

Atentigo: Estas bonvenaj ĉiaj rimarkoj, notoj, korektoj, plibonigoj, sugestoj, aldonoj (ktp). Viajn mesaĝojn bv. sendi al la aŭtoro per tradicia poŝto: János Sárközi, pk. 127, HU-2600 Vác, Hungario – aŭ rete: sarkozi32@freemal.hu

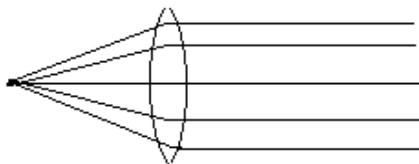
Scienc-Teknika Esperanto-Biblioteko: <http://www.eventoj.hu> - Bonvenon al via vizito!

LA FIZIKA MONDO

UNIVERSITATA LERNOLIBRO-SERIO EN ESPERANTO
PRI EKSPERIMENTA FIZIKO POR KOMENCANTAJ STUDENTOJ

OPTIKO

B 0



János Sárközi *

*Dipl. fizikisto, em. esploringeniero

2000 (III. verzio)

ENHAVO

Antaŭparolo	2.
Optiko (ĝenerale)	5.
La fotometrado	9.
Estiĝo kaj estigo de lumo	16.
La propagiĝo de la lumo	27.
Refrakto de la lumo	33.
La ondooptiko	55.
La polarigo de la lumo	70.
Lumo kaj materialo	80.
La okuloj	92.
La optikaj instrumentoj	100.
Literaturo	123.
Registro	124.

Antaŭparolo

Antaŭ pli ol dek jaroj Walter KLAG iniciatis verki kaj eldoni ampleksan esperantlingvan universitatan lernolibron pri eksperimenta fiziko. Al tiu ĉi laboro li varbis kunlaborantojn. Mi anoncis min por verki ĉapitron pri optiko. Samtempe mi proponis, eldonadi anstataŭ ampleksa libro, libreto-serion, en kiu la apartaj partoj aperus en 100...200- paĝaj libretoj. Mi opinias, ke libron, kiu devas ampleksi pli ol mil paĝojn neniu entreprenus verki, neniu entreprenus eldoni, sciante ke vendi tiaspecan multekostan faklibron ne eblas. S-ro Klag konsentis, kaj dispartigis la grandan libroskizon je malgrandaj, kiujn unu aŭ du aŭtoroj povos prilabori.

Mi eklaboris fari libron pri optiko; komencis kolekti materialojn kaj fari skizojn. Tamen pro aliaj aferoj la laboro fariĝis malrapida, fine dormiĝis. S-ro Klag ĉesis la organizadon.

Pasis pluraj jaroj, kiam Mati LAHTINEN kun granda elano rekomencis la organizadon. Li sukcesis varbi fakulojn preskaŭ por ĉiu temo. Ankaŭ mi, uzinte la malnovajn notojn, finverkis la optikan libron. La malneton mi sendis al Lahtinen, kiu ĉefe lingve kaj metode kontrolis ĝin, kaj konsilis korektojn.

Aperis diversaj teknikaj problemoj, kies solvo bezonis tre multe da tempo. En tio multe helpis al mi László SZILVÁSI.

Dume mi sukcesis investi modernan komputilon, do la laboron jam malhelpas nenio, nur la tempomanko kaj miaj modestaj konoj en tiu ĉi nova komputada sfero.

Finfine la „granda verko” estas preta. Tamen mi konsideras ĝin ne eldonpreta libro, nur kiel tekston por interreto, kie fakuloj povos studi ĝin kaj konsili korektojn, modifojn. Fine eble naskiĝos teksto por bona libro.

Bone mi scias, ke inter esperantistoj fizikisto kiu interesiĝas pri optiko estas nur malmulte, tial la libron mi klopodis verki iom sciencpopulariga; ekz. klarigi la kaŭzon de naturaj fenomenoj; kial la ĉielo kaj maro estas bluaj, kiamaniere la ĉielarko estiĝas, kial la oleotavolo sur akvo estas multkolora, ktp. Mi pensas, ke la priskribo de diverspecaj bestaj okuloj, kaj funkciado de la homa okulo estas interesa.

Matematikon malmulte mi uzis, ĉefe nur nivelan de mezlernejoj. La dedukton de formuloj ne ĉiam mi priskribis, nur tie, kie mi volis demonstri la uzitajn metodojn.

Tamen mi opinias, ke la libro estos uzebla kiel universitata lernolibro por komencantaj studentoj. Des pli, ĉar mi lanĉis kelkajn problemojn, kiuj je la unua vido estas simplaj, tamen post profunda pripensado evidentiĝas, ke la afero estas ne memkomprenebla.

Ekz. la deduktoj de la formuloj por fokusdistancoj de sferaj speguloj kaj maldikaj lensoj $1/a + 1/b = 1/f$ havas grandan trompon, tial ili estas validaj nur je kvazaŭaksaj radioj. Tamen en la praktiko ili estas uzeblaj ankaŭ por pli larĝaj radiokonusoj.

Alia enigma afero, pri kio (de mi legitaj faklibroj) klare, kompreneble ne skribas, la konduto de lumradioj dum trapaso tra materialoj, kies refraktivo estas diversa. Laŭ la formulo de Descartes kaj Shnellius la lumrapido optike pli densa materialo estas malpli granda ol en aero. Tial la radio ŝanĝas la direkton. Sed post la trapaso la rapido denove estas „c”. Kiaspeca forto akcelas la fotonon post la trapaso?

Arbitre nur malofte mi kreis fak-vortojn. Se necesis el konataj, ekzistantaj vortoj mi klopodis fari kunmetaĵojn. Mi esperas, ke post iom cerbumado ĉiu komprenos ilin. Mi esperas, ke atentema leganto povos multe lerni el la libro, kaj trovos aferojn pri kiuj estas inde plu cerbumadi. La rimarkojn, kritikojn, proponojn al tiu ĉi reta teksto mi atendas de la legantoj, uzante ilin, eble povos aperi bona, bela optika libro-serio en Esperanto

Pro la helpo en la ĝis nuna laboro akceptu mian sinceran dankon Mati Lahtinen kaj László Szilvási.. Eble ankaŭ mastroj de ceteraj temoj de la fizikolibro-serio emos eklabori.

János Sárközi

HU, 2600 Vác, Pf 127

(Cserje u. 35)

sarkozi32@freemail.hu

1. OPTIKO

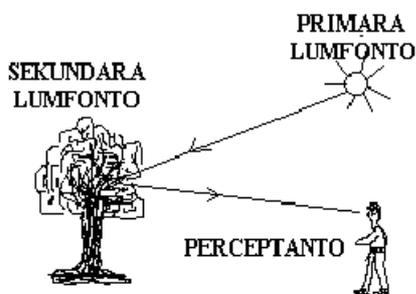
1. La temo de la optiko estas: esplorado de la ecoj de la lumo, kaj fenomenoj, en kiuj la lumo rolas. Apliko de la lumo en diversaj sciencaj kaj praktikaj celoj; por tio kreo de iloj.

1.1 La lumo, kiel transportanto de energio

La nuna stato de la senviva materialo kaj la vivularo de la tero **elformiĝis per la energio de suno**, kiu alvenis ĉi tien en formo de radioj. Ankaŭ la nunan teran vivon funkciigas la energio de **sunradioj**. Intuicie ekkonis ĝin jam la antikvaj egiptoj, tial ili adoris la sunon kiel dion. La nuna tekniko komencas uzi la lumon kiel transportanton de energio (vidu: laseroj), kaj kiel senperan energio-fonton. (sunĉeloj)

1.2 La lumo, kiel transportanto de informoj

Granda parto de la vivularo akiras informojn pri la ĉirkaŭanta mondo pre de lumradioj. **Iu lumfonto radias lumon** (primara lumfonto), kaj **la lumradioj reflektiĝas de objektoj aŭ de vivuloj**. (Sekundaraj lumfontoj)



B 1-1

La reflektitajn lumradiojn perceptas la okuloj de vivuloj, tial ili havas informojn pri la ekzisto, pri la formo, pri la moviĝo, pri la distanco pri la koloro, pri la eco de la surfaco de la koncerna alia vivulo aŭ objekto.

Ankaŭ la moderna informo-tekniko uzas la lumon kiel peranton en lumkonduktaj kabloj. (Vidu ĉe la instrumentoj.)

1.3 La lumo estas ano de la elektromagneta ondofamilio

La elektromagneta ondo estas propagiĝo de energio, kiun estigas moviĝo, vibrado de elektraĵaj ŝarĝoj, kie la energiodiferenco inter la antaŭa kaj posta stato de elektrono

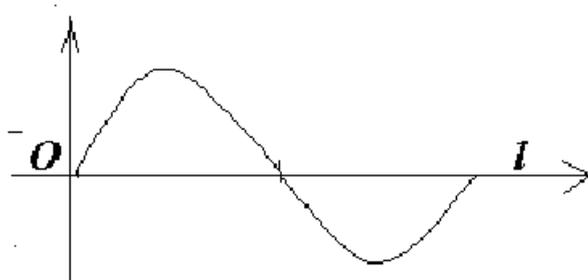
ferradiiĝas kiel elektromagneta ondo. La rilaton inter elektraĵ, magnetaj fenomenoj kaj lumo, la ecojn de la elektromagnetaj ondoj malkovris, kaj matematike formulis la granda skota fizikisto Maxwell (meksel) en la jaro 1862.

La elektromagnetajn ondojn (ĝenerale ĉiun ondopropagiĝon) karakterizas tri ecoj: **ondolongo (l)**, **frekvenco (f)**, **rapido de la propagiĝo (c)**. Inter ili ekzistas jenaj rilatoj:

$$l = c/f, \quad \text{F 1.1} \quad c = f \cdot l, \quad f = c/l,$$

La **tempodaŭro** de unu vibro: $t = 1/f$, [sekundo], **f estas la nombro de vibroj dum unu sekundo.**

B.1-2 La ondolongo (l) dum unu plena vibro:



c estas la lumrapido en vakuo (kaj proks. ankaŭ en aero). Laŭ la teorio de la relativeco, kreita de Einstein (ajnŝtejn) **c estas la plej granda ekzistanta rapido**. Ĝia granda estas $2.9979 \cdot 10^8$ m/s (metroj dum unu sekundo).

E 1.1 Kelkaj ekzemploj:

La ondolongo de reta kurento kies frekvenco estas 50 Hz (herc) estas:

$$l = c/f = 2.9979 \cdot 10^8 / 50 = \hat{c} 6000 \text{ km}$$

La frekvenco de radiodissendo al kiu apartenas 500 m ondolongo:

$$f = c/l = 2.9979 \cdot 10^8 / 500 = 599.580 \text{ Hz}; \hat{c} .600 \text{ kHz}$$

La frekvenco de 555 nm ondolonga lumradio

$$f = c/l = 2.9979 \cdot 10^8 / 555 \cdot 10^{-9} = 5.402 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

La ondolongo, kiu apartenas al 6 MHz ($6 \cdot 10^6$ Hz) $l = 49.965 \text{ m}$

1.4 La lumrapido

C, la rapido de la propagiĝo de la lumo estas grava fizika konstanto, tial estas bezonate scii ĝian valoron. Laŭ la nuna kono ĝi estas **$(2.997925 \pm 0.000003) \cdot 10^8$ m/s.**

La rapidon de la lumo unue mezuris Römer, dana astrnomo, per observado de la lunoj de la planedo Jupitero, en 1676. Poste sekvis pluraj astronomiaj mezuroj, kaj la rezulto iĝis ĉiam pli preciza. Surteran mezuron Fizeau (fizo) faris unuafoje en la jaro 1849.

Poste sekvis Cornu (kornu), Foucault (fuko). Ĉies metodo **faris** per dentrado aŭ per turniĝanta spegulo el la lumo de iu lumfonto **mallongajn lumimpulsojn**. En ia certa distanco oni metis spegulon, kaj la spegulo reflektis la lumimpulsojn al la dentrado. Konante la distancon inter la dentrado kaj spegulo, kaj la distancon inter la dentoj, la turnorapidon de la dentrado kiam la reflektita lumo povis trapasi, la lumrapido estis kalkulebla, kaj donis saman rezulton kiel la astronomiaj mezuroj, pruvante, ke **la lumrapido en vakuo kaj en aero praktike estas sama**. Michelson (majkelson) mezuris la lumrapidon per sia interferometro. Nuntempe per optikelektronikaj metodoj oni jam facile povas mezuri la lumrapidon uzante nur mallongan distancon. Tio ebligas la mezuron de lumraido pri ĉiuj travideblaj materialoj.

En la menciitaj metodoj **oni mezuris la lumrapidon per impulsoj, do la rapidon de kune pasantaj ondogrupoj**. Tial oni nomas la rezulton “**grupo-rapido**”. La gruporapido en ĉiu materio estas malpli granda, ol tiu estas en vakuo.

Krom la gruporapido ekzistas ankaŭ aparta **fazo-rapido**, ĉar la fazo de la ondo ŝanĝiĝas dum la trapaso de materio. Tio havas signifon ĉe la **reflekto** kaj **refrakto** de la lumo. **La du rapidoj en vakuo estas samaj**, sed en materio ili estas diversaj.

1.5 La familio de la elektromagnetaj ondoj

Nun oni trarigardos la tutan familion de la elektromagnetaj ondoj. **Dum la propagiĝo ili kondukas kiel ondoj**. Sed se ili renkontiĝas **kun materio**, ili kondukas kiel apartaj **korpuskloj**. Tiujn apartajn korpusklojn oni nomas **fotonoj**. Ĉiu fotono **havas energion**, kiu dependas nur de la longo de tiu ondo (aŭ frekvenco), kiu apartenas al la fotono.

La energio de unusola fotono:

$$\text{F.1.2} \quad E = h \cdot c / l \quad [\text{J}]$$

h : estas la Planck (plank)-konstanto, kies valoro estas

$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}$ (: joule = ĵul), c estas la lumrapido [m/s], l estas la ondolongo [m]. Estas videble, ke la energio laŭ la malkresko de la ondolongo, proporcie kreskas. La duspecan konduton de la lumo (ondo, korpusklo) la kvantummekaniko povas klarigi kaj harmoniigi.

T 1.1 La plena serio de la elektromagnetaj ondoj:

Nomo	Ondolongo [m]	Frekvenco [Hz]
alterna kurento	18...3*10 ⁶	16...100
radio-ondoj		
mezaj	600... 150	(5...20)*10 ⁵
mallongaj	50 15	(6...20)*10 ⁶
UKO (ultra k.)	15. ...1	(2...30)*10 ⁷

Mikroondoj	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^8 \dots 10^{13}$
lumo		
antaŭruĝa	$3 \cdot 10^{-10} \dots 7.6 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{12} \dots 3.9 \cdot 10^{14}$
videbla	$(7.6 \dots 3.8) \cdot 10^{-7}$	$(3.9 \dots 7.8) \cdot 10^{14}$
postviola	$3.8 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-8}$	$7.8 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$
Rentgena (x) rad.	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{20}$
gama rad.	$3 \cdot 10^{-10} \dots 3 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{18} \dots 1 \cdot 10^{22}$
kosmaj rad.	$3 \cdot 10^{-14} \dots 3 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{22} \dots 1 \cdot 10^{24}$

El tiu ĉi larĝa spektro la homa okulo povas percepti nur la tre mallarĝan 380...760 nanometran intervalon. Ĝia nomo estas la **bendo de videbla lumo**. Tiun studas kaj uzas la optiko. Krome ankaŭ partojn el la antaŭruĝa kaj postviola terenoj.

La koloro de la lumo **dependas** nur de **ĝia ondolongo**. Al la plej longa ondo de la videbla spektro apartenas **la ruĝa, la plej bone videbla estas la verd-flava, kaj ĉe la alia fino** de la videbla spektro estas la **viola** koloroj.

