medeltal ändras på något sätt. Även linjebreddens som bestämmer urets precision beror av relaxationstiden, på samma sätt som Cs-urets skärpa beror på den tid som Cs-atomerna befinner sig i högfrequensfältet. Relaxationstiden beror av en rad samverkande faktorer. Dels kan atomen lämna behållaren genom ingångshålet; dels kan vid de upprepade stötarna mot väggen i behållaren atomen komma något litet ur fas med svängningen i kaviteten eller t. o. m. reagera kemiskt med väggmaterialet. Den förstnämnda effekten ger dessutom en ytterst liten förskjutning av linjens läge, som dock kan beräknas mycket noga. En annan relaxationsmekanism är spinnbyte vid kollision mellan väteatomer i behållaren. Med en kvartsbehållare på 10 cm diameter och invändigt



klädd med teflon, som ur relaxationssynpunkt har särskilt goda egenskaper, blir relaxationstiden ca 2 s. Detta innebär att väteatomerna studsar omkring 10^5 gånger mot väggarna innan de är ur räkningen ur masersynpunkt. Detta är ju en ofantlig distans jämfört med vad som rimligtvis kan åstadkommas med atomstråleapparater av t. ex. Cs-typen. Linjeskärpan blir också enastående i sitt slag, ca 0,1 Hz, och eftersom resonansen ligger vid 1 420 MHz motsvarar detta en relativ linjebredd av $1:10^{10}$, dvs. 200 gånger bättre än

Fig. 21. Schematisk figur över vätemasern. Väteatomerna passerar en sexpolmagnet varvid atomer i tillståndet ($F, m=1,0$) attraheras mot det svaga fältet i magnetens centrum och fokuseras in i kvartskolven i kaviteten. Där övergår atomerna till tillståndet (0,0) under ut-sändande av strålning med frekvensen $\Delta\nu$ (jfr fig. 19), stimulerade av den radiofrekventa strålningen i kaviteten.

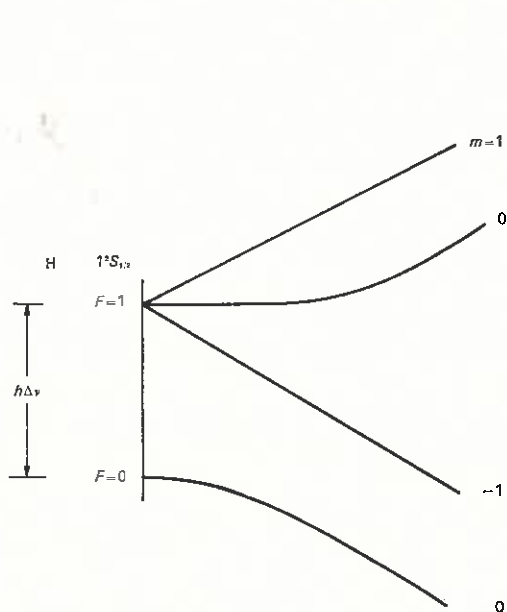


Fig. 22. Energiniivådiagram för väteatomen i tillståndet $1^3S_{1/2}$. Det visar energien som funktion av ett yttre magnetfältets styrka. Utan yttre fältet fås en energiseparation $h\Delta\nu$ mellan nivåerna, hyperfinkonstrukturen. Vid svagt fält är energien för de båda nivåerna med $m=0$ som synes nästan oberoende av magnetfältet, varför en övergång mellan dessa sker för en frekvens godtyckligt nära $\Delta\nu$ om fältet är tillräckligt svagt. I starkt fält ökas den ena av dessa nivåers energi med fältet. Atomer i detta tillstånd kommer därför i ett inhomogent magnetfält att attraheras av det svaga fältet, medan atomer i det lägre tillståndet attraheras av det starkare fältet. Detta förklarar hur inhomogena magnetfält kan användas att separera atomer i dessa båda tillstånd.

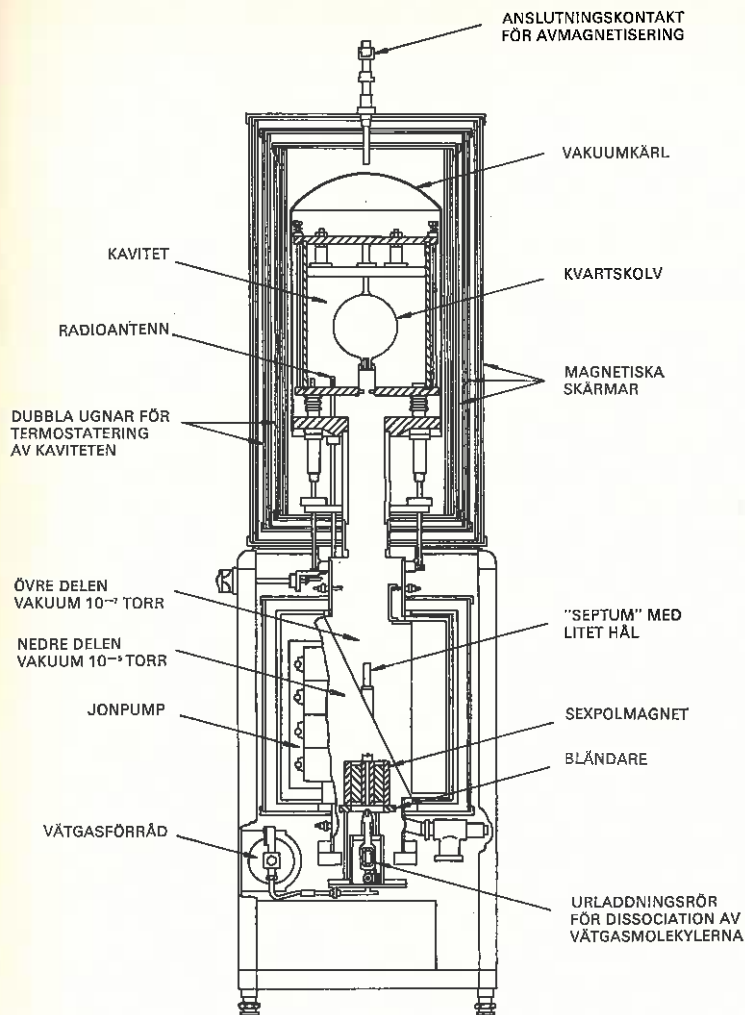


Fig. 23

Fig. 23. Tvärsektion av väteur. Vätgasmolekylen dissocieras längst ned med en radiofrekvent urladdning. Då atomerna passerat sexpolmagneten träffar de ett »septum», som sprider de icke fokuserade atomerna så att de pumpas bort och ej spridas in i kvartskolven och försämrar vakum där. Observera de magnetiska skärmarna runt kaviteten som skall minska inverkan av yttre magnetfält bl. a. jordmagnetiska fältet. Observera även termostateringen av kaviteten.



Fig. 24

Fig. 24. Fotografi av väteuret i figur 23. Instrumenteringen är som synes måttlig, främst emedan maserns frekvens är i det närmaste oberoende av yttre faktorer.

Cs-uret. Emellertid kommer vissa andra felkällor in vid bestämningen av toppläget, beroende på små frekvensskift. Det som förorsakas av stötarna mot väggarna beror linjärt av antalet stötar, dvs. är omvänt proportionellt mot behållarens dimensioner. Genom att variera dessa kan skiftet bestämmas experimentellt. För en 15 cm behållare är frekvensskiftet $2 \cdot 10^{11}$ och kan bestämmas på 1% när. Vidare fås skift på grund av 2:a ordningens Dopplereffekt (1:a ordningens effekt försvinner). Detta skift är $1,4 \cdot 10^{-13} T$ och om temperaturen stabiliseras på $0,01^\circ\text{C}$ blir det försumbart. Ett annat frekvensskift orsakas av Zeemaneffekten på hyperfinstrukturen. Den använda övergången ($F=1; m_F=0$) \rightarrow ($F=0; m_F=0$) är i enlighet med det föregående fallet i första ordningen oberoende av yttre magnetfält, men i andra ordningen beroende av B så att skiftet blir $= 3,9 \cdot 10^{-6} \cdot B_0 \cdot \Delta B_0$. Om B_0 är 10^{-3} G måste dess värde vara känt på 1% om felet skall bli $< 10^{-14}$. För en precision av detta slaget krävs som synes extraordinära försiktighetsmått, dock inte värre än att de kan realiseras med känd teknik. $1:10^{13}$ synes icke erbjuda några oöverstigliga svårigheter att uppnå i långtidsstabilitet och under kortare tider har det t. o. m. varit möjligt att uppnå $4:10^{14}$.

