



EX  
LIBRIS



ARH

A  
7172

195873





FÜÜSIKA PRAKTIKUM  
TARTU ÜLIKOOLIS



A-7172

W...  
A-7172  
20x

Tartu Üliõpilaskonna toimetised nr. 2.

Assist. A. Altman'i ja V. Koern'i kaastegevusel koostanud

E. KILKSON

Tartu Ülikooli Füüsikainstituudi vanem assistent

FÜÜSIKA PRAKTIKUM  
TARTU ÜLIKOO LIS

ARHIIVKOGU

TARTU, 1931 49

AKADEEMILISE KOOPERATIIVI KIRJASTUS

*Trükitud G. Roht'i trükikojas  
Tartus, 1931. a.*

ARHIIVKOGU

2

Tartu Ülikooli  
Raamatukogu

195 873

## EESSÕNA.

Käesolev raamat on määratud neile üliõpilastele, kes osa võtavad füüsika praktilistest tööd Tartu ülikoolis.

Teos on alguse saanud neist praktiliste tööde kirjeldistest, mis juba mõne aasta eest koostati tarvitamiseks üliõpilastele. Ent kogemused näitavad, et mainitud kirjeldistest ei jatku edukaks töötamiseks füüsika laboratooriumis, sest neid kirjeldisi võisid üliõpilased tarvitada vaid laboratooriumi ruumes, kuna nende koju kaasa viimine suure praktikantide arvu pärast oli võimatu. Pealegi tuli neid kirjeldisi väga sageli ümber kirjutada, kusjuures neisse tekkis ikka rohkem vigu.

Mis puutub tööde kirjeldiste laadisse, siis on püütud töö tehnilise läbiviimise kirjelduse kõrval anda ka nähtuse üldkirjeldus, niipalju kui ruum seda lubas. Seda oli tarvis juba seepärast, et meil puudub vastav eksperimentaalse füüsika käsiraamat.

Ruumi puuduse pärast jäi osa tööde kirjeldisi, eriti elektri alalt, käesolevast raamatust välja ja just need tööd, mis sunduslikud vaid ühele osale praktikantidest, näit. tööd elektrimootoriga, elektronitoruga jne.

Lõpuks pean oma kohuseks tänu avaldada era dots. dr. E. Krahn'ile, kes kirjutas sissejuhatuse (vaatlusvead ja nende mõju arvutamise saadustesse) ja mag. phys. A. Altman'ile ning mag. phys. V. Koern'ile nende lahke kaastöö eest.

*E. Kilkson.*

Tartus, veebr. 1931.

## Sisu.

Eessõna . . . . .	Lk. V
-------------------	----------

### I. Sissejuhatus.

Vaatlusvead ja nende mõju arvutamise saadustesse . . . . .	1
--	---

### II. Üldmõõtmised.

1. Noonius . . . . .	11
2. Varbsirkel . . . . .	13
3. Mikromeeter . . . . .	14
4. Sfäromeeter . . . . .	15
5. Katetomeeter . . . . .	17
6. Parallaxi viga ja peegeldastmiku tarvitamine . . . . .	18
7. Baromeeter . . . . .	18
8. Vesilood . . . . .	20
9. Vesiloe kaliibrimine . . . . .	21
10. Kaalud . . . . .	23
11. Erikaal. Tihedus . . . . .	33
12. Klaasriistade puhastamine ja kuivatamine . . . . .	39
13. Auru suhtelise tiheduse määramine Viktor Meyer'i järele . . . . .	40
14. Nurkade mõõtmine peegli ja astmiku abil . . . . .	42

### III Mehaanika.

15. Vabalt langeva keha kiirenduse määramine pendli abil . . . . .	45
16. Vetrivusemoodul ja selle määramine . . . . .	46
17. Torsiooni- ehk keerdmoodul . . . . .	48
18. Vedelikkude sisehõõrumine . . . . .	51
19. Kapillaartoru läbimõõdu määramine . . . . .	53

### IV. Hääled.

20. Hääle interferents . . . . .	54
21. Kundt'i toru . . . . .	56
22. Helihargi võnkearvu määramine . . . . .	58

### V. Soojus.

23. Tahke keha erisoojuse määramine segamismeetodi järgi . . . . .	62
24. Jää sulamissoojuse määramine . . . . .	65

	Lk.
25. Clément ja Desormes'i meetod Cp/Cv määramiseks . . . . .	69
26. Absoluutse ja suhtelise niiskuse määramine Alluard'i hügromeetriga . . . . .	69
27. Mehaanilise soojuse ekvivalendi määramine . . . . .	71

## VI. Valgus.

28. Valgusetugevuse mõõtmine . . . . .	73
29. Kolorimeeter lahuste kontsentratsiooni määramiseks . . . . .	73
30. Lääse tulipunkti kauguse määramine . . . . .	77
31. Mikroskoop . . . . .	79
32. Pikksilm . . . . .	80
33. Spektromeeter . . . . .	81
34. Valguse diffraktsioon . . . . .	85
35. Spekteer. Spektroskoop. Spektraalanalüüs . . . . .	90
36. Abbé refraktomeeter . . . . .	95
37. Valguse polarisatsioon . . . . .	98
38. Lippich & Laurent'i poolvarju-polarimeeter . . . . .	104
39. Faraday efekt . . . . .	105

## VII. Magnetism.

40. Maa magnetiväli . . . . .	108
41. Maa magnetivälja tungjoonte kaldenurga (inklinatsiooni) määramine Maa induktori abil . . . . .	109
42. Maa magnetivälja horisontaalkomponendi $H$ määramine Gauss'i magneto-meetriga . . . . .	110
43. Magnetivälja tugevuse mõõtmine Quincke järele . . . . .	115

## VII. Elekter.

44. Üidised märkused . . . . .	118
45. Galvanomeeter . . . . .	122
46. Ballistiline galvanomeeter . . . . .	125
47. Tangens-galvanomeeter . . . . .	127
48. Takistuse mõõtmine Wheatstone'i sillal . . . . .	130
49. Lahused . . . . .	133
50. Elektrolüütide elektrijuhtivus . . . . .	134
51. Elektromotoorsete jõudude võrdlemine . . . . .	137
52. Elektromotoorsete jõudude võrdlemine Fechner'i järele . . . . .	140
53. Danielli elemendi elektromotoorse jõu määramine . . . . .	141
54. Voolusoojus . . . . .	143
55. Tööühikud . . . . .	145
56. Elektrikeetja . . . . .	146
57. Hüsteresis . . . . .	147
58. Vahelduv vool . . . . .	152
59. Vahelduva voolu energia . . . . .	156
60. Pooli eneseinduktsiooni määramine vahelduva voolu abil . . . . .	158
61. Kondensaatorite mahtuvuste võrdlemine . . . . .	158
62. Elektrivõnkumised . . . . .	161
63. Dielektrilise jääva määramine Drude aparaadil . . . . .	162

	Lk.
64. Röntgenikiired . . . . .	164
65. Fotoelement . . . . .	168
66. Radioaktiivsus . . . . .	170
67. Schmidt'i elektromeeter . . . . .	172

IX. Tabeleid.

1. tabel: Kehade erikaale . . . . .	179
2. „ Joonpaisumiskoeffitsiente . . . . .	179
3. „ Ruumpaisumiskoeffitsiente . . . . .	179
4. „ Kehade erisoojusi . . . . .	179
5. „ Vee erikaal . . . . .	180
6. „ Küllastunud veeauru rõhk . . . . .	180

## I.

# Sissejuhatus.

### Vaatlusvead ja nende mõju arvutamise saadustesse.

Füüsikas tuleb alatasa arvutada ligikaudsete arvudega. See tuleb üheltpoolt sellest, et mõõdetavad suurused ise pole küllalt täpsalt defineeritud (nagu näiteks mõne varda pikkus, sest varda otsad pole kunagi täpsalt geomeetriliselt rööbikud tasapinnad), teiselt poolt aga on ka meie mõõtmisriistad õiged ainult teatud täpsuseni (näiteks termomeeter, kaalud) ja ka meie organid (silmad, kõrvad ning käed) lubavad mõõtmistoimingut läbi viia ainult teatud täpsuseni, millel on olemas loomulikud piirid.

Ei olegi alati tähtis mõõtmist ja sellest saadud suurustega arvutamist toimetada kõige suurema saavutatava täpsusega, sest tihti huvitab meid ainult suurusejärk ja esimesed kaks või kolm numbrit resultaadina saadavas arvus. Tähtis on seevastu aga alati esiteks määrata mõõtmisvea ülemmäär ja teiseks, kui on tegemist kaudsel teel (arvutamise abil) suuruse leidmisega, otsustada, kuivõrd otseteel leitud suuruste vead mõjustavad resultaati.

### Korduv katse.

Katsetel võivad esineda süstemaatilised vead (aparatuuri vale seadeldus, järjekindel eksitus vaatlusel jne.) ja juhuslikud vead, mille hulka arvatakse ka eespooltoodud põhjustest tingitud vead. Need viimased olenevad oluliselt mõõtmisriistade täielikkusest ja vaateja osavusest.

Juhuslikkude vigade vähendamiseks korraldatakse üht ja sama katset mitu korda ja loetakse katsesaaduse tõenäoiseks väärtuseks aritmeetiline keskmine üksikutest saadustest.

Kui  $n$  katse või vaatluse juures samadel tingimustel on leitud ühe ja sama suuruse väärtused  $s_1 s_2 s_3 \dots s_n$ , siis on nende aritmeetiline keskmine

$$s = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n}{n}$$

Olgu näiteks mõne võnkumisperioodi korduval mõõtmisel leitud ajad

$$\begin{array}{r} 34,8 \text{ sek} \\ 34,4 \text{ " } \\ 33,8 \text{ " } \\ 35,0 \text{ " } \\ 35,2 \text{ " } \\ \hline 34,4 \text{ " } \\ 207,6 \text{ sek;} \end{array}$$

aritm. keskmine on siis

$$207,6 \text{ sek} : 6 = 34,6 \text{ sek.}$$

Otstarbekohasem on siin liitmisel lähtuda mõnest arvust, mis esimese pilgu järele paistab ainult vähe erinevat aritmeetilisest keskmisest, siin näit. 34,0 sek, ja üles kirjutada ainult positiivsed ja negatiivsed erinevused sellest arvust, neid liita, vaatluste arvule jagada ja saadus alguses ärajäetud arvuga liita.

$$\begin{array}{r} + 0,8 \\ + 0,4 \\ - 0,2 \\ + 1,0 \\ + 1,2 \\ \hline + 0,4 \\ + 3,6 \end{array} \quad \begin{array}{l} + 3,6 : 6 = + 0,6 \\ \\ \\ \\ \\ 34,0 \text{ sek} + 0,6 \text{ sek} = 34,6 \text{ sek} \end{array}$$

### Vaatlusvead.

Vaatlustest või katsetest saadud suuruse keskmine väärtus võib muidugi erineda suuruse tõelisest väärtusest, mida meie ei tunne. Üksikul vaatlusel saadud väärtuse, samuti ka keskvaartuse erinevust tõelisest väärtusest nimetatakse veaks.

*Tõenäoseks veaks* nimetatakse niisugust suurust  $v_t$ , mille kohta võib tõenäosusega  $\frac{1}{2}$  väita, et vea absoluutväärtus teda ei ületa (võib üks ühe vastu kihla vedada, et viga ei ole suurem kui  $v_t$ ).

Tõenäose veaga on lähedalt seotud keskmine viga  $v_k$ . See määratakse järgmiselt. Tähistame üksikvaatluse saaduse ja keskväärtuse vahe tähega  $\Delta_i$

$$s_1 - s = \Delta_1$$

$$s_2 - s = \Delta_2$$

$$\cdot \cdot \cdot \cdot$$

$$\cdot \cdot \cdot \cdot$$

$$\cdot \cdot \cdot \cdot$$

$$s_n - s = \Delta_n.$$

Sellest järgneb

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n = 0,$$

millist võrdust tarvitatakse arvutuste kontrollimiseks.

Üksikul vaatlusel või katsel saadud suuruse  $s_i$  keskmiseks veaks  $v_k$  nimetatakse siis suurust

$$v_k = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \dots + \Delta_n^2}{n-1}}$$

ja keskväärtuse  $s$  keskmiseks veaks  $V_k$  suurust

$$V_k = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \dots + \Delta_n^2}{n(n-1)}}.$$

Vigu arvutatakse nende valemite abil, kui on käsitada vähemalt 5, parem 10 või rohkem, üksikvaatluse annet.

Nii üksiku vaatluse tõenäose vea  $v_t$  kui ka keskväärtuse tõenäose vea  $V_t$  saame vastavatest keskmistest vigadest, korrutades neid konstandiga, mis võrdub ligikaudu 0,6745

$$v_t \approx 0,6745 v_k$$

$$V_t \approx 0,6745 V_k.$$

Meie näite korral on

$\Delta$	$\Delta^2$
+ 0,2	0,04
- 0,2	0,04
- 0,8	0,64
+ 0,4	0,16
+ 0,6	0,36
- 0,2	0,04
<hr/>	<hr/>
0	1,28

ja üksiku vaatluse keskmine viga

$$v_k = \sqrt{\frac{1,28}{5}} \approx \pm 0,5;$$

keskväärtuse keskmine vaatlusviga, ehk saaduse keskmine vaatlusviga, on

$$V_k = \sqrt{\frac{1,28}{5 \cdot 6}} \approx \pm 0,2$$

ja saadus

$$34,6 \pm 0,2 \text{ sek.}$$

Viimase kirjaviisiga tähendatakse harilikult saadus ühes keskmise veaga.

Tõenäone viga oleks antud näites

$$V_t \approx 0,67 V_k \approx \pm 0,14.$$

Saaduse keskmine viga antakse tihti protsentides või promillides. Toodud näites ta on

$$\frac{100 \cdot 0,2}{34,6} \% \approx 0,6 \% = 6 \text{‰}.$$

*Üksiku vaatluse*, mõõtmise või katse korral arvestatakse keskmise vea asemel *maksimaalne viga*. Kui me näiteks mõne keha kaalumisel oleme leidnud 2,0582 g, kusjuures kaalude skaala jaotised vastavad 2 mg, nõnda et jaotise kümnendikkude hindamisel on tegemist 0,2 mg-ga, siis on maksimaalne viga 0,4 mg, sest skaala nullpunkti lugemisel oli samuti võimalik 0,2 mg suurune viga.

Leitud raskuse võime siis nõnda kirja panna

$$2,0582 \pm 0,0004 \text{ g.}$$

## Vaatlusvigade mõju arvutamise saadustesse.

Ligikaudsete (tuntud keskmise või maksimaalse vaatlusveaga seotud) arvudega arvutamise saadus (resultaat) on muidugi ka ainult ligikaudne ja tema vea suurus oleneb andmete vigadest.

Vaatame, kuidas andmed mõjustavad saadust nelja põhi-tehte korral.

### Absoluutne viga.

Olgu  $X$  ja  $Y$  täpsad suurused,  $x$  ja  $y$  nende ligikaudsed väärtused,  $\alpha$  ja  $\beta$  absoluutsed vead (positiivsed või negatiivsed), nii et

$$X = x + \alpha$$

$$Y = y + \beta$$

ja vigade ülemmäärad  $a$  ja  $b$

$$|\alpha| \leq a$$

$$|\beta| \leq b.$$

Vaatame, missugused on nelja tehte juures saaduste absoluutsete vigade ülemmäärad.

$$X + Y = x + y + \alpha + \beta$$

$$X - Y = x - y + \alpha - \beta$$

Nii  $\alpha + \beta$  kui  $\alpha - \beta$  absoluutväärtuse ülemmääraks on  $a + b$ , sest  $\alpha$  ja  $\beta$  võivad olla nii positiivsed kui negatiivsed arvud.

$$|\alpha + \beta| \leq a + b$$

$$|\alpha - \beta| \leq a + b.$$

Korrutamise korral on

$$XY = (x + \alpha)(y + \beta) = xy + y\alpha + x\beta + \alpha\beta$$

$$XY - xy \approx y\alpha + x\beta$$

ja vea ülemmäär

$$|y\alpha + x\beta| \leq |y|a + |x|b.$$

Jagamisel saame

$$\frac{X}{Y} = \frac{x + \alpha}{y + \beta}; \quad \frac{X}{Y} - \frac{x}{y} = \frac{x + \alpha}{y + \beta} - \frac{x}{y} = \frac{y\alpha - x\beta}{y(y + \beta)} \approx \frac{y\alpha - x\beta}{y^2}$$

ja vea ülemmääraks ligikaudselt

$$\frac{|y|a + |x|b}{y^2}.$$

### Suhteline (relatiivne) viga.

Suhteliseks veaks nimetatakse absoluutse vea ja ligikaudse suuruse suhet. Eelmistes tähistes

$$\frac{a}{x} \text{ ja } \frac{\beta}{y}.$$

Summa suhtelise vea ülemmäär on

$$\frac{a + b}{|x + y|}.$$

Selle kohta võib näidata, et ta ei ületa liidetavate suurema suhtelise vea ülemmäära ega ole väikesem kui väikesem neist. Sümbolites:

$$\text{kui } \frac{a}{|x|} \leq \frac{b}{|y|}, \quad \text{siis } \frac{a}{|x|} \leq \frac{a + b}{|x + y|} \leq \frac{b}{|y|}.$$

Vahe suhtelise vea ülemmäär on

$$\frac{a+b}{|x-y|}$$

ja võib küllalt väikese  $x$  ja  $y$  vahe korral omada kuitahes suuri väärtusi.

Korrutise suhtelise vea ülemmäär võrdub tegurite suhteliste vigade ülemmäärade summaga. Samuti jagatise suhtelise vea ülemmäär võrdub jagatava ja jagaja suhteliste vigade ülemmäärade summaga.

$$\frac{|y|a + |x|b}{|xy|} = \frac{a}{|x|} + \frac{b}{|y|};$$

$$\frac{|y|a + |x|b}{y^2} \cdot \frac{|x|}{|y|} = \frac{a}{|x|} + \frac{b}{|y|}.$$

Ülaltoodud juhised (reeglid) on üldistatavad tehingute jaoks rohkem kui kahe suurusega.

Suhteline viga antakse tihti protsentides.

Me näeme, et summa ja vahe juures on lihtsam arvutada absoluutset viga, korrutise ja jagatise juures aga suhtelist viga.

Näited.

$$\begin{array}{r} \text{I.} \quad 2,43 \pm 0,04 \\ + \quad 0,012 \pm 0,0005 \\ \hline 28,1 \pm 0,2 \\ \hline 30,54 \pm 0,24 \\ \approx 30,5 \pm 0,3 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{II.} \quad 5,28 \cdot 10^7 \pm 0,03 \cdot 10^7 \\ \hline 3,30 \cdot 10^7 \pm 0,08 \cdot 10^7 \\ \hline 1,98 \cdot 10^7 \pm 0,11 \cdot 10^7 \\ \approx 2,0 \cdot 10^7 \pm 0,1 \cdot 10^7 \end{array}$$

III. Olgu meil korrutada arvud

$$24,32 \pm 0,05 \text{ ja } 0,0721 \pm 0,0002.$$

Absoluutsed vead on siin 0,05 ja 0,0002, suhtelised

$$\frac{0,05}{24,32} \approx 0,002 \text{ ehk } 0,2\% \text{ ja } \frac{0,0002}{0,0721} \approx 0,0028 \text{ ehk } 0,28\%.$$

Viimaste arvude asemele võib võtta ka 0,003 ja 0,3%.

Kui lühenduseks tähistame suhtelise vea „s. v.“, siis võib antud arve ka nõnda kirjutada:

$$24,32 \text{ (s. v. } \pm 0,002) \text{ ja } 0,0721 \text{ (s. v. } \pm 0,003) \\ \text{ehk } 24,32 (\pm 0,2\%) \text{ ja } 0,0721 (\pm 0,3\%).$$

Korrutis võrdub

$$24,32 \text{ (s. v. } \pm 0,002) \cdot 0,0721 \text{ (s. v. } \pm 0,003) \approx 1,753 \text{ (s. v. } \pm 0,005) \\ \text{ehk } 24,32 (\pm 0,2\%) \cdot 0,0721 (\pm 0,3\%) \approx 1,753 (\pm 0,5\%).$$

Kui suhteline viga ümber arvutada absoluutseks veaks, siis võib saadust kirjutada

$$1,753 \pm 0,009 \text{ ehk ligikaudu } 1,75 \pm 0,01.$$

IV. Samu arve jagades leiame

$$\frac{24,32 (\pm 0,2^0/0)}{0,0721 (\pm 0,3^0/0)} \approx 337,3 (\pm 0,5^0/0) = 337,3 \pm 1,7 \approx 337 \pm 2.$$

Korrutistes ja jagatistes jätame muidugi kirjutamata need numbrid, mille suurusejärk on väikesem vea suurusejärgust. Seda võib saavutada kas sel teel, et me tarvitame ligikaudse korrutamise ja jagamise võtteid, või aga ka sel teel, et me korrutame ja jagame arvud harilikul viisil ja jätame saaduses ülearused numbrid ära, kirjutades, kui suurusejärk seda nõuab, nende asemele nullid.

V. Veel üks näide :

$$\frac{0,451 (\pm 0,001) \cdot 874,5 (\pm 0,2)}{3 \cdot 0,00026 (\pm 0,000005)} = \frac{0,451 (\pm 0,2^0/0) \cdot 874,5 (\pm 0,02^0/0)}{3 \cdot 0,00026 (\pm 1,9^0/0)}.$$

Et nii korrutamisel kui ka jagamisel tuleb suhtelised vead liita, siis saame resultaadi suhtelise veana

$$0,2^0/0 + 0,02^0/0 + 1,9^0/0 \approx 2^0/0$$

ja meie murd võrdub

$$505000 (\pm 2^0/0) = 505000 \pm 10000 = 5,05 \cdot 10^5 \pm 0,1 \cdot 10^5.$$

VI. Kui meil on tegemist avaldisega, milles esinevad nii liitmine ja lahutamine kui ka korrutamine ja jagamine, siis arvutame esimeste tehete juures absoluutse veaga, teiste juures aga suhtelisega. Näiteks

$$\begin{aligned} & \frac{0,38 (\pm 0,005) \cdot 5700 (\pm 20) + 149,5 (\pm 0,5)}{28,4 (\pm 0,04) \cdot 1,768 (\pm 0,0005) - 28,3 (\pm 0,04) \cdot 1,761 (\pm 0,0005)} = \\ = & \frac{0,38 (\pm 1,3^0/0) \cdot 5700 (\pm 0,4^0/0) + 149,5 (\pm 0,5)}{28,4 (\pm 0,14^0/0) \cdot 1,768 (\pm 0,03^0/0) - 28,3 (\pm 0,14^0/0) \cdot 1,761 (\pm 0,03^0/0)} \approx \\ \approx & \frac{2166 (\pm 1,7^0/0) + 149,5 (\pm 0,5)}{50,21 (\pm 0,17^0/0) - 49,84 (\pm 0,17^0/0)} = \\ = & \frac{2166 (\pm 37) + 149,5 (\pm 0,5)}{50,21 (\pm 0,085) - 49,84 (\pm 0,085)} \approx \frac{2316 (\pm 38)}{0,37 (\pm 0,17)} \approx \\ \approx & \frac{2320 (\pm 1,6^0/0)}{0,37 (\pm 46^0/0)} \approx 6 \cdot 10^3 (\pm 50^0/0) = 6 \cdot 10^3 \pm 3 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Siin on üksikute tegurite absoluutsed vead esiti ümber arvutatud suhtelisteks, siis tegurid korrutatud ja nende suhtelised vead liidetud; peale suhteliste vigade muutmist absoluutseteks on liitmine ja lahutamine läbi viidud, seejärel vead jälle muudetud suhtelisteks ja mõlemad arvud jagatud. Saaduse suhteline viga on lõpuks ka veel absoluutsena antud <sup>1)</sup>).

### Elementaarsete funktsioonide vead.

*Astme* suhteline viga võrdub astmealuse suhtelise vea ja astmenäitaja korrutisega. (Teisarvulise astmenäitajaga aste on ju võrdsete tegurite korrutis.) Näiteks

$$[0,75 (\pm 0,01)]^5 = [0,75 (\pm 1,3\%)]^5 \approx 0,237 (\pm 7\%) \approx 0,24 \pm 0,02.$$

*Juure* suhteline viga võrdub juurealuse suhtelise vea ja juurenäitaja jagatisega (mis järgneb sellest, et juurevõtmine on astmessevõtmise vastastehe).

$$\sqrt[4]{7,32 (\pm 0,005)} = \sqrt[4]{7,32 (\pm 0,07\%)} \approx 1,6449 (\pm 0,02\%) = 1,6449 \pm 0,0003.$$

*Logaritmil* ja samuti *trigonomeetrilistel funktsioonidel* võib leida viga, võttes tabelist üks kord funktsiooni väärtuse positiivse veaga seotud argumendilt, teine kord — negatiivse veaga seotud argumendilt. Funktsiooni otsitava väärtusena võtame keskmise leitud arvudest ja veana poole leitud arvude vahest.

Näiteks

$$\log_{10} 2,346 (\pm 0,002) = 0,3703 (\pm 0,0004),$$

$$\text{sest } \log_{10} 2,344 \approx 0,3700 \text{ ja } \log_{10} 2,348 \approx 0,3707.$$

Kui näiteks  $\log_{10} \operatorname{tang} \alpha = 0,78 (\pm 0,01)$ , siis  $\alpha = 80^\circ 35' (\pm 13')$ , sest  $\log_{10} \operatorname{tang} 80^\circ 22' \approx 0,77$  ja  $\log_{10} \operatorname{tang} 80^\circ 47' \approx 0,79$ .

*Eksponentsiaalfunktsiooni* suhtelise vea leiame valemist

$$\frac{c^{x(\pm a)} - c^x}{c^x} = \frac{c^x (c^{\pm a} - 1)}{c^x} = c^{\pm a} - 1 \approx \pm (c^a - 1).$$

<sup>1)</sup> Harjutusmaterjali leidub raamatus: G. R ä g o. Matemaatika tööraamat keskkoolidele. Algebra. III kl. kursus.

Näiteks  $1,8^{3,5 (\pm 0,3)}$  suhteline viga on ligikaudselt  
 $\pm (1,8^{0,3} - 1) \approx \pm 0,2$   
 ja  $1,8^{3,5 (\pm 0,3)} \approx 7,8$  (s. v.  $\pm 0,2$ ) =  $7,8 (\pm 20\%) = 7,8 \pm 1,6 \approx 8 \pm 2$ .

### Taylor'i valem.

Kes on tuttav differentsiaalrjutamisega, võib avaldise  $f(x, y, z)$  vea otstarbekohaselt määrata Taylori valemi abil.

Tuttavas sümboolses kirjaviisis on see

$$f(x+a, y+b, z+c) - f(x, y, z) = \left(a \frac{\partial}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z}\right) f(x, y, z) + \frac{1}{2!} \left(a \frac{\partial}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z}\right)^2 f(x, y, z) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \left(a \frac{\partial}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z}\right)^{n-1} f(x, y, z) + \frac{1}{n!} \left(a \frac{\partial}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z}\right)^n f(x+\theta a, y+\theta b, z+\theta c); 0 < \theta < 1.$$

Vigade arvutamisel võime tihti piirduda selle valemi esimese liikmega

$$f(x+a, y+b, z+c) - f(x, y, z) \approx a \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} + b \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} + c \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z},$$

peame aga seejuures muidugi hindama jääkliiget

$$\frac{1}{2} \left(a \frac{\partial}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z}\right)^2 f(x+\theta a, y+\theta b, z+\theta c)$$

ja oleme õigustatud tarvitama seda lahendust ainult siis, kui jääkliige võrreldes eelmise ligikaudse veaga osutub küllalt väikeseks. Muidu peame arvesse võtma ka teist, kolmandat jne. Taylori rea liiget, kuni jääkliige osutub küllalt väikeseks.

Näide:

$$f(\delta, \rho) = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta + \rho)}{\sin \frac{\rho}{2}} \quad \begin{aligned} \delta &= 48^\circ 16' (\pm 4') \\ \rho &= 58^\circ 10' (\pm 2'). \end{aligned}$$

$$f(\delta + a, \rho + b) - f(\delta, \rho) \approx a \frac{\partial f(\delta, \rho)}{\partial \delta} + b \frac{\partial f(\delta, \rho)}{\partial \rho}.$$

Avaldame vead kaaremõdus

$$a = \pm 0,0012 \quad b = \pm 0,00058.$$

Arvutame tuletised

$$\frac{\partial f}{\partial \delta} = \frac{\cos \frac{1}{2}(\delta + \rho)}{2 \sin \frac{\rho}{2}} \approx 0,62 \quad \frac{\partial f}{\partial \rho} = -\frac{\sin \frac{\delta}{2}}{2 \sin^2 \frac{\rho}{2}} \approx -0,86.$$

Vea suurusena saame

$$0,0012 \cdot 0,62 + 0,00058 \cdot 0,86 \approx 0,0012.$$

Et me võime piirduda vea arvutamisel esimese astme liikmetega, seda näeme Taylori valemi jääkliikmest, milles esinevad  $a^2$ ,  $2ab$  ja  $b^2$  korrutatud vastavalt teiste tuletistega; need on aga

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \delta^2} = -\frac{\sin \frac{1}{2}(\delta + \rho)}{4 \sin \frac{\rho}{2}} \approx -0,4; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial \delta \partial \rho} = -\frac{\cos \frac{\delta}{2}}{4 \sin^2 \frac{\rho}{2}} \approx -1;$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} = \frac{\sin \frac{\delta}{2}}{2 \sin^3 \frac{\rho}{2}} \approx 2$$

ja jääkliikme suurusjärk on võrreldav vea ruuduga; seetõttu võib teda vea arvutamisel kõrvale jätta.

Näite alguses antud funktsiooni väärtus on nõnda

$$\frac{\sin \frac{1}{2}(\delta + \rho)}{\sin \frac{\rho}{2}} = 1,6477 \pm 0,0012.$$

### Mõned ligikaudsed valemid.

Kui  $\alpha$  ja  $\beta$  on võrreldes ühega väikesed arvud, siis võib tarvitada järgmisi ligikaudseid valemiteid (kus  $\alpha$  ja  $\beta$  võivad olla nii positiivsed kui negatiivsed):

- 1)  $(1 + \alpha)(1 + \beta) \approx 1 + \alpha + \beta$     2)  $(1 + \alpha)^2 \approx 1 + 2\alpha$   
 3)  $(1 - \alpha)^2 \approx 1 - 2\alpha$     4)  $\frac{1}{1 + \alpha} \approx 1 - \alpha$     5)  $\frac{1}{1 - \alpha} \approx 1 + \alpha$   
 6)  $\sqrt{1 + \alpha} \approx 1 + \frac{1}{2}\alpha$     7)  $\sqrt{1 - \alpha} \approx 1 - \frac{1}{2}\alpha$     8)  $(1 + \alpha)^n \approx 1 + n\alpha$   
 9)  $\sqrt[n]{1 + \alpha} \approx 1 + \frac{1}{n}\alpha$     10)  $\frac{1}{(1 + \alpha)^2} \approx 1 - 2\alpha$     11)  $\frac{1}{\sqrt{1 + \alpha}} \approx 1 - \frac{1}{2}\alpha$

Näiteid. Sulgudes on tähendatud tarvitatud valemi number.

$$1,03 \cdot 0,98 \approx 1,01 \quad (1.) \quad 1,036^2 \approx 1,072 \quad (2.)$$

$$\frac{1}{0,92} \approx 1,08 \quad (5.) \quad \sqrt{1,12} \approx 1,06 \quad (6.)$$

$$\sqrt[7]{0,95} \approx 0,993 \quad (9.) \quad \frac{1}{\sqrt{0,8}} \approx 1,1 \quad (11.)$$

$$\frac{1}{5,375^2} = \frac{1}{5^2} \cdot \frac{1}{1,075^2} \approx 0,04 \cdot 0,85 = 0,034 \quad (10.)$$

$$\frac{1}{\sqrt{36,94}} = \frac{1}{\sqrt{36 \cdot 1,026}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,026}} \approx \frac{1}{6} \cdot 0,987 \approx 0,165 \quad (11.)$$

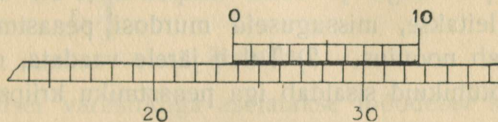
## II.

# Üldmõõtmised.

### 1. Noonius.

Mõõtes pikkusi näiteks mm-jaotistega varustatud mõõtuuga, tuleb millimeetri osi hinnata silma järele. Niisugune jaotiste (kriipsuvahede) murdosade hindamine ei ole täppis ning nõuab vaatlejalt vilumust. Palju täpsamalt sünnib kriipsuvahede murdosade määramine nooniuuse abil.

Sagedamini tarvitavaks nooniuuseks on peaastmiku kõrval liikuv abiastmik, mille 10 kriipsuvahet võrduvad 9 peaastmiku kriipsuvahega. Nii on iga nooniuuse kriipsuvahe lühem kui peaastmiku kriipsuvahe  $\frac{1}{10}$  peaastmiku kriipsuvahe võrra.



1. joonis.

Riistad, kus nooniuust tarvitatakse, on nii ehitatud, et mõõtmistel tuleb määrata nooniuuse nullkriipsu asend peaastmiku suhtes. Seejuures loetakse esiti peaastmiku terved kriipsuvahed kuni nooniuuse 0-kriipsuni (cm, mm või nende osad), siis vaadatakse, milline nooniuuse kriips ühtub peaastmiku kriipsuga. Olgu see näiteks 7. nooniuuse kriips (1. joonis). Järgmine madalam, s. o. kuues, ei ühtu ühegi peaastmiku kriipsuga, vaid asetseb sellest  $\frac{1}{10}$  peaastmiku kriipsuvahe võrra kaugemal; viienda nooniuusekriipsu kaugus peaastmiku kriipsust on  $\frac{2}{10}$  jne. Nooniuuse nullkriipsu kaugus peaastmiku kriipsust on  $\frac{7}{10}$  peaastmiku

kriipsuvahet. Seega on seda liiki nooniusse tarvitamisel mõõdetava asja pikkusearvu murruline osa nii mitu kümnendikku peaastmiku kriipsuvahet, kui mitmes nooniusse kriips ühtub astmiku ühe kriipsuga.

Nooniusse tarvitamist selgitab 1. joonis. Nagu joonisest näha, on nooniusse nullkriipsu asend peaastmiku suhtes 23,7 mm, sest 7. nooniusse kriips ühtub peaastmiku kriipsuga. Nimelt siis, kui on tegemist kümne kriipsuvahega nooniussega. Sageli on tarvitusel ka teissugused nooniused. Nii on nooniusi, mille 20 kriipsuvahet võrdub 19 astmiku kriipsuvahega, 30—29, 40—39, 50—49 jne. Üldse on kriipsuvahed nooniusel nii märgitud, et  $n$  selle kriipsuvahet võrdub  $n-1$  peaastmiku kriipsuvahega. Seega on iga nooniusse kriipsuvahe lühem peaastmiku kriipsuvahest  $\frac{1}{n}$  peaastmiku kriipsuvahe võrra. Leiti katse juures, et nooniusse  $s$ -kriips ühtus peaastmiku kriipsuga, siis on mõõdetava pikkuse arvu murruline osa  $\frac{s}{n}$  peaastmiku kriipsuvahet. Võrdub seejuures peaastmiku iga kriipsuvahe  $k$  millimeetriga, siis on otsitav murruline osa millimeetris  $\frac{s}{n} \cdot k$ .

Iga kord nooniusse tarvitamisel tuleb järgmist silmas pidada: 1) Tuleb järele vaadata, milline on tarvitatava nooniusse ehitus, s. o. mitu peaastmiku kriipsuvahet võrdub osadeks jaotatud nooniusse üldpikkusega ja mitu kriipsuvahet on märgitud viimasel. Siit leitakse, missuguseid murdosi peaastmiku kriipsuvahedest annab noonius. 2) Tuleb järele vaadata, mitu ja missuguseid mõõtühikuid sisaldab iga peaastmiku kriipsuvahe.

### Näide 1.

Katses tarvitatav riist on varustatud nooniussega, mille 50 kriipsuvahet võrduvad 49 peaastmiku kriipsuvahega. Seega võimaldab see noonius  $\frac{1}{50}$  peaastmiku kriipsuvahe osade lugemi. Katse puhul ühtus 27. nooniusse kriips peaastmiku kriipsuga, mis annab  $\frac{27}{50}$  peaastmiku kriipsuvahet. Lähemal vaatlusel selgus, et iga peaastmiku kriipsuvahe pikkus on  $\frac{1}{2}$  mm. Seega annab nooniusse lugem  $\frac{27}{50} \cdot \frac{1}{2} \text{ mm} = \frac{27}{100} \text{ mm}$ .

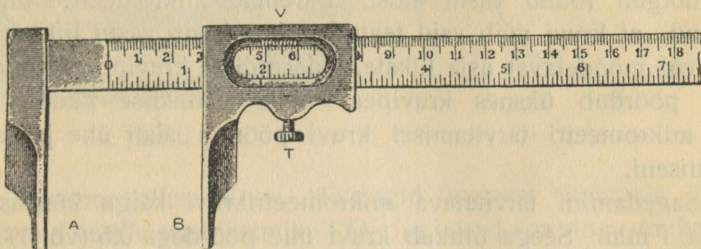
Selle riista nooniusse lugem annab seega nii mitu sajandiku mm osa, kui mitmes nooniusse kriips ühtub peaastmiku kriipsuga.

## Näide 2.

Goniomeeter on varustatud ringastmikuga, mille iga kriipsuvahe on  $\frac{1}{4}^\circ$  ehk  $20'$ . Liikuv alidaadil on märgitud noonius, mille 40 kriipsuvahet ühtuvad 39 peaastmiku kriipsuvahega. Seega võimaldab noonius siin  $\frac{1}{40}$  peaastmiku kriipsuvahe osa lugemi. Et iga peaastmiku kriipsuvahe =  $20'$ , siis annab noonius lugem  $(20 \cdot \frac{1}{40})' = \frac{1}{2}' = 30''$ . Katse juures ühtus 13. noonius kriips peaastmiku kriipsuga, seega annab noonius lugem  $(30 \cdot 13)'' = 390'' = 6' 30''$ .

## 2. Varbsirkel.

Pikkuste mõõtmiseks tarvitatakse sageli varbsirklit (2. joonis). Selle riista peaosaks on millimeeterastmikuga varustatud varb, mida mööda liigub lükati  $V$ . Lükati, samuti ka mõõtevarva üks ots on varustatud nokkadega  $A$  ja  $B$ . Lükatil on märgitud noonius astmik nii, et lükates nokad teineteise vastu, ühtub noonius nullkriips varbsirkli astmiku nullkriipsuga.



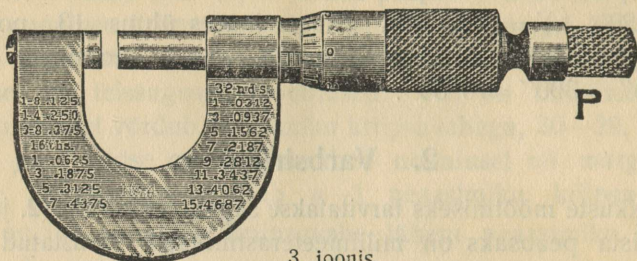
2. joonis.

Mõõtmisel varbsirkliga asetatakse mõõdetav keha nokkade vahele nii, et need nõrgalt rõhuksid mõõdetavat keha. Tugeva rõhumise eest tuleb hoiduda, vastasel korral võib varbsirkel, samuti ka mõõdetav keha deformeeruda.

Selle järele kinnitatakse lükati, kinnituskrugi  $T$  kinni kee- rates, ja loetakse mõõdetava keha pikkus. Seks loetakse noonius nullkriipsu asend mõõtevarba astmiku suhtes, sest nokkade kaugus teineteisest võrdub varbsirkli nullkriipsu ja noonius nullkriipsu kaugusega. Terved millimeetrid loetakse otse varbsirkli astmikult, osade lugemiseks aga tuleb tarvitada noonius. Alati, kui tarvitusele võetakse tundmata varbsirkel, tuleb järele vaadata, missugune ehitus on selle nooniusel ja mitu mm (või selle osa) sisaldab iga varbsirkli astmiku kriipsuvahe.

### 3. Mikromeeter.

Väga väikeste pikkuste (traadi läbimõõdu, pleki paksuse jne.) täpsaks mõõtmiseks tarvitatakse mikromeetrikruvi ehk mikromeetrit (3. joonis). Selle riista peaosaks on hästitreitud kruvi, mis liigub kindlas klambris edasi-tagasi.



3. joonis.

Mõõdetav asi asetatakse mikromeetri liikuva kruvi ja selle vastas asuva liikumatu aluse vahele ning kruvi pead pöörates nihutatakse kruvi mõõdetava asja vastu nii, et kruvi mõõdetavat asja nõrgalt rõhub vastu alust. Paremad mikromeetrid on nii ehitatud, et kruvi võib vaid teatud rõhumiseni vastu liikumatut alust või mõõdetavat asja lükata, edaspidisel kruvipea *P* pöörasisel pöördub üksnes kruvipea. Selle seadeldise puudumisel tuleb mikromeetri tarvitamisel kruvi pöörata alati ühe ja sama rõhumiseni.

Sagedamini tarvitatava mikromeetrikruvi käigu kõrgus on 0,5 või 1 mm. Seega nihkub kruvi ühe pöördega 0,5 (või 1) mm võrra edasi. Mõõtmisel mikromeetriga loetakse pooled (või täis-) millimeetrid mikromeetri teljel märgitud astmikult (pikiastmik), kuid millimeetri osad loetakse kruviga ühes liikuval trumlil märgitud astmikul (põikastmik). Harilikult on 0,5 mm käigukõrgusega mikromeetritrumli täispööre (360°) jagatud 50-eks kriipsuvaheks; seega pöörates mikromeetripeat ühe trumliastmiku kriipsuvahe võrra, nihkub kruvi  $\frac{1}{50}$  osa  $\frac{1}{2}$  millimeetrist, s. o.  $\frac{1}{100}$  millimeetrit edasi.

Pöörates mikromeetrikruvi aluse vastu, peab trumli nullkriips ühtuma mikromeetri teljel märgitud nullkriipsuga; vastasel korral tuleb määrata vastav nullkriipsu parandus, mida iga lugemi juures tuleb arvesse võtta.

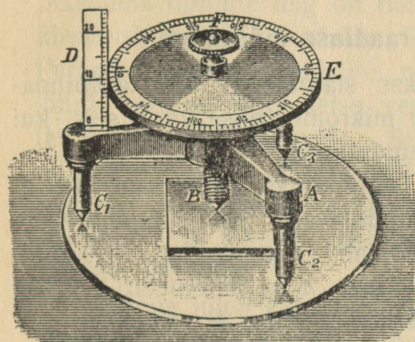
Igakord mikromeetri tarvitamisel tuleb enne vaadata, milline on selle kruvikäigu kõrgus ja milline astmik on trumlil.

## 4. Sfäromeeter.

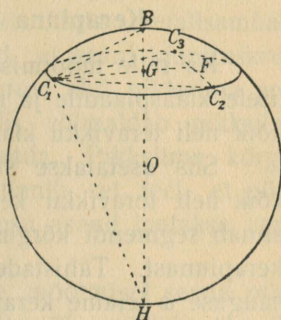
Sfäromeetrit tarvitatakse sageli kerapinna kõveruse raadiuse mõõtmiseks, millest riist on saanudki oma nimetuse.

Selle riista peaosaks on kolmjalg, mille teljeks on liikuv mikromeetiline kruvi  $B$  (4. joonis).

Kõik kolm jalga  $C_1$ ,  $C_2$  ja  $C_3$ , samuti ka mikromeetiline kruvi  $B$  on varustatud teravikkudega, kusjuures jalgade paigutus on niisugune, et nende teravikud moodustavad võrdkülgse kolmnurga tipud. Selle võrdkülgse kolmnurga raskustäpi kohal asetseb mikromeetiline kruvi.



4. joonis.



5. joonis.

Mikromeetrilise kruvi täisringid loetakse kolmjala külge kinnitatud vertikaalselt astmikult  $D$ , ringi osad aga ringastmikult  $E$ .

Sagedamini tarvitatavate sfäromeetrite mikromeetrilise kruvi käigu kõrgus on 1 või 0,5 mm.

On sfäromeetri mikromeetrilise kruvi käigu kõrgus 0,5 mm ja on seejuures terve ringastmik ( $360^\circ$ ) jaotatud 500 kriipsuvaheks, siis pöörates niisuguse sfäromeetri kruvi ühe ringastmiku kriipsuvahe võrra, tõuseb või vajub mikromeetiline kruvi  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{500} = \frac{1}{1000} = 0,001$  mm võrra.

Sfäromeetri tarvitamisel tuleb alati alul järele vaadata, kui suurt täpsust võimaldab antud riist.

### Klaasplaadi paksuse mõõtmine.

Seks asetatakse riista kõik kolm jalga tasapinnalisele klaasplaadile ja keeratakse mikromeetrilist kruvi, kuni ta teravik

puudutab klaasplaati, lõpetades puutemomendil kruvi keeramise. Et kruvi mitte liiga madalale ei oleks keeratud, selle kontrolliks vaadatakse järele, kas kõik kolm jalga ja kruvi teravik klaasplaati ühetugevuselt rõhuvad. Selle järele loetakse mikromeetrilise kruvi seis, millimeetrid (või pooled millimeetrid) vertikaalselt astmikult ja millimeetri osad ringastmikult.

Nüüd keeratakse mikromeetriline kruvi kõrgemale ja asetatakse selle alla mõõdetav klaasplaat. Selle järele keeratakse kruvi tagasi, kuni selle teravik mõõdetavat klaasplaati puudutab. Loetakse uuesti mikromeetrilise kruvi seis. Mõlemate lugemite vahe annab klaasplaadi paksuse.

### Kerapinna kõveruse raadiuse mõõtmine.

Ka selle mõõtmisel asetatakse sfäromeeter alul tasapinnalisele klaasplaadile ja määratakse mikromeetrilise kruvi seis, kui kõik neli teravikku klaasplaati puudutavad.

Siis asetatakse sfäromeeter kerapinnale ja seatakse nii, et kõik neli teravikku kerapinda puudutavad. Kahe lugemi vahe annab segmendi kõrguse, mille lõikab  $\Delta$ -ga  $C_1C_2C_3$  tasapind kerapinnast. Tähistades selle kõrguse  $h$  ja sfäromeetri jalgade kauguse  $a$  leiame kerapinna kõveruse raadiuse  $R$  valemist

$$R = \frac{h}{2} + \frac{a^2}{6h} \dots \dots \dots (1).$$

Valem (1) tuletatakse järgmiselt:

Olgu  $C_1C_2C_3$  (5. joonis) täpid, kus sfäromeetri jalgade teravikud puudutavad kerapinda;  $B$  on punkt, kus kerapinda puudutab mikromeetrilise kruvi teravik.  $B$  kõrgus tasapinnast  $C_1C_2C_3$  on  $h$ , mis mõõdetakse sfäromeetriga. Olgu  $O$  kerapinna keskpunkt ja  $R$  selle raadius. Diameeter  $BH$  lõikab  $\Delta C_1C_2C_3$  selle raskustäpis  $G$ .  $C_1G$  võrdub seejuures kahe kolmandikuga võrdkülgse kolmnurga  $C_1C_2C_3$  kõrgusest  $C_1F$ , mis omakord, nagu element. geometria õpetab,  $= \frac{a}{2} \sqrt{3}$ . Seega  $C_1G = \frac{a}{3} \sqrt{3}$ . Teiselt poolt on  $C_1G$  keskmine proportsionaalne  $BG$  ja  $GH$  vahel, millest järgneb

$$BG : C_1G = C_1G : GH$$

$$h : \frac{a}{3} \sqrt{3} = \frac{a}{3} \sqrt{3} : (2R - h)$$

$$R = \frac{3h^2 + a^2}{6h} = \frac{h}{2} + \frac{a^2}{6h}$$

$a$  mõõtmiseks vajutatakse sfäromeetri teravikkudega paberile jäljed ja paberilt mõõdetakse varbsirkli abil  $a$ .

Et resultaat oleks täpsam, korratakse  $a$  mõõtmist mitu korda.

## 5. Katetomeeter.

Katetomeetriga mõõdetakse kahe täpi vertikaalset kaugust ehk kõrgusevahet.

Riista peaosaks on üle 1 m pikk mm-jaotistega varustatud ja vertikaalse telje ümber pöörlev metallsammast. Mööda metallsammast liigub saan, mille külge kinnitatud pikksilm, kusjuures pikksilma optiline telg on risti katetomeetri teljega. Saani võib kinnituskruvi abil mistahes kõrgusel kinnitada metallsambale. Paremad katetomeetrid on nii ehitatud, et saani kinnituskruvi kinni keerates võib teise vertikaalse kruvi abil pikksilma aeglaselt üles-alla nihutada. See seadeldis võimaldab pikksilma niitristi täpsalt soovitava täpi kohale seada. Pikksilma kõrgus loetakse metallsamba astmikult, mis sünnib sel teel, et pikksilmaga ühes liikuva nooniuse nullkriipsu asend loetakse vertikaalselt astmikult.

Seega tuleb kahe täpi kõrgusevahe mõõtmisel seada pikksilm nii, et selle niitristi kohal oleks näha üks, näiteks ülemine täpp. Siis loetakse pikksilma kõrgus katetomeetri astmikult.

Samuti loetakse pikksilma kõrgus, kui pikksilma niitrist on seatud teise, s. o. alumise täpi kohale. Kahe lugemi vahe annab tähendatud kahe täpi vertikaalse kauguse ehk kõrgusevahe.

Katetomeeter toetub kolmele jalgkruvile  $m_1$ ,  $m_2$  ja  $m_3$ , mille abil seatakse katetomeetrisammast katse alul vertikaalsesse asendisse. Kas katetomeetrisammast on vertikaalne, seda näitab pikksilma peale (või alla) kinnitatud vesilood, mille telg on rööbiti pikksilma optilise teljega.

### Katetomeetrisamba seadmine vertikaalseks.

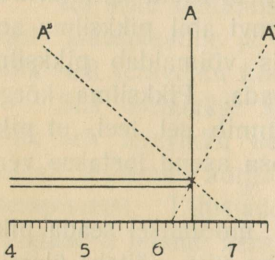
Pööratakse sammast seni, kuni pikksilma optiline telg on rööbiti kahte jalgkruvi, näiteks  $m_1$  ja  $m_2$ , ühendava sirgega. Kruvisid  $m_1$  ja  $m_2$  vastupidistes suundades pöörates tuuakse vesiloe õhumull õigesse asendisse, s. o. keskele. Selle järele pööratakse sammast ühes pikksilmaga  $180^\circ$  võrra. Näitab seejuures vesiloe õhumull nihkumist, siis parandatakse õhumulli pool nihkumist kruvide  $m_1$  ja  $m_2$  abil, pool parandust pikk-

silma kruvi abil. Uuesti pööratakse sammast ühes pikksilmaga  $180^\circ$  võrra ja parandatakse samal viisil õhumulli nihkumist. Katset jätkatakse, kuni pikksilma optilist telge  $180^\circ$  võrra pöörates vesiloe mull jääb paigale.

Siis pööratakse sammast ühes pikksilmaga  $90^\circ$  võrra, s. o. risti sirgega  $m_1$ ,  $m_2$ , ja kui vesiloe õhumull näitab nihkumist, tuuakse see kruvi  $m_3$  pööramisega õigesse asendisse tagasi.

## 6. Parallaksi viga ja peegelmikro tarvitamine.

Kõigi pikkusemõõtmiste juures, kus mõõdetav ese ei asetse mõõtpuu jaotistega ühel tasapinnal, peab silma asend lugemi juures olema niisugune, et sirge silmast mõõdetava täpini (näiteks elavhõbeniidi ots termomeetris) on risti mõõtpuuga, seega ka mõõdetava pikkusega.



6. joonis.

6. joonis kujutab elavhõbeniidi pikkuse mõõtmist. Joonisel on silma õige asend A-s. Asendeis A' ja A'' projektib silm niidi otsa viltu mõõtpuule, mille tõttu lugem esineb veaga. Nagu joonisel näha, näeb silm asendis A' niidi otsa 6,18 jaotisel, A''-s 7,09, kuna õige

lugem on 6,47. Säärast lugemi viga nimetatakse parallaksi veaks. Ta esineb õige sageli termomeetrite ja teiste lugemite juures. Sageli leitakse silma õige asend, otsides kohta, kus astmiku kriipsud on näha sirgetena.

Parallaksi viga võib kõrvaldada, kui tarvitada peegelmikro, s. o. seesugust astmikku, mis märgitud peegliribale. Niisugusel korral hoitakse silm lugemi juures asendis, kus näha mõõdetava täpi kujutis täpi enda kohal.

## 7. Baromeeter.

Õhurõhumist mõõdetakse baromeetriga. Kui ca 80 cm pikkune ja ühest otsast kinnine klaastoru täita elavhõbedaga ja selle järele, lahtist otsa sõrmega sulgedes, pöörata toru ümber ning pista otsapidi elavhõbedaga täidetud anumasse, siis sõrme ära võttes langeb elavhõbe torus vähe allapoole, kuid jääb teatud kõrgusele seisma.

Torus olevat elavhõbedat tasakaalustab väline õhu rõhk. Sellel katsel põhjenebki baromeeter.

Normaalseks elavhõbedasamba kõrguseks — sageli baromeetri kõrguseks nimetatud — loetakse  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  geograafilisel laiusel ja merepinna kõrgusel 760 mm, kusjuures seda loetakse elavhõbeda pinnast anumaks kuni elavhõbeda pinnani torus. Torus elavhõbeda kohal on nn. Torricelli tühjus.

Baromeetri kõrguse mõõtmiseks on toru kõrvale kinnitatud mm-jaotistega varustatud astmik, mille 0-kriips peab mõõtmise juures ühtuma elavhõbeda pinnaga lahtises anumaks. Mõõtmisel seatakse erilise kruvi abil astmiku nullkriips elavhõbeda alumise pinna kohale, mis näiteks seega teostatakse, et astmikku nihutatakse kruvi abil üles-alla, kuni astmikul märgitud kriips ühtub ujuja kriipsuga. Ujuja ujub anumaks elavhõbeda pinnal, seega tõuseb ja vajub ühes elavhõbedaga. Selle järele võib astmiku liikumatult paigale kinnitada.

Ülemise elavhõbedapinna kõrguse lugem sünnib sageli mikroskoobi või luubi abil. Baromeetritoru taha asetatakse valguseallikas; seejärele nihutatakse mikroskoopi üles-alla, kuni mikroskoobis olev niitrist ühtub elavhõbeda pinnaga torus. Seejuures tuleb meeles pidada, et mikroskoobis on näha elavhõbedasamba ümberpööratud kujutis. Mikroskoobiga ühes liigub peaastmiku kõrval abiastmik — noonius — nii, et nooniusse 0-kriips on mikroskoobis oleva niitristiga ühel kõrgusel. Seega tuleb lugeda vaid nooniusse 0-kriipsu asend peaastmiku suhtes.

Üldiselt oleneb elavhõbedasamba rõhk torus raskustungist. Raskustung aga oleneb asukohast maakera pinnal ehk õigemini geograafilisest laiusel ja ka kõrgusest merepinnast. Seepärast on tarvitusele võetud taandada baromeetri lugem 45. laiuskraadile ja merepinna. Tarvilik parandus on üldiselt väike: näiteks Kesk-Euroopas laiusel  $1^{\circ}$  suurenemisega  $45^{\circ}$  juures on see  $+0,067$  mm ja tõusuga merepinnast kõrgemale 100 m võrra  $-0,024$  mm. Pealegi ei ole neid parandusi tarvis, kui tuleb leida vaid antud juhtumil baromeetri kõrgus.

Teisiti on lugu temperatuuri mõjuga. Elavhõbedasamba kõrgus, samuti ka astmiku pikkus oleneb tunduvalt temperatuurist.

Õhurõhk antakse harilikult elavhõbedasamba kõrgusena avaldatud mm  $0^{\circ}\text{C}$  juures. Seepärast tuleb teha 0-st erineva temperatuuri ( $t$ ) korral järgmised parandused:

Olgu elavhõbeda ruumpaisumiskoeffitsient  $\alpha = 0,000181$ . On elavhõbedasamba kõrgus temperatuuri  $t$  korral  $H_t$ , siis  $0^\circ$  juures oleks selle kõrgus  $H = H_t - \alpha H_t \cdot t$ .