En la optiko la mezurunuo de longo estas plej ofte la **nanometro** ($=1 \cdot 10^{-9}$ m). La malnova literaturo uzas la mezurunuon Angström ($1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10}$ m)

T 1.2 Ondolongoj kaj frekvencoj apartenantaj al kelkaj lumkoloroj:

Koloro	Ondolongo [nm]	Frekvenco [Hz]
ruĝa	720.2	$4.16257 \cdot 10^{14}$
oranĝa	600.2	$4.99508 \cdot 10^{14}$
flava	589.17	$5.08865 \cdot 10^{14}$
verda	495.02	$6.05463 \cdot 10^{14}$
blua	410.29	$7.06741 \cdot 10^{14}$
viola	396.85	$7.55430 \cdot 10^{14}$

Se la lumfasko enhavas nur **unu frekvencon**, oni nomas la lumon **unukolora**; en la scienca literaturo laŭ greka vorto “monokromata”. Tian lumon emisas ekscititaj gasoj kaj laseroj. **Ĉiun koloron havas la ĉielarko**. Ĉijn kolorojn emisas ankaŭ **ardantaj**

solidaj korpoj. La miksaĵo de ĉia videbla lumo ŝajnas blanka, ekzemple la taga sunlumo estas preskaŭ tia.

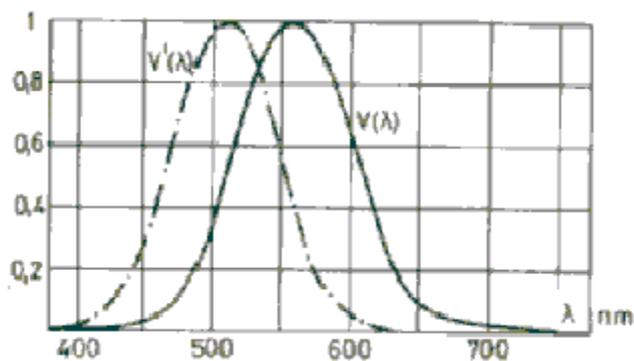
2.

La fotometrado

Fotometrado estas **mezurado de ecoj de la lumo**, kaj tiuj de la **lumfontoj**. Krom la koloro karakterizas lumon ankaŭ la intenso aŭ flukso. Ĉar **en la lumo propagiĝas energio**, oni povas pensi, ke la mezuro de la lumflukso estas simpla mezuro de energio, kiun transportas la koncerna lumfasko dum tempounuo. Tamen la afero estas ne tiel simpla. Memoru; la lumo estas la videbla intervaleto el la larĝa serio de la elektomagneta spektrobendaro. Do, **la lumo estas nur tiu parto de la energio, kiun la homa okulo povas percepti**. Nu, se oni volas mezuri la lumflukson, unue devas ekkoni, kiomgrade la homa okulo povas percepti la diversajn kolorojn.

Per precizaj, sciencaj manieroj tio ankoraŭ nuntempe estas nedeterminebla. Tial **per eksperimentoj oni determinis**, ke kiel bone perceptas la flukson de **diverskoloraj lumoj multaj diversaj homoj**. Por ĉiu videbla ondolongo oni kalkulis la mezvaloron, kaj nomis ĝin **“koeficiento de videblo”**. Ties signo estas $V(\lambda)$, kaj **ĉe 555 nm** ondolongo estas $V(\lambda)=1$. Ĉe aliaj ondolongoj $V(\lambda)<1$. (Pli precize $V(\lambda)$ validas nur je taglumo. Por krepusko, kiam la koloroj jam estas malbone videblaj, estis difinita ankaŭ $V(\lambda)'$, kies maksimuma valoro estas ĉe 507nm.) $V(\lambda)$ valorojn oni desegnis kiel kurbon laŭ la ondolongoj. Tiu estas la kurbo de la kolor-perceptivo de la homa okulo. (La kurboj, apartenantaj al $V(\lambda)$ kaj $V(\lambda)'$ estas tute similaj, nur la maksimumoj situas ĉe malsamaj ondolongoj. En la praktiko oni uzas la $V(\lambda)$ -kurbon.

B 2-1



T 2.1

$\lambda / V(\lambda) \text{ (nm)} / (V(\lambda) / V(\lambda)_{\text{maks}})$

380/0.0000, 390/0.0001, 400/0.0004, 410/0.0012, 420/0.0040, 430/0.0116, 440/0.023,
 450/0.038, 460/0.060, 470/0.091, 480/0.139, 490/0.208, 500/0.323, 510/0.503,
 520/0.710, 530/0.862, 540/0.954, 550/0.995, 560/0.995, 570/0.952, 580/0.870,
 590/0.757, 600/0.631, 610/0.503, 620/0.381, 630/0.265, 640/0.175, 650/0.107,
 660/0.061, 670/0.032, 680/0.017, 690/0.0082, 700/0.0041, 710/0.0021,
 720/0.00105, 730/0.00052, 740/0.00025, 750/0.00012, 760/0.00006, 770/0.00003,
 780/0.000015

La **maksimuma perceptivo** de la homa okulo estas ĉe la **verd-flava 555 nm**-a ondolongo. Tio estas ne hazardo, ĉar la perceptivo elformiĝis dum jarmilionoj, dum kiuj la prauloj de la homo vivis en la libera, verdkolora naturo. (Estas interese, ke certaj bestoj vidas ankaŭ aliajn kolorojn, -antaŭruĝan, post- violan, (insektoj)- sed ekzistas bestoj, kiuj ne povas percepti kolorojn, ili vidas la mondon nigra-blanka.)

Kiamaniere oni povas uzi tiun ĉi kurbon kaj tabelon? Oni devas mezuri en ĉiu ondolongo-intervalo la tutan povumon. La mezuritan povum-kvanton multobligi laŭ la tabelo per $V(\lambda)$ koeficiento. Fine oni adicias la multobligitaĵojn, kaj la sumo estos la povumo de la lumfasko en lumeno-mezurunuo.

Pli science, oni povas kalkuli jenan integralon:

$$\text{F 2.1} \quad \text{lm/W} = N_{\text{maks.}} * \int_{\lambda=380}^{780} V(\lambda) * S(\lambda) d\lambda$$

($S(\lambda)$ estas la relativa povumo $N(\lambda)/N_{\text{maks}} \leq 1$, $N_{\text{maks}} = 680 \text{ lm/W}$ (pri tio poste.))

La kalkulado tiamaniere ŝajnas simpla, kaj vere estus tia, se $V(\lambda)$ estus esprimebla aŭ alproksimigebla per ekvacio. (plej bone alproksimas ĝin la Gauss-kurbo)

Ekzakte la problemo matematike estas nesolvebla, tial oni uzas tabelojn, grafikan integradon (planimetrijo) aŭ aliajn ne tute ekzaktajn metodojn. Nuntempe per komputilo la problemo estas facile solvebla uzante numeran integradon. Ĝi estas tre utila, se oni volas kalkuli la lum-transmision de iu optika filtrilo, aŭ la perceptitan lumenergion de iu optikelektronika instrumento.

2.2 Kandelo, Lumeno, Lukso, Nito

Oni jam vidis, ke la **lumo estas energio**, tamen ĝi estas speciala, **ĝia mezuro postulas specialajn metodojn kaj mezurunuojn. La baza SI mezurunuo de la optiko estas la lumintenso** (germ.:lichtstärke, angl.:luminous intensity), kies **mezurunuo** estas la **kandelo (cd)**. 1 kandelo estas la lumintenso de tiu lumfonto, kiu en donita direkto forsendas unukoloran radiadon kun frekvenco de $540 * 10^{12}$ hercoj, kaj kies povumo estas po 1/683 wattoj en unu spacradiano. (pli konata estas la difino: Nigra korpo kies surfaco estas 1 kvadratcentimetro kaj ĝia temperaturo estas 2042 K, -tio estas la fandpunkto de plateno- en orta direkto ĝi radias per 60 kandela lumintenso.)

Spacradiano (sr) estas tridimensia unuo de angulo en la spaco. El la surfaco de sfero kies radiuso estas unu metro, 1 spacradiano eltranĉas 1 kvadratmetran surfacon. (la plena spacangulo= $4 * \pi = 12.56$ spacradianoj.)

Lumeno (lm) estas la mezurunuo de la **lumflukso**. 1 lm = 1 cd/sr. Lumfonto, kies lumintenso estas 1 kandelo, en 1 spacradiana spacangulo forradias lumflukson de 1 lumeno. **1 kandelo en la plena spacangulo forradias $4 * \pi$ lumenojn.**

Ĉe unukolora radiado, kies ondolongo estas 555 nm (tie estas la maksimumo de la perceptivo de la homa okulo) **1W** elradiita povumo egalas al **682 lumenoj**. Oni nomas ĝin **mekanika egalvaloro de la lumeno**.

Lukso (lx) estas la **mezurunuo** de la **lumiga intenso** (aŭ helo) de iu **priradiata surfaco**. 1 lx estas la lumiga intenso de 1 kvadratmetra surfaco, se trafas ĝin 1 lumena lumflukso el orta direkto. (1 lx estas la helo de interna surfaco de sfero kies radiuso estas 1m, kaj meze brilas lumfonto per 1 kandela lumintenso.

Nito (nt) estas la **unu de la brilo de la surfaco de lumfonto mem**. 1 nt estas la brilo de 1 kvadratmetra surfaco, se ĝia lumintenso estas 1 kandelo. (Ĝenerale oni uzas la mezurunuon stilbo. 1 **stilbo** estas la brilo de 1 kvadratcentimetra surfaco, se ties lumintenso estas 1 kandelo. **1 st = 1*10⁴ nt**)

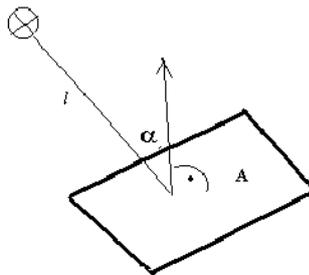
2.3 Lumfonto de Lambert, la kosinus-leĝo de Lambert

La bazajn principojn de la fotometrado malkovris Lambert, tial lia nomo estas konservata per la **Lambert-lumfonto**, kaj per la **kosinus-leĝo**. La Lambert-lumfonto estas teoria nocio. ĝi estus "nigra" radianto, kiu radias en ĉiu direkto en la spaco per la sama flukso. Lambert konstatis, ke la prilumigiteco de iu ebena objekto dependas ankaŭ de la **trafango** kiu estas **inter la direkto de la lumfonto kaj la ortanto de la prilumigata ebena**. Estas facile kompreni, ke la prilumigiteco estas maksimuma, se la surfaco estas orta je la lumradio; nulo, se tiu estas paralela kun la lumradio. Tial validas la ekvacio (ni vidas la surfacon de iu ebena plej granda el orta, nulo, el paralela direkto.) je ĉiu trafango:

$$F 2.2 \quad E = E_0 \cdot \cos \alpha$$

α = trafango inter la ortotanto kaj la radio

B 2-2



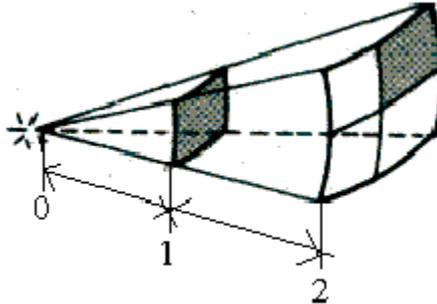
2.4 La rolo de la distanco inter la lumfonto kaj objekto

Ĉiu spertis, ke la **helo** de iu objekto **dependas ankaŭ** de la **distanco**, kiu estas inter la objekto kaj la lumfonto. Tio dependo estas ne lineara, sed -se la lumfonto estas punktsimila, **kvadrata**.

Por kompreni tion, oni imagu, ke iu punktsimila lumfonto estas en la centro de sfero, kies radiuso estas 2 metroj. La tuta interna surfaco estas egale prilumigata. Se la

radiuson de la sfero oni duobligas, do ĝi estos 4 metroj, la lumintenso ne duoniĝas, sed kvaroniĝas, ĉar la surfaco de la sfero estas proporcia al la kvadrato de la radiuso. Tial la sama lumkvanto disdividiĝas sur kvarobligita surfaco, do trafas ĝin nun kvarono el la lumradioj. Do, se oni **duobligas la distacon** inter lumfonto kaj la prilumata objekto, **la helo estas nur la kvarono** de la antaŭa.

B 2-3

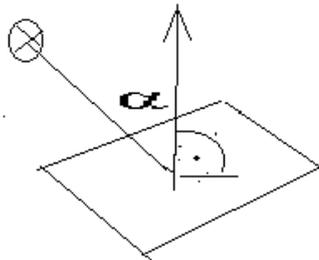


Se oni kunigos tion al la kosinus-leĝo, ricevos **ĝeneralan ekvacion pri la prilumiteco**.

$$\text{F 2.3} \quad E = E_0 \cdot A \cdot \cos \alpha / l^2$$

E: intenso de la prilumigiteco, E_0 : intenso de la prilumanto, A estas la prilumata surfaco, l estas la distanco inter A kaj la lumfonto, α trafangulo inter la ortanto kaj radio.

B 2-4



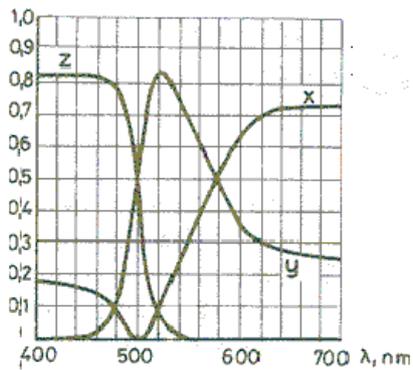
2.5 Instrumentoj por fotometrado

La evoluigon de diversaj mezuriloj, per kiuj oni povas mezuri la kvantajn ecojn de la lumo, necesigis la produktado de elektraj lumiloj, la fotografado, la produktado de ties materialoj, kaj la uzado de fotometrado en kemia analizo.

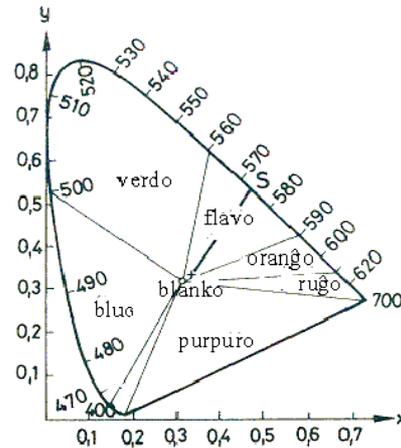
La uzado de tiuj iloj komence **baziĝis sur komparado**. Oni komparis la lumon de la ekzamenata lumfonto kun la lumintenso de iu konata lumfonto per iaj metodoj kaj iloj. Tiuj iloj nuntempe jam havas nur historian signifon. La **modernaj mezuriloj uzas** eksklusive nur **elektrajn aparatojn**. La tensio U aŭ kurento I de certaj elektraj konstruelementoj povas aliĝi proporcie al la intenso de la prilumado. Tiuj iloj povas esti fotopiloj, fotorezistiloj, fotodiodoj, fototransistoroj, elektronmultobligiloj. Ili **transformas la lumon iamaniere elektra signo**, U, I kiuj estas mezureblaj, aŭ uzeblaj por ia regulado. Estas bezonataj la kono de perceptivo, ties dependo de la ondolongo. La celo, ke la elektra signo estu rekte proporcia al la granda da la mezurenda lumfenomeno, estas realigebla per optikaj filtriloj, kaj, aŭ per elektronikaj metodoj.

Ĉi tie estas menciende la tiel nomata “**kolor-mezuro**”. Ĝi povas precize difini ĉiun koloron per X,Y,Z nombroj. X reprezentas la kvanton de la ruĝa, Y la verda, Z la blua koloroj. La mezuro okazas uzante tri optikajn filtrilojn, ĉiu el ili tralasas nur unu el la menciitaj koloroj. Pli moderna metodo determinas la koloron per la spektro: al ĉiu koloro apartenas ia intenso de X, Y,Z kolorkoordinatoj

B 25,



B 251



2.6 Ekzemploj

Estas grave, ke oni havu ian imagon pri la ĝis nun menciitaj nocioj. Ekzemple, kion signifas la lumintenso kaj ĝia mezurunuo, la kandelo?. **Oni rigardu kiom lumintenson havas kelkaj lumfontoj.**

T 2.2

Lumfonto	lumintenso [kandeloj]
ordinara kandelo	0.5...1
petrolaj lampoj	25 .250
normalaj elektraj inkandeskaj lampoj	140
lampoj por hejma filmprojekciado	500...2000
lampoj por grandaj kinofilmprojekciiloj	proks. 20000
armeaj lumjetiloj (kontraŭ aviadiloj)	80 000 000

Se oni konas la lumintenson, **ebblas facile kalkuli la lumflukson:**

$$1 \text{ cd} = 4 \cdot \pi \cdot \text{lm} = 12.56 \text{ lm}$$

En katalogoj nuntempe la lumflukso estas menciita. Normala 100 W-a inkandeska lampo radias 1400 lumenojn. Do ĝia lumintenso estas $1400/12.56=111.5 \text{ cd}$

Estas interese, ke la homa okulo povas percepti tre larĝan skalon el la helo.