Atomuren, särskilt vätemasern, karakteriseras uppenbarligen av en enastående frekvensstabilitet och precision, långt bättre än den astronomiska tidsdefinitionen förmår åstadkomma. För att knyta samman atomtid och astronomisk tid med varandra har en mycket omfattande serie av undersökningar gjorts för att bestämma frekvensen av Cs-uret uttryckt i den tidigare astronomiska definitionen av sekunden. Resultatet erhöles 1958 och gav att Cs-frekvensen är $9\,192\,631\,770 \pm 20$ Hz, dvs. antalet perioder per sekund efemeridtid, i enlighet med sekunddefinitionen av 1960. Med anledning härav föreslog den internationella kommittén för mått och vikt generalförsamlingen

vid dess tolfte möte 1964 att Cs-tiden skulle temporärt användas som ett alternativ till astronomisk tid. Man ville icke vid detta tillfälle helt överge den astronomiska definitionen till förmån för Cs-tiden därför att man avvaktar vätemaserns definitiva genombrott. I sitt uttalande fastställer den internationella kommittén att »*standarden som skall användas är övergången mellan hyperfinnivåerna $F=4, m_F=0$ och $F=3, m_F=0$ av grundtillståndet $^2S_{1/2}$ för cesium-133 atomer, ostörd av yttre fält och att värdet $9\,192\,631\,770$ Hz skall utgöra denna övergångs frekvens*».

Helt nyligen har N. Ramsay publicerat en ytterst noggrann undersökning av vätemaserns frekvens i förhållande till Cs-frekvensen. Om den sistnämnda fastställs till exakt ovanstående värde blir vätemaserns frekvens $= 1\,420\,405\,751,800 \pm 0,028$ Hz. Om inget oförutsett inträffar torde denna långa sifferkonstellation bli framtidens tidsdefinition.

Det kan tilläggas att tillkomsten av de nya atomuren skapar intressanta nya förutsättningar att angripa en rad vetenskapliga problem. Olika relativitetseffekter blir bl. a. åtkomliga för ett ingående studium, särskilt om man utnyttjar de möjligheter som instrumentburna satelliter ger. Genom att jämföra observationer av astronomisk tid och atomtid under en följd av år bör det också vara möjligt att ta ställning till vissa kosmologiska teorier som framlagts. En sådan går ut på att naturkonstanterna avseende gravitationskrafter och elektromagnetiska krafter kanske varierar i tiden i förhållande till varandra. Eftersom den astronomiska tiden är baserad på gravitationskrafter och atomär tid på elektromagnetiska krafter skulle denna teori kunna prövas genom att parallellt observera de båda tidmätarna under ett antal år. Enligt teorin skulle förhållandet mellan de båda tiderna variera som $1/T_0$ per år. T_0 = universums ålder och är ungefär 10^{10} år. Efter ca 10 år skulle den föreslagna effekten visa

Coulombs lag:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}$$

$$\epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$$

Biot-Savarts lag:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{s} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

Gauss sats:

$$\epsilon_0 \iiint \mathbf{n} \cdot \mathbf{F} ds = q$$

Ampères lag:

$$\frac{1}{\mu_0} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = I$$

$$\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$$

Faraday's induktionslag:

$$U = - \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ m/s}$$

Maxwells ekvationer:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

$$\text{div } \mathbf{H} = \mathbf{q}_m$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \mathbf{q}$$

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \\ \mathbf{B} = \mu_0 \mu_0 \mathbf{H} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\mathbf{D} - \mathbf{P}) \\ \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \mathbf{D} \end{cases}$$

$$\mathbf{i} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\text{div } \mathbf{i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$\frac{dW}{dv} = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}$$

sig med de metoder för astronomisk och atomtidmätning som man nu förfogar över.

ELEKTRISKA MÄTNINGAR

Det är förklarligt att det varit mycket svårare att komma tillrätta med enheter och måttssystem för de elektriska fenomenen, som är betydligt mera komplicerade, än för de mekaniska. Det är också tämligen sent som man lyckats få de elektriska enheterna anslutna till de mekaniska grundstorheterna på ett fullt tillfredsställande sätt. I den vetenskapliga och tekniska litteraturen, i handböcker och skolböcker finnes fortfarande en brokig provkarta på konkurrerande system som är kvarlevor från äldre tider. Utvecklingen tog sin början när Coulomb år 1785 på empirisk väg lyckades ställa upp sin berömda lag. Örsted fann 1820 inverkan av en ström på en kompassnål och samma år fann Biot och Savart genom sina mätningar att fältet från en rak ledare var omvänt proportionellt mot avståndet från ledaren. Då redogörelsen presenterades i den franska vetenskapsakademien uppställde Laplace vid den följande diskussionen den formel som gäller för ett infinitesimalt strömelement. Vid samma tid utförde Ampère, Gauss och Weber (de två sistnämnda i samarbete) en serie försök av grundläggande betydelse för de elektriska och magnetiska fenomenen. 1827 publicerade Ohm sin lag och 1830 Faraday sina försök om induktionsverkan. Lenz fann 1834 att den inducerade strömmens riktning är sådan att den genom sin verkan vill motverka pålagda förändringar. 1851 införde Weber de två elektriska måttssystemen, det elektrostatiska, e.s.e., respektive det elektromagnetiska, e.m.e., som anslöt sig till det mekaniska systemet. Weber mätte bl. a. en och samma storhet i de två systemen och fann ett

förhållande dem emellan som numeriskt skiljde sig från ljushastigheten med endast 3% (1856). Det var från sådana mätningar jämte mätningar av ljushastigheten och dielektricitetskonstanten och brytningsindex i olika material som Maxwell upptäckte ljusets elektromagnetiska natur (1865).

I mitten på 1800-talet började elektriciteten att utnyttjas tekniskt (bl. a. telegrafen) och i den elektriska mättekniken infördes olika former av praktiska elektriska standarder. På förslag av Siemens 1860 utnyttjades bl. a. som motståndsnormen en kvicksilverpelare av 1 meters längd och 1 mm² tvärsnitt. Daniellelementet (omkring 1,08 V) användes ofta som spänningsreferens. 1861 tillsattes i England en kommitté av British Association for the Advancement of Science som skulle utreda de elektriska grundenheterna ur vetenskaplig och praktisk synpunkt. Denna kommitté har spelat en mycket viktig roll och genom dess framsynthet och dess utomordentliga kompetens — lord Kelvin och Maxwell voro de ledande — lades en väsentlig grund till det elektriska måttssystemet och dess senare anslutning till det mekaniska — observera t. o. m. före meterkonventionens realiserande. De föreslog att för praktiskt bruk skulle enheterna volt, ohm och ampere användas och anknöt dessa enheter till Webers e.m.e. genom cgs enheter (Weber hade mm, mg och sekund) så att 1 volt = 10⁸ e.m.e., 1 ampere = 0,1 e.m.e. och 1 ohm = 10⁹ e.m.e. Som praktisk motståndreferens föreslogs 1 siemensenhet, dock 104,8 cm lång, och som spänningsreferens Daniellcellen på 1,08 V. Motstånd- och spänningsnormaler började genom kommitténs försorg att tillverkas. Successivt ökades mätnoggrannheten och de praktiska referensernas dimensioner och värden måste ändras några gånger för att få bästa möjliga anslutning till de absoluta definitionerna. Genom bildandet av International Electrotechnical Commission (IEC) blev frågan om de elektriska enheterna en internationell angelägenhet

och vid en kongress i London 1908 fastställdes det s. k. *internationella systemet*. 1 internationell ohm definierades som resistansen hos en kvicksilverpelare 106,300 cm lång och med massan 14,4521 g och 1 internationell ampere som den ström som utfäller silver med en hastighet av 0,00111800 g/s från en lösning av silverniträt. Lord Rayleigh och Kohlrausch utförde mätningarna.

Olika länders nationella mätlaboratorier skaffade sig i anslutning till genomförandet av det internationella elektriska systemet egna noggrant tillverkade resistansnormaler och spänningsnormaler, de senare i form av en grupp Weston-celler. Dessa normaler kunde då och då jämföras inbördes och dessutom med andra mät-

laboratoriers. Genom beslut 1921 skulle internationella kommittén för mått och vikt svara även för de elektriska normalernas vidmakthållande och de internationella kompareringarna har därför skett genom byråns försorg.