Samuti on ka astmik  $0^\circ$  juures lühem  $\beta H_t \cdot t$  võrra, kus  $\beta$ -ga on tähistatud tema joonpaisumiskoeffitsient. See parandus tuleb võtta  $+$ -märgiga, sest astmiku pikenemise tõttu on elavhõbeda pinnani tõusnud vähemate numbritega märgitud jaotised kui siis, mil astmiku temperatuur oleks  $0^\circ \text{C}$ . On baromeetriastmik valgevasest, siis  $\beta = 0,000019$ .

Kaht eelmist parandust arvestades, on baromeetri kõrgus  $H_0$ ,  $0^\circ \text{C}$  juures

$$H_0 = H_t - (\alpha - \beta) H_t \cdot t.$$

Parandusist jõhvsuse ja elavhõbeda-aurude rõhu põhjal võib nende vähesuse tõttu loobuda.

## 8. Vesilood.

Laua või mõne teise tasapiinna horisontaalse seisu näitamiseks tarvitatakse vesiloodi.

Vesiloeks on metallplaadile kinnitatud klaastoru, mis õige vähe kõveraks on painutatud. Toru on täidetud eetriga, õhku on jäetud sinna vaid ühe õhumulli osa. Toru on kinnitatud metallplaadile, kusjuures toru suund on rööbiti aluslaua plaadi tasapinnaga. On viimane horisontaalne, siis asub õhumull toru keskel, mis harilikult märgitud kahe kriipsuga.

### Kolmele jalgkruvile toetuva lauakese horisontaalseisu asetamine vesiloe abil.

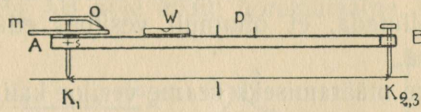
Vesilood asetatakse lauakesele rööbiti lauakese kahe jalgkruviga 1 ja 2. Mõlema jalgkruvi vastusuunalise pööramisega tuuakse vesiloe õhumull keskele. Selle järele pööratakse vesiloodi  $90^\circ$  võrra nii, et vesiloe suund oleks nüüd risti endise suunaga, s. o. sirgega 1, 2, ning pöörates jalgkruvi 3 tuuakse vesiloe õhumull keskele. Asetades vesiloe uuesti rööbiti jalgkruvidega 1 ja 2, kontrollitakse, kas vesiloe õhumull on keskel, vastasel korral korratakse katset veelkord.

Laua tasapind on horisontaalne, kui vesiloe õhumull lauale asetamisel ikka keskele jääb, olgu seejuures vesiloe suund milline tahes.

## 9. Vesiloe kaliibrimine.

Vesiloodide kaliibrimiseks tarvitatakse erilist riista, nn. vesiloe kaliibrijat. Sama riista tarvitatakse ka antud tasapindade väikese kallakuse määramiseks. Kallakuseks nimetatakse nurka antud tasapinna ja horisontaalse tasapinna vahel.

Riista peaosad on:  $T$ -kujuline metalltelg  $AB$ , mis toetub kolmele kruvile  $K_1$ ,  $K_2$  ja  $K_3$ , millest ühe ( $K_1$ ) seisu on võimalik määrata osuti  $O$  ja ringastmikuga (harilikult 100 jaotist) varustatud mõõteringi  $m$  abil, vesilood  $W$  ja alused  $P$ , millele asetatakse kaliibrimisel lahtised torukujulised vesilood (7. joonis).



### Riista kaliibrimine.

Et võimalik oleks riista kasutada, peame teda enne kaliibrima, s. o. kindlaks määrama, missuguse nurga moodustab riista telg  $AB$  oma algsuunaga, kui kruvi  $K_1$  pöörame 1-he mõõteringi  $m$  jaotise võrra. Selleks asetame riista mingile kindlale jalgkruvikete abil horisontaalselt seatud alusele, näit. klaasplaadile, ja seame telje niihästi suunas  $AB$  kui ka ristsuunas horisontaalseks vesiloe  $W$  abil. Nüüd määrame katetomeetri abil teljele  $AB$  kruvi  $K_1$  kohale tehtud märgi  $S$  seisu (kõrguse) kindlaks. Olgu katetomeetri loetud kõrgus  $h_1$ . Pöörame kruvi  $K_1$  osuti  $O$  abil  $n$  ringi (umbes 10–15) ja vaatame katetomeetri abil, millisel kõrgusel asub nüüd täpp  $S$ . Olgu see kõrgus  $h_2$ . Seega tõusis täpp  $S$  kruvi pööramisele  $n$  ringi võrra  $h = h_2 - h_1$  ja kruvi pööramisele ühe mõõteringi jaotise võrra

$$h = \frac{h_2 - h_1}{n \cdot 100} \dots \dots \dots (1),$$

ning vastav nurk riista telje algseisu ja seisu vahel peale kruvi  $K_1$  pööramise ühe mõõteringi jaotise võrra on (võrdhaarsest kolmnurgast  $SBS_1$ , kus külj  $SS_1 = h$  on väga väike võrreldes küljega  $SB = BS_1 = 1$ )

$$\alpha = \frac{h}{l} \dots \dots \dots (2),$$

kus  $\alpha$  on mõõdetud absoluutses nurgamõõdus (radiaanides) ja  $l$  tähendab riista telje  $AB$  pikkust, mõõdetud kruvi  $K_1$  teljest kruve  $K_2$  ja  $K_3$  telgi ühendava sirgjooneni.

Ehk ümber arvutades otsitud nurga suurust sekunditesse, leiame ( $1$  radiaan  $= 57^\circ 17' 45''$ )

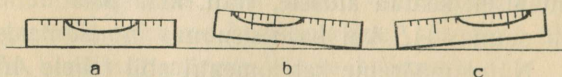
$$\alpha'' = \frac{h}{l} \cdot 206265'' \dots \dots \dots (3).$$

Märkus: Meil tarvitada oleval riistal on  $l = 74,606$  cm.

### Vesiloe tundlikkuse määramine.

Vesiloe tundlikkuseks nimetatakse nurka, mille võrra on vaja vesiloe telge kallutada, et õhumull vesiloes edasi nihkuks ühe kriipsuvahe võrra.

Tundlikkuse määramiseks seame vesiloe kaliibrija kõigepealt horisontaalsesse asendisse, enne muidugi järele vaadates, et alused, millele kruvid  $K_1, K_2, K_3$  toetuvad, ise oleksid horisontaalsed. Siis asetame uuritava vesiloe kas otseselt teljele  $AB$  või alustele  $P$ , selle järele, kas vesiloele enesel on alust või ei ole, nii et ta telg oleks paralleelne vesiloe kaliibrija teljega  $AB$ . Säärasel juh-tumil peab vesiloe õhumull asuma just keskkohal (8. joonis *a*). Nüüd pöörame kruvi  $K_1$ , kuni õhumull nihkub äärmise jaotiseni (8. joonis *b*).



8. joonis.

Märgime üles, missugusel mõõteringi jaotisel asub osuti  $O$ . Siis pöörame kruvi  $K_1$  tagasi, kuni õhumull on nihkunud edasi ühe kriipsuvahe võrra, ja vaatame, mitme mõõteringi jaotise võrra oli meil vaja pöörata kruvi. Sedaviisi toimime edasi, iga vesiloe kriipsuvahe jaoks leides vastava mõõteringi jaotiste arvu, kuni õhumull on jõudnud teisepoole äärmise jaotiseni (8. joonis *c*). Siit edasi hakkame kruvi  $K_1$  vastupidises suunas pöörama, see-juures samuti leides, mitme mõõteringi jaotise võrra on vaja pöörata kruvi, et õhumull nihkuks ühe kriipsuvahe võrra tagasi. Samuti toimime, kuni oleme tagasi jõudnud algseisu (8. joonis *b*). Kõigist niiviisi leitud mõõteringi jaotiste arvudest võtame aritmeetilise keskmise. Olgu see  $m$ . Eelmisest ülesandest on meil aga teada, et

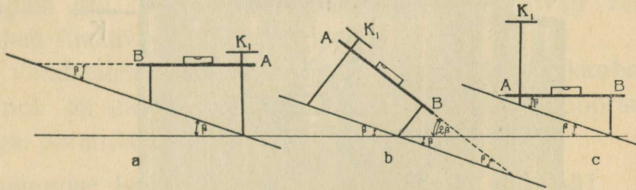
kruvi pöörämisel ühe jaotise võrra vesiloe kaliibrija ja seega ka vesiloe telg kaldub nurga  $\alpha$  võrra. Seega vesiloe tundlikkus

$$\gamma'' = m \cdot \alpha'' \dots \dots \dots (4).$$

**Tasapinna kallakuse määramine.**

Seame vesiloe  $W$  telje paralleelseks riista teljega  $AB$ , asetame vesiloe kaliibrija mõõdetavale kaldpinnale nii, et selle telg  $AB$  oleks paralleelne kallakuse suunaga, ja pöörame kruvi  $K_1$ , kuni vesilood näitab, et telg on horisontaalne (9. joonis *a*).

Märgime üles osuti  $O$  seis. Pöörame nüüd vesiloe kaliibrija ümber, nii et otsad  $A$  ja  $B$  oleksid vahetatud (9. joonis *b*). Näeme, et siis riista telg  $AB$  pole enam horisontaalne, vaid moodustab



9. joonis.

sellega nurga  $2\beta$ , kus  $\beta$  on otsitav pinna kallakus. Seades riista kruvi  $K_1$  abil uuesti horisontaalseks (9. joonis *c*), paneme tähele, mitme mõõteringi jaotise võrra selleks vaja on pöörata kruvi. Olgu see arv  $r$ . Teades eelmisest, et ühele jaotisele vastab nurk  $\alpha$ , (3) saame otsitava pinnakallakuse :

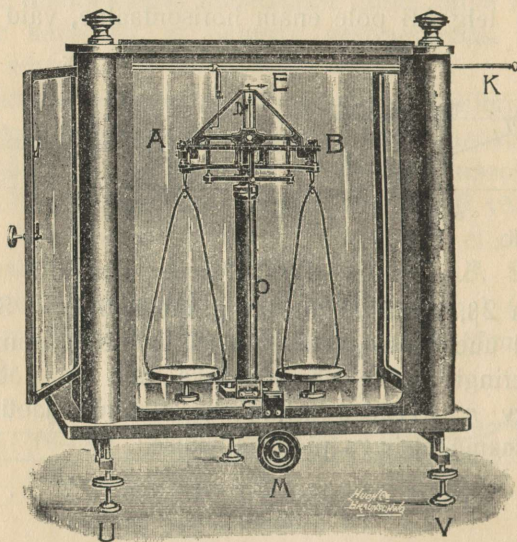
$$\beta = \frac{l}{2} r \cdot \alpha \dots \dots \dots (5).$$

**10. Kaalud.**

Kaalusid tarvitatakse selleks, et määrata keha massi suhet aluseks võetud massiühikuga (etalooniga). Tühjas ruumis suhtuvad kehade massid samuti nagu nendesse mõjuvad maakera tõmbetungid, s. o. kehade raskused. Siinjuures ei tohi unustada, et keha mass on jääv suurus ja ei olene sellest, kus kohal asub keha; keha kaal (raskus) aga oleneb täiesti keha asupaigast maakera suhtes. Et harilikkude kangkaaludega töötades võrreldakse ühes ja samas kohas kaalutavasse kehasse mõjuvat maakera tõmbetungi vihtidesse mõjuva tõmbetungiga ja sealjuures teada on vihtide mass, siis saame seesuguse kaalumise teada keha massi. Mitte nii ei ole aga lugu näit.

vedrukaaludega, mis mõõdavad ainult kehasse mõjuvat maakera tõmbetungi, seega annavad meile ainult keha kaalu (raskuse), aga mitte ka massi. Tegelikult oludes on keha kaalu (raskuse) muutused kohaga väga väikesed.

Massiühikuks on gramm (g). See on üks tuhandik Pariisis rahvusvahelises mõõtude ja kaalude kojast alalhoitavast plaatina- ja iriidiumisegust valmistatud kilogrammist (kg). Ligikaudselt on 1 g võrdne ühe kuupsentimeetri neljakraadilise ( $+4^{\circ}\text{C}$ ) vee kaaluga (täpsamalt:  $1,000027\text{ cm}^3$  vee kaal = 1 g). Kaalu (raskuse-)ühikuks on samuti grammkaal, mis on ühte gramm-massisse mõjuv raskustung.



10. joonis.

Analüütilised kaalud (10. joonis) — nii nimetatakse peeni kaalusid seetõttu, et neid väga suurel määral tarvatakse keemiliste analüüside juures — kujutavad enesest võrdõlgset kangi  $AB$ , mis toetub terava prismaga poleeritud terasest või ahaadist laagrile. Samuti on kausid riputatud õlgade otstele prismade abil. Kangi keskohta on kinnitatud osuti  $O$ , mis astmiku  $S$  kohal võib liikuda. Mutrit  $D$  üles- või allapoole kruvides on võimalik muuta kaalukangi raskustäpi kõrgust ja seega kaalude tundlikkust. Keelekese  $E$  pööramisega ühele või teisele poole on võimalik teha mõlemaid kaaluõlgu üheraskusteks. Pöörates kruvist  $M$ , tõstetakse mehhanismi (areteerija)

abil kang ja kausid oma laagritelt üles, et õrnad prismad asjalt ei kuluks ega nürineks. Harjade abil saab väljastpoolt tarviduse korral summutada kausside õõtsumist, mida tohib teha ainult areteeritud kaalude korral. Jalgkruid  $U$  ja  $V$  ning vesilood on kaalude loodi seadmiseks.

Igakord enne kaalumisele asumist peab kontrollima, kas kaalud on korras. Seda tehakse järgmiselt:

1) Vaadatakse, kas kõik liikuvad kaalu osad on täiesti puhtad tolmust ja muust prügist.

2) Seatakse kruve  $U$  ja  $V$  pöörates kaalud loodi, s. o. nii, et vesiloe õhumull asuks just keskkohal.

3) Avatakse ettevaatlikult, aeglaselt areteerija, pöörates nupust  $M$ . Vaadatakse, kas kaalud võnguvad vabalt ja kas võnked kustuvad küllalt aeglaselt.

4) Vaadatakse, kas nulltäpp asub astmiku keskkohal; kui lahkumine on üle ühe jaotise, peab keelekese  $E$  pööramisega seda viga parandama.

Kaalumise kestusel peab järgmist silmas pidama:

1) Ei tohi toetuda ei kaalusid ümbritsevale klaaskastile ega lauale, millel kaalud asuvad, sest vastasel korral „lähksid kaalud loest ära“ ja seega võib nulltäpp suuresti muutuda.

2) Kaalukasti ukсед peavad vaatluste ajal olema suletud.

3) Kaalukaussid ei tohi vaatluste ajal õõtsuda. Kui seda on märgata, siis kohe areteerija sulgeda ja pintslikeste abil kausside õõtsumised summutada.

4) Vihte, ratsanikku ja kaalutavat eset tohib asetada kaalule ainult siis, kui see on areteeritud. Seejuures peab ka igast põrutusest hoiduma.

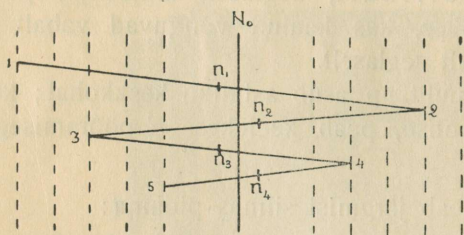
5) Vihte tohib tõsta ainult pintsettidega. Näppudega neid üldse ei tohi puutada.

6) Piinlikult tuleb hoiduda, et hüdrostaatilisel kaalumisel kui ka igasugu vedelikkude kaalumisel ei tilgutataks vett kaaludele.

7) Igal kaalul on oma kindel maksimaalne kandejõud, s. o. ülemmäär, kui raskeid kehi üldse tohib kaaludele asetada. Enamal jaol analüütilistel kaaludel on see koormise ülemmäär 200—500 g. Millalgi ei tohi raskemaid asju kaaluda, kui vastavatele kaaludele lubatud, muidu võib kaalud täiesti ära rikkuda.

## Kaalude nulltäpi määramine.

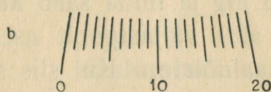
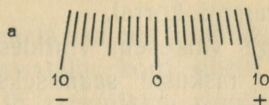
Nulltäpp ( $N_0$ ) on see astmikutäpp, mille kohale osuti kooramata kaalude korral seisma jääks, kui ei oleks hõõrumist ega muid segavaid mõjusid. Arvutada saab nulltäppi, kui panna kaalud võnkuma ja vaadelda osuti pöördetäppe. Kaalud, nagu iga korrapäraselt võnkuv keha, kaldub ühe võnke vältel peaaegu sama palju oma tasakaalutäpist paremale kui vasemale poole, ja seega on nulltäpp peaaegu osuti äärmiste seisude (pöördetäppide) keskkohal. Täpsalt oleks ta seda siis, kui võnkumised oleksid kustumatud. Et aga tegelikult võnked järjest



11. joonis.

kahanevad — kustuvad —, siis ei saa niiviisi veel õiget nulltäppi. Loetakse näit. esiteks vasemalt (1) ja siis paremalt (2) pöördetäpid ära, siis ei ole osuti kindlasti mitte enam läinud nii kaugele paremale tasakaalutäpist kui enne vasemale (11. joonis), ja me saaksime nulltäpiks täpi ( $n_1$ ), mis asub õigest vasemal. Loetakse aga enne paremalt (2) ja pärast vasemalt (3), siis saadakse nulltäpp ( $n_2$ ), mis asub õigest paremal. Õige nulltäpi leiame siis, kui võtame keskmise neist ebatäpsatest nulltäppidest ja säärast lugemist ja arvutamist veel kordame. Seejuures, nagu näha, tuleb lugeda ikka paaritu arv pöördetäppe, näit. 5 või 7, kusjuures sealtpoolt, kust alatakse (näit. vasemalt), tuleb lugeda ikka üks rohkem kui teiselt (paremalt) poolt. Selle asemel, et ikka kahest pöördetäpist arvutada ebatäpsad nulltäpid ja võtta neist siis paarikaupa keskmine, toimitakse nii: 1) võetakse kõigist lugemeist vasemalt keskmine, 2) kõigist lugemeist paremalt keskmine ja 3) neist kahest keskmisest uuesti keskmine. Nagu lihtsast matemaatilisest arvutusest selgub ja ka otseselt 11. jooniselt võib näha, saame seesugusel teel täpsalt sama resultaadi nagu ka allpoolkirjeldatud üksikasjalise arvutamise juures. Katse käik on siis: Peale seda, kui kaalud lk. 25 kirjeldatud viisil korda on seatud ja kontrollitud, avame ettevaatlikult areteerija, seks pöörates kaalu aluslaua küljes olevat suurt nuppu, mille tagajärjel

kaalud vabalt võnkuma hakkavad. Kui nad ei hakka võnkuma, siis sulgeme ja avame kohe uuesti areteerija. Et nulltäpi arvutamisel vaja ei oleks — ja + -märke tarvitada, siis loetakse astmiku keskpunkt mitte 0 (12. joonis a), vaid 10 (12. joonis b), vasempoolne 10 loetakse 0 ja parempoolne 10—20. Seega peab nulltäpp asuma 10-nda jaotise lähedal. Pöörde- $\frac{1}{10}$  täppide lugemise toimetame  $\frac{1}{10}$  jaotise täpsusega, kirjutame üles ning arvutame ülevaatlikkuse ning lihtsuse pärast nii:



12. joonis.

Näide:

9,2	
	11,2
9,3	
	11,1
9,3	
Keskmine: 9,27 + 11,15 = 20,42	
	$N_0 = 10,2$

Resultaadis võetakse siin üks koht peale koma. Tuleb hoolitseda, et võnkumiste amplituud ei oleks liiga suur, vaid püsiks 3—4 jaotise piires. Kui võnked on suuremad, siis suletakse areteerija ja avatakse uuesti hästi aeglaselt. Kui märgatakse, et võnked ei kahane enam-vähem ühtlaselt, siis tuleb vaatlus kohe katkestada ja uuesti otsast alata. Peale vaatlusi areteerija alati otsekohe ettevaatlikult, aeglaselt sulgeda. Kõigi vaatluste ajal peavad kaalusid ümbritseva klaaskasti ukсед olema suletud. Kui nulltäpp astmiku keskkohast enam kui ühe jaotise võrra erineb, siis peab kaalud lk. 25 seletatud viisil paremini tasakaalu seadma.

Nulltäpp pole peenemate kaalude juures pikemat aega püsiv ja seepärast tuleb see alati iga kaalumise eel uuesti määrata.

Harjutuseks tuleb nulltäpi määramist korrata, kuni pöörde- $\frac{1}{10}$  täppide lugemises on omandatud küllaldane vilumus.

## Kaalude tundlikkus.

Kaalude tundlikkus on tasakaalutäpi edasi nihkumine 1-mg-lise lisakoormise rakendamisel ühele kausile. Tundlikkus oleneb kaalude koormisest ja väheneb harilikult koormise kasvuga. Definiitsioonist järgneb kohe tundlikkuse määramise viis: vaja ainult asetada ühele kaalukausile lisaraskus mõni mg, vaadelda, mitme jaotise võrra tasakaalutäpp astmikul seetõttu kohalt nihkus, ja arvutada, kui suur oleks nihkumine ühe milligrammi korral.

Et harilikult kõige väikesem vihtidest kaalub 10 mg, siis tarvitatakse vähemate raskuste saamiseks nn. ratsanikku — väikest plaatinast või alumiiniumist painutatud traadikest, mille raskus on harilikult 10 mg ja mida saab kaalukasti läbiva varda K otsas oleva konksu abil väljastpoolt asetada jaotistega (harilikult 10) varustatud kaaluõlale. Kui siis säärane ratsanik asub näit.  $p$ -ndal õlajaotisel, siis mõjub ta kangi seaduse järele samuti kui  $p$  mg, mis asetatud vastavale kaalukausile. Ratsanikku tohib peale asetada, ära võtta ja edasi nihutada ainult selleks määratud varda K abil ja ainult areteeritud kaalude juures. Käega ratsanikku puutada ei tohi.

Tundlikkuse koormamata kaalude korral leiame nii:

1) Määrame nulltäpi ( $N_0$ ) lk. 26 näidatud viisil.

2) Asetame ratsaniku mingile õla jaotisele, näit.  $p$ -ndale, ja määrame vastava tasakaalutäpi  $N$ , s. o. täpi, kuhu nüüd osuti seisma jääks, kui ei oleks hõõrumist ega segavaid mõjusid, just samuti kui varemini nulltäpigi.

3) Kontrollime, kas nulltäpp on jäänud endisse kohta; kui lahkumine ei ületa 0,2—0,3 astmikujaotist, siis võetakse neist nulltäpest keskmine. Kui erinevus aga on suurem, siis tuleb katse tervelt korrata.

Neist andmeist saame tundlikkuse koormamata kaalude jaoks:

$$\tau_0 = \frac{N_0 - N}{p}.$$

Näide: Nulltäpp alguses:  $N_0' = 10,1$ . Ratsanik 2-sel jaotisel. Tasakaalutäpp 7,8. Nulltäpp lõpul  $N_0'' = 10,3$ . Siis: keskmine nulltäpp

$$N_0 = \frac{10,1 + 10,3}{2} = 10,2$$

ja tundlikkus:

$$\tau_0 = \frac{10,2 - 7,8}{2} = \frac{2,4}{2} = 1,2.$$

Koormatud kaalude jaoks tundlikkust harilikult eraldi ei määrata, sest tundlikkus oleneb koormise suurusest ja muutub aja jooksul; ta leitakse, nagu pärastpoole näeme, niikuinii iga kaalumise korral.

### Harjutus.

Määrata koormamata kaalude tundlikkus vähemalt 3—4 korda, asetades seejuures ratsaniku kord ühele, kord teisele öla jaotisele. Seejuures tohib ratsanikku ainult niikaugemale asetada, et tasakaalutäpp  $N$  ei erineks nulltäpist  $N_0$  mitte enam kui 2—3 jaotise võrra.

### Kaalumine.

Põhimõtteliselt on kaalumine lihtne: asetame kaalutava eseme ühele kaalukaasile ja teisele kaasile niipalju vihte, et osuti oleks parajasti nulltäpi kohal. Tegelikult aga on kaalumist seesugusel kujul väga raske läbi viia, sest tuleks enne väga kaua proovida vihtidega, kuni tasakaalutäpp ühtuiks nulltäpiga. Tegelikult toimetatakse nii: 1) Vaadatakse, kas kaalud on korras (lk. 25). 2) Määratakse iga kaalumise eel nulltäpp (lk. 26)  $N_0'$ . Olgu see näit. 10,1. 3) Asetatakse kaalutav ese ühele (harilikult vasemale) kaalukaasile ja teisele kaasile vihid. Vabastatakse areteerija ja vaadatakse, kummale poole kaalud kalduvad, s. o., kas vihte on palju või vähe peale pandud. Seejuures pole vaja areteerijat alguses täieliselt vabastada, vaid ainult niipalju, et oleks märgata, kuhupoole kaalud kalduvad. Niiviisi proovitakse kõik vihid läbi kindlas järjekorras, alates suurimast ja lõpetades vähimaga. Näit. nii: Arvata on, et keha kaalub vahest 10—20 g. Asetame siis kaalule 20-g vihi. Näeme, et seda on palju. Võtame 20 g ära ja paneme järgmise väikesema vihi, 10 g, asemele. Näeme, et seda on vähe. Jätame selle 10 g peale ja asetame järgneva väikesema vihi, 5 g, veel lisaks. Seda on palju. Võtame 5 g ära ja paneme asemele 2 g. On vähe. Jätame 2 g peale ja lisame 1 g juurde. Seda on palju. Võtame 1 g ära ja lisame 0,5 g juurde jne. Kuni oleme jõudnud kõige väikesema vihini (0,01 g). Et kergendada vihtide valikut, võib keha kaalu ligikaudu määrata enne lihtsatel kaaludel. Edasi proovitakse juba

ratsanikuga, kuni on näha, et osuti võngub nulltäpi läheduses (mitte enam kui 2—3 jaotist sellest eemal). Siinjuures tuleb lähele panna, et kaalutavat eset kui ka vihte tohib kaaludele asetada ainult siis, kui need on areteeritud, ja vihte ei tohi iialgi puutuda näppudega, vaid neid tohib tõsta ainult selleks määratud pintsetidega. Samuti ei tohi vihte kunagi jätta vedelema lauale või mujale, vaid peab nad, kaalukausilt ära võtnud, asetama kohe tagasi vihtide kasti — igaühe oma määratud kohale. Vihtide järjekord kassis olgu: 100, 100, 50, 20, 20, 10, 5, 2, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,2, 0,1, 0,05, 0,02, 0,02, 0,01 g. Kui siis kaalud on nii viisi vihtidega, mida selleks vaja  $P_1$  g (näit. 12,561 g) niikaugemale tasakaalustatud, et nad vabalt võnguvad, määratakse osuti pöördetäppidest (lk. 26) tasakaalutäpp  $N_1$ , mis olgu näit. 12,5. 4) Vaadatakse, võrreldes tasakaalutäppi nulltäpiga, kas vihte on palju või vähe, ja sellele vastavalt kas võetakse ära või lisatakse juurde mõni mg, selleks nihutades ratsanikku mõne jaotise võrra kas kaalukangi keskkoha poole või sealt eemale. Selle raskuse muutmise peab valima nii, et uus tasakaalutäpp asuks teisel pool nulltäppi, võrreldes esimesega. Olgu nüüd vihtide summa  $P_2$  g (näit. 12,564 g). Edasi määrame sellele raskusele vastava uue tasakaalutäpi  $N_2$ , näit. 9,7. 5) Määrame uuesti kontrolliks nulltäpi  $N_0''$  ( $= 10,3$ ). Kui see uus nulltäpp endisest ainult vähe erineb, siis võetakse neist keskmine ( $N_0 = \frac{N_0' + N_0''}{2}$ ), kui erinevus aga on suurem kui ca 0,2 astmikujaotist, siis tuleb kogu kaalumise korrata.

Nüüd on teada, et keha tõeline raskus on  $P_1$  ja  $P_2$  g vahel ja et raskuse muutmisel  $P_2 - P_1 = p$  mg võrra nihkub tasakaalutäpp  $N_1 - N_2$  jaotise võrra.

Arvutame kõigepealt kaalude tundlikkuse praeguse koormatise jaoks, sest tundlikkus on ju tasakaalutäpi nihkumine ühemilligrammilise vihtide raskuse muudatuse korral; siis:

$$\tau = \frac{N_1 - N_2}{P_2 - P_1} = \frac{12,5 - 9,7}{12564 - 12561} = \frac{2,8}{3} = 0,93 \text{ jaot/mg.}$$

Edasi arvutatakse, mitu mg on vaja  $P_2$ -st lahutada või  $P_1$ -ga liita, et osuti nihkuks vastavast tasakaalutäpist nulltäppi. Muutes vihtide hulka ühe milligrammi võrra, nihkub tasakaalutäpp  $\tau = 0,93$  jaotise võrra; tarvis teada, mitme mg võrra on vaja muuta  $P_1$ , et tasakaalutäpp nihkuks  $N_1$ -st kuni  $N_0$ , s. o.

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ mg} \dots \quad \tau = 0,93 \\
 X \text{ „} \dots N_1 - N_0 = 12,5 - 10,2 = 2,3 \\
 \hline
 X = \frac{2,3}{0,93} = 2,5 \text{ mg.}
 \end{array}$$

Seega  $P = P_1 + X = 12,561 \text{ g} + 2,5 \text{ mg} = 12,5635 \text{ g}$ . Et käesoleval juhtumil parandus  $X$  vihtidega  $P_1$  tuleb liita, näeme, võrreldes tasakaalutäppi  $N_1$  nulltäpiga  $N_0$ .

Sedaviisi toimides saame keha näiva kaalu õhus ainult siis õieti, kui mõlemad kaaluõlad on täpsalt ühepikkused, mis aga ei ole kunagi täielikult teostatav. Seepärast on säärane kaalumine täpsamate tööde juures lubatav ainult siis, kui on tegemist kaalude suhetega, nagu näit. erikaalu määramisel, keemiliste kaalanalüüside puhul jne. Vastasel korral peab õige väärtuse kehakaalu jaoks määrama kas kahekordse kaalumise või ka ta-reerimismeetodi abil.

### Kahekordne kaalumine.

Kui kaaluõlad ei ole täpsalt ühepikkused, siis ei anna ühekordne kaalumine õiget väärtust keha kaalu jaoks. Olgu kaalu vasema õla pikkus  $l$  ja parema  $r$ . Kui keha, mille tõeline kaal on  $K$ , asub vasemal kausil ja on tasakaalustatud vihtidega  $p_1$ , siis kangi seaduse põhjal:

$$l \cdot K = r \cdot p_1.$$

Kui asetame keha aga paremale kausile ja vihid vasemale, siis on vaja vihte  $p_2$  ja samuti kangi seaduse järele:

$$r \cdot K = l \cdot p_2.$$

Neist kahest võrrandist leiame:

$$K = \sqrt{p_1 \cdot p_2}.$$

Ehk, sest et  $p_1$  ja  $p_2$  harilikult väga vähe teineteisest erinevad,

$$K = \frac{p_1 + p_2}{2}.$$

Seega on vaja keha õige kaalu leidmiseks:

1) Keha asetada vasemale kaalukausile ja määrata tema kaal eespoolnäidatud viisil.

2) Asetada sama keha paremale kaalukausile ja määrata uuesti tema kaal samal viisil.

3) Leitud kaaludest võtta aritmeetiline keskmine.

## Keha kaal tühjas ruumis.

Et kaalumisi toimetatakse õhuga täidetud ruumis, siis ei saa nii ka absoluutset keha kaalu kätte, sest niihästi kaalutav keha kui ka vihid näivad õhus kergemad kui tõeliselt ja kergemad just niipalju, kui kaalub nende poolt väljatõrjutud õhk (Archimedes'e seadus). Seega ei suru keha ja vihid mitte kõige oma raskusega kaalukaussidele, vaid tasakaal on siis, kui:

$$K - A_k = P - A_p \dots,$$

kus  $K$  ja  $P$  on keha ja vihtide tõelised kaalud ja  $A_k$  ning  $A_p$  nende poolt väljatõrjutud õhu kaalud, nii et keha tõeline kaal oleks:

$$K = P + A_k - A_p.$$

Väljatõrjutud õhu kaalud  $A_k$  ja  $A_p$  saame arvutada, kui teame keha ja vihtide ruumala, sest: kaal = ruumala  $\times$  erikaal, ja õhu erikaal  $\lambda$  on teada ( $\lambda = 0,0012$ ). Olgu keha erikaal  $d$ , vihtide erikaal  $s$ , keha ruumala  $V_k$  ja vihtide ruumala  $V_p$ , siis keha poolt väljatõrjutud õhu kaal:

$$A_k = \lambda \cdot V_k = \lambda \cdot \frac{K}{d};$$

samuti: 
$$A_p = \lambda \cdot V_p = \lambda \cdot \frac{P}{s},$$

ja seega:

$$K = P + \lambda \frac{K}{d} - \lambda \frac{P}{s} = P + \lambda \left( \frac{K}{d} - \frac{P}{s} \right).$$

Et kogu parandusliige on võrdlemisi väike ja  $K$  ning  $P$  väga vähe teineteisest erinevad, ei tee suurt viga, kui viimases avaldises sulgudes  $K$  asemele asetame  $P$ , s. o.

$$K = P + \lambda \cdot P \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{s} \right),$$

kus õhu erikaal  $\lambda = 0,0012$  ja harilikkuude valgevasest vihtide korral  $s = 8,4$ . Kaalutava keha erikaalu võib leida raamatu lõpul olevast tabelist.

## 11. Erikaal. Tihedus.

Tihedus  $d$  on ühe ruumalaühiku aine mass, s. o. ühe  $\text{cm}^3$  aine mass grammides:

$$d = \frac{m}{v} \text{ g/cm}^3.$$

Erikaal  $e$  on ühe ruumalaühiku aine kaal, s. o. ühe  $\text{cm}^3$  aine kaal grammides:

$$e = \frac{p}{v} \text{ g/cm}^3.$$

Et  $1 \text{ cm}^3$  vett  $+ 4^\circ \text{C}$  juures kaalub praktiliselt küllalt täpsalt  $1 \text{ g}$  ( $0,999973 \text{ g}$ ), siis nimetatakse erikaaluks sageli ka suhet, mis näitab, mitu korda antud keha on raskem veest, s. o.

$$\text{erikaal} = \frac{\text{keha kaaluga}}{\text{sama ruumalaga vee kaaluga} + 4^\circ \text{C juures}}.$$

Et tihedus ja erikaal on arvuliselt võrdsed, siis ei tehta nende vahel sageli vahet. Nagu näha, on erikaalu määramine põhimõtteliselt väga lihtne: vaja keha kaaluda, mõõta kuidagi viisi selle ruumala ja jagada esimene arv teisega.

### Tahkete kehade erikaalu määramine otsese ruumala mõõtmise ja kaalumise abil.

Kui on tegemist korrapärase kujuga kehaga, näit.: kuup, kera, silinder jne., siis saame erikaalu lihtsalt: 1) kaalume keha ja 2) mõõdame keha suuruse — kõrguse, pikkuse, diameetri jne. kas lihtmõõtpuu või varbsirkli abil; siit arvutame selle ruumala.

### Tahkete kehade erikaalu määramine Archimedese seaduse järgi.

Võetakse aluseks erikaalu definitsioon kujul:

$$\text{Erikaal} = \frac{\text{keha kaaluga}}{\text{sama ruumalaga vee kaaluga } 4^\circ \text{C juures}}.$$

Teatavasti kaotab iga keha vees oma kaalust just niipalju, kui palju kaalub tema poolt väljatõrjutud vesi, s. o. kehaga võrdse ruumalaga vee hulk (Archimedese seadus). Seega leitakse erikaal nii kätte:

$$\text{Erikaal } e = \frac{\text{keha kaaluga}}{\text{keha kaalu kaotusega vees}} = \frac{P}{P - P_v},$$

kus  $P$  on keha kaal õhus,  $P_v$  keha kaal vees,  $P - P_v$  on seega keha kaalu kaotus vees.  $P$  ja  $P_v$  leitakse, kaaludes keha kord õhus, teine kord vees.

Katse käik on järgmine: Määratakse analüütilistel kaaludel antud keha kaal  $P$  ühekordse kaalumise teel. Siis asetatakse ühe kaalukaasi (vasakpoolse) kohale selleks valmistatud väike pingike nii, et kaalukauss seda mitte ei puutuks, vaid saaks vabalt liikuda. Asetatakse sellele pingikesele klaasanum destilleeritud veega. Riputatakse keha peene niidi või traadi abil ülal kaalukaasi hoidja küljes oleva konksu otsa nii, et ta täielikult ulatuks vette ja seejuures ei puutuks anumat. Õhumullikesed, mis keha külge võivad jääda, kõrvaldatakse kas mõne traadikese abil või lihtsalt liigutades keha vees. Nüüd määratakse säärases seisukorras uuesti keha kaal  $P_v$ . Täpsate mõõtmiste juures peab siinjuures arvestama ka ülesriputamiseks tarvitatud traadi kaalu; harjutuste juures pole see tarvilik. Siit keha kaalu kaotus vees:

$$P - P_v = p$$

ja otsitud erikaal:

$$e = \frac{P}{P - P_v}.$$

Et kaalumisi on toimetatud õhus ja ka tarvitatud vee temperatuur pole  $4^\circ \text{C}$ , siis peame õigema resultaadi saamiseks tegema väikesed parandused. Näiv keha kaal õhus oli  $P$ ; tema tõeline kaal on siis  $P + l$ , kus  $l$  on keha poolt väljatõrjutud õhu kaal. Samuti ei ole ka väljatõrjutud vee tõeline kaal  $p$ , vaid  $p + l$ .  $+ 4^\circ \text{C}$  juures oleks aga sama ruumalaga vee kaal  $\frac{p+l}{Q}$ , kus  $Q$  on vee tihedus antud temperatuuris. Seega tõeline erikaal

$$e = \frac{P+l}{p+l} \cdot Q \dots \dots \dots (1).$$

Et aga  $\frac{p+l}{Q}$  on väljatõrjutud vee ja seega ka keha ja väljatõrjutud õhu ruumala, siis

$$l = \frac{p+l}{Q} \cdot \lambda,$$

kus  $\lambda$  — õhu erikaal. Siit leiame väljatõrjutud õhu kaalu

$$l = \frac{p\lambda}{Q - \lambda}.$$

Asetades selle  $l$  väärtuse avaldisse (1) leiame:

$$e = \frac{P + \frac{p\lambda}{Q-\lambda}}{p + \frac{p\lambda}{Q-\lambda}} \cdot Q = \frac{(P \cdot Q - P \cdot \lambda + p\lambda)(Q-\lambda)}{(p \cdot Q - p \cdot \lambda + p\lambda)(Q-\lambda)} \cdot Q = \frac{P}{p} \cdot (Q-\lambda) + \lambda.$$

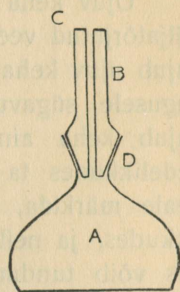
Vee tihedused  $Q$  on toodud raamatu lõpus tabelis nr. 2. Õhu tiheduseks võib võtta keskmise väärtuse toatemperatuuris:  $\lambda = 0,0012$ .

### Vedelikkude erikaalu mõõtmine püknomeetriga.

Mõõtes teatud ruumala vedeliku kaalu ja siis sama ruumala vee kaalu, saadakse nende arvude jagatisest erikaal.

Püknomeeter (13. joonis) on väike kindla mahuga klaaspudelike  $A$  täpsalt pealelihvitud klaaskorgiga  $B$ . Pikuti läbi korgi ulatub kapillaarne avaus  $C$ . Püknomeetrit peab enne tarvitamist puhastama ja kuivatama, nagu seletatud lk. 39.

Püknomeetri täitmiseks valatakse pudelike  $A$  pea ääreni vedelikku täis. Pannakse kork  $B$  peale nii, et ei jääks selle alla õhumullikesi ja et üleliigne vedelik kapillaari  $C$  kaudu välja pressitaks. Pealtpoolt kuivatatakse püknomeeter filterpaberiga, seejuures hoidudes püknomeetrit käega soojendamast. Lõpuks kontrollitakse, kas vedelik ulatub parajasti kapillaari ülemise ääreni.



13. joonis.

Erikaalu määramine toimub nii:

1. Kaalutakse puhastatud ja kuivatatud püknomeeter tühjalt analüütilistel kaaludel. Olgu leitud kaal  $K$ .
2. Täidetakse püknomeeter destilleeritud veega ja kaalutakse teist korda. Olgu see  $W$ .
3. Täidetakse enne kuivatatud või paar korda mõõdetava vedelikuga läbilõputatud püknomeeter mõõdetava vedelikuga ja kaalutakse jällegi. Olgu see  $G$ .

Siit saame püknomeetrisse mahtuva vedeliku kaalu  $P = G - K$  ja samasse mahtuva vee kaalu  $p = W - K$  ning erikaalu

$$e = \frac{P}{p} = \frac{G - K}{W - K}.$$

Et kaalumisi on toimetatud õhuga täidetud ruumis ja vee temperatuur pole katse ajal mitte  $4^{\circ}\text{C}$ , vaid  $t^{\circ}$ , siis arvutatakse parandus samuti kui tahkete kehade puhul lk. 34. näidatud, s. o. tõeline erikaal

$$e = \frac{G - K}{W - K}(Q - \lambda) + \lambda,$$

kus  $Q$  on vee tihedus  $t^{\circ}$  juures ja  $\lambda$  — keskmine õhu tihedus = 0,0012.

Kõik kaalumised siin tehakse ühekordselt ja 0,1 mg täpsusega.

### Vedeliku erikaalu määramine areomeetriga.

Ujuv keha vajub vedelikku just nii sügavalt, et tema poolt väljatõrjutud vee kaal on võrdne keha enese kaaluga. Seepärast vajub ujuv keha mitmesuguse erikaaluga vedelikkudes ka mitmesugusele sügavusele: suure erikaaluga (rasketes) vedelikkudes vajub keha ainult vähe sisse, väikese erikaaluga (kergetes) vedelikkudes ta vajub aga sügavale. Kui nüüd mingile kehale peale märkida, kui sügavale ta vajub teatud erikaaluga vedelikkudes, ja neile jaotistele vastavad erikaalud juurde kirjutada, siis võib tundmata vedeliku erikaalu üle otsustada selle järele, missuguse jaotiseni see keha vedelikku vajub, kui teda seal lasta ujuda. Sääraseks ujuvaks kehaks tarvitatakse õõnsat klaasilindrikest, mille ülemises otsas asub pikk peenike jaotistega varustatud toru ja allotsas tarvilise raskuse andmiseks elavhõbedaga või haavlitega täidetud kuulike.

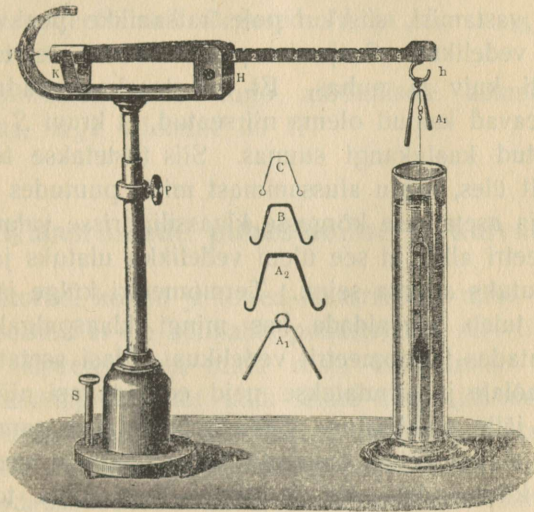
Lugemise korral ei tohi areomeeter mitte liiga anuma seinale lähedal asuda, ega tohi ta küljes ka õhumullikesi olla.

### Vedeliku erikaalu määramine Mohr'i kaaludega.

Kui asetada keha, mille ruumala on  $V$ , mingisse vedelikku, siis kaotab ta oma kaalust niipalju, kui palju kaalub ruumalaga  $V$  vedeliku hulk. Kui aga sellise kaalukaotuse mõõtmisel võtta kaaluühikuks mitte 1 g, vaid tarvitatud kehaga võrdse ruumalaga vee kaal, siis ongi sääraustes ühikutes mõõdetud keha kaalu kaotus võrdne vedeliku erikaaluga, sest

$$\text{erikaal} = \frac{\text{vedeliku kaaluga}}{\text{sama ruumalaga vee kaaluga } 4^{\circ}\text{C juures}}.$$

Seesuguseks vedelikku asetatavaks kehaks tarvitatakse harilikult erilist lühikest termomeetrit (et võimalik oleks korraka vedeliku temperatuuri määrata) ja selle kaalu kaotuse määramiseks mõõdetavas vedelikus nn. Mohri kaale (14. joonis). Need on nii valmistatud, et siis, kui termomeeter ei asu mingis vedelikus, ta on parajasti vastukaalu  $K$ -ga tasakaalustatud, mille paremaks äratundmiseks on teravikud  $J$ . Kui need ei peaks päris teineteise kohal asuma, siis võib neid nii seada, krui  $S$  abil alussammast kallutades. Kaaluõlg  $Hh$  on jaotatud 10-sse



14. joonis.

ossa. Termomeetrikaalu kaotuste määramiseks on kaaludega kaasa antud ratsanikud, millest kõige suurem kaalub just nii palju kui termomeetri poolt väljatõrjutud vesi, s. o. meie praegune kaaluühik. Ta tasakaalustab täppi  $h$  asetatult termomeetrikaalu kaotuse just  $4^{\circ}\text{C}$  destilleeritud vees. Kui aga termomeeter asetada mõnda teise vedelikku, siis tuleb ratsanik asetada juba mõnele teisele olajaotisele. Kui ta tasakaalustab termomeetrikaalu kaotuse, asudes jaotisel  $n$  (näit. 7-ndal), siis on ta mõju sama kui täppi  $h$  asetatud raskusel  $\frac{n}{10}$  (vt. ka lk. 28) ja seega ka vedeliku erikaal on  $0, n$  (näit. 0,7). Et aga säärase suure ratsanikuga saame ainult kümnendikud kätte, sest näit. 7-ndal jaotisel

oli raskus väike, 8-ndal aga juba liiga suur, siis on veel kaasa pandud ratsanikud, mille kaal on  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  ja  $\frac{1}{1000}$  suurima ratsaniku kaalust, seega annavad nad meile, asudes  $m$ -ndal, teine  $n$ -ndal ja kolmas  $p$ -ndal jaotisel, erikaaluks  $\frac{m}{100}$ ,  $\frac{n}{1000}$  ja  $\frac{p}{10000}$ , s. o. teise, kolmanda ja neljanda kümnendkoha.

Näiteks, asub üks suur ratsanik 10-ndal jaotisel, teine sama suur ratsanik 2-sel jaotisel, keskmine 5-ndal ja vähim 7-ndal, siis on erikaal  $e = 1,0 + 0,2 + 0,05 + 0,007 = 1,257$ .

Mõõtmist toimetatakse nii: Seatakse kaalud tasakaalu, s. o. teravikud  $J$  vastamisi, siis kui pole ratsanikke peal ega termomeeter asu vedelikus. Seejuures peab vaatama, et termomeeter oleks täiesti kuiv ja puhas. Et see tasakaaluseadmine oleks võimalik, peavad kaalud olema nii seatud, et kruvi  $S$  (14. joonis) oleks asetatud kaalukangi suunas. Siis tõstetakse termomeeter ettevaatlikult üles, kaalu alussammast mitte puutudes ega kohalt nihutades, ja asetatakse kõrgesse klaasilindrisse valatud vedelik nii termomeetri alla, et see üleni vedelikku ulatuks ja seejuures mitte ei puutuks anuma seinu. Termomeetri külge jäänud õhumullikesed tuleb kõrvaldada kas mingi klaaspulgakesega või lihtsalt liigutades termomeetrit vedelikus. Edasi asetatakse ratsanikke kaaluõlale ja nihutatakse neid edasi-tagasi niikaua, kuni kaalud on jälle tasakaalus. Seda toimetatakse samuti kindlas järjekorras, alates kõige suurema ratsanikuga ja asetades seda kõigepealt kümnendale õla jaotisele, just nagu toimetatakse vihtidegi valikul hariliku kaalumise korral (lk. 29.). Siis loetakse ratsanikkude asukohtadest kaaluõlal otsekohe, nagu näidatud ülalpool, vedeliku erikaal.

Igal seesuguseks otstarbeks valmistatud Mohri kaalude termomeetril on märgitud kas punase kriipsukesega termomeetri astmikul või antud arvuna temperatuur, mille juures ta annab meile õiged andmed, sest temperatuuri muutumisel muutub ka, ehk küll praktiliselt väga vähe, termomeetri ruumala. Et vedelikkude erikaal temperatuuri muutumisega suuresti muutub, siis peab alati ka teadma, missuguse temperatuuri juures erikaal on määratud. Seepärast loemegi termomeetrilt temperatuuri, kui see asub mõõdetavas vedelikus.

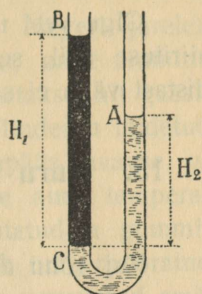
## Vedeliku erikaalu määramine U-torus.

Ühendatud anumates, mille kummaski anumal on isesugune vedelik, on tasakaal siis, kui vedelikkude kõrgused üle nende vahepinna on pöördvõrdelised nende erikaaludega, s. o.

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{e_1}{e_2}.$$

Kui nüüd ühe vedeliku erikaal on teada, näit. olgu I-ne vedelik vesi ( $e_2 = 1$ ), siis mõõtes katetomeetri abil kõrgused  $H_1$  ja  $H_2$ , saame arvutada II-se vedeliku erikaalu  $e_1$ .

Katetomeeter tuleb enne mõõtmisele asumist hoolega korda seada, nagu seletatud lk. 17.



15. joonis.

## 12. Klaasriistade puhastamine ja kuivatamine.

Klaastorud, kolvid ja teised klaasriistad, mille puhastamine mehaanilisel teel ei ole võimalik, puhastatakse sel viisil, et neisse kallatakse salpeeterhapet, mida riista kallutamise teel lastakse voolata edasi-tagasi, kuni kõik seinte külge jäänud mustus on happes lahustunud. On klaasriistad määrduvad rasvadega või õlidega, siis tarvitatakse nende puhastamiseks happe asemel leelisi (soodat, sööbenaatriumi- või sööbekaaliumilahust). Tuleb hoiduda seejuures, et vedelik kuidagi kätele ega riietele ei satuks. Seejärele loputatakse riist puhta veega mitu korda läbi nii, et hape või leeline on täielikult riistast välja uhetud.

Et riista kuivatamine rätikuga tegelikult on läbiviidamatu, samuti ka vee auramine on takistatud, siis võetakse ette niisugusel puhul kunstlik riista kuivatamine, mida järgmiselt toimetatakse. Riista kallatakse piiritust ja riista kallutamisega lastakse piiritus edasi-tagasi voolata, kuni kõik seinte külge jäänud vesi piirituses lahustub. Selle järele kallatakse piiritus välja ja selle asemele kallatakse eetrit, mille abil uhetakse riista seinte külge jäänud piiritus. Pärast eetri väljakallamist puhutakse gummipuhuja abil riistast kuiva õhku läbi, mis endaga ühes viib ka eetriauru. Eetriaur on õhust raskem, seepärast tuleb õhu läbipuhumise ajal riista lahtine pool hoida allpool, muidu ei tule eetriauru

riistast välja. Läbipuhumise ajal aurab eeter riistas kiiresti ja riist on kuiv.

Olgu veel tähendatud, et kõik vesi tuleb riistast välja uhta piirituse abil, sest eetriga vesi ei segune, seega eetriga vett riistast välja ei saa ajada.

### 13. Auru suhtelise tiheduse määramine Viktor Meyer'i järele.

Kui rõhu all  $H$  (mm Hg) ja temperatuuri  $t$  juures  $V$  cm<sup>3</sup> gaasi kaalub  $p$  g, siis tema erikaal

$$e = \frac{p}{V} \dots \dots \dots (1).$$

Et gaaside (aurude) ruumalad tunduvalt sõltuvad temperatuurist ja rõhust, siis antakse need nn. „normaalingimusil“, s. t. 0° C ja 760 mm elavhõbedasamba rõhu all. Olgu normaalingimusil gaasi ruumala  $V_0$ , siis

$$V_0 = V \cdot \frac{H}{760} \cdot \frac{1}{(1 + \alpha \cdot t)} \dots \dots \dots (2),$$

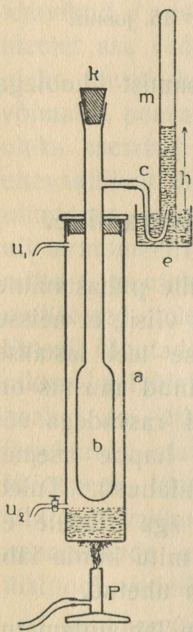
kus  $\alpha$  on üldine gaaside paisumise kordaja. Siit (1 ja 2) järgneb, et normaalingimusil erikaal

$$e_0 = \frac{p}{V_0} = \frac{p}{V} \cdot \frac{760}{H} \cdot (1 + \alpha \cdot t) \dots \dots (3).$$

Et 1 cm<sup>3</sup> gaasi (auru) kaal on väga väike arv, siis on otstarbekohane nende erikaalusid võrrelda mingi üldtuntud gaasi erikaaluga, näiteks vesiniku, sagedamini aga kuiva õhu erikaaluga. Normaalingimusil on kuiva õhu erikaal  $e_1 = 0,00129$ . Siis (3) järele, kui  $\alpha = 0,004$ , mis on ligikaudu toatemperaatuuri juures ca 70% relat. niiskuse korral õhupaisumise kordaja,

$$d = \frac{e_0}{e_1} = \frac{p}{V} \cdot \frac{760}{H} \cdot \frac{(1 + 0,004 \cdot t)}{0,00129} \dots \dots \dots (4),$$

kus  $d$  tähendab uuritava gaasi ja kuiva õhu erikaalude suhet normaalingimusil ning on seega nimeta arv. Et ainete erikaalud suhtuvad samaselt nende tihedustesse, siis võib  $d$ -d käsitleda kui uuritava gaasi (auru) tihedust õhu suhtes.



16. joonis.

Ülesanne: Määrata etüüleetri-( $C_4H_{10}O$ )auru tihedus õhu suhtes Viktor Meyeri järele.

Riista kirjeldus (16. joonis) (Viktor Meyeri järele). Klaasanum  $b$  on paigutatud metallsilindrisse  $a$ , mille alumine osa kraanini  $u_2$  täidetud veega; vett soojendatakse alt gaasipõleti  $P$  leegiga keemiseni. Seega on välissilinder  $a$  täidetud keeva vee auruga, millele võimaldatud väljapääs avause  $u_1$  kaudu, ja seesmine anum  $b$  püsib keeva vee auru temperatuuri juures. Anumast  $b$  viib  $U$ -taoliselt painutatud ja gummitoruga jätkatud klaastoru vesivanni  $e$ , kus lõpeb ümberpööratud veega täidetud mõõtklaasi  $m$  all. Mõõtklaas on varustatud  $cm^3$ -jaotistega. Uuritav vedelik juhitakse anumasse  $b$  väikeses klaaskuulikeses.

Katse käik. Kaalutakse tühi klaaskuulike analüütilistel kaaludel ( $p_1$ ).

Selle järele täidetakse kuulike eetriga järgmiselt: Katseklaasis soojendatakse vesi ligikaudu  $50^\circ$ – $70^\circ$ . Siis pistetakse kaalutud klaaskuulike vette, hoides seejuures kuulikese lahtist otsa eetris, mis valatud väikesse klaasanumasse. Õhk paisub temperatuuri tõusmisega ja tungib välja. Tõstes nüüd kuulikese veest välja, jättes tema lahtise otsa eetrisse, tõmbub õhk temperatuuri langemisel kokku ja eeter tungib välise õhu surve mõjul kuulikesse. Kui nõnda toimida paar korda, täitub kuulike eetriga. Et eetriga täidetud klaaskuulikest kaaluda (eetri kaalu leidmiseks) on soovitatav torukese lahtine ots Bunsen'i ehk tulitiku leegil kinni sulatada. Kaitseks leegi kuumuse vastu võib kuulikese mähkida külma veega niisutatud lapi sisse.

Nüüd kaalutakse kuulike ühes eetriga ( $p_2$ ), kust arvutatakse eetri kaal  $p = p_2 - p_1$ .