T 2.3 Jen, kelkaj ekzemploj:

Lumiga intenso (helo)	luksoj
Nokte, kiam brilas nur la steloj:	0.002
Nokte, kiam ankaŭ la luno brilas:	0.5
Taga lumo sen sunbrilo	2000
Somera sunbrilo	100 000
Surstrata, nokta prilumado	2...15
Por fari maldelikatan laboron estas bezonataj:	20...40
Por lego kaj skribo:	60 90
Por desegnado:	150...300
Por delikata laboro	150 2000
La minimuma helo, kiun la homa okulo povas percepti:	0.0000001

Oni faru kelkajn kalkulojn.

E 2.1 Ĝus estis mencio, ke 100 W-a inkandeska lampo radias 1400 lumenojn, kaj la homa okulo povas percepti $1 \cdot 10^{-7}$ luksojn. El kiom distanco estas ankoraŭ videbla la lumo de tiu lampo, se la aero estas tute pura?

El formulo F 2.3 oni apartigu l -on. $E = E_0 \cdot \cos \alpha / l^2$ $E_0 = 1400 / 12.56 = 111.5 \text{ cd.};$
 $\cos 0 = 1,$

$$l = \sqrt{E_0 / E} = \sqrt{111.5 / 1 \cdot 10^{-7}} = 33\,378 \text{ m} = 33.4 \text{ km!}$$

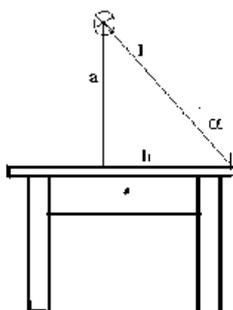
E 2.2 Kiom estos la helo de iu surfaco, se la sama lampo prilumas ĝin el la distanco de 10 metroj, la trafangulo estas orta (1), poste 45 gradoj (2)?

$$\alpha = 0 \quad \cos 0 = 1 \quad E = E_0 / l^2 = 111.5 / 100 = 1.115 \text{ lx}$$

$$\alpha = 45 \quad \cos 45 = 0.71 \quad E = 111.5 \cdot 0.71 / 100 = 0.79 \text{ lx}$$

E 2.3 La lampo nun pendu 2 metrojn super la mezo de tablo. La longeco estu 2 metroj. Oni kalkulu la helon sur la mezo kaj sur la rando de la tablo.

B 2.6



$a=2$ m, $b=1$ m. Laŭ la pitagora formulo $l^2=5$. La helo meze estas E_0
 $/d \cdot l^2 = 111.5/4 = 27.91$ lx.

La helo rande estas kalkulebla jene: $90-\alpha = \arctan(a/b) = \arctan(2) = 63.3^\circ$
 $\alpha = 90 - 63.3 = 26.7^\circ$, $\cos 26.7^\circ = 0.893$

$$E = E_0 \cdot \cos \alpha / l^2 = 111.5 \cdot 0.893 / 5 = 19.9 \text{ lx}$$

E 2.4 Jam estis menciite, ke lego bezonas helon de 60...90 luksoj. Per la jam kekfoje uzita 100 W-a lampo oni prilumu la legatan folion tiel, ke la helo sur la folio estu 80 lux-oj, kaj la trafangulo de la lumradioj estu 20 gradoj. Oni kalkulu kiom granda devas esti la distanco inter la lampo kaj la mezo de la folio. El la formulo F 2.3

$$l = E_0 \cdot \cos \alpha / l^2 = 111.5 \cdot 0.94 / 80 = 1.14 \text{ m.}$$

Neniam oni forgesu, ke en tiuj ĉi ekzemploj okazis **nenia reflekto** de lumo, do ni kalkulis nur pri rekte trafantaj lumradioj. En ejo, kie la muroj, plafono, aliaj objektoj ĉiam reflektas lumon, **la vera helo estas ĉiam pli granda** ol la supre kalkulitaj valoroj. Eĉ se malantaŭ inkandeska lampo estas **reflektilo** la prilumado preskaŭ duobliĝas.

Alia grava afero, ke la supraj kalkuloj validas nur pri **punktsimilaj lumfontoj**. Pripensu; se la lumfonto estas ampleksa, ekz. temas pri lumtubo, kaj la prilumata objekto estas proksime. Tiam lumradioj trafos ĝin el diversaj distancoj kaj direktoj. Kalkuli prilumadon en tiu kazo eblas, sed estas komplike. Por preciza kalkulado oni devas kalkuli la efikon de ĉiu punkto de la lumfonto, surbaze de la distanco kaj direkto, kaj fine adicii la unuopajn rezultojn. Per integralo tio eblas. Foraj ampleksaj lumfontoj, malgraŭ ilia grandaj dimensioj (ekz. Suno) jam povas esti konsiderataj punktsimilaj.

Jam mi menciis, ke realaj lumfontoj nur malofte estas punktsimilaj. Ili ĉiam havas pli-malpli grandan surfacon. Tial ilia lumintenso disdividiĝas sur la surfaco.

La brilo de la surfaco dependas de tio, ke la sama lumintenso disdividiĝas sur kiom granda surfaco.

La brilo de iu lumfonto havas signifon ĉefe en ejoj, kie homoj restadas proksime al lumfontoj, kaj senpere povas vidi ilin. **Tro granda brilo povas damaĝi la okulojn.** Por bonkvalitaj inkandeskaj lampoj **tial** la fabrikantoj **produktas ampolojn el diafana, lumdifuziga vitro**, aŭ korodigas la internan surfacon de la travidebla ampolo per acido, aŭ kovras ĝin per lumdifuziga tavolo.

Sed la brilego de la filamentoj de inkandeskaj lampoj estas reduktebla, se oni metas la lampon en diafanan difuzigan ujon, kies dimensio multe pli granda ol tiu de la lampo, kaj la formo ĝenerale estas kuglo.

E2.5 Kiel ekzemplon denove oni rigardu la 100 W-an lampon, iom neglektante ĝian formon. Oni supozu, ke ĝia formo estas sfero, el difuziga materialo, kun 6 cm diametro. Do la surfacareo estas: $s = \pi \cdot d^2 = \pi \cdot 6^2 = 113$ kvadratcentimetroj. Oni jam scias, ke la lumintenso de la lampo estas 111.5 cd. Do la brilon oni ricevos, se dividos ĝin per la surfacareo. $111.5/113 = 1.022$ sb

Nun oni metu tiun lampon en diafanan, difuzigan vitrosferon, kies diametro estas 30 cm. Laŭ kalkulo la brilo sur la surfaco estas: $111.5/(\pi \cdot 30^2) = 0.04$ sb

E 2.6 Lumtuboj havas ĝenerale grandan surfacon, tial ilia brilo estas malgranda. Ekz. 40 W-a lumtubo radius 1600 lumenojn. Do ĝia lumintenso estas $1600/4 \cdot \pi = 127.3$ cd. Ĝiaj geometriaj dimensioj: la diametro estas 3 cm, la longo estas 120 cm. Do la surfac-areo: $3 \cdot \pi \cdot 120 = 1131$ cm². Tial la brilo estas: $127.3/1131 = 0.11$ sb

T 2.4 Estas interese kompari la brilon de kelkaj lumfontoj:

normalaj kandeloj:	1 sb
luno	1 sb
wolfram-filamento (100 W-a lampo)	3000 sb
karba elektra arko:	15000 sb
Suno:	20 000 sb

Grandaj lumintensoj malsanigas la okulojn, tial rigardi al objektoj, kies brilo estas granda, estas ne saĝa afero.

2.7 Rilato inter diversaj mezurunuoj de la brilo

T 2.41

Mezurunuoj de la brilo

1 sb (stilbo) =	$1 \cdot 10^4$ nt (nito)
1 asb (apostilbo) =	0.31831 nt
1 L (lamberto) =	3183.1 nt (1/(sb))
1 cd/ft (kandelo per square foot) =	10.764 nt
1 fl (foot lambert) =	3.42626 nt
1 ph (phot) =	$1 \cdot 10^4$ lx (lukso)
1 ph cd (phot-candle) =	10.67391 lx

3. Estiĝo kaj estiĝo de lumo

Jam multe oni parolis pri la ecoj de la lumo, sed ne pri tio, ke **kiamaniere lumo estiĝas**. Kial materialoj emisas elektromagnetajn ondojn, kiuj ĉiam ĉirkaŭas nin, kreskigas por ni nutraĵojn, varmigas nin, kaj ebligas la vidon.

3.1 Naturaj lumfontoj

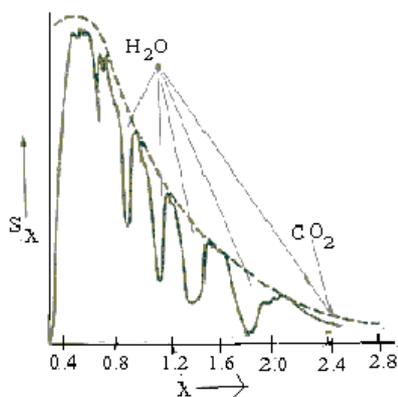
En la naturo el nia vidpunkto la plej grava lumfonto estas **Suno**. En ĝi la energion liveras **atoma transformiĝo**. El unuiĝo de hidrogenatomoj estiĝas heliumatomoj, dume liberiĝas grandega energio. La materialo transformiĝas tie en energion; ja la estiĝinta helium-kvanto estas malpli granda ol la transformiĝinta hidrogen-kvanto. **El la masodiferenco (m) estiĝas energio (E)**. (Tie validas la ekvacio, kiun formulis Einstein: $E=m*c^2$. Ĝi donis ideon fari hidrogen-bombon.)

La energio Suno forradfias kiel elektromagnetajn ondojn.

Pro la granda temperaturo kaj alta premo, –pro la grandega gravito– malgraŭ, ke la suno konsistas el gasoj, la **spektro** de la radiado estas **kontinua**. (En la kontinua spektro Fraunhofer trovis **nigrajn striojn**. Estigas ilin la absorbado fare de la ĉeestantaj gasoj. La strioj ebligis la malkovron de heliumo.) La temperaturo de la sunsurfaco estas 5760 K. La temperaturo de la interna parto estas 20 000 K. Do, **la spektro de la sunradiado estas kontinua, la energio-maksimumo estas en la videbla intervalo**, tial la sunbrilo ŝajnas (iom flav-) **blanka**.

La plena forradiata povumo-kvanto de Suno estas $3.724*10^{26}W$. La flukso de la povumo sur la sunsurfaco estas $6.13*10^7 W/m^2$. El tiu grandega energio-kvanto **atingas la tersurfacon nur proks. maks. 1000 W/m²** pro la granda distanco kaj pro la absorbado en la tera atmosfero.

B 3-1



Absorbado en la tera atmosfero, ĉefe gasoj; ozono, akvovaporo, karbondioksido malhelpas la alvenon de la plena spektro de la sunradiado sur la tersurfacon. Tio **ebligas la nunan formon de la tera vivo**. **Ĉar sen ŝirmo de la ozontavolo la intensaj postviolaj sunradioj neniigus la vivulojn. Krome tiuj gasoj formas la averaĝan teran temperaturon** (parte per malhelpo de alveno al la plena spektro sur la tersurfacon, parte per la reduktado de la varm-radiado de la tero.) Sed ĉi lasta povas esti ankaŭ danĝera, ebligante la trovarmiĝon sur la tersurfacon.

La teran vivon ebligas tre delikataj ekvilibraj statoj, kiuj elformiĝis dum jar-miliardoj. Tre danĝera afero estas, ke la troa homa aktivado, granda nombro de la homaro, senbrida, senresponseca industriigo, neniigo de praarbaroj, konsumado de superflujaj aĵoj kiel vivcelo, la prioritato de profito, la delikatan ekvilibron dum kelkaj jardekoj povas signife ŝanĝi. Malgraŭ la averto de saĝaj scienculoj kaj mondscale pensadantaj responsecaj homoj, organizoj, la danĝera tendenco ne reduktiĝas.

Dum jarmiliardoj la unusola lumigilo estis la suno, kiu limigis la agadon de la vivularo. Luno, kiel grandega reflektilo, nokte iom prilumas la teron. Ekzistas krome la nordpolusa lumino, kiun jonizitaj aero-molekuloj emisias je la efiko de la forta magnetika kampo. Ankaŭ kelkaj vivuloj povas emisii lumon per efiko de kemiaj reakcioj. Ili estas certaj fiŝoj, lampiroj, bakterioj k.a.

3.2 Artefaritaj lumfontoj

Unue, kiel lumigilo kaj varmigilo aperis **fajro**. La prahomoj trovis fajron, kiam fulmo trafis arbon. Post kiam ili ekkonis ĝian utilecon kaj uzeblecon, tre zorgeme gardis ĝin. Poste la prahomo ellernis estigi fajron per frotado de sekaj lignopecoj; per frapado de certaj ŝtonoj. Dum jarmiloj la prahomoj uzis la fajron en natura formo prilumi kaj vintre varmigi la kavojn, kavernojn, kie ili loĝis, kaj fortimigi rabobestojn. Poste ili evoluigis diversajn, simplajn lumigilojn; **torĉojn, meĉojn, kandelojn, petrolajn lampojn**, kaj uzis ilin ĝis la pasinta jarcento. Tiam ili komencis uzi **lum-gason** poste **elektran energion**.

Fajro estas rapida kemia transformiĝo de materialoj. Plej ofte karbono komponiĝas kun oksigeno; estiĝas **karbondioksido, varmo kaj lumino**. Materioj, kiuj enhavas karbonon, ekz. ligno, ellasas bruligeblajn gasojn pro varmigado. Ili unuiĝante kun oksigeno estigas varmon, kaj **en la flamo ŝvebantaj ardantaj karberoj**, lumantaj same kiel solidaj korpoj emisias **kontinuan spektron**. Mem la ardaĵoj de brulantaj solidaj materialoj lumas simile. En gaslampoj lumas ardanta solida korpo, la “stumpo”, kiu estas el asbesto.

3.3 Temperatura radiado

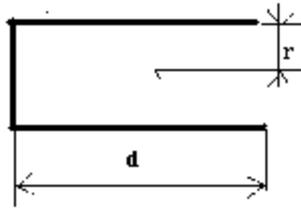
Akceliĝantaj, elektre ŝargitaj korpuskloj ĉiam emisias elektromagnetajn ondojn. Ties kondutojn priskribis Maxwell (maksuel) en siaj ekvacioj. Ĉiu materialo inter la neŭtralaj atomoj havas ankaŭ **ŝargitajn korpusklojn**, kiuj **pro la varmo vibradas** kune kun la atomoj. Se la temperaturo kreskas, la frekvenco kaj amplitudo kreskas. Eĉ pli forta vibrado kreskigas la nombron de la **ŝargitaj korpuskloj** kaj **ekscititaj** atomoj. **Pro interpuŝiĝado elektronoj ricevas energion kaj, ili disŝiriĝas** disde neŭtralaj atomoj, kreskas la nombro de jonoj, do kreskas ankaŭ la intenso de la radiado.

La nomo de tiu ĉi procezo estas **temperatura radiado**. Tie solidaj aŭ fluidaj materialoj emisias **kontinuan spektron**. Do kvankam ne samintense, tamen ĉiu ondolongo ekzistas en la radiado. La kaŭzo estas, la interefiko de la vibrantaj korpuskloj, kaj tio, ke la temperaturo estas statistika mezvaloro, ĉar ne ĉiuj korpuskloj vibras laŭ la sama frekvenco.