Internationella kommittén började omgående efter 1921 att förbereda övergången från de internationella elektriska enheterna till *de absoluta*. Genom andra världskriget blev det formella beslutet något uppskjutet och först 1948 kunde generalkonferensen (den nionde) fastställa de nya definitionerna. *En ampere definierades som »storleken av en konstant elektrisk ström som, när den genomflyter två raka, oändligt långa ledare med tvärsnitt av försumbar utsträckning, placerade parallellt i tomrum på en meters avstånd från*

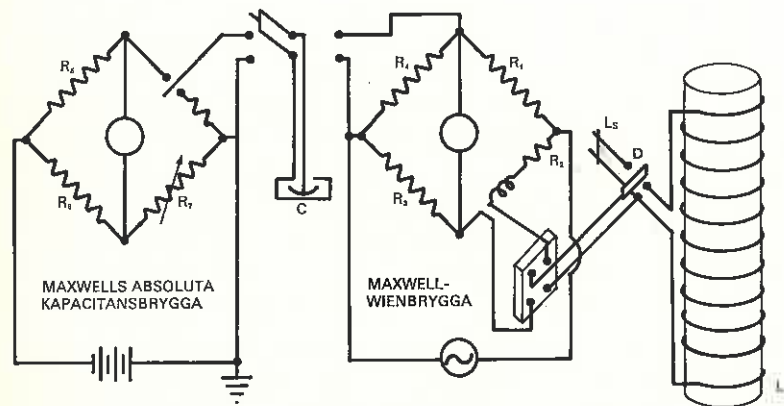
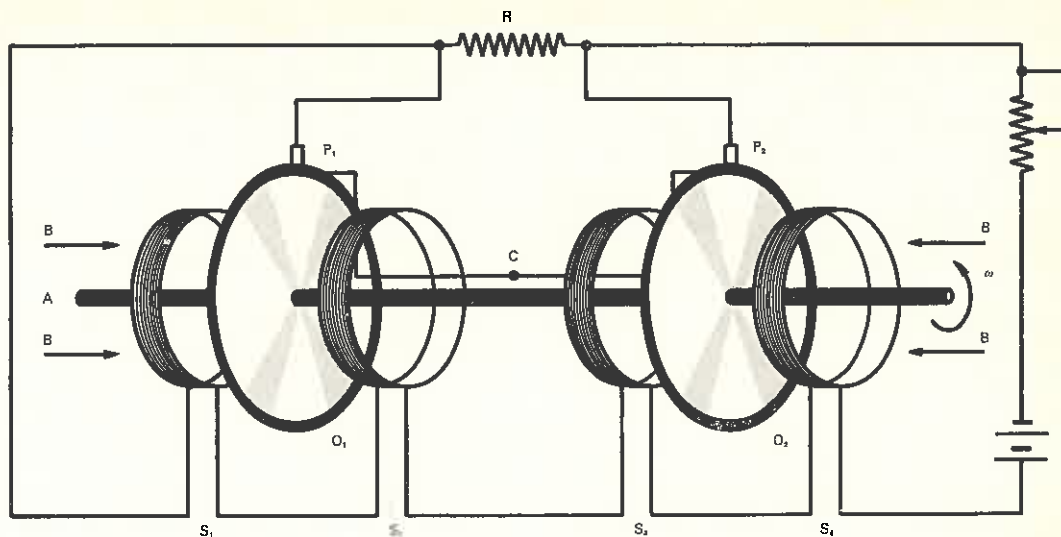


Fig. 25. Figuren visar den tvåstegskrets som användes vid N.B.S. för absolutbestämning av resistans. Det första steget, som består av en Maxwell-Wien brygga, användes för att med hög precision bestämma relationen mellan värdet på induktansen L , en stor luftkondensator C , och de två resistanserna R_1 och R_3 . Kontakten D användes för en grundavläsning, varvid en mindre, från de geometriska dimensionerna beräknad spole L_0 inkopplas i stället för

L . Kondensatorn C kopplas sedan till en Maxwells absoluta kapacitansbrygga i vilken kondensatorns värde bestämmas med avseende på resistanserna R_5, R_6 och R_7 , samt antalet upp- och urladdningar per sekund som produceras av brytaren K . Denna brytare är kopplad till den kvartsoscillator som utgör N.B.S. frekvensstandard, vilket möjliggör eliminerandet av tiden. Jämförelse av resistanserna R_5, R_6 och R_7 ger absolutvärdet.

Fig. 26. Schematisk uppställning av Lorenz' metod för absolutbestämning av resistans. Genom spolarna S_1 , S_2 , S_3 och S_4 passerar samma ström som passerar resistansen R vilkens absoluta resistans sökes. I det magnetfält B som genereras av spolarna roterar ringarna O_1 och O_2 kring axeln A med rotations-hastigheten ω rad/s. Spolarnas och ringarnas dimensioner har uppmätts med stor noggrannhet varför den ömsesidiga induktansen M_1 och M_2 mellan dessa kunnat beräknas med hög precision. Vid rotationen genereras en spänning i kretsen $p_1 p_2$ som balanseras av spänningen över R varvid strömmen eliminerar och sambandet mellan resistansen, induktansen och rotations-hastigheten blir $R = \omega(M_1 + M_2)$.



varandra, för varje meter av ledarna åstadkommer en kraftverkan mellan ledarna av $2 \cdot 10^{-7}$ kilogrammeter per sekundvå ($2 \cdot 10^{-7}$ newton)».

Denna typiskt begreppsmässiga definition av strömstyrkeenheten, där man inför två imaginära parallella och oändligt långa ledare, kan givetvis inte direkt realiseras i praktiken. Hur är då det verkliga tillvägagångssättet? Till att börja med kan man bestämma värdet av en resistans uttryckt i längdenheter, dvs. i absoluta enheter, genom att i en bryggkoppling jämföra resistansen med en induktans eller en kapacitans, vars impedanser kan beräknas från de geometriska dimensionerna. Den använda frekvensen innebär inga större svårigheter att bestämma. Vanliga bryggkopplingar är Maxwell-Wien-bryggan, som utnyttjas för att bestämma induktanser uttryckta i kapacitanser, eller Lorenz' metod som direkt kan jämföra en resistans med en induktans. Det finns också bryggor för direkt mätning av en resistans mot en kapacitans.

Beräkningen av jämförelseimpedansen från dess uppmätta geometriska dimensioner är givetvis grundläggande för den uppnåeliga noggrannheten av resistansens värde. Detta rent klassiska problem fick en närmast dramatisk lösning då australiensaren Lampard så sent som 1956 fann en ny metod att under vissa betingelser beräkna värdet av en kapacitans (den s. k. cylindriska korskapacitansen) som med ytterst små korrekationer ger ett nära nog exakt värde av kapacitansen (Lampards teorem). Noggrannheten är så stor (ungefär $1:10^6$) att osäkerheten i ljushastigheten blir en begränsande faktor, då man måste gå från e.s.e. till e.m.e.

Nästa steg är att — utgående från definitionen på amperen — uppmäta kraftverkan från en ström, varvid denna också får passera den tidigare uppmätta resistansen. Över denna resistans bildas då ett spänningsfall som följaktligen erhålles i absoluta enheter. Ett normalelement, exempelvis en Weston-cell, jämföres med detta spänningsfall

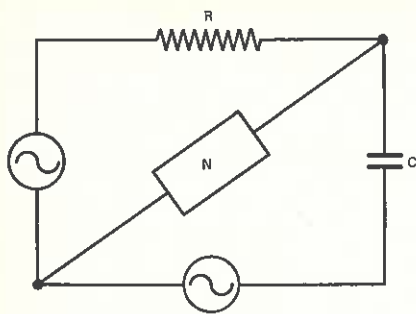


Fig. 27

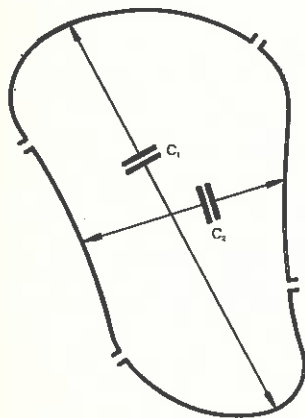


Fig. 29

Fig. 30

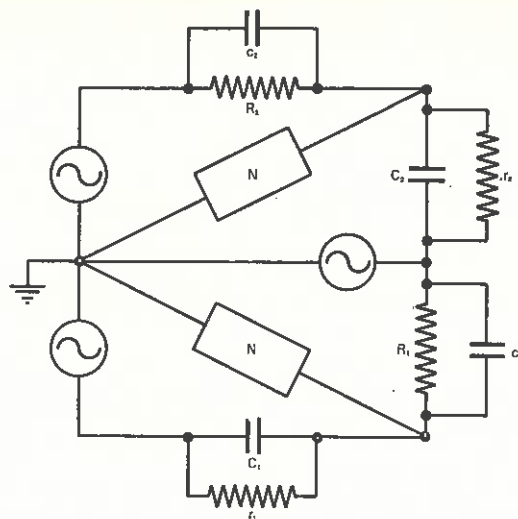
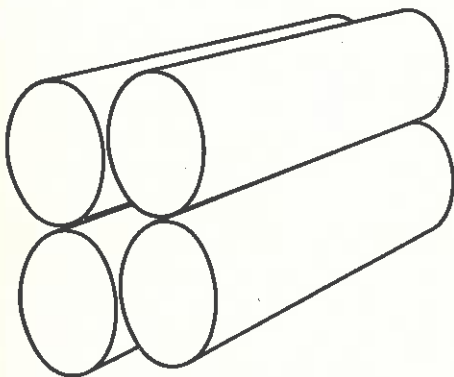