Avades kraani  $u_2$  kallatakse välisanumasse  $a$  seni vett, kuni ta hakkab  $u_2$  kaudu välja voolama. Seejärel suletakse kraan  $u_2$ . Nüüd täidetakse vann  $e$  veega. Loputatakse anum  $b$  veega, siis piiritusega ja lõpuks eetriga. Kuivatamiseks soojendatakse teda ettevaatlikult põleti leegi kohal. Samal ajal puhutakse tase gummist puhujaga klaastoru kaudu õhku, et välja tõrjuda eetriaurud. Seejuures hoitakse anuma lahtine ots allpool, sest eetriaur, mille tihedus suurem kui õhul, ei pääse muidu välja. Sulgedes anuma suu korgiga  $k$  paigutatakse ta oma kohale silindrisse  $a$ , ning toru  $c$  klaasjatk vesivanni  $e$ , kuid mitte mõõtklaasi  $m$  avause alla.

Süüdatakse põleti  $P$  ja keedetakse vett anuma  $a$  alumises osas, kuni temperatuur anumast  $b$  jääb konstantseks. Selle tunnuseks on õhumullide väljumise lõppemine toru  $c$  kaudu.

Siis paigutatakse toru  $c$  klaasjatk mõõtklaasi  $m$  alla.

Avades anuma  $b$  korgi  $k$  äravõtmisega lastakse sinna eetriga täidetud klaaskuulike ning ajaviimatult pannakse kork võimalikult kindlasti tagasi oma kohale, et selle toiminguga vältel õhk anumast  $b$  ei jahtuks.

Kuulike lõhkeb eetriauru rõhu surve all. Vabanenud aur tõrjub enda alla võetud ruumala võrra anumast  $b$  toru  $c$  kaudu õhku mõõtklaasi  $m$ . Kui lõpeb õhumullikeste kogunemine mõõtklaasi, võetakse kork  $k$  anumast  $b$  suult ja kustutatakse alles siis põleti. Toimides ümberpööratult, tõmbuks anumast  $b$  jahtuv õhk kokku ja imeks vannist  $e$  vee anumasse.

Selle järele oodatakse ca 5 minutit, mille vältel mõõtklaasi kogunenud õhk jõuab omandada toatemperatuuri, loetakse sinna kogunenud õhu ruumala  $V$  cm<sup>3</sup> ja määratakse mõõtpuuga klaasi jäänud veetulba kõrgus  $h$  mm (loetud vee pinnast vannis).

Lõpuks määratakse toatemperatuur  $t$  ja baromeetri seis  $b$  mm.

Arvutus tehakse avaldise (4) järele, kus  $H = b - \frac{h}{13,6}$ , sest veetulp  $h$  vähendab õhu rõhku  $H$  mõõtklaasis  $\frac{h}{13,6}$  Hg mm võrra (13,6 — elavhõbeda erikaal). Niihästi  $H$  kui ka  $b$  ja  $h$  tuleb avaldada mm-eis,  $p$  — grammes ja  $V$  — cm<sup>3</sup>-eis.

#### 14. Nurkade mõõtmine peegli ja astmiku abil.

Seda meetodit rakendatakse siis, kui tarvis mõõta nurk, mille võrra pöördub mingi seadeldis. Eriti tarvitatakse seda meetodit galvanomeetrite lugemite täpsuse tõstmiseks.

Olgu 17. joonisel  $T$  pöördetelg (risti joonise tasapinnaga), mille külge kinnitatud peegel  $pp$ . Viimasest kaugusel  $d$  asetsegu mm-jaotistega astmik  $AB$  ja selle all (või peal) niitristiga varustatud pikksilm  $P$ , mille optiline telg on risti astmikuga.

Kui peegel on rööbiti (asend  $pp$ ) astmikuga, näeb vaatleja pikksilmas niitristi kohal peeglis selle astmiku jaotise peegelpildi, mis asetseb pikksilma optilise telje kohal („nullseis“). Pöördub peegel nurga  $\alpha$  võrra (asend  $p_1p_1$ ), siis moodustab ka selle normaal  $N$  algsuunaga sama suure nurga  $\alpha$ . Pikksilma niitristiga

ühtub nüüd astmiku jaotise  $n$  peegelpilt, millelt langeb kiir peeglile nurga  $\alpha$  all. Seega peegli pöörangu korral nurga  $\alpha$  võrra on langeva ja peegeldunud kiire vaheline  $\angle nT0 = 2\alpha$ . Mida suurem on  $d$ , seda kaugemale 0-st nihkub ühe ja sama peeglipöörangu  $\alpha$  juures  $n$ .

Olgu  $n0 = s$ . Nagu näha joonisest,

$$\tan \angle nT0 = \tan 2\alpha = \frac{s}{d} \dots (1).$$

Väikeste nurkade (mõni kraad) korral võib  $\tan$ 'i asendada vastava kaarega ja kirjutada ligikaudselt

$$\alpha = \frac{s}{2d} \dots \dots \dots (2).$$

Kui katse ei nõua arvulist väärtust, vaid pöördenurkade  $\alpha_1, \alpha_2 \dots$  omavahelist võrdlust, pole tarvis mõõta peegli ja astmiku vahelist kaugust  $d$ , sest (2) järele

$$\alpha_1 : \alpha_2 \dots = s_1 : s_2 : \dots \dots \dots (3).$$

Pöördenurgad suhtuvad nagu nihkumised astmikul.

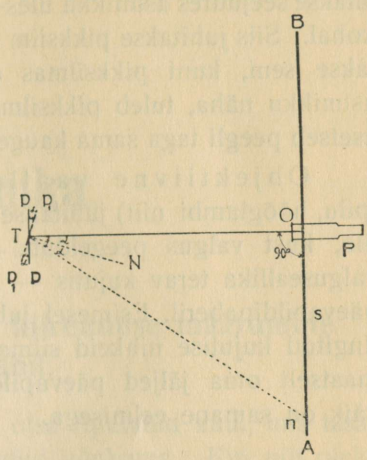
Valem (2) oleks täppis ka igasuguste suurte nurkade puhul, kui astmik  $AB$  moodustaks kaare, mille senter ühtuks peegli pöördeteljega. Sirgjoonelise astmiku korral (1 järele)

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{s}{d} = \frac{1}{2} \left( \frac{s}{d} - \frac{1}{3} \frac{s^3}{d^3} + \frac{1}{5} \frac{s^5}{d^5} \dots \right) \dots \dots (4),$$

kusjuures nurk väljendub radiaanides. Et saada  $\alpha$  kraadides, tuleb parem pool korrutada  $\frac{360}{2\pi} = 57^\circ,296$ . Igal üksikul juhtumil tuleb eriti otsustada, mitmes  $\arctan$ . rea (avaldis sulgudes) liige avaldab mõju tulemusse lugemite täpsuse piires. Valemit (4) tarvitatakse vaid siis, kui eriti suurt täpsust nõutakse.

### Pikksilma ja astmiku ülesseadmine.

Alul määratakse kindlaks ristsuund peeglile, milleks otsitakse koht, kus näha peeglis silma enda kujutis. Sirgele peeglist silma asetatakse pikksilm astmikuga. Seejuures tuleb pikksilma



17. joonis.

ja astmiku kõrgusi nii muuta, et pikksilma kõrgusel oleks näha astmiku kujutis. Otstarbekohane on seda järgmiselt toimetada: Vaadates ühe silmaga pikksilma kõrvalt (mitte pikksilmasse), nihutatakse seejuures astmikku üles-alla, kuni astmik on näha pikksilma kohal. Siis juhitakse pikksilm peeglile. Pikksilma pikkust muudetakse seni, kuni pikksilmas on näha peegli terav kujutis. Et astmikku näha, tuleb pikksilma lühendada, sest astmiku kujutis asetseb peegli taga sama kaugel peeglist, kui astmik ise peegli ees.

Objektiivne vaatlusviis: Mingist valguseallikast (pilu, hõõglambi niit) juhitakse kitsas kiirtekimp läbi läätse peeglile, kust valgus peegeldub. Läätse teatud asendis saadakse valguseallika terav kujutis — „indeks“ kas näiteks astmikul või päevapildipaberil. Esimesel juhtumil jälgitakse peegli pöörangust tingitud kujutise nihkeid silmaga, teisel jätab valgusmärk automaatselt oma jäljed päevapildipaberile. Pöörangu arvestamise käik on samane eelmisega.

### III.

## Mehaanika.

### 15. Vabalt langeva keha kiirenduse määramine pendli abil.

Lihtsamaks pendliks on niidi otsa riputatud kuul, mis tasakaaluseisust väljaviimisega on pandud võnkuma. Kui niit oleks raskuseta ja kuuliks raske täpikujuline keha, siis oleks meil tegemist matemaatilise pendliga. Matemaatilise pendli niidi pikkus oleks ühtlasi ka pendli pikkuseks.

Pendlivõnke kestuseks nimetatakse ajavahemikku, mida pendel tarvitab liikumiseks ühest pöördepist teise (akustikas ja optikas on tarvitusele võetud nimetada võnke kestuseks ajavahemikku, mida võnkuv keha tarvitab ühest pöördepist teise ja tagasi liikumiseks).

Väikeste amplituudide (võnke kauguste) puhul on võnke kestus ligikaudu olenematu võnke amplituudist. Niisugusel korral võib avaldada pendlivõnke kestuse  $T$  järgmise valemiga

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \dots \dots \dots (1),$$

kus  $l$  on pendli pikkus ja  $g$  vabalt langeva keha kiirendus.

Kuivõrd õigustatud on valemi (1) tarvitamine, selgub järgmisest täpsast  $T$  avaldisest

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2 \cdot 2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 \sin^4\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \dots \right\} \dots (2),$$

kus  $l$  ja  $g$  on endised tähendused,  $\varphi$  on võnke amplituud (nurk pendliniidi tasakaaluseisu ja ühe pöörde seisu vahel. Olgu  $\varphi = 2^\circ$ , siis on:

$$\sin^2(1^\circ) = 0,0003, \quad \sin^4(1^\circ) = 0,00000009.$$

Seega on võnke kestus valemi (2) järele

$$T = T_0(1 + 0,000075 + 0,00000002),$$

kus  $T_0 = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ .

Siit järgneb, kui  $\varphi = 1^\circ$ , siis  $T$  valemi (2) erinevus  $T$  valemist (1) on  $1/13000$ .  $5^\circ$  võnke amplituudi puhul oleks erinevus juba  $\frac{1}{2000}$ .

Pendel võimaldab määrata ka vabalt langeva keha kiirenduse  $g$ , sest mõõtes  $l$  ja  $T$  võib valemist (1) arvutada  $g$ .

Katse käik.

Pendliks on niidi või peenikese traadi otsas rippuv raske kuul. Pendli pikkus leitakse, mõõtes katetomeetriga niidi pikkuse  $l_0$  ja kuuli läbimõõdu  $d$ . Pendli pikkus

$$l = l_0 + \frac{1}{2}d.$$

$T$  määramiseks märgitakse sekundimõõtjaga aeg, millal pendliiniit võnkumisel möödub pendli taga oleval seinal märgitud kriipsust. Umbes 100 võnke pärast loetakse aeg, kui pendliiniit samaltpoolt möödub samast märgist. Leitud ajavahemik, jagatud võngete arvuga, annab otsitava pendlivõnke kestuse. Soovitav on seda katset mitu korda teha ja siis võtta keskmine. Võnke amplituud ärgu võetakse seejuures mitte üle  $5^\circ$ .

Tõeliselt on siin kirjeldatud pendel füüsiline, seepärast on tarvilik, arvestades kuuli läbimõõtu  $d$ , teha pendli pikkuses järgmine parandus  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 0,1d^2/l.$$

Arvestades viimast parandust tuleb  $g$  arvutada järgmisest valemist:

$$g = \pi^2(l + \varepsilon)/T^2.$$

## 16. Vetruvusemoodul ja selle määramine.

Kõva keha deformeerub, kui tasse mõjub mingi tung. On keha elastne, siis kaob deformatsioon tungi lakkamisega. Näiteks, traadi otsa riputatud raskuse mõjul pikeneb traat, milline nähtus kaob, kui raskus ära võetakse. Katsed näitavad, et keha deformatsioon on võrdeline mõjuva tungiga (Hooke'i seadus). Hooke'i seaduse järele on elastne pikenemine  $\Delta l$  (lineaarne deformatsioon)

võrdeline traadi otsa riputatud raskusega  $p$  ja pöördvõrdeline traadi ristlääbilõikega  $q$ :

$$\Delta l = \varepsilon \frac{lp}{q},$$

kus  $\varepsilon$  on proportsionaalsusekoefitsient, mis oleneb vaid traadi materjalist.  $\varepsilon$ -le ümberpööratud suurus  $\frac{1}{\varepsilon} = E$  nimetatakse elast-  
suse- ehk vetruvuse-(Young'i) mooduliks. Asetades eelmisse valemisse  $\varepsilon$  asemele  $\frac{1}{E}$ , leiame

$$\Delta l = 1/E \cdot \frac{lp}{q} \text{ ehk}$$

$$E = \frac{lp}{\Delta l q}.$$

Valides  $l=1$ ,  $q=1$ , saame  $E=p$ , s. o. vetruvuse-  
moodul  $E$  on see jõud, mida peaks rakendama traadisse, läbilõikepinnaga 1, et teda 2 korda pikemaks venitada, eeldusel, et pikenemine on võrdeline mõjuva jõuga. Katsed on näidanud, et Hooke'i seaduse maks-  
vus on piiratud. Kui suurendada traadi otsa riputatud tungi, siis võib viia selle traadi kuni katkemiseni. Uurimised on näi-  
danud, et juba vähemate raskuste juures kui see, mille mõjul traat katkeb, ei ole Hooke'i seadus maksev. Teatud raskusest alates (elastsuse ehk vetruvuse piir) ei kao ka pikenemine —  
lineaarne deformatsioon — raskuse kõrvaldamisega. Üldiselt on raskus, mille mõjul traat katkeb, hoopis vähem kui  $E$ .

Tabelis 3 on toodud mõnede kehade kohta vetruvuse-  
moodul, vetruvuse piir ja raskus, mida traat ülimalt suudab kanda (katkeb).

Arvuliselt oleneb vetruvusemoodul muidugi ühikuist, milles mõõdetud mõjuv jõud ja traadi läbilõikepind. Sageli kasuta-  
takse venitaja jõuna raskustungi. Kui on arvestatud viimane kg-es ja läbilõikepind  $\text{mm}^2$ -eis, siis on  $E$  mõõde —  $\left(\frac{\text{kg-kaal}}{\text{mm}^2}\right)$ . CGS-süsteemis mõõdame aga jõudu düünides ja pindala  $\text{cm}^2$ ; sel korral on mõjuv jõud (düünides) =  $pg$  (kus  $p$  tähendab traadi otsas rippuva keha massi grammides ning  $g$  raskus-  
tungi poolt esilekutsutud kiirendust). Mõõteliselt on seega  $[E] = (g \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^{-2}) \cdot (\text{cm}^{-2}) = (\text{düün}/\text{cm}^2)$ .

Vetruvusemooduli määramist toimetatakse järgmiselt:

Seinas oleva kindla toe külge on kinnitatud uuritav traat, millele märgitud kaks täppi  $A$  ja  $B$ . Et traat oleks pingul, ripu-

tatakse tema otsa raskus  $P$  (algkoormis). Täppide  $A$  ja  $B$  vastastikune kaugus  $l$  määratakse katetomeetri abil. Seejärel pannakse juurde lisakoormis  $p$  ning mõõdetakse uuesti täppide  $A$  ja  $B$  kaugus teineteisest  $l'$ ;  $l' - l = \Delta l$  on märkide  $A$  ja  $B$  vahelise traadilõigu pikenemine lisakoormise mõjul. Mikromeetriga määratakse traadi läbimõõt  $d$ , mida vaja läbilõikepinna  $q$  arvutamiseks ( $q = \frac{\pi d^2}{4}$ ). Vetruvusemoodul leitakse valemist

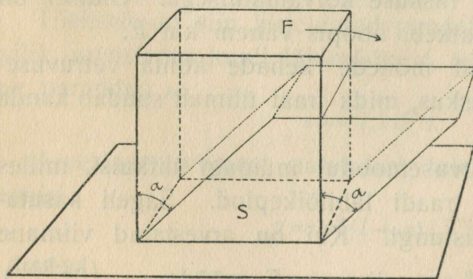
$$E = \frac{l}{\Delta l} \cdot \frac{P}{q}.$$

Traadi venitamine sündigu ikka vetruvuse piires, s. t. lisakoormise  $P$  kõrvaldamisega ta omandagu endine pikkus, mida pärast katset tuleb kontrollida. Lisakoormis  $P$  ei või suurem olla kui pool sellest raskusest, mille juures traat veel on elastne (elastsuse piir).

Käesoleva katse korral arvutatagu vetruvusemoodul  $E$  nii kilogrammides/mm<sup>2</sup> kui ka düünides/cm<sup>2</sup> kohta.

## 17. Torsiooni- ehk keermoodul.

Olgu pindalaga  $s$  plaadi põhipind oma alusele liikumatult kinnitatud. Mõjugu vastasoleva plaadi pinnasse plaadiga paralleelne tung  $F$ . Mõjugu



18. joonis.

see tung ühtlaselt igasse plaadi pinna elemendis. Igasse ruutsentimeetrisse mõjub siis tung  $\frac{F}{s} = f$ . Tungi mõjul deformeerub plaat ning selle tagajärjel moodustuvad külgpinnad oma esialgse normaalse seis-

suga nurga  $\alpha$  (18. joonis), kusjuures tungi  $f$  mõju tasakaalustab keha elastsus.

Katse teel on leitud, et tung  $f$  on võrdeline deformatsiooni-nurgaga  $\alpha$  ja pindalaga  $s$ , s. o.

$$f = Ns\alpha \dots \dots \dots (1),$$

kus  $N$  on võrdelisusetegur ja oleneb vaid plaadi materjalist ja

tarvitatavaist mõõduühikuist.  $N$  nimetatakse torsiooni- ehk keerdmooduliks.

Kui  $s = 1$ ,  $\alpha = 1$  (kaareühikuis  $= 57^\circ 17' 14''{,}8$ ), siis

$$f = N \dots \dots \dots (2),$$

s. o., torsioonimoodul võrdub tungiga, mida on tarvis, et plaati, mille pindala  $1 \text{ cm}^2$ , nii deformeerida, et tema külgpinnad moodustaksid oma esialgse seisuga nurga  $1$  (kaareühikuis), eeldades seejuures, et seadus jääb maksvaks ka selle deformatsiooni juures.

Tõmbame traadi, mille pikkus on  $l$  ja raadius  $r$ , raskuse abil sirgu ning keerame seejuures tema alumist otsa nurga  $\varphi$  võrra, siis deformeerub traat nii nagu kirjeldatud plaat.

Kui tõmbame traadi välispinnal sirge, siis moodustab see sirge pärast deformatsiooni oma endise suunaga nurga.

Traadi keeramiseks pöördenurga  $\varphi$  võrra on tarvis rakendada traadi alumise otsa külge pöördemoment, mille suurus peab võrduma (elementaarsel teel mittetuletatav)

$$N \frac{\pi r^4 \varphi}{2l}.$$

Tähendab, see pöördemoment on võrdeline torsioonimooduliga  $N$ , traadi raadiuse neljanda astmega  $r^4$  ning pöördenurgaga  $\varphi$  ja pöördvõrdeline traadi pikkusega  $l$ .

Sama suur pöördemoment on traadi torsioonil, mis tekib traadi elastsuse tagajärjel. Pöördemoment, mille traat omandab torsiooni tagajärjel siis, kui nurk  $\varphi = 1$  (kaareühikuis), kutsutakse direktsioonitungiks  $D$ . Viimane on seega

$$D = N \frac{\pi r^4}{2l} \dots \dots \dots (3).$$

Kui välise tungi mõjul keerata traat keerdu ning selle järele lahti lasta, siis hakkab traat torsiooni tõttu võnkuma horisontaaltasapinnas.

Nagu üldfüüsika kursusest teame, maksab võnkuva keha inertsimomendi  $K$ , direktsioonitungi  $D$  ja võnke kestuse  $T$  vahel seos (analoogiline harilikku pendli valemiga)

$$T = \pi \sqrt{K/D},$$

kusjuures võnke kestuseks nimetatakse aega, mida võnkuv keha tarvitab ühest äärmisest seisust teise minemiseks. Asetades siia  $D$  asemele selle avaldise valemist (3), leitakse

$$T^2 = \pi^2 \frac{K \cdot l}{N r^4 \pi} = \frac{2\pi K l}{N r^4},$$

mis annab

$$N = \frac{2\pi Kl}{T^2 r^4} \dots \dots \dots (4).$$

Mõõtes seega  $K$ ,  $T$ ,  $l$  ja  $r$ , võib valemist (4) arvutada  $N$ .

Torsioonimooduli dimensioon määratakse valemist

$$[N] = \frac{ML^2L}{T^2L^4} = L^{-1} \cdot M \cdot T^{-2} (= \text{tung/pindala})$$

või absoluutseis ühikuis

$$[N] = \text{cm}^{-1} \text{ g sec}^{-2} (= \text{düün/cm}^2).$$

Tehnikas avaldatakse torsioonimoodul tihti  $\text{kg/mm}^2$ .

Käesolevas töös tuleb avaldada  $N$  absoluutseis kui ka tehnilis ühikuis.

### Aparaadi kirjeldus ja katse käik.

Kindla toe külge on kinnitatud uuriavast aimest tehtud traat. Selle traadi alumise otsa külge on kinnitatud vaskketas, mis traadi sirgu tõmbab. Vaskketast läbiv kruvi on varustatud peegliaga, mis võimaldab ketta võnke kestuse täpsa lugemise. Selle ketta alla võib kruvida samale teljele teise ringikujulise ketta. Et õhuvoolud katsesse segavalt ei mõjuks, on soovitatav asetada kirjeldatud osa aparaadist klaasanumasse. Katse alul, samuti ka katse lõpul mõõdetakse traadi pikkus mõõtuuga (lugeda mm) ja traadi läbimõõt mikromeetriga. Võnke kestus määratakse järgmiselt: Asetatakse peegli ette põlev lamp nii, et lambi valgus peegeldub seinale. Ketast võnkuma pannes märgitakse sekundimõõtjat käima lastes aeg, millal valgusmärk mõõdub seinale märgitud kriipsust.

Võnkumise amplituud valitakse mitte suur. Nüüd loetakse mõnikümmend võnget. Viimse võnke lõpul, märgi läbimineku hetkel pannakse sekundimõõtja seisma. Sekundimõõtjalt loetud aeg, jagatud võngete arvuga, annab 1 võnke kestuse. (Katset korrata ja keskmine võtta. Lugada kuni  $\frac{1}{2}$  sek täpsuseni.) Peale seda määratakse võnkumise keha inertsimoment  $K$ . Arvutada matemaatiliselte seda keha geomeetrisest kujust ei ole võimalik, sest keha omab liiga komplitseeritud kuju. Inertsimoment  $K$  leitakse järgmisel teel. Võnke kestus  $T_1$ , inertsimoment  $K$  ja tung, mis keha sunnib tagasi minema oma algseisu (direktsioonitung), on, nagu nägime, seotud valemiga

$$T_1 = \pi \sqrt{K/D} \dots \dots \dots (5).$$

Suurendatakse keha inertsimomenti  $K_1$  võrra lisaketta juurdepanemisega, jättes seejuures direktsioonitungi endiseks (antud juhul on direktsioonitungiks traadi torsioon, mis muidugi endiseks jääb), siis suureneb ka võnke kestus, mis leitakse valemist (6).

$$T_2 = \pi \sqrt{\frac{K+K_1}{D}} \dots \dots \dots (6).$$

Valemist (5) ja (6) järgneb

$$\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{K+K_1}{K}.$$

Siit leitakse

$$K = \frac{K_1 T_1^2}{T_2^2 - T_1^2}.$$

Lisakoormiseks võetakse keha, mille inertsimoment leitakse lihtsa arvutamise teel selle kujust. Olgu seks õõnes silinder, mille mass on  $m$  ja väline ning sisemine raadius  $r_1$  ja  $r_2$ . Säärase keha inertsimoment

$$K_1 = \frac{m}{2} (r_1^2 + r_2^2).$$

Keha mass määratakse kaalumise teel, raadiused  $r_1$  ja  $r_2$  varbsirkliga. Kirjeldatud lisakoormise juurdepanemisega muutub võnke kestus. See määratakse eespooltoodud viisil. Lõpuks arvutatakse traadi torsioonimoodul valemist (4).

## 18. Vedelikkude sisehõõrumine.

Vedeliku sisehõõrumine tingib vedeliku läbivoolamise kiiruse nn. kapillaartorudes. Voolamine ise sünnib seejuures järgmiselt: vedelikukiht, mis toru seina vastu asetseb, jääb vedeliku ja toru seina vahelise hõõrumise tõttu paigale, kuna kiirus üldiselt kasvab toru silindri telje poole. Selle tagajärjel jaguneb vedelik torus konsentrilisteks õõnessilindriteks, mis mitmesuguste kiirustega liikudes üksteise vastu hõõrduvad.

Seadus, mis määrab vedelikkude voolamise kiiruse kapillaartorudes, on leitud katse teel prantsuse arsti Poiseuille'i poolt; pärastpoole on mitmed teadlased selle ka teoreetiliselt põhjendanud. Eriti suur tähtsus on sellel seadusel vereringvoolu kiiruse määramisel. Selle seaduse matemaatiline avaldis on:

$$V = \frac{\pi}{8} \frac{pr^4}{\mu l} t,$$

kus  $V$  on kapillaartorst läbivoolanud vedeliku ruumala  $\text{cm}^3$ ,  $p$  — rõhumiste vahe kapillaartoru otstes (õigem rõhumine, mis vedeliku voolamise kapillaartorus esile toob) düünides  $\text{cm}^2$  peale,  $l$  — kapillaartoru pikkus ja  $r$  — toru raadius, mõõdetud  $\text{cm}$ -eis,  $\mu$  — vedeliku sisehõõrumise koefitsient,  $t$  — vedeliku voolamise kestus.

Sellest valemist võib arvutamise teel leida  $\mu$ :

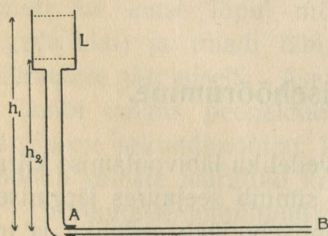
$$\mu = \frac{\pi}{8} \frac{pr^4 t}{lV}.$$

Tähendatud koefitsiendil on järgmine füüsikaline tähendus: Kujutame vedeliku lõpmata suure kihina liikumas horisontaalses suunas kihtidena nii, et igale sentimeetrilisele tõusule vedelikus vastab kiiruse juurdekasv  $1 \text{ cm/sek}^2$ , siis on  $\mu$  hõõrumistung düünides, millega 2 sarnast  $1 \text{ cm}^2$ -lise pindalaga horisontaalset vedelikukihti teineteise vastu hõõrduvad. Seega on  $\mu$  dimensioon:

$$[\mu] = \text{cm}^{-1} \text{ g sek}^{-1}.$$

### Katse käik.

Riista, mida tarvitatakse  $\mu$  määramiseks, kujutab 19. joonis.  $AB$  on kapillaartoru, kus vedeliku voolamise kiirust mõõdetakse,



19. joonis.

$L$  — lehtritaoline vertikaalselt kinnitatud anum, kuhu mõõdetav vedelik valatakse. Rõhumine, mille mõjul vedelik kapillaartorus voolab, on tingitud vedeliku kõrgusest anumas  $L$ . Et vedeliku kõrgus selles katse ajal muutub, siis võetakse selle kõrgus  $h_1$  katse alul, s. o. hetkel, mil hakatakse mõõtma läbivoolanud vee

hulka, ja selle kõrgus  $h_2$  katse lõpul, s. o. hetkel, mil mõõtmiseks võetud vedeliku voolamine lõppes, ja arvutatakse aritmeetiline keskmine  $\frac{h_1 + h_2}{2} = h$ .

Rõhumine  $p$  vedelikus on Pascal'i seaduse põhjal  $p = he$ , kus  $e$  on vedeliku erikaal. Düünidesse ümberarvutatult saame rõhumise  $p = heg$ . On uuritavaks vedelikuks vesi, siis  $e = 1$ . Kapillaartoru raadiuse mõõtmist toimetatakse, nagu allpool juhatatud.

## 19. Kapillaartoru läbimõõdu määramine.

Kapillaartoru puhastatakse ja kuivatatakse, nagu öeldud lehekülj 39. Pärast seda ei tohi torru suuga enam õhku puhuda. Selle järele juhitakse torru umbes 10—12 cm pikkune elavhõbeniit. Et valada elavhõbedat torru, seks on soovitav tarvitada väikest klaasletrit, mis tuleb mõne cm pikkuse kummitoru abil ühendada kapillaariga. Elavhõbe kallatakse letrisse, kusjuures suletakse kapillaartoru lahtine ots alul näpuga. Näppu ära võttes lastakse voolata paras hulk elavhõbedat torru. Seejuures tuleb hoolitseda, et torru elavhõbeda vahele ei jääks õhumulle. Väga peenikesse klaastorudesse tuleb elavhõbe imeda. Kõik katsed elavhõbedaga tuleb toimetada klaas- või pappvanni kohal, et elavhõbedat kaduma ei läheks. Selle järele määratakse elavhõbeniidi pikkus torus. Pärast valatakse elavhõbe torust paberist valmistatud vanni või väikesse uuriklaasi ja kaalutakse. Lahutades sellest vanni (uuriklaasi) kaalu, leitakse elavhõbeda kaal. Oli elavhõbedasamba pikkus torus  $l$  cm, selle kaal  $q$  g, kapillaartoru raadius  $r$ , siis

$$\pi r^2 l = \frac{q}{13,6},$$

kus 13,6 on elavhõbeda erikaal. Siit arvutatakse kapillaartoru raadius  $r$ .

#### IV.

## H ä ä l.

### 20. Hääle interferents.

Kui keha võngub, siis tekitab ta ümbritsevas õhus vaheldumisi tihendusi ja hõrendusi, mille tagajärjeks on õhu kaasa-võnkumine. Tihendused ja hõrendused levivad kehalt ümbrusse teatud kiirusega ja sünnitavad niiviisi õhulaineid. Õhuosakeste võnkumine sünnib siin laine levimise suunas, seega on niisugune lainetus longitudinaalne.

Õhuvõnkumisi, mille sagedus ehk võnkearv (võngete arv 1 sek) 20 ja 20 000 vahel, on kõrvale kuulda, nimetatakse häälelaineteks. Võnke sagedusest  $n$  oleneb hääle kõrgus: mida suurem on  $n$ , seda kõrgem toon.

$T = \frac{1}{n}$  on ühe võnke kestus, s. o. ajavahemik, mille kestel sünnib õhuosakese üks täisvõnge. Ühe võnke kestel levib laine edasi ühe lainepikkuse  $\lambda$  võrra. Seega on lainepikkus võrdne kahe tihenduse (või kahe hõrenduse) kaugusega teineteisest.

Olgu  $v$  laine levimiskiirus, siis levib laine ühe võnke kestel ühe lainepikkuse võrra:

$$\lambda = vT = \frac{v}{n}$$

Siit

$$T = \frac{\lambda}{v}$$

$$\text{ja } v = n\lambda.$$

Seega võib siin antud  $n$  ja  $\lambda$  kaudu arvutada kiiruse  $v$ .

Levimiskiirus  $v$  ei olene hääle kõrgusest ega hääle tugevusest.

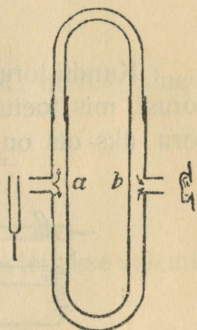
Kahe laine vastastikune mõju võib olla kahesugune. Kui üks laine teisega nii kokku satub, et ühe laine tihendus ühtub

teise laine hõrendusega, siis hävitavad nad vastastikku teineteist. Ühtuvad aga mõlemate lainete tihendused kui ka hõrendused, siis selle tagajärjeks on tugevam laine.

Nii sünnib see ka veelainete juures. Veelained hävitavad teineteist, kui ühe laine hari langeb teise laine põhja kohale ja esimese laine põhi teise laine harja kohale. Ühtuvad aga mõlemate lainete harjad kui ka põhjad, siis tekib kokkupuutumisel kõrgem laine. Niisugust lainete vastastikust mõju nimetatakse *interferentsiks*.

Häälelainete interferentsi võib uurida Quincke' torus (20. joonis).

Toru *ab* ette asetatakse hääleallikas, näiteks piirituselapiga hõõrutav klaaskepp, vile jne., millest häälelained toru levivad. *a* juures hargneb toru kaheks haruks. Mõlemaid harusid mööda levivad häälelained; *b* juures ühtuvad lained uuesti, edasi liiguvad nad juba koos. On mõlemate harude pikkused võrdsed, siis loomulikult *b* juures ühtuvad mõlemate lainete tihendused isekeskis, samuti ka mõlemate lainete hõrendused isekeskis: hääll muutub tugevamaks. Kui aga ühe haru pikkust nii muuta, et *b* juures ühtuvad ühe laine tihendus teise laine hõrendusega, siis hävitavad nad vastastikku teineteist. Üldse kaob hääll *b* juures, kui lainete käiguvahe (faasi vahe) torudes on võrdne paaritu arvu poollaine pikkustega; ent hääll muutub tugevamaks, kui lainete käiguvahe on null või paarisarv poollaineid.



20. joonis.

Seega muutes aeglaselt näiteks ühe haru pikkust ning jälgides hääle tugevust *b* juures, võib määrata häälelaine pikkuse, mõõtes tähendatud haru pikkuste vahet kahe teineteisele järgneva hääle kadumise puhul *b* juures.

Hääle nähtavastegemiseks *b* juures tarvitatakse sageli tundlikku gaasileeki. Tundlik gaasileek saadakse, kui gaas lastakse voolata läbi peenikese ja vähe laperguse avause.

### Seisvad häälelained.

Kui tekitada toru ühes otsas õhulaineid, siis, levides torus, võivad need toru teise otsa paigutatud seinalt tagasi peegelduda. Peegeldunud ja langevad õhulained interfereeruvad. Teatud toru

pikkuse ja interfereeruvate lainete pikkuse suhte juures tekivad torus nn. seisvad õhulained. Seisvais õhulaineis eraldatakse paise ja sõlmi. Paisudes on õhk elavas liikumises, kuid sõlmedes ta püsib paigal.

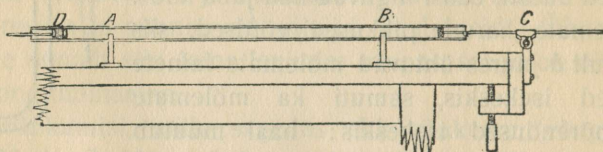
Seisvais laineis on kahe sõlme kaugus teineteisest (või kahe paisu kaugus) võrdne poole lainepikkusega.

Mõõtes nende kauguse, võib leida seega lainepikkuse  $\lambda$ .

Niiviisi määratakse sageli häälelaine pikkus Kundt'i toru abil.

## 21. Kundt'i toru.

Kundt'i toru koosneb pikast  $\approx 2-3$  cm läbimõõduga klaasitorust, mis toetub kahele *U*-taolisele alusele (21. joonis). Klaasitoru üks ots on suletud korgiga, teise toru otsa ulatub klaas-



21. joonis.

kepp. Toru ulatuva klaaskepi otsa on paigutatud teine kork. Seega jääb kahe korgi vahele õhusammas. Klaaskepp on keskelt liikumatult kinnitatud laua külge. Hõõrudes klaaskeppi piirituses niisutatud puuvillaga, sünnitatakse selles longitudinaalaineid, mis klaaskepi torus olevasse õhku (gaasi) levivad, toru teises otsas asuvast korgist aga tagasi põrkavad. Teatud toru pikkuse ja kepi tekkinud häälelaine pikkuse suhte juures tekivad torus seisvad häälelained. Viimased tehakse nähtavaks kerge korgipuru või lükopoodiumi abil.

Et saada seisvaid laineid, peab torus oleva õhu- (gaasi-) samba pikkus võrduma täisarvu poollaine pikkustega. Viimane saavutatakse katse teel: nihutatakse üht korki torus, kuni korgipuru paisudes maksimaalselt liikuma hakkab.

Klaaskepp on keskelt kinnitatud, seega asetseb seal sõlm; mõlemas otses on paisud; nii on klaaskepi pikkus võrdne temas tekkinud poollaine pikkusega.

Klaaskepi pikkusest ja kahe sõlme (või paisu) kaugusest on võimalik hääle kiirust kepis arvutada järgmiselt: Olgu  $\lambda$  häälelaine pikkus kepis,  $N$  — võnke arv ja  $v$  — kiirus, siis, nagu nägime:  $v = N\lambda$ .

Samasugune valem maksab ka lainete kohta õhus:  $v_1 = N_1\lambda_1$ .

Et võnke sagedus klaasis ja õhus on üks ja sama, siis  $N = N_1$ , seega  $\frac{v}{v_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$ .

Kui tähistada kepi pikkus  $l$ -ga, kahe sõlme (või paisu) kaugus  $k$ -ga, siis

$$\frac{v}{v_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{\frac{1}{2}\lambda}{\frac{1}{2}\lambda_1} = \frac{l}{k}.$$

Hääle kiirus  $v_1$  õhus oleneb temperatuurist; nullist erineva temperatuuri juures on kiirus:

$$v_1 = 33100 \sqrt{1 + 0,004t} \text{ cm/sek}^2,$$

kus  $t$  on toatemperatuur.

Neist valemeist arvutatakse  $v$ ; võnke sagedus leitakse valemist

$$v_1 = N\lambda_1 = 2kN,$$

$$N = \frac{v_1}{2k}.$$

Hääle kiirus  $v$  tahkes kehas sõltub keha elastsusemoodulist  $E$  ja tihedusest  $d$ . Selle sõltuvuse matemaatiline avaldis on:

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}}.$$

Seega määrates  $v$  Kundti järele ja arvestades, et  $d$  klaasi puhul on 2,6, võib leida klaaskepi elastsusemooduli  $E$ . Oli  $v$  avaldatud cm-eis, siis  $E$  on düün/cm<sup>2</sup>.

Täites toru mõne teise gaasiga, näiteks valgustusgaasiga, ja tarvitades hääle sünnitamiseks sama keppi, maksab ka selle gaasi kohta seadus:

$$v_2 = N\lambda_2$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{k_2}{k_1},$$

kus  $k_2$  on kahe sõlme kaugus,  $v_2$  kiirus ja  $\lambda_2$  lainepikkus nimetatud gaasis,  $k_1$ ,  $v_1$  ja  $\lambda_1$  samad õhus. Niiviisi võib leida ka hääle kiiruse valgustusgaasis.

Seejuures tuleb tähele panna, et õhk täielikult oleks välja tõrjutud torust. Soovitakse hääle kiirust taandada  $0^\circ$ , siis korrutatakse seda  $\sqrt{1 - 0,004 t}$ , kus  $t$  — gaasi temperatuur.

Teoreetilises füüsikas tuletatakse valem

$$v = \sqrt{\frac{kp}{d}},$$

kus  $k$  on gaasi erisoojuse suhe muutumatu rõhu ja muutumatu ruumala juures,  $p$  — gaasi rõhumine düünides/cm<sup>2</sup>,  $d$  — tihedus.

Et

$$d = d_0 \frac{h}{76} \frac{1}{1 + \alpha t} \text{ ja}$$

$$p = h \cdot 13,6 \cdot 981 = 13333 h \text{ düün/cm}^2, \text{ kus}$$

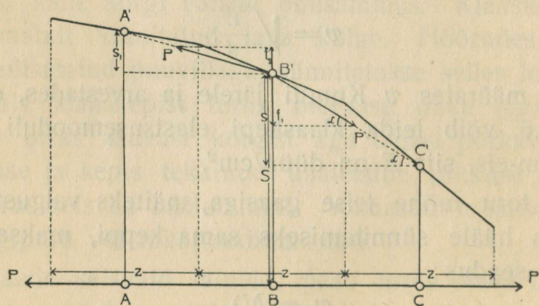
$d_0$  on gaasi tihedus  $0^\circ$  ja 760 mm rõhumise juures,  $\alpha$  — paisumiskoeffitsient,  $t$  — temperatuur, seega

$$v^2 = 1013300 k \frac{1 + \alpha t}{d_0} \left(\frac{\text{cm}}{\text{sek}}\right)^2.$$

Selle valemi põhjal on võimalik hääle kiirusest arvutada ka  $k$ .

## 22. Helihargi võnkearvu määramine.

Kui kinnitada helihargi ühe haru külge pinguletõmmatud traat, siis tekivad helihargi võnkumisel viimases kohase pinge korral seisvad lained, sest helihargi võnked kanduvad edasi traadi osakestele, sundides neid võnkuma samas perioodis.



22. joonis.

Olgu  $ABC$  traat (22. joonis), mille otstele rakendatud jõud  $P$ ;  $e$  — erikaal ja  $q$  — traadi läbilõikepind. Vaatleme selle traadi kolme väga väikest osakest, elemente  $A$ ,  $B$  ja  $C$ , mille pikkus olgu  $z$ ; olgu  $\tau$  — aeg, mille kestel võnkliikumine jõuab traati

mööda edasi  $ABC$  suunas pikkuse  $z$  võrra. Seega on võnkliikumise levimise keskmine kiirus  $v$ :

$$v = \frac{z}{\tau}.$$

Olgu elemendid  $A, B$  ja  $C$  (õigemini nende masskesktäpid, märgitud ringikestena) tasakaaluseisust välja viidud asendisse  $A', B'$  ja  $C'$ ; tähistame nende masskeskkohtade vastavad kaugused algasendist  $S + s_1$ ;  $S$  ja  $S - s$ , kusjuures  $s > s_1$ . Oletame, et traati sedavõrd vähe painutati, et tema venimisel tekkinud vetruvuse tungid on kaduv-väikesed võrreldes algpingega.

$C'$  suunas mõjub  $B'$ -sse tung  $P$ , mille püstosa  $f_1$ , sihitud  $B' \rightarrow B$  (alla), võrdub  $P \cdot \sin \alpha$ , kus  $\alpha$  on nurk  $B' C'$  ja traadi algasendi  $ABC$  vahel. Et nurk  $\alpha$  on väga väike, siis  $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ ; joonisel on näha, et  $\tan \alpha = \frac{s}{z}$ . Lugesdes tungi suuna positiivseks ülespoole, leiame

$$f_1 = -P \cdot \frac{s}{z}.$$

Samuti mõjub  $A'$  suunas  $B'$ -sse tung  $P$ , mille püstosa  $f_2$  (sihitud ülespoole):

$$f_2 = P \cdot \frac{s_1}{z}.$$

Tungipaari  $f_1$  ja  $f_2$  resultant  $F$  on sihitud  $B'$ -st  $B$ -sse ja võrdub:

$$F = -P \frac{s}{z} + P \frac{s_1}{z} = -P \frac{s - s_1}{z} \dots \dots (1).$$

Kui joonis kujutab olukorda hetkel  $t$ , siis täpp  $B'$  ajavahemikus  $t - \tau$  kuni  $t$  (s. t. ajaga  $\tau$ , mille vältel võnkliikumine jõuab edasi  $z$  võrra) käis läbi teosa  $s_1$ ; seega tema keskmine liikumise kiirus selles ajavahemikus oli  $\frac{s_1}{\tau}$ . Kuid ajavahemikus  $t$  kuni  $t + \tau$  jääb samal täpil  $B'$  läbi käia tee  $s$ , keskmise kiirusega  $\frac{s}{\tau}$ . Et ühtlase kiirenduse korral keskmine kiirus mingis ajavahemikus ( $t$  kuni  $t \pm \tau$ ) võrdub kiirusega sama ajavahemiku keskhetkel, siis hetkel  $t - \frac{\tau}{2}$  oli täpi  $B'$  kiirus  $\frac{s_1}{\tau}$ , hetkel  $t + \frac{\tau}{2}$  saab olema  $\frac{s}{\tau}$ , kust otsitav kiirendus  $W$  [kiiruse muutus  $\frac{s}{\tau} - \frac{s_1}{\tau}$  jagatud ajaga  $t + \frac{\tau}{2} - (t - \frac{\tau}{2}) = \tau$ ].

$$W = \frac{\frac{s}{\tau} - \frac{s_1}{\tau}}{\tau} = \frac{s - s_1}{\tau^2} \dots \dots (2).$$

Traadi elemendi mass võrdub  $z \cdot e \cdot q$ ; seega on tema masskeskkohale rakendatud tung (mass  $\times$  kiirendus):

$$F = z \cdot e \cdot q \cdot \frac{s - s_1}{\tau^2} \dots \dots \dots (3).$$

Avaldised (1) ja (3) annavad

$$-P \frac{s - s_1}{z} = z \cdot e \cdot q \frac{s - s_1}{\tau^2}.$$

Lahendades selle kiiruse  $-\frac{z}{\tau} = v$  suhtes, leiame, et kiiruse absoluutväärtus

$$v = \sqrt{\frac{P}{q \cdot e}} \dots \dots \dots (4).$$

Olgu:

Otsitav võnkearv ehk sagedus	$\dots \dots \dots$	$N$ .
Laine levimise kiirus traadil (cm. sec <sup>-1</sup> )	$\dots \dots \dots$	$v$ .
Lainepikkus cm-es	$\dots \dots \dots$	$\lambda$ .
Traadi pikkus (helihargist plokini) cm-es	$\dots \dots \dots$	$l$ .
Paisude (poollainete) arv sellel pikkusel	$\dots \dots \dots$	$b$ .
Traati sirgu tõmbav jõud (vihid + kauss + üle ploki ulatuv traadi osa) grammides	$\dots \dots \dots$	$M$ .
1 cm traadi kaal grammides	$\dots \dots \dots$	$p$ .
Raskustungi kiirendus (= 981 cm. sec <sup>-2</sup> )	$\dots \dots \dots$	$g$ .

Teame, et  $\lambda \cdot N = v$  ja  $\lambda = \frac{2l}{b}$ , kust  $\frac{2l}{b} \cdot N = v$  ehk  $N = \frac{b}{2l} \cdot v$ .

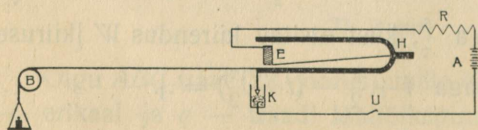
Asetades siia  $v$  asemele tema väärtuse valemist (4), leiame

$$N = \frac{b}{2l} \cdot \sqrt{\frac{P}{q \cdot e}},$$

ehk arvestades, et  $q \cdot e$  on 1 cm traadi kaal  $p$ , ja  $P = Mg$ , siis

$$N = \frac{b}{2l} \sqrt{\frac{M \cdot g}{p}}.$$

Lülitis (23. joonis):



23. joonis.

- A — akkumulaator,
- R — reostaat,
- E — elektromagnet,
- K — elavhõbeda katkestaja,
- H — helihark ja
- U — lülaja.

Katse alul täidetakse katkestaja anum  $K$  piiritusega.

Voolu läbimisel tõmbab elektromagnet helihargi alumise haru enda poole, teravik tõuseb välja elavhõbedast ja katkestab voolu. Samal hetkel kaotab elektromagnet oma magnetismi ning teravik langeb tagasi elavhõbedasse. Sama nähtus kordub edaspidi iga vönke puhul. Katse ajal reguleeritakse reostaadi abil voolu nii, et sellest parajasti piisaks võngete alalhoidmiseks.

Alguses määratakse traadi üldine pikkus ja tema kaal  $Q$ , kus siis 1 cm kaal  $p = \frac{Q}{L}$ . Nüüd seatakse traat üle ploki  $B$ ; üks ots kinnitatakse helihargi haru külge, teise otsa aga riputatakse kauss ühes raskusega  $m$  (umbes 200 g). Selle järele pannakse helihark vönkuma ja nihutatakse heliharki edasi-tagasi, kuni sõlmed võimalikult teravaks muutuvad, ja loetakse nende arv  $b$ . Siis katkestatakse vool ja mõõdetakse traadi pikkus  $l$  helihargist plokini.

Katse kordamisel muudetagu raskus  $m$  ja võetagu kõigist saadud  $N$  väärtusist aritmeetiline keskmine.

## V.

# Soojus.

### 23. Tahke keha erisoojuse määramine segamis- meetodi järgi.

Keha erisoojuseks nimetatakse kaloreis avaldatud soojuse-  
hulka, mida 1-g keha tarvitab soojendamisel  $1^\circ \text{C}$  võrra.

Üldiselt sõltub keha erisoojus temperatuurist, seepärast  
tuleb vahet teha erisoojuste vahel, mis mõõdetud mitmesuguste  
temperatuuride juures (erisoojus  $0^\circ$  juures, erisoojus  $15^\circ$  juures jne.).  
Sageli tarvitatakse nn. keskmist erisoojust  $0^\circ$ — $100^\circ$  vahel. Vii-  
mane on kaloreis avaldatud  $\frac{1}{100}$  soojusehulka, mida 1-g keha  
tarvitab soojenemisel  $0^\circ$ — $100^\circ$ . Ent üldiselt ei ole vahe tähen-  
datud erisoojuste vahel kuigi suur.

Erisoojuse definitsioonist järgneb, et 1-g keha, mille eri-  
soojus on  $c$ , soojendamisel  $1^\circ$  võrra tarvitab  $c$  kalorit, soojenda-  
misel  $t^\circ$  võrra  $ct$  kal. Et soojendada  $m$  grammi sama keha  $t^\circ$   
võrra, on tarvis seega  $mct$  kalorit soojust. Nii on keha soojen-  
damisel tarvitatud soojusehulk võrdne massi, erisoojuse ja tempe-  
ratuuri tõusu korrutisega.

Aparaadi vesiväärtuseks  $W$  nimetatakse soojusehulka, mida  
tarvitab aparaat, kui teda soojendada  $1^\circ$  võrra. Homogeense  
keha vesiväärtus on seega  $\sigma q$ , kus  $\sigma$  on erisoojus,  $q$  mass.

Segamismeetodi järgi määratakse tahke keha erisoojus  
järgmiselt: uuritav keha, mille mass  $m$  on määratud kaalumise  
teel, soojendatakse mingi kindla temperatuurini  $t_1$ , seejärel  
asetatakse keha üleni vette, mille mass  $M$  ja temperatuur  $t_2$  on  
mõõdetud, ning oodatakse, kuni mõlemate kehade temperatuurid  
on üheksõrgused. Olgu nende ühine temperatuur  $t$ . Kui uuri-

tava keha erisoojus tähistada  $x$ -ga, siis, eeldades, et kõik soojus, mis keha kaotas, läks veele, võib kirjutada :

$$xm(t_1 - t) = M(t - t_2),$$

mis annab

$$x = \frac{M(t - t_2)}{m(t_1 - t)} \dots \dots \dots (1).$$

Mõõtmiseks tarvitata vesi hoitakse erilises anumaks, mida kalorimeetriks nimetatakse. Tavaliselt on kalorimeetriks kahekordsete õhukeste seintega metallanum, kuid ka õhukeste seintega keeduklaasi tarvitatakse selleks. Vee segamine sünnib õhukesest plekist või traadist valmistatud segaja abil.

Tegelikult tarvitavad osa soojust ka kalorimeetrianum (muidugi vaid seesmine), segaja ja termomeeter, millega vee temperatuuri mõõdeti. Olgu kalorimeetri ja segaja mass<sup>1)</sup>  $q$  ja  $\sigma$  nende erisoojus, siis kalorimeetri ja segaja vesiväärtus  $W_1 = q\sigma$ . Olgu termomeetri vesiväärtus  $W_2$  (vaata allpool).

Kalorimeetri, segaja ja termomeetri vesiväärtuste määramine sündigu ligikaudselt, sest need suurused esinevad lõppvalemis vaid parandustena.

Arvestades mõlemat parandust tuleb arvutada keha erisoojus järgmisest valemist :

$$mx(t_1 - t) = (M + W_1 + W_2)(t - t_2),$$

mis annab

$$x = \frac{(M + W_1 + W_2)(t - t_2)}{m(t_1 - t)} \dots \dots \dots (2).$$

Kui kalorimeetris olev veehulk on suur võrreldes kalorimeetri, segaja ja termomeetri massidega, siis võib jätta arvestamata nende poolt tarvitatud soojuse hulki. Sel puhul võib  $x$  arvutada valemist (1).

Seega on katse käik järgmine :

Kaalumisega leitakse keha kaal ja märgitakse see vihikusse.

Selle järele asetatakse keha kahekordsete seintega vaskanumasse, mille kahekordsete seinte vahel keeb vesi.

Seal tuleb teda hoida vähemalt 15—20 minutit, et keha temperatuur jõuaks tõusta vee keemistemperatuurini (100° C).

Vahepeal kaalutakse tühi kalorimeeter, kallatakse sinna vett ja kaalutakse uuesti. Kaaluvahe annab kalorimeetrisse kal-

---

<sup>1)</sup> Kalorimeeter ja segaja on sageli valmistatud ühest ja samast ainest (tavaliselt valgevastest). On nad aga valmistatud eri aineist, siis tuleb nende vesiväärtused eraldi määrata.

latud vee hulga. Selle järele määratakse vee temperatuur vähemalt  $\frac{1}{10}^{\circ}$  täpsusega. Temperatuuri mõõtmise juures tuleb vett tublisti segada. Soovitav on, et kalorimeetriveri algtemperatuur oleks vähe alla toatemperatuuri.

Nüüd võetakse keha vannist välja ja asetatakse kiiresti kalorimeetris olevasse vette. Segades tublisti vett, jälgitakse selle temperatuuri. Kõrgeim temperatuur, mis segamisele järgneb, on kalorimeetri lõpptemperatuur (segutemperatuur).

Nüüd arvutatakse keha erisoojus valemist (2), ehk kui mitte arvestada soojusehulka, mida tarvitasid kalorimeetrianum, segaja ja termomeeter, siis jätkub valemist (1).

Nagu tähendatud, eeldatakse seejuures, et soojuse kaotus ümbrusse on kaduv-väike. Et seda kaotust vähendada, on kalorimeeter asetatud teise anumasse korkide peale. Samuti on mõlemate anumate pinnad peegelsiledaks lihvitud, et ei oleks kaotust kiirguse näol.

Sageli tarvitatakse kalorimeetriks õhukeste seintega keeduklaasi; siis, arvestades selle väikest massi, võib ära jääda parandus kalorimeetri vesiväärtuse kohta. Soojuse kaotuse vältimiseks asetatakse klaasist kalorimeeter viltkaitsesse.

### **Termomeetri vesiväärtuse (soojamahtuvuse) määramine katse teel.**

Vildiga kaitstud katseklaasi kallatakse vett, mille mass  $m$  leitakse kaalumise teel, ja määratakse siis selle temperatuur  $t_1$ . Soovitav on, et  $t_1$  oleks vähe alla toatemperatuuri. Selle järele asetatakse termomeeter sooja vette ja oodatakse, kuni termomeeter näitab seal konstantset temperatuuri. Siis võetakse termomeeter soojast veest välja, kuivatatakse veidi rätikuga, loetakse kiiresti termomeetri temperatuur  $t_2$  ja pistetakse termomeeter katseklaasis olevasse vette teda liigutades, ja oodatakse, kuni termomeetri elavhõbeniidi langemine lõpeb, s. o. kuni termomeetri ja vee temperatuur on ühekõrgune, mille järele loetakse termomeetrilt temperatuur  $t_3$ . Termomeetri vesiväärtus  $W$  leitakse valemist

$$W = \frac{m(t_3 - t_1)}{t_2 - t_3}.$$

Katse juures peab meeles pidama, et termomeetrit tuleb niipalju vette pista kui keha erisoojuse määramise puhulgi.

Sageli on otstarbekohasem arvutada termomeetri vesiväärtus selle ruumala põhjal. Olgu termomeetri ruumala  $V$ , siis on termomeetri vesiväärtus  $W$  ligikaudselt

$$W = 0,46 V,$$

kus  $0,46$  on  $1 \text{ cm}^3$  elavhõbeda soojamaht.

## 24. Jää sulamissoojuse määramine.

Jää sulamissoojuseks nimetatakse soojuse hulka, mida  $1 \text{ g } 0^\circ$  jääd tarvitab sulamisel veeks  $0^\circ$ .

Nagu erisoojust nii võib ka jää sulamissoojust määrata segamismeetodi järele.

Katse korraldatakse siin järgmiselt: Kaalutakse tühi kalorimeeter, seejärel kallatakse sinna vett, mille temperatuur olgu vähe kõrgem toatemperatuurist. Siis kaalutakse uuesti kalorimeeter ühes veega. Kaaluvahe annab kalorimeetrisse kallatud vee hulga. Kui kalorimeetriks on keeduklaas, siis asetatakse see soojuse kaotuse vältimiseks viltkaitsesse. Nüüd määratakse vee temperatuur  $\frac{1}{10}^\circ$  täpsusega, enne vett tublisti segades.