La temperatura radiado estas plej bone studebla per **“nigra korpo”**. Ĝi estas varmigebla kavo, kies vandoj ĉie havas saman temperaturon. Ĝi havas mallarĝan truon, kompare al la dimensioj de la kavo. La koloro de la interna parto estas nigra. La nigra korpo **perfekte absorbas la lumon**, kiu enpasas tra la truo, sekve la **koeficiento de la absorbo $\sigma=1$** . Ankaŭ la **koeficiento de la emisio $\epsilon=1$** . Tre grava eco de la nigra korpo estas, ke en ĉiu ondolongo, en ĉiu direkto ĝi elradias la maksimumon de la energio, kio en donita temperaturo de la kavo eblas.

Ĉiu objekto, kiu ne aŭ tre malbone reflektas lumon estas konsiderebla kiel nigra korpo. Ekz. Fulgo, gudro, nigra veluro ktp. Sur ilia surfaco troviĝas amaso da nigraj truetoj. En la praktiko nigra korpo estas realigebla jene:

B 3-2



T 3.1	d/r	6	10	20
	ϵ	0.992	0.995	0.998

Pri studado de temperatura radiado multe okupiĝis grandaj fizikostoj en la fino de la 19-a jarcento kaj en la komenco de la 20-a. Per tiuj studoj Max Planck (maks plank) trovis la **bazojn de la kvantumfiziko**, kaj enkondukis la “**h**”-konstanton, sen kiu la moderna fiziko estas ne imagebla.

Planck konstatis, ke **elektronoj emicias ne kontinuan energion, sed apartajn kvantojn**. Elektronoj, kiuj havas pli grandan energion, ol la baza, kiam ili okupas denove malpli altan energio-nivelon, tiam ili emicias energio kvanton; **fotonon**, kies energio estas $e = h \cdot f$. Estas grave, ke tiu ĉi energio ĉiam devas esti entjera oblo de h . La Planck-konstanto $h = 6.6210^{-34} \text{ Ws}^2$. f estas la frekvenco de la radiado.

Per la **Planck-formulo** estas kalkulebla la radiata energio M de nigra-korpo-surfaco en duon-spaco laŭ ondolongoj:

$$F 3.1 \quad M_{e,s,\lambda} = (2 * \pi * c^2 * h) / \lambda^5 (e^{c*h/\lambda*k*T} - 1)$$

B 3-3



En la formulo c estas la lumrapido, k estas la Boltzmann (bolcman)-konstanto, h estas la Planck-konstanto. λ la ondolongo, T la temperaturo.

Laŭ la **ekvacio de Stefan-Boltzmann**, la radiata **energio de nigra korpo kreskas laŭ kvara potenco de la temperaturo**. (la formulo estis determinita per eksperimentoj, sed ĝi estas la integralo laŭ la plena ondolongo-intervalo de la Planck-formulo.)

$$F.3.2 \quad E = \sigma * T^4, \quad \sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}^4)$$

σ estas la povumo, kiun forradias 1 kvadratmetra surfaca nigra korpo en duonon de la spaco, se ĝia temperaturo estas 1 K.

E 3.1 Kalkulu la povumon, kiun forradias malfermita pordeto de forno, (supozu, ke ĝi radias kiel nigra-korpo.) se la temperaturo ene estas 1000°C ($=1273\text{ K}$), kaj la areo de la pordeto estas 100 cm^2 ($=0.01\text{ m}^2$)

$$N = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 0.01 \cdot 1273^4 = 1498\text{ W}$$

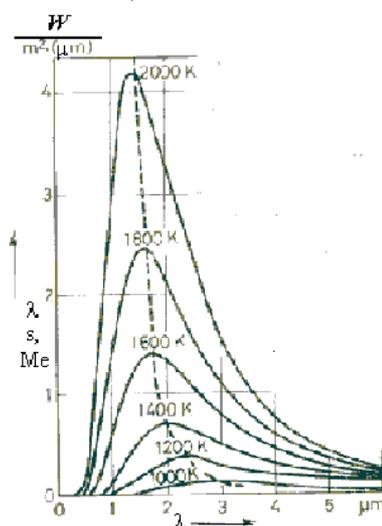
En la naturo vera nigra korpo ne ekzistas. **Realaj objektoj** en la sama temperaturo ĉiam **radias malpli** ol nigra korpo. Ilia kvociento estas la **faktoro de la radiado: $\epsilon < 1$** . En specialaj faklibroj oni trovas tiun faktoron por ĉiu materialo, eĉ ĝian varion laŭ la temperaturo. En kalkuladoj oni devas multoblige la rezulton per ϵ faktoro.

Jam ĉiu vidis, se iu objekto, ekz. varmigita fer-stango havas relative malaltan temperaturon, la koloro de ĝia ardo estas malhel-ruĝa. **Se la temperaturo kreskas**, laŭ la kresko **la koloro iĝas ĉiam pli hela**, unue flaveca, poste preskaŭ blanka. La blankiĝon kaŭzas, ke en alta temperaturo aperas jam ankaŭ la blua parto de la spektro, kaj tiu miksaĵo aspektas iom blanka.

El tiu ĉi sperto **Wien (vin) konkludis**, kaj matematike pruvis, se oni altigas la temperaturon de nigra korpo, la ondolongo, ĉe kiu la objekto forradias la **energio-maksimumon**, fariĝas ĉiam **malpli longa**. Tiu ondolongo estas kalkulebla al ĉiu temperaturo per la **formulo de Wien**:

F 3.3
$$l = 2.88 \cdot 10^{-3} / T \text{ [m]} \quad (l = \text{ondolongo } T \text{ temperaturo [K].})$$

B 3-4



- “- - - - -” La kurbo estas kunligo de la maksimumoj de la izotermoj . Bone ĝi demonstras la teoremon de Wien.

E 3.2 Oni kalkulu la ondolongon, ĉe kiu la antaŭa forno-pordo forradias la maksimuman povumon, se la temperaturo estas 1273 K $l = 2.88 \cdot 10^{-3} / 1273 = 2.26 \cdot 10^{-6}\text{ m}$, aŭ 2260 nanometroj. Tiu ĉi ondolongo apartenas al la antaŭruĝa parto de la spektro.

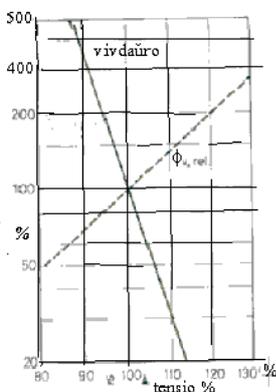
E 3.3 Kaj la ondolongo kiu apartenas al la maksimuma radiado-povumo de Suno kies surfaca temperaturo estas 5670 K ?

$l = 2.88 \cdot 10^{-3} / 5760 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$. Tiu ondolongo situas en la videbla parto de la spektro, proksime al la loko, kie estas la maksimuma sentemo de homa okulo.

El la prezentitaj ekzemploj estas videble, ke la proporcio de la **videbla parto kreskas** el la radiado de ardanta objekto, se ĝia **temperaturo estas altigita**. Tial la **koloro aspektas ĉiam pli blanka**.

En la lumigado revolucian ŝanĝon kaŭzis la **ekuzo de elektro**. Unue oni lumigis per **elektra** arko, kiu ardis inter du karbo-stangetoj. Poste sekvis la inkandeskaj lampoj. **La evoluigon direktis ekde la komenco tiu ekkono, ke la emisiita lumkvanto estas ekonomie kreskigebla nur per altigo de la temperaturo de la ardanta filamento**. Komence oni uzis fibrojn el karbo, poste filamenton el osmiumo, tantalo kaj fine el volframo. Ili estis muntitaj en ampoloj, poste la ampoloj estis vakuigitaj. (en aero la ardantaj filamentoj tuj forbruliĝus.) Grandan evoluon ebligis la spiraligo de la filamento. La lampoj povis radii nur malfortan flavruĝan lumon; aŭ se la temperaturo estis plualtigita, la vivdaŭro estis tre mallonga, pro la rapida for-vaporiĝo de la volframo en vakuo. Tial post la vakuiĝo la ampolo estas plenigita per neŭtrala gaso; unue per argono, nitrogeno, poste per kriptono, ksenono, kaj per ilia konvena miksaĵo. Malgraŭ ke la gaso kaŭzis energio-perdon per varmkonduko, tamen la bilanco iĝis pozitiva, ĉar la reduktado de forvaporiĝo de la volframo ebligis uzadon de signife pli alta temperaturo. Plu reduktis la varmperdon la duobla spiraligo, tial la temperaturo kreskis sen mallongigo de la vivdaŭro. La ĝis nunan pinton de la evoluigo de inkandeskaj lampoj signifas la uzo de halogenaj (jodo, bromo) aldonajoj al la gasoj, kiuj plenigas la ampolon. Ili estigas ciklon, kiu transportas la forvaporiĝintan volframon sur la plej varmajn (nome la plej mallarĝajn) punktojn de la filamento. Tiamaniere la vivdaŭro plilongiĝas, aŭ se la vivdaŭro estas permesata resti la originala, la lumflukso signife pligrandiĝas. Kiel jam estis menciite, la gvidprincipo en la evoluigo estas la ekonomia (ŝparema) grandigo de la lumo de la lampo. Tio signifas, ke la lampo per la konsumo de ĉiu vatto emisiu laŭeble la plej grandan lumflukson, dume la vivdaŭro atingu difinitan tempon. La ekonomiecon de la lampo montras la koeficiento lm/W. (Lumefikeco) Ĝi forte kreskas laŭ la altigo de la temperaturo de la volframspiralo. Sed samtempe pli forte kreskas ĝia forvaporiĝo, pro kio la vivdaŭro rapide malkreskas.

B 3-5



Normalaj lampoj por ĝenerala uzado havas 1000 horan vivdaŭron. Al tiu apartenas 12...15 lm/W-oj. Specialaj lampoj, ekz. por fotografado havas nur 25-horan vivdaŭron kun blanka, forta lumo, kaj 20...25 lm/W lumefikecon. La vivdaŭro de normalaj lampoj estas

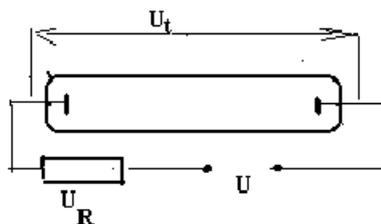
decidita laŭ la prezo de elektro en la koncerna lando. Tial la vivdaŭron oni elektas 2500-horoj, kie la elektro estas malmultekosta. **Halogenaj lampoj**, kvankam ili havas altan lumefikecon kaj longan vivdaŭron, pro la multekostaj teknologiaĵoj kaj materialoj estas multekostaj, tial ili estas uzataj ĉefe nur **specialaj celoj**. (fotografado, projekciado, en veturilaj lumjetiloj ktp.)

E 3.4 Fine oni rigardu ekzemplon: kiom ekonomiece uzas la elektran energion normala 100 W-a inkandeska lampo? Ĝi elradias 1400 lumenojn. Kiel en la ĉapitro 2.2 estis videble $1\text{ W}=682\text{ lm}$. Do la forradiata 1400 lumenoj egalas al $1400/628=2.05\text{ W}$. Tiu estas nur 2% el la konsumita energio. La cetera fariĝas senutila varmo.

3.4 Lumradiado de ekscititaj gasoj

Gasojn oni konsideras izolajn materialojn. Tamen, se oni en tubo, kies finoj havas elektrodojn, per suĉado maldensigas la aeron je la premo de proks. 1...2 KPa, kaj ŝaltas al la elektrodoj elektran tension, en la cirkvito oni povas mezuri malgrandan kurenton. La kurenton ebligas jonoj, kiuj ĉiam estiĝas pro la ekzistanta eta radioaktiva kaj kosma radiadoj. Pro la tensio inter la elektrodoj elformiĝas elektra kampo, kaj la liberaj elektronoj akceliĝante moviĝas al la direkto de la pozitiva anodo kaj la pozitivaj jonoj al la katodo.

B 3-6



La redukto de la gaspremo estas bezonata, por ke la korpuskloj havu sufiĉe longan **liberan vojlongon** en kiu ili povu flugi sen interpuŝiĝo, kaj akiri el la elektra kampo kinetan energion, sufiĉan por tio, ke okaze de posta **interpuŝiĝo** ili povu **eksciti aŭ jonigi** la trafitan **korpusklon**. Pro interpuŝiĝoj la nombro de jonoj kaj liberaj elektronoj kreskas. Sed tio okazas nur se la tensio kompare al la distanco inter la elektrodoj estas sufiĉe granda. Se oni grandigas la tension, post komenca kresko la kurento restas longe konstanta. Tiam ĉiu ŝargita korpusklo partoprenas en la kurento. Se oni plugrandigas la tension, grandiĝas ilia rapido, kune la kineta energio. Tial dum interpuŝiĝo novaj jonoj kaj elektronoj estiĝas, kaj la kurento komencas kreski. Oni nomas tion **memnutranta malŝargiĝo**. Post tio la tensio U vane estas grandigita, U_t ne kreskas inter la du elektrodoj, ĉar pro la estiĝo de novaj ŝarĝportantoj la kurento kreskas, kun tio la rezistanco de la tubo malkreskas. Tial oni devas munti en la cirkvito de la tubo **eksteran rezistoron R**. Ĝi limigas la intenson de la kurento en la cirkvito. Ĉar inter la elektrodoj la tensio U_t **restas konstanta**, malgraŭ se oni grandigas la tension U , la tensio U_r inter la finaĵoj de al rezistoro R kreskas laŭ la ohm-formulo. Tial la sumo de U_t kaj U_r estas U . (tiun fenomenon oni uzas por stabiligi tension, (inter la du elektrodoj U_t restas stabila, sendepende de la ŝanĝo de U - tensio.)

En tiu stato **la ekscititaj gasoj komencas lumi**, tial la tension, apartenantan al la lumkomenco oni nomas **“ekbrultensio”**. Post la plua altigo de nutrotensio, la katodoj forte varmiĝas pro la bombardado de jonoj kaj elektronoj. Pro la varmiĝo ili emisias elektronojn, kiuj partoprenas en la kurento, forte grandigante ĝin. Elformiĝas **elektra arko**, kies grandon limigas nur R rezistoro. Inter la elektrodoj laŭ la grandigo de la

ekstera tensio la kurento grandiĝas, la tensio malgrandiĝas. Tial oni nomas la rezistancon de la tubo negativa, kiel inverson de la ohm-a rezistanco.

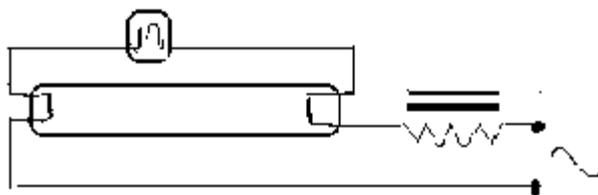
Elektra arko povas ekzisti eĉ en atmosfera aŭ en pli alta gaspremo. Sur tiuj fenomenoj, kiujn oni nomas **“malŝargiĝo” en gasoj**, baziĝas pluraj lumfontoj. Ankaŭ en la naturo ili estas videblaj kiel fulmoj aŭ arktaj lumoj.

Ekonomieca ebleco por elektra lumigado estas la uzado de elektraj malŝargiĝoj kaj arkoj en gasoj. El inter tiuj lumfontoj la plej konata estas la **lumtubo**. Ĝi estas vitrotubo, kies longeco estas 0.5...1.5 m, kaj la diametro 2.5...4 cm. (Komence oni uzis longajn, maldikajn tubojn, en kiuj pluraj kilovoltaj elektra tensio funkciigis malŝargiĝon inter malvarmaj katodoj, simile al reklamtuboj. En la reklamtuboj la koloron de la lumo difinas la speco de la pleniganta malaltprema indiferenta gaso -neono, heliumo k.a gasoj. **En lumtuboj malaltprema hidrargo-vaporo emisias postviolan radiadon, kaj fosforeska tavolo, kiu estas sur la interna surfaco de la tubo, transformas ĝin videbla radiado.** En modernaj lumtuboj troviĝas du oksidkatodoj, kiuj pro varmigado emisias elektronojn, kaj nutras elektran arkon inter la katodoj. Por la funkciigo sufiĉas la

tensio de la reta kurento. Dum la produkto unue la tubo estas vakuigita, poste oni metas en ĝin malaltpreman argon-gason kaj guton da hidrargo.