Fig. 28

och dess e.m.k. erhålles härigenom direkt i absoluta volt. Den på detta sätt bestämda spänningsnormalen jämte resistansnormalen ger tillsammans i princip möjligheten att när som helst reproducera en strömstyrka i absoluta enheter om man vid något tillfälle lyckats göra den nämnda uppmätningen av en ströms kraftverkan. Detta är långt ifrån en enkel uppgift och kräver en betydande mätteknisk och ekonomisk insats, varför endast de största mätlaboratorierna såsom NBS eller NPL gett sig i kast med uppgiften. Man utnyttjar en strömvåg (enligt Rayleigh) vars en vågskål ersatts med en strömspole koncentriskt omgiven av en fast spole. Spolarna precisionslindas med yttersta noggrannhet. De två spolarna förbindas med varandra genom specialkonstruerade tilliedningar och kraftverkan mellan de två spolarna, då en ström går genom dem plus den nämnda motståndsnormalen, uppmättes genom att belasta den andra vågskålen med kända massor. Kraftverkan kan direkt jämföras med

Fig. 27, 28. Fig. 27 visar en brygga för resistansbestämning mot en känd kondensator C . Balansvillkoret är $R = \omega C$, där C är den kända kapacitansen. Absolutvärdet av R erhålles genom bestämning av ω . Uppställning fordrar dock två växelspanningskällor som är exakt 90° ur fas samtidigt som amplituderna på spänningarna från båda generatorerna måste vara exakt lika. För att undgå denna svårighet användes en så kallad dubbelbrygga. Fig. 28 visar en sådan dubbelbrygga, där alla hjälpkomponenter för enkelhets skull borttagits. g_1 och g_2 betecknar strömläckorna i kondensatorerna C och C_2 och c_1 och c_2 strömkapacitanserna i de sökta resistanserna G_1 och G_2 .

Fig. 29. Figuren visar genomskärningen av ett godtyckligt ledande cylindriskt skal, vilket uppdelats i fyra delar genom smala isolerande gap parallella med cylinderns axel. Härvid bildas en beräkningsbar korskondensator vars kapacitans $C_m = (1n2)/4\pi^2$ e.s.e./cm. C_m är medelvärde av C_1 och C_2 . Kondensatorelektrodernas godtyckliga form gör att dessa kan väljas så att gapet mellan dem får minimal inverkan, vilket i sin tur möjliggör realiserandet av den beräknade kapacitansen.

Fig. 30. Exempel på en Lampardkondensator konstruerad av cylindriska passbitar. Randeffekterna elimineras ur bestämningen genom att kondensatorns längd varieras. För precisionsmätningar användes ett mera komplicerat system.

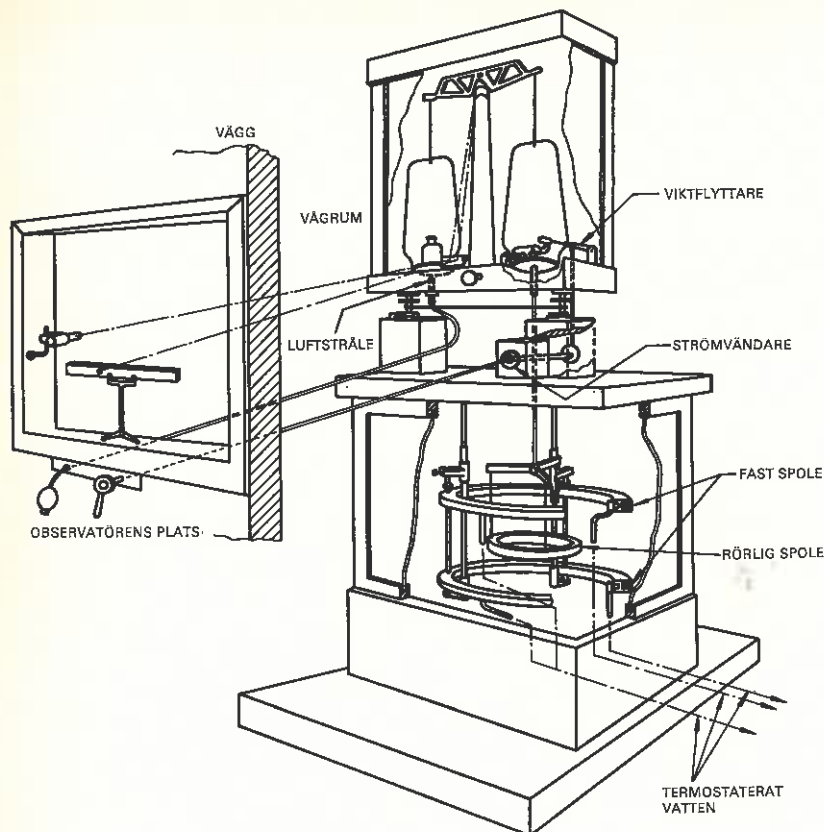


Fig. 31. Strömvåg som används vid NBS. för absolutmätning av amperen. Vid den experimentella bestämningen av krafterna mellan spolarna användes en uppställning vars utseende framgår av den schematiska ritningen. Under utvägningen av den kraft som verkar på den rörliga spolen sändes samma ström genom denna och den fasta spolen. Strömmen får passera ett normalmotstånd vars resistans är känd i absoluta enheter, varför spänningsmätningen kan utföras mot standardceller, vars elektromotoriska krafter således kan bestämmas i absoluta enheter. Dessa standardceller kan sedan användas som absoluta spänningsnormaler.

Korrektion för krafterna mellan tillledningarna göres så att spolarna bortkopplas och ledningarna kortslutes alldeles intill spolarna. Därefter utvägs kraften mellan dessa.

definitionen av amperen. Den första noggranna bestämningen utfördes av NBS 1958. Vid den internationella byrån har sedermera de olika mätlaboratoriernas resultat kunnat jämföras sinsemellan genom komparationer av de på de olika hållen erhållna värdena på normalelementen och normalresistanserna. Överensstämningen är av storleken $\approx 10:10^6$. Relativmätningarna kan göras betydligt noggrannare, dvs. $0,01-0,1:10^6$. Till felet i absolutmätningen av amperen måste läggas osäkerheten i g , eftersom man måste gå från massa till kraft vid vägningen. Man ser således att de elektriska enheterna härigenom blir direkt avhängiga av tyngdkraftens acceleration. En jämförelse mellan de internationella elektriska enheterna och de absoluta ger:

- 1 internationell ohm = 1,00049 absolut ohm
- 1 internationell volt = 1,00034 absolut volt.

Motsvarande växelströmsstorheter kan inte bestämmas med lika stor noggrannhet som i likströmsfallet. Frekvensberoendet är i själva verket betydande vilket framgår av följande tabell (R. Ohlon: Teknisk Tidskrift 1964):

Frekvens	Spänning %	Impedans %
0*	0,001	0,001***
< 50 kHz	0,01-0,02	0,01-0,02
100 kHz-30 MHz	0,1-2	1
100-1000 MHz	2-5	2
8-12 GHz	2**	1-2

* Likström. ** Effekt. *** Resistans.