Seejärel asetatakse vette rätikuga kuivatatud jäätükke, segatakse vett ja jälgitakse vee temperatuuri. Jääd pannakse niipalju alla toatemperatuuri, kui palju ta oli enne kõrgem toatemperatuurist. Seega väheneb viga, mis tekib kalorimeetrissoojuse kaotusest ümbruse.

Sulamisele järgnenud vee madalam temperatuur loetakse termomeetrilt ja märgitakse üles. Vee segamine võib sündida erilise segaja abil. Tarviduse korral tuleb arvestada selle vesiväärtus. Samuti tuleb leida kalorimeetri vesiväärtus. Et leida, kui palju jääd sulatati, tuleb määrata katse lõpul veehulk kalorimeetris. Vee kaaluvahe annab ärasulanud jää hulga.

Tähistus:

Kalorimeetrisse kallatud vee mass grammides . . . . .	$M$
Ärasulanud jää mass grammides . . . . .	$m$
Kalorimeetriveri algtemperatuur . . . . .	$t_1$
„ lõpptemperatuur . . . . .	$t_2$
Jää algtemperatuur . . . . .	$0$
„ sulamissoojus . . . . .	$S$
Kalorimeetri ja segaja mass grammides (kui ühest ja samast ainest) $q$	
„ „ „ erisoojus . . . . .	$C$

Katse juures andis kalorimeetris olev vesi jahtudes  $M(t_1 - t_2)$ , kalorimeeter ja segaja  $Cq(t_1 - t_2)$ . See soojusehulk läks osalt jää sulamiseks, osalt jääst tekkinud vee temperatuuri tõstmiseks kalorimeetri lõpptemperatuurini; esimene on võrdne  $Sm$ , teine  $mt_2$ . Arvestades, et katse juures soojust kaduma ei läinud, võib kirjutada

$$M(t_1 - t_2) + Cq(t_1 - t_2) = Sm + mt_2.$$

Siit arvutatakse jää sulamissoojus

$$S = \frac{(M + Cq)(t_1 - t_2) - mt_2}{m}.$$

Kui aga mitte arvestada kalorimeetri ja segaja poolt antud soojusehulka, siis võib  $S$  arvutada lihtsamast valemist:

$$S = \frac{M(t_1 - t_2) - mt_2}{m}.$$

Viimast valemit võib tarvitada vaid siis, kui katse juures tarvitada kalorimeetrina keeduklaasi ja kui veemass oli suur võrreldes kalorimeetri ja segaja massiga.

## 25. Clément ja Desormes'i meetod $C_p/C_v$ määramiseks.

Tehakse vahet gaaside juures nende kahe isesuguse erisoojuse vahel: erisoojus muutmata rõhu all  $C_p$  — isobaariline erisoojus, ja erisoojus muutmata ruumala juures  $C_v$  — isokooriline erisoojus.

Olgu silindris, mille kaaneks liikuv, raskustega tasakaalustatud kann, teatud hulk gaasi (1 gramm). Kui soojendada seda gaasi, siis paisub ta ning tõstab liikuva kaane kõrgemale, ületades seejuures välise õhu rõhu ja tasakaalustava tungi. Sel juhtumil läheb osa gaasile antud soojusest temperatuuri tõstmiseks, osa töötgemiseks ( $C_p$ ).

Kui soojendada sama gaasi kinnihoitud kannu juures, siis läheb soojus vaid gaasi temperatuuri tõstmiseks ( $C_v$ ).

Esimesel juhtumil kulub gaasi  $1^\circ \text{C}$  võrra soojendamiseks rohkem soojust kui teisel juhtumil, s. o.  $C_p > C_v$ .

$C_p - C_v$  on soojusehulk, mida gaas tarvitab kaane tõstmiseks. Sellest vahest arvutab J. R. Mayer soojuse mehaanilise ekvivalendi. Ideaalsete gaaside kohta on  $C_p - C_v$  jääv suurus, kuna see reaalsete gaaside suhtes on ligikaudselt maksev.

Samuti on suhe  $C_p/C_v$  jääv suurus.

$C_p/C_v = k$  määratakse Clément & Desormes'i järele järgmiselt:

Muutugu gaasi olek adiabaatilisel, s. o. ilma soojuse juurde-  
tulekuta ja kaota. Sellest muutumiskäigust eraldame kaks olekut:  
algolek —  $(p_1, V_1)$  ja lõppolek —  $(p_2, V_2)$ . Termodünaamika  
õpetab, et gaasi adiabaatilise muutumise puhul on maksev Laplace-  
Poisson'i seadus:

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k = \text{const.} \dots \dots \dots (1)$$

ehk

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \dots \dots \dots (2).$$

Tähistame  $\delta_1$  ja  $\delta_2$  gaasi tiheduse kahe tähendatud oleku  
juures, siis

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\delta_2}{\delta_1}.$$

Valemit (2) logaritmidest ning asetades seejuures

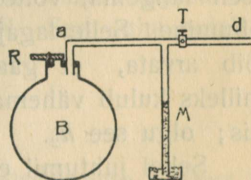
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\delta_2}{\delta_1}, \text{ leiame } \log \frac{p_2}{p_1} = k \log \frac{\delta_2}{\delta_1}$$

ehk

$$k = \frac{\log \frac{p_2}{p_1}}{\log \frac{\delta_2}{\delta_1}} \dots \dots \dots (3).$$

Siit järgneb ka  $C_p/C_v = k$  määramise viis: muudetakse  
gaasi olek adiabaatilisel ja määratakse selle rõhk ning tihedus  
oleku muutmise algusel ja lõpul.

Katseks tarvitatakse Clément ja De-  
sormes'i järele riista, mis koosneb ligi  
10 l mahuga klaaskerast  $B$  ja manomeetrist  $M$  (24. joonis). Klaaskera metall-  
kael on varustatud õhukindla klappiga  $R$   
ja toruga  $ad$ , mis läheb manomeetri  
juurde (kraan  $T$ ). Manomeetris on elav-  
hõbeda asemel petrooleum, et tõsta rõhu-  
vahede mõõtmiste tundlikkust.



24. joonis.

Katse käik.

Klapp  $R$  keeratakse õhukindlalt kinni ja pumba ehk suu abil  
hõrendatakse toru  $T$  kaudu  $B$ -s olevat gaasi. Oodatakse ca 10 min.,  
kuni  $B$ -s olev õhk omandab ümbruskonna temperatuuri. Olgu  $H$   
baromeetri kõrgus, avaldatud petrooleumisamba kõrgusena, ja  $h_1$   
vedeliku kõrgus manomeetris, siis klaaskeras  $B$  on rõhk  $H - h_1$ .

Et seda rõhumist taandada elavhõbedasamba kõrgusele, tuleb  $H - h_1$  jagada elavhõbeda erikaaluga ja korrutada petrooleumi erikaaluga (0,82). Antud katse juures ei ole see aga tarvilik. Siis avatakse üheks hetkeks õhukindel klapp  $R$ , seejuures tungib väline õhk keraesse ja surub seal oleva gaasi (õhu) kokku. Selle kokkusurumise juures tõuseb ühtlasi ka gaasi temperatuur. Niipea kui tasakaal on saavutatud, s. o. kui kera oleval õhu rõhk on võrdne välise õhu rõhuga, milleks kulub umbes  $\frac{1}{2}$  sekundit, keeratakse klapp uuesti kinni. Arvesse võttes, et klapp avati vaid üheks hetkeks, võime seda muutumist võtta adiabaatilisena.

	Olgu	õhu ruumala	rõhk	temperatuur	tihedus
Enne klapi lahtikeeramist . . .	$V$	$H - h_1$	$t$		$\delta_1$
Klapi avamise hetkel . . . . .	$V'$	$H$	$t + x$		$\delta_2$

Kasutades Laplace-Poissoni valemit (sest oleku muutus oli, nagu öeldud, adiabaatiline)

$$k = C_p / C_v = \frac{\log \frac{p_2}{p_1}}{\log \frac{\delta_2}{\delta_1}} = \frac{\log \frac{H}{H - h_1}}{\log \frac{\delta_2}{\delta_1}} \dots \dots \dots (4).$$

Selle avaldise lugeja väärtus on teada. Jääb veel määrata see nimetaja tarvis, mis leitakse järgmiselt: Olgu  $\delta_2$  gaasi tihedus sel hetkel, mil klapp kinni keerati. Et adiabaatilisel kokkusurumisel gaasi temperatuur tõusis, siis hakkab see nüüd aeglaselt langema, võttes algtemperatuuri; ühtlasi langeb ka tema rõhumine. Selle tagajärjeks on vedeliku tõus manomeetris. Kui võib arvata, et gaas kera on omandanud toatemperatuuri (milleks kulub vähemalt 10—15 min.), siis loetakse manomeetri seis; olgu see  $h_2$ .

Sellel juhtumil ei muutu gaasi tihedus, sest et tema ruumala ei muutu. Gaasirõhk on nüüd  $H - h_2$ . Võrreldes nüüdset gaasi olekut endise olekuga, s. o. olekuga, milles ta oli enne klapi avamist, võib Boyle-Mariotte'i seaduse põhjal kirjutada (sest mõlemal juhtumil on tema temperatuur üks ja sama), et gaasi tihedus on võrdeline tema rõhumisega:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{H - h_2}{H - h_1}.$$

Asetades  $\frac{\delta_2}{\delta_1}$  asemele valemisse (4) selle väärtuse siit, leiame

$$k = \frac{\log H - \log (H - h_1)}{\log (H - h_2) - \log (H - h_1)} \dots \dots \dots (5).$$

Tihti tarvitatakse  $C_p/C_v$  arvutamiseks ligikaudset valemit, mis saadakse sel juhtumil, kui  $h_1$  ja  $h_2$  on võrreldes  $H$ -ga väikesed suurused:

$$C_p/C_v = \frac{h_1}{h_1 - h_2}.$$

Selle valemi võime tuletada eespooltoodud täpsast valemist, kui selle lugeja ja nimetaja arendada reaks ja sellest võtta vaid esimesed liikmed.

Katset korratakse mitu korda.

## 26. Absoluutse ja suhtelise niiskuse määramine Alluard'i hügrimeetriga.

Absoluutne niiskus on  $1 \text{ m}^3$  õhus käesoleval silmapilgul tõeliselt sisalduv veeauru hulk, mõõdetud grammides. Sellest erineb üldiselt nn. maksimaalne niiskus, s. o. veeauru hulk, mis käesoleval temperatuuril maksimaalselt  $1 \text{ m}^3$  õhus võiks peituda ehk teiste sõnadega: veeauru hulk, mis õhku antud temperatuuri juures parajasti küllastaks. Sageli antakse absoluutse niiskuse  $g$  ja maksimaalse niiskuse  $G$  asemel neile vastavad veeauru rõhud  $p$  ja  $P$ , mõõdetud mm Hg. Siit järgneb suhteline niiskus  $E$  kui tõeliselt õhus sisalduva veeauru rõhu  $p$  suhe sama temperatuuri juures õhku küllastava veeauru rõhuse  $P$ . See suhe antakse protsentides, s. o.:

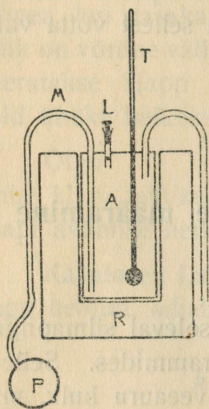
$$E = \frac{p}{P} \cdot 100\%.$$

Igale temperatuurile vastab kindel maksimaalne niiskus ja sellele vastav veeauru rõhk, mis kord määratud ja antud siin raamatu lõpus tab. nr. 6. Maksimaalne niiskus väheneb temperatuuri alanemisel. Seega on võimalik õhu kunstliku jahutamise teel teatud temperatuurini teda viia olukorda, kus temas peituv veeauru teda just parajasti küllastab, s. o., kus maksimaalne niiskus ja absoluutne niiskus on saanud võrdseks. Seda temperatuuri  $\tau$  nimetatakse kastepunktiks, sest kui õhku veel edasi jahutada, siis sadestub osa veeauru juba kaste näol.

Seega on vaja absoluutse niiskuse määramiseks leida kastepunkt  $\tau$  ja siis tabelist nr. 6 otsida vastav veeauru hulk  $g$ . Rela-

tiivse niiskuse leidmiseks peab veel mõõtma õhu temperatuuri  $t$  ja tabelist otsima niihästi sellele kui ka kastepunktile  $\tau$  vastavad veeauru rõhud  $P$  ja  $p$ .

Kastepunkti määramiseks tarvitame Alluard'i hügromeetrit (25. joonis).  $A$  on läikiv nikeldatud metallanum, millesse on lehtri  $L$  abil valatud eetrit. Kummipuhujaga  $P$  on võimalik puhuda toru  $M$  kaudu õhku läbi eetri nii, et see kiiresti hakkab aurama, kusjuures, nagu teada, hulk soojust ära tarvitatakse, mistõttu läikiva anuma  $A$  temperatuur alaneb. Termomeetri  $T$  abil saame lugeda anuma temperatuuri. Anumast  $A$  väikese pilu läbi eraldatud läikiv raam  $R$  on selleks, et kergem oleks näha kaste tekkimise momenti.



25. joonis.

Katse käik on seega järgmine: valatakse anumasse  $A$  lehtri  $L$  kaudu eetrit, puhutakse kummipuhuja  $P$  abil õhku läbi eetri ja vaadeldakse seejuures teravalt anuma  $A$  läikivat pinda. Niipea, kui sellel ilmuvad esimesed kaste jäljed, jäetakse puhumine järele ja loetakse termomeetrilt  $T$  anuma temperatuur  $t_1$ . Nüüd lastakse anumal soojeneda, kuni kaste jälle ära kaob, ja loetakse temperatuur uuesti, mis nüüd olgu  $t_2$ . Kastepunkti tõenäosemaks suurusks oleks siis:

$$\tau = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Säärast jahutamist kuni kaste tekkimiseni ja soojenedalaskmist kuni kaste kadumiseni korratakse vähemalt 4—5 korda, kuni kaste tekkimise ja kadumise temperatuurid üksteisele kaunis lähedale tulevad. Niiviisi saadud kastepunktidest võetakse keskmine. Toatemperatuur loetakse teiselt hügromeetri külge kinnitatud termomeetrilt ja arvutatakse absoluutne ning relatiivne niiskus, nagu eespool näidatud.

Et hingamisega mitte suurendada õhu niiskust hügromeetri lähedal ega tekitada enneaegset kaste ilmumist, peab vaatlema anuma pinda ja termomeetrit eemalt läbi klaasplaadi.

## 27. Mehaanilise soojuste ekvivalendi määramine.

Puluj aparaadi moodustavad kaks teineteise täpsalt sobivat terasest õõneskoonust. Välimine neist on kinnitatud püsttelje ülemise otsa külge, mille alumise otsa kettalt käib nõör üle veoratta. Telje keskkohas on sidendatud tiirude arvestajaga. Elavhõbedaga täidetud seesmisele koonusele käib peale kaas, mille keskel on avaus termomeetri jaoks. Kaas on varustatud osutiga. Viimase ots on ühenduses vedrukaaluga.

Veoratta ringiajamisel pöörleb püsttelg ja sellega ühes ka väliskoonus, kuna seesmise koonuse pidurdab vedrukaaluga sidendatud osuti. Mõlema koonuse vahel tekib hõõrumistung  $q$ , mille suurust mõõdab vedrukaal. Koonuse ühe tiiru puhul on sel puhul tehtud töö (tee  $\times$  tung)

$$A_1 = 2\pi\lambda \cdot q,$$

kus  $\lambda$  tähendab osuti pikkust koonuse keskkohast kaalu rakendus-täpini, kusjuures kaalu tõmbe suund on mõeldud risti osutiga.

Tegi väliskoonus  $n$  tiiru, siis on tehtud töö

$$A = A_1 \cdot n = 2\pi\lambda q \cdot n \quad \dots \dots \dots (1).$$

(Töö  $A$  ühikud olenevad  $\lambda$  ja  $q$  ühikuist).

Koonuste hõõrumisel kulutatud töö  $A$  muutus soojuseks, mis tõstis koonuste, elavhõbeda ja termomeetri temperatuuri  $t_1$  kuni  $t_2$ . Olgu  $P$  — elavhõbeda kaal seesmises koonuses,  $p_1$  ja  $p_2$  sise- ja väliskoonuste kaalud,  $\alpha$  — elavhõbeda ja  $\beta$  — terase erisoojus (vaata tabel nr. 5) ning  $a$  — termomeetri soojamaht, siis on hõõrumisel tekkinud soojuse hulk

$$Q = \{\alpha \cdot P + \beta(p_1 + p_2) + a\} (t_2 - t_1) \quad \dots \dots \dots (2).$$

Siit leitakse mehaaniline soojuste ekvivalent  $E$ :

$$E = \frac{A}{Q} \quad \dots \dots \dots (3).$$

### Ülesanne.

Määrata katseliselt mehaaniline soojuste ekvivalent  $E$  (3) kg-m/kcal; erg/cal; džaul/cal.

## Katse käik.

Sisekoonus täidetakse kaalutud hulga elavhõbedaga ( $P$ ) ja sinna paigutatakse läbi kaaneavause termomeeter; seejärel mõõdetakse osuti pikkus ja kinnitatakse selle ots vedrukaalu külge (osuti risti kaalu tõmbega!). Samuti loetakse elavhõbeda algtemperatuur  $t_1$  ja tiirude arvestaja seis. Nüüd pööratakse veoratast võimalikult ühtlase kiirusega nii, et vedrukaal näitaks tõmmet ca 15 g. Katse kestel märgitakse kaalu seis mitmel (vähemalt 5) korral ja võetakse saadud lugemeist aritmeetiline keskmine  $q$ . Katse lõpetatakse, kui temperatuur on tõusnud ca  $3^\circ$  võrra, mis loetakse täpsalt (lõpptemperatuur  $t_2$ ). Samuti loetakse tiirude arvestaja seis.

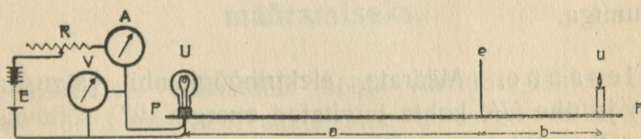
Kasutades valemid (1), (2) ja (3) arvutatakse soojuse mehaaniline ekvivalent  $E$ .

## VI.

# Valgus.

### 28. Valgustusetugevuse mõõtmine.

Valgustusetugevuse ehk lihtsalt valgustuse all mõistame pindala ühikule langevat valguse voogu. Et täpikujulisest valguseallikast levib valgus kerapinnana ja et kerapind kasvab võrdeliselt raadiuse ruuduga, siis peab üks ja sama valgusehulk jagunema pinnaühikuile, mille arv kasvab võrdeliselt kauguse ruuduga valguseallikast: pindala (ühiku) valgustusetugevus on pöördvõrdeline kauguse ruuduga valguseallikast. Ehk ümberpööratult: pinna ühe ja sama valgustuse korral peab suurendama valguseallika valgustusetugevust võrdeliselt kauguse ruuduga.



26. joonis.

Olgu (26. joonis)  $PP$  — optikapink,  $e$  — ekraan,  $U$  ja  $u$  — 2 valguseallikat kaugusel  $d = a + b$  teineteisest,  $L$  ja  $l$  — neile vastavad valgustusetugevused ja  $b$  ning  $a$  — nende kaugused ekraanist, kui viimane on mõlemalt poolt valgustatud ühesuguse tugevusega. Siis

$$\frac{L}{l} = \frac{a^2}{b^2} \dots \dots \dots (1).$$

Ühikud. Valgustusetugevuse ühiku suhtes pole jõutud ühisele kokkuleppele. Saksamaal on levinud nn. Hefner'i küünal (*HK*) — valgusehulk, mille horisontaalsuunas välja saadab Hefneri poolt 1884. a. koostatud ümmarguse tahiga lamp, kui tema leegi kõrgus tahist puhtas vaiksuses on 40 mm. Lambis põleb puhas amüülatsetaat ( $C_7H_{14}O_2$ ). Hefneri küünal on tarvitusel Saksamaal; Inglismaal ja Ameerikas aga tarvitatakse *international candle* ( $1K = 1,11HK$ ) ja Prantsusmaal *Bougie decimale* =  $1,11HK$ . Pinna valgustusetugevus on 1 lux (meeterküünal), kui teda risti 1 m kauguselt valgustab 1 *HK*.

### Bunseni fotomeeter.

Bunseni fotomeeter koosneb paberilehekesest, mille keskel asub rasvapekk; nurkpeegel võimaldab korruga jälgida lehekeset ja pleki mõlema külje heledust. Seadeldis asetseb vankrikesega optikapingil. Vaadates niisugusele lehele valguseallikale vastupidisest küljest (läbiminevad kiired), näib läbipaistvam rasvapekk heledam kui paber; jälgides aga teiselt poolt peegeldunud valgust, paistab rasvapekk oma vähema peegeldusvõime tõttu tumedana. Asetseb fotomeeter  $e$  (26. joonis) kahe valguseallika  $u$  ja  $U$  vahel, nii et mõlemad valgustavad lehekest ühesuguse tugevusega, siis peaksid paistma paber ja rasvapekk võrdsete heledustega ja neid ei peaks saama teineteisest eraldada. Mitmeil kõrvalisil põhjusil ei kao plekk täielikult: fotomeetrimisel tuleb rahulduda paberi ja pleki heleduste vahede miinimumiga.

Ülesanne. Määrata elektrihoõglambi valgustusetugevuse ( $L$ ) ja ühe *HK* kohta tarvitatud energia ( $W$ ) sõltuvus voolu pingest. Olgu (26. joonis)  $PP$  — mm-jaotistega varustatud optikaping,  $u$  — Hefneri lamp,  $U$  — uuritav hoõglamp ja  $e$  — Bunseni fotomeeter.

Lambi lülitus: (26. joonis)  $U$  — hoõglamp,  $E$  — vooluallikas,  $R$  — reostaat,  $A$  — ampermeeter ( $E$ ,  $R$ ,  $A$  ja  $U$  ühendada järjes-tikku) ja  $V$  — voltmeeter (rööbiti lambiga).

Katse alul seatakse ühekõrgusele optikapingist fotomeetri rasvapekk, Hefneri lambi leek ja uuritav valguseallikas  $U$ . On Hefneri lamp põlenud ca 5 minutit, siis vaadatakse, kas leegi

ülemine terav tipp ulatub parajasti lambi külge kinnitatud luubi mattklaasile tõmmatud kriipsuni; vastasel korral tuleb seda seada reguleerimiskruvi abil. Hiljemini tuleb seda kontrollida. On see püsiv, võib asuda mõõtmisele. Reostaadi takistust muudetakse nii, et lambil oleks pinge  $V$ , mille lugem saadakse voltmeetrilt; ühtlasi loetakse ka voolu tugevus  $i$  ampermeetrilt. Seejärel nihutatakse fotomeetrit valguseallikate vahel edasi-tagasi, kuni leitakse koht, kus paberi ja rasvapeki heleduste vahe on mõlemalt poolt kõige väikesem. See leitud, loetakse optikapingi astmikult mõõdetava valguseallika kaugus  $a$  ja ühik-küünla kaugus  $b$  fotomeetrist. Et pinge ja voolutugevus katse ajal sagedasti muutuvad, siis on otstarbekohane vaatlusi toimetada kahekesi: üks seab fotomeetrit ja teine jälgib pinget ning tasandab viimase kõikumisi, kui need olemas, reostaadiga. Soovitav on neid mõõtmisi teha vähemalt 3 korda ja saadud lugemeist  $a'$ ,  $a''$ ... samuti  $b'$ ,  $b''$ ... võtta aritmeetilised keskmised.

**Arvutus.** Pinge  $V$  korral arvutatakse lambi valgustuse-tugevus valemist (1).

$$L = \frac{a^2}{b^2},$$

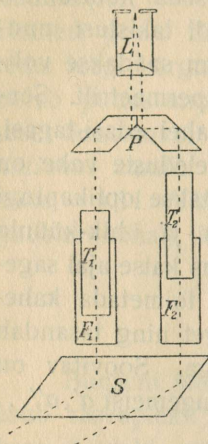
sest  $l = 1$ .

## 29. Kolorimeeter lahuste kontsentratsiooni määramiseks.

Kolorimeeter võimaldab mõõta värvaine lahuse kontsentratsiooni võrdlemise teel sama aine lahusega, mille kontsentratsioon on antud. Kolorimeeter põhjeneb nähtusel, et valguse neeldumine värvaine lahuses on võrdeline lahuse kontsentratsiooniga (Beer'i seadus). Harilikult määratakse siin suhe kahe vedeliku-(lahuse-)kihi paksuse vahel, mis valgusekiiri ühepalju neelavad. Beer'i seaduse põhjal suhtuvad niisuguste vedelikkuude kihtide sügavused  $h_1$  ja  $h_2$  pöördvõrdeliselt nende lahuste kontsentratsioonidesse  $C_1$  ja  $C_2$ , see on:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{C_2}{C_1}.$$

Allolev 27. joonis kujutab sageli tarvitavat kolorimeetrit (Dubosq).  $S$  on piimklaasist peegel, mille abil juhitakse valgus võrreldavaid lahuseid sisaldavasse torudesse  $F_1$  ja  $F_2$ . Pikksilm  $L$  ja prisma  $P$  moodustavad fotomeetrilise sisseade, mille abil võrreldakse  $F_1$  ja  $F_2$  läbinud valgusehulki, heledust.



27. joonis.

Kolorimeetrit võib vaid siis tarvitada, kui võrreldavad lahused on täiesti suspensioonivabad, s. o. selged, ning ei sisalda kehi, mis neid uduseks teevad.

Võrdluslahus tuleb hoolega valmistada ja selle kontsentratsioon (lahustunud aine hulk g-ides iga 100 cm<sup>3</sup> lahuse kohta) täpsalt mõõta, sest sellest oleneb mõõtmisresultaadi täpsus.

Samuti tuleb hoolt kanda, et võrreldavate lahuste temperatuurid oleksid ligikaudu võrdsed, sest tihti muutub lahuse värv, seega ka valguse neeldumine selles, temperatuuri muutusega.

### Katse käik.

Enne kui asetada vedelikud aparati, vaadatakse, kas pikksilma vaatevälja mõlemad pooled on ühetugevuselt heledad. Ei ole see mitte nii, siis pööratakse aparati valguseallika ees (aken, elektrilamp), tarbekorral ka piimklaasist peeglit, niikaua, kuni heledusevahe vaateväljal kaob, — siis on aparaat mõõtmiseks valmis. Nüüd asetatakse aparadi ühte klaastorru tuntud kontsentratsioon, teise — mõõdetav lahus. Üldiselt näivad siis vaatevälja pooled isetugevusega heledad. Tuntud või uuritava lahuse kihi paksust muutes kaotatakse heledusevahe vaateväljal. Vedelikukihi paksust muudetakse kas juurdekallamise teel või klaaspõhjaga tühja silindri kaudu, mida erilise kruvi abil vedelikus üles ja alla võib tõsta. (Ettevaatust: mitte klaastoru põhja katki rõhuda!) Silindriga ühenduses olev osuti võimaldab ka kihi paksuse lugemise aparadi astmikult. Olgu sel puhul tuntud ja uuritava lahuse sügavused  $h_1$  ja  $h_2$ , kontsentratsioonid  $C_1$  ja  $C_2$ , siis Beeri seaduse põhjal on

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{h_2}{h_1}.$$

Olgu tuntud lahuse kontsentratsioon  $C_1$ , siis arvutatakse  $C_2$  valemist:

$$C_2 = C_1 \frac{h_1}{h_2}.$$

### 30. Läätse tulipunkti kauguse määramine.

Optiline lääts on läbipaistev (harilikult klaasist) keha, mida piiravad kaks kerapinda.

Kumerlääts, mis keskelt paksem, nimetatakse sageli koondavaks läätsesks.

Läätsse tulipunktiks nimetatakse punkti, kus kõik läätsse peateljega paralleelsed kiired lõikuvad pärast murdumist. Igal läätsel on kaks tulipunkti, üks ühel, teine teisel pool läätsse, kuid üks tulipunkti kaugus. Ent viimane on maksev vaid siis, kui mõlemal pool läätsse on üks ja sama keskkond, näiteks õhk.

Läätsse ette asetatud asjast annab lääts kujutise, mis asetseb teisel pool läätsse ja on tõeline, kui asja kaugus läätsesest on suurem läätsse tulipunkti kaugusest. Asetseb asi aga läätsse ja tulipunkti vahel, siis on kujutis imaginaarne ja asetseb samal pool läätsse, kus asigi.

Nagu sfääriliste peeglite nii ka läätsse kohta maksab asja kauguse  $a$ , selle kujutise kauguse  $k$  ja läätsse tulipunkti kauguse  $f$  vahel seos

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f} \dots \dots \dots (1),$$

mis annab

$$f = \frac{ak}{a+k} \dots \dots \dots (2).$$

#### Läätsse tulipunkti kauguse määramine asja ja selle kujutise kauguse mõõtmise teel.

Tähendatud meetod on rakendatav kumerläätsede puhul.

Katse korraldatakse järgmiselt:

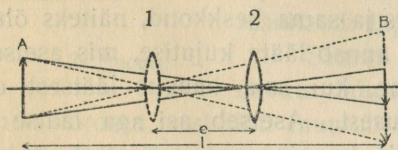
Läätsse ette, selle tulipunktist kaugemale, asetatakse kujutatav asi (näiteks hästivalgustatud traat), teisele poole läätsse asja kujutise ülesleidmiseks valge ekraan. Otstarbekohane on kõik kolm asetada optikapingile, kus on võimalik neid edasitagasi nihutada. Katse puhul peavad olema kõik kolm ühekõrgusel optikapingist; samuti tuleb hoolitseda, et kiired langeksid läätssele risti.

Ekraani edasi-tagasi nihutades leitakse selle asend, kus ekraanil on näha asja kujutis. Siis jäetakse asi ning ekraan paigale ja nihutatakse läätse nende vahel, kuni kujutis teravalt ja selgesti on näha ekraanil. Siis mõõdetakse mõõtpuuga asja kaugus  $a$  ja kujutise kaugus  $k$  ehk loetakse need optikapingile märgitud astmikult ja arvutatakse tulipunkti kaugus  $f$  valemist

$$f = \frac{ak}{a+k}.$$

Katset korratakse vähemalt kolm korda, kusjuures ekraanile antakse niisugune kaugus, et kujutis oleks kord võrdne asjaga, teine kord vähendatud, kolmas kord suurendatud.

Kui asja  $A$  ja ekraani  $B$  vaheline kaugus, mille tähistame  $l$ -ga, on suurem neljakordsest läätse tulipunkti kaugusest  $f$ , siis annab läätse ekraanil asja kujutise kahes asendis 1 ja 2 (28. joonis). Kord on kujutis suurendatud, teinekord vähendatud. See järgneb juba läätse põhivalemist, sest võttes asja kauguseks kujutise kauguse  $k$ , leitakse kujutise kaugus, mis võrdne asja kaugusega  $a$ .



28. joonis.

Nagu joonisest järgneb, on seetõttu läätse asendis 1.  $a = \frac{1}{2}(l - e)$  ja kujutise kaugus  $k = \frac{1}{2}(l + e)$ , kus  $e$  on tähistatud kahe läätse asendi 1 ja 2 kaugus teineteisest. Seega annab läätse põhivalem

$$\frac{2}{l+e} + \frac{2}{l-e} = \frac{1}{f}.$$

Arvutades siit  $f$  leitakse:

$$f = \frac{l^2 - e^2}{4l} = \frac{1}{4} \left( l - \frac{e^2}{l} \right) \dots \dots \dots (3).$$

Seega korraldatakse see osa katses järgmiselt:

Nihutades läätse optikapingil asja ja ekraani vahel, leitakse läätse asend 1, kus kujutis on suurendatud. Samuti leitakse asend 2, kus kujutis on vähendatud. Mõlemate tähendatud läätse asendite kaugus  $e$  loetakse optikapingi astmikult või mõõdetakse mõõtpuuga. Seejärel mõõdetakse asja ja ekraani kaugus  $l$  ja arvutatakse tulipunkti kaugus  $f$  valemist (3).

### 31. Mikroskoop.

Mikroskoop koosneb kahest optilisest läätsest süsteemist, objektiivist ja okulaarist. Mõlemad läätsest süsteemid on liidetud mitmest läätsest, et kujutised neis oleksid vabad sfäärilisest ja kromaatilise aberratsioonist.

Objektiivi tulipunkti kaugus on mõni mm, okulaari tulipunkti kaugus mõni cm.

Vaadeldav asi asetatakse objektiivi ette väljaspool selle tulipunkti.

Objektiiv kumerläätsena annab asja tõelise ja suurendatud kujutise teisel pool objektiivi okulaari ees. Seda kujutist vaadeldakse okulaariga kui luubiga. Vaatlemisel nihutatakse mikroskoopi üles-alla, kuni asja kujutis selles on näha normaalsilma parema nägemise kaugusel, mis võrdub 25 cm.

Mikroskoobi suurendus on suhe  $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ , kus  $\alpha_1$  on nurk, millel näha keha mikroskoobis, ja  $\alpha_2$  nurk, millel näha sama keha normaalsilma parema nägemise kaugusel.

Mikroskoobi suurendus määratakse sageli järgmiselt.

Mikroskoobi alla asetatakse väga väikeste kriipsuvahedega astmik (objektmikromeeter), ja mikroskoopi üles-alla nihutades katsutakse leida selles astmiku terav ja selge kujutis. Mikroskoobi kõrvale lauale asetatakse teine millimeeter-astmikuga mõõtpuu nii, et vaadates ühe silmaga mikroskoobi alla asetatud astmikku, teisega samal ajal lauale asetatud astmikku, kusjuures katsutakse viimast nii paigutada, et see silmast oleks 25 cm kaugusel ja et mõlemad astmikud oleksid näha teineteise kõrval või teineteist kataksid. Katab seejuures mikroskoobis näha oleval astmikul  $n$  kriipsuvahet palja silmaga näha oleval astmikul  $N$  kriipsuvahet, kusjuures  $n$  kriipsuvahe pikkus on  $l$  mm ja  $N$  kriipsuvahe pikkus  $L$  mm, siis suhe

$$\frac{L}{l} = s$$

on mikroskoobi suurendus.

Katset korraldatakse mitu korda ja arvutatakse neist aritmeetiline keskmine.

## 32. Pikksilm.

Pikksilma tähtsamad osad on objektiiv ja okulaar. Mõlemad on mitmest läätsest liidetud läätsede süsteemid. Lihtläätsedes oleksid kujutised mittevabad sfäärilisest ja kromaatilisest aberatsioonist. Astronoomilises pikksilmas on mõlemad, objektiiv ja okulaar, kiiri koondavad süsteemid.

Tavaliselt on objektiivi tulipunkti kaugus mõni dm, okulaari oma mõni cm.

Vaadeldav asi asetseb objektiivi ees ja selle kaugus objektiivist on võrreldes läätsede tulipunkti kaugustega suur. See tõttu annab objektiiv asja kujutise ligikaudu tulipunktis. Seda kujutist vaadeldakse nagu mikroskoobi juureski okulaariga kui luubiga. Nii on säärases pikksilmas kujutis ümberpööratud ja suurendatud. Et kujutis oleks õigetpidi, seks asetatakse objektiivi ja okulaari vahele kolmas lääts, mis kujutise õigetpidi tagasi pöörab. Niisuguse pikksilma pikkus on kolmanda läätse 2-he tulipunkti kauguse vahe võrra pikem eespoolkirjeldatud pikk-silmast.

Pikksilmaga vaatlemisel tuleb okulaari edasi-tagasi nihutada, kuni vaadeldav asi selgesti okulaaris nähtavale tuleb.

Mida lähemal on asi, seda pikemaks tuleb seada pikksilm ja ümberpööratult.

On keha näha palja silmaga nurgi  $\alpha_1$  ja sama keha samalt kohalt pikksilmas nurgi  $\alpha_2$ , siis suhe  $\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$  on pikksilma suurendus.

Astronoomilise ja galilei pikksilma suurendus  $s = \frac{F}{f}$ , kus  $F$  on objektiiv,  $f$  — okulaarläätse tulipunkti kaugus.

Pikksilma suurendus määratakse katse teel sageli järgmiselt:

Mõõtpuu ette, millel jaotised märgitud jämedate kriipsudega, seatakse pikksilm niikaugele (ca 5 m), et jaotised mõõtpuul oleksid palja silmaga veel selgesti näha. Seejärel nihutatakse pikksilma okulaari edasi-tagasi, kuni mõõtpuu jaotised pikksilmas tulevad teravalt nähtavale.

Siis vaadatakse jaotisi mõõtpuul ühe silmaga läbi pikk-silma, teisega samal ajal pikksilma kõrvalt, kusjuures katsutakse anda pikksilmale niisugune suund, et läbi pikksilma nähtud mõõtpuu kujutis oleks näha palja silmaga nähtud mõõtpuu kohal.

Kui leitakse, et pikksilmas  $n$  jaotist katab palja silmaga nähtud  $N$  jaotist mõõtpuul, siis  $\frac{N}{n}$  ongi pikksilma suurendus.

Täpsama resultaadi leidmiseks korratakse mõõtmist vähemalt 5 korda, võttes  $n$  iga kord isesuurusena. Kõigist tulemusist leitakse aritmeetiline keskmine.

### 33. Spektromeeter.

Kehale, mille murdumisnäitaja tuleb mõõta, antakse tavaliselt prisma kuju, sest mõõtes prisma murdjanurka ja nn. kalde miinimumi teatud kiire suhtes, võib arvutada neist prisma aine murdumisnäitaja sama kiire tarvis.

Tarvitades õõnesprismat võib sel teel määrata ka vedelikkude murdumisnäitaja.

Prisma murdjanurga ja kalde miinimumi määramine sünnib tavaliselt spektromeetriga.

Spektromeetri ehitus võib olla väga mitmesugune, olenedes sellest, milliseks otstarbeks teda peamiselt tarvitatakse.

Siin tarvitatav spektromeeter omab järgmised peaosad: pilutoru (kollimaator), horisontaalne mõõtering, pikksilm ja prismaalus. Tugevale kolmjalgsele alusele on püstitatud koonusekujuline telg, mis oma ülemises otsas kannab kolmele jalgkruvile toetuvat prismaalust. Jalgkruvide abil võib prismaalust seada üles-alla. Mõõtering ja pikksilm on pööratavad sama telje ümber. Sageli nimetatakse nende ühist pöörlemistelge aparaadi teljeks.

Kollimaator on harilikult liikumatult kinnitatud alusele. Kollimaatoritoru väljapoole pööratud ots on varustatud piluga, mille laiust võib reguleerida erilise kruvi abil. Kollimaatoritoru prismaaluse poole pööratud otsas on kaksikkumer lääts — kollimaatori objektiiv. Pilu ja objektiivi kaugus teineteisest on võrdne viimase tulipunkti kaugusega. Nii on pilu läbinud kiired objektiivist välja tulles paralleelsed. Prisma tahul murdudes või peegeldudes langevad need kiired pikksilma. Et pikksilmas oleks näha pilu terav kujutis, tuleb teda fookustada lõpmatusse.

Pikksilm on lihtne, astronoomiline, niitristiga varustatud okulaariga. Sageli on tarvitusel lihtsa okulaari asemel Gauss'i okulaar. Gaussi okulaaril on tehtud pikksilma torusse okulaari ja niitristi vahele aknake. Aknakese kohale on paigutatud  $45^\circ$  all

tasaparalleelne klaasplaat. Sellel plaadil peegelduvad aknakese ette asetatud valguseallika kiired torusse ning valgustavad niiviisi niitristi.

Pikksilma pööratakse riista telje ümber, võttes käega kinni pikksilma jalast, mitte aga pikksilma torust.

Pikksilma suund loetakse aparadi mõõteringilt, mis varustatud ringastmikuga. Seks loetakse pikksilmaga ühes liikuva kahe nooniuise nullkriipsude asend mõõteringi astmiku suhtes. Mõnede aparaatide juures liigub mõõtering ühes pikksilmaga, ent siis on mõlemad nooniused liikumatud. Ka niisugusel korral loetakse nooniuise nullkriipsu asend mõõteringi astmiku suhtes. Lugemise ajaks tuleb pikksilma kinnituskruvi kinni keerata ning kontrollida, kas pilu kujutis jäi niitristi kohale.

Kahel teineteise vastas oleval lugemiskohal on see paremus, et nad võimaldavad kõrvaldada vea, mis võib tekkida aparadi pöörlemistelje ja ringastmiku sentri mitteühtumisest. Seejuures tuleb igakord lugeda mõlemad nooniused. Kummagi nooniuise lugemist arvutatakse eraldi otsitav nurk ja võetakse neist keskmine. Ehk arvutatakse kraadid vaid ühe nooniuise järele, kraadide osadeks (minutid ja sekundid) aga võetakse mõlemate nooniuiste lugemite keskmised.

Et spektromeeter oleks kõlvuline mõõtmiseks, tuleb teda järgmisel viisil korda seada.

### Pikksilma ja kollimaatori seadmine lõpmatusse.

Nagu nägime, peavad kollimaatorist tulnud kiired olema paralleelsed. See sünnib muidugi siis, kui pilu asetseb kollimaatori objektiivil tulipunktis. Et pikksilmas oleks siis näha pilu terav kujutis, tuleb pikksilm fookustada lõpmatusse. Tegelikult on pilu asetamine objektiivil tulipunkti raske, seepärast toimetatakse siin enamail juhtumeil ümberpööratult: fookustatakse pikksilm lõpmatusse ja siis, asetades pikksilma kollimaatori ette, reguleeritakse pilu kaugust, kuni selle kujutis pikksilmas muutub teravaks.

See kollimaatori ja pikksilma seadmine korraldatakse seega järgmiselt:

Alul seatakse pikksilma okulaar nii, et niitrist oleks teravalt näha. Siis juhitakse pikksilm mõne kaugel oleva asja peale

ja pikksilma pikkust muutes tuuakse pikksilmas asja terav kujutis nähtavale, kusjuures asja kujutis ei tohi pikksilma niitristi suhtes anda parallaksi, s. o. silma kõrvale nihutades ei tohi asja kujutis niitristi suhtes nihkuda. Nüüd pööratakse pikksilm tagasi kolli- maatori ette, seejärel nihutatakse pilu kollimaatoritorus edasi- tagasi, kuni pilu kujutis teravaks muutub. Seejuures vaadatakse, et ka pilu kujutis pikksilma niitristi suhtes ei annaks parallaksi; ühtlasi pööratakse pilu, et selle kujutis oleks paralleelne pikk- silma vertikaalse niidiga, ja antakse pilule paras laius.

Pikksilma võib fookustada lõpmatusse ka Gaussi okulaariga. Lähemalt selle kohta leidub: F. Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik.

### Pikksilma toru seadmine risti aparadi pöörlemisteljega.

Prismaalusele asetatakse püsti tasaparalleelne klaasplaat nii, et selle tasapind oleks rööbiti kahe aluse jalgkruviga  $a_1$  ja  $a_2$ . Pikksilma lihtokulaar vahetatakse Gaussi okulaariga, mida valgus- tatakse toru kõrvale asetatud lambiga. (Gaussi okulaari võib asendada, nagu eespool tähendatud, klaasplaadike, mida tuleb asetada lihtokulaari ja pikksilma niitristi vahele. Muidugi on see võimalik, kui torus on vastav avaus.)

Nüüd katsutakse leida pikksilmas plaadil peegeldunud niit- risti kujutis. Seks tuleb tavalisest pöörata prismaalust ja selle jalgkruve.

Seda jätkatakse seni, kui pikksilma niitrist ühtub plaadil peegeldunud niitristi kujutisega. Siis on pikksilma telje suund risti plaadi tasapinnaga. Nüüd pööratakse klaasplaati aluse pöö- ramisega  $180^\circ$  võrra. Ühtub ka nüüd niitrist oma kujutisega, siis on pikksilm risti aparadi pöörlemisteljega. Vastasel korral tuleb pool sellest parandusest teha pikksilma kruviga, pool prismaaluse jalgkruviga  $a_3$ . Katset jätkatakse, kuni prismaalusega klaasplaati  $180^\circ$  võrra pöörates niitrist ühtub oma kujutisega.

Teiste aparadi osade (kollimaatori, prismaaluse) korda- seadmise kohta leidub kirjeldisi raamatus F. Kohlrausch, Lehr- buch d. prakt. Physik.

## Prisma murdjanurga määramine.

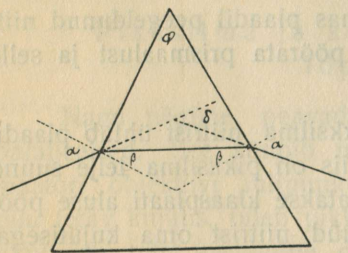
Pilu ette asetatakse mingi valguseallikas, näiteks gaasilamp. Selle järele asetatakse prisma spektromeetri prismaalusele nii, et prisma murdjanurga poolitaja ühtuaks kollimaatori teljega. Nii-sugusel prisma asendil peegeldub osa pilust läbi tulnud kiiri ühel prisma tahul, teine osa teisel tahul. Nüüd pööratakse pikksilm prisma tahul peegeldunud kiirte ette ja asetatakse ta sinna nii, et pikksilma niitristi kohal oleks näha pilu terav kujutis. Pikksilma kinnituskruvi abil kinnitades loetakse spektromeetri ringastmikult pikksilma suund, kusjuures tarvitatakse mõlemaid nooniusi. Pöörates pikksilma teisel prisma tahul peegeldunud kiirte ette, loetakse samal viisil pikksilma suund riista ringastmikult. Kahe lugemi vahe annab nurga  $A$ . See nurk on võrdne kahekordse prisma murdjanurgaga  $\varphi$ , s. o.

$$\varphi = \frac{A}{2}.$$

(Vaata: Grimsehl, Lehrb. d. Phys. Bd. I.)

## Prisma murdumisnäitaja määramine.

Et murdumisnäitaja sõltub valguse lainepikkusest ehk valguse värvist, siis tuleb käesolevas katses pilu valgustada homogeense (ühevärvilise) valgusega. Seks on otstarbekohane tarvitada kollast naatriumileeki, mis saavutatakse sel teel, et hoitakse tükki keedusoolalahuses leotatud asbesti värvitus Bunseni põleti leegis.



29. joonis.

Alul määratakse kindlaks mittekaldunud kiirte suund. Seks seatakse pikksilm kollimaatori vastu, prisma kiirte ette asetamata, ja otsitakse niisugune pikksilma asend, kus pilu kujutis oleks näha pikksilma niitristi kohal. Pikksilma kinnituskruvi kinni keerates loetakse ringastmikult pikksilma suund. Soovitav on seda lugeda mõlemailt nooniusilt, et tõsta lugemi täpsust.

Seejärel asetatakse prisma prismalauakesele kollimaatori-torust väljunud kiirte ette ja katsutakse alul leida palja silmaga koht, kus näha on prisma läbinud kiired. Seejuures tuleb meeles

pidada, et prisma läbimisel kalduvad kiired prisma alustahu poole. Sinna pööratakse nüüd pikksilm ja katsutakse leida selles pilu kujutis. On see leitud, siis hakatakse prisma alusega pöörama, kusjuures pikksilma järele pööratakse, et mitte kaotada silmast pilu kujutist. Seda tehakse senikaua, kui on leitud prisma asend, kus kalle kõige väikesem, s. o. asend, kus prisma mistahes suunas pöörates pilu kujutis nihkub vaid ühele poole, s. o. kalle suureneb. Nüüd seatakse pikksilma niitrist täpsalt pilu kujutise kohale, kinnitades pikksilma kinnituskruviga, ja loetakse pikksilma suund ringastmikult. Eelmise ja nüüdse lugemi vahe annab nurga  $\delta$ , mille võrra kaldusid kiired prisma. See kalle on ühtlasi ka miinimum, sest, nagu nägime, pöörates prisma mistahes suunas, suurenes ikka kalle.

Prisma murdumisnäitaja arvutatakse prisma murdjanurgast  $\varphi$  ja kalde miinimumist —  $\delta$  järgmisest valemist:

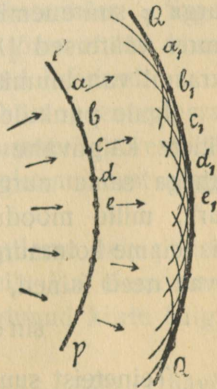
$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\varphi + \delta)}{\sin \frac{\varphi}{2}}$$

(Vaata: Grimsehl, Lehrb. d. Phys. Bd. I.)

### 34. Valguse diffraktsioon.

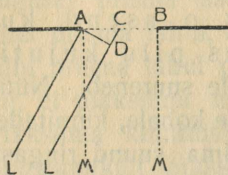
Lainetusteooria järele on valgus eetrilainetus.

Olgu  $A$  valguseallikas ja  $P$  kerapind, milleni jõudis teatud hetkel valguseallikast  $A$  väljunud laine. Huygens'i printsibi põhjal võib igat laine täppi võtta uue elementaarlane sentrina. Seega ka igat laine  $P$  täppi võib käsitleda elementaarlainete  $a, b, c \dots$  sentritena (30. joonis). Nende elementaarlainete mähispind  $Q$  on  $P$ -ga konsentriline kerapind. Niisuguse kujutelma lainete levimisest saab lähtudes Huygens'i printsibist. Samasuguseid tulemusi annab muidugi ka laine sirgjoonelise levimise teooria.



30. joonis.

Olgu 31. joonisel kujutatud kitsas pilu, millele langeb homogeenne (ühevärviline) ja paralleelne kiirte kimp. Asetades pilu taha ekraani, võime seal tähele panna heledat riba, mida valgustavad pilust paindumatult läbi pääsenud kiired. Kui pilu on



31. joonis.

kitsas, siis näeme ekraanil mõlemalpool heledat riba kogu paralleelseid, vaheldumisi heledaid ja tumedaid ribasid. Valge valguse juures on ribad värvilised. Kui pilu teha kitsamaks, siis nihkuvad ribad üksteisest kaugemale. Niisugust kiirte paindumist kutsutakse valguse diffraktsiooniks.

Nähtust võib seletada toetudes Huygens'i printsiibile.

Huygens'i printsiip lubab igat täppi pilu avauses käsitleda kui elementaarlainet sentrit. Vaatleme neist kahte: täppi  $A$  pilu ääres ja täppi  $C$  pilu keskkohas. Neist levivad elementaarlained igasse suunda.

Pilule langevate kiirte suunas annavad tähendatud sentrid  $A$  ja  $C$  lained, mille käiguvahe null, s. o. mõlemad lained suurendavad teineteist. Teisiti on lugu nende lainetega, mille suund ei ühtu pilule langenud kiirte suunaga. Kiirte käiguvahe kahe kiire  $AL$  ja  $CL$  vahel, mis moodustavad kiirte algsuunaga nurga  $\varphi$ , on, nagu 31. joonisest näha,  $CD$ . Tähendatud käiguvahe leitakse, kui tõmmata täpist  $A$  loodjoon  $CL$ -ile. On käiguvahe võrdne  $\frac{1}{2}\lambda$ ,  $\frac{3}{2}\lambda$ ,  $\frac{5}{2}\lambda \dots$ , kus  $\lambda$  on lainepikkus, siis hävitavad mõlemad lained teineteist. Kui käiguvahe on võrdne  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda \dots$ , siis suurendavad nad teineteist. Nagu joonisest näha, nurga  $\varphi$  suurenemisega suureneb ka käiguvahe  $DC$ , võttes seejuures väärtused  $\frac{1}{2}\lambda$ ,  $\lambda$ ,  $\frac{3}{2}\lambda$ ,  $2\lambda$  jne. Nii tekivad pilu taha asetatud ekraanil vaheldumisi tumedad ja heledad ribad.

Igale punktile  $AC$  vahel leidub vastav täpp  $CB$  vahel, mille lainete käiguvahe on võrdne punktide  $A$  ja  $C$  lainete käiguvahega sama nurga  $\varphi$  juures. Kui tähistada pilu laius  $d$  ja  $\varphi$  nurk, mille moodustavad paindunud kiired kiirte algsuunaga, siis leiame kolmnurga  $ACD$  põhjal, et vastastikku teineteist hävitavad need lained, mille sin on

$$\sin \varphi_1 = \frac{1}{2}\lambda/d \quad \sin \varphi_2 = \frac{3}{2}\lambda/d \dots$$

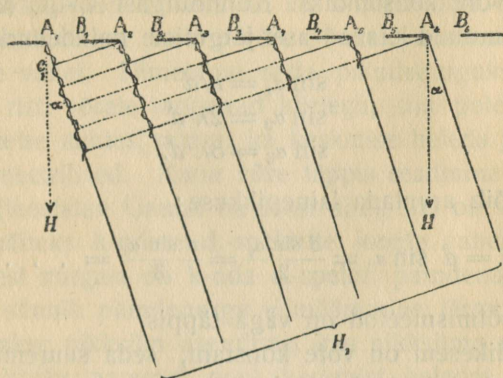
Teineteist suurendavad need, mille

$$\sin \varphi' = \lambda/d, \quad \sin \varphi'' = 2\lambda/d \dots \dots \dots (1).$$

Üldiselt on  $\lambda$  väga väike. Nagu valemist (1) näha, nihkuvad laia pilu puhul heledad ribad üksteise peale ( $\varphi$  on väga väike) ning diffraktsiooninähtused muutuvad nägematuks.

Alles pilu puhul, mille laius ligineb valguselaine pikkusele, näeme valgusekiire paindumist pilu avases.

Tarvitades homogeenne valguse asemel mittehomogeenset (valget) valgust, tekivad pilu taha asetatud ekraanile langevate kiirte suunas valgustatud riba kõrvale värvilised ribad, nn. diffraktsioonispektrid, kusjuures riba violetne pool asetseb keskmisele ribale lähemal ( $\lambda$  on väikesem), punane pool kaugemal ( $\lambda$  on suurem).



32. joonis.

Vaatleme nüüd valguse diffraktsiooni mitme kitsa pilu juures. Kogu paralleelseid võrdse laiusega ja võrdseil kaugusil asetsevaid pilusid moodustab nn. diffraktsioonivõre. Sageli valmistatakse nad sel teel, et teemantnoaga tõmmatakse klaasplaadile üksteisest võrdseil kaugusil paralleelsed kriipsud.

Langegu niisugusele võrele loodjoones homogeenne paralleelne kiirte kimp lainepikkusega  $\lambda$ . Paindumatult võrest läbi tulnud kiired valgustavad võre taha asetatud ekraani, sest käiguvahe neil kiirtel on null.

Olgu  $A_1B_1$  ja  $A_2B_2$  kaks võre pilu. Vaatleme neis piludes kahte täppi, mida Huygeni järele võib käsitleda kui elementaarlainete sentreid  $A_1$  ja  $A_2$ . Nurga  $\alpha$  võrra paindunud kiirte käiguvahe on, nagu 32. joonisel kujutatud,  $A_1C$ .

Kui käiguvahe  $A_1C$  on võrdne  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda \dots$ , siis ei hävita lained teineteist. Seega tekib ka siin kiirte paindumine ehk

diffraktsioon. Samasuguse käiguvahe annavad paarikaupa ka teised täpid piludes  $A_1B_1$  ja  $A_2B_2$ . Õeldu maksab samuti kõigi teiste pilude kohta. Selle teooria arendamine ei kuulu käesolevasse raamatusse. Lugeja leiab selle igast täielikumast eksperimentaalse füüsika õpperaamatust.

Nagu 32. jooniselt näha, suureneb nurgaga  $\alpha$  käiguvahe  $A_1C$ . Iga  $\alpha$  puhul, mille juures käiguvahe on võrdne  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  jne., ei hävita elementaarained teineteist, seega võib neil korral tähele panna valguse paindumist võre piludes. Üldiselt on need valguse maksimumid hulga pilude puhul väga teravad.

Ühe pilu ja ühe vahe kogulaiust  $A_1A_2 = d$  nimetatakse diffraktsioonivõre konstandiks. Kolmnurgast  $A_1A_2C$  leiame, et heleduse maksimumid leiavad aset järgmiste paindenurkade juures:

$$\begin{aligned}\sin \alpha_1 &= \lambda/d \\ \sin \alpha_2 &= 2\lambda/d \\ \sin \alpha_3 &= 3\lambda/d.\end{aligned}$$

Neist võib arvutada lainepikkuse:

$$\lambda = d \sin \alpha_1 = \frac{d \sin \alpha_2}{2} = \frac{d \sin \alpha_3}{3} = \dots \dots \dots (2).$$

See mõõtmismeetod on väga täppis.

Mida väikesem on võre konstant, seda suuremate nurkade  $\alpha$  juures painduvad võrel kiired.