Oni rigardu la kompletan cirkvito kaj funkciadon de la lumtubo:

B 3.7



Kun la du katodoj estas serie muntitaj memindukta bobeno (nur se oni uzas alternan kurenton) kaj startigilo. La startigilo estas malgranda tubo kun malaltprema gaso kaj du elektrodoj. Post la ŝalto okazas malŝargiĝo en la tuboeto inter la elektrodoj, kiuj, aŭ unu el ili estas faritaj el speciala "dumetala" rubandeto. Pro la varmigo fare de la malŝargiĝo la dumetala elektrodo kurbiĝas, tial la du elektrodoj kontaktiĝas. Pro tio tra la katodoj (kiuj estas mallongaj volframspiraloj kovritaj per specialaj oksidoj) ekfluas relative granda kurento, do la **katodoj rapide varmiĝas. Tial la katodmaterialo emisias elektronojn**, kiuj kiel nubo ĉirkaŭas ilin. Post la kontaktiĝo de la elektrodoj en la startigilo ĉesas la malŝargiĝo, la dumetalo malvarmiĝas, rektiĝas kaj malŝaltas la kurenton en la cirkvito. Pro la abrupta ĉeso de la kurento **la memindukta bobeno induktas altan tension**, kiu aperas inter la du katodoj de la lumtubo. Ĉar ili estas varmaj kaj ĉirkaŭas ilin elektronoj **komenciĝas malŝargiĝo** en la argono (tial ĝi estas bezonata). La malŝargiĝo iom varmigas la hidrargo-guton, tial ĝi forvaporiĝas, kaj en la hidrargo-vaporo **elformiĝas elektra arko**. La tubon plenigas miksaĵo de liberaj elektronoj kaj jonoj; oni nomas ĝin **plasma**. En la plasma daŭre okazadas interŝanĝo de elektronoj, neŭtraj atomoj kaj jonoj. Jonoj ĉiam estiĝas el neŭtraj atomoj pro la ŝoviĝo, alpuŝado de rapidaj elektronoj. La plusan energion la jonoj kaj ekscititaj atomoj forradias ĉefe en la postviola ondobendo. La postviolkoloran radiadon fosforeska tavolo, kiu kovras la internan surfacon de la vitrotubo, transformas videbla, ĉefe blanka lumo. La koloro dependas de la speco de la fosforeska tavolo. Iu rajte demandas, ke post la malvarmiĝo de la elektrodoj en la ŝartilo, kial la startigilo ne ekfunkcias denove? Ĝi ne povas ekfunkcii, ĉar post la ekfunkcio de la lumtubo elformiĝas konstanta brutensio inter ties elektrodoj. La startotensio de bona startigilo estas pli alta ol la brutensio de la lumtubo.(Se la

startigilo difektiĝas, reduktiĝas ĝia startotensio, la lumo de la lumtubo periode ĉesas. Oni devas tuj ŝanĝi la malbonan startigilon, ĉar la lumvibrado estas ne nur malagraba, sed ankaŭ la lumtubo rapide difektiĝos.) **La lumtuboj apenaŭ produktas varmon**, tial la **lumefikeco estas proksimume kvarobla** kompare al la normalaj inkandeskaj lampoj, krome ilia **vivdaŭro** estas ne 1000 sed **10 000 horoj**. Do ilia uzado anstataŭ inkandeskaj lampoj estas ŝparema. Malavantaĝo estas, ke malgraŭ ilia blanksimila koloro, **la koloro de la prilumata objekto estas ne ĉiam la originala**. La kaŭzo estas, ke ĉiu objekto reflektas nur la kolorojn de la ĝin prilumanta lumfonto. Blankkoloran lumfonton oni povas fari ekz. per konvena miksaĵo de materialoj kiuj povas emisii bluan kaj flavan lumon. Se oni prilumas per ĝi blankan folion, ĝi ŝajnas blanka. Sed se oni prilumas ekz. ruĝan aŭ verdan objektojn, ili ŝajnas nigraj, ĉar en la prilumanta lumo ilia koloro ne ekzistas. Tial, se oni volas, ke la koloro de la prilumata objekto restu konforma al la originalo, oni devus uzi tian fosforeskan tavolon, kiu samintense povus emisii radiojn en ĉiu koloro de la videbla spektro. Nature tio estas utopia celo, neniam realigebla. Tamen tio estas la direkto de la evoluigo. **Por plibonigi la kolorkonformecon** de la lumtuboj **oni uzas diversajn aldonajojn al la fosforeska tavolo**. La rezulto iĝas ĉiam pli bona, tamen oni devas daŭrigi la evoluigon.

Alia malavantaĝo estas, ke al la lumtubo **estas bezonataj diversaj akcesorajoj**; speciala kontaktilo, startigilo, memindukta bobeno. Ili grandigas la prezon, tamen nur ŝajne. Pro la alta lumefikeco por la sama prilumado sufiĉas nur kvarono da elektra povumo. (anstataŭ 75 W-a inkandeska lampo sufiĉas uzi 20 W-an lumtubon.) Krome ankaŭ la dekobla vivdaŭro forte grandigas la ekonomiecon. Se anstataŭ normalaj lampoj ĉiu uzus lumtubojn, eĉ en tutmonda nivelo estiĝus granda ŝparo de elektra energio. Por helpi tion, oni evoluigis la tiel nomatan **kompaktan lum-tubon**. Ĝi estas **malgrandpovuma malgranddimensia lumtubo**, kun-konstruita kun **malgrandaj elektronikaj akcesorajoj**. Ili anstataŭas la apartan startigilon kaj meminduktan bobenon. Eĉ **ili havas la saman kontakteblecon kiel normalaj inkandeskaj lampoj**, tial en iliajn ŝraubingojn oni simple ŝraŭbas kompakt-lumtubon. La lumvibrado kiu estas ĉe normalaj lumtuboj, ĉe kompaktaj lumtuboj ne videblas. La elektronika akcesorajo funkciigas ilin anstataŭ 50 Hz per multe pli alta frekvenco. Tamen ankaŭ normalaj inkandeskaj lampoj havas uzrajton en ejoj, kie estas bezonata nur mallongdaŭra lumado. Ekz. En antaŭ-ĉambroj, banĉambroj, k.s. Lumtubo ne “ŝatas” se ĝi estas ofte en kaj malŝaltata.

Prilumado de grandaj ejoj, stratoj, placoj oni uzas grand-premajn **hidrargo-vaporajn lampojn**. En ili en kvarc-tubeto ardas **elektra arko en hidrargo-vaporo**. Pro la granda premo tiuj lampoj jam radias ankaŭ videblan lumon krom la postviolan. La postviola, simile kiel ĉe lumtuboj, per fosforeska tavolo estas transformata videbla. La fosforeska tavolo estas en la interna surfacode la ekstera ampolo, kiu ĉirkaŭas la kvarc-tubeton.

La evoluigantoj, por bonigi la kolor-konformecon, klopodas atingi, ke la lampo laŭ la plena spektro forradiu lumon. Kvankam pro la alta premo **tiuj lampoj jam radias ne nur spektro-liniojn sed ankaŭ larĝajn striojn**, tamen **restas** en la videbla spektro **malplenaj bendoj**. Tiujn oni klopodas **plenigi per mikso al hidrargo diversaj kemiaj kombinaĵoj de metal-halogenoj**. Tial oni nomas la tiaspecajn lampojn **metahalogenaj lampoj**.

La plej altan lumefikecon ebligas la **natriovapora lampo**.

Ili ekzistas kaj malaltprema kaj altprema tipo. La malaltprema radias nur puran, flavan natrio-lumon, tial ĝi estas utiligebla nur por prilumado de stratoj, placoj. Sed por la trafiko tiu koloro estas tre konvena. **La altprema natriovapora lampo**, pro la alta premo

kaj alta temperaturo aldone al la natrio-spektro **radias ankaŭ la plenan videblan spektron**, tial ĝia lumkoloro estas **agrabla orflava**.

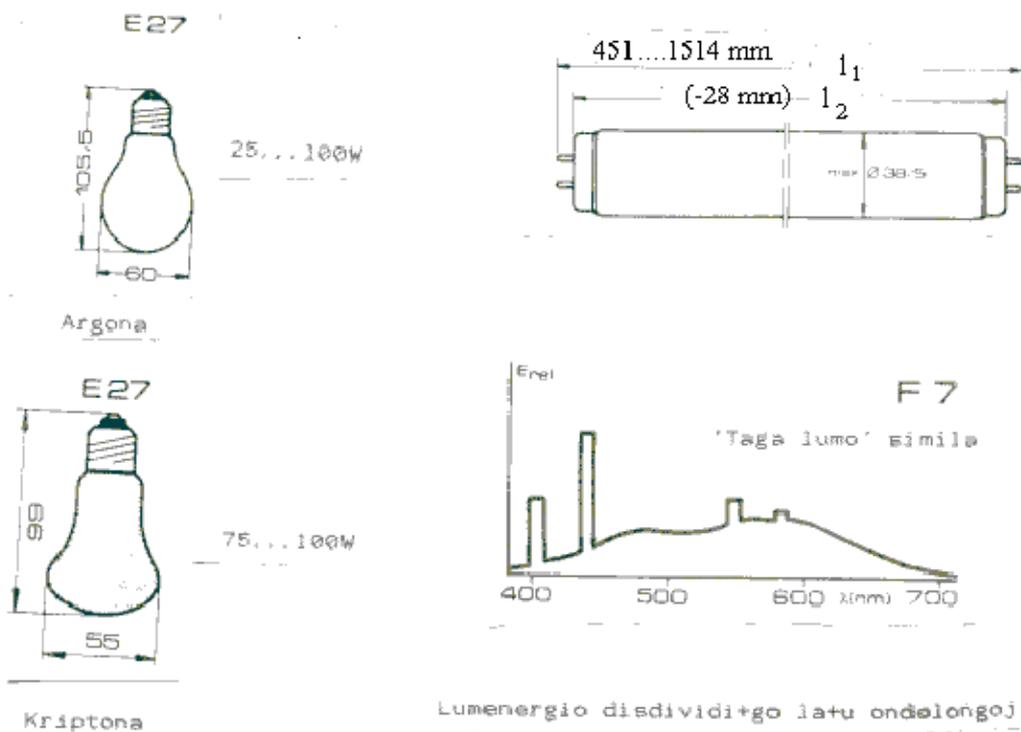
La altan lumefikecon de tiuj lampoj kaŭzas, ke ilia radiad-maksimumo estas en la Na D-linio, kiu situas proksime al la maksimumo de $V(\lambda)$ kurbo.

Por specialaj celoj; filmprojekciado, lumĵetiloj, estas uzataj **ksenongas-arkaj lampoj**. En ili inter volfram-elektrodoj brilegas elektra arko en altprema ksenongaso. Tiuj lampoj havas la plej grandan elektran povumon.

Fine estas taŭge kompari la lumefikecon de diversaj elektraj lampoj.

Lampospeco	lumefikeco [lm/W]
normala inkandeska lampo	10...15
inkandeska lampo kun halogen-aldonaĵo	20...25
ksenongas-arka lampo	25...35
grandprema hidrargo-vaporo lampo	50
lumtubo	70
metalvapor-lampo	90
natriovapora lampo	110...140

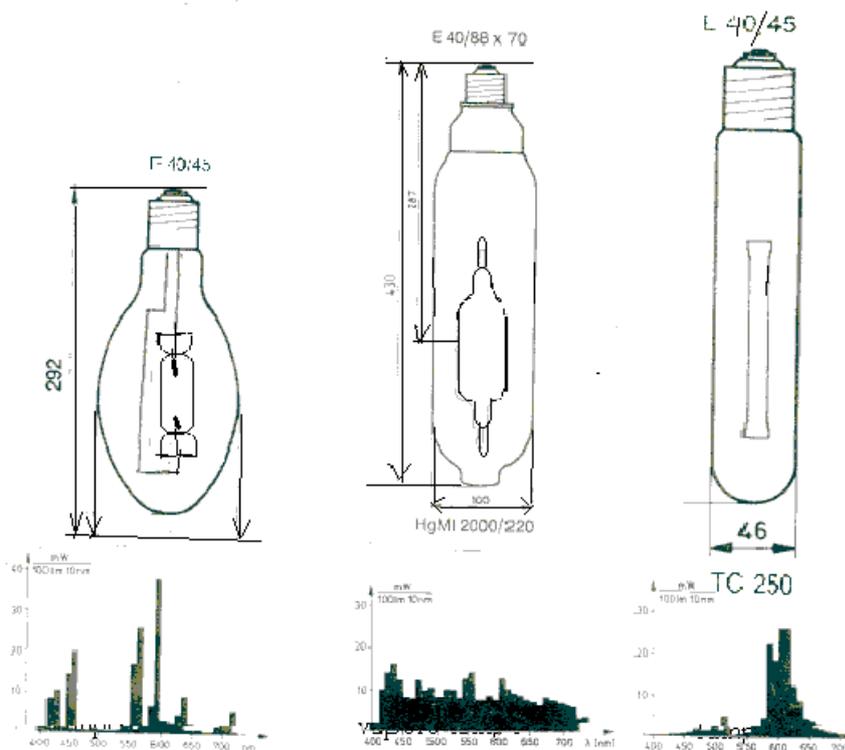
B 3-8 Bildoj pri lampoj; normalaj lampoj, lumtubo



Hidrargo-vaporo lampo

Metalhalogeno-lampo

Grandprema Na-lampo



4. La propagigo de la lumo

Laŭ nia nuna kono la lumo propagiĝas kiel **elektromagneta ondo**. Se ĝi trafas materialon, en certaj kazoj ĝi kondukas kiel **korpusklo**. Nun ni konsideru la lumon, kiel fenomenon, kiu propagiĝas en libera spaco rektlinie, kaj en travideblaj materialoj laŭ geometrie simplaj manieroj.

4.1 La geometria optiko

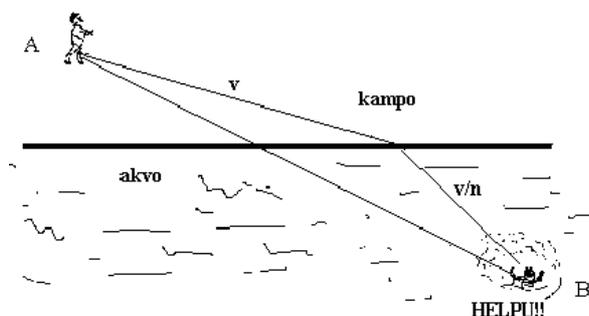
La geometria optiko estas **forte simpligita modelo de la reala konduto de la lumo**, tamen ĝi ebligas la priskribon de la propagigo de la lumo en aero (en vakuo) kaj en travideblaj materialoj. **La limo de la uzebleco** de la geometria optiko estas objektoj, kies dimensioj **proksimas la ondolongon de la lumo**. Tamen por kompreno, eĉ por planado kaj konstruado de ĉiutagaj optikaj instrumentoj la uzo de geometriaj reguloj kaj formuloj sufiĉas.

Kiel jam estis menciite, la lumrapido en vakuo kaj en aero estas preskaŭ sama (c), sed en travideblaj pli **densaj materialoj** (solidaj, likvaj) la lumrapido estas **malpli ol c**. La kono de la lumrapido en tiuj materialoj ebligas la priskribon de la itinero de la lumo.

4.2 La principo de Fermat

Baza principo estas, ke le lumo inter du punktoj ĉiam elektas tiun itineron, laŭ kiu pasante, **la plej mallonga tempo estas bezonata**. Tio estas la principo de Fermat. Ĝi estas komprenebla per simpla ekzemplo:

B 4-1



Homo promenas sur kampo apud lago. En la lago, iom pli fore li rimarkas drononton. Li scipovas kaj kuri kaj naĝi, do li povas savi la drononton se alvenos el la punkto A al B en sufiĉe frua tempo. Li devas atingi punkton B dum la plej mallonga tempodaŭro. Sur la

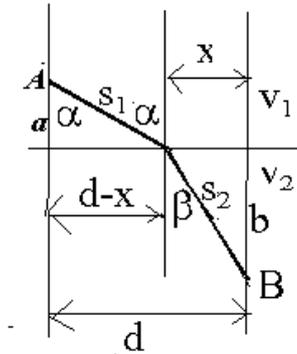
kampo li kapablas kuri per rapido v . En la akvo li kapablas naĝi per rapido v/n . Ĉar $n > 1$, $v > v/n$, do li devos pli grandan parton de la itinero pasi kurante.