Det skulle givetvis vara värdefullt om de olika ländernas mätlaboratorier kunde skaffa sig egna strömnormaler utan att behöva gå vägen över normalelement och normalmotstånd. Strömvägningen innebär en mycket omfattande undersökning av mer eller mindre engångskaraktär. Emellertid skulle man kunna utnyttja strömmens

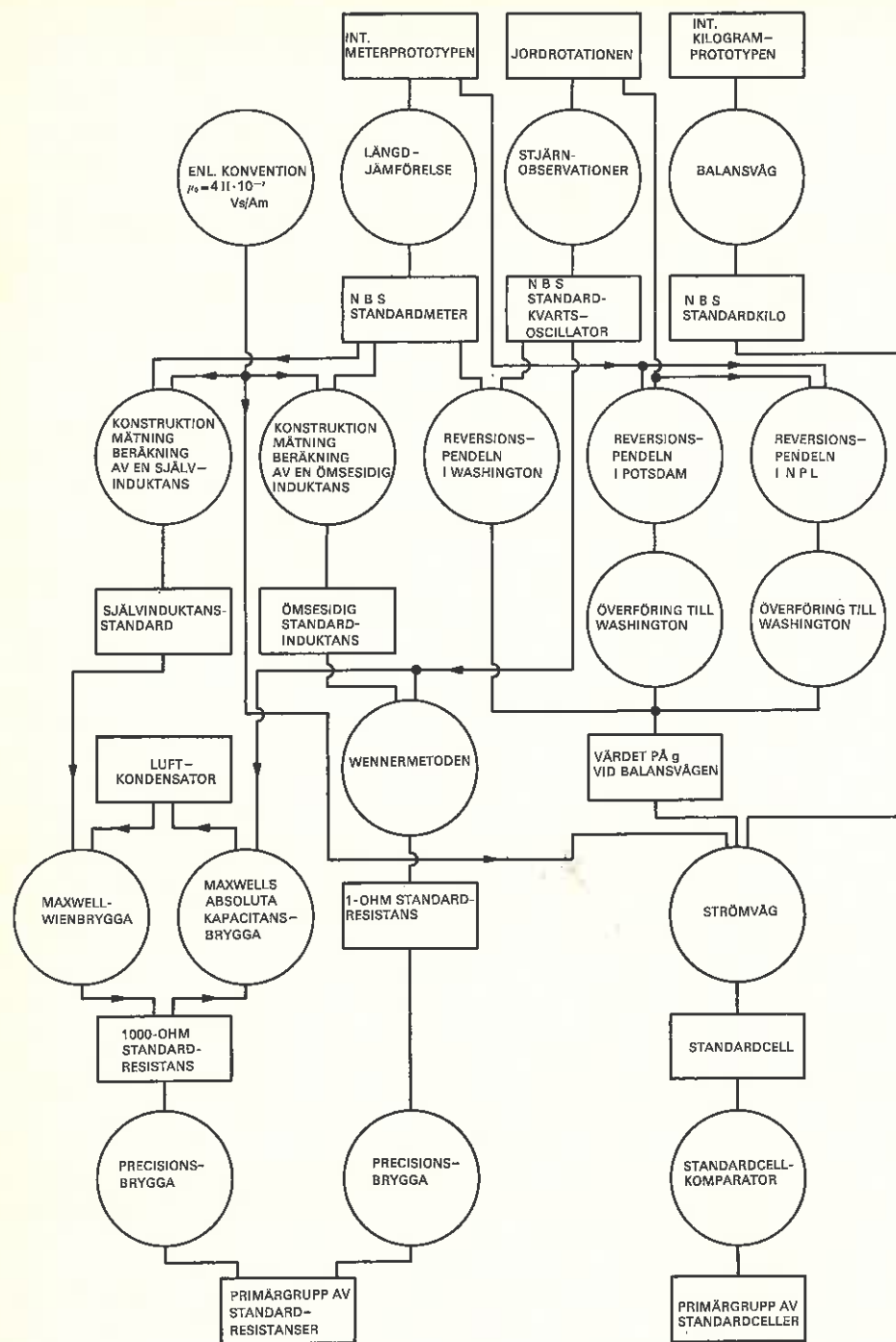


Fig. 32. Blockschemat avser att visa att de olika fysikaliska storheterna och mätningarna som utnyttjas för absolutbestämningar av elektriska enheter i realiteten står i ett komplicerat beroendeförhållande till varandra.

Rektanglarna representerar fysikaliska grundenheter och cirklarna representerar den experimentella procedur och de apparater som användes vid mätningen.

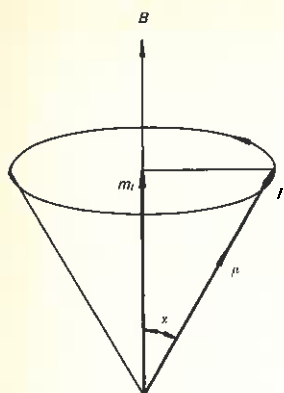


Fig. 33. En atomkärna med spinn I och magnetiska momentet μ precesserar i ett yttre magnetfält B . I 's projektion på B betecknas m_l . m_l är kvantiserat och kan anta värden mellan I och $-I$.

magnetfält till en bekväm och ytterst noggrann strömnormals. Om en liten behållare med vatten placeras i en solenoid precesserar protonens kärns-pin runt de magnetiska kraftlinjerna med en viss väldefinierad Larmorfrekvens. Med hjälp av kärnmagnetisk resonans (nmr = nuclear magnetic resonance) kan frekvensen bestämmas ytterst noggrant. Samhörande värden på magnetisk flödestäthet B och vinkelfrekvens ω_p erhålles ur relationen

$$\omega_p = \gamma_p \cdot B$$

där γ_p är protonens gyromagnetiska konstant.

Sambandet mellan atomär eller nukleär magnetism och motsvarande resonansfrekvenser framgår av följande överläggning och storhetsdefinitioner:

En atomär eller nukleär magnetisk dipol med magnetiska moment $=\mu$ som har spinnkvanttalet I precesserar omkring ett magnetfält B med en projektion av I längs efter B , kvantiserad $=m_l$. Energien är $E = -\mu B \cos \alpha = -\mu B (m_l/I)$. Energiskillnaden mellan två närbelägna energinivåer ($\Delta m_l = 1$) är $\Delta E = (\mu B/I)$. Detta energibelopp skall lämnas av det radiofrekventa fältet för att uppnå resonansvillkoret »nuclear magnetic resonance». Detta villkor ger alltså $h\nu = \mu B/I$. Atomära magnetiska dipolmoment brukar uttryckas i Bohr magnetoner $\mu_B = e\hbar/2m_e = 9.2732 \cdot 10^{-24}$ Am² och kärnors dipolmoment i kärnmagnetoner $\mu_K = e\hbar/2M_p = 5.0505 \cdot 10^{-27}$ Am². Magnetiska moment uttryckta i dessa enheter är tal av storleksordningen 1. Protonens magnetiska dipolmoment $= 2.79276$ kärnmagnetoner. Kärnans s. k. g -faktor fås genom att dividera dess magnetiska dipolmoment uttryckt i kärnmagnetoner med spinn I . Protonens g -faktor är sålunda $= 5.58552$. Den gyromagnetiska konstanten $\gamma = \mu/hI$. Denna har varit föremål för en serie alltmera förfinade undersökningar. Utgående från de motstånds- och spänningsnormaler som

NBS förfogar över kan protonens gyromagnetiska konstant sättas till $\gamma_p = 2,675193 \cdot 10^8 T^{-1} s^{-1}$ med ett fel som är av storleken $\approx 10:10^6$. Internationella kommittén för mått och vikt har föreslagit att detta värde tillsvidare skall användas. Frågan om strömnormalen och dess realiserande med hjälp av protonens kärnresonans är f. n. föremål för ingående studier. Av ovanstående relationer framgår att vid ett fält av exempelvis 1 000 G i solenoiden, dvs. 10^{-1} T blir resonansfrekvensen ca 30 MHz. Via magnetfältet i en strömsolenoid kan således en viss strömstyrka reproduceras med en betydande noggrannhet genom att man registrerar ett vattenprovs resonansfrekvens, som tydligen ligger i det radiofrekventa området. Som bekant kan en frekvens mätas med mycket stor precision utan större svårigheter.

TEMPERATURMÄTNING

Vårt nuvarande fysikaliska enhetsystem har, förutom de tre oberoende grundstorheterna längd, massa och tid, egentligen endast en ytterligare helt oberoende storhet, nämligen temperatur. Såväl elektrisk ström som i viss mån ljusstyrka är storheter som beror av de ovan fyra nämnda.

En konsekvens av termodynamikens andra huvudsats är att temperaturskalan i princip endast behöver en fixpunkt som tilldelas en viss temperatur för att alla andra temperaturer skall vara definierade. Detta insåg Lord Kelvin redan 1852 och han genomförde sitt resonemang med hjälp av Carnot's kretsprocess. Detta är grunden till den s. k. termodynamiska temperaturskalan. Beträffande fixpunkten beslöt den 10:e generalkonferensen 1954 att använda vattnets s. k. tripelpunkt (då is, vatten och ånga samtidigt existerar i jämvikt) och satte denna till 273,16°K.