Tarvitades homogeense valguse asemel valget valgust ja arvestades seejuures, et lainepikkus  $\lambda$  on iga värvi kohta isesuurune, ei ole raske järeldada, et paindunud kiired lahutuvad spektri, kusjuures violetse osa paindenurk on väikesem, sest ka nende  $\lambda$  on väikesem; punase osa paindenurk on suurem. Nii tekib paindumisel võrel diffraktsioonispekter.

Esimese diffraktsioonispektri annavad kiired, mille lainete käiguvahe on  $\lambda$ , teise diff.-spektri annab laine käiguvahe  $2\lambda$  jne. Esimene diffraktsioonispekter on ka paindumatult võrest läbi tulnud kiirtele kõige lähemal.

### **Naatriumileegi lainepikkuse määramine diffraktsioonivõre abil.**

Katse korraldatakse järgmiselt:

Pilu valgustatakse valgusega, mille lainepikkus tuleb määrata. Alul vaadatakse järele, kas pikksilm on fookustatud lõpmatusse ja kas pikksilma kollimaatoritoru vastu pöörates pilu kujutis on

pikksilmas teravalt näha. Samuti vaadatakse järele, kas pilu laius on paras. Seejärele asetatakse võre prismaalusele risti kolli-  
maatorist väljunud kiirtega nii, et võre kriipsud oleksid rööbiti  
piluga. Vaadates nüüd pikksilmaga pilu kujutist, võib näha selles  
ühe heleda keskmise joone, ja kahelpool sellest kogu nõrgema  
heledusega jooni, kusjuures joonte heledus väheneb nende kau-  
gustega keskmisest joonest. Keskmise, hele joon on pilu kujutis,  
mida annavad diffraktsioonivõrest paindumatult läbi tulnud kiired.  
Mõlemad esimesed jooned kahelpool keskmist joont vastavad  
esimesele diffraktsioonispektrile (käiguvahe  $\lambda$ ), mõlemad teised  
jooned — teisele diffraktsioonispektrile (käiguvahe  $2\lambda$ ) jne.  
Mõlemad  $k$ -ndad jooned vastavad ka  $k$ -ndale diffr.-spektrile.

Nüüd määratakse nurk  $\varphi$  võre piludes paindunud ja paindu-  
matute kiirte vahel. Nimetame seda paindenurgaks. Kui võre  
pole täpsalt risti võrele langenud kiirtega, siis pole joonte asu-  
kohad teineteise suhtes, samuti ka keskmise heleda joone suhtes,  
täpsalt sümmeetrilised. Kuna võre täppis seadmine risti kiirtega  
pole kerge (teostatav Gaussi okulaari abil), siis on soovitav mää-  
rata nurk näiteks  $k$ -ndate  $d$ -spektrite joonte vahel. On selge,  
et pool sellest nurgast on  $k$ -nda  $d$ -spektri paindenurk  $\varphi_k$ .

Seega sünnib paindenurga  $\varphi$  määramine järgmiselt:

Pööratakse pikksilm asendisse, kus pikksilma niitristi kohal  
on näha näiteks paremal pool keskmist heledat joont  $k$ -nda  
spektri joon. Pikksilma seal kinnitades loetakse aparadi ring-  
astmikult pikksilma suund. Pöörates pikksilma vasemale poole  
asendisse, milles pikksilma niitristi kohal on vasem  $k$ -nda spektri  
joon, loetakse ka nüüd pikksilma suund aparadi ringastmikult.  
Kahe lugemi vahe annab nurga  $\alpha$ , mille moodustavad mõlemad  
 $k$ -ndate spektrite jooned omavahel.

$$K\text{-nda spektri paindenurk } \varphi_k = \frac{\alpha}{2}.$$

Valgusekiire lainepikkus  $\lambda$  arvutatakse valemist

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi_k}{k},$$

kus  $d$  on diffraktsioonivõre konstant (s. o. ühe pilu ja ühe vahe  
kogulaius).

Mõõdeti näiteks kolmanda  $d$ -spektri paindenurk  $\varphi_3$ , siis  
arvutatakse  $\lambda$  valemist:

$$\lambda = \frac{d \sin S_3}{3}.$$

Soovitav on võtta  $k$  suurem kui 1.

Katsed korratakse mitu korda.

Konstant  $d$  on kas antud või määratakse objektmikromeetriga varustatud mikroskoobiga.

Laine pikkus  $\lambda$  avaldatakse kas millimikronites ( $1 \text{ m}\mu = 10^{-7} \text{ cm}$ ) või Ångström'i ühikuis ( $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$ ).

### 35. Spekteer. Spektroskoop. Spektraalanalüüs.

Prisma läbimisel kaldub valgusekiir oma algsuunast kõrvale ning laguneb seejuures, kui valgus pole ühtlane, värvilisteks kiirteks ehk spektriks. Spektiris võib eraldada järgmisi värve: punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, sinine ja violetne. Need värvid ei ole enam lahutatavad (Newton).

Spekteer, mille annavad kiirgavad kehad, nimetatakse emissioonspektriks.

Kõvade ning vedelate kehade emissioonspektrid on pidevad; seejuures võivad mõned värvid puududa (fluorestsents, fosforestsents).

Teissuguse emissioonspektri annavad gaasid ja aurud. Gaaside ja aurude spekteer koosneb üksikuist joontest, seepärast nim. neid ka joonspektreiks. Näiteks annab hõõguv naatriumi-aur spektri, mis koosneb vaid kahekordsest kollasest joonest.

Kolmanda rühma moodustavad nn. ribaspektrid (Bandenspektrum). Selles spektris on näha heledamad ribad, mis aga sageli tugevama dispersiooni puhul lagunevad suurteks kogudeks võrdse heledusega joonteks. Ribaspektri annavad ka hõõguvad gaasid.

Üldiselt on igal ainel gaasilises olekus isesugune emissioon.

Ka igal liitainel (ühendil) gaasilises olekus on isesugune spekteer, nn. ühendusspekter (Mitscherlich). Arusaadavalt võime seda spektrit vaid siis näha, kui korda läheb seda ainet kiirgamiseni kuumendada, ilma et ta seejuures algosadeks laguneks. Siit järgneb, miks mitmesugused naatriumisoolad Bunseni leegis ühe ja sama spektri annavad: kõrge temperatuuri tõttu lagunevad need algosadeks ning kollane joonspekter on metall naatriumi oma. Näitena olgu nimetatud veel ühendite  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{SrBr}_2$ ,  $\text{SrJ}_2$  spektrid, mis fulguraatoris  $H$  õhkkonnas, samuti ka Bunseni leegis, segatud  $HC$ ,  $HBr$ ,  $HJ$ , kus need gaasidena esi-

nevad, annavad täiesti isesugused spektrid. Harilikus Bunseni leegis annavad aga nimetatud ained ühe ja sama spektri, s. o. metall strontsiumi ja selle oksüüdi oma.

Spektrite uurimisi toimetatakse spektraalaparaadi ehk spektroskoobi abil.

Spektroskoobi ehitus on üldjoontes samasugune kui 81. leheküljel kirjeldatud spektromeetril. Et siin nurkade mõõtmisi tarvis ei tule, siis puudub spektroskoobil tavalisest mõõtering. Selle asemel on Bunsen & Kirchhoff'i spektroskoobil kolmas toru läätsega, mille tulipunkti on paigutatud läbipaistev astmik. Astmikku valgustatakse nõrga valguseallikaga. Torust väljunud kiired peegelduvad prisma tahul ja satuvad nii lõpmatusse fookustatud pikksilma, kus nad annavad astmiku kujutise spektri kohal.

Ka siin peavad kollimaatorist tulnud kiired olema paralleelsed, milleks tuleb seada pilu kollimaatorläätsse tulipunkti. Prismat läbivad kiired kalde miinimumi all. Sealt satuvad nad pikksilma. Seega on riista kordaseadmine samasugune kui spektromeetri puhul öeldud.

Sageli tarvitatakse spektroskoopi *à vision directe*. Selles riistas spektri keskmised kiired — kollased — ei murdugi, kuid äärmised värvid murduvad üks ühele, teine teisele poole. Nii-sugune värvide lahutamine saavutatakse prismade kombinatsiooni abil.

Spektroskoop *à vision directe* tuleb tööle asumisel vähemalt järgmiselt korda seada: spektroskoop juhatakse mõnele päikesest valgustatud asjale (hele taevas) ja nihutatakse toru okulaari, kuni Fraunhofer'i jooned teravalt nähtavale tulevad, kusjuures pilule antakse ka paras laius. Tuleb tähendada, et spekter on seda teravam, mida kitsam pilu, kuid sedavõrd jälle väheneb spektroskoopi sattuv valgusehulk.

Hoides astmikutoru ees näiteks küünlaleeki, elektrilampi või mõnda teist valguseallikat, nihutatakse astmikku torus edasitagasi, kuni ta kujutis on teravalt näha spektri kohal, ent seejuures ei tohi okulaari enam nihutada.

Üldiselt on spektroskoobiastmik meelevaldne. Et astmikult võimalik oleks lugeda lainepikkus, tuleb teda enne pügaldada. Seda toimetatakse järgmiselt: määratakse mõnede tuntud ainete joonte asend astmikul ja leitakse nendele joontele vastavad lainepikkused tabelist. Millimeetrilisel paberil kantakse rõhtteljele astmiku lugemid, püstteljele lainepikkused. Leitud täpid ühen-

datakse pideva joonega. Nii joonistatud kõver on spektroskoobikõver. Soovitav on alata püstteljel jaotisest 400  $m\mu$ , sest lühemad lained ei ole silmale nähtavad.

Spektroskoobi pügaldamiseks kasutatakse aineid, mille spektrid koosnevad üksikuist teravaist joontest, näiteks naatrium (keedusool Bunseni leegis), heelium, vesinik (Geissler'i torus), elavhõbe jne.

### Aine koosseisu määramine spektroskoobi abil.

Et iga aine gaasilises olekus annab isesuguse joonspektri, siis võib viimast kasutada aine koosseisu määramiseks. Seks tuleb leida tema spektrijoonte asendid spektroskoobiastmikul; spektroskoobikõveralt leitakse joontele vastavad lainepikkused. Jääb veel järele tabelist vaadata, millise aine spektrile on omased leitud lainepikkused.

Tavaliselt avaldatakse lainepikkused  $m\mu$  ( $1 m\mu = 10^{-6}$  mm) ehk Ångström'i ühikuis ( $1 \text{ \AA} = 10^{-7}$  mm).

### Valguseallikad.

Keha, mille emissioonspektrit uuritakse, peab olema hõõguvas gaasitaolises olekus. Seda võib saavutada järgmisel viisil.

Bunseni leek. Hõõguvad aurud saadakse tihti sel teel, et uuritav aine hoitakse platinatraadi abil Bunseni leegis, kus ta auruks muutub ja temale omaseid kiiri kiirgab.

Geissleri toru. Uuritava gaasiga täidetud peenikesest torust juhitakse elektrivool läbi, mille tõttu see kiirgama hakkab ja gaasile omaseid kiiri kiirgab.

Fulguraator. Väga kohane on ka fulguraator (Delachanal & Mermet). Katseklaasi põhja läbib torusse paigutatud plaatinastraat. Katseklaas on suletud korgiga, millest läbi pistetud teine samasugune traat. Katseklaasi kallatakse niipalju uuritavat vedelikku, et alumise traadi ülemine ots vedeliku pinnani ulatuks. Indukti abil sesse voolu juhtides tekib torus säde. Sädemele juhitakse spektroskoobipilu.

Teravikud. Hele säde, mis tekib kahe metallteraviku vahel, annab nende metallide aurude spektri, millest ehitatud antud teravikud, samuti ka teravikkude vahel oleva gaasi, õhu

spektri. Säde saavutatakse järgmiselt: Leydeni purk laetakse induktori vooluga, kusjuures väline pind on otse ühendatud induktori —-poolusega ja teraviku ühe poolega. Induktori +-poolus tuleb ühendada Leydeni purgi sisemise pinnaga ja teraviku teise poolega.

### Mõnede tähtsamate ainete emissioonspektrid.

(Lainepikkused avaldatud  $m\mu$ -es.)

Uuritav aine Bunseni leegis.

**Naatriumkloriid.**

Intensiivne kollane joon  $\lambda = 589$ . Tugeva dispersiooni puhul laguneb ta kaheks. Kollane naatriumijoon spektris tekib ka siis, kui on olemas sellest ainest vaid jäljed. Seepärast on see joon ka kõigi teiste spektrite kaaslane.

**Liitiumkloriid.**

Intensiivne punane joon  $\lambda = 671$ .

**Talliumkloriid.**

Väga hele, terav roheline joon  $\lambda = 535$ .

**Kaltsiumkloriid.**

Karakteristlik violetne joon  $\lambda = 423$ . Peale selle ribaspekter rohelistes osas.

**Kaaliumkloriid.**

Hele kahekordne joon punases osas  $\lambda = 766$  ja  $770$ , teine joon äärmises violetses osas  $\lambda = 404$ . Peale selle nõrk ribaspekter.

### Geissleri toru.

Vesinik annab intensiivse punase joone  $H_a$ ,  $\lambda = 656,4$  (päikesespektri  $C$ -joone), ühe rohelis-sinise  $H\beta$ ,  $\lambda = 486,1$  (päikesesp.  $F$ -joone), helesinise  $H\gamma$ ,  $\lambda = 434,0$  (lähedane p.-spektr.  $G$ -joonele) ning vaevalt märgatava violetse joone  $H\delta$ ,  $\lambda = 410,2$  ( $h$  — päikesespektris).

**Helium**

annab järgmised jooned:

helekollane  $\lambda = 587,6$

roheline  $\lambda = 501,6$

sinised  $\lambda = 492,2, 471,3$  ja  $447,2$ .

## Absorptsioonspekter.

Läbib valge kiir (päikese, gaasilambi, elektrilambi valgus) näiteks hõõguva naatriumiauru, siis neelab see osa kiiri ära, mille tagajärjel tekib spektris tume joon, antud juhtumil kollase spektri osas. Samasugust mõju avaldavad ka teised auru ja gaasid ning mitmed vedelad ja tahked kehad. Niiviisi tekib absorptsioon- ehk neeldspekter.

Ka absorptsioonspektri abil võib otsustada aine koosseisu üle, sest nagu emissioonspekter, on seegi igal ainel isesugune. Seepärast on absorptsioonspektril emissioonspektri kõrval suur tähtsus spektraalanalüüsis.

Kirchhoff leidis, et iga gaas neelab samu kiiri, mida ta ise samus tingimuses kiirgab.

### Mõnede absorptsioonspektrite uurimine ja nende joonistamine.

Selleks asetatakse uuritav keha valguseallika (valge valguse allikas, gaasilamp) ja spektroskoobipilu vahele. On uuritav keha tahkes olekus, siis tarvitatakse teda plaadikujulisena, on ta aga vedelas või gaasilises olekus, siis hoitakse teda klaasanumais. Soovitav on vedelaid kehi (samuti ka gaase) hoida kiilutaolises klaasanumas, mis võimaldab kihi paksuse muutmise. Spektroskoobisse vaadates määratakse absorptsioonjoonte asendid spektroskoobiastmikul ning märgitakse paberile. Spektroskoobikõvera abil määratakse nende joonte lainepikkused.

### Mõnede absorptsioonspektrite kirjeldus.

Absorptsioonspektrid võivad olla mitmesugusekujulised:

I tüüp — ühepoolne absorptsioon.

Spektris on absorbeeritud üks äärmine osa. Näide: kloor-  
raualahus, pikriinhape jne.

II tüüp — kahepoolne absorptsioon.

Sellel tüübil on absorbeeritud mõlemad ääred, järel on keskmine osa. Näide: kloorniklilahus jne.

III tüüp — ribaspekter.

Sellel spektril on kogu laiemaid ja kitsamaid ribasid mitte-  
teravate äärtega. Näide: sinine (koobalt) klaas ja teised värvi-  
lised klaasid ning ained.

IV tüüp — joonspekter.

Spektris on näha teravad tumedad absorptsioonjooned. Nimetatud spekter on omane gaasidele ja aurudele.

### Temperatuuri, kihi paksuse j. m. mõju absorptsioonspetritesse.

Mida paksem on absorbeeriv kiht, seda tumedamad ja laiemad on absorptsioonjooned.

Pea samasugust mõju avaldab aine kontsentratsiooni suurenemine.

Temperatuuri tõusmisega muutuvad absorptsioonjooned. Seejuures võib temperatuuri mõju olla füüsikaline, mille tagajärjel neeldumine süveneb, ja keemiline. Viimase tunnuseks on aine ühenduste muutumine.

### Päikesespekter.

Spektroskoobipilu juhitakse mõnele päikesest hästi valgustatud asjale (hele taevas, päikesest valgustatud maja sein jne.). Seejuures tehakse pilu võimalikult kitsaks: Spektri vaatlusel näeme temas suurt hulka tumedaid jooni, mida nende leiutaja järele Fraunhoferi joonteks nimetatakse. Nüüd määratakse nende asendid astmikul ja joonistatakse paberile.

Lainepikkused  $m_{\mu}$ :

<i>A</i> . . . . .	$\lambda = 759,4$	<i>E</i> . . . . .	$\lambda = 527,0$
<i>B</i> . . . . .	$\lambda = 686,7$	<i>F</i> . . . . .	$\lambda = 486,2$
<i>C</i> . . . . .	$\lambda = 656,3$	<i>G</i> . . . . .	$\lambda = 430,8$
<i>D</i> <sub>1</sub> . . . . .	$\lambda = 589,6$	<i>H</i> . . . . .	$\lambda = 396,9$
<i>D</i> <sub>2</sub> . . . . .	$\lambda = 589,0$		

Ka spektroskoobiastmiku pügaldamiseks võib kasutada Fraunhoferi jooni.

### 36. Abbé refraktomeeter.

Eelmärkused: Igale ainele vastab temale omane murdumisnäitaja

$$n = \frac{\sin i}{\sin r},$$

kus *i* tähendab langemis- ja *r* murdumisnurka (lähtekeskonnana on mõeldud õhk, ehk õigem — tühjus). Et näiteks sinised kiired murduvad rohkem kui punased ja seega murdumisnäitaja on

esimestel suurem kui teistel, siis tuleb murdumisnäitaja käsitlemisel ikka silmas pidada, millise spektraalvärvi jaoks ta on antud.

Üksikute värvide suhteline asend — dispersioon — spektris, mis saadud teatud aimest valmistatud prismaga, oleneb igale värvile omase murdumisnäitaja suurusest. Nähtava spektri pikkus on seega võrdeline äärmiste punaste ja siniste kiirte murdumisnäitajate vahega. Et spektri mõlemate otste piirjooned pole teravad, on otstarbekohane ainetele omased dispersioonid anda kindlate spektraaljoonte jaoks.

Aine eridispersiooniks ( $d_e$ ) nimetatakse päikesespektri Fraunhoferi joonte  $H$  (sinine; lainepikkus  $\lambda = 396,9 m\mu$ ) ja  $C$  (punane,  $\lambda = 656,3 m\mu$ ) murdumisnäitajate vahe:  $d_e = n_H - n_C$ .

Osadispersiooni ( $d_o$ ) all mõistetakse kahe (näiteks roheline  $F$  ja kollane  $D$ ) Fraunhoferi joone murdumisnäitajate vahet  $d_o = n_F - n_D$ .

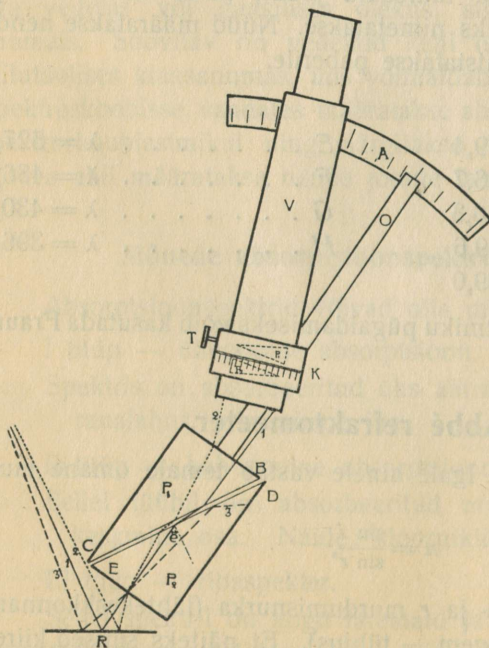
Riista kirjeldus. Abbé refraktomeeter sobib nii vedelikkude murdumisnäitaja kui ka dispersiooni määramiseks.

Üldiselt koosneb Abbé refraktomeeter (33. joonis) suure murdumisnäitajaga raskest klaasist kaksikprismast  $P_1 P_2$ , pikk-

silmast  $V$ , selle objektiivi ette paigutatud kompensatorist  $K$  ja peeglist  $R$  prismade altvalgustamiseks.

Kaksikprisma on lahtivõetav: tema vastastikku kokku käivate hüpotenuustahkude  $BC$  ja  $DE$  vahele paigutatakse piisk uuritavat vedelikku, mis prismade kokkupanekul nende vaheruumi täidab õhukese tasaparalleelse kihina.

Valgustagu prisma alumist osa peeglile  $R$  langev ühtlane naatriumivalgus. Olenedes nurgast, mille



33. joonis.

all valgusekiir langeb prismade vahel asetseva vedeliku kihile, võib ta viimase läbida või seal täieliselt peegelduda, sattudes optiliselt tihedamast (klaasprisma) optiliselt hõredamasse keskkonda (vedelikukiht), sest käesoleva riistaga on võimalik uurida vaid neid aineid, mille murdumisnäitaja  $n$  on väikesem prisma murdumisnäitajast  $N$ . Olgu  $e$  suurim langemisnurk (piirnurk), mille all kiirte kimp veel astub vedelikku: ta riivab (kiir 1) tahku  $CB$ , läbib ülemise prisma  $P_1$  ning jõuab pikksilma  $V$ . Piirnurga

$$\sin e = \frac{n}{N} \dots \dots \dots (1).$$

Samuti läbivad vedelikukihi kõik kiired, mille langemisnurk  $i < e$  (kiir 2), kuna kõik suuremate nurkade ( $i > e$ ) all langevad kiired täieliselt peegelduvad (kiir 3). Seetõttu on pikksilma vaatevälja üks osa heledalt valgustatud, teine aga tume. Mõlemaid pooli eraldab terav piirjoon, sest üleminek täieliselt sisepeegelduselt kihti läbivatele kiirtele toimub hüppena.

Kui tarvitada ühtlase valguse asemel „valget“ valgust (hõõglamp, taevas, hästivalgustatud sein jne.), siis kaob terav piirjoon ja selle asemele ilmub mitmevärviline vööt, sest igale spektraalvärvile on omane isesugune murdumisnäitaja ja seega ka isesugune täielise sisepeegelduse piirnurk  $e$  (1). Et ka valge valguse puhul saavutada teravat piirjoont, tuleb hajunud värvid kokku võtta kohaselt valitud murdjanurgaga prismaga. Seks on pikksilma objektiivi ette paigutatud kaks naatriumi  $D$  joone jaoks *à vision directe* prisma  $p_1$  ja  $p_2$ , — kompensator —, mida võib kruvi  $T$  abil vastupidistes suundades pöörata pikksilma optilise telje kui pöördetelje ümber. Sel teel omab prismapaari valguse lahutusvõime kõik väärtused alates nullist (mõlema prisma murdjad nurgad vastupidises suunas: prismapaar moodustab tasaparalleelse kihi — olukord 33. joonisel) kuni kahekordse üksiku prisma lahutusvõimeni (kumbki prisma pööratud nii, et murdjad servad on ühesuunalised).

Seega võib piirjoone värve kokku võtta, kui kompensatoris valida sama suur, kuid vastupidine dispersioon: piirjoon muutub siis teravaks ja värvituks.

Et kaksikprisma  $P_1 P_2$  valgust ei lahuta värvesse — ta esineb tasaparalleelse klaasi kihina kiire teel —, on värvilised nähtused piirjoonel tingitud ainult prismade vahele suletud vedelikust: kompensatsioonprismade pöörangu põhjal võib otsus-

tada vedeliku dispersiooni suuruse üle. Kompensatsioonprisma-dega ühes pöörduv astmikuga varustatud trummel, kust loetakse pöörangu suurus  $Z$ .

Prisma paariga  $P_1 P_2$  on sidendatud osuti  $O$ , millega kaasa pöörduvad prismad ning muutub ka neile peegli  $R$  langevate kiirte suund: sel teel on võimalik tuua piirjoon pikksilma vaatevälja ja teda seada niitristi kohale. Riist on nii koostatud, et kui piirjoon ühtub pikksilma niitristiga, siis osutile  $O$  tõmmatud kriips näitab pikksilma külge kinnitatud ringastmikul  $A$  arvule, mis vastab vedeliku murdumisnäitajale naatriumi  $D$  joone jaoks ( $n_D$ ).

Katse käik: Peegel  $R$  seatakse nii, et mõnest valguseallikast peegelduks valgus pikksilma. Selle järele pööratakse riista ülemist osa kuni prisma  $P_1$  tahk  $CB$  jõuab horisontaalsesse asendisse. Avades kinnituskruvi ning sellest kinni hoides, tõstetakse üles prisma  $P_2$ . Nüüd paigutatakse prisma  $P_1$  tahule  $BC$  puupulgaga (prisma mitte kriimustada!!) mõni tilk uuritavat vedelikku ja suletakse prismad uuesti. Siis tõstetakse riist endisse asendisse ja pööratakse ettevaatlikult osutit  $O$ , kuni pikksilma vaatevälja keskele jõuab heledat osa tumedast eraldav värviline vööt. Nüüd pööratakse trumlit  $\tau$ , kuni kaovad värvid ja piirjoon muutub teravaks, ja osutit  $O$ , kuni piirjoon ühtub pikksilma niitristiga. Selle järele loetakse trumli seis ( $Z'$ ) ja osuti  $O$  asend astmikult  $A$  ( $n_D$ ). Pöörates trumlit edasi endises suunas, kuni piirjoon muutub teist korda värvituks, loetakse uus trumli asend ( $Z''$ ). Mõlemaist lugemeist trumlil ( $Z'$  ja  $Z''$ ) võetakse aritmeetiline keskmine. Täpsuse tõstmiseks korratakse vaatlusi. Peale katset puhastatakse prismad uuritud vedelikust ja paigutatakse riist kasti oma kohale.

Arvutus: Murdumisnäitaja  $n_D$  oli otse loetud astmikult  $A$ . Dispersiooni  $d_0 = n_F - n_D$  leidmiseks mõõdetud  $n_D$  ja  $Z$  põhjal on riista juurde koostatud eritabel.

### 37. Valguse polarisatsioon.

Valguse interferentsist järeneb, et valgus on oma loomu poolest lainetus (eetrlainetus). Kuid interferentsinähtuste põhjal ei ole võimalik otsustada, kas valgus on longitudinaalne lainetus, nagu seda on hää, või transversaalne. Esimesel lainetusel sünnib, nagu teada, osakeste võnkumine laine levimise suunas, teisel — risti levimise suunaga.

Ent valguse polarisatsiooni nähtused põhjustavad oletuse, et valgus on ristlainetus.

Paralleelsete kiirte kimp langeb viltu klaasplaadile, mille tagumine pind on pigitatud. Klaasi tunginud kiired neelduvad pigitatud pinnal, järele jääb vaid see osa kiirgust, mis klaasi esipinnalt tagasi peegeldus. Langevad nüüd nii peegeldatud kiired teisele samuti tagapinnalt pigitatud peeglile, siis peegelduvad need teist korda teiselt peeglit. Pööratakse aga teist peeglit üks kord peegeldunud kiirte kui telje ümber, siis muutub teist korda peegeldunud valguse tugevus. Peegeldunud valguse tugevus on kõige suurem juhtumil, kui mõlemate peeglite peegelduspinnad on paralleelsed, on aga kõige nõrgem, kui peegelduspinnad on risti. Üldse muutub peegeldunud kiirguse tugevus 4 korda, kui teine peegel pöörduv  $360^\circ$  võrra. Kui lasta valgusekiirtel langeda neile peeglitele mitmesuguse nurgi, siis võib tähele panna klaaspeegli puhul, et teiskordne peegeldumine annab suurima peegeldunud valguse tugevuse muutuse siis, kui langemisnurgad on võrdsed  $55^\circ$ .

Sellist muudatust valgusekiires nimetatakse polarisatsiooniks, muutunud kiirt polariseeritud kiireks.

Kui oletada, et valgus on pikilainetus, siis ei ole võimalik anda kirjeldatud nähtusele mingisugust seletust. Küll aga on see võimalik siis, kui valgus on ristlainetus.

Oletatakse, et loomulikus valgusekiires sünnib eetriosakeste võnkumine igas suunas, mis on risti valgusekiirega; polariseeritud valguse kiires aga sünnib võnkumine vaid ühes suunas.

Langeb valgusekiirte kimp klaasplaadile  $55^\circ$  nurgi, siis peegelduvad vaid need võnkumised, millel on kindel suund. Fresnel'i järgi peegelduvad sellel juhtumil võnkumised, mis sünnivad langemise tasapinnaga risti tõmmatud tasapinnas. Langemistasapind on siin ühtlasi ka polarisatsioonipinnaks. Lihtsuse pärast räägitakse tihti, et võnkumine sünnib polarisatsioonipinnas.

Olgu veel tähendatud, et Neumann'i järgi sünnivad võnkumised just rööbiti polarisatsioonipinnaga. Niihästi Fresneli kui ka Neumanni teooriad viivad ühele ja samale resultaadile, ning ükski nähtus ei eelista ühte teooriat rohkem kui teist.

Klaasplaati tunginud kiirte järelekatsumisel leiti, et ka need suurelt osalt on polariseeritud, kusjuures viimase valguse polarisatsioonipind on risti peegeldunud valguse polarisatsioonitasapinnaga.

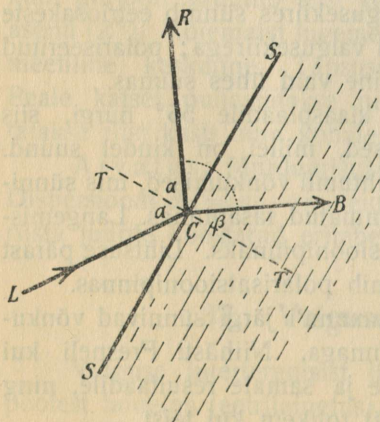
Et klaasis murdunud valguse polarisatsiooni täielikumaks teha, selleks tarvitatakse mitu üksteisele taha asetatud klaasplaati. Niisuguse klaasplaatide kogu läbinud valgusekiir on peaaegu täielikult polariseeritud. Muidugi peab ka sellel puhul langemisnurk olema võrdne  $55^\circ$ .

Riista, mille abil valgusekiirele antakse polarisatsioon, kutsutakse polarisaatoriks (esimene pigitatud peegel). Samasugune riist võib olla ka analüsaatoriks, s. o. riistaks, mis näitab, kas uuritav valgus on polariseeritud (teine pigitatud peegel). Kui polarisaatori ja analüsaatori polarisatsioonipinnad on rööbiti, siis öeldakse: polarisaator ja analüsaator on rööbiti. On nad aga risti üksteisega, siis öeldakse: polarisaator ja analüsaator on risti.

Katsed näitavad, et mitte iga langemisnurka juures ei teki peegeldamisel täielik polarisatsioon. Et polarisatsioon oleks täielik, peab langemisnurk omama teatud väärtuse  $\varphi$ , mis, nagu katsed näitavad, on peegli aine. Viimane asjaolu lubab oletada seose olemasolu polarisatsiooninurga ja aine murdumisnäitaja vahel. See seos on leiutatud Šoti füüsiku Brewster'i poolt aastal 1813.

### Brewster'i seadus.

Peegeldumisel on polarisatsioon siis täielik, kui kiired langevad peeglile nii, et peegeldunud ja murdunud kiired



34. joonis.

moodustavad täisnurka. Langeb kiir  $L$  (34. joonis) polarisatsiooninurga  $\alpha$  lihvitud klaasile, mille murdumisnäitaja olgu  $n$ , siis moodustavad Brewster'i seaduse järele peegeldunud kiir  $CR$  ja murdunud kiir  $CB$  täisnurka. Olgu murdumisnurk sel puhul  $\beta$ . Snellius'e seadusest teame, et  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ , ehk  $\sin \alpha = n \sin \beta$ . Joonisest on näha, et  $\alpha + \beta = 90^\circ$ . Mõlemad valemid annavad seose

$$\sin \alpha = n \sin (90^\circ - \alpha) = n \cos \alpha,$$

millest järgneb, et

$$\operatorname{tga} = n.$$



risti uute alustahkudega, ja liimitakse uuesti kokku kaanada palsamiga. Ühe niiviisi valmistatud Nicoli prisma läbilõik on kujutatud 35. joonisel, kus  $AC$  näitab kokkuliimitud pinda. Langeb sellisele kunstlikule kristallile valgusekiir  $L$ , siis lahutub kiir murdumisel tahul  $AB$  korrapäraseks ja korravastaseks kiireks, kusjuures korrapärase kiir rohkem murdub. Kaanada palsami murdumisnäitaja on väikesem islandi pao omast, seepärast on võimalik kokkuliimitud kihil valgusekiirt täielikul sisemisel peegeldumisel kõrvale juhtida, kui valida kiire langemisnurk küllalt suur. Nicoli prisma on nurgad nii valitud, et kokkuliimitud kihil korrapärase kiir kõrvaldatakse täieliku sisemise peegelduse teel. Prismat läbib vaid korravastane kiir. Nii saadakse prisma, mis annab valgusekiirele täieliku polarisatsiooni.

### Polarisatsioonipinna pöörang.

Kui polariseeritud valguse kiir läbib kvartsi, siis pöördub seejuures valgusekiire polarisatsioonipind. Peale kvartsi avaldavad samu omadusi mitmed orgaanilised ained, näiteks suhkrulahus, tärpentiinõli ja teised. Seejuures on polarisatsioonipinna pöörangu suurus proportsionaalne pöörava kihi paksusega ja oleneb tarvitatava valgusekiire lainepikkusest. Üldiselt on see seda suurem, mida lühem on valguselaine pikkus. Seepärast tuleb mõõtmiste juures alati tähendada, missuguste kiirte kohta antud pöörang on maksev. Harilikult tarvitatakse valguseallikana naatriumileeki, mis annab ühtlase valguse — kollased  $D$ -joone kiired. Samuti suureneb pöörang lahuses selle kontsentratsiooniga (eripöörang: vaata allpool).

Kehad, milles valgusekiire polarisatsioonipind pöördub, nimetatakse optiliselt aktiivseteks.

Tuleb vahet teha kahe isesuunalise pöörangu vahel: osa kehi pöörab polarisatsioonipinna paremale poole, ( $\vec{\alpha}$ ), mida nimetatakse  $+$ -pööranguks, teine osa kehi pöörab selle pahe- male poole ( $\overleftarrow{\alpha}$ ), see on  $-$ -pöörang.

Tahkete kehade kohta antakse polarisatsioonipinna pöörangu suurus tavaliselt nurgana, mille võrra pöördub neis polarisatsioonipind, kui läbitud kihi paksus on 1 mm.

Vedelikkude kohta antakse nn. eripöörang.

Polarisatsioonipinna eripööranguks vedelikus nimetatakse nurka, mille võrra pöörduv polarisatsioonipind, kui polariseeritud kiir läbib 20° C temperatuuri juures vedeliku, mis sisaldab 1 cm<sup>3</sup> ruumalas 1 g optiliselt aktiivset ainet ja mille kihi paksus on 1 dm.

Seega tuleb vedeliku eripöörangu leidmiseks jagada nurk, mille võrra pöörduv polarisatsioonipind 1 dm paksuses vedelikukihis, vedeliku tihedusega (erikaaluga).

Olgu mingi aktiivse vedeliku mõõdetud pöördenurk  $\alpha$  (20° C), kihi paksus (vedelikku sisaldava toru pikkus)  $l$  dm ja vedeliku erikaal  $e$ . Siis leitakse selle aine polarisatsioonipinna eripöörang  $[\alpha]_D^{20*}$  valemist:

$$[\alpha]_D^{20} = \frac{\alpha}{le} \dots \dots \dots (1).$$

Vedeliku erikaal  $e$  mõõdetakse Mohri kaaludega või püknoomeetri abil.

Samuti defineeritakse ka lahuste eripöörang. Lahuste eripöörangu määramisel tuleb arvestada vees lahustatud aktiivse aine kontsentratsiooni  $c$ . Kui viimase all mõista selle aine grammide arvu 100 cm<sup>3</sup> lahuses, siis eripöörang

$$[\alpha]_D^{20} = \frac{100 \alpha}{lc} \dots \dots \dots (2).$$

Ehk kui tähistada  $p$ -ga lahustunud aine grammide hulk 100 g lahuses ja  $e$ -ga lahuse erikaal (20°), siis  $c = pe$ .

Seega

$$[\alpha]_D^{20} = \frac{100 \alpha}{lpe} \dots \dots \dots (3).$$

Vastupidine ülesanne. Kui on antud lahuse eripöörang  $[\alpha]_D^{20}$ , siis, määrates polarisatsioonipinna pöördenurga lahuse kohta, võib arvutada sellest lahuse kontsentratsiooni valemi (2) järel:

$$c = \frac{100 \alpha}{[\alpha]_D^{20} l} \dots \dots \dots (4).$$

Viimast meetodit kasutab tehnika suhkrulahuste kontsentratsiooni määramistel.

Et selgusele jõuda, kas on tegemist pahemale või paremale poole pöörava ainega, mõõdetakse pöördenurk toruga,

\*) Indeks D tähendab, et pöörang on võetud naatriumi kollase D-joone jaoks.

mille pikkus on  $l$  dm, ja siis teise toruga, mille pikkus on  $nl$  dm (kus  $n$  tähendab torude pikkusesuhet). Kui pöörangu suund oli alguses õieti määratud, siis teise toru puhul loetud nurk

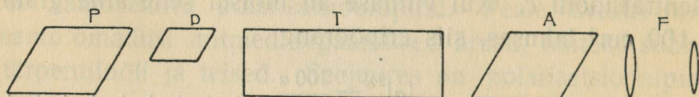
$$\alpha' = n\alpha.$$

Harjutus. Määrata suhkrulahuse eripöörang Lippich & Laurent'i polarimeetri abil (vt. järgmine §).

### 38. Lippich & Laurent'i poolvarju-polarimeeter.

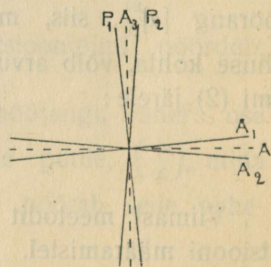
Polarisatsioonipinna pöörangu määramine toimub polarisatsiooniaparaadi või polarimeetri abil. Lippich & Laurent'i polarimeetri ehitus on järgmine:

Polarisaatorina ja analüsaatorina ( $P$  ja  $A$ , 36. joonis) kasutatakse Nicol'i prismasid. Analüsaatori pöörang on määratav ringastmikult nooniuuse abil. Polarisaatori taga asetseb väikesem



36. joonis.

nikol  $p$ , mille alumine pind poolitab pikksilma  $F$  vaatevälja. Nikolid  $P$  ja  $p$  on nii seatud, et nende polarisatsioonipinnad ( $P_1$  ja  $P_2$ , 37. joonis) moodustaksid väikese nurga. On analüsaatori polarisatsioonipind risti kas  $P_1$ :ga või  $P_2$ :ga (asendites  $A_1$  või  $A_2$ ), siis on vastavalt üks pool vaatevälja hele, teine tume. Asendite  $A_1$  ja  $A_2$  vahel peab leiduma analüsaatori asend  $A$ , kus mõlemad vaatevälja pooled on ühetugevuselt valgustatud. See on riista nullseis.



37. joonis.

Et polarisatsioonipinna pöörang oleneb valguse lainepikkusest, tarvatakse töö juures ühevärvilist, näiteks kollast naatriumivalgust. Seks asetatakse polarisatsiooniaparaadi ette ca 10 cm kaugusele eriline Bunseni põleti, mille leegis hoitakse soolveega ( $NaCl$ ) immutatud asbesti tükikest.

Kui on määratud riista nullseis, pannakse uuritav keha (toru vedelikuga) analüsaatori ette ja seatakse viimane nii, et vaatevälja mõlemad pooled oleksid ühetugevuselt valgustatud nagu enne. Selle ja nullseisu vahe annabki pöördnurga. Üldiselt muudab seejuures polarisaatori ja analüsaatori vahele asetatud keha pikksilmas näha oleva kujutise kauguse, mille tõttu vaatevälja piirid segaseks muutuvad. Et vaatevälja piire uuesti teravaks teha, tuleb pikksilma okulaari kaugust vastavalt muuta, s. o. peab pikksilma fookustama. Täpsama resultaadi saamiseks korratakse katset mitu korda. Vaatlusi soovitatakse toimetada järgmiselt: pööratakse analüsaatorit näiteks kellanäitaja liikumise suunas, kuni mõlemad vaatevälja pooled on ühetugevuselt valgustatud, ja loetakse analüsaatori seis. Selle järele pööratakse analüsaatorit vastassuunas, kuni saavutatakse sama efekt, ja loetakse uuesti selle seis. Keskmise mõlemast lugemist annab otsitava nullseisu. Kuid võib ka nii toimetada, et esiti seatakse analüsaator seis  $A_1$  (kus üks vaatevälja pool kustub) ja siis seis  $A_2$  (esimene pool hele, teine kustub);  $\frac{A_1 + A_2}{2}$  annab analüsaatori seis  $A$ , kus vaateväli on ühtlaselt valgustatud. Viimane meetod on vähem täppis.

Sama olukorda võib teostada ka seisus  $A_3$  ( $A_3$  on ligikaudselt paralleelne  $P_1$  ja  $P_2$ ), kus aga valgustuse vahed on heleduse tõttu sedavõrd väikesed, et saavad märgatavaks alles analüsaatori pööramisel suures vahemikus, mispärast see seis mõõtmiseks pole kõlvuline. Viimast analüsaatori seis  $A$  tuntakse sellest, et pikksilma vaateväli on siis palju tugevamini valgustatud kui esimesel korral, s. o. seisus  $A$ .

Enne katset tuleb tutvuda nooniusega. Selle lugemist võimaldab luup.

### 39. Faraday efekt.

Kui polariseeritud valguse kiir läbib läbipaistva keha, mis asetseb tugevas magnetiväljas, ning seejuures valgusekiire suund on paralleelne magnetitungjoontega, siis pöörduv polarisatsioonipind (longitudinaalne magneto-optiline efekt). Pöörang võib sündida ühele või teisele poole, olenedes sellest, milline on magnetivälja suund. See leiutus kuulub M. Faraday'le, kes tegi selle aastal 1845.

Faraday seadus. Nurk  $\alpha_t$  (temperatuuri  $t$  juures), mille võrra polarisatsioonipind pöördub, kui valgusekiir läbib keha paralleelselt magnetitungjoontega, on võrdeline magnetivälja tugevusega  $H$  ja läbitud kihi paksusega

$$\alpha = \omega l H \dots \dots \dots (1),$$

kus  $\omega = [\text{cm}^{-1} \text{g}^{-1} \text{sec}]$  on pöörang, mis tekib 1 cm paksuses kihis, kui magnetivälja tugevus on 1 gauss. Seda konstanti tuntakse füüsikas Verdet' konstandi nime all. On saanud harilikuks kombeks avaldada Verdet' konstant minuteis.  $\omega$  on positiivne, kui pöörang sünnib nagu vees ja suuremas osas kehis: vaadates magnetitungjoonte suunas, pöördub polarisatsioonipind neis paremale poole (kellaosuti liikumise suund) — positiivne pöörang. Pöörangu pahemale poole annavad merivaik, titaankloriid ja teised (negatiivne pöörang). Erandiks on ferromagnetilised kehad, mille kohta ei ole maksev Faraday seadus.

Järgnevas tabelis on antud mõnede kehade Verdet konstandid (minuteis) ja temperatuur, mille puhul on konstant maksev. Valgusekiire lainepikkus = 589  $m\mu$ . (naatriumi  $D$ -joon).

K e h a	Tempe- ratuur	Verdet konstant, korrutatud 100-ga ja avaldatud minuteis
Vesi . . . . .	0	1,311
Väävelsüsinik . . . . .	0	4,341
Piiritus . . . . .	20	1,12
Bensool . . . . .	16	2,70
Titaankloriid . . . . .	16	—1,521
Kvarts $\perp$ teljega . . . . .	20	1,664
Kivisool . . . . .	16	3,28
Jeena kroonklaas . . . . .	18	1,61
Flintklaas . . . . .	18	8,88
$Fe_2Cl_6$ (60,5%) . . . . .	16	—20,41

Pöörangu suuruse ja pöörangul tekkinud dispersiooni arvutased teoreetiliselt Drude ja Voigt, lähtudes seejuures elektroni-teooria põhiseadusest.

Nende järele on polarisatsioonipinna pöörangu põhjuseks järgmine nähtus:

Iga läbipaistev keha muutub magnetiväljas optiliselt aktiivseks, s. o. annab valgusekiirele ringpolarisatsiooni (Zirkularpolarisation). Lineaarselt polariseeritud valgusekiir, minnes magnetiväljas olevasse läbipaistvasse kehasse, lahutub kaheks vastasuunaliselt ringpolariseeritud kiireks. Mõlemad levivad isekiirusega selles kehas. Kehast väljudes tekib nende kiirte kokkuvõtmisel uuesti lineaarselt polariseeritud kiir, kuid kiiruste vahe tõttu ei ole polarisatsioonipind sama, mis oli kiirel varem. Et lineaarselt polariseeritud kiir lahutub tõesti kaheks ringpolariseeritud kiireks, näitas B. Brace katse teel. Ühtlasi leidis ta ka, et mõlema kiire kiirus oli isesuurune. Hiljem õnnestus füüsik Mills'il koguni näidata, et kiiremini levib see ringikujuliselt polariseeritud kiir, mille pöörlemise suund on samane Ampère'i molekulaarvoolu pöörlemise suunaga (Mills, Phys. Review, veebr. 1904).

### **Verdet konstandi määramine.**

Tugeva elektromagneti pooluste vahele asetatakse läbipaistev keha, mida läbides valgusekiire polarisatsioonipind pöörduv. Selleks on klaasplaat, mis asetatakse pooluste vahel asetsevale puualusele. Magnetipoolused on läbi puuritud, mis võimaldab juhtida valgusekiiri paralleelselt magnetitungjoontega läbi uuritava keha. Mõlema pooluse külge avause kohale on kinnitatud nikoliprisma. Üks neist moodustab polarisaatori, teine analüsaatori. Analüsaator on varustatud ringastmikuga. Valguseallikaks on naatriumileek, mis annab homogeense valguse. Katse alul keeratakse polarisaator ja analüsaator risti teineteisele, mis näha sellest, et valgus neist läbi ei pääse, ning loetakse astmikult analüsaatori seis. Nüüd juhitakse vool elektromagnetisse ja pööratakse analüsaatorit, kuni vaateväli on jälle valgustamata. Uuesti loetakse analüsaatori seis. Kahe analüsaatori seisu vahe on võrdne polarisatsioonipinna pööranguga uuritavas aines. Seda katset tuleb mitu (vähemalt 10) korda korrata ning saadud andmeid arvutada keskmine.

### **Magnetivälja tugevuse määramine.**

Mõõtes polarisatsioonipinna pöörangut keha kohta, mille Verdet konstant on antud, võib arvutada sellest ka magnetivälja tugevuse.

## VII.

# Magnetism.

### 40. Maa magnetiväli.

Eelmärkused.

Ühtlaselt magneeditud magneti pooluste tugevused on võrdsed ja vastusuunalised:  $+m$  (põhjapoolus) ja  $-m$  (lõunapoolus). Mitte väga pika varvakujulise magneti pooluste kaugus  $a$  on ligikaudu  $\frac{5}{6}$  magneti pikkust  $l$ .

Magnetipooluse ühikuks on magnetipoolus, mis tühjuses mõjub sama tugeva magneti poolusesse 1 cm kaugusel 1-düünilise tugevusega.

Korrutist  $ma$ , kus  $m$  on pooluste tugevus ja  $a$  pooluste kaugus, nimetatakse magneti momendiks.

Magnetivälja iseloomustab välja tugevus ja suund.

Magnetivälja tugevus avaldatakse gaussides:

magnetivälja tugevus on 1 gauss, kui ta pooluse ühikusse mõjub 1-düünilise tugevusega.

Maa magnetivälja suunda näitab vabalt liikuv magnetnõel.

Selline magnetnõela suund moodustab horisontaaltasapinnaga nurga  $i$ , mida nimetatakse inklinatsiooniks. Teiseks asetseb tähendatud nõel kindlas vertikaalses tasapinnas, mida kutsutakse magnetiliseks meridiaaniks. Geograafilise ja magnetilise meridiaani vahelist nurka  $\Delta$  kutsutakse deklinatsiooniks.

Eestis kaldub magnetnõela põhjapoolus lääne poole (positiivne deklinatsioon).

Inklinatsioon ja deklinatsioon määravad üheselt Maa magnetivälja suuna. Iga magnetivälja iseloomustab selle intensiivsus — magnetivälja tugevus  $H$ , nii kui siin. Sageli ei anta Maa

magnetivälja tugevus otseselt, vaid selle vertikaalne ja horisontaalne komponent  $H_v$  ja  $H_h$ , kusjuures

$$\begin{aligned} H_h &= H \cos i \quad \text{ja} \\ H_v &= H \sin i \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (1).$$

Neist on  $i$  ja  $H_h$  kergesti mõõdetavad, kuna  $H_v$  arvutatakse valemist (1), mis annab

$$\operatorname{tg} i = H_v / H_h.$$

Kolm suurust: inklinatsioon  $i$ , deklinatsioon  $\Delta$  ja välja tugevus  $H$ , mis määravad üheselt antud koha Maa magnetivälja, nimetatakse Maa magnetilisteks konstantideks.

#### 41. Maa magnetivälja tungjoonte kaldenurga (inklinatsiooni) määramine Maa induktori abil.

Maa induktor koosneb isoleeritud traatmähisest, mis keritud puust põiale. Viimase poolitaja otsad toetuvad keppidele. Väнда abil võib mähist selle poolitaja kui telje ümber  $180^\circ$  võrra pöörata. Terve seadeldis asetseb lauakesel, mida omakorda võib seada kas vertikaalselt või horisontaalselt, nii et mähise telge võib soovi järele seada kas horisontaalsesse või vertikaalsesse suunda.

Kui pöörata mähist, mille pind on risti magnetilise meridiaaniga, meridiaani tasapinnas asetseva vertikaalse telje ümber, siis lõikab mähis Maa magnetivälja horisontaalset komponenti ning selle tagajärjeks on mähist läbiv induksioonivool, kusjuures vooluhulk oleneb  $180^\circ$ -kraadilise pöörangu puhul mähise poolt lõigatud tungjoonte arvust ja vooluahela takistusest, mitte aga ajast, mille vältel toimus pöörang, kui viimane sündis küllalt ruttu, võrreldes galvanomeetri enda võnke kestusega. Eriti viimasele tingimusele vastab nn. ballistiline galvanomeeter, mille võnke kestus on õige pikk ning pöörlev süsteem küllalt massiivne, nii et galvanomeeter üksiku voolutõuke kestel ei jõua anda küllalt märgatavat hälvet.

Kui tungjooned on risti mähise pinnaga, siis läheb neid viimasest läbi maksimaalne arv. Pöörame aga mähist, kuni tema pind on rööbiti tungjoontega, siis tekib seal pinda läbivate tungjoonte arvu kahanemise tõttu induksioonivool; edasipööramisel ei muutu voolu suund, ehk tungjoonte arv nüüd küll kasvab, sest mähis on vahetanud oma külje tungjoonte suhtes.

On mähise pöördetelg magnetilise meridiaani pinnas ja seejuures horisontaalne, siis mõjub mähise pööramisel  $180^\circ$  võrra

ainult Maa magnetivälja vertikaalne komponent  $H_v$ , telje püstseisus aga horisontaalne komponent  $H_h$ .

Vaatluste täpsus tõuseb tunduvalt n. n. „multiplikatsioonimeetodi“ tarvitamisel, mil üksikule pöördele vastavat galvanomeetri hälvet järgnevate pöörete abil suurendatakse; selleks oodatakse, kuni vaikumistäpp astmiku kujutisel pikksilma niitristist uuesti möödub; samal silmapilgul pööratakse mähis endisesse seisu, mille tõttu galv. hälve teisele poole suureneb; seda korratakse, kuni on saavutatud galv. maksimaalne hälve mõlemale poole. Nüüd loetakse mõned võngete ulatused (maksimaalsed hälbed) ja võetakse neist aritmeetiline keskmine.

Maa magnetivälja tungjoonte kaldenurga määramine toimub seega järgmiselt:

Mähise pöördetelg seatakse magnetnõela abil horisontaalselt magnetilise meridiaani tasapinnas, aluslaud vesiloe abil horisontaalselt.

Lugemi pikksilm juhatakse galv. peeglile ja loetakse vaikumistäpp.

Nüüd alatakse vända abil mähise pööramist  $180^\circ$  võrra ülalkirjeldatud viisil ja loetakse galv. hälbed  $s_v^1; s_v^2 \dots s_v^n$ , kus  $n$  tähendab loetud hälvete arvu; keskmine hälve

$$s_v = \frac{s_v^1 + s_v^2 + \dots + s_v^n}{n}$$

on siis võrdeline magnetivälja vertikaalse komponendiga  $H_v$ . Seejärel seatakse telg püstloodi ja toimitakse nagu varem. Nii leitakse hälve

$$s_h = \frac{s_h^1 + s_h^2 + \dots + s_h^n}{n},$$

mis on võrdeline horisontaalse komponendiga  $H_h$ .

Siit

$$\tan i = \frac{H_v}{H_h} = \frac{S_v}{S_h},$$

kus  $i$  on tähistatud Maa magnetivälja tungjoonte kaldenurk (inklinatsioon).

## 42. Maa magnetivälja horisontaalkomponendi $H$ määramine Gauss'i magnetomeetriga.

Riputame magneti niidi otsa või asetame teravikule nii, et ta vabalt võib liikuda horisontaaltasapinnas, siis võtab magnet

pärast võnkumisi ühele ja teisele poole põhja-lõuna (N-S) suuna. Sellest suunast nurga  $\varphi$  võrra kõrvale pööratud magnetisse mõjub Maa magnetivälja horisontaalne komponent  $H_h$ , sundides magnetit tagasi minema. Ühte magnetipoolusesse  $m$  mõjub seejuures tung  $H_h m$ , mis annab pöördemomendi  $H_h m \frac{l}{2} \sin \varphi$  (pöördemoment = tung  $\times$  tungi perpendikulaarne kaugus pöörlemisteljest. Antud juhtumil on see kaugus  $\frac{l}{2} \sin \varphi$ ).

Seega on kogu pöördemoment võrdne  $Hml \sin \varphi$ .

Olgu  $l$  magnetipooluste kaugus.

Ülal nägime, et  $ml = M$ , seega tähendatud pöördemoment on  $MH_h \sin \varphi$ .

Kui magnet on pööratud risti magnetiväljaga ( $\varphi = 90^\circ$ ), siis omab pöördemoment maksimaalse väärtuse  $MH_h$ , sest  $\sin 90^\circ = 1$ . Võnkuva keha pöördemomendi maksimaalset väärtust nimetatakse **direktsioonitungiks**.

Pendli võnkumise teooriast teame, et pendli võnke kestuse  $T$  määrab seos

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}},$$

kus  $K$  on pendli inertsimoment pendli kinnitustäpi suhtes ja  $D$  pendlisse mõjuva raskustungi maksimaalne pöördemoment ehk **direktsioonitung**.

Analoogiliselt pendli valemiga võib kirjutada võnkuva magneti puhul

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{MH_h}},$$

kus  $K$  on magneti inertsimoment pöörlemistelje suhtes,  $MH_h$  **direktsioonitung** ja  $T$  võnke kestus, s. o. ajavahemik, mida tarvitab magnet liikumiseks ühest pöördetäpist teise ja tagasi (täisperiood).

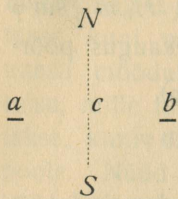
Siit leitakse

$$MH_h = \frac{4\pi^2 K}{T^2}.$$

Peale magnetilise **direktsioonitungi**  $D = MH_h$  sõltub magneti võnke kestus ka niidi torsioonist tingitud **direktsioonitungist**  $d$ . Olgu  $\frac{d}{D} = \theta$  nn. niidi torsioonisuhe. Ei ole raske näha, et magneti võnke kestus niidi torsiooni tõttu väheneb  $\sqrt{1 + \theta}$  korda. Arvestades ka niidi torsiooni, leiame  $MH_h$  määramiseks

$$MH_h = \frac{4\pi^2 K}{T^2 (1 + \theta)} \dots \dots \dots (I).$$

Kui sama magnet, mille võnke kestus määrati, lähendada teisele abimagnetile (magnetnõelale), siis annab viimane hälbe, millest on võimalik leida suhe  $\frac{M}{H_h}$ .