La proporcion de la longoj de kuro kaj naĝo li elektas intuicie, sed en simila situacio la lumradio per helpo de la onda naturo trovas la optimumon. Ondoj laŭ malĝustaj itineroj eliminis sin renkontiĝante, ĉar la fazoj estas ĉiaj. Per tiu ĉi principo ĉiu

fenomeno de la lumpropagiĝo estas klarigebla. B 4.1 ekzemplo estas matematike traktebla relative simple.

Estu la rapido sur la kampo v_1 en la akvo v_2 , . $v_1 > v_2$. Laŭ la ekvacio de Pitagoro:

B 4-2



$$s_1^2 = a^2 + (d-x)^2 \quad s_1 = \sqrt{a^2 + (d-x)^2}$$

$$s_2^2 = b^2 + x^2 \quad s_2 = \sqrt{b^2 + x^2}$$

La tempo dum kiu la savanto atingas el punkto A punkton B:

$T = t_1 + t_2$, kie $t = t_1$ estas la tempo sur la kampo, t_2 estas la tempo en la akvo. Oni povas kalkuli la tempon, se oni dividas la distancon per la rapido.

$$t_1 = (s_1 / v_1) = (\sqrt{a^2 + (d-x)^2}) / v_1$$

$$t_2 = (\sqrt{b^2 + x^2}) / v_2$$

Do: la minimumo de tempo T inter punktoj A kaj B dependas de x . Tial ni kalkulu la derivaĵon de T laŭ x :

$$\begin{aligned} dT/dx &= 1/v_1 * 1/2 * [a^2 + (d-x)^2]^{-1/2} * 2(d-x)(-1) + 1/v_2 * 1/2 * (x^2 + b^2)^{-1/2} * 2 * x = \\ &= -(d-x)/(v_1 * \sqrt{a^2 + (d-x)^2}) + x/(v_2 * \sqrt{x^2 + b^2}) = \\ &= x/(v_2 * \sqrt{x^2 + b^2}) - (d-x)/(v_1 * \sqrt{a^2 + (d-x)^2}) \end{aligned}$$

La funkcio havas ekstremajn valorojn kie ĝia derivaĵo egalas nulon, do kie:

$$\begin{aligned} x/(v_2 * \sqrt{x^2 + b^2}) &= (d-x)/(v_1 * \sqrt{a^2 + (d-x)^2}) \quad \text{aŭ} \\ (1/v_2) * (x/s_2) &= (1/v_1) * [(d-x)/s_1] \end{aligned}$$

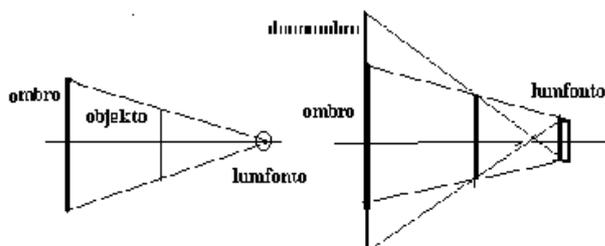
El la figuro estas videble, ke:

$$\begin{aligned} (x/s_2) = \sin \beta \quad , \quad (d-x)/s_1 = \sin \alpha \quad \text{do} \quad \sin \beta / v_2 = \sin \alpha / v_1 \\ v_1 / v_2 = \sin \alpha / \sin \beta \end{aligned}$$

La atingotempo inter A kaj B estas minimumo, se la kvociento de la sinuso de anguloj α kaj β egalas al la kvociento de rapidoj V_1 kaj V_2 . En la ĉapitro 5. montras tion ankaŭ la la formulo de Descartes kaj Schnellius.

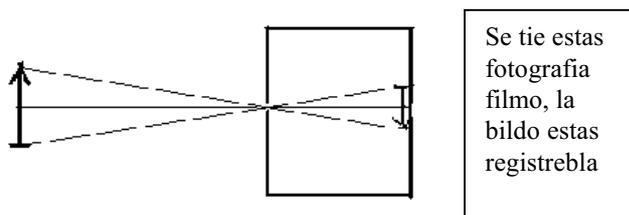
Estas facile demonstreble, ke **en homogena materialo la itinero de la lumo estas rekta linio**. Plej okulfrappe montras tion la ombroj faritaj de punktsimilaj lumfontoj. Tiam la konturoj de la ombroj estas akraj, rektaj. Se la lumfonto estas ne punktsimila, estiĝas duonombroj.

B 4-3



Bone montras la rektlinian propagiĝon ankaŭ la “kamera obskura”. Ĝi estas skatolo en kies vando estas malgranda truo. Sur la vando kontraŭ la truo aperas inversdirekta bildo pri la objekto, kiu troviĝas antaŭ la truo. (Se tie estas fotografia filmo, la bildo estas konsevebla.)

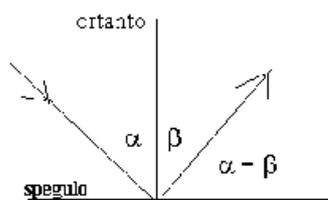
B 4-4



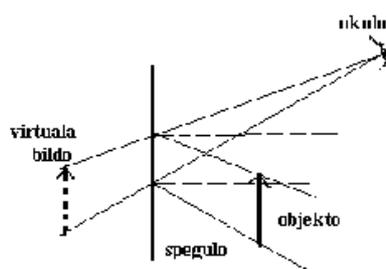
4.3 Ebena spegulo

La ebena spegulo estas **plata objekto**, kies ebena surfaco estas **polurita**. Paralelajn lumradiojn ĝi reflektas paralelaj. La trafangulo (α) inter la ortanto de la surfaco kaj la reflektangulo (β) estas egalaj. La trafanta kaj reflektata radioj kaj la ortanto situas en la sama ebena, kiu nature estas orta je la spegula surfaco. La ebena spegulo faras **virtualan (ŝajnan) bildon**. Tio signifas, ke per ekrano ĝi estas ne vidigebla sed nur okule observebla. Ĝi ŝajnas, kvazaŭ la rigardata objekto starus malantaŭ la spegulo. Atentu, ke la lumitinerio inter la objekto, spegulo kaj okulo estas kiom eble plej mallonga. En ĉiu optika instrumento la direkto de **la lumradio estas inversigebla**, do oni ĉiam povas interŝanĝi la objekton kaj bildon.

B-4-5



B 4-6



La ebena spegulo estas ne nur konata ilo por ĉiu, sed ĝi estas ankaŭ aplikata en pluraj optikaj instrumentoj. Ekzemple en periskopoj, en certaj fotoaparatoj, en sekstanto, distanc-mezurilo kaj aliaj. (Vidu en ĉ. 10.)

4.3.1 Sferaj speguloj

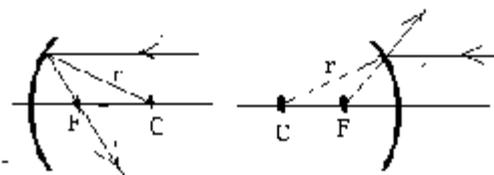
La sfera spegulo estas **sfer-ĉapo** kies radiuso nature egalas al la radiuso de la sfero kies parto ĝi estas. La geometria centro estas la centro de la sfero. La optika centro estas la centro de la ronda spegulsurfaco. La optika akso trapasas kaj la geometrian kaj la optikan centron.

La sfera spegulo estas **konvekso**, se la spegulita surfaco estas en la interna surfaco de la sfero. Ĝi estas konkava, se la ekstera parto estas spegulita.

Konvekso spegulo **kolektas** la reflektitajn lumradiojn en ĝia **fokuso**, se ili atingis la spegulon paralele kaj proksime al la optika akso. La fokuso situas sur la akso, meze inter la optika kaj geometria centroj de la sfero.

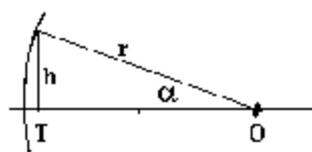
Konkava spegulo estas spegulita sur la ekstera surfaco. Lumradiojn, kiuj trafas la spegulitan surfacon ĝi **disĵetas**. Se ili alvenas paralele kun la optika akso, la direkto de la disĵetitaj radioj estas tia, kvazaŭ ili estus venintaj el la fokuso (el la kontraŭa flanko), se la sama spegulo estus konvekso. Tiu **fokuso estas virtuala**.

B 4-7



Por simpligi la matematikajn deduktojn de la geometria optiko oni uzas “kvazaŭaksajn” lumradiojn. Ili pasas paralele al la optika akso proksime al ĝi.

B 4-8



. Distanco OT kvazaŭ egalas al radiuso r. Tiam distanco h kvazaŭ egalas al la longeco de la cirkloarko $h \cong \alpha * r$ [radiano] Tiu ĉi simpligo estas farebla, dum $\sin \alpha$ proksimume egalas al $\text{tg } \alpha$ kiu proksimume egalas al α mezurita en radianoj. (proks. ĝis 10 gradoj)

T 4.1

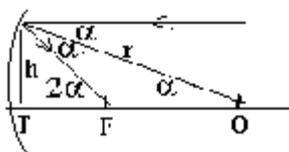
α [gradoj]	$\sin \alpha$	$\text{tg } \alpha$	[radianoj]
5	0.087	0.087	0.087
10	0.173	0.176	0.175

Post tiuj konsideroj oni povos facile dedukti la fokusdistancon de sferaj speguloj, se ilia radiuso r estas konata.

$$h \approx \alpha * R = \alpha * OT \quad 2 * TF = Rh \quad 2 * \alpha * TF = \alpha * r$$

4.1 $TF \approx f = R/2$

B 4-9

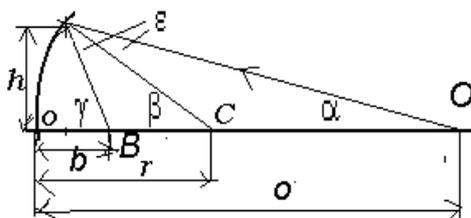


La fokuso situas meze inter la optika centro kaj la geometria sferocentro.

Tio validas ankaŭ pri konkavaj speguloj. (Tie la fokusdistanco estas negativa.)

Oni deduku la lokon de la bildo se la fokusdistanco kaj objektodistanco estas konataj kaj la spegulo estas konvekca.

B 4-10



$$\alpha + \gamma = \beta - \epsilon + \beta + \epsilon = 2 * \beta \quad , \quad \alpha = h/o \quad ,$$

$$\alpha + \gamma = 2 * \beta \quad \beta = \alpha + \epsilon \quad , \quad \gamma = \beta + \epsilon \quad , \quad \alpha = \beta - \epsilon$$

$$h/o + h/b = 2 * h/r$$

El la formulo F 4.1 $f = r/2$, $r = 2 * f$, $2 * h/r = 2 * h/2 * f = h/f$, $h/o + h/b = h/f$

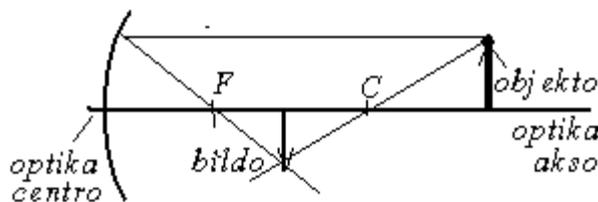
Dividita ambaŭ flankoj per h ni ricevos la formulon por bildkreo de sferaj speguloj, kiu validas ankaŭ pri bildkreo de maldikaj lensoj:

F 4.2 $1/o + 1/b = 1/f$

Tie o =objekto, b =bildo, f =fokus-distancoj disde la optika centro. El la formulo F4.2: $b = f * o / (o - f)$, $o = f * b / (b - f)$

4.5 Bildkreo per sfera spegulo

B-4-11



C: Geometria centro de la sfero F: Fokuso de la spegulo

Oni povas esti bildpunkton per du radioj: La radio, paralela kun la optika akso, reflektiĝata de la spegulo **trapasas la fokuspunkton**. La radio, kiu **trapasas la geometrian centron de la sfero**, post la reflektiĝo pasas reen laŭ la sama rekto. **Kie la du radioj renkontiĝas, estiĝas reala bildpunkto**. (Reala signifas, ke sur ekrano ĝi estas rigardebla.) “**Linea grandigo**” G signifas la grandigon de longoj. G montras kiomfoja longaj (aŭ mallongaj) estas la distancoj sur la bildo kompare al la objekto.

$$\text{F 4.3} \quad G = b/o = f/(o-f) = (b-f)/f$$

$$\text{F 4.4} \quad f = b/(G+1), \quad b = G*f+f,$$

$$b = o*f/(o-f), \quad o = b*f/(b-f),$$

La supraj formuloj **validas** ankaŭ por kalkuloj pri la **bildkreo de maldikaj lensoj**, se la lumradioj estas kvazaŭaksaj.

Se la **objekto** estas **ekster la geometria centro de la sfero**, la bildo estiĝas inter la fokuso kaj geometria centro. Ĝi estos malgrandigita, reala kaj inversdirekta. Tio okazas ĉe spegulaj teleskopoj.

Se la **objekto** estas **inter la fokuso kaj geometria centro**, la bildo estos trans la geometria centro. Ĝi estos reala, grandigita kaj inversdirekta. Tiel funkcias projekciiloj, spegulaj mikroskopoj.

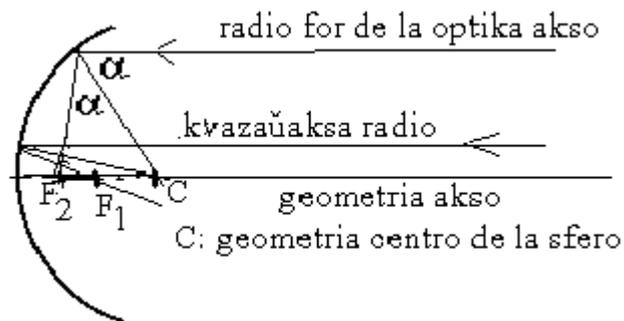
Se la **objekto estas en la fokuso**, la bildo estiĝas en la infinito, do la radioj forlasas la spegulon paralele. Se la objekto estas forta lumfonto, la tuto funkcias kiel **lumĵetilo**.

Se la objekto estas **inter la fokuso kaj optika centro**, la bildo estos virtuala, grandigita, originaldirekta. Bonkvalitaj por-razilaj speguloj ili estas.

Se la **spegulo estas konkava**, kaj la objekto estas ekster la (virtuala) fokuso, la bildo ŝajnas malgrandigita, virtuala, originaldirekta. Per tiaspeca spegulo **oni samtempe povas trarigardi grandan terenon**. Tial oni uzas ĝin ĉefe en trafiko, en aŭtoj kiel retrorigardilon, ĉe vojkruciĝoj, muntita sur fosto, por trarigardi la trafikon en la orta strato.

Kiel jam estis menciite antaŭ la deduktoj, sferaj speguloj povas krei precizan bildon, nur se en la bildokreo partoprenas lumradioj, kiuj pasas proksime al la optika akso, kaj kies trafangulo sur la spegulo estas malgranda (kvazaŭaksaj.) . Se la radioj trafas la spegulon malproksime de la akso, la fokuso estos pli proksime al la optika centro ol al la duona distanco. La sekva bildo demonstros tion:

B 4-12



Sferaj speguloj estas ne taŭgaj por krei tute precizajn bildojn. Tial ili estas uzataj ĉefe en lumĵetiloj, ekz. en aŭtoj. La volframspiralo de la lampo estas lokita ĉe la fokuso, kaj la lumfasko iĝos iom diverĝa.

Por konstrui precizajn spegulajn teleskopojn (ĉefe por astronomiaj observadoj), anstataŭ sfera surfaco **oni uzas parabolajn surfacojn**. Ili kolektas ĉian paralelan faskon de lumradioj en la fokuso, tial ili povas krei precizan bildon pri malproksimaj objektoj.

La traktitaj matematikaj deduktoj kaj formuloj validas ankaŭ je speguloj kun parabolaj surfacoj.