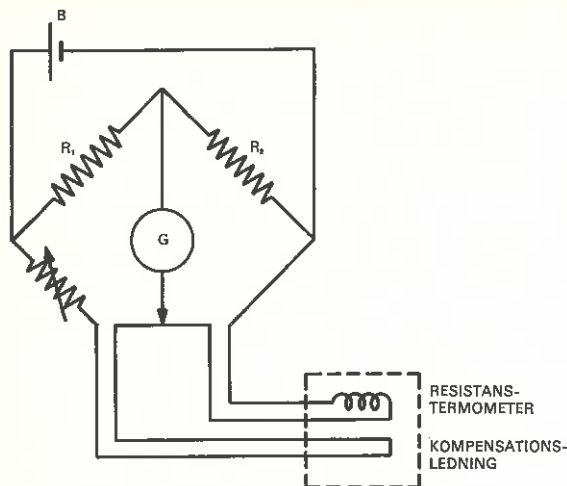


Fig. 34a. Resistanstermometrar, vilka är gjorda av trådspolar som kalibrerats, användes ofta i stället för andra typer av termometrar t. ex. vätsketermometer. Detta beror dels på att deras temperaturskala har en större utsträckning dels på att det inte innebär någon större nackdel att verkställa avläsningen långt från mätpunkten. För mycket exakta bestämningar användes platinarestansternometrar. Om en förändring i temperatur skall mätas kan resistansförändringen uttryckas som de första termerna i en serieutveckling. Temperatur — resistanskurvan för en spole med mycket ren platinatråd, av den typ som användes i resistansternometrar, representeras av ekvationen

$$R_t = R_0(1 + 0.003985t - 0.000000586t^2)$$

där R_0 är resistansen vid 0°C och R_t resistansen vid $t^\circ\text{C}$. För att resistansternometern skall kunna användas på ett visst avstånd från mätapparaturen måste ledningarnas resistanser kunna elimineras. Det vanligaste förfarandet är att använda en kompensationskrets, som är helt lik den som innehåller resistansternometern. En Wheatstone-brygga, där förhållandet mellan R_1 och R_2 är 1:1 är lämplig för mätningar av detta slag.

Isens smältpunkt som tidigare utnyttjats som fixpunkt i Celsiusskalan ligger i den termodynamiska skalan vid $273,15^\circ\text{K}$. Genom valet av fixpunkt kommer emellertid vattnets kokpunkt i den termodynamiska skalan att liksom tidigare ligga precis 100 grader över fryspunkten. Definitionen för 1 grad Kelvin definieras som ett tem-

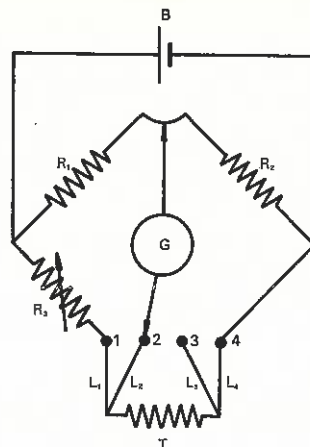


Fig. 34b. Mueller-brygga. Denna användes tillsammans med en platinarestansternometer, försedd med fyra anslutningsledningar. Bryggan, som är en modifierad Wheatstone-brygga, är speciellt lämpad för mätningar av resistanser upp till 100 ohm. R_1 och R_2 är två nominellt lika stora resistanser och T är resistansternometern. R_3 är den justerbara resistansen i bryggan. L_1 , L_2 , L_3 och L_4 är de fyra anslutningsledningarna till resistansternometern och punkterna 1, 2, 3 och 4 är dennas inkopplingsställen. Om galvanometern är kopplad till punkt 2 ingår T och ledningsresistansen i L_4 i den högra delen av bryggan och resistansen i L_1 i den justerbara delen R_3 . Då R_1 och R_2 är lika och bryggan är i balans, kommer R_3 och T att vara lika, endast om resistanserna i L_1 och L_4 är lika. I stället för att justera resistanserna i L_1 och L_4 till exakt samma värde omkastas anslutningarna L_1 och L_4 samtidigt som galvanometern ansluts till punkt 3, i stället för som tidigare i punkt 2, för att härigenom fortfarande ha T i den högre delen av bryggan. Medeltalet av dessa två balansinställningar är lika med det värde som skulle erhållas om L_1 och L_4 var lika.

peraturintervall: » 1°K utgör $1/273,16$ av den termodynamiska temperaturen för vattnets trippelpunkt.»

Den termodynamiska temperaturmätningen kan realiserats med en gastermometer om gasen kan betraktas som ideal, varvid gasens tryck mätes. Om samtidigt en motståndsternometer av

exempelvis platina på detta sätt kalibreras kan den senare utnyttjas för att noggrant relateras till temperaturen hos någon lämplig substans som genomgår en väldefinierad fasomvandling, exempelvis nämnda trippelpunkt.

Som komplement till den termodynamiska skalan finnes den s. k. *internationella praktiska temperaturskalan*. Denna accepterades av generalkonferensen 1927 (med tillägg 1948) och definieras av ett antal fixpunkter utspridda över ett mycket stort temperaturområde. Dessa fixpunkter (olika substansers frys- och kokpunkter) försöker man successivt att så noggrant som möjligt ansluta till den exakta termodynamiska skalan. Temperaturer emellan dessa fixpunkter bestämmas genom olika föreskrivna interpolationsförfaranden, varvid olika temperaturmätande instrument användas, grundade på motståndsmätning, termokors, strålningspyrometri och Planck's strålningslag. Syrets kokpunkt vid $-182,92^{\circ}\text{C}$ och smältpunkterna för zink ($419,505^{\circ}\text{C}$), silver ($960,8^{\circ}\text{C}$) och guld (1063°C) utnyttjas bl. a. Reproducibiliteten i denna skala är utomordentligt stor, för vanliga temperaturer några få tiotusendels grader. För extremt låga temperaturer, under syrets kokpunkt, kompletteras mätmetoderna med hjälp av väl undersökta ångtryckskurvor för ^3He ($0,25-2,25^{\circ}\text{K}$) och ^4He ($0,5-5,22^{\circ}\text{K}$).



Fig. 35. Laboratoriet för fotometri vid BIPM. I bakgrunden Ulbricht's sfär.

FOTOMETRI

Inom belysningstekniken har framvuxit ett behov av att standardisera mätning av ljusstyrka och den 9:e generalkonferensen 1948 beslöt att ersätta tidigare sinsemellan konkurrerande definitioner med en ny enhet, den s. k. *candela* enheten. För att få en entydig fysikalisk förankring hänfördes den nya enheten till strålningen från en svart kropp även om i praktiken sekundära standarder av andra slag är de brukliga. Den antagna definitionen av en *candela* (*cd*) är »ljusstyrkan vinkelrätt från en totalstrålare (»svart kropp») med ytan $1/600\,000$ kvadratmeter vid temperaturen för platinas stelnande». Två andra storheter är definierade med utgångspunkt från candelan, nämligen *ljusflödet*, »*lumen*», och *belysningen*, »*lux*». En ljuskälla med ljusstyrkan 1 candela som strålar likformigt emitterar ljusflödet 1 lumen (lm) per steradian. Belysningen på en yta är ljusflödet per ytenhet, dvs. lumen/m², och betecknas lux (lx). För den praktiska mättekniken har det visat sig att en wolframlampan som lyser vid en färgtemperatur av $2\,042^{\circ}\text{K}$ (platinas stelningspunkt) har en spektral sammansättning som väl överensstämmer med den från en svart kropp. Lampor för fotometriska ändamål kan efter lämplig behandling och åldring reproducera en viss fotometrisk styrka inom 0,1–0,2% när vid en viss specificerad strömstyrka. Noggranna komparationer av olika länders sekundära strålningsstandarder utföres kontinuerligt i internationella kommitténs regi.

JONISERANDE STRÅLNING

I samband med den tolfte generalkonferensen 1964 invigdes ett nytt metrologiskt laboratorium vid BIPM för joniserande strålning. Laboratoriet



Fig. 36

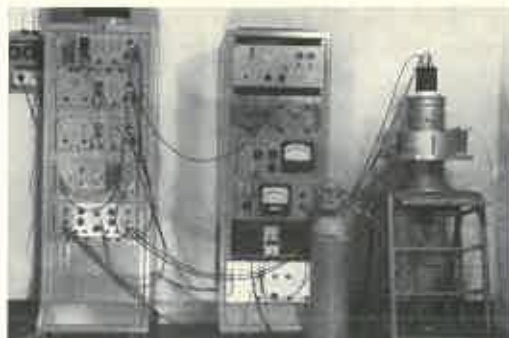


Fig. 37

Fig. 36. Två uppställningar för absolut uppmätning av neutronflux vid NRM. De sfäriska behållarna användes för aktivering av Mn-lösningar och det kubiska vattenbadet för guldfolie aktivering.

Fig. 37. Uppställning vid NRM för absolutmätning av radioisotopers styrka. Till höger ses detektorarrangemanget, som utgöres av en 4π proportionaldetektor, ovan och nedan omgiven av scintillationsräknare i koincidenskoppling. Preparatens styrka kan bestämmas med en noggrannhet av ca 0.5%.