39. joonis.

Olgu magnetnõela pooluse tugevus  $\mu$ . Sellesse poolusesse mõjub Maa magnetivälja horisontaalne komponent  $H_h$  tungiga  $H_h\mu$ . Olgu 39. joonisel  $c$  magnetnõela kesktäpp,  $N-S$  magnetilise meridiaani suund. Magnet, mille võnke kestus määrati, asetatakse magnetnõelast lääne või ida poole kas asendisse  $a$  või  $b$ , nii et magneti suund oleks risti magnetilise meridiaaniga (Gaussi I peasend). Magnet kaugus magnetnõelast  $r$ , mis loetakse

magnetnõela kesktäpist magneti kesktäpini, tuleb valida vähemalt kolm korda suurem kui magneti pikkus. Seejuures annab magnetnõel hälbe  $\varphi$ . See hälve on tingitud sellest, et magnet mõjub magnetnõelasse teatud tungiga. Selle tungi tähistame  $f$ . Ei ole raske näha, et

$$\tan \varphi = \frac{f}{H_h\mu}.$$

Magnetnõelale lähemal olev poolus mõjub seejuures poolusesse  $\mu$  tungiga  $f_1$ , mille võib leida Coulomb'i seadusest:

$$f_1 = \frac{m_1\mu}{\left(r - \frac{L}{2}\right)^2}.$$

Avaldis  $r - \frac{L}{2}$ , kus  $L$  on magnetipooluste  $m_1$  ja  $m_2$  kaugus, tähendab siin pooluste  $m_1$  ja  $\mu$  kaugust.

Kaugemal olev poolus  $m_2$  mõjub vastavalt:

$$f_2 = \frac{m_2\mu}{\left(r + \frac{L}{2}\right)^2}.$$

Seejuures on  $f_2$  suund just vastupidine  $f_1$  suunaga. Arvestades, et  $m_1 = m_2 = m$ , leiame kogu poolusesse  $\mu$  mõjuva tungi  $f$ :

$$\begin{aligned} f &= f_1 + f_2 = m\mu \left[ \frac{1}{\left(r - \frac{L}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r + \frac{L}{2}\right)^2} \right] = \\ &= m\mu \frac{\left(r + \frac{L}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{L}{2}\right)^2}{\left(r^2 - \frac{L^2}{4}\right)^2} = \\ &= 2m\mu r \frac{L}{r^3} = 2M \frac{\mu}{r^3}, \end{aligned}$$

kus  $\frac{L^2}{4}$  kui kaduv-väike suurus  $r^2$  kõrval on jäetud arvestamata.

Seega

$$\tan \varphi = 2 \frac{M}{H_h r^3}.$$

Et magnetnõela pooluste kaugust  $l$  ei ole arvestatud, siis tuleb veel juurde lisada parandustegur  $(1 + \eta/r^2)$ , kus

$$\eta = \frac{1}{2} L^2 - \frac{3}{4} l^2.$$

Selle parandusega leiame

$$\tan \varphi = 2 \frac{M}{H_h r^3} \left(1 + \frac{\eta}{r^2}\right) \text{ ehk}$$

$$\frac{1}{2} r^5 \tan \varphi = \frac{M}{H_h} (\eta + r^2). \dots \dots \dots (1).$$

Siit võiks arvutada  $\frac{M}{H_h}$ . Kuid seejuures on tarvilik, et  $L$  ja  $l$  oleksid antud.

Varva-, samuti ka nõelakujulise magneti pooluste kaugus on ligikaudu võrdne magneti resp. nõela  $\frac{5}{6}$  pikkusega.

Ent sageli on  $L$  ja  $l$  tundmatud, seepärast soovitakse Gauss mõõta hälvet  $\varphi$  magneti kahel kaugusel  $r$  ja  $r'$  puhul.

Kauguse  $r'$  juures võib kirjutada

$$\frac{1}{2} r'^5 \tan \varphi' = \frac{M}{H_h} (\eta + r'^2). \dots \dots \dots (2).$$

Mõlemad valemid (1) ja (2) annavad

$$\frac{M}{H_h} = \frac{1}{2} \frac{r^5 \tan \varphi - r'^5 \tan \varphi'}{r^2 - r'^2}. \dots \dots \dots (II).$$

Kui asetada magnet magnetnõelast lõuna või põhja poole (Gaussi 2. peasend), siis saaksime  $\frac{M}{H_h}$  jaoks avaldise, mis on samasugune kui avaldis (II), kuid puudub tegur  $\frac{1}{2}$ .

Nii võib määrata korrutise  $MH_h$  ja suhte  $\frac{M}{H_h}$ , millest võib arvutada Maa magnetivälja horisontaalkomponendi  $H_h$  absoluutse väärtuse. See  $H_h$  määramise meetod on Gaussi poolt leiutatud.

Riist, mille abil toimub  $H_h$  määramine, on tuntud Gaussi magnetomeetri nime all.

### Aparaadi ja katse kirjeldus.

#### $MH_h$ määramine.

Magneti võnke kestuse määramine toimub klaasist või mõnest teisest mittemagnetilisest aineest valmistatud kastis, kuhu pannakse

magnet niidi otsa rippuma. Eemale viies kõik magneetuvad kehad (raud ja teras), pannakse magnet võnkuma ja loetakse aeg, mille kestel teeb magnet näiteks 100 võnget. See ajavahemik, jagatud võngete arvuga, annab võnke kestuse. Seejuures tuleb võnke amplituud valida väike, vastasel korral tuleb teha nagu pendliigi juures vastav parandus.

Niidi torsiooni suhte  $\theta$  leidmiseks määratakse magneti tasakaalutäpp võnkumiste pöörde täppidest, nagu seda kaalude juures tehakse. Seks on riista põhi varustatud peegelmikuga. Kui magneti tasakaalu seis on leitud, siis loetakse niidi kruvi seis vastavalt astmikult. Nüüd keeratakse sama kruvi teatud nurga  $\alpha$  võrra ( $180^\circ$ ,  $360^\circ$ ) ja määratakse uuesti magneti tasakaalu suund, mis nüüd endisest erineb näiteks  $\varphi$  võrra. Niidi torsiooni-suhe arvutatakse valemist

$$\theta = \frac{\varphi}{\alpha - \varphi}.$$

Magneti inertsimoment  $K$  arvutatakse magneti kujust või määratakse katse teel. Näiteks täisnurkse rööptahuka inertsimoment servaga  $c$  (kõrgusega) paralleelse telje suhtes  $K = \frac{1}{12} M (a^2 + b^2)$ , kus  $M$  on rööptahuka mass,  $a$  ja  $b$  tema serva pikkused (pikkus ja laius).

Ent iga kord ei ole arvutamine läbiviidav. Siis määratakse see katse teel. Võnkuva magneti külge riputatakse kaks ühesuurust ja üheraskust lisakoormist, üks ühele, teine teisele poole magnetiniidist, kuid võrdsele kaugusele  $l$ . Lisakoormiste juurdehaakimisega suurenes magneti inertsimoment  $k$  võrra. Nüüd määratakse niiviisi koormatud magneti võnke kestus, mille tähistame  $T_1$ .

Olgu  $T$  magneti võnke kestus ja  $K$  inertsimoment ilma lisakoormisteta, siis

$$K = k \frac{T^2}{T^2 - T_1^2}.$$

(Vt. 51. lehekülg.)

Lisakoormiste inertsimoment leitakse arvutamise teel. Kui lisakoormisteks olid täpsalt ühesugused silindrid, mille raadius  $r$  ja mass  $m$ , ja nad olid asetatud magnetile  $l$  cm kaugusele magneti pöörlemisteljest (niidist), siis

$$k = 2m \left( l^2 + \frac{r^2}{2} \right).$$

$MH_h$  arvutatakse valemi (I) järele.

## $M/H$ määramine.

Lihtsamakujuline riist, mille abil määratakse  $M/H_h$ , on moodustatud väikesest karbikesse paigutatud magnetnõelast, mis on kinnitatud rennikujulise mõõtevarva keskkoha. Karbikese põhi on varustatud ringastmikuga, millelt loetakse magnetnõela suund. Et tõsta lugemi täpsust, on magnetnõela peale sageli kinnitatud pikk ja peenike alumiinium-osuti. Niisugusel korral loetakse astmikult alumiinium-osuti suund, kuna lühikese magnetnõela lugem oleks liiga vähe täppis.

Mõõtmisel tuleb riist nii seada, et mõõtevarb oleks risti magnetilise meridiaaniga, seega ka magnetnõela suunaga. Eemale viies kõik magneetuvad kehad (teras ja raud), loetakse magnetnõela suund ringastmikult. Nüüd asetatakse näiteks lääne poole sellest  $r$  cm kaugusele magnetnõelast mõõtevarva rennisse magnet, mille võnke kestus äsja määratud.

Seejuures on muidugi ka magnet risti magneti meridiaanile. Magneti asetamisega sinna annab magnetnõel hälbe  $\varphi$ , mis loetakse ringastmikult, kusjuures siin tuleb lugeda osuti mõlemate otste näitamised. Nüüd pööratakse magnetit  $180^\circ$  võrra ja asetatakse ta mõõtevarvale tagasi, kusjuures tema kaugus  $r$  jäetakse endiseks. Uuesti loetakse magnetnõela hälve. Selle järele asetatakse magnet magnetnõelast ida poole, kuid samale kaugusele, ja korratakse kõik endised tehted. Kokku saadakse nii 8 lugemit, millest arvutatakse keskmine hälve  $\varphi$ .

Seesugune lugemite kordamine on tarvilik, et hoiduda vigadest, mis võivad tulla sellest, et 1) magnetnõela pöörlemisel ja ringastmiku kesktäpp ei ühtu, 2) et mõõtevarva telg ei ühtu täpsalt  $O-W$  suunaga ja 3) et magnetnõela kesktäpp ei ühtu mõõtevarva kesktäppiga. Nii määratakse ka hälve  $\varphi'$ , kui magneti kaugus magnetinõelast on  $r'$ .

Kahest hälbest  $\varphi$  ja  $\varphi'$  ja kaugustest  $r$  ja  $r'$  arvutatakse valemi (II) järele suhe  $\frac{M}{H_h}$ .

Lõpuks arvutatakse  $H_h$  korrutisest  $MH_h = A$  ja suhtest  $\frac{M}{H_h} = B$ .

## 43. Magnetivälja tugevuse mõõtmine Quincke järele.

Asetades magnetiväljasse, mille tugevus  $H$ , raua, muutub see magnetiliseks. Olgu seejuures ta magneetumise intensiivsus,

s. o. ühe ruumala-ühiku kohta tulev magnetimoment,  $J$ . Magnetiväljast tugevusega 1 tingitud magneetumise intensiivsust  $\chi = \frac{J}{H}$  nimetatakse selle keha magnetiliseks susseptibiliteediks ehk vastuvõtlikkuseks.  $\chi$  on kehi iseloomustav suurus. Kõik kehad rühmituvad selle suhtes kahte ossa:

Kehi, mille  $\chi > 0$ , nimetatakse paramagnetilisteks, neid aga, millede  $\chi < 0$ , diamagnetilisteks. Üldiselt on  $\chi$  konstantne ja nullist vähe erinev suurus. Erandiks on raud, nikkel, koobalt ja mangaan. Viimaste susseptibiliteet  $\chi$  oleneb väga tunduvalt magnetivälja tugevusest. Seepärast nimetatakse neid kehi nende peaesindaja järele ferromagnetilisteks. Paramagnetilistesse kehasse mõjub magnetiväli tõmbavalt, diamagnetilistesse tõukavalt.

Quincke kasutas paramagnetilisi lahuseid tugevate magnetiväljade mõõtmiseks (vt. Annalen d. Physik, 1885, Bd. 24). Ta tarvitas seks otstarbeks U-toru taolist manomeetrit, mille üheks haruks kapillaartoru ja kuhu valatakse mingisugust paramagnetilist vedelikku.

Mõõtmine ise toimub Quincke järele järgmiselt:

Elektromagneti N- ja S-pooluste teravikkude vahele asetatakse U-toru peenem haru, kuna jämedam olgu m.-väljast võimalikult kaugel. U-toru täidetakse paramagnetilise vedelikuga, näiteks  $MnCl_2$ -lahusega. Magnetivälja olemasolu puhul on vedelikusammast välja mõjupiirkonnas olevas harus  $h$  cm võrra kõrgem kui teises harus. Kohas, kuhu ulatub vedelikusamba tipp, olgu magnetivälja tugevus  $H$ . Tähistame veel vedeliku erikaalu  $d$  ja tema magnetilise vastuvõtlikkuse  $\chi$  ja vabalt langetava keha kiirenduse  $g = 981 \frac{cm}{sek^2}$ , siis

$$h = \frac{\chi}{2gd} H^2,$$

mis annab

$$H = \sqrt{\frac{2ghd}{\chi}}.$$

Häviv väli, siis alaneb vedeliku pind torukeses  $h$  cm võrra.

Et välja tugevust mõõta, seks paigutatakse U-manomeetri kapillaartoru magnetipooluste vahele nii, et torus oleva vedeliku pind ulatuks selle kohani, kus mõõtmist soovitakse toimetada, ja juhitakse vool elektromagnetimähisesse; katetomeetri abil mää-

ratatakse vedeliku kõrgus kapillaartorus. Selle järele katkestatakse vool, mille tõttu magnetiväli hävib, ja määratakse uuesti vedeliku kõrgus.

Mõlema lugemi vahe annab tõusu  $h$ . Juurdelisatud tabelist vastavalt lahuse erikaalule leitakse vedeliku magnetiline vastuvõtlikkus. Erikaal määratakse Mohri kaalude või püknomeetri abil.

Kui muuta magnetipooluste kaugust, siis muutub ka magnetivälja tugevus nende vahel. Määrates iga kord eespoolkirjelatud viisil magnetivälja tugevuse, võib koostada tabeli, millest on näha, kuidas sõltub magnetivälja tugevus pooluste kaugusest.

T a b e l.

I.		
Vedelik	Erikaal	Magnetiline vastuvõtlikkus $\times 10^6$ .
$MnCl_2$ .	1,3695	57,57
Magaan-	1,3339	55,29
kloriid.	1,2992	48,97
	1,1739	27,47
	1,1209	18,64
II.		
$FeCl_3$		
Ferri-	1,5083	64,90
kloriid.	1,1395	17,25
	1,0564	5,988

## VIII.

# Elekter.

### 44. Üldised märkused.

#### Põhiühikud.

Elektrivoolu juures huvitavad meid peamiselt kolm suurust: voolutugevus  $J$ , pingeline  $E$  ja takistus  $R$ . Neid kolme suurust seob Ohmi seadus, millele võib anda vastava ühikute valiku juures kuju:

$$J = \frac{E}{R}.$$

Kõik elektrilised, samuti magnetilised ühikud on tuletatavad pikkuse, massi ja aja põhiühikuist cm, g, sek. (CGS — absoluutne mõõtudesüsteem).

Kuid seejuures võib saada elektriliste ja magnetiliste suuruste jaoks kaks isesugust mõõtudesüsteemi. Seejärele, kas lähendada paigal seisvate elektrilaengute vastastikusel mõjust või elektrivoolu mõjust magnetisse, saadakse elektrostaatilisid ühikud või elektromagnetilised ühikud.

Niihästi abs.-elektrostaatilisid kui ka abs.-elektromagnetilised ühikud on kas liiga suured või liiga väikesed, seepärast on tarvitusele võetud praktilised ühikud, mis tuletatakse absoluutseist elektromagnetilisist ühikuist korrutamisega 10 vastavas astmes.

Takistuse ühik on oom (Ohm) =  $10^9$  el.-magn. =  $1/9 \cdot 10^{-11}$  el.-staat. CGS  
Voolutugevuse ühik amper =  $10^{-1}$  " " =  $3 \cdot 10^9$  " " "  
Elektromotoorse jõu ühik volt =  $10^8$  " " =  $1/3 \cdot 10^{-2}$  " " "

Et nende põhiühikute absoluutne mõõtmine on väga raske, siis on tarvitusele võetud nn. internatsionaalsed praktilised ühikud oom, amper ja volt, kusjuures need tuletatakse empiirilisel teel järgmiselt:

Takistus 1 oom on elavhõbedasambal, mille pikkus on 106,3 cm ja läbimõõt 1 mm<sup>2</sup> (kaal 14,4521 g ) 0° juures.

1 amper on voolutugevus, mis lahutab ühe sekundi jooksul hõbenitraadist 1,11800 mg hõbedat.

Elektromotoorse jõu ühik volt tuletatakse Ohmi seaduse järel eespooltoodud internatsionaalsest oomist ja amprist. Seega on volt elektromotoorne jõud, mis annab ahelas, mille takistus on 1 oom, voolutugevuse 1 amper. (Elektrikute kongressid Chicagos 1893. ja Londonis 1908. a.). Hilisemad uurimised näitasid, et internatsionaalsete põhiühikute lahkuminek absoluutseist ühikutest ei ole suur.

### Elektri mõõduriistadest.

Voolutugevuse mõõtmine toimub ampermeetriga, pinge mõõtmine — voltmeetriga. Väga nõrkade voolude mõõtmiseks tarvitatavoid riistu nimetatakse ka galvanomeetriteks.

Voolutugevuse mõõtmiseks antud ahelas tuleb ampermeeter lülida nii, et kogu vool selle läbiks. Kuna voolutugevus ahelas on igalpool üks ja sama, siis pole ampermeetri lülimise järjekord teiste riistade suhtes oluline. Et ampermeetris ei oleks asjata energia kaotusi ja pinge langemist (Joule-Lenz'i ja Ohm'i seadused), siis ehitatakse nad väga väikese takistusega; erandi moodustavad galvanomeetrid. Praktiliselt on ampermeeter päris ilma takistuseeta. Siit juhis: ampermeeter lülitakse vooluahelasse alati järjestikku voolu tarvitavate aparaatidega nii, et kogu vool tast läbi peab minema.

lialgi ei tohi ampermeedit lülida paralleelselt vooluallikaga, sest siis tõuseks, nagu järgneb Ohmi seadusest, voolutugevus väga suureks ning selle tagajärjeks oleks ampermeetri läbipõlemine.

Harilik voltmeeter on põhijoontes väga tundlik, kuid suure (praktiliselt lõpmata suure) ja kindla takistusega ampermeeter. Seega lülides voltmeedit vooluahelasse läheb tast läbi vool, mille tugevus on proportsionaalne pingega ühendamise punktide vahel ( $J = \frac{E}{R}$ , kus  $R$  on antud riistal muutumatu suurus). Kui nüüd

iga pinge jaoks kanda selle riista astmikule mitte voolutugevus, mis tast läbi läheb, vaid pinge suurus, siis saamegi voltmeetri. Seega voltmeetri tarvitamise juhised: voltmeeter ühendatakse alati nende täppidega, mille vahel pinget soovitakse mõõta. Kunagi ei tohi voltmeetrit lülida järjestikku teiste riistadega, sest oma suure takistuse tõttu ei lase voltmeeter peaaegu sugugi voolu läbi. Ainult väga nõrkade voolude korral peab arvestama ka voltmeetri voolutarvitust, näit. raadiolampide küttepinge mõõtmisel, kus voltmeetrit läbib vahest sama tugev vool kui hõõgniiti ja seega voltmeetri lüümisel ahelasse pinge võib tunduvalt langeda.

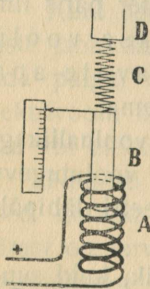
Niihästi volt- kui ka ampermeetri tarvitamisel tuleb tähele panna, et ei hakataks mõõtma pingeid resp. voolutugevusi, mis on suuremad, kui antud riist võimaldab mõõta.

Igasuguste vooluahelate koostamisel peab alati Ohmi seaduse põhjal arvestama, kas neist riistadest võib läbi minna nii tugev vool, kui tarvis.

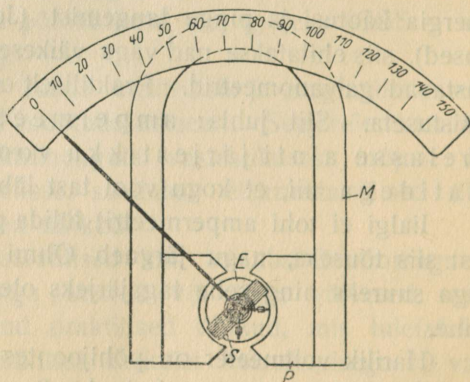
### Amper- ja voltmeetrите tüübid.

#### Elektromagnetilised.

Seda liiki mõõduriistade peaosaks on paigalseisev pool, millesse juhitud elektrivool mõjub pehmest rauast südamikusse nii, et see voolu toimel oma algseisust välja liigub (40. joonis).



40. joonis.



41. joonis.

Elektromagnetiliste mõõduriistade täpsus on  $\sim 5\%$ . Nad kannatavad kaunis suurt ülekoormatust. Nad on tarvitatavad

niihästi alalise kui ka vahelduva voolu puhul. Nende astmik ei ole ühtlase jaotusega. Elektromagnetiline voltmeeter tarvitab võrdlemisi palju voolu.

### Pöördpooliga mõõduriistad.

Õige täpsad on pöördpooliga mõõduriistad. Tugeva teras-magneti  $M$  pooluste vahel pöörleb telje ümber kerge neljannurgeline poolike  $S$ , mida hoiavad nullseisus kõikuvad spiraalvedrukesed, mille kaudu juhitaksegi vool liikuvasse pooli.

Et pooli pöörlemise suund oleneb voolu suunast, siis on pöördpoolriistad tarvitavad ainult alalise voolu jaoks. Alati on märgitud riistale, missuguse klemmiga tuleb ühendada  $+$ -poolus, millisega  $-$ -poolus. Täpsus 1—0,1%. Juba väike ülekoormatus võib täielikult hävitada riista. Voltmeeter tarvitab vähe voolu, 1—10  $mA$ . Ampermeetrid on alati varustatud šundiga, mis harilikult on ehitatud juba riista sisse.

Väliselt erinevad pöördpooliga mõõduriistad teistest seega, et nende astmiku jaotus on ühtlane, s. o. tundlikkus on astmikul igalpool üks ja sama (41. joonis).

### Soojuselised (termilised) mõõduriistad.

Nende riistade peaosaks on peenike plaatinatraat, mis voolu läbimisel Joule'i seaduse järele soojeneb ja seega ka pikeneb. Traadi pikenemine paneb pöörlema osuti. Et soojenemine ei olene voolu suunast, siis on soojuselised mõõduriistad tarvitavad alalise, vahelduva kui ka suursagedusega voolu puhul. Ülekoormamist nad ei kannata. Täpsus kuni 1%. Voltmeetrid tarvitavad palju voolu — kuni 200  $mA$ .

### Elektrodünaamilised mõõduriistad.

Üks ja sama vool läbib paigalseisva ja pöördpooli, mille tõttu pöördpool hakkab liikuma. Tarvitav alalise ja vahelduva voolu puhul. Hinnalt on need riistad kallid, seepärast tarvitatakse neid vähem.

### Reostaadid.

Reostaate on kahesuguseid: reguleerimisreostaadid ja mõõtereostaadid.

Reguleerimisreostaate tarvitatakse voolutugevuse reguleerimiseks antud voolu ahelas. Alati on neile märgitud voolutuge-

vuse piir, milleni võib tõusta neid läbiv vool kahju tegemata reostaadile. Kuju poolest võivad need reostaadid olla lükati- või kurbel-reostaadid.

Mõõtereostaate tarvitatakse näiteks takistuse mõõtmisel. Neist võib läbi lasta vaid väga nõrka voolu, sest tugevama voolu puhul hävivad nad kergesti. Tavalisem mõõtereostaadi kuju on tõpsel- ehk pulk-reostaat. Tõpsel-reostaadi tarvitamisel tuleb hoolitseda, et kõik ühenduskohad, tõpslid ja tõpslipesad, oleksid täiesti puhtad ja vabad oksüüdist. Tõpslid puhastatakse riidelapiga, millele puistatud veidi peenikest smirgelpulbrit, tõpslipesad puupulgaga ja smirgelpulbriga.

## 45. Galvanomeeter.

Galvanomeetrit tarvitatakse nõrkade voolude mõõtmiseks. Rohkem tarvitavad tüübid on nõel-galvanomeeter (liikva magnetiga) ja pöördpooliga galvanomeeter.

Nõel-galvanomeeter põhjeneb nähtusel, et magnetnõel, mis asetatud voolu lähedale, kaldub voolu mõjul oma algsuunast kõrvale ja püüab asetuda risti voolu suunaga (Oersted'i nähtus). Tundlikkuse suurendamiseks riputatakse magnetnõel horisontaalselt peene niidi otsa ja hoitakse siis poolis (mähises), millesse juhitakse vool. Nõela nullseisu hoidjaks on seejuures Maa magnetiväli. Seepärast tuleb galvanomeeter mõõtmisel asetada nii, et mähised oleksid magnetilise meridiaani tasapinnas. Hälbe lugemine toimub kas magnetnõela külge kinnitatud kerge osuti abil või, nagu enamail juhtumeil, nõelaga ühes pöörduva peeglike ja lugemi pikksilma abil (peegel-galvanomeeter).

Galvanomeetri magnetnõelu on väga mitmesugusekujulisi, näiteks Wiedemann'i peegel-galvanomeetri magnet on kõver, kellukesekujuline. Sageli varustatakse galvanomeeter kahe mähisega, mida võib lähendada või eemaldada magnetist, seega võib muuta galvanomeetri tundlikkust.

Et galvanomeetri magneti võnkumised kiiresti kustuksid, asetatakse magneti lähedale suured vaskmassid kas kuuli või massiivse raami näol, milles magneti liikumisel tekkinud keerisvoolud püüavad liikumist takistada.

Nõel-galvanomeetreid tarvitatakse peaaegu ainult nn. null-instrumentidena, s. o. selleks, et teada saada, kas antud juhtumil on voolu või mitte, sest voolutugevuse määramiseks ei ole nad

oma ebastabiilse nullseisu tõttu küllalt kõlvulised, kuigi nende tundlikkus on kaunis suur (kuni  $10^{-8}$  amp.).

Peaaegu sugugi ei ole tundlik välistele mõjudele pöördpooli galvanomeeter. Viimase riista peaosaks on tugeva magneti pooluste vahel rippuv kerge pool (vt. pöördpooli mõõduriistad). Sesse pooli juhitakse vool peenikeste ja painduvate metallniitide kaudu. Pooli nullseisus hoidvaks tungiks on ülesriputamiseks tarvitatud traadi torsioon. Pöördpooli galvanomeetri tundlikkus on suur, kuni  $10^{-10}$  amp. Ta on väga vähe tundlik magnetilistele mõjudele, küll aga õrn mehaaniliste vigastuste ja ülekoormatuse vastu.

Galvanomeetri tarvitamisel tuleb ta seada loodi, s. o. nii, et tema liikuv süsteem võiks vabalt liikuda. Seks on iga galvanomeeter varustatud kolme jalgkruviga ja paremad ka vesiloega. Rippuva magnetiga galvanomeetri magnetit tuleb mõnikord seejuures summutajakuuli sees kas üles või alla lasta.

### Galvanomeetri taandamistegur.

Juhtides galvanomeetrise voolu, annab see hälbe, mille suurus sõltub antud galvanomeetri tundlikkusest ja läbijuhitud voolu tugevusest. Mittesuurte hälvete puhul on voolutugevus  $i$  võrdeline hälbega  $\alpha$  \*)

$$i = C\alpha,$$

kus  $C$  on galvanomeetri nn. taandamistegur.

On  $C$  antud, siis võib alati leida galvanomeetrist läbi juhitud voolu tugevuse.

$C$  määratakse, kui juhitakse galvanomeetrise tuntud tugevusega vool, sest eelmise valemi põhjal võib kirjutada

$$C = i/\alpha.$$

Andes voolu abil galvanomeetrile paraja hälbe ja siis voolu katkestades, hakkab galvanomeetri pöörlev osa võnkuma. Olgu üksteisele järgnevate galvanomeetri hälvete amplituudid ehk võnke ulatused  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ . Nagu tuletatakse galvanomeetrite võnkumise teooriast, on kahe teineteisele järgneva amplituudi suhe  $k$  konstantne:

$$k = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_3} = \frac{\alpha_3}{\alpha_4} = \text{const.};$$

\*) See on maksev tavaliste galvanomeetrite, kuid mitte elektrodünaamiliste ja termiliste riistade kohta.

$k$  nimetatakse galvanomeetri sumbumissuhteks,  $\lambda = \log_{\text{nat}} k$  nimetatakse logaritmiliseks dekrementiks.

Nii määratakse  $\lambda$  ja  $k$  avatud galvanomeetriaehela puhul. Kui aga ühendada galvanomeetriahel, siis suureneb võnkumiste sumbumine seda enam, mida vähem on galvanomeetriaehela takistus.

Määrates  $\lambda$  resp.  $k$  mitme galvanomeetriaehela välistakistuse puhul, võib seda sõltuvust kujutada graafiliselt kõverana. Sellest kõverast võib juba leida  $\lambda$  resp.  $k$  iga välistakistuse kohta.

Galvanomeetri võnke kestuseks nimetatakse seda ajavahemikku, mida tarvitab galvanomeetri võnkuv süsteem ühest pöördeseisust teise liikumiseks. Galvanomeetri võnke kestus määratakse nagu tavalisest iga teise võnke kestus, s. o. määratakse aeg, mille kestel sünnib mõnikümmend võnget, ning sellest arvutatakse üksiku võnke kestus. Galvanomeetri võnke kestus sõltub võnkumiste sumbumissuhtest ning suureneb sellega.

Olgu  $\tau$  summutamata galvanomeetri võnke kestus,  $t$  summutatud galvanomeetri võnke kestus,  $\lambda$  logaritmiline dekrement, siis

$$t = \tau \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2} \text{ ehk}$$

$$\tau = \frac{t}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2}}.$$

### Galvanomeetri taandamisteguri määramine.

Galvanomeetri taandamistegurit  $C$  võib määrata, kui juhtida tast läbi tuntud tugevusega vool. Ent enamail juhtumeil kasutatakse seks haruvoolu ühendust.

Galvani elemendist, lüljast ja ampermeetrist koosnevasse vooluahelasse lülitakse takistus  $R$ . Kahest täpist takistusel, mille vaheline takistus olgu  $r_n$ , hargneb vool galvanomeetriaehelasse. Galvanomeetriaehelasse lülitakse veel takistus  $r$  (10 000—100 000 oomi). Reguleerides takistust  $r_n$  nii, et galvanomeeter annaks paraja hälbe (umbes astmiku keskele), loetakse galvanomeetri hälve  $\alpha$ . Katset korratakse mitu korda.

Galvanomeetrit läbiva voolu tugevus  $i_g$  on võrdeline galvanomeetri hälbega:

$$i_g = C\alpha,$$

millest

$$C = i_g/\alpha.$$

Olgu  $i$  ampermeetrit loetud voolutugevus ja  $r_g$  galvanomeetri takistus, siis, arvesse võttes, et kahe tähendatud haru takistused on  $r_n$  ja  $r + r_g$ , seega

$$i_g = \frac{ir_n}{r + r_g + r_n}.$$

Siit

$$C = \frac{i}{\alpha} \frac{r_n}{r + r_g + r_n}.$$

## 46. Ballistiline galvanomeeter.

Väga lühikese kestusega voolude (voolutüugete) mõõtmiseks tarvitatakse ballistilist galvanomeetrit.

Kui ajaelemendi  $t$  kestusel galvanomeetrit läbis vool tugevusega  $i$ , siis leiame läbivoolanud elektri hulga valemist

$$Q = it.$$

Kui voolutugevus on muutlik, siis muidugi

$$Q = \int i dt.$$

Et voolu mõju pöörlevasse magnetnõela oleks igal hetkel üks ja sama, ei tohi viimane, niikaua kui vool kestab, oma algseisust kuigi palju välja minna. Seepärast tarvitatakse ballistiliste galvanomeetritena neid galvanomeetreid, mille võnke kestus on suur (vähemalt 10—15 sek.).

Iga galvanomeeter laseb end ballistiliseks ümber ehitada, kui tema võnkua osa inertsimoment suurendada näiteks lisa-koormisega.

Mittesuurte hälvete puhul on elektri hulk  $Q$  võrdeline hälbega  $\alpha$ :

$$Q = C_\beta \alpha. \quad \dots \dots \dots (1),$$

$C_\beta$  nimetatakse ballistiliseks taandamisteguriks. Ta on arvuliselt võrdne elektri hulgaga (kulonites), mis galvanomeetrist läbi minnes annab hälbe 1.

Nagu teooria näitab, on  $C_\beta$  seotud summutamata galvanomeetri hariliku taandamisteguriga  $C$  järgmise seose kaudu:

$$C_\beta = C \frac{\tau}{\pi} \quad \dots \dots \dots (2).$$

Valemeist (1) ja (2) järgneb:

$$Q = C a \frac{\tau}{\pi} \dots \dots \dots (3),$$

kus  $\tau$  on summutamata galvanomeetri võnke kestus. Kui galvanomeetri võnkumine on summutatud, ja olgu  $k$  sumbumissuhe kahe teineteisele järgneva hälbe vahel,  $\lambda$  selle nn. logaritmiline dekrement, siis oleks hälve summutamatute võnkumiste puhul

$$ak \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\pi}{\lambda}.$$

Selle põhjal võime valemi (3) ümber kirjutada, mis annab

$$Q = C a \frac{\lambda}{\pi} k \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\pi}{\lambda}.$$

$$\text{ehk } Q = \frac{C a k}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\pi}{\lambda}.$$

Võrreldes viimast valemiga  $Q = C_{\beta} a$ ,

saame

$$C_{\beta} = C \frac{\tau}{\pi} k \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\pi}{\lambda} \dots \dots \dots (4),$$

mis annabki otsitud seose. Et kõik viimases valemis esinevad suurused on katsete abil määratavad, siis võib arvutada  $C_{\beta}$ , kui on antud  $C$ .

Kui  $k$  ja  $\lambda$  sõltuvad galvanomeetriaehela välisest takistusest, siis sõltub neist ka  $C_{\beta}$ . Tavaliselt määratakse  $C_{\beta}$  avatud galvanomeetriaehela kohta (väline takistus  $\infty$ ).

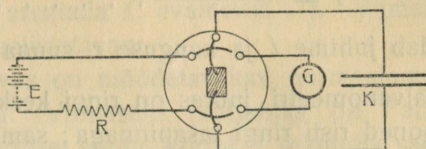
Hoopis lihtsamalt võib leida  $C_{\beta}$ , kui juhtida läbi ballistilise galvanomeetri mõõdetud elektri hulk. Elektri hulk  $Q$ , mis laeb kondensaatori mahuga  $K$  pingeni  $V$ , on võrdne  $KV$ .

Kui tühjendada kondensaator läbi ballistilise galvanomeetri, siis annab see hälbe  $a$ , kusjuures

$$Q = C_{\beta} a, \text{ ehk, et } Q = KV, \text{ siis } KV = C_{\beta} a.$$

Siit arvutatakse  $C_{\beta}$ , kui on antud  $V$  ja  $K$ . Seega võib ballistilise galvanomeetri taandamisteguri määrata järgmiselt: Tuntud mahuga kondensaator laetakse teatud pingeni ning tühjendatakse kondensaator siis läbi uuritava galvanomeetri, kusjuures loetakse galvanomeetriaälve. Niisugune meetod annab  $C_{\beta}$  avatud galvanomeetriaehela jaoks.

Katseks vajalikku vooluahelat kujutab 42. joonis. Samuti on sellel joonisel kujutatud ümberlülija, mille abil toimub kondensaatori laadimine ja tühjendamine.



42. joonis.

$K$  — kondensaator.

$G$  — galvanomeeter.

$E$  — patarei, mis omab mingi kindla pinge (akkum. pat.).

Patarei ahelasse lülitakse reostaat  $R$ , mis kaitseks on lühiühenduse puhul. Joonisel kujutatud ümberlülija asendis on patarei ühenduses kondensaatoriga (kondensaator laetakse patarei pingeni). Pööratakse ümberlülija paremale poole, siis tühjendub kondensaator läbi galvanomeetri. Ühtlasi lülitakse patarei kondensaatori ahelast välja. Tekkinud galvanomeetrihälve loetakse ja kirjutatakse üles. Lülijat pahemale poole tagasi pöörates laetakse kondensaator uuesti. Korrates katset mitu korda, saadakse rida hälbeid, millest võetakse keskmine.

$C_{\beta}$  arvutatakse valemist

$$C_{\beta} = \frac{KV}{a}.$$

Harilikult avaldatakse  $C_{\beta}$  — kulon/cm-ites

Elektrihulk  $Q$  on avaldatud kulonites, kui  $K$  on mõõdetud faradites ja  $V$  voltides. Sageli antakse kondensaatori maht mikrofaradeis ( $\mu F$ ), mis on  $\frac{1}{10^6}$  faradit ( $F$ ).

Niiviisi leitud  $C_{\beta}$  on maksev muidugi avatud galvanomeetriahela kohta.

## 47. Tangens-galvanomeeter.

Tangens-galvanomeeter  $G$  koosneb ringikujulisest voolujuhtmest, mille keskel ühtlases magnetiväljas asetseb ringi raadiusega  $r$  võrreldes lühike magnet  $m$ . Magnet ripub tema raskuskeskohta kinnitatud peene siidniidi otsas ja võib horisontaaltasapinnas

vabalt pöörduda kinnitustäpi ümber. Biot-Savart'i seaduse järele mõjub vool tugevusega  $J$  kaugusel  $r$  juhtmest  $l$  magnetipoolusesse  $m$  tungiga

$$F = \frac{Jml \sin(l,r)}{r^2} \dots \dots \dots (1),$$

kus  $(l,r)$  tähendab juhtme  $l$  ja kauguse  $r$  suuna vahelist nurka.

Tangens-galvanomeetri juures on ringi keskel voolu magnetivälja tungjooned risti ringi tasapinnaga; samuti on kauguse  $r$  suuna ja juhtme  $l$  vaheline nurk  $(l,r) = 90^\circ$  ja seega  $\sin(l,r) = 1$ . Juhtme pikkus  $l = 2\pi rn$ , kus  $r$  on ringi raadius ja  $n$  keerdude arv. Sellest järeneb, et

$$F = \frac{2\pi rnm}{r^2} J \dots \dots \dots (2),$$

kusjuures  $F$  leiame düünides, kui  $r$  on antud cm,  $m$  ja  $J$  absoluutseis elektromagnetilisis ühikuis.

Kui Maa magnetivälja horisontaalne komponent on  $H_h$  ja magnet kaldub voolu mõjul välja ringi tasapinnast, mis asetseb magnetilises meridiaanis, nurga  $\varphi$  võrra, siis

$$\tan \varphi = \frac{F}{H_h} \dots \dots \dots (3).$$

Asetades siia  $F$  väärtuse avaldisest (2), leitakse

$$\tan \varphi = \frac{2\pi rnm}{r^2 H_h} J \dots \dots \dots (4).$$

Et praktiline voolutugevuse ühik 1 amper =  $1/10$  abs. el.-magn. ühikut, siis

$$\tan \varphi = \frac{2\pi rnm}{10 r^2 H_h} J \dots \dots \dots (5),$$

kus  $J$  on juba mõõdetud ampreis.

Tähistame

$$\frac{2\pi rnm}{10 r^2 H_h} = \frac{1}{C} \dots \dots \dots (6),$$

siis (5) järele

$$J = C \tan \varphi \dots \dots \dots (7).$$

Eelmine valem on ligikaudne, sest esiteks ei asu magnet tõeliselt kõigist ringi täpest ühekaugusel ja teiseks on see kaugus muutlik nõela kõrvalekaldumisel.

$C$  nimetatakse tangens-galvanomeetri taandamisteguriks. Ta on muutumatu antud riista ja koha jaoks. On  $C$  määratud,

võib teda rakendada. Valem (7) lubab arvutada galvanomeetri läbiva voolu tugevuse  $J$ , kui on loetud osuti kaldenurk  $\varphi$ .

$C$  leidmiseks võib valida kaks teed: 1) määrata  $n$ ,  $m$ ,  $r$ , ja  $H_h$  ning arvutada  $C$  avaldisest (6) või 2) mõõta voolutugevus  $J$  ja nurk  $\varphi$  ning arvutada  $C$  avaldisest (7). Viimane viis on oma lihtsuse pärast eelistatavam.

Voolutugevus on mõõdetav kas normaalampermeetriga või elektrolüüsi abil. Viimaseks juhtumiks on Faraday seadusest teada, et 1-amprilise voolu korral 1 sekundis sadestub katoodil ikka kindel hulk  $A$  vesinikku või metalli igast tema soola lahusest, olenemata metalli keemilisest ühendist, s. t. aniooni iseloomust.  $A$ -d nimetatakse aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks. Näiteks vase jaoks  $A = 0,329$  mg/kul.

Kui on teada, et  $T$  sek. jooksul voolu mõjul katoodile sadestunud metalli hulk on  $P$ , siis oli galvanomeetris katse vältel keskmine voolutugevus

$$J = \frac{P}{AT} \dots \dots \dots (8).$$

Asetades selle  $J$  väärtuse valemisse (7) leitakse, et

$$C = \frac{P}{AT \tan \varphi} \dots \dots \dots (9).$$

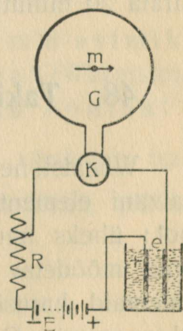
Kui siin  $A$  on võetud kuloni kohta, siis leitud  $C$  arvuline väärtus asetatult valemisse (7) annab  $\tan \varphi$ -ga korrutatult  $J$  ampreis.

Määrata tangensgalvanomeetri taandamis-tegur  $C$  elektrolüütilisel teel.

Lülitusskeemi kujutab 43. joonis.  $E$  on vooluallikas,  $R$ —muudetav reostaat,  $K$ —kommutaator,  $e$ — ja  $e +$  kulonmeetri elektroodid;  $G$  — galvanomeeter ja  $m$  — g. magnet.

Käesolevas katses on elektroodideks vaskplaadid ja elektrolüüdiks väävelhappu vase lahus (*cupr. sulf.*). Enne katset tuleb puhastada elektroodid liivapaberiga ja siis loputada piirituses. On kasulik süüdata põlema piiritusega niisutatud elektroodid, et neilt kõrvaldada võimalikult orgaaniliste ainete osakesi, mis takistavad vase sadestumist kindla kihina.

Kaaludes katoodi enne ja pärast elektrolüüsi, leitakse sadestunud vase kaal  $P$ . Suu-



43. joonis.

rema täpsuse saavutamiseks võib kaaluda mõlemad elektroodid eraldi, sest anood kaotab sama palju vaske, kui palju sadestub katoodil. Mõlemate elektroodide kaalu muutuse keskmine annab elektrolüüsist osa võtnud vase kaalu  $P$ .

Katse lõpul tuleb hoolitseda, et elektrolüüdist niisked elektroodid võimalikult lühikest aega kokku punktusid õhuga, sest värskelt sadestunud vask ühineb hapnikuga väga kiiresti. Kohe lahusest välja võttes tuleb elektroodid tublisti loputada veega, siis piiritusega ja lõpuks kuivamise kiirendamiseks eetriga.

Siis asetatakse galvanomeetrimähise tasapind Maa magnetivälja suunda, s. o. nii, et magneti külge kinnitatud osuti mõlemad otsad näitaksid jaotisringi  $O$ . Enne katset ilma kulonmeetrit on soovitatav voolutugevus reostaadi abil reguleerida nii, et magnetnõela kaldenurk oleks ca  $45^\circ$ .

Kommutaator lülitakse nii, et vibu ümberpaigutusel voolu suund muutuks galvanomeetris, jäädes samaks mujal vooluahelas (kulonmeetris).

Et vähendada vigu, mis võiksid olla tingitud ebatäpsast ringi ülesseadest magnetilise meridiaani tasapinnas ja nõela ning jaotisringi kesktäppide lahkuminekest või ka vooluallika pinge kõikumisest, loetakse katse vältel magneti kaldenurk  $\varphi$  osuti mõlemast otsast näiteks iga paarisarvulise minuti lõpul ja muudetakse seejärel iga kord kommutaatori abil voolu suund galvanomeetris. Saadud kaldenurga lugemeist arvutatakse aritmeetiline keskmine.

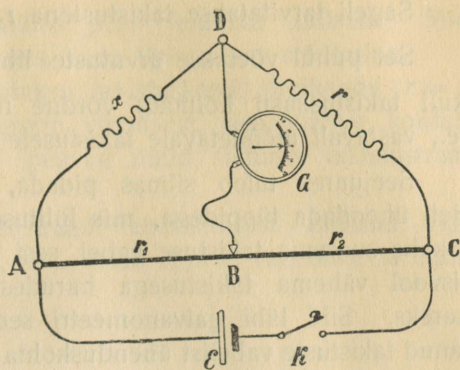
Et vool katkeb iga kommuteerimise juures, toimugu see õige ruttu, et voolu katkemise aeg oleks kaduv-väike võrreldes kogu katse vältusega. Käesolevas katses võib elektrolüüsi kestust piirata 20 minutiga.

## 48. Takistuse mõõtmine Wheatstone'i sillal.

Wheatstone'i silda kujutab 44. joonis.  $E$  on vooluallikas (galvani element),  $K$  — lülili. Täppides  $A$  ja  $C$  haruneb vool: üheks haruks on takistused  $r_1$  ja  $r_2$ , teise haru moodustavad mõõdetav takistus  $X$  ja antud takistus  $r$  (takistuskast). Mõlemaid harusid ühendab nn. sild  $BD$ , millesse on lülitatud galvanomeeter  $G$ . Vaatleme nüüd, missuguseil tingimusil puudub vool sillal  $BD$ .

Täpist A, mille potentsiaal olgu  $V_1$ , langeb see harudes ABC ja ADC täpi C potentsiaalini, mis olgu  $V_2$ . ( $V_1 - V_2$  on täppide A ja C potentsiaalivahe, kusjuures Ohmi seaduse järele potentsiaali lang on võrdeline takistusega.)

Kui täpis D on potentsiaal  $V$ , siis haru ADC kohta on maksev seos



44. joonis.

$$\frac{V_1 - V}{V - V_2} = \frac{X}{r} \dots \dots \dots (1).$$

Sama potentsiaal  $V$  on ka täpis B (haru ABC), kui

$$\frac{V_1 - V}{V - V_2} = \frac{r_1}{r_2} \dots \dots \dots (2).$$

Täpid D ja B, kus potentsiaalid on võrdsed, jagavad harud ADC ja ABC kaheks osaks, mille takistuste suhted on võrdsed, sest (1) ja (2) järgneb

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{X}{r} \dots \dots \dots (3).$$

Ühendades seesugusel puhul täppidepaari D ja B sillaga, ei näita galvanomeeter hälvet, sest silla otste võrdsete potentsiaalide tõttu on ta vooluta.

Takistused  $r_1$  ja  $r_2$  moodustab *mm*-astmikul sirgu tõmmatud ühtlane takistustraata (Wheatstone'i silla mõõtmistraat). Sellel traadil liigub kontakt B.

Ühtlase läbimõõduga traadi takistus on võrdeline traadi pikkusega. Seetõttu võib asendada suhte  $\frac{r_1}{r_2}$  vastavate pikkuste suhtega  $\frac{l_1}{l_2}$ .

On  $X$  tundmata takistus, siis

$$X = r \frac{r_1}{r_2} = r \frac{l_1}{l_2} \dots \dots \dots (5).$$

Sageli tarvitatakse takistustena  $r_1$  ja  $r_2$  ka takistuskaste.

Sel puhul võetakse arvutuste lihtsustamiseks suhe  $\frac{r_1}{r_2}$  (harilikult takistuskasti hõlmad) võrdne näit. 1, 10, 100, 0,1, 0,001 jne., vastavalt mõõdetavale takistusele  $X$ .

Seejuures tuleb silmas pidada, et vooluallika poolused tuleb ühendada täppidega, mis lülituses asetsevad kahe vähema ja kahe suurema takistuse vahel, sest vastasel korral võib mõõtmisvool vähema takistusega harudes muutuda ebasoovitavalt suureks. Sild läbi galvanomeetri seob muidugi siis kaht ülejäänud takistuste vahelist ühenduskohta: galvanomeetrit ja vooluallikat võib ikka ümber vahetada, ilma et seejuures muutuks nullseisu tingimus.

Takistustevahelised ühendusjuhtmed ja ühenduskohad olgu võimalikult takistusvabad (jämedad vasktraadid), kuna silla  $DB$  või vooluallika juhtmete takistused ei mõjusta katsevigu, küll aga võivad vähendada seadeldise tundlikkust.

Määrata antud pooli oomiline takistus Wheatstone'i sillal.

Lülitus tuleb teha 44. joonise järele. Ühenduskohad ja juhtmete otsad tuleb puhastada liivapaberiga; samuti tuleb puhastada seks ettenähtud peene smirgliga takistuskasti ühenduspulgad ja nende pesad.

Liikuv kontakt  $B$  seatakse takistustraadi keskele ning katseks võetakse mingi takistus  $r'$  takistuskastis ja suletakse lülili  $K$  võimalikult lühikeseks ajaks, millest parajasti piisaks galvanomeetrihälbe suuna kindlakstegemiseks. (Üldiselt näitab galvanomeeter  $G$  hälvet voolu ühendamisel, kui liikuva kontaktiga pole juhuliselt tabatud just „nullseis“). Meeles tuleb pidada galvanomeetrihälbe suund. Nüüd võetakse teine takistus  $r''$  ja toimetatakse samuti, kuni leitakse kaks mitte üle 30% erinevat takistust  $r'$  ja  $r''$ , mille kohta selgus, et ühe puhul neist voolu ühendamisel galvanomeetri hälve oli ühes, teisel korral aga vastupidises suunas. Nüüd jäetakse takistuskasti üks neist sobivaist takistusist  $r$  ja otsitakse takistustraadil kaks liikuva kontakti asendit ( $l'$  ja  $l''$  cm traadi otsast loetud), milles galvanomeetri hälbed on vastusuunalised, ning asutakse siis koondama seda vastusuunaliste hälvete

piirkonda ( $l'$  ja  $l''$ ), milles peab leiduma nullseis. Mida väikesem on  $l'$  ja  $l''$  erinevus, seda täpsam on mõõtmine.

Katse kordamisel seatakse takistuskastis ligikaudu  $r = X$ . Nii saadud tulemus on täpsam eelmisest, sest liikuva kontakti mõlemad asendid  $l'$  ja  $l''$  peavad nüüd sattuma takistustraadi keskkoha ümbrusse.

Et kõrvaldada takistustraadi ebaühtlusest tingitud vigu, võib traadi ümber pöörata, s. t. otsad  $A$  ja  $C$  vahetada, ja endisi vaatlusi korrata.

## 49. Lahused.

Gramm-molekuliks (moliks), gramm-aatomiks ja gramm-ekvivalentiks nimetatakse seda hulka ainet, mille kaal on niipalju gramme, kui suur on selle aine molekul-, aatom- või ekvivalent-kaal.

Olgu  $K$  lahustunud aine kaal ja  $L$  seejuures saadud lahuse kaal, siis  $p = \frac{K}{L}$  ehk 0/0-des  $100 \frac{K}{L}$  on lahuse kontsentratsioon kaalu järele. Tavalisem viis on avaldada lahuse kontsentratsioon niiviisi, et antakse, kui palju on lahustunud ainet lahuse ruumala ühikus. Olgu  $K$  lahustunud aine hulk ja  $V$  lahuse ruumala, siis on lahuse kontsentratsioon ruumala järele  $c = \frac{K}{V}$ .

Olgu seejuures lahuse tihedus  $s$ , siis

$$c = ps.$$

Mõnikord on otstarbekohasem anda lahuse ruumala ühikus lahustunud aine hulk  $m$  gramm-molekulides (molides), samuti ka gramm-ekvivalentides. Kui  $A$  on aine gramm-molekul resp. gramm-ekvivalent, siis  $m = \frac{c}{A} = \frac{ps}{A}$ .

On aga  $p$  avaldatud 0/0-des,  $c$  grammides 100  $\text{cm}^3$  kohta ja  $m$  nagu tavalisesti gramm-molides 1  $l$  kohta, siis  $m = \frac{10 ps}{A} = \frac{10 c}{A}$ .

Normaallahuseks on lahus, kui 1 liitris lahuses on lahustatud 1 gramm-ekvivalent ainet.

## 50. Elektrolüütide elektrijuhtivus.

Tarvitusele on võetud metallide jaoks anda nende eritakistus, sest metallide takistus leiab sagedat tehnilist rakendamist. Teisiti on lugu elektrolüütidega: teoreetilisest seisukohast peamiselt huvitab meid nende erijuhtivus. F. Kohlrausch'i ettepanekul defineeritakse elektrolüütide erijuhtivus järgmiselt: Elektrolüütide erijuhtivuseks nimetatakse pöördarvu takistusega, mille omab 1 cm pikkune ja 1 cm<sup>2</sup> läbilõike pinnaga samm. Seda erijuhtivust on hakatud tähistama  $\kappa$ . Olgu  $l$  cm kõrge ja  $f$  cm<sup>2</sup> läbilõikega vedelikusamba takistus  $R$ , siis järgneb ülaltoodud definitsioonist, et

$$\kappa = \frac{l}{fR_{\text{Room}}}.$$

Sageli muutuvad valemid ülevaatlikumaks, kui anda mitte elektrolüüdi erijuhtivus  $\kappa$ , vaid nn. ekvivalent-juhtivus  $\Lambda = \frac{\kappa}{\eta}$ , s. o. erijuhtivus  $\kappa$  jagatud ekvivalent-kontsentratsiooniga  $\eta$ . Ekvivalent-kontsentratsioon  $\eta$  tähendab 1 cm<sup>3</sup> lahuses lahustunud aine hulka, avaldatud gramm-ekvivalentides. Seega on hariliku normaal-lahuse (1 g-ekv./liiter) ekvivalent-kontsentratsioon  $\eta = 0,001$ .

Elektrolüütide erijuhtivus sõltub tunduvalt temperatuurist ja üldiselt kasvab temperatuuri tõusuga, seega just vastupidiselt metallide erijuhtivusele.

Elektrolüütide erijuhtivus leitakse sel teel, et määratakse nende takistus ja alles sellest arvutatakse erijuhtivus.

Ka elektrolüütide takistuse mõõtmiseks tarvitatakse Wheatstone'i silla meetodit, kuid muudetud kujul.

Juhtides elektrolüüdist läbi alalise voolu, lahustub elektrolüüt, kusjuures lahustunud ained kogunevad elektroodidele. Ent viimased annavad polarisatsioonivoolu, mis võib viia valele resultaatile.

Et polarisatsioonivool katse juures segavalt ei saaks mõjuda, seks tarvitatakse F. Kohlrausch'i ettepanekul elektrolüütide takistuste mõõtmisel alalise voolu asemel kiiresti vahelduvat voolu. Vahelduva voolu suuna sageda muutuse tõttu ei saa üldse tekkida polarisatsioon: esimese voolu tõukel tekkinud polarisatsiooni hävitab teise tõuke vastusuunaline vool. Sel puhul ei ole muidugi enam võimalik galvanomeetrit tarvitada. F. Kohlrausch

asendas galvanomeetri telefoniga, mis on pea sama tundlik vahelduvale voolule kui galvanomeeter alalisele voolule, eriti kui võnke arv sek. on ligi 1000. Vahelduva voolu allikana tarvitatakse sumistit, mis koosneb kahest traatmähisest ühise raudsüdamikuga. Primaarmähisesse juhitud alalist elektrivoolu katkestab ja ühendab elektromagnetiline vasar. Seetõttu indutseerub sekundaarmähises vahelduv elektrivool, mida tarvitataksegi siin.

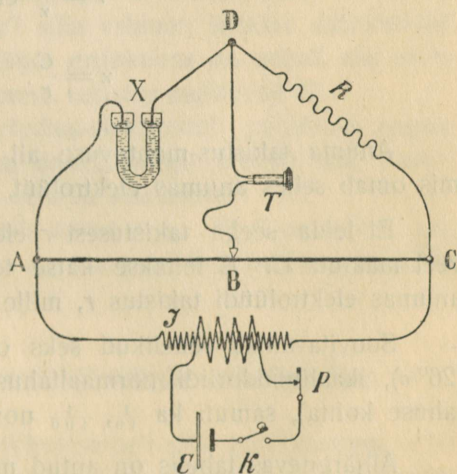
Primaarvool võetakse kuivast elemendist või ühest akkumulaatorist, ent viimasel puhul on tarvis lülida primaarvoolu ahelasse reostaat voolutugevuse reguleerimiseks.