5. Refrakto de la lumo

Refrakto okazas, se **lumradio trapasante el iu medio al alia, ŝanĝas sian direkton**. Por demonstri tiun fenomenon estas tre konvena la figuro B 4.1 kaj ties klarigo. Lumradioj ŝanĝas direkton, se **ili devas plupasi en alia medio per alia rapido**. Escepto estas nur, se la trafangulo estas orto. Tiam la direkto de la lumradioj restas originala.

5.1 La trapaso de lumradioj

Se lumradioj trafas ekz. vitrosurfacon **ne orte**, el ili proksimume **4% reflektiĝas**, granda parto kun ŝanĝata direkto **trapasas**, malgranda parto **absorbiĝas**.

B 5-1



α : trafangulo, α' : reflektangulo, β refraktangulo, v_1 : rapido en medio A, v_2 : rapido en medio B.

Cartesius kaj Snellius eksperimente pruvis, ke

$$\text{F 5.1} \quad \sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1 = n_{12}$$

n_1 estas la refraktivo (refrakto-indico) de materialo A, **kompore al tiu de vakuo**. La refraktivo de vakuo estas la **absoluta refraktivo**. n_2 estas la refraktivo de materialo B. Poste oni konstatis kaj per la ondooptiko oni pruvis, ke

$$\text{F 5.2} \quad \sin \alpha / \sin \beta = v_1 / v_2$$

T 5.1 Refraktivo de kelkaj materialoj, se la ondolongo estas 589.3 nm (Na-D-linio) kaj la temeraturu 20° C

materialo	n	materialo	n
alkoholo	1.362	salkristalo	1.5443
optika vitro (1)	1.613	kvarc-vitro	1.459
optika vitro (2)	1.515	kalkspat-kristalo	1.6584
diamanto	2.417	benzolo	1.501
akvo	1.333	glacio (°C)	1.309

n, la refraktivo de materialoj dependas ankaŭ de la ondolongo kaj de temperaturo. El optika vidpunkto estas grave la dependo de la ondolongo. Oni rigardu la ondolongo-dependon de optika vitro:

T 5.2

Ondolongo [nm]	760	656	589	486	434	397
refraktivo; n	1.739	1.747	1.755	1.775	1.792	1.81

Se granda precizeco estas ne bezonate, oni uzas la refraktivon ĉe la ondolongo de NaD-linio ĉe. +20 C gradoj.

Estas tre interese la jena formulo:

F 5.3
$$n = c / v = \sqrt{\epsilon}$$

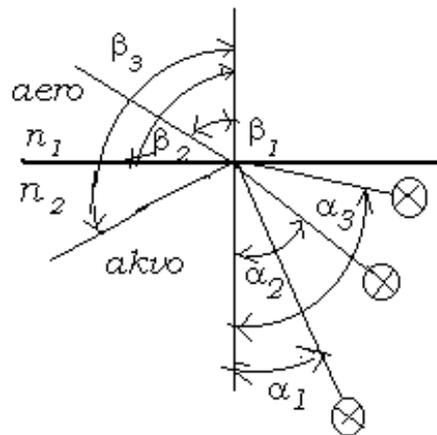
kie c estas la lumrapido en vakuo, v estas la lumrapido en la koncerna materialo. ϵ estas la dielektra konstanto de la materialo. (ankaŭ tio pravas la rilaton inter lumoj kaj elektro)

5 1.2 La plena reflektiĝo

Se lumoj propagiĝas el optike densa materialo en optike pli maldensan alian materialon, ekz. el akvo en aeron, kaj **oni kreskigas la trafangulon** (per translokigo de la lumfonto), oni **atingas angulon**, super kiu jam **lumoj ne trapasas** en la aeron. La fenomeno estas la **plena reflektiĝo**.

B 5-2

$$n_1 < n_2$$



α_2 estas la angulo de la plena reflektiĝo, al kiu apartenas refraktangulo $\beta_2 = 90^\circ$

$$\sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1 = n_{21}$$

α_2 estas la angulo de la plena reflektiĝo, al kiu apartenas $\beta_2 = 90^\circ$

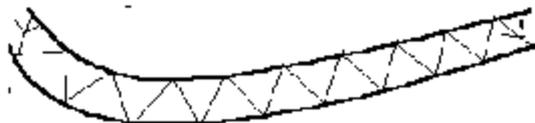
$\sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1 = n_{21}$. Se $\beta = 90^\circ$ $\sin \beta = 1$, do la kondiĉo:

F 5.4 $\sin \alpha \text{ plena} = n_{21}$

En la praktiko la fenomenon oni uzas en optikaj kabloj, kie la plena reflektiĝo retenas la lumon en la kablo. 90° prismo pro la plena reflektiĝo estas uzebla kiel perfekta ebena spegulo.

B 5-3

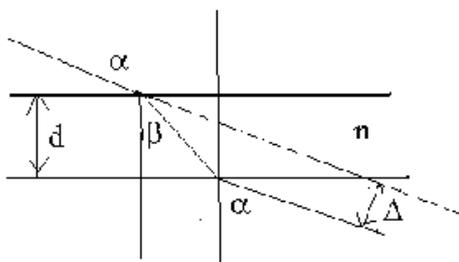
Optika kablo



La fenomenon “**fata morgana**” kaŭzas la plena reflektiĝo. Diverstempuraj aerotavoloj havas diversajn refraktivojn. Pro tio en certaj kazoj estiĝas plenaj reflektiĝoj, kiuj respegulas eĉ subhorizontajn aĵojn. Sed tian fenomenon ĉiu vidas super varmaj aŭtovojoj. Ofte ĝi brilas kvazaŭ ĝi estus akvokovrita, kaj respegulas objektojn estantajn apud la vojo.

5.2 Travideblaj objektoj kun paralelaj surfacoj kaj prismoj

B 5-4



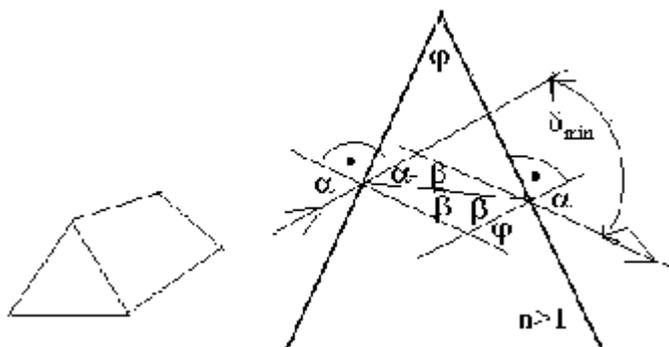
Travidebla materialo kun ebenaj paralelaj surfacoj. Ĝia diko estas d , la refraktivo n , $n > 1$. Se la trafangulo estas orta, la lumradioj trapasas sen ŝanĝo de la direkto. Se inter la orta direkto kaj lumradio estas trafangulo α , tiam post la trapaso la direkto restas la originala, sed la radio daŭrigas la pason laŭ paralela itinero, kies distanco disde la originala estas.

$$\text{F 5.4} \quad \Delta = d * \sin \alpha * [1 - \cos \alpha / \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}]$$

E 5.1 Kalkulu la valoron de Δ se $d=10$ mm, $\alpha=45$ gradoj, $n=1.5$.
 $\sin 45^\circ = 0.7071, \dots (\sin 45^\circ)^2 = 0.5, \dots \cos 45^\circ = 0.7071, \Delta = 3.29$ mm

Prismo estas la nomo de travideblaj objektoj kies limsurfacoj estas ne paralelaj ebenaĵoj. Plej konata estas la prismo, kies orta sekcio estas triangulo

B 5-5



Se prismon trafas lumradio kiel en la bildo, la direkto ŝanĝiĝos. El la grandeco de la direktoŝanĝo oni povas kalkuli la refraktivon de la prismomaterialo “ n “. Nature oni devas uzi unukoloran lumon, kaj devas koni la interedran angulon φ de la prismo.

Se φ kaj trafangulo α estas malgrandaj δ dependos nur de φ kaj sendependos de α . Tamen, **se α estas granda**, δ dependos ankaŭ de la refraktangulo β . Se oni desegnas la valorojn de δ laŭ funkcia argumento α , tiam **oni trovos minimumon. Tiam la lumradio simetrie trapasos la prismon, kaj la trafangulo kaj forlasangulo estos egalaj al α** . Oni ekzameni nur tiun kazon. (Tamen, se α estas granda,

$$\delta = \alpha + \beta - \varphi \quad \varphi = 2 * \beta \quad \delta = 2 * (\alpha - \beta) = 2 * \alpha - 2 * \beta = 2 * \alpha - \varphi$$

$$\beta = \varphi / 2 \quad \alpha = (\delta + \varphi) / 2$$

$$\text{F 5.5} \quad n = \sin \alpha / \sin \beta = [\sin(\delta_{\min} + \varphi) / 2] / \sin(\varphi / 2)$$

En tabeloj estas troveblaj ecoj de optikaj vitroj. Tamen antaŭ uzo estas utile kontroli ilin per mezuro.

E 5.2 Kalkulu δ angulojn se la radio estas **ruĝa**, poste **viola**. Estu la interedra angulo $\varphi = 60^\circ$ Estu la trafangulo. $\alpha_1 = 80^\circ$ Estu la refraktivo de la vitro por la ruĝa koloro $n = 1.73886$

$$n = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 \quad \varphi = \alpha_2 + \beta_2 \quad \delta = (\alpha_1 + \beta_1) - \varphi$$

$$\sin \alpha_2 = \sin \alpha_1 / n = \sin 80^\circ / 1.73886 = 0.9848 / 1.73886 = 0.5663$$

$$\alpha_2 = \arcsin 0.5663 = 34.49^\circ \quad \beta_2 = \varphi - \alpha_2 = 60^\circ - 34.49^\circ = 25.5^\circ$$

$$\sin \beta_2 = 0.4305 \quad \sin \beta_1 = n * \sin \beta_2 = 1.73886 * 0.4305 = 0.7487$$

$$\beta_1 = \arcsin 0.7487 = 48.48^\circ$$

$$\delta = \alpha_1 + \beta_1 - \varphi = 80 + 48.88 - 60 = 68.83^\circ$$

B 5-6



Estu la refraktivo por violkolora radio $n = 1.80598$. (La ceteraj estas senŝanĝaj)

$$\sin \alpha_2 = \sin 80^\circ / 1.80589 = 0.5453 \quad \alpha_2 = 33.05^\circ$$

$$\beta_2 = 60^\circ - 33.5^\circ = 26.95^\circ \quad \sin 26.95^\circ = 0.4535$$

$$\sin \beta_1 = 1.80898 * 0.4533 = 0.8178 \quad \beta_1 = 54.95^\circ$$

$$\delta = \alpha_1 + \beta_1 - \varphi = 80 + 54.95 - 60 = 74.95^\circ$$

Prismoj estas diverspecaj, kaj uzataj por diversaj celoj. Se lumradio trafas iun internan surfacon de prismo per la angulo de la plena reflektiĝo, la prismo funkcias kiel perfekta spegulo. Prismoj estas uzataj ankaŭ en periskopoj anstataŭ speguloj.

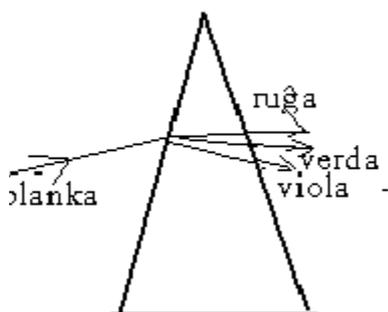
En skriboprojekciilo prismo ŝanĝas la lumdirekton je 90° . En lornoj du prismoj turnas la direkton de la bildo, kaj plilongigas la tubon.

En spegulaj fotoaparatoj oni uzas kvinedran prismon por turni la biddirekton kaj radiodirekton.

Pri iloj, aparatoj, kiuj uzas prismon mi traktos en la ĉapitro 10; „Optikaj instrumentoj”

Grava apliko de prismoj estas la spektroskopio. Tie inter alie ankaŭ per prismoj oni estigas spektrojn.

B 5-7



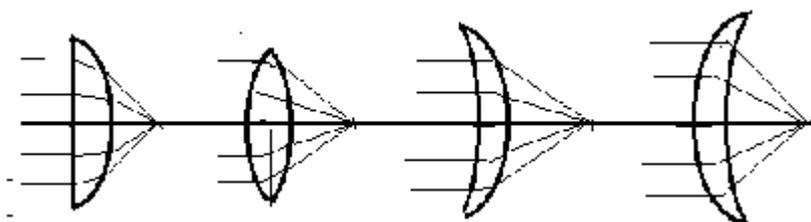
5.3 Lensoj

Lensoj estas gravaj optikaj komponantoj. Ili estas troveblaj en preskaŭ ĉiu optika ilo kaj aparato. Lensojn oni povas klasifi laŭ diversaj ecoj, kvalitoj, uzeblecoj. Sed unue oni komprenu, ke lensoj estas kompleksoj de malgrandaj prismoj, kiuj **per refrakto ŝanĝas la direkton de lumradioj; kolektas aŭ diverĝigas ilin.**

Lenso **kolektas** lumon, se ĝia mezo estas pli dika ol la rando. Ĝi **diverĝigas** lumradiojn, se la rando estas pli dika ol la mezo.

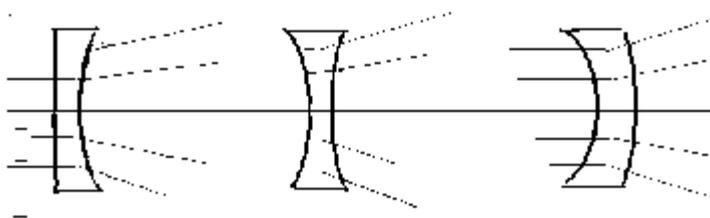
B 5-8 Kolektaj lensoj: ebeno-sfera dusfera

duop-konveksaj



B 5-9 Diverĝigaj lensoj: eben-konkava

duop-konkavaj



Ekzistas simplaj lensoj, dikaj, maldikaj, kiuj estas faritaj el unu vitropeco. Ekzistas plurmembra lensoj el diversaj specialaj vitroj, lensosistemoj, kiuj povas krei perfektajn bildojn.

5.3.1

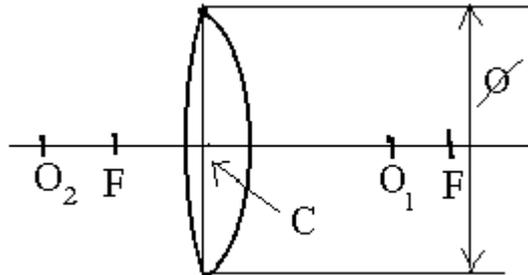
Maldikaj lensoj

Unue oni studu la simplajn maldikajn lensojn. La bazaj nocioj, metodoj tiamaniere estas pli facile kompreneblaj. (Lenso estas maldika, se la distanco inter la du surfacoj

meze estas malgranda kompare al la diametro.) Por plu simpligi la aferon, oni konsideros nur lumradiojn preskaŭaksajn.

La plej gravaj nocioj pri lensoj:

B 5-10

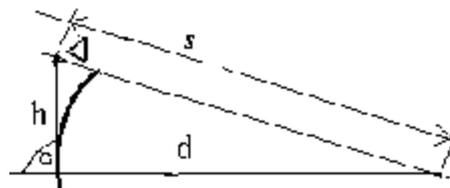


Geometriaj centroj de la sferoj: punktoj O_1 , O_2 . Optika centro de la lenso punkto C - Diametro de la cirklo \emptyset , kiu baras la funkciantan lenso-surfaco. Fokuspunktoj (du), kie paralelaj radioj renkontiĝas F . - Dioptrioj estas inversaj valoroj de fokusdistancoj en metroj. (Unuo de „forteco” de lenso estas dioptrio.)

E 5.3 Se lenso havas fokusdistancon de 10 cm (0.1m), tiam ĝi havas $1/0.1=10$ dioptriojn. Se $f=100$ cm, la lenso havas $1/1=1$ dioptron.

Kial la lenso kolektas la paralelajn radiojn en la fokuso? Por kompreni tion, unue oni devas klarigi kelkajn geometriajn aferojn.