är uppdelat i tre olika avdelningar: den första sysslar med radionuklider, den andra med röntgenstrålning och den tredje med neutroner. Verksamheten hade dessförinnan varit i gång några år och hade lyckats samla internationella organisationer och nationella mätlaboratoriernas specialister inom dessa områden till gemensamma försök att förbättra och standardisera mätmetodiken och söka komma underfund med olika systematiska mätfel etc. När det gäller radionuklider förför man så att ett stort antal radioaktiva preparat från samma lösning distribuerades till laboratorier som oberoende av varandra fick bestämma aktiviteten. En rad olika metoder användes beroende på karaktären av den radioaktiva strålningen: Scintillationsmetoden, med och utan koincidensarrangemang, proportionalrörskrättning i 4π geometri och kombinationer mellan dessa etc. Den noggrannaste metoden för detta slags mätningar har visat sig vara ett arrangemang bestående av två proportionalräknare av den platta »pillerburks»-typen som omger preparatet ovanför och nedanför detsamma. Två NaI-kristaller för gammarekning placeras direkt ovanför och nedanför proportionalräknarna. Man registrerar koincidenserna mellan β - och γ -

pulserna i proportionalrören respektive scintillationsräknarna. En närmare analys av detta arrangemang visar att ett antal felkällor härigenom kan elimineras. Preparatstyrkan, uttryckt som antalet sönderfallande kärnor per tidsenhet, kan bestämmas med en noggrannhet av ca 0,5%. Bland de nuklider som distribuerades mellan laboratorier kan nämnas ^{60}Co , ^{198}Au , ^{204}Tl , ^{131}I , ^{32}P och ^{35}S .

Den mätmetodik som utvecklats för absolutmätning av radionuklider utnyttjas för mätning av neutronkällor. Man placerar neutronkällan, exempelvis ett radiumberyllium-preparat, i centrum av en stor vattenbehållare, i vilken neutronerna modereras till termiska hastigheter. I denna placeras tunna guldfolier vars aktivitet efter neutronbestrålningen bestäms, varefter neutronstyrkan kan beräknas. En annan möjlighet är att låta neutroner aktivera en mangansulfatlösning och därefter uppmäta aktiviteten av ^{56}Mn .

Röntgenavdelningen utvecklar mätmetoder för röntgenstrålning med jonisationskammare etc., och ägnar också särskilda studier åt annan joniserande strålning och dess biologiska och medicinska applikationer.

Vid laboratoriet planeras nu ett program för

precisionsmätning av referenslinjer inom kärnspektroskopien. För närvarande konstrueras en precisionsspektrometer för α -spektra. De metoder som använts på byrån för noggranna längdmätningar och för uppmätning av magnetfält med hjälp av kärnmagnetisk resonans kommer att bli grundläggande för den uppnåeliga precisionen (av storleken $\approx 1:10^5$).

För joniserande strålning finnes ett stort antal enheter som dels beskriver styrkan hos strålningskällan själv, dels strålningens effekt vid absorptionen i materia. Radioaktiva ämnens styrka uttryckes fortfarande i curie eller multiplar därav trots att denna enhet inte är rationell. Orsaken härtill är givetvis historiskt betingad och visar hur svårt det kan vara att bli av med gamla enheter då de en gång kommit i bruk. »Den kvantitet radon som står i radioaktiv jämvikt med 1 gram radium» var ursprungligen definitionen på en curie. Mätningar har visat att detta innebär ca $3,7 \cdot 10^{10}$ sönderfallande atomer per sekund. För övriga vanliga nuklider är denna siffra tämligen ointressant och enklast vore att uttrycka styrkan hos en radioaktiv nuklid direkt i antalet sönderfallande atomer per sekund med dimensionen s^{-1} .

Internationella kommittén för mått och vikt har dock föreslagit att curieenheten tillsvidare kan användas vid sidan härom, varvid 1 curie = 1 Ci satts exakt = $3,7 \cdot 10^{10} s^{-1}$.

Stråldosen hänför sig till den absorberade strålningsenergin per massenhet. Enheten är 1 rad = 10^{-8} J/kg. Exponeringsdos är en annan viktig radiologisk storhet som redogör för strålningens förmåga att jonisera luft. Exponeringen mätes i enheten röntgen (sedan 1962 betecknad R). Definitionen av denna enhet gjordes ursprungligen med hjälp av äldre enhetssystem: »1 R åstadkommer en sådan jonisation i luft att 1 elektrostatisk enhetsladdning (esu) av vardera teckenlaget frigöres per cm^3 luft av normalt tryck och temperatur.» Med de nu vedertagna enheterna

som grund definieras 1 R som $2,58 \cdot 10^{-4}$ coulomb/kg luft. Detta motsvarar en stråldos av 0,87 rad i luft.

SI-SYSTEMET — DET INTERNATIONELLA ENHETSSYSTEMET

Som tidigare nämnts inkallar den internationella kommittén för mått och vikt den s. k. generalkonferensen minst vart sjätte år för att underställa denna sina förslag för eventuella beslut. Denna generalkonferens är den enda församling, vars delegater utgöres av officiella representanter för respektive regeringar, som kan överlägga och delta i internationella beslut beträffande enhets- och standardkonventioner inom metrologien. Här har funnits en brokig flora av olika system vid sidan om varandra, som avsevärt komplicerat den vetenskapliga och tekniska dokumentationen. Inte minst pedagogiskt har detta varit — och är alltjämt — ett viktigt problem att komma tillrätta med. Försök att ersätta tidigare system med ett nytt och förbättrat har ofta resulterat i att skaran av system utökats med ytterligare ett. Det är i allmänhet inte svårt att anföra skäl för att ett visst system i vissa avseenden är bättre än ett annat. Av större praktisk betydelse är emellertid att på internationell basis och givetvis efter grundliga utredningar söka enas om något som kan godkännas av alla. I första hand kräves härför att en av alla accepterad organisation med tillräcklig auktoritet ställer sig bakom ett sådant enhetssystem.

Internationella kommittén för mått och vikt blev redan 1913 av generalkonferensen anmodad att studera detta grundläggande problem. År 1948 framlade IUPAP till internationella kommittén vissa förslag och efter omsorgsfulla förbere-

delser kunde generalkonferensen vid sina möten 1954 och 1960 antaga ett internationellt system av enheter, det s. k. *SI-systemet*. De flesta länderna har sedan dess genom lagstiftning accepterat detta system. I Sverige har just i dagarna ett sådant lagförslag presenterats (sou 1965: 5). Tyvärr är det inte möjligt att på en gång åstadkomma ett enhetssystem som täcker alla områden utan systemet kommer därför successivt att byggas ut. Alla de vanligaste och mest grundläggande enheterna är dock redan definierade. I efterföljande tabell är si-systemet sammanställt i dess nuvarande omfattning.

si-systemet består f. n. av sex grundenheter, två kompletterande enheter för de dimensionslösa storheterna plan vinkel och rymdvinkel, samt tjugosju härledda enheter, vilka tillsammans bildar systemets samstämda enheter. Benämningarna och beteckningarna för dessa enheter ges i tabellen. Benämningar och beteckningar för de storheter som mäts i respektive enheter ges i de två första kolumnerna. Multipelenheter erhålles genom multiplikation med en talfaktor. Vanligen är denna en jämn tiopotens och anges genom ett prefix. Följande prefix användes:

Tiopotens	Prefix	Tecken
10^{-16}	femto	<i>f</i>
10^{-12}	piko	<i>p</i>
10^{-9}	nano	<i>n</i>
10^{-6}	mikro	μ
10^{-3}	milli	<i>m</i>
10^{-2}	centi	<i>c</i>
10^{-1}	deci	<i>d</i>
10^{+1}	deka	<i>da</i>
10^{+2}	hekto	<i>h</i>
10^{+3}	kilo	<i>k</i>
10^{+6}	mega	<i>M</i>
10^{+9}	giga	<i>G</i>
10^{+12}	tera	<i>T</i>

De multipelenheter som ges i tabellen är sådana som erhållit särskild benämning och där multiplikationsfaktorn ej kan anges med något av ovanstående prefix. Dessutom ges i tabellen vissa enheter utanför si-systemet. De kan betraktas som multipelenheter vilkas multiplikationsfaktorer ej är exakt kända. Så till exempel är definitionen av energienheten elektronvolt sådan att multiplikationsfaktorn för denna enhet beror av det experimentellt bestämda värdet på elementarladdningen. Däremot är energienheten kilokalori numera definierad som exakt 4 186,8 J och är därmed ansluten till si-systemet.

Tabell 1. Enheter för fysikaliska storheter.