Uuemal ajal tarvitatakse ka elektronтору-generaatorit vahelduva voolu allikana.

Kuigi elektrolüütide takistuse määramiseks võib tarvitada harilikku Wheatstone'i silda, on seks siiski sobivam sild, mille mõõtmistraat (joonisel *AC*) Kohlrausch'i ettepanekul on keritud marmorsilindrile. Liikuvat kontakti moodustab niisuguse silla juures väike rattake. Keerdude arv marmorsilindril on 10. Kui lugeda mõõtmistraadi kogu pikkus võrdseks 1000, siis nullseisu lugemisel leitakse sajad keerdude arvu, kümned ja ühed keerdude osadest, mis tuleb lugeda silindri äärel märgitud astmikult. Mõõtmistraadi silinder on kinnitatud kasti kaanele, millesse on ehitatud ka takistuskaas. Seega ei ole tarvis eri takistuskaasi.

Juuresolev joonis kujutab Wheatstone'i silla lülitust seesugusel kujul, nagu seda tavaliselt tarvitatakse elektrolüütide takistuste määramisel. *J* on sumisti, *AC* — mõõtmistraat, *X* — elektrolüüt, *R* — antud takistus ja *T* — telefon.

Kui viia sumisti tegevusse, kuulub telefonis hääl, mille kõrgus vastab sumisti primaarvoolu katkestamisarvule. Liikuvat kontakti *B* mõõtmistraadil nihutades, võib leida selle asendi, kus



45. joonis.

telefonis hääl ära kaob või miinimumini nõrgeneb. Niisugusel korral maksab seos

$$X : R = (AB) : (BC).$$

Siit arvutatakse  $X$ .

Elektrolüüdi takistuse määramisel tuleb teda hoida erilises anumask. Sagedamini tarvitatakse seks  $U$ -kujulist klaasanumat, kuhu elektrivool juhitakse plaatina-elektroodide kaudu.

Anumas oleva vedeliku takistus sõltub anuma kujust, samuti ka elektrodide suurusest ja kaugusest, ent elektrolüüdi erijuhtivus on neist sõltumatu.

Nagu tahkete kehade juures maksab ka siin seos

$$r = \frac{1}{x} \frac{d}{q},$$

kus  $d$  on elektrodide kaugus,  $q$  — vedeliku läbil.-pind anumask, mis anuma kuju tõttu ei ole igal pool üks ja sama,  $x$  — elektrolüüdi erijuhtivus ja  $r$  — takistus.  $\frac{d}{q} = C$  nimetatakse anuma takistus-mahtuvuseks. Seega

$$r = \frac{C}{x} \text{ ehk}$$

$$x = \frac{C}{r}.$$

Anuma takistus-mahtuvuse all tuleb mõista seda takistust, mis omab selles anumask elektrolüüt, mille erijuhtivus on 1.

Et leida seega takistusest  $r$  elektrolüüdi erijuhtivus, tuleb veel määrata  $C$ .  $C$  leitakse katse teel. Seks määratakse selles anumask elektrolüüdi takistus  $r$ , mille erijuhtivus on antud.

Soovitavamad vedelikud seks on keedusoola küllast lahusk (26<sup>0</sup>/o), kaaliumkloriidi normaallahusk (74,60 g  $KCl$  ühe liitri lahuse kohta), samuti ka  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  norm.  $KCl$  lahust jne.

Alljärgnevas tabelis on antud mõnede lahuste erijuhtivused mitmesuguse temperatuuri juures.

T a b e l.

Tempera- tuur	$H_2SO_4$ maks.	$NaCl$ küllast.	$MgSO_4$ maks.	$KCl$ norm.	$KCl$ $\frac{1}{10}$ norm.	$KCl$ $\frac{1}{50}$ norm.
15°	0,7028	0,2015	0,04555	0,09254	0,01048	0,002243
16	,7151	,2063	4676	,09443	1072	2294
17	,7275	,2112	4799	,09633	1095	2345
18	,7398	,2161	4922	,09824	1119	2397
19	,7522	,2210	5046	,10016	1143	2449
20	,7645	,2260	5171	,10209	1167	2501

Seega toimub elektrolüütide takistuse määramine järgmiselt.

Hästi puhastatud ja selle järele kuivatatud  $U$ -anumasse valatakse vedelik, mille erijuhtivus on antud. Asetades anumasse plaatina-elektroodid nii, et need ulatuksid täiesti üleni vedelikku, lülitakse anum Wheatstone'i silla ühte harru, nagu näha 45. joonisel. Silindrit pöörates nihutatakse liikuvat kontakti silla mõõtmistraadil, kuni häääl telefonis ära kaob. Enamail juhtumeil ei kao häääl telefonis täiesti, vaid tuleb otsida hääle miinimum. Seda on tarvis teha mitu korda, liigutades liikuvat kontakti kord ühelt poolt, teine kord vastusuunas, ja arvutada neist keskmine. Kasutades tuntud Wheatstone'i silla valemit, leitakse elektrolüüdi takistus  $r_1$ . Et selle elektrolüüdi erijuhtivus on antud, siis arvutatakse valemist  $r_1 = C/x$  anuma takistus-mahtuvus  $C$ .

Seejärele kallatakse võrdlus-elektrolüüt pudelisse tagasi, pestakse elektroodid ja anum destill. veega tublisti läbi, kuivatatakse ja kallatakse uuritav vedelik anumasse.

Ka nüüd määratakse selle takistus  $r_2$ . Et  $C$  on leitud, siis, asetades eelmisse valemisse  $r_2$ , arvutatakse  $x$  uuritava vedeliku kohta.

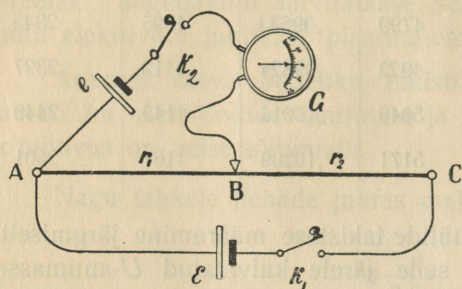
## 51. Elektromotoorsete jõudude võrdlemine.

Olgu 46. joonisel  $AC$  Wheatstone'i silla mõõtmistraat,  $e$  — galvani element,  $E$  — akkumulaatori patarei,  $G$  — galvanomeeter (peegel-galvanomeeter),  $K$  — lülilija,  $B$  — liikuv kontakt mõõtmistraadil.

Olgu seejuures vooluahelad koostatud nii, et akkumulaatori patarei ja elemendi ühenimelised, näiteks plusspoolused on ühendatud täpiga  $A$ , nagu näha jooniselgi.

Olgu  $V_a$  ja  $V_e$  akkumulaatori ja galvani elemendi elektromotoorsed jõud (pinged).

Kui on ühendatud mõlemad voolud, s. o. suletud mõlemate vooluahelate lülid, siis valitseb akkumulaatori ja elemendi



46. joonis.

plusspoolusil ning ühtlasi ka täpis  $A$  ühine potentsiaal, eeldusel, et kõrvaljuhtmete takistus on kaduv-väike. Samal põhjusel on ka potentsiaal täpis  $B$  samane elemendi miinus pooluse potentsiaaliga. Ühtlase läbimõõduga takistustraadil  $AB$  langeb potentsiaal

ühtlaselt  $AC$  suunas. Näiteks tina-akkumulaatori elektromotoorne jõud on  $\sim 2$  volti. Sellisel juhtumil oleks täpi  $A$  ja mõõtmistraadi 10-nda cm vahel potentsiaalide vahe (pinge) 0,2 volti, 20-nda cm — 0,4 V.; 50-nda cm — 1 volt jne. (mõõtmistraadi üldine pikkus = 100 cm). Seepärast peab leiduma  $AC$  vahel täpp  $B$ , kus potentsiaal on samane elemendi miinuspooluse potentsiaaliga, muidugi eeldusel, et akkumulaatori elektromotoorne jõud on suurem või vähemalt võrdne elemendi omaga. Tarvilik tingimus voolu tekkimiseks juhtmes on potentsiaalide erinevus selle otstes; on aga juhtme otstes potentsiaalid võrdsed, siis on ka voolu tekkimine võimatu, olenemata sellest, kas potentsiaali absoluutväärtus on kõrge või madal, positiivne või negatiivne. Järelikult täpi  $B$  ja elemendi miinuspooluse vahel voolu ei ole, ehkki need on ühendatud galvanomeetri kaudu: viimane ei näita hälvet. Küll aga ilmuvad hälbed, kui liikuv kontakt paigutada naabertäpesse  $B'$  ehk  $B''$ , ja pealegi vastusuunalised, sest ühel juhtumil on takistustraadil potentsiaal kõrgem, teisel aga madalam kui elemendi miinuspoolusel. Eelmine asjaolu on kindlaks tagatiseks, et „nullseis“  $B$  on leitud õieti; peetagu seda eriti silmas.

Mida kaugemal  $A$ -st on „nullseis“  $B$ , seda suurem on elemendi elektromotoorne jõud, sest seda

suuremat potentsiaalivahemikku takistustraadil vajati elemendi elektromotoorse jõu tasandamiseks (kompensatsiooniks): elemendi elektromotoorne jõud on võrdeline selle kaugusega. Võib juhtuda, et igas kontakti  $B$  asendis terve takistustraadi  $AC$  ulatusel galvanomeetri hälbed on ühesuunalised (nullseisu ei ole). Siis on elemendi elektromotoorne jõud suurem kui akkumulaatoril ja viimane vajab täitmist.

Olgu takistustraadi  $AC$  pikkus  $l$  ja liikuva kontakti  $B$  kaugus  $A$ -st nullseisus  $l_1$ ,  $E$  akkumulaatori ja  $e_1$  elemendi 1 elektromotoorsed jõud, siis

$$\frac{e_1}{E} = \frac{l_1}{l} \dots \dots \dots (1).$$

Asendades elemendi 1 elemendiga 2, mille elektromotoorne jõud  $e_2$ , olgu nüüd liikuva kontakti nullseisu kaugus  $A$ -st  $l_2$ , siis

$$\frac{e_2}{E} = \frac{l_2}{l} \dots \dots \dots (2).$$

Jagades liikmeti avaldised (1):(2), leiame

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{l_1}{l_2} \dots \dots \dots (3).$$

Selle nn. „kompensatsioonmeetodi“ paremus elektromotoorsete jõudude võrdlemisel seisab selles, et uuritavaist elemendest võetakse voolu väga lühikest aega, nagu selgub alamal, mis ei mõjusta märgatavalt nende elektromotoorsete jõudude muutust, sest üldiselt väheneb elemendi elektromotoorne jõud voolu andmisel.

Leida Leclanché ja Danielli elementide elektromotoorsete jõudude suhe.

Vooluahelad koostatakse 46. joonise järele; seejuures tuleb hoolitseda, et täpiga  $A$  oleksid ühendatud akkumulaatori ja elemendi ühenimelised poolused, näiteks plusspoolused.

Vaatlusi alatakse Leclanché elemendiga, siis Danielli elemendiga, veel kord Leclanché elemendiga, siis teist korda Danielli el. ja lõpuks kolmat korda Leclanché elemendiga.

Lõpptulemusteks võetakse üksikvaatluste aritmeetilised keskmised. Vaatlusi toimetatakse seejuures järgmiselt: enne ühendatakse lülilja  $K_1$  abil akkumulaatori vool, seejärel lülilja  $K_2$  abil elemendi vool, kusjuures voolude kestus olgu võimalikult lühike, millest parajasti piisab galvanomeetri esimese hälbe suuna kindlakstegemiseks.

Kui galvanomeetri hälbe suund on määratud, siis avatakse enne elemendi voolu lülja ja siis alles akkumulaatori voolu lülja. Seda korratakse mitmes liikuva kontakti  $B$  asendis, kuni leitakse takistustraadil vahemik  $B_1B_2$ , mille puhul galvanomeetri hälbed on vastusuunalised. Siis, poolitades vahemiku  $B_1B_2$ , leitakse kaks lähemat täppi, milles galvanomeetri hälbed on vastusuunalised. Katset jätkatakse, kuni leiutatakse „nullseis“.

Märkus.

Danielli element tuleb koostada igaks katseks. Ta koosneb seesmisest urbest anumast, milles asetseb tsinkelektrood tsinkvitrioolilahuses. Välimine anum on vasest, seega on ta ühtlasi ka elektroodiks (+). Välimisse anumasse kallatakse vasevitrioolilahust.

## 52. Elektromotoorsete jõudude võrdlemine Fechner'i järele.

Koostatakse vooluahel ühest võrreldavast elemendist, reostaadist, galvanomeetrist ja lüljast.

Olgu ühe mõõdetava galvani elemendi elektromotoorne jõud  $E_1$  ja sisetakistus  $r_1$  ning reostaadi ja galvanomeetri takistus  $R$ . Voolu ühendamisel tekib tähendatud ahelas vool, mille tugevuse  $i_1$  määrab Ohmi seadus:

$$i_1 = \frac{E_1}{r_1 + R}.$$

Asendades elemendi 1 teise võrreldava elemendiga 2 ja olgu seejuures elemendi 2 elektromotoorne jõud  $E_2$  ja sisetakistus  $r_2$ , siis analoogiliselt eelmisega

$$i_2 = \frac{E_2}{r_2 + R}.$$

Kui valida küllalt suur ahela välistakistus (reostaadi takistus  $R$ ) võrreldes elemendi sisetakistusega  $r_1$  resp.  $r_2$ , võib viimaseid mitte arvestada, seega

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{i_1 (R + r_1)}{i_2 (R + r_2)} = \frac{i_1}{i_2},$$

s. o. mõlemate elementide elektromotoorsed jõud suhtuvad kui vastavad voolutugevused. Et voolutugevused  $i_1$  ja  $i_2$  on võrdelised galvanomeetri hälvetega  $\alpha_1$  ja  $\alpha_2$ , siis annab galvanomeetri hälvete suhe elementide elektromotoorsete jõudude suhte.

Seega on katse käik järgmine :

Lülitakse eespoolkirjeldatud vooluahelasse galvani element 1, ühendatakse vool ja loetakse galvanomeetri hälve  $\alpha_1$ . Asendades elemendi 1 elemendiga 2, kusjuures muud ahela osad jäetakse muutumatuks, ühendatakse vool ja loetakse galvanomeetri hälve  $\alpha_2$ . Suhe  $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$  annabki otsitava elektromotoorsete jõudude suhte.

### 53. Danielli elemendi elektromotoorse jõu määramine.

Elektrivoolu läbimisel laguneb elektrolüüd, kusjuures lagunemiseks tarvismineva energia annab elektrivool.

Faraday leiutas, et lahutatud aine hulk  $q$  on võrdeline voolu tugevusega  $J$  ja voolu kestusega  $t$ :

$$q = kJt \dots \dots \dots (1),$$

kus  $k$  on proportsionaalsusekoefitsient. Olgu  $J = 1$  ja  $t = 1$ , siis

$$q = k.$$

See tähendab:  $k$  on arvuliselt võrdne aine hulgaga, mida lahutab 1 kulon elektrit. See on aine elektrokeemiline ekvivalent. Üldiselt on iga aine elektrokeemiline ekvivalent isesuurune.

Edasi avastas Faraday, et  $k$  on võrdeline aine keemilise ekvivalendiga, ehk kui viimast tähistada  $Q$ , siis võime valemi (1) kirjutada järgmiselt:

$$q = cQJt,$$

kus  $c$  on juba konstant, mis on kõigi ainete jaoks üks ja sama.

Üldisest keemiast teame, et

$$Q = \frac{A}{n},$$

kus  $A$  on aine aatomikaal,  $n$  selle aine valentsus. Seega võidakse Faraday seadusele anda järgmine kuju:

$$q = c \frac{A}{n} Jt. \dots \dots \dots (2).$$

On  $q$  mõõdetud g-des,  $J$  — amprites,  $t$  — sekundites, siis  $c = 1,036 \cdot 10^{-5}$ , seega

$$q = 1,036 \cdot 10^{-5} \frac{A}{n} e,$$

kus  $e = Jt$  on läbivoolanud elektri hulk kulonites.

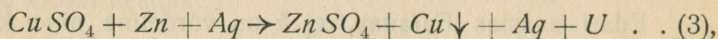
$\frac{A}{n} g \left( \frac{\text{Aatomkaal}}{\text{Valentsus}} \right)$  nimetatakse aine gramm-ekvivalentiks (analooiliselt gramm-aatom, gramm-molekul).

Faraday seadusest järgneb: Kui lahutatud aine hulk on  $= 1$  gramm-ekvivalent, mis võrdne  $Q = \frac{A}{n} g$ , siis läbivoolanud elektri hulk on  $e = \frac{1}{1,036 \cdot 10^{-5}} = 96\,540$  kulonit, s. o. 1 gramm-ekvivalenti lahutamiseks on tarvis 96 540 kulonit. Seda arvu, mis on maksev kõigi ainete kohta, nimetatakse Faraday arvuks.

Nagu eespool tähendatud, annab lahutamiseks tarvismineva energia elektrivool. Galvani elementides toimub ümberpööratud nähtus: keemilise energia kulul tekib elektrivool. Seega on võimalik elementides toimival keemilisel protsessil tekkinud soojuse hulgast arvutada elemendi elektromotoorset jõudu. Kasutades termodünaamika 1. põhilause, arvutas W. Thomson sel teel mõnede elementide elektromotoorsed jõud.

### Danielli elemendi elektromotoorse jõu määramine Thomson'i järele.

Danielli elemendis kulgeb järgmine keemiline protsess:



kus  $U$  tähendab selle reaktsiooni juures vabanenud soojuse hulka. Olgu  $Q$   $\text{Zn}$  resp.  $\text{Cu}$  gramm-ekvivalent,  $U$  soojuse hulk mõõdetud džaulides, mis vabaneb 1 gramm-ekvivalenti  $\text{Zn}$  lahustusel resp.  $\text{Cu}$  sadestusel. Ühe gramm-ekvivalenti keemiliseks muutumiseks on tarvis, et sellest läbi voolaks 96 540 kulonit elektrit. Et galvani elemendis, mille elektroodide vaheline pinge on  $V_1 - V_2 = E$ , läbi voolaks 96 540 kulonit, seks on tarvis teha tööd 96 540  $E$  volt-kulonit = 96 540  $E$  džauli.

Elemendis toimub see töö reaktsiooni soojuse arvel, seepärast

$$96\,540 E = U,$$

ehk kui  $u$  on soojuse hulk (džaulides), mis vabaneb  $\frac{Q}{96\,540}$  grammi  $\text{Zn}$  lahustusel ja  $\frac{Q}{96\,540}$  grammi  $\text{Cu}$  sadestusel, s. o.  $u = \frac{U}{96\,540}$ , siis

$$E = u \dots \dots \dots (4).$$

Elemendi elektromotoorne jõud võrdub seega soojuste hulga, mis vabaneb  $\frac{Q}{96540}$  grammi  $Zn$  lahustusel, resp.  $Cu$  sadestusel.

Katse korraldatakse järgmiselt:

Dewar'i anumasse kallatakse  $CuSO_4$ -lahus, mille hulk ( $cm^3$ ) on määratud mõõtklaasiga või kaalumise teel, ja mõõdetakse lahuse algtemperatuur.

Selle järele lastakse  $CuSO_4$  lahusesse liivapaberiga puhastatud ning kaalutud tükk  $Zn$  ja kaetakse anum vatiga, millest läbi pistetud termomeeter ja segaja.

Nüüd oodatakse, kuni  $Zn$  lahustunud, mis sellest tunda, et temperatuur enam ei tõuse. Viimane, lõpptemperatuur, loetakse ja arvutatakse reaktsiooni soojust, võttes lahuse erisoojuse samaseks vee omaga (=1).

Samuti arvutatakse  $u$ , mis võrdne elemendi elektromotoorse jõuga  $E$ .

$u$  arvutatakse lahustunud  $Zn$  kui ka sadestunud  $Cu$  jaoks, milleks viimane tuleb lahusest välja filtrida, pesta, kuivatada ja kaaluda. Mõlemal juhtumel saadakse, muidugi katsevigade piires, võrdsed arvud.

Märkus:  $Zn$  aatomkaal on 65,4  
 $Cu$  „ „ „ 63,6

## 54. Voolusoojus.

Elektrihulga  $e$  ümberpaigutusel täpist, mille potentsiaal on  $V_1$ , täppi potentsiaaliga  $V_2$ , kulub tööhulk  $A$ , kusjuures

$$A = e (V_1 - V_2) \dots \dots \dots (1).$$

Kui  $e$  on mõõdetud kulonites ja  $V_1$  ning  $V_2$  voltides, siis väljendub  $A$  džaulides. Tähistame potentsiaalivahe  $V_1 - V_2 = V$ . Läbi-voolanud elektri hulk kulonites

$$e = It,$$

kus  $J$  on voolu tugevus ampreis ja  $t$  voolu kestus sekundeis. Seega

$$A = J V t \text{ džauli } \dots \dots \dots (2).$$

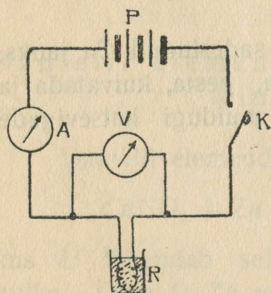
$A$  on töö, mida vool peab tegema juhtme takistuse ületamiseks. Selle tehtud töö tulemusena vabaneb Joule'i seaduse järele juhtmel vastav soojusehulk  $Q$ . On tehtud töö hulk 1 džaul, siis vabanenud soojuse hulk on  $c$  kalorit,

$$Q = cA = cJt \text{ kal} \dots \dots \dots (3).$$

Kui  $J = V = t = 1$ , siis  $Q = c$ ;  $c$  on seega soojuse hulk, mis vabaneb 1 sekundi kestel juhtmel, kui teda läbib 1-ampriline vool 1-voldilise pinge juures. Joule'i seaduses esineb ta võrdelisuse-egurina.

Tähendatud tegurit Joule'i seaduses võib määrata katseliselt.

Vooluahel koostatakse (47. joonis) vooluallikast  $P$ , takistustraadist  $R$ , millel vabaneb soojus  $Q$ , ampermeetrist  $A$  ja voltmeest  $V$  (voltmeeter  $V$  tuleb lüüda rööbiti takistustraadiga  $R$ ).



47. joonis.

$R$  on kalorimeetris, mida ümbritseb viltkate kaitseks soojuse vahetuse vastu välisõhuga.

Kalorimeeter täidetakse umbes kuni 1 sentimeetrini kaanest destilleeritud veega, mille temperatuur olgu paar kraadi madalam toatemperatuurist. Seejärel paigutatakse kalorimeetrisse kuumendaja keha (takistustraad  $R$ ), termomeeter ja segaja. Segatakse vett kalorimeetris tublisti ja seejärel loetakse tema alg-

temperatuur  $T_1$ . Siis ühendatakse vool ja märgitakse aeg  $t_1$ . Katse kestel segatakse vett kalorimeetris ja loetakse iga poole minuti järele pinge  $V$  voltmeetrilt ning voolutugevus  $J$  ampermeetrilt. On vee temperatuur kalorimeetris tõusnud ca  $4^\circ$  võrra, katkestatakse vool, samal ajal loetakse aeg  $t_2$ . Selle järele segatakse mõned korrad vett ja loetakse tema lõpptemperatuur  $T_2$ . Nüüd mõõdetakse veehulk  $M$  kalorimeetris. Kalorimeetris vabaneb soojusehulk

$$Q = M(T_2 - T_1) \dots \dots \dots (4).$$

See tekkis katse vältel  $t = t_2 - t_1$  sek. kestel elektri-energia poolt tehtud töö  $A$  arvel. Seega otsitav

$$c = \frac{Q}{A} = \frac{M(T_2 - T_1)}{J \cdot V \cdot t} \dots \dots \dots (5).$$

Täpsamate mõõtmiste juures tuleb arvestada ka kalorimeetri-  
 anuma, traadi j. t. tarvitatud soojuste hulka. Lähemalt selle  
 kohta 24. töös.

Ülesanne. Mitu džauli on vaja teha tööd, et saada  
 0,24 g-kal. soojust, kui 427 kg<sup>\*</sup>.m tööd annavad 1 kilokalori soojust.

## 55. Tööühikud.

Töö defineeritakse kui läbikäidud tee pik-  
 kuse korrutis mõjuva tungi projektsiooniga tee  
 suunas. Mõõteliselt on seega töö: tung  $\times$  pikkus (= g cm<sup>2</sup> sek<sup>-2</sup>).

Absoluutses ehk CGS-süsteemis on tungiühikuks düün  
 (1 düün =  $\frac{1}{981}$  g), pikkuseühikuks cm, tööühikuks on seega erg:

$$\text{Erg} = \text{düün} \cdot \text{cm}.$$

Et erg on praktiliseks tarvitamiseks liiga väike, siis tarvi-  
 tatakse sagedamini

$$\text{džauli} = 10^7 \text{ ergi}.$$

Valides tungiühikuks kg<sup>\*</sup> (tung) = 0,98 · 10<sup>6</sup> düüni ja pik-  
 kuseühikuks meetri, saadakse tööühikuks kilogramm-meeter:  
 kg<sup>\*</sup> · m = 0,98 · 10<sup>6</sup> düüni · 10<sup>2</sup> cm = 9,8 · 10<sup>7</sup> ergi = 9,8 džauli.

Võimsus (effekt) on 1 sek kestel tehtud töö hulk.  
 CGS-süsteemis on võimsuseühikuks  $\frac{\text{erg}}{\text{sek}}$ . Praktiliselt tarvitatakse  
 võimsuseühikuna

$$\text{vatt} = \frac{\text{džaul}}{\text{sekund}} = 10^7 \frac{\text{erg}}{\text{sek}}.$$

Sageli tarvitatakse ka suuremaid ühikuid

$$100 \text{ vatti} = \text{hektovatt ja}$$

$$1000 \text{ vatti} = \text{kilovatt}.$$

Varemalt tarvitati võimsuseühikuna ka hobusejõudu (HP) ehk

$$\frac{75 \text{ kg}^* \cdot \text{m}}{\text{sek}}.$$

Arusaadav, et võimsuse korrutis ajaga annab tehtud töö  
 hulga, näiteks

$$\text{džaul} = \text{vatt} \cdot \text{sek}.$$

Praktikas avaldatakse väga sageli tööhulk kilovatt-tundides:

$$\text{Kilovatt-tund} = 1000 \cdot 60 \cdot 60 \text{ džauli} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ džauli}.$$

Nii leiab tarvitamist kilovatt-tund eriti sageli elektri-energia mõõtmise juures.

Elektrivoolu võimsuse annab voolutugevuse korrutis pingega. On voolutugevus mõõdetud ampreis, pinge voltides, siis saadakse voolu võimsus vattides. Vatt voolu võimsuse ühikuna nimetatakse sageli volt · ampriks (alal. voolu puhul).

$$\text{Volt} \cdot \text{amper} = \text{vatt}.$$

Nii on siis

$$\text{džaul} = \text{volt} \cdot \text{amper} \cdot \text{sek}.$$

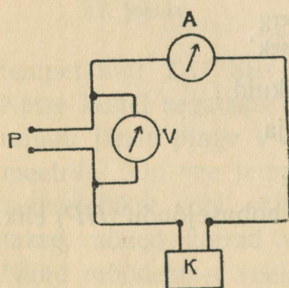
$$\text{Kilovatt-tund} = \frac{\text{volt} \cdot \text{amper} \cdot \text{tund}}{1000}.$$

## 56. Elektrikeetja.

Elektrikeetjas on kahekordsete metallseinte vahele keritud takistustraadist kuumendaja keha, mille takistus kohandatud elektrivõrgu pingele (näit. 220 V), nii et temast võib läbi juhtida võrgu voolu otse, ilma eeltakistuseta.

Ülesanne 1. Arvutada elektriga vee keetmise juures tarvitatud energia hulk  $A$  (§ 55), ja kui palju läheks see kohaliku elektri hinna juures maksma.

Vooluahel koostatakse 48. joonisel kujutatud skeemi järele, kus  $K$  on elektrikeetja,  $A$  — ampermeeter,  $P$  — vooluallikas (kahvel ühendamiseks elektrivõrguga),  $V$  — voltmeeter. Eriti peetagu silmas, et ampermeeter tuleb lülida vooluahelasse järjestikku keetjaga, voltmeeter aga rööbiti. Seejärele kallatakse elektrikeetjasse selle suuruse järele 500 — 1000 cm<sup>3</sup> vett, mille hulk määratakse mõõtklaasiga. Nüüd mõõdetakse vee algtemperatuur  $T_1$ , kontrollitakse veelkord, kas vooluahel on õieti koostatud, ja ühendatakse vool; samal hetkel loetakse taskukellalt aeg  $t_1$  ja märgitakse üles. Katse kestel loetakse voltmeetrilt pinge  $V$  ja ampermeetrilt voolutugevus  $J$  iga minuti järele. Kui vesi keetjas on omandanud soovitava temperatuuri  $T_2$ , märgitakse aeg  $t_2$  ja katkestatakse vool.



48. joonis.

Nüüd arvutatakse kõigist lugemeist keskmine pinge  $V$  ja keskmine voolutugevus  $J$ . Samuti arvutatakse voolu kestus  $t = t_2 - t_1$ .

Tarvitatud energia arvutatakse valemist

$$A = JVt.$$

Kui  $J$  on avaldatud ampreis,  $V$  voldes ja  $t$  tundides, siis leitakse  $A$  vatt-tundides.

Keetmise kulu arvutamisel tuleb tarvitatud energia väljendada muidugi antud hinnale vastavais ühikuis ja siis sellega korrutada.

Ülesanne 2. Arvutada antud keetja kasutegur  $\eta$  (‰), kus kasuteguri  $\eta$  all tuleb mõista arvu, mis näitab, mitu ‰ kulutatud energiat  $A$  keetjas tarvitati vee temperatuuri tõstmiseks, kuna ülejäänud osa kasutamata kiirgus välja keskkonda.

Oli keetjasse kallatud  $M$  grammi vett, mis soojenes  $T^\circ$  võrra, siis soojusehulk, mis vesi sai voolult, on  $MT$ . Teiselt poolt, tarvitatud elektri-energia on  $cJVt$  kalorit.

Seega on 
$$\eta = \frac{MT}{cJVt} 100\%$$

kus  $c = 0,24$ . Siin tuleb  $t$  avaldada sekundeis.

## 57. Hüsteresis.

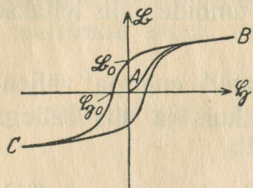
Poolisse juhitud elektrivool tekitab poolis magnetivälja, mille tugevus olgu  $H$ . Asetame pooli raudkeha, siis magneetub ta. Olgu seejuures ta magneetimisintensiivsus  $J$ . Suhet  $x = \frac{J}{H}$ , nagu nägime 116. leheküljel, nimet. magn. vastuvõtlikkuseks.

$\mu = 1 + 4\pi x$  nimetatakse raua permeabiliteediks ehk läbitungitavuseks. Korrutist  $H\mu = H + 4\pi J = B$  nimetatakse magnetiliseks induktsiooniks.

Suhe  $\mu = \frac{B}{H}$  omab väga suure tähtsuse elektrotehnikas. Ta ei ole konstantne, sest sõltub tunduvalt  $H$ -st. Parema kujutelma sellest sõltuvusest saame, kui kujutame selle graafiliselt nn.  $H$ - $B$  kõverana (49. joon. on teljed tähist.  $\mathfrak{H}$  ja  $\mathfrak{B}$ -ga).

Kui muudame  $H$  järk-järgult nullist kuni mingi maksimumi ja tagasi nullini ning siis  $H$  suuna muutes suurendame teda

kuni endise maksimumini ja tagasi nullini ning veelkord  $H$  kuni maksimumini, siis saame kõvera, mida kujutab 49. joonis. Seda kõverat kutsutakse hüsteresisekõveraks. Nagu joonisest näha, ei kata see kõver end tagasi tulles. Osa sellest kõverast



49. joonis.

$AB$  on omane vaid rauale, mis varem ei ole olnud magneeditud. Ühtlasi näeme sellest kõverast, et juhtumil, kui  $H=0$ , ei ole  $B$  null, seega on siis ka raud magnetiline, kui välimine magnetiväli on 0. Joonisel: kui  $H=0$ , siis  $B=A\mathfrak{B}_0$  (remanentne magnetism). Et hävitada remanentset magnetismi, tuleb  $H$ -le anda

ümberpööratud suund. Viimase suurus iseloomustab seda jõudu, mis magnetismi rauas alal hoiab (koertsitiivjõud).

Kirjeldatud nähtust tuntakse hüsteresise nime all.

Warburg'i seadus. Hüsteresisekõvera poolt eraldatud pindala on võrdeline energia hulgaga, mida raud ümbermagneetamiseks tarvitab. See energia avaldub rauas soojusena. Warburg'i järele võrdub see energia kadu  $W$ :

$$W = \frac{1}{4\pi} \int H dB \text{ erg/cm}^3,$$

kus  $\int$  tuleb võtta rajades  $+B_{\max}$  kuni  $-B_{\max}$  ja tagasi  $+B_{\max}$ . Tihti kasutatakse  $W$  arvutamiseks Steinmetz'i empiirilist valemit:

$$W = \gamma B_{\max}^{1.6} \text{ erg/cm}^3.$$

Konstant  $\gamma$  on raudpleki puhul  $= 0,0013$  kuni  $0,0020$ . Suurte  $B$ , samuti ka väga väikese  $B$  puhul ei ole viimane valem maksev.

Käesoleva töö ülesanne on:

- 1) määrata antud raua kohta  $B$  sõltuvus  $H$ -st ning kujutada seda graafiliselt;
- 2) leida  $\mu_{\max}$  ning määrata, millise  $H$  juures see  $\mu_{\max}$  esineb.

Hüsteresise määramine ringikujulises rauas.

See meetod on lihtsamaid tegelikuks tarvitamiseks. Tarvilik magnetiväli saadakse siin ringikujulises poolis (primaarmähis), millesse juhitakse elektrivool. Poolis asetseb samakuju-line kinnine raudrõngas. Magn. induktsiooni  $B$  mõõtmine toimub ballistilise galvanomeetri abil, mis ühendatakse katse puhul sama raua ümber mähitud nn. sekundaarpooliga. Iga  $H$  muu-

tuse puhul tekib viimases poolis induksioonivool, kusjuures induksioonivoolu elektromotoorne jõud on võrdeline tungjoonte arvuga  $N$ , mida pool 1 sek. kestel lõikab, ja pooli keerdude arvuga  $z$ :

$$e = z \frac{dN}{dt}$$

ehk

$$\int edt = zN \dots \dots \dots (1).$$

Olgu  $q$  pooli läbilõige,  $B$  — magnetiline induksioon, siis on tungjoonte arv, mis läbib pooli, võrdne  $qB$ . Asetades selle  $N$  asemele valemisse (1), leiame

$$\int edt = zqB \dots \dots \dots (2).$$

Olid selle pooli traadi otsad ühendatud galvanomeetriga, siis näitas see voolu muutuse hetkel hälvet. Galvanomeetrist läbi voolanud elektri hulk

$$Q = \int idt = \int \frac{edt}{R}$$

ehk, asetades  $\int edt$  asemele selle väärtuse valemist (2), leiame:

$$Q = \frac{zqB}{R} \dots \dots \dots (3),$$

kus  $R$  on ahela täielik takistus. Tarvitati seejuures ballistilist galvanomeetrit, siis on selle hälve ühtlasi võrdeline ka läbivoolanud elektri hulga:

$$Q = C_{\beta} \alpha.$$

$C_{\beta}$  — on ballistiline taandamistegur,  $\alpha$  — hälve (vt. ballistiline galv.). Valem (3) annab

$$B = \frac{R}{zq} C_{\beta} \alpha \dots \dots \dots (4).$$

Kõik siin esinevad suurused tuleb avaldada absoluutseis elektromagn. ühikuis. Oli  $R$  avaldatud oomides ja  $C_{\beta}$  — kulon/cm, siis, arvestades, et 1 oom =  $10^9$  abs. elektromagn. ühikut ja 1 kulon =  $10^{-1}$  abs. ühikut, leiame

$$B = \frac{10^8 R}{zq} C_{\beta} \alpha \dots \dots \dots (5).$$

Valemis (5) on kõik peale  $B$  otsesel teel mõõdetavad suurused. Tähendab, mõõtes galv. hälbe  $\alpha$ , võime siit arvutada vastava  $B$ .

Magneeditavale rauale antakse rõnga kuju. Rõnga välimisest ja sisemisest läbimõõdust  $d_1$  ja  $d_2$  leitakse läbimõõt

$$d = \frac{1}{2} (d_1 + d_2),$$

millest raua pikkus saadakse valemi abil:

$$l = \pi d.$$

Raua ruumala  $V$  arvutatakse raua läbimõõdust ja pikkusest. Raudrõnga ümber on mähitud spiraalitaoliselt peenike isoleeritud traat, mis katse ajaks ühendatakse ballistilise galvanomeetriga. Selle mähise (sekundaarmähis) keerdude arv on antud. Olgu see  $z$ . Sekundaarmähise ümber asetseb teine nn. primaarmähis, millesse juhitakse magnetiseeriv vool. Olgu primaarmähise keerdude arv  $v$ . Keerdude arv  $n$ , mis tuleb ühe sentimeetri pikkuse kohta, arvutatakse rõnga ümbermõõdust  $l$  ja kogu keerdude arvust  $v$ :

$$n = \frac{v}{l}.$$

Magnetiväli  $H$ , mille tekitab primaarpoolis vool, arvutatakse valemist

$$H = \frac{4\pi}{10} ni \dots \dots \dots (6),$$

kus  $i$  on voolutugevus ampreis (tuletatud Biot-Savart'i seadusest)

Tähendatud valemid on vaid siis maksvad, kui poolide keerud tihedalt üksteise ligi on mähitud.

Elmisest järgneb  $B$  mõõtmise viis:

Mõõtes ampermeetri abil  $i$ , arvutame valemi (6) abil  $H$ . Iga  $i$  muutuse hetkel saadud hälve võimaldab valemi (5) abil arvutada  $B$ .  $B$  olenevus  $H$ -st tuleb graafiliselt kujutada.

Voolutugevuse reguleerimiseks primaarvoolu ahelas on reostaat. Reostaadi takistuse muutmine toimub lisaharutakistuste juurdelülamise abil. Harutakistusi juurde lülides suureneb järsku voolutugevus. Voolu suuna muutmine primaarpoolis toimub kommutaatori abil.

Sekundaarpool ühendatakse reostaadi kaudu ballistilise galvanomeetriga. Selle ahela takistust katse kestusel muuta ei või.

Katse käik on seega järgmine:

Pärast kõigi ühenduste kontrollimist ühendatakse primaarvool esimese lüliliga abil. Primaarvool indutseerib sekundaarpoolis induksioonivoolu, mis annab galvanomeetris hälbe. Hälve, samuti ampermeetrilt loetud voolutugevus kirjutatakse üles. Pärast galvanomeetri võnkumiste vaikumist suurendatakse teise lüliliga ühendust andes voolutugevust ning loetakse vastav hälve ning voolutugevus jne. Nii suurendatakse voolutugevust teatud

piirini, iga kord ära märkides galvanomeetri hälbe ja voolutugevuse. Siit alates toimub voolu kahandamine samal viisil, kusjuures igale voolu kahandamisele vastav hälve ja voolutugevus üles märgitakse. On voolutugevus langenud nullini (viimase lülijaga vooluahela katkestamisega) muudetakse voolu suund poolis kommutaatori abil ning korratakse katset uuesti, muutes voolutugevust järk-järgult kuni sama piirini ja tagasi, ning uuesti kommuteerides jätkatakse katset. Otseselt galvanomeetri hälvetest ei saa arvutada induktsiooni  $B$ , sest galvanomeetri hälvetest ei saa arvutada induktsiooni  $B$ , sest galvanomeetri hälve on võrdeline induktsiooni  $B$  juurdekasvuga  $\Delta B$ , mitte aga  $B$ -ga, mis juba varem oli rauas.

Vastab voolutugevusele  $i$  induktsioon  $B$ , siis voolutugevusele

$$i_2 = i_1 + \Delta i$$

vastab induktsioon  $B'$ .

Seejuures on

$$B' = B + \Delta B$$

kus  $\Delta B$  on induktsiooni juurdekasv, mis tekkis voolutugevuse suurenemisel  $\Delta i$  võrra.  $\Delta B$  määratakse valemist:

$$\Delta B = \frac{10^8 \cdot R}{zq} C_\beta \alpha,$$

kus  $\alpha$  voolutugevuse suurenemisel  $i_1$ -st kuni  $i_2$ -ni ( $\Delta i$  võrra) saadud galvanomeetri hälve. Siit saame

$$B' = B + \Delta B = \frac{10^8 \cdot R}{zq} C_\beta (\beta + \alpha).$$

Tähendab, et leida  $B'$ -le vastav hälve, tuleb liita  $B$ -le vastav hälve  $\Delta B$ -le vastava hälbega. Viimases valemis on  $B$ -le vastav hälve tähistatud  $\beta$ . Siit selgub, et mingile induktsioonile  $B$  vastava hälbe leidmiseks tuleb liita kõik eelmised hälbed  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots = \alpha_m$ . Selle meetodi puuduseks on asjaolu, et  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  jne. liitmistel liituvad ka vastavad vaatluse vead, seega suureneb viga ka lõppresultaadis, ning kord tehtud viga esineb ka kõigis järgnevais andmeis.

On mõni hälve liiga suur, nii et see galv. lugemi pikk-silma astmiku piirkonnast välja ulatub, siis loetakse teine, kolmas või neljas hälve  $\alpha_n$ , ning sellest arvutatakse esimene hälve, kasutades seks asjaolu, et üksteisele järgnevate võngete amplituudide suhe on konstantne (sumbumissuhe).

Sumbumissuhe tuleb määrata enne katset või katse lõpul. Näiteks leiti, et  $\alpha_3 = 35$  cm, siis

$$\alpha_1 = \alpha_2 k = k^2 \alpha_3 = k^2 \cdot 35 \text{ cm.}$$

Töö ülevaatlikkuse pärast on tarvis kirjutada saadud andmed tabelina.

### Näide.

Nr.	Voolutugev. ampr.	Galvan. vaikumis-täpp.	Hälbe lugem.	$\alpha$	$\alpha_m$ $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots$	$H$	$B$

Et lihtsustada  $H$ , samuti ka  $B$  arvutamist, seks arvutatakse enne see osa valemit, mis katse juures ei muutu. Näiteks, et leida rida  $B$  väärtusi, mis vastavad hälvetele valemist

$$B = \frac{10^8 \cdot R}{zq} C_{\beta} \alpha,$$

leitakse esiti  $\frac{10^8 R}{zq} C_{\beta}$  arvuline väärtus. Viimase korrutamine vastava  $\alpha$  väärtusega annab  $B$ .

## 58. Vahelduv vool.

Vahelduvaks vooluks nimetatakse iga perioodilist voolu. Teoreetiliselt lihtsam on nn. siinusvool, mida võib avaldada järgmiselt:

$$J = J_0 \sin 2\pi \frac{t}{T} = J_0 \sin 2\pi n t = J_0 \sin \omega t$$

$$E = E_0 \sin 2\pi \frac{t}{T} = E_0 \sin 2\pi n t = E_0 \sin \omega t,$$

kus  $J$  ja  $E$  on voolutugevus ja pinge hetkel  $t$ ,  $J_0$  ja  $E_0$  nende maksimaalsed väärtused,  $T$  periood ehk võnke kestus,  $n$  võnkearv 1 sek ehk sagedus ja  $\omega$  nurk-kiirus ehk ringsagedus. Seejuures

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ ja}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

Tehnikas tarvitatav vahelduv vool on ligikaudu siinusvool.

Niisuguse siinusvoolu saame näiteks traatringi pöörlemisel magnetiväljas. Pöörrelgu homogeenses magnetiväljas, mille tugevus olgu  $H$ , traatring muutumatu kiirusega  $\omega$ . On traatring risti magnetiväljaga, siis läbib teda  $N_0 = FH$  tungjoont, kus  $F$  on traatringi pindala.  $t$  sekundi kestel pöördus traatring nurga  $\omega t$  võrra. Nüüd läbis tast vaid  $N = N_0 \cos \omega t$  tungjoont. See-

juures tekkis traatringis induktsoonivool, mille elektromotoorne jõud  $E$  on võrdeline traatringi läbivate tungjoonte arvu muutusega:

$$E = \frac{dN}{dt} = \frac{d(N_0 \cos \omega t)}{dt} = -N_0 \omega \sin \omega t.$$

Ehk kui mitte arvestada voolu suunda ja tähistada  $N_0 \omega = E_0$ , siis

$$E = E_0 \sin \omega t.$$

Seega tekib ühtlasel traatringi pööramisel magnetiväljas elektromotoorne jõud, mis on aja siinusfunktsioon. Nurka  $\omega t$  nimetatakse faasiks.  $E_0$  on elektromotoorse jõu maksimaalne väärtus.

Sama maksab ka voolutugevuse kohta

$$J = J_0 \sin \omega t.$$

Hetkel  $t$  on voolutugevuse väärtus

$$J = J_0 \sin \omega t.$$

Teatud aja  $T$  pärast on selle väärtus

$$J = J_0 \sin(\omega t + \omega T).$$

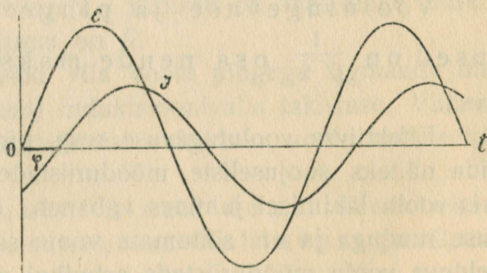
Sama väärtuse, mida omas sin hetkel  $t$ , omab ta ka hetkel  $t + T$ , kui faasi juurdekasv  $\omega T = 2\pi$ , sest

$$\sin(\omega t + 2\pi) = \sin \omega t.$$

Sellest näitest selgub, missugne tähendus on  $T$  ja  $\omega$ .

Parema kujutelma vahelduva voolust annab selle graafiline kujutus. Kui lugeda püstteljel  $J$  resp  $E$  väärtused, rõhtteljel aeg, siis  $J$  ja  $E$  jaoks

saame kõverad, mis kujutatud 50. joonisel. Joonisel kujutatud voolutugevuse ja pinge maksimumid ei ole üheaegsed. Faasi vahe ehk faasinihke nurk nende vahel on  $\varphi$  (faasi võib käsitleda nurgana, kusjuures terve periood on  $2\pi = 360^\circ$ ).



50. joonis.

Vahelduva voolu pinge ja voolutugevus muutuvad nende positiivsete ja negatiivsete maksimaalsete väärtuste vahel. Kesk-

mine voolutugevus  $J_k$  resp. pinge  $E_k$  poole perioodi\*)  $\frac{T}{2}$  kestel on seega

$$J_k = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} J dt \text{ resp.}$$

$$E_k = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} E dt.$$

Siit leiame:

$$J_k = 0,6366 J_0 \text{ ja } E_k = 0,6366 E_0.$$

Seda keskmist nimetatakse elektrolüütiliseks ehk galvanomeetriliseks keskmiseks. Vahelduva voolu tehnikas leiavad need keskmised  $J_k$  ja  $E_k$  väga vähe tarvitamist.

Tegelikult mõõdetakse vahelduva voolu juures efektiivne voolutugevus ja efektiivne pinge.

Effektiivseks voolutugevuseks  $J_e$  ja pingeks  $E_e$  nimetatakse ruutjuurt silmapilksete voolutugevuse resp. pinge ruutude keskmisest, seega

$$J_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T J^2 dt},$$

$$E_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt}.$$

Arvestades, et  $J = J_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$  ja  $E = E_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$ , leiame

$$J_e = \frac{J_0}{\sqrt{2}} = 0,707 J_0 \text{ ja } E_e = \frac{E_0}{\sqrt{2}} = 0,707 E_0.$$

Voolutugevuse ja pinge efektiivsed väärtused on  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  osa nende maksimaalseist väärtustist.

Effektiivse voolutugevuse resp. pinge mõõtmine võib sündida näiteks soojuseliste mõõduriistade abil, sest soojusehulk, mis voolu läbimisel juhtmes vabaneb, on võrdeline voolutugevuse ruuduga ja on sõltumatu voolu suunast. Ka tavaliste vahelduva voolu mõõduriistade astmikul on märgitud voolu tugevuse ja pinge efektiivväärtused.

Olgu vooluahela takistus alalise voolu suhtes  $R$  (oomiline takistus). Olgu seejuures vooluahel vaba eneseinduksioonist ja

\*) Terve perioodi aritm. keskmine on null.

mahtuvusest. Niisuguse ahela kohta maksab ka vahelduva voolu puhul sama seadus, mis alalise voolu puhulgi, s. o.

$$J_e = \frac{E_e}{R}.$$

See seadus maksab iga hetke kohta; sest voolutugevus ja pinge on ühes ja samas faasis, s. o. nende maksimumid ja miinimumid on üheaegsed.

Kui vooluahel omab ainult oomilise takistuse  $R$  ja eneseinduktsiooni  $L$ , siis maksab seos

$$J_e = \frac{E_e}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{E_e}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}},$$

kus  $\omega$  on nurk-kiirus,  $n$  sagedus.

Avaldist  $W = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}$  nimetatakse ahela näiliseks ehk vahelduva voolu takistuseks. Viimane on üldiselt suurem kui ahela oomiline takistus  $R$ .  $\omega L$  nimetatakse induktiivseks takistuseks.

Vool, samuti ka pinge on seejuures siinusekujulised, kuid ei ole enam ühes ja samas faasis, — vool on pingest maha jäänud ehk hilinenud. Olgu seejuures nende faasinihe, mis tavaliselt avaldatakse nurgana,  $\varphi$ , siis

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} \text{ ehk } \varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}.$$

Kui  $R=0$ , siis  $\tan \varphi = \infty$  ehk  $\varphi = 90^\circ$ , s. o. vool on pinge suhtes hilinenud  $90^\circ$  võrra. Seesugust juhtumit on praktiliselt raske teostada, sest et ei ole võimalik saada eneseinduktsiooni ilma oomilise takistusega. Üldiselt on faasinihe nurk  $\varphi$  seda väikesem, mida suurem on  $R$ .

See asjaolu võimaldab viia voolu pingega ligikaudu ühte faasi, lülides ahelasse suure induktsioonivaba takistuse. Viimane nähtus leiab praktilist rakendamist vahelduva voolu vattmeetrite juures.

Koosneb vooluahel ainult oomilisest takistusest  $R$  ja kondensaatorist mahtuvusega  $C$ , siis maksab seos

$$J_e = \frac{E_e}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}},$$

kusjuures faasinihe nurga voolu ja pinge vahel annab seos

$$\tan \varphi = -\frac{1}{\omega CR} \text{ ehk } \varphi = -\arctan \frac{1}{\omega CR}.$$

$\frac{1}{\omega C}$  nimetatakse kapatsitiivseks takistuseks.

Kui  $R = 0$ , siis  $\tan \varphi = -\infty$  ehk  $\varphi = -90^\circ$ , s. o. vool on pingest faasi suhtes eespool  $90^\circ$  võrra.

Koosneb vooluahel oomilisest takistusest  $R$ , eneseinduktsioonist  $L$  ja kondensaatorist mahutuvusega  $C$ , siis maksab Ohmi vahelduva voolu seadus:

$$J_e = \frac{E_e}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

a faasinihke nurk

$$\tan \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Kui  $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ , siis on  $\varphi$  positiivne, s. o. vool jääb pingest faasi suhtes maha; on  $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ , siis esineb ümberpööratud nähtus. On  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  siis ahelal on vaid oomiline takistus.

Kõigis eespooltoodud valemis tuleb kõik suurused avaldada ühes ja samas mõõtudesüsteemis, näiteks praktiliselt ühikuis:  $J_e$  ampreis,  $E_e$  voldes,  $C$  faradites ja  $L$  henrides.

## 59. Vahelduva voolu energia.

Alalise voolu võimsus ehk efekt on võrdne  $EJ$ . Ka vahelduva voolu kohta on see maksev, kuid siin tuleb arvestada, et  $EJ$  väärtus muutub pidevalt. Voolu töö pikema aja  $t$  kestel on võrdne kõigi  $EJdt$  väärtuste summaga, kus  $dt$  on ajaelement, millest koosneb  $t$ . On ahelasse lülitatud eneseinduktsioon, siis ei ole pinge ja voolutugevus faasis, mille tagajärjeks on, et  $E$  ja  $J$  märgid on teatud hetkel isesugused, nii siis  $EJ$  võib mõnikord olla negatiivne, teinekord positiivne.

Olgu elektrom. jõud — pinge — antud valemiga

$$E = E_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad \dots \dots \dots (1)$$

ja olgu voolutugevuse faasinihke nurk võrreldes elektrom. jõuga  $\varphi$ , s. o.

$$J = J_0 \sin \left( \frac{2\pi}{T} t - \varphi \right) \quad \dots \dots \dots (2).$$

Ajaelemendi  $dt$  jooksul antud energia hulk

$$dA = EJdt.$$

Asetades siia  $E$  ja  $J$  asemele nende väärtused valemist (1) ja (2) leiame

$$dA = E_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) J_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \varphi\right) dt \dots (3).$$

Keskmise ühe perioodi  $T$  kestel antud energiast leiame, kui avaldis (3) integrida rajades  $t = 0$  ja  $t = T$  ning jagada  $T$ :

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T E_0 J_0 \sin\frac{2\pi}{T}t \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \varphi\right) dt.$$

Selle avaldise integrimine annab

$$A = \frac{1}{2} E_0 J_0 \cos \varphi \dots (4).$$

Asetame  $E_0$  ja  $J_0$  asemele efektiiv-väärtused  $E_e$  ja  $J_e$ , siis leiame

$$\left(E_e = \frac{E_0}{\sqrt{2}}; J_e = \frac{J_0}{\sqrt{2}}\right)$$

$$A = E_e J_e \cos \varphi \dots (5).$$

$\cos \varphi$  nim. võimsuse teguriks.

Kui antud vool ei ole puhas siinusvool, siis on tähend. tegur muidugi keerulisem avaldis.

Erijuhtumid:

1)  $\varphi = 0$ . Voolutugevus ja pinge on faasis. Voolutugevuse ja pinge korrutis on ikka positiivne suurus, sest mõlemate märgid on igal hetkel ühesugused.

2)  $\varphi = 90^\circ$ . Sellega on  $\cos 90^\circ = 0$ .

Poole perioodi vältusel on pinge märk ühesugune voolutugevuse märgiga, seega nende korrutis positiivne; teise poole perioodi kestel on nende märgid vastupidised, nende korrutis negatiivne. Esimese poole perioodi kestel annab dünamomasin energiat vörgult ja töötab, kui mootor ning kogu energia hulk = 0. Keskmine voolu võimsus  $J_e E_e \cos 90^\circ = 0$ . Niisugune olukord võib tekkida, kui ahela takistus on 0 võrreldes ahela eneseinduktsiooniga.

Nagu nägime, ainult voolutugevusest ja pingest vahelduva voolu võimsust arvutada ei saa. Peab teadma veel faasinihke nurka nende vahel. Otse võib mõõta vahelduva voolu võimsust vattmeetri abil.

Sageli on võimalik arvutada  $\cos \varphi$ . On näiteks ahela oomiline takistus ja eneseinduktsioon antud, siis

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

## 60. Pooli eneseinduktsiooni määramine vahelduva voolu abil.

Kooskõlas voolutugevuse, pinge ja takistuse ühikutega on tarvitusele võetud eneseinduktsiooni ühik henri ( $H$ ). Pooli eneseinduktsioon on 1 henri, kui eneseinduktsiooni pinge on 1 volt voolutugevuse muutusel 1 sek. kestel 1 ampri võrra.

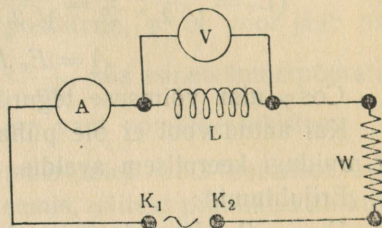
$$1 H = 10^9 [\text{cm}] \text{ el. -magn.} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} [\text{cm}^{-1} \text{ sek}^2] \text{ el. -stat. CGS.}$$

Pooli eneseinduktsiooni võib leida pooli vahelduva voolu ja oomilisest takistusest.