Storhet		Samstämd SI-enhet		SI-anslutna multipelenheter			Icke SI-anslutna multipelenheter			Anmärkningar
Benämning	Beteckn.	Benämning	Bet.	Benämning	Bet.	Definition	Benämning	Bet.	Samband	
Längd	<i>l</i>	meter	m	ångström	Å	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$	x-enhet	xu	$1 \text{ xu} = 1,00206 \cdot 10^{-12} \text{ m}$	Våglängd betecknas λ .
Massa	<i>m</i>	kilogram	kg				universell massenhet	u	$1 \text{ u} = 1,66043 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	Universella massenheten är 1/12 av atommassan för kolisotopen C^{12} .
Tid	<i>t</i>	sekund	s	minut	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$				1 min kan betecknas 1 m om förväxling ej befaras.
Elektrisk ström	<i>I</i>	ampere	A	timme	h	$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$				

Tabell 1 (forts.)

Storhet		Samstämd SI-enhet		SI-an slutna multipelenheter			Icke SI-an slutna multipelenheter			Anmärkningar
Benämning	Beteckn.	Benämning	Bet.	Benämning	Bet.	Definition	Benämning	Bet.	Samband	
Temperatur (absolut)	T	grad Kelvin	$^{\circ}\text{K}$							Isens trippelpunkt = $273,16^{\circ}\text{K}$. Temperaturskillnad betecknas ΔT eller Δt och mäts i grad som betecknas deg eller $^{\circ}\text{K}$ resp. $^{\circ}\text{C}$ om förväxling med temperatur ej befaras.
	Temperatur (över isens smältpunkt)	t	grad Celsius	$^{\circ}\text{C}$						
Ljusstyrka	I	candela	cd							
Plan vinkel	α	radian	rad	grad	$^{\circ}$	$1^{\circ} = 180 \text{ rad}$				Cirkeln = $2\pi \text{ rad}$ Sfären = $4\pi \text{ sr}$
Rymdvinkel	Ω	steradian	sr							
Yta	A	kvadratmeter	m^2	barn	barn	$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$				Enheten barn används för tvärsnitt inom kärnfysiken.
Volym	V	kubikmeter	m^3	liter	l	$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$				
Frekvens	f	hertz	Hz (s^{-1})							Man ser ofta beteckningen c/s och p/s för Hz. Alternativ beteckning för frekvens är ν .
Densitet	ρ	kilogram per kubikmeter	kg m^{-3}							Tidigare benämndes storheten täthet.
Hastighet	v	meter per sekund	m s^{-1}							Ljushastigheten $c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.
Vinkelhastighet	ω	radian per sekund	rad s^{-1}							
Acceleration	a	meter per sekundtvå	m s^{-2}							Äldre enhetsbenämning: meter per sekundkvadrat. Tyngdkraftens acceleration $g_0 = 9,80665 \text{ m s}^{-2}$
Vinkelacceleration	$\dot{\omega}$	radian per sekundtvå	rad s^{-2}							
Kraft	F	newton	N (kgms^{-2})	kilopond dyn	kp dyn	$1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$ $1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$				
Tryck, mekanisk spänning	p	newton per kvadratmeter	N m^{-2}	bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^{-5} \text{ N m}^{-2}$				
				fysikalisk atmosfär	atm	$1 \text{ atm} = 101325 \text{ N m}^{-2}$				
				teknisk atmosfär	at	$1 \text{ at} = 1 \text{ kp cm}^{-2}$				
				torr	torr	$1 \text{ torr} = 1/760 \text{ atm}$				
Viskositet (kinematisk)	ν	kvadratmeter per sekund	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	stok	St	$1 \text{ St} = 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$				Äldre beteckning för torr är mm Hg.

Tabell 1 (forts.)

Storhet		Samstämd SI-enhet		SI-an slutna multipelenheter			Icke SI-an slutna multipelenheter			Anmärkningar
Benämning	Beteckn.	Benämning	Bet.	Benämning	Bet.	Definition	Benämning	Bet.	Samband	
Viskositet (dynamisk)	η	newtonsekund per kvadratmeter	Ns m ⁻²	pois		P	1 P = 0,1 Ns m ⁻²			
Energi, värme-mängd, mekaniskt arbete	W	joule	J	erg kilokalori kilowattimme		erg kcal kWh	1 erg = 10 ⁻⁷ J 1 kcal = 4,1868 · 10 ³ J 1 kWh = 3,6 · 10 ⁶ J	elektronvolt eV	1 eV = 1,60210 · 10 ⁻¹⁹ J	
Effekt	P	watt	W	(J s ⁻¹)				hästkraft hk	1 hk = 735,5 W	Hästkraft definieras olika i skilda länder.
Elektricitetsmängd	Q	coulomb	C	(As)						Elementarladningen $e = 1,60210 \cdot 10^{-19} C$
Elektrisk spänning, elektrisk potentialdifferens, elektromotorisk kraft	U	volt	V	(W A ⁻¹)						
Elektrisk fältstyrka	E	volt per meter	V m ⁻¹							
Resistans	R	ohm	Ω	(VA ⁻¹)						
Kapacitans	C	farad	F	(As V ⁻¹)						
Magnetiskt flöde	Φ	weber	Wb	(Vs)						
Magnetisk flödestäthet	B	tesla	T	(Wb m ⁻²)	gauss	G	1 G = 10 ⁻⁴ T			
Induktans	L	henry	H	(Vs A ⁻¹)						Ömsesidig induktans betecknas M eller L_{12} .
Magnetisk fältstyrka	H	ampere per meter	A m ⁻¹							Storheten benämnes även magnetiserande fältstyrka.
Magnetisk spänning, magnetomotorisk kraft	M	ampere	A							I stället för A (ampere) kan alternativt skrivas At (ampere varv).
Ljusflöde	Φ	lumen	lm	(cd · sr)						
Luminans	L	candela per kvadratmeter	cd m ⁻²							Storheten benämns även ljusstäthet och används om såväl ljuskällor som om belysta ytor.
Belysning	E	lux	lx	(lm m ⁻²)						Storheten benämns även illuminans.

ATOMÄRA OCH NUKLEÄRA ENHETSSYSTEM

Numeriska beräkningar inom *atomfysiken*, bl. a. med datamaskin, blir komplicerade genom att så systemets grundenheter är förankrade inom den makroskopiska fysiken. I stället använder man sig oftast av s. k. atomära enheter, vilka i förvånansvärd grad förenklar beräkningarna och gör resultaten lättare att tolka. I ett enhetssystem, som införts av Hartree, sätter man: $\hbar = e = m_e = 4\pi\epsilon_0 = 1$. Vilken blir längdenheten i detta system? Vi betraktar uttrycket för en radie enligt Bohrs atommodell

$$a_n = \frac{n^2 \cdot \hbar^2 \cdot 4\pi\epsilon_0}{m_e \cdot e^2 \cdot Z}$$

För $Z=1$ och $n=1$ blir tydligen $a_1=1$, dvs. alla avstånd som beräknas i detta system blir uttryckta i innersta Bohrradien i väteatomen som enhet ($0,529 \cdot 10^{-10}$ m). Det är lättare att göra sig en konkret föreställning om ett atomfysikaliskt problem om resultatet erhålles i denna form än uttryckt i enheter som inte har något direkt samband med atomära förhållanden. Samtidigt slipper man i räkningarna laborera med storheter som, förutom atomkonstanternas långa talvärden, innehåller faktorer av typen 10^n , där n varierar inom mycket vida gränser. Vilken blir då tidsenheten i det atomära systemet? Tiden

för en elektron att gå en distans av 1 banradie i n :te banan är

$$T = \frac{n^3 \cdot \hbar^3 \cdot (4\pi\epsilon_0)^2}{m_e \cdot e^4 \cdot Z^2}$$

För $Z=1$ och $n=1$ blir tydligen denna atomära tid = 1. De tider som beräknas med det atomära enhetssystemet som bas blir sålunda uttryckta i enheter av ovannämnda atomära tid ($T=2.40 \cdot 10^{-17}$ s).

Inom *elementarpartikelfysiken* försöker man på samma sätt korrelera avstånd och tider till en skala som passar in på denna fenomenvärld. Avståndsenheten sättes till 10^{-15} m (1 fermi), dvs. ungefär storleken av en nukleon. Tidsenheten anges i enheter av den ungefärliga tid det tar för ljuset att tillryggalägga en distans lika med diametern av en nukleon, eller 10^{-23} s. De mest kortlivade av de s. k. resonanspartiklarna existerar under tider som endast är några få enheter i detta nukleära enhetssystem.

LITTERATUR

- Moreau, H., J. Chem. Ed. 30 (1953), 3.
Terrien, J., Metrologia 1 (1965), Nr 1.
Edlén, B., Kosmos 37 (1959).
Ramsay, N., Metrologia 1 (1965), Nr 1.
Olsmats, M., Kosmos 37 (1959).
Ohlon, R., Teknisk Tidskrift h, 13 (1964), 313.
Ohlon, R., Elteknik 7 (1964), 175.
McNish, A., Science and Technology, Nov. 1965.