Vooluahel koostatakse vahelduva voolu allikast  $K_1 K_2$  (51. joonis) ampermeetrist  $A$  ja eneseinduktsioonist  $L$ , mille oomiline takistus  $R$  on täpsalt mõõdetud, ning voolutugevuse reguleerijast - reostaadist  $W$ . Voltmeeter  $V$  ühendatakse paralleelselt eneseinduktsiooniga. Ohmi seaduse põhjal võime siis kirjutada:

$$J_e = \frac{E_e}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

millest arvutatakse  $L$ . Oli  $J_e$  mõõdetud ampreis,  $E_e$  voldes, siis  $L$  avaldub henrides.  $J_e$  loetakse ampermeetritl,  $E_e$  voltmeetritl.  $\omega$  arvutatakse valemist  $\omega = 2\pi n$ , kus  $n$  on voolu sagedus.  $n$  on kas antud või leitakse tiirude arvestaja abil masina tiirude arvust.



51. joonis.

## 61. Kondensaatorite mahtuvuste võrdlemine.

Praktiliseks kondensaatori mahtuvuse ühikuks on farad ( $F$ ). Mahtuvus 1 farad on kondensaatoril, mille pinge on 1 volt, kui ta laeng on 1 amper-sekund = 1 kulon.

$$1 F = 10^{-9} [\text{cm}^{-1} \text{ sek}^2] \text{ el. -magn.} = 9 \cdot 10^{11} [\text{cm}] \text{ el. -staat. CGS.}$$

Sageli tarvitatakse ka mikrofaradit ( $\mu F$ ).

$$1 \mu F = 10^{-6} F.$$

Vooluahelal, mis koosneb takistusest  $r$  ja kondensaatorist mahtuvusega  $C$ , on alalise voolu suhtes lõpmata suur takistus.

Vahelduva voolu suhtes on aga tähendatud ahel voolu juhtiv kusjuures kogu ta näiline takistus  $W$ :

$$W = \sqrt{r^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}} \dots \dots \dots (1),$$

kus  $r$  on tarvitatava juhtme nn. oomiline takistus,  $C$  — kondensaatori mahtuvus,  $\omega$  — suurus, mis seotud vahelduva voolu võnke kestusega  $T$  või sagedusega  $n$  (ringsagedus):

$$= \omega \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

Kui  $C$  on väike suurus (harilikult tarvitatava kond. mahtuvus üle  $1 \mu F = 10^{-6}$  faradit ei küüni) ja arvestades, et ühendustraate takistused on väga väikesed, on  $r$  võrreldes  $\frac{1}{C\omega}$  kaduvväike suurus, tähendab võime  $r$  mitte arvestada, seega leiame kirjeldatud ahela takistuse vahelduva voolu suhtes valemist

$$W = \frac{1}{C\omega} \dots \dots \dots (2).$$

Vooluahelasse lülitud kondensaatori takistus vahelduva voolu suhtes on pöördvõrdeline kondensaatori mahtuvusega  $C$ .

Kirjeldatud vahelduva voolu omadust kasutatakse sageli kondensaatorite mahtuvuste võrdlemiseks, sest võrreldes nende takistusi vahelduva voolu suhtes, leitakse nende überpööratud mahtuvuste suhe. On ühe kondensaatori mahtuvus teada, siis võime mistahes kondensaatori mahtuvust ka arvuliselt mõõta.

Mõõtmist ennast toimetatakse järgmiselt:

Kasutades Wheatstone'i silla korraldust, asetatakse mõõdetav kondensaator  $C_1$  ühte harru (52. joonis), tuntud mahtuvusega kondensaator  $C_2$  teise harru, harudeks  $AB$  ja  $BC$  on takistuskastid, reostaadid (ühendustraate takistusi kui väga väikesi suurusi ei tule arvestada).

Vooluallikana kasutatakse väikest induktorit, sumistit  $J$ , voolu näitajana sillas telefoni  $T$ .

Muutes reostaate takistusi, kuni telefon vaikib, s. t. kuni sillaharus, kuhu telefon lülitud, puudub vool, ja tarvitades Wheatstone'i silla valemit nullseisu puhul, leiame

$$\omega_1 : \omega_2 = r_3 : r_4,$$

kus  $r_3$  ja  $r_4$  on harude  $AB$  ja  $AC$  takistused (takistuskastid). Asetame  $\omega_1$  ja  $\omega_2$  asemele nende väärtused valemist (2), leiame

$$\frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} = r_3 : r_4$$

ehk

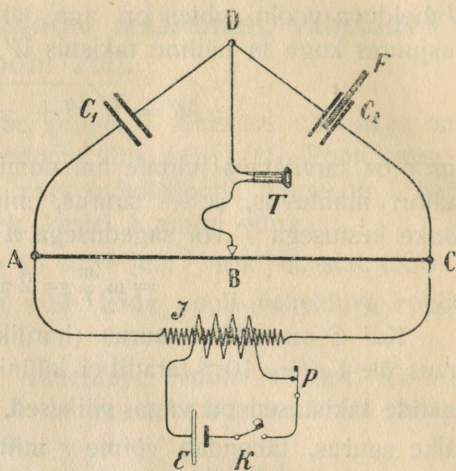
$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{r_4}{r_3},$$

mis annab

$$C_1 = C_2 \frac{r_4}{r_3} \dots (3).$$

Täpsama resultaadi leidmiseks muudetakse näit. takistus  $r_3$  silla nullseisus mõlemale poole, kuni hääle miinimum telefoni halvemaks muutub. Olgu need  $r_3$  väärtused mõlemal juhtumil  $r_3'$  ja  $r_3''$ , siis

$$r_3 = \frac{1}{2} (r_3' + r_3'').$$



52. joonis.

Nagu katsed näitavad, on soovitatav  $r_3$  ja  $r_4$  võtta tuhandeise oomides.

### Vedelikkude dielektrilise jääva määramine.

Eelmise meetodi järele võrreldakse kahe tasaparalleelse kondensaatori mahtuvusi, kusjuures ühe kondensaatori mahtuvus loetakse võrdseks 1.

Nüüd valatakse ühe kondensaatori plaatide vahele mõõdetav vedelik ja võrreldakse jälle. Seejuures leitakse, et viimase kondensaatori mahtuvus suurenes.

Teoriast on teada, et tasaparalleelse kondensaatori mahtuvus

$$C = \frac{\epsilon s}{4\pi d},$$

kus  $s$  on kondensaatori pinna suurus,  $d$  — plaatide kaugus teineteisest,  $\epsilon$  — plaatide vahel asetseva aine dielektriline jääv. Õhu puhul on see võrdne 1. Siit järgneb, et nii mitu korda kui eelmises katses suurenes kondensaatori mahtuvus, kui õhu asemele plaatide vahele asetati uuritav vedelik, nii suur on selle vedeliku dielektriline jääv.

## 62. Elektrivõnkumised.

Ahelas, mis koosneb kondensaatorist  $C$  ja eneseinduktsioonist  $L$  (elektrivõnke-ahel) toimub elektrivõnkumine kestusega  $T$ , mida määrab seos

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

Seda seost tuntakse füüsikas Thomson'i valemi nime all.

Seejuures tuleb  $L$  ja  $C$  avaldada ühtedes ja samus mõõtude-süsteemi ühikuis, näiteks praktilistes:  $C$  — faradites ja  $L$  — henri-des. Kui  $C$  on võetud cm (el.-staat. ü.) ja  $L$  cm (el.-magn. ü.), siis

$$T = \frac{2\pi}{c} \sqrt{L_{cm} C_{cm}},$$

kus  $c = 3 \cdot 10^{10}$  (valguse kiirus cm/sek.).

Asetame kaks elektri-võnke-ahelat teineteise lähedale nii, et näiteks nende eneseinduktsioonipoolid on teineteisega rööbiti. Kui nüüd ühes ahelas (primaarahel) tekitada elektrivõnkumisi, siis

võime tähele panna, et ka teises ahelas (sekundaarahel) tekivad elektrivõnkumised. See energia üleminek ühelt võnkeahelalt teisele on eriti suur siis, kui mõlemate ahelate omavõnke kestused on võrdsed. Siis öeldakse: ahelad on teineteisega resonantsis.

Et võnkumine ühelt ahelalt kanduks üle teisele, seks peab nende vahel olema mingi side. See side võib olla:

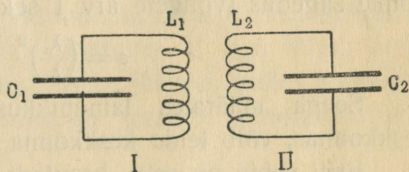
- 1) magnetiline (induktiivne) — ühine magnetiväli;
- 2) galvaniline (konduktiivne) — ühine oomiline takistus;
- 3) elektriline (kapatsitiivne) — ühine kondensaator.

Side võib olla seejuures veel kas nõrk või tugev.

Tugeva sideme puhul avaldab sekundaarahel märgatavat toimet primaarahela võnkumistesse. Siin esineb nn. taas-side. Resonantsiprintsiibi järele on ehitatud nn. lainemõõtjad.

Lainemõõtja koosneb muutliku mahtuvusega kondensaatorist ja vahetatavast eneseinduktsioonist. Paremail lainemõõtjail on kondensaatori-astmikul märgitud mahtuvuse asemel lainepikkus.

Kui lainemõõtja viia resonantsi mõne võnkeahelaga, siis võidakse niisuguselt lainemõõtjalt otse lugeda lainepikkus (võnke sagedus).



53. joonis.

### 63. Dielektrilise jääva määramine Drude' aparaadil.

Elektromagnetiliste lainete levimisel õhus mingisse kesk-konda, näiteks vedelikku, muutub nende lainepikkus lühemaks.

Olgu  $v_0$  elektromagn. lainete levimiskiirus õhus,  $v$  nende kiirus mõnes keskkonnas, siis

$$\frac{v_0}{v} = n$$

on vastava aine murdumisnäitaja.

Maxwell'i järele on pikemate elektromagnetiliste lainete puhul

$$n^2 = \epsilon \dots \dots \dots (1),$$

kus  $\epsilon$  on keskkonna dielektriline jääv.

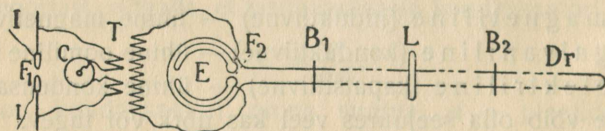
Et üldiselt kiirus  $v = N\lambda$ , kus  $\lambda$  on lainepikkus ja  $N$  võnke sagedus (võngete arv 1 sek.), siis

$$\epsilon = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2 \dots \dots \dots (2).$$

Seega määratas lainepikkuse  $\lambda_0$  õhus ja lainepikkuse  $\lambda$  keskkonnas, võib leida keskkonna dielektrilise jääva.

Eriti sobiv on seks kasutada nn. seisvaid elektromagneti-lisi laineid. Muidugi ei tohi lainepikkus seejuures olla liiga suur, sest vastasel korral on nende mõõtmine tülikas.

Drude' aparati, mille abil on võimalik tekitada seis-vaid elektromagnetilisi laineid, kujutab 54. joonis. Induktori  $J$  abil tekitatakse elektrivõnkumised ahelas, mis moodustatud kondensaatorist  $C$  (Leydeni purk), transformaatori  $T$  primaarmähisest ja sädemikust  $F_1$ . (Tesla transformaatori primaarahel). Trans-



54. joonis.

formaatori sekundaarmähis on ühendatud vibraatoriga  $E$ . Iga vooluvõnge transformaatori sekundaarmähises kutsub esile vibraatoris võnkumise, mille periood  $T$  ja seega ka omalaine sõltuvad vibraatori eneseinduksioonist  $L$  ja mahtuvusest  $C$  seose järele  $T = 2\pi\sqrt{CL}$ . Kuna viimased on vibraatori juures väike-sed, siis toimub elektrivõnkumine vibraatoris väga suure sagedu-

sega, s. o. lühikese perioodiga. Vibraatorit ümbritseb poolringis traatkontur, mille otsad on rööbiti teineteisega sirgu tõmmatud (umbes  $1\frac{1}{2}$  m pikad). Vibraator ühes teda ümbritseva traatkonturiga on asetatud petrooleumisse, et sädeme tekkimine vibraatori sädemikus  $F_2$  oleks korrapärane. Voolu võnkumine vibraatoris indutserib ümbritsevas traatkonturis sama sagedusega võnkumise. Sealt kanduvad võnkumised rööbititõmmatud traatidele  $Dr$ , kus nad levivad peaaegu valguse kiirusega. Peegeldudes teisel pool otses, tekivad interferentsi tõttu traatidel seisvad elektromagnetilised lained, nagu Kundt'i torus seisvad õhulained (vt 56. lehekülg). Seejuures on veel tarvis, et traadipaari pikkus  $l$  võrduks  $k\frac{\lambda}{2}$ , kus  $k = 1, 2, 3 \dots n$ . (täisarv poollaineid). Teiste sõnades, traadipaar peab moodustama võnkeahela, mille eneseinduktsioon  $L$  ja mahtuvus  $C$  on valitud nii, et ta oleks resonantsis voolu võnkumisega vibraatoris. Mahtuvus  $C$  aga sõltub keskkonna (õhk, õli j. n. e.) dielektrilisest jäävast, milles asetsevad traadid. Sellekohaselt tuleb valida ka traatide eneseinduktsioon (pikkus).

Nagu Kundt'i torus, võib ka siin tähele panna paisu- ja sõlme-kohti.

Seisvate lainete olemasolu võib siin nähtavaks teha väikese neoontäitega Geissleri toru  $L$  abil, mis tuleb seks asetada traatide vahele risti nendega nii, et toru elektroodid moodustaksid traatidega liikuva kontakti. Asetades niisuguse toru paisu lähedale, hakkab ta seal helenduma, kuna sõlmes ei ole helendumist.

Sõlmekohtadele võib asetada silla, milleks võib olla vasktraat, ilma et see märgatavat mõju avaldaks seisvaise laineisse (s. o., resonants jääb püsima). Silla asetamine paisu hävitab täielikult resonantsi.

Kahe kõige lähema sõlme kaugus resp. paisu kaugus teineteisest on võrdne  $\frac{\lambda}{2}$ . Seega mõõtes neid kaugusi üks kord, kui traadid on õhus, teine kord, kui nad on mingis vedelikus, võib leida lainepikkused õhus ja vedelikus.

Katse läbiviimine toimub seega järgmiselt. Induktori primaarvoolu ühendamise järele seatakse mikromeetriliste kruvide abil sädemikkude  $F_1$  ja  $F_2$  kaugused nii, et neist sädemed üle hüppaksid. Eriti täpsat reguleerimist vajab vibraatori sädemik  $F_2$  (kaugus umbes 0,5 mm).

Seejärele paigutatakse Geissleri toru traatidepaarile umbes 15 cm kaugusele vibraatorist ja nihutatakse esimest silda  $B_1$  torukese ja vibraatori vahel, kuni on leitud asend, milles toruke kiirgab kõige heledamini (esimene sõlm).

Nüüd asetatakse teisele poole Geissleri toru teine sild  $B_2$  ja nihutatakse viimast edasi-tagasi, kuni on saavutatud torukese heledaim kiirgus (teine sõlm). Märgitakse silla  $B_2$  see asend. Edasi asetatakse G. toru  $B_1$  ja  $B_2$  keskele. (Traatide kinnituseadeldise ja teiste kõrvaltoimete tõttu ei vasta esimene sõlmedevahe täpsalt poollainele õhus, mille tõttu teda ei saa arvestada.)

G. toru ja esimene sild  $B_1$  jäetakse paigale, nihutatakse teist silda  $B_2$  eemale torukesest ja märgitakse need kohad, kus toruke kõige intensiivsemalt helendub resp. kustub. Helendumine tekib siis, kui  $B_2$  on sõlmes, kustub, kui paisus. Nii leitud sõlmede resp. paisude vahe kaugused vastavad poollainele  $\frac{\lambda}{2}$  õhus. Määramised toimetatakse vähemalt kolmel korral ja saadud lugemist võetakse aritmeetiline keskmine.

Nüüd asendatakse see osa rööbiti olevaist traatidest, mis kaugemal Geissleri torust, klaasvanni paigutatud traadipaariga. Klaasvanni valatakse vedelik, mille diel. jääv tuleb määrata, ja mõõdetakse selles kahe sõlme resp. paisu kaugus, mis annab poole lainepikkuse vedelikus.

Lõpuks arvutatakse  $\epsilon$  valemist (2).

## 64. Röntgenikiired.

Röntgenikiired kuuluvad väga lühikeste elektromagnetiliste lainetuste hulka: röntgenikiirte lainepikkus on keskmiselt paar tuhat korda lühem kui äärmiste violettkiirte lainepikkus. Uuritud röntgenikiirte spekter ulatub ca  $20 \cdot 10^{-8}$  —  $0,1 \cdot 10^{-8}$  cm.

Suuremate lainepikkustega röntgenikiiri kutsutakse pehmeteks kiirteks, lühemaid kõvadeks — vastavalt nende läbitungimisvõimele. Röntgenikiired on silmale nähtamatud, kuid et nad mitmeis kehis fluorestsentsi tekitavad, siis võib neid nähtavaks teha fluorestseeriva sirmiga. Röntgenikiirte allikaks on iga keha, millele langevad katoodkiired (elektronide vool). Röntgenikiired tekitatakse klaastorus, millest õhk peaaegu kõik on välja pumbatud; järelejäänud õhu rõhk on vaid ligi  $5 \cdot 10^{-4}$  mm. Üks

selle elektrod ühendatakse negatiivse poolusega (katood), otse selle vastas asetseb antikatoodiks nimetatud ja positiivse poolusega ühenduses olev elektrod. Katoodi ja anoodi vahel valitseva kõrge pinge tagajärjel ioniseerub torus olev õhk; negatiivsed ioonid liiguvad antikatoodi poole, positiivsed ioonid katoodi poole. Katoodile langenud  $+$ -ioonide põrgete tagajärjel väljuvad elektronid sellest (elektroni mass = ca  $\frac{1}{1840}$  vesinikuaatomit, laeng =  $4,77 \cdot 10^{-10}$  el.-staat. laengu üh.). Need elektronid liiguvad pinge mõjul suure kiirusega antikatoodile, millega kokkupõrkamisel muutub suurem osa elektronide liikumise energiat soojuseks, vähema osa energia kulul tekivad röntgenikiired, mis antikatoodilt levivad igasse suunda.

Viimasel ajal tarvitatakse ka gaasivabu torusid röntgenikiirte tekitamiseks. Neis on katoodikiirte allikaks elektrivooluga hõõgumiseni kuumendatud volframtraat (Coolidge'i toru).

Tehakse vahet kahe isesuguse röntgenikiirguse — karakteristliku ehk fluorestsents- ja pärsskiirguse vahel. Karakteristliku kiirguse spekter kuulub joonspektrite liiki. Karakteristliku kiirguse spektris võib tähele panna kolme või rohkem osa:  $K$ ,  $L$  ja  $M$ .  $K$ -kiirgus on lühilaineline, tähendab kõva,  $L$  on pehmem,  $M$  on väga pehme ning seetõttu võib teda tähele panna vaid raskeimate elementide juures. Karakteristliku kiirguse kõvadus sõltub vaid antikatoodi materjali aatomkaalust (õigem aatomnumbrist). Mida suurem on elemendi (antikatoodi) aatomkaal, seda kõvem on karakteristlik kiirgus. Karakteristlikkude röntgenikiirte lainepikkuse sõltuvus antikatoodi elemendi aatomkaalust leiab avalduse Moseley seaduses: rutjuur röntgenikiirguse sagedusest on lineaarne funktsioon elemendi aatomnumbrist. Viimane on võrdne elemendi tuuma laenguga.

Pärsskiirgus (Bremsstrahlung) on elektromagnetiline impulss, mis tekib elektronide järsul seismajäämisel antikatoodil. Pärsskiirguse spekter on pidev, kuid lõpeb pikema laine poolel järsku, mis tingitud kiirte neeldumisest toru klaasis. Pärsskiirgus on seda kõvem (lainepikkus lühem), mida suurem on antikatoodile langenud elektronide kiirus, mida suurem seega katoodi ja antikatoodi vaheline pinge. Karakteristlik kiirgus ei sõltu elektronide kiirusest. Et aga tekiks teatud karakteristlik kiirgus, on tarvis, et elektronide kiirus omaks sellele kiirgusele vastava minimaalse väärtuse. Karakteristlikule kiirgusele, mille sagedus  $\nu$ , vastava tarviliku pinge suuruse  $V$  määrab Einsteini võrrand

$$eV = h\nu,$$

kus  $e$  — elektronilaeng  $= 4,77 \cdot 10^{-10}$  el.-staat. ühikut,  $h$  — nn Planck'i konstant  $= 6,55 \cdot 10^{-27}$ .

Tabel.

Elektronide kiiruse suhe valguse kiiruse.	Pinge voltides.	Lainepikkus $\text{Å}$ ( $10^{-8}$ cm).
0,1	2562	4,7853
0,15	5819	2,1069
0,2	10480	1,1698
0,3	24550	0,4994
0,4	46320	0,2647
0,5	78640	0,1559
0,6	127100	0,0965

Röntgenikiirte eritunnuseks on nende läbitungivus kehadest: kehad on röntgenikiirte suhtes seda läbipaistvamad, mida vähem on keha aatomkaal. Väga kõrge aatomkaaluga kehis kahaneb röntgenikiirte intensiivsus juba õhukese kihi läbimisel.

Muidugi sõltub röntgenikiirte absorbeerimine kehas veel tarvitatava kiirguse lainepikkusest: mida lühema lainega kiirgus, seda läbitungivam.

### Röntgenikiirte absorptsioon.

Homogeensete röntgenikiirte absorbeerumine kehis toimub eksponentsiaalseaduse järele, millel on järgmine kuju:

$$J = J_0 e^{-\mu d},$$

kus  $J_0$  on esialgne  $r$ -kiirte intensiivsus,  $J$  — intensiivsus pärast läbimineku kehas, mille paksus  $d$ ,  $\mu$  on nn. absorptsioonikoefitsient. Mida kõvemad on kiired, seda väikesem on  $\mu$ . Muidugi on  $\mu$  seejuures iga keha kohta isesuurune.

Kiirguse intensiivsuse sõltuvus kehade keemilistest omadustest neist läbimisel leiab eriti lihtsa väljenduse, kui jagada absorptsioonikoefitsient keha tihedusega  $\rho$ . Nii leitud ühele massiühikule vastavat absorptsioonikoefitsienti nimetatakse mass-absorptsioonikoefitsiendiks. Röntgenikiirte lainepikkust on võimalik ligikaudselt leida, kui määrata  $\frac{\mu}{\rho}$  mõne aine jaoks, mille

kohta on antud sõltuvus lainepikkusest. Käesoleva töö ülesanne ongi lainepikkuse  $\lambda$  määramine kirjeldatud meetodi järele.

Tabel.

Lainepikkus $\lambda$	$\frac{\mu}{\rho}$ Al. tarvis	Lainepikkus $\lambda$	$\frac{\mu}{\rho}$ Al. tarvis.
0,081	0,145	0,280	0,475
0,102	0,169	0,320	0,630
0,138	0,189	0,360	0,850
0,160	0,212	0,400	1,11
0,173	0,235	0,450	1,45
0,194	0,265	0,484	1,75
0,220	0,310	0,560	2,65

Lainepikkuse leidmiseks määratakse röntgenikiirte absorptsioonikoefitsient näiteks alumiiniumis; sellest arvutatakse massabsorptsioonikoefitsient ning eespooltoodud tabelist leitakse lainepikkus  $\lambda$ . Olgu tähendatud, et niisugune  $\lambda$  määramise meetod on ebatäpsamaid, kuid lihtne. Meetod eeldab, et kiirgus peab olema homogeenne, mida aga antud juhtumil ei ole.

Saadud resultaat annab pärsskiirguse keskmise lainepikkuse. Võiks öelda: leitud lainepikkus on omane pärsskiirguse spektri kõige intensiivsemale osale.

Katse korraldatakse järgmiselt:

Statiivi külge kinnitatud röntgenitoru ühendatakse suurema induktori sekundaarmähisega. Kas poolused on õieti ühendatud, näeme sellest, et siis helendub — fluorestseerub — katodi ees olev toru klaassein, kuid vastasel korral on näha torus heledad vöödid. Nüüd asetatakse röntgenitoru ette, otse antikatodi vastu, musta paberisse pakitud fotograafiilaat nii, et želatiinikiht asetseb torule lähemal küljel. Kui fotograafiilaat oli hästi musta paberiga valguse eest kaitstud, siis ei ole tarvis korraldada katset pimikus. Fotograafiilaadi ja röntgenitoru vahele asetatakse metallkehad, mille absorptsioonikoefitsient määratakse. Seks tarvitatakse mitmesuguse paksusega alumiiniumplaate. Nüüd lastakse mõjuda röntgenikiirtele fotograafiilaadisse. Valgustuse kestus sõltub kiirte intensiivsusest, tarvitavast plaadist jne. Valgustatud plaat ilmutatakse ja kinnistatakse nagu tavaline fotograafiilaat.

Seejärel määratakse plaadi tuhmus (Schwärzung) fotoelemendi abil, millest leitakse absorptsioonikoefitsient alumiiniumis.

## 65. Fotoelement.

Kui metallpinnale langeb elektromagnetiline kiirgus (nähtavad, ultravioletsed, röntgeni- või teised kiired), siis võivad elektronid absorbeeritud energia kulul metallist väljuda, kui langevate kiirte lainepikkus on selleks kohane. Et väljunud elektronid tulevad peamiselt äärmisest õhukesest pealmisest pinnast, siis on see elektronide vool tunduvalt metalli pinna ehitusest. Elektronide lahkumisega omandab metall positiivse laengu, tekib nn. fotovool. Fotovoolu tekkimiseks on tarvilik, et metallile langeva kiirguse sagedus ei tohi vähem olla kui teatud sagedus, mis omane antud metallile. Elektronid lahkuvad metallist kiirusega, mis samuti on langevast kiirgusest. Selle kiiruse võime leida Einsteini kvantide lausest

$$\frac{mv}{2} = h\nu - A \dots \dots \dots (1),$$

kus  $m$  on elektroni mass,  $v$  — elektroni kiirus,  $h$  — nn. Plancki konstant,  $\nu$  — langeva kiirguse sagedus ehk frekvents ja  $A$  — energia hulk, mis elektroni metallist väljatõukamiseks tarvilik.  $A$  on seega miinimum kiirgamisenergiat, mida elektron väljatõukamiseks tarvitab. Suurema osa metallide juures tekib elektronide väljumine langevate kiirte toimel vaid siis, kui on tege mist ultravioletsete või veel lühemate lainetega (suurema sagedusega). Erandi moodustavad leelismetallid. Viimaste juures tuleb fotoeffekt esile koguni juba ultrapunaste kiirte toimel.

Sellekohaseist mõõtmistest on leitud, et fotovool on võrdeline absorbeeritud valguse hulga. Viimane asjaolu võimaldab tarvitada fotoelementi valgustuse tugevuse mõõtjana. Ka fotograafiplaadi tuhmuse määramiseks võib hea eduga tarvitada fotoelementi.

Elster & Geitel'i fotoelemendi tundlikuks pinnaks on leelismetall. See on ühtlasi ka üheks elektroodiks, mis klaasist välja on juhitud traadi kaudu. Veel asetseb torus teine elektrood.

Mõõtmisel ühendatakse leelismetall elektripatarei negatiivse poolusega, teine — positiivse poolusega. Kaitseks lühiühenduste vastu lülitakse samasse ahelasse veel takistus (ca 10 000 oomi). Voolutugevust mõõdab galvanomeeter (peegelgalvanomeeter). Fotovoolu läbimisel galvanomeetrist annab viimane hälbe. Hälve on võrdeline voolutugevusega, seega ka absorbeeritud valguse hulga. Käesolevas katses tarvitatakse foto-

elementi röntgenikiirtega valgustatud plaadi tuhmuse määramiseks. Viimane on ligikaudu võrdeline plaadile langenud röntgenikiirte intensiivsusega.

Katse käik plaadi tuhmuse määramisel on järgmine:

Kaetud fotoelemendi avause ette või vastavasse raami asetatakse uuritav fotograafiplaad. Plaadi ees asetseb muutuseta tugev valguseallikas, näiteks tugev elektrilamp. Loetakse galvanomeetri nullseis. Nüüd keeratakse fotoelemendi kaitsesilindrit nii, et uuritav plaad tuleks katmata fotoelemendi ette. Tekkinud fotovoolu tugevus loetakse galvanomeetrit lugemi pikksilma ja astmiku abil.

Galvanomeetri hälve  $\alpha$  on võrdeline plaadi läbinud valguse hulga. Plaadi tuhmuse määramiseks mõõdetakse veel valguse hulk, mis langes plaadile. Viimane leitakse, mõõtes galvanomeetri hälve  $\alpha_0$ , kui fotoelemendi ja valguseallika vahel ei ole plaati. Fotograafiplaadi tuhmuseks  $S$  nimetatakse

$$S = \log \frac{i_0}{i} \dots \dots \dots (3),$$

kus  $i_0$  on plaadile langenud ja  $i$  plaadi läbinud valgusehulk. Et  $i_0$  ja  $i$  on võrdelised  $\alpha_0$  ja  $\alpha$ , siis võime asetada valemisse (3)  $i_0$  ja  $i$  asemele  $\alpha_0$  ja  $\alpha$ . Nii leiame tuhmuse

$$S = \log \frac{\alpha_0}{\alpha} \dots \dots \dots (4).$$

Fotograafiplaadi valgustamisel röntgenikiirtega oli plaadi ees absorbeeriv metallplaad. Olgu absorbeeriva keha poolt varjatud fotograafiplaadi osa tuhmus  $S$ , mujal aga, s. o. sääl, kuhu röntgenikiired takistamatult langesid,  $S_0$ . Nagu varem tähendatud, on fotograafiplaadi tuhmus  $S$  võrdeline plaadile langenud röntgenikiirte intensiivsusega  $J$ . Seepärast võib valemisse

$$J = J_0 e^{-\mu d}$$

$J$  ja  $J_0$  asemele asetada nendega võrdelised suurused  $S$  ja  $S_0$ , mis annab

$$S = S_0 e^{-\mu d} \dots \dots \dots (5).$$

Mõõtes  $S$  ja  $S_0$  ning  $d$  arvutatakse  $\frac{\mu}{\rho}$ , vastavast tabelist leitakse röntgenikiirguse lainepikkused  $\lambda$ .

Märkused I. Mõõtmisel fotoelemendiga ei arvestatud valguse hulka, mis absorbeeris fotograafiplaadi klaas ja valgustamata želatiinikiht. Soovitakse täpsamat resultaati, siis tuleb arvestada ka seda nähtust.

II.  $S$  on võrdeline  $J$  vaid siis, kui valgustuse kestus oli lühike, kuni  $S = 0,7$ . Ülevalgustuse puhul see seadus maksev ei ole.

## 66. Radioaktiivsus.

Radioaktiivseiks nimetatakse elemente, mis lagunedes muutuvad teisteks elementideks, kusjuures nad kiirgavad teatud liiki kiiri. Kiired mõjuvad päevapildiplaadisse, tekitavad mitmesugustes kehaes lüminestsentsi ja ioniseerivad õhku.

Kiired jaotatakse kolme liiki, seejärel, missugust mõju avaldab neisse magnetivälja.  $\alpha$ -kiired on positiivse voolu iseloomuga: nad koosnevad positiivselt laetud heeliumi-aatomeist, absorbeeruvad aga juba üliõhukestes kihtides (näit. 0,05-mm alumiinium)  $\alpha$ -kiirte ulatuvus õhus on ( $15^{\circ} C$  ja 760 mm) 2,5—8,6 cm vahel.  $\beta$ -kiired on sugulased katoodkiirtega; nad moodustuvad elektronide voolust, mis erineb katoodkiirgusest vaid eriti suure elektronide kiiruse poolest:  $\beta$ -kiirte kiirus on ainult vähe väikesem valgusekiirusest.  $\beta$ -kiirte läbitungivus on märksa suurem  $\alpha$ -kiirte omast. Nad absorbeeruvad täielikult vaid 5-mm alumiinium- või 2 mm paksuses tinaplaadis.

Kolmandat liiki kiiri kutsutakse  $\gamma$ -kiirteks. Magnetiväljas  $\gamma$ -kiired kõrvale ei kaldu, — nad kuuluvad elektromagn. kiirte hulka. Röntgenikiirtest erinevad nad vaid eriti lühikeselt lainepikkuselt (ligikaudu 1000 korda lühemad).  $\gamma$ -kiired on märksa läbitungivamad kui  $\alpha$ - ja  $\beta$ -kiired ja absorbeeruvad alles 75-cm alumiinium- või 20-cm tinaplaadis. 1-mm klaasplaadis kahaneb nende intensiivsus umbes 1% võrra.

Kõik radioaktiivsed elemendid tekivad kahest kõige raskema aatomkaaluga elemendist: uraanist (aat.-kaal 238) ja tooriumist (aat.-kaal 232). Kolm emanatsiooni (raadiumi-, tooriumi- ja aktiiniumiemanatsioon) on inertssed gaasid, kõik teised radioaktiivsed elemendid on tahked kehad. Üldiselt tekib radioaktiivsel aine lagunemisel ainult üks uus aine, erijuhtumina võib ette tulla duaalne lagunemine; nii näiteks annab uraan II oma lagunemisel uraan Y (millest hiljem algab aktiiniumirida) ja iooniumi (raadiumirea algus).

Kuna  $\alpha$ -kiired on heeliumi-aatomid (aat.-kaal 4) ja  $\beta$ -kiired elektronid, siis langeb aine aatomikaal  $\alpha$ -kiirgamise puhul 4-ja võrra, kuna  $\beta$ -kiirgamise puhul see jääb muutumatuks. Elektroni mass on umbes  $\frac{1}{1840}$  vesinikuaatomi massist.

Katselisel teel on leitud, et radioaktiivse aine kiirgus kahaneb aja jooksul teatava eksponentsiaalseaduse järele.

Olgu kiirgus ajamomendil $t$ . . . . .	$J_t$
„ aatomite arv samal momendil . . . . .	$N_t$
„ kiirgus ajamomendil $0$ . . . . .	$J_0$
„ aatomite arv ajamomendil $0$ . . . . .	$N_0$
„ naturaal-logaritmid alus $e = 2,7182818$ . . .	

siis on  $J_t = J_0 e^{-\lambda t}$ . Igat elementi iseloomustavat suurust  $\lambda$  nimet. lagunemiskonstandiks. Et ajaühikus lagunenu aat. arv on võrdeline olemasolevate aat. arvuga  $N$ , siis

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N,$$

kus  $\lambda$  on prop.-koeffitsient.

Seda integrides saame

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Aeg  $\tau = 1/\lambda$ , mille jooksul aatomite arv on langenud  $1/e$ -ni, näitab radioaktiivse aine keskmist iga. Aeg  $T$ , mille jooksul aine aatomitehulk poole võrra väheneb, on aine pool-iga. Iga radioaktiivset ainet iseloomustab selle lagunemiskonstant, keskmine ja pool-iga, tema poolt väljasaadetavate kiirte liik ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), kiirte ulatus, kiirte absorptsioonikoeffitsient jne.

Kehade radioaktiivsuse määramised elektrilise meetodi järele põhjenevad järgmisel nähtusel. Kui asetada kinnisesse ruumi radioaktiivne keha, siis muutub mõne aja pärast selles ruumis olev õhk (ehk gaas) elektri suhtes juhtivaks, kuna ta loomulikult seda ei ole. Ent radioaktiivse keha äraviimisega lõpeb elektrijuhtivus. Uurimused on näidanud, et elektri edasikandjaks õhus on nn. ioonid, see on õhuosakesed, mis laetud kas positiivse või negatiivse laenguga. Ioonid võivad tekkida mitmesuguste kiirte mõjul (ultravioletsed, röntgenikiired). Ka radioaktiivsete kehade kiired ioniseerivad õhku, s. o. tekitavad õhus  $+$ - ja  $-$ -ioone. Õhu ioniseerimine toimub siin järgmiselt:

Määratu suure kiirusega radioaktiivse keha aatomi tuumast väljapaisatud  $\alpha$ -,  $\beta$ - või  $\gamma$ -kiired purustavad õhuaatomite või molekulidega kokku põrgates neid positiivselt ja negatiivselt laetud osiks, s. o. ioonideks. Et radioaktiivne aine nimetatud kiiri alalõpmata välja kiirgab, siis peaks ioonide hulk teoreetiliselt kasvama lõpmatuseni. Tegelikult ei toimu see mitte. Õhus olevate ioonide hulk kasvab vaid teatud piirini, piirini, mis oleb mitmesugustest katse tingimustest, radioaktiivse aine hulgast jne. Seda nähtust seletatakse sellega, et positiivsed ja ne-

gatiivsed ioonid üksteisega kokku puutudes uuesti ühinevad, neutraliseeruvad. Aja jooksul tekib teatud tasakaal: sama palju ioone tekib juurde, kui palju neist ühineb: ionide hulk jääb konstantseks.

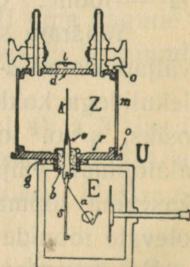
Anname ioniseeritud õhku toodud 2 metallplaadile mingi potentsiaalivahe. Kui ionide liikumine varem oli korratu, siis muudab elektriväli ionide liikumise suunda, ioonid hakkavad pinge tagajärjel liikuma kindlas suunas: positiivselt laetud ioonid negatiivse elektroodi poole, negatiivselt laetud ioonid ümberpööratud suunas, — nii tekib ionisatsioonivool. Pinge suurenemisega suureneb ka ionide kiirus, sest siis pääseb rohkem ioone enne ühinemist elektrodidele, seega suureneb ka ionisatsioonivool. Ionisatsioonivoolu suurenemisel on aga piir: on pinge nii kõrge, et kõik tekkinud ioonid elektrodidele jõuavad, enne kui nad ühinevad, siis ei saa me enam ionisatsioonivoolu suurendada, kuigi suurendaksime pinget. Sel juhtumil on tegemist nn. küllastusvooluga. Küllastusvool on võrdeline radioaktiivse aine poolt tekitatud ionide hulgaga ehk keha radioaktiivsusega. Väga kõrge pinge puhul muutub nähtus: teatud pingest alates hakkab õhu juhtivus jälle kasvama. Ioonide kiirus on siis juba niivõrt suur, et nad õhuosakestega kokku puutudes neid võivad ioniseerida. Liikudes pinge toimel võivad viimased omakorda jälle uusi ioone juurde tekitada jne.

Täpsad ionisatsioonivoolu määramistel põhjenevad mõõtmismeetodid eeldavad, et mõõtmistel tarvitatakse küllastusvoolu.

Harilikult tarvitatakse ionisatsioonivoolu mõõtmiseks elektromeetreid.

## 67. Schmidt'i elektromeeter.

Schmidt'i elektromeeter on kohane tahkete, vedelate ja gaasitaoliste kehade radioaktiivsuse mõõtmiseks. Riist koosneb kahest osast: elektromeetrist  $E$  ja nn. ionisatsioonisilindrist  $Z$ . Silindri kaas on varustatud vesiloega, mille abil riist katse alul korda seatakse. Ionisatsioonisilinder on õhukindel. Elektromeetritelehekese hoidja on kruviga kinnitatud vaskvarva külge, mis läbib elektromeetri ja ionisatsioonisilindri vahel asuva isolaatori. Ühtlasi on selle külge



55. joonis.

kinnitatud ka elektrood  $k$ . Elektromeetritelehekese seisuga lugemist kergendab selle külge kinnitatud kvartsiit.

Lugemine ise toimub erilise mikroskoobi abil. Elektromeeter laetakse väikese eboniitpulga abil, mida hõõrutakse vilgase riidega. (Ettevaatust: juba nõrk villase riide puudutamine laeb eboniitpulga küllaldase elektrihulgaga.) Elektromeeter on nii ehitatud, et kui mikroskoobi all ilmub nähtavale leheke, siis on juba tegemist küllastusvooluga. Õhus leidub alati ioone, seega võib ka alati tähele panna, et elektromeetriteleheke langeb. Muidugi on see osalt tingitud elektromeetri-isolaatori juhtivusest, mis on heade elektromeetrite juures peaaegu 0. Kuigi see laengu kaotus on väike, tuleb teda siiski arvestada. Seepärast määratakse iga mõõtmise eel elektromeetri loomulik laengu kaotus, nn. loomulik ionisatsioonivool.

Elektromeetritelehekese seisule vastavad pinge väärtused voltides leiduvad eri tabelis.

### Mõõtmisviisid.

Ionisatsioonimeetodi järele võib keha radioaktiivsete ainete sisaldavust määrata ka siis, kui viimased esinevad väga vähesel hulgal. Keemilis-analüütiliste meetodite tarvitamine, samuti ka spektraalanalüüs sel puhul ei annaks mingisuguseid resultate.

Seejärele, missuguste kiirte ionisatsioonivõimet mõõdetakse, oleneb ka mõõtmisviis.

Tahke keha radioaktiivsuse määramine  $\alpha$ -kiirte tugevuse järele.

Et  $\alpha$ -kiirte ioniseeriv toime on ligi 100 korda suurem  $\beta$ -kiirte omast, viimaste oma jälle suurem  $\gamma$ -kiirte omast, siis ei tule selle meetodi juures arvestada  $\beta$ - ja  $\gamma$ -kiirte toimet.

Õieti võib  $\alpha$ -kiirgust mõõta ainult siis, kui uuritava aine lagunemisel ei teki gaasitaolisi radioaktiivseid elemente — emanatsiooni, sest emanatsiooni lagunemise saadused võivad sattuda aparadi seintele, neid pikemaks ajaks ka radioaktiivseks teha, mille tagajärjel aparat muutub kauemaks ajaks kõlbmatuks.

Kui pärast uuritava aine viimist ionisatsioonianumasse ionisatsioon aja jooksul suureneb, tekitab uuritav keha alati emanatsiooni.

Et aga  $\alpha$ -kiirte meetod on lihtsamaid oma korralduselt, siis tarvitatakse seda mõnikord siiski, eriti seal, kus ei nõuta suurt täpsust. Väga kohane on see viis eelkatseiks.

Katse ise korraldatakse järgmiselt:

Kaalutud hulk pulbriks hõõrutud ja hästikuivatatud uuritavat ainet asetatakse väga õhukese kihina mõõtetaldrikule. Paks kiht ei ole lubatav, sest vastasel korral toimub  $\alpha$ -kiirte absorbeerumine juba aines eneses. Mõõtetaldrik asetatakse aparadi ionisatsioonilindrisse, suletakse kõik kraamid ja määratakse elektromeetrilehekese langemine; sellest arvutatakse ionisatsioonivoolu tugevus (millivolt pro sekund), millest tuleb lahutada midugi loomulik ionisatsioon. Kui soovitakse leida ka uuritava aine radioaktiivsuse absoluutväärtus, siis võrreldakse seda preparaadiga, mille raadiumisisaldus on teada. \*)

Uuritava aine radioaktiivsus avaldatakse niiviisi ekvivalentse raadiumi hulga.

Peale raadiumi võib aga ette tulla ka teisi radioaktiivseid kehi. Emanatsioonimeetod, mille kirjeldus järgneb allpool, võimaldab ka leida, kui palju sisaldab mingi keha üksikut radioaktiivset ainet. See meetod on rakendatav vaid vedelikude puhul.

Kehade radioaktiivsuse määramine emanatsiooni mõõtmise teel.

Emanatsioon, mida radioaktiivne keha eraldab, juhitakse aparadi ionisatsioonianumasse ja seal mõõdetakse tema tekitatud ionisatsioonivoolu tugevus. Emanatsioon eraldatakse uuritavast vedelikust nn. loksutamise (osalt) või (täielikult) keetmise teel. Esimene viis on märksa lihtsam ja seepärast tarvitatakse seda eriti palju allikate ja kaevude vete radioaktiivsuse määramisel.

Vee radioaktiivsuse määramine loksutusmeetodi järele.

Pea kõik veed, mis looduses esinevad, on radioaktiivsed. Läbi voolates kihtidest, mis sisaldavad radioaktiivseid kehi, võtab vesi sealt emanatsiooni kaasa. Harvem leidub vees radioaktiiv-

\*) Näiteks sisaldas 1 g uraani  $3,328 \cdot 10^{-7}$  g Ra met, sest radioaktiivse tasakaalu puhul on Ra hulga suhe Ur hulga:

$$\text{Ra} : \text{Ur} = 3,328 \cdot 10^{-7}.$$

sete ainete sooli. Loksutusmeetod võimaldab mõõta raadiumi-emanatsiooni hulka, mis leidub vees lahustunud olekus.

Uuritav vesi kallatakse erilisse metallpudelisse. Kui mõõtmine toimub otse veeallika lähedal, siis on soovitatav metallpudel enne õhupumba abil osaliselt õhust tühjaks imeda, kraanid kinni keerata, üleni vette pista ja kraani avades vett sisse lasta voolata kuni umbes pooleni, siis kraanid sulgeda ning mõõtmisega kohe algust teha. Ei ole lubatud vett enne pudelisse valamist segada, sest on karta, et õhumullidega ka radioaktiivne emanatsioon veest välja võib tulla. Kui palju vett pudelisse voolas vee võtmisel, määratakse hiljem, pärast katset. Vaja on üles märkida prooviks võetud vee temperatuur.

Nüüd loksutatakse metallpudelit ühes uuritava veega tugevasti umbes 1—1½ min. jooksul, kuni emanatsioon seguneb pudelis oleva õhuga. Et loksutamisega võib pudelis tekkida ülerõhk, siis lastakse, alumist pudelikraani lühikeseks ajaks avades, osa vett, millest emanatsioon juba lahkunud, välja voolata. Kummitorude abil ühendatakse kummipuhuja, pudel ja elektromeetri ionisatsioonianum. Et niiskus ei pääseks elektrometrisse, pannakse elektromeetri ja pudeli vahele U-toru kloorkaltsiumiga. Ühendada tuleb neid nii, et vesi mitte elektrometrisse ei saaks voolata.

Kõiki kraane avades ning kummipuhujat tegevusse viies sunnitakse emanatsioonirikast õhku elektrometris oleva õhuga ühtlaselt segunema. Aeg, mil puhumine algas, märgitakse üles. Umbes 1 minuti pärast lõpetatakse puhumine ning suletakse kõik kraanid. Kohe seejärel hakatakse elektrometritelehekese lange-mist jälgima. Kõige kohasem on tähele panna aega, millal lehekese kvartsnii mingist jaotise kriipsust mööda liigub. Aja mõõtmiseks tarvitatagu sekundimõõtjat. Andmed kirjutatakse tabelisse.

Tavalisesti kasvab laengu kaotus aja jooksul tunduvalt. Laengu kaotuse suurenemise põhjuseks on, et emanatsioon lagunedes tekitab uusi radioaktiivseid elemente, mis teevad omalt poolt õhu enam juhtivaks. Umbes 3 tunni pärast omab ionisats.-vool ülimalt väärtuse. Sellest ajast alates hakkab ta uuesti langema. Et aga teada saada ionisatsioonilindrisse puhutud emanatsiooni hulka, peame teadma ionisatsiooni voolutugevuse momendil  $t_0$  (puhumise alul), mida saame kas graafilisel teel (kõvera lõike täpp teljega, millel loetud voolutugevus) või ioni-

satsiooni voolutugevuse korrutamisel taandamisteguriga  $K$ , mis antud vastavas tabelis. Lehekese jälgimise põhjal teatud aja vältel (näit. 30 min.) saame potentsiaali langemise kiiruse selle vaatlusvahemiku keskmomendil: kui alustati, arvates puhumise algusest, lugemisega  $t_1$ -sel sekundil ja lõpetati  $t_2$ -sel sek., siis keskmine aeg

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Tabel ionisatsioonivoolu taandamiseks  
algmomendile.

Kui emanatsioon ja selle järeltulijad annavad elektromeetri ionis.-silindris teatud momendil pinge langemise  $V$ , siis oleks katse alul emanatsioonist tingitud pinge langemine olnud võrdne ainult  $VK$ .

Maksev üksnes Ra emanatsiooni puhul.

Aeg minuteis.	$K$	Aeg.
0	1,000	8 0,707
1	0,910	10 0,690
2	0,850	15 0,663
3	0,806	20 0,645
5	0,751	

Näide.

Lehekese langemise lugemisega tehti algust 5 min. pärast emanatsiooni puhumist ion.-silindrisse ning lõpetati 15. minutil; seega jälgiti 10 min. ning leiti seejuures, et pinge langemine selle aja jooksul oli  $V$  volti 10 min. Siit arvutatakse pinge langemine 1 sek. Nii suur pinge langem. ei olnud ei viiendal min. pärast puhumist ega ka viieteistkümnendal minutil (5 min. kohta on leitud pinge langemine liiga suur, 15 min. jaoks liiga väike). Nii leitud pinge langemine on keskmine pinge langemine selle aja kestel, — vastab sega keskmisele momendile  $\frac{5 + 15}{2} = 10$  min. puhumist. Korrutades leitud pinge langemise (volt/sek) vastava taandamisteguriga  $K$  tabelist, leitakse pinge langemine algmendil.

Nii suure pinge langemise (millivolt/sek ; volt/sek) annab vees lahustunud emanatsiooni hulk tarvitatud elektromeetri ionisatsioo-

silindris. Olgu elektromeetri mahtuvus  $C$  (cm-s), siis küllastusvoolu tugevus  $i$  absoluutseis elektrostaatilis ühikuis leitakse valemi järgi

$$i = \frac{CV}{300}.$$

( $V$  — on siin mõõdetud volt/sekund).

Niiviisi leitud ionisatsioonivoolu tugevus on võrdeline ionisatsiooni-silindris oleva emanatsiooniga. Ent osa emanatsioonist jäi pudelisse, torudesse jne. Harilikuks kombeks on saanud taandada seda ionisatsioonivoolu tugevust sellele emanatsiooni hulga, mis oli 1 liitris vees. See saadakse lihtsa korrutamise teel ühe taandamisteguriga  $\alpha$ , kusjuures arvesse võetakse ka emanatsiooni absorptsioon vees:

$$\alpha = \frac{1000 (l_1 + l_2 + l_3)}{W l_3} \left(1 + \alpha \frac{W}{l_1}\right).$$

$W$  — on mõõtmiseks tarvitatud vee hulk  $\text{cm}^3$ -eis.

$l_1$  — õhu hulk pudelis  $\text{cm}^3$ -eis.

$l_2$  — õhu hulk gummipuhuja torudes jne.  $\text{cm}^3$ -eis.

$l_3$  — õhu hulk ionis.-silindris  $\text{cm}^3$ -eis.

Konstant  $\alpha$  on emanatsiooni absorptsioonikoefitsent vees. Toatemperatuuri juures on see 0,25.

Ka kõige radioaktiivsemate allikate vete puhul on see arv väike. Seepärast on kombeks saanud füüsik Mache ettepanekul seda arvu korrutada 1000. Nii saadakse vee radioaktiivsus Mache ühikuis.

### Duane'i parandus.

Õhu ionisatsioon ionis.-silindris on tingitud peamiselt emanatsiooni ja selle järelproduktide  $\alpha$ -kiirtest.  $\alpha$ -kiired ioniseerivad õhku kogu oma teepikkusel.  $RaC$  (üks Em. järeltulijaist)  $\alpha$ -kiirte ulatuvus õhus on 7 cm. Et ion.-silindri suurus on piiratud, siis on selge, et osa  $\alpha$ -kiiri langeb enne silindri seinale, kui nad kõik suudavad oma energia ioniseerimiseks ära kasutada.

Seepärast tuleb eespool-leitud ionisatsioonivoolu tugevus Duane'i järele korrutada teguriga  $k$ , mis järgmiselt saadakse ( $Ra$  eman. puhul):

$$k = \frac{1}{1 - 0,52 \frac{s}{V}},$$

kusjuures  $s$  on ionisatsiooni-silindri sisepind avaldatud  $\text{cm}^2$ ,  $v$  — ionisatsioonisilindri ruumala  $\text{cm}^3$ .

## Ühikud.

Nagu varem tähendatud, avaldatakse vee radioaktiivsus sageli Mache ühikuis. Kui vee radioaktiivsus oli tingitud raadiumi emanatsioonist, siis on soovitatav mõõta seda nn. curie'des, nagu see on viisiks teaduslikus kirjanduses. Curie on emanatsiooni hulk, mis on tasakaalus 1 grammi raadiumiga. Et curie on liiga suur, siis avaldatakse vee radioaktiivsus  $10^{-10}$  curie/pro liiter, mida emaaniks kutsutakse. 1 Mache ühik = 3,64 emaan.

## IX.

## Tabeleid.

## 1. tabel: Kehade erikaale.

(Gaaside erikaalud on maksvad 0° ja 760 mm r. puhul.)

Alumiinium . . . . .	2,7	Marmor . . . . .	2,5– 2,8
Eeter . . . . .	0,72	Petrooleum . . . . .	0,8
Elavhõbe . . . . .	13,6	Piiritus . . . . .	0,971
Hapnik . . . . .	0,00143	Raud . . . . .	7,8
Hõbe . . . . .	10,5	Tina . . . . .	11,3
Inglitina . . . . .	7,28	Tsink . . . . .	7,1
Jää . . . . .	0,917	Valgevask . . . . .	8,1– 8,6
Klaas . . . . .	2,4—2,6	Vask . . . . .	8,9
Kork . . . . .	0,2	Vesinik . . . . .	0,0000899
Lämmastik . . . . .	0,00125	Õhk . . . . .	0,00129

## 2. tabel: Joonpaisumiskoeffitsiente (18° C).

Alumiinium . . . . .	0,0000238	Tina . . . . .	0,0000292
Inglitina . . . . .	0,0000225	Tsink . . . . .	0,0000293
Klaas . . . . .	0,0000091	Valgevask . . . . .	0,0000185
Raud . . . . .	0,0000112	Vask . . . . .	0,0000165

## 3. tabel: Ruumpaisumiskoeffitsiente.

Elavhõbe . . . . .	0,00018	Vesi (18°) . . . . .	0,00018
Petrooleum . . . . .	0,00092	Õhk . . . . .	0,00367
Piiritus (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O) . . . . .	0,00110	(jääva rõhu juures)	

## 4. tabel: Kehade erisoojusi.

Alumiinium . . . . .	0,214	Inglitina . . . . .	0,054
Piiritus . . . . .	0,58	Jää . . . . .	0,5
Eeter . . . . .	0,56	Klaas . . . . .	0,19
Elavhõbe . . . . .	0,033	Parafiin . . . . .	0,62

Petrooleum . . . . .	0,51	Tsink . . . . .	0,092
Raud . . . . .	0,111	Valgevask . . . . .	0,093
Tina . . . . .	0,031	Vask . . . . .	0,091

5. tabel: Vee erikaal.

Temperatuur.	Erikaal.	Temperatuur.	Erikaal.
0	0,999 87	13	0,999 40
1	0,999 93	14	0,999 27
2	0,999 97	15	0,999 12
3	0,999 99	16	0,998 97
4	1,000 00	17	0,998 80
	0,999 99	18	0,998 62
6	0,999 97	19	0,998 43
7	0,999 93	20	0,998 23
8	0,999 88	21	0,998 02
9	0,999 81	22	0,997 80
10	0,999 73	23	0,997 57
11	0,999 63	24	0,997 33
12	0,999 52		

6. tabel.

Küllastunud veeauru rõhk  $P$  temperatuuri  $t$  juures, avaldatud elavhõbedasamba kõrgusena mm-tes, ja absoluutne niiskus  $A \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ .

$t$	$P$	$A$	$t$	$P$	$A$	$t$	$P$	$A$
-6	2,8	,0	+ 6	7,0	7,3	+18	15,5	15,4
-5	3,0	,2	7	7,5	7,8	19	16,5	16,3
-4	3,3	3,5	8	8,0	8,3	20	17,5	17,3
-3	3,6	3,8	9	8,6	8,8	21	18,7	18,3
-2	3,9	4,1	10	9,2	9,4	22	19,8	19,4
-1	4,2	4,5	11	9,8	10,0	23	21,1	20,6
0	4,9	4,8	12	10,5	10,7	24	22,4	21,8
+1	4,9	5,2	13	11,2	11,4	25	23,8	23,0
2	5,3	5,6	14	12,0	12,1	26	25,2	24,4
3	5,7	6,0	15	12,8	12,8	27	26,7	25,8
4	6,1	6,4	16	13,6	13,6	28	28,3	27,2
5	6,5	6,8	17	14,5	14,5	29	30,0	28,7







A

7172

195873

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00839035 5

Kilkinson, E.

A  
7172  
195873

Füüsika praktikum

TÜ RAAMATUKOGU  
  
1 0300 00839035 5