B 5-11



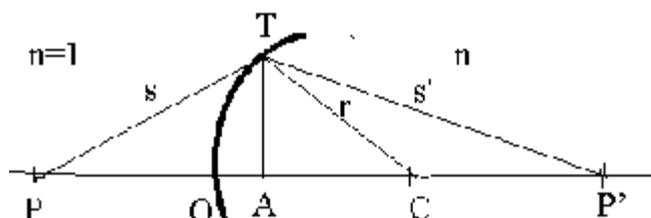
La longcediferenco inter la radiuso de la cirklosektoro, kaj hipodenuzo de la triangulo, kiu enhavas la cirklosektoron estas $\Delta = s-d$. Laŭ la pitagora ekvacio $s^2 - d^2 = h^2$; $(s-d)(s+d) = h^2$ $\Delta = s-d$, $s+d \approx 2*s$, $\Delta*2*s = h^2$

F 5.6 $\Delta \cong h^2 / 2*s$

Tiaspeca alproksimiĝo validas nur je preskaŭaksaj radioj.

Jen la baza problemo:

B 5-12



La kurbo estas sekcio de travidebla objekto, kies refraktivo $=n$. Punkto P' troviĝas en tiu mediaĵo. Maldekstre de la kurbo estas aero; $n=1$. **Oni volas, ke ĉiu radio kiun emisias P lulpunkto, trapasante la kurban surfacon en punkto T, kolektiĝu en punkto P'**. La kondiĉo estas, ke sendepende de la loko de T, ĉiu lumradio laŭpasante la sŝ' itineron trafu punkton P' en la sama tempo. **Tio eblas nur, se la sumo $1*s+n*s'$, kiu fakte estas oblo de la tempodaŭro, bezonata por la plena vojo, estu la sama por ĉiu itinero PTP' kaj POP'**. Estas videble, ke ĉi lasta estas pli mallonga, tial la **lumradio devas pasigi pli longan tempon en la medio, kie la rapido estas $1/n$ - obla**. Tial la konturlinio devas esti tiel kurba, , ke povu estiĝi tiu plusa OA distanco en la dekstaflanka medio. Cetere $n*s$ (refraktivo*longo) estas la „optika vojlongo”. Finfine la kondiĉo de la alveno en punkton P' estas, ke **la optika vojlongo estu la sama**. Tion diras ankaŭ la Fermat-principo.

Por kontentigi tiun ĉi kondiĉon, estus bezonate surfaco, kies ekvacio estus kvar-grada. Matematike formuli eblas tion. Realigi en la praktiko tian surfacon estas pli malfacile. Tial **oni faras lensojn je sfersurfacaj**. Se la angulo inter la optika akso (POP') kaj lumradio s, kaj kune kun tio distanco OA estas malgrandaj, la aberacioj restas malgrandaj, kaj per kunmeto de diversaj lensoj ili estas preskaŭ perfekte elimineblaj.

Do, **la surfaco estas sferĉapo**. Tie la radiuso estu r kaj la geometria centro C. Grave estas la **distanco OA**, ĉar ĝi **estas la pluso**, la ekstraĵo per kiu la radio devas kompensi la longodiferencon. Tie la tempodaŭro estas $(n-1)*OA$. Laŭ F 5.6 $OA = \Delta = h^2/(2*r)$. Tial $h^2/(2*s) + n*h^2/(2*s') = (n-1)*h^2/(2*r)$ Dividite la ekvacion per $h^2/2$ oni ricevos jenajn formulojn:

F 5.7 $1/s + n/s' = (n-1)/r$ Se ankaŭ la maldekstra flanko estas **solida aŭ fluida** materialo kies refraktivo estas n_1 kaj tiu de la dekstra n_2 , tiam la formulo:

$$n_1/s + n_2/s' = (n_2 - n_1)/r$$

Se oni grandigas distancon s, tiam s' devas malgrandiĝi. Se s estas infinito, tiam la radioj estas paralelaj kaj s' estas minimumo. Tiu distanco estas en la vitro la fokusdistanco: f. Oni kalkulu ĝin per la formulo F 5.7. Se $s = \text{infinito}$, tiam $1/s = 0$. $n_1/f = (n_1 - 1)/r$; $f = n_1*r/(n_1 - 1) = r*n_1/(n_1 - 1)$

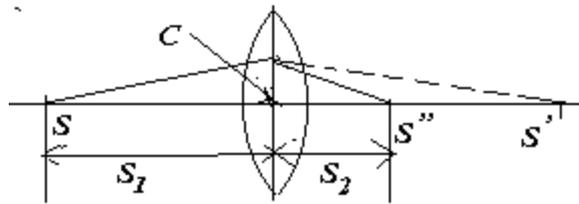
Se la lumfonto estas en la vitro, kaj s' estas infinito, la lumradioj renkontiĝas maldekstre de la vitrosurfaco en f distanco de O. Ĉar $n=1$, $1/f = (n-1)/r$, $f = r/(n-1)$. El ili sekvas la konata formulo:

F 5.8 $1/s + 1/s' = 1/f$

5 3 2 La fokusdistanco de lensoj

Simplaj lensoj havas du surfacojn, kaj inter ili vitron aŭ alian travideblan materialon kun refraktivo n. Ambaŭflanke estas aero, do $n=1$. **Estu la lenso maldika**, tial oni ne kalkulu per du **optikaj centroj**, ni supozu ke ili estas identaj kun la **centro de la lenso**. Kaj supozu, ke la direktoŝanĝo de lumradioj okazas sur la mezosurfaco en la lenso.

B 5-13



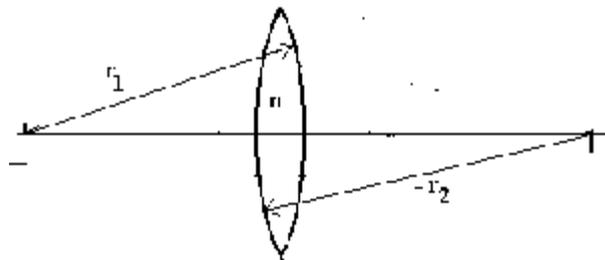
Nun oni apliku la ekvaciojn por ambaŭ vitrosurfacoj, kiujn oni uzis dum la dedukto de formulo F5 $(n/s_1') - 1/s_1 = (n-1)/r_1$. Ĉar nun ekzistas du surfacoj, la bildo de punkto S estiĝos ne en punkto S', sed en punkto S''. (S' estas nun virtuala lumfonto por S''). El tio sekvas $1/s_2 - n/s_1 = (1-n)/r_2$

(El maldekstra direkto la surfaco kiu apartenas al r_2 estas konkava, tial r_2 estas negativa.) Adiciante la du ekvaciojn, kaj anstataŭante s_2 per s' :

$$\text{F 5.9} \quad (1/s') - (1/s) = (n-1) * (1/r_1 - 1/r_2)$$

Lumradio povas alveni kaj el dekstra kaj el maldekstra direktoj. Se la objektopunkto estas en infinito, la bildpunkto estas en la fokuso. Fokuspunktoj estas du: antaŭa kaj malantaŭa. Ilia absoluta valoro estas sama. $f = -f'$ Tial:

B 5-14



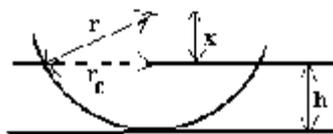
$$\text{F 5.10} \quad D = 1/f = (n-1) * (1/r_1 - 1/r_2)$$

Ofte oni devas mezuri la radiuson de sfera surfaco. Tio povas okazi jene: Metu la sferon sur rondan truon kies radiuso estu r_c . Poste mezuru precize la distancon h. Laŭ la ekvacio de Pitagoro

$$r^2 = r_c^2 + x^2, \quad x = r - h$$

$$r^2 = r_c^2 + r^2 - 2*r*h + h^2; \text{ el tio: } r = (h^2 + r_c^2)/h$$

B 5 15



E 5.4 Oni mezuru la radiuson de kolekta lenso per B 5.15 ilo, kie radiuso de ronda truo $r_c = 1$ cm, distanco $h = 0.2$ cm.

$$R = (h^2 + r_c^2)/h = (0.2^2 + 1^2)/0.2 = 5.2 \text{ cm}$$

E 5.5 Estu la refraktivo de la vitro $n=1.5$, $r_1=1$ cm., $r_2=0.5$ cm Kiom estas la fokusdistanco f de tiu ĉi lenso? $1/f=(1.5-1)*(1/0.2+1/0.1)=15$ $f=1/15=0.066$ m=6.6 cm

E 5.6 Oni faru lenson, kies fokusdistanco estu 20 cm. Ĝia unua flanko estu sfero kun radiuso $r=1$ cm. La alia flanko estu ebena ($r_2=\text{inf.}$) La refraktivo de la vitro estu $n=1.5$. Oni kalkulu la valoron de r_1 :

$$D=(n-1)/r_1, \quad D=1/0.2=5 \quad r_1=(n-1)/D=0.5/5=0.1 \text{ m}=10 \text{ cm}$$

5.3.3 Bildkreo de maldikaj lensoj

Ĉiu videbla objekto konsistas el unuopaj punktoj, kiuj emicias diverĝajn lumradiojn. La lenso kolektas lumradiojn de la punktoj, poste denove unuigas ilin en apartaj punktoj, kiuj konformas al la radiintaj. El tiuj punktoj konsistas la bildo. **Reala bildo ĉiam estas inversa**, kaj depende de la loko de la objekto rilate la fokuson, ĝi estas **grandigita aŭ malgrandigita**.

Oni rigardu, **kiel kondutas certaj specialaj lumradioj**.

- Se lumradio trafas la lenson **paralele** kun la optika akso, **ĝi plupasas tra la fokuso**. F_2 (1)

- Se lumradio **trapasas la optikan centron** de la lenso, ĝi trapasas **ne ŝanĝante sian direkton**. F_1 (2)

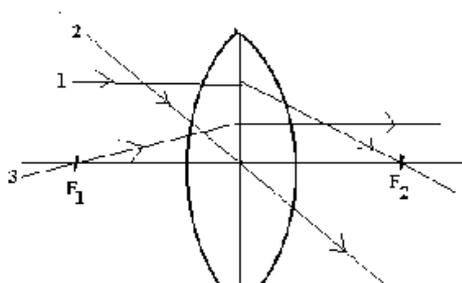
- Se lumradio trapasas la **fokuson (antaŭ la lenso)**, ĝi **pasas plu paralele** kun la optika akso. (3)

-

B 5-16

Per tiuj ĉi lumradioj oni povas desegni bildkreon de la lensoj.

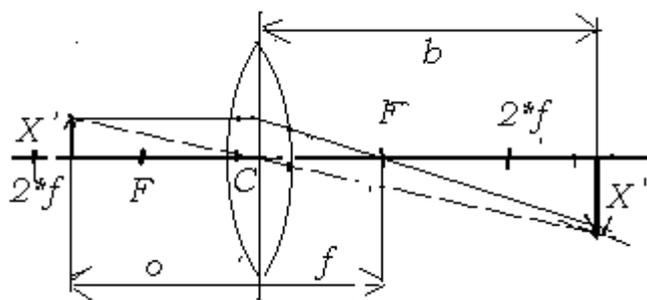
B 5-16



$X^?$: objekto, X'' bildo f : fokusdistanco, o : objektodistanco, b : bilddistanco. Oni ĉiam rajtas interŝanĝi la lokon de la objekto kun tiu de la bildo. La formulo 5.8 ĉi tie validas en jena formo:

$1/o + 1/b = 1/f$, $G = b/o$, G ; la **linea grandigo** signifas la grandigon laŭ unu dimensio. (Grandigo de longoj). G_a ; **angulgrandigo**. La proporcioj de la eĝoj de similaj trianguloj, anstataŭ bilddistanco b , kaj objektodistanco o oni licas uzi la alton de bildo kaj tiun de objekto.

B 5-17



F 5.11 $G=x''/x'$ La fokusdistanco de maldikaj lensoj ambaŭflanke estas sama.

Okaze de bildkreo de lensoj ekzistas jenaj variantoj:

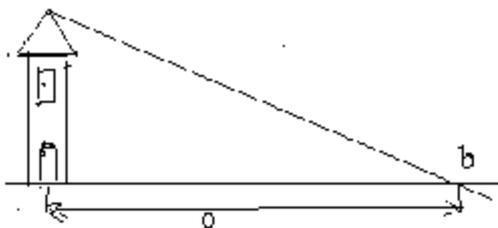
- Se objektodistanco $o > 2*f$ la bildo estiĝas en la transa flanko de la lenso inter f kaj $2*f$. Ĝi estas reala, malgrandigita, inversdirekta. (fotografado, teleskopoj, lornoj)
- Se la objektodistanco $o = 2*f$ tiam ankaŭ la bilddistanco $b = 2*f$, la bildo estas reala, samgranda kiel la objekto kaj inversdirekta. (o.)
- Se $2*f > o > f$ tiam la bilddistanco $b > 2*f$, kaj la bildo estas reala, grandigita, inversdirekta. (projekciilo)
- Se $o = f$ tiam $b = \text{infinito}$, kaj la radioj paralele kun la optika akso forlasas la lenson. (lumjetilo)
- Se $f > o > C$ tiam la objekto estas inter la fokuso kaj optika centro, kaj la bildo estos virtuala, grandigita, originaldirekta. (tiel funkcias la plej simpla optika ilo, la lupeo. (Oni traktos ĝin en ĉap. 10.)

E 5.8 Kiom longa devas esti la fokusdistanco de lenso kaj la objektodistanco, se oni volas projekcii, kaj la bilddistanco estas 5 m kaj la grandigo estas 100-obla? $G_a = 100$, $b = 5$, $f = ?$ $G_a = b/o$, $o = b/G_a = 5/100 = 0.05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$. Laŭ F 4.4 $f = b/(G_a + 1) = 500/101 = 4.95 \text{ cm}$.

Estas videble, ke la objekto estas preskaŭ en la fokuso; se oni projekcias per lenso, kiu havas relative mallongan fokusdistancon kaj la bilddistanco estas relative granda. Oni kontrolu la rezulton per la originala formulo $1/o + 1/b = 1/f$ $1/o = 1/5 = 0.2$

($1/b = 1/500 = 0.002$, $1/f = 1/495 = 0.202$ $0.2 + 0.002 = 0.202$, do la rezulto estas preciza.)

E 5.9 Oni havas fotoaparaton, kies fokusdistanco estas 50 mm. (En ĝi estas normala optiko.) Per ĝi oni volas foti turon, kies alto estas 70 m. La dimensio de la uzata filmoparto estas 24 x 36 mm. Oni volas, ke la alto de la turo sur la filmo estu 30 mm. Tial oni devas uzi la aparaton en staranta pozicio. La demando estas, kiom longa devas esti la distanco inter la turo kaj la fotanto.

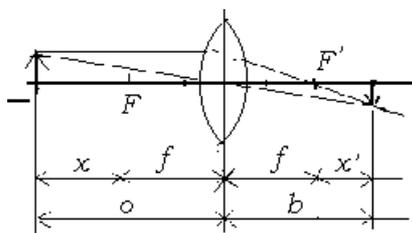
B 5-18

Estas konataj: $f=0.05$ m, la objektoalto: 70 m, la bildalto 0.03 m. $G/B = 0.03/70 = 4.286 \cdot 10^{-4}$. Laŭ la formulo F 4.4 la bilddistaco $b = G \cdot f + f = 4.286 \cdot 10^{-4} \cdot 0.05 + 0.05 = 0.05002$ m, do fakte egalas al la fokusdistanco. Ĉar la bildalto estas rekte proporcia al la bilddistanco kaj la objektoalto al la objektodistanco, $O/o = B/b$, el kio $o = o \cdot b/B = 70 \cdot 0.05/0.03 = 116.7$ m. La deziritan bildon ni devos fari do el la distanco de 116.7 m disde la turo. Ĉar en urboj malofte oni povas trovi tiom longan liberan lokon, oni devas uzi fotoaparaton kun lenso, kiu havas malpli longan fokusdistancon; t.e grandvidangula foto-lenso.

E 5.10 Estu la sumo de la bilddistanco kaj objektodistanco 20 cm. Estu la fokusdistanco de la lenso 1cm. Kien oni devas meti la lenson por havi akran bildon? $o+b=20$, $o=20-b$ $f=1$ el $1/o+1/b=1/f$ $f=o \cdot b/(o+b)$ $(20-b) \cdot b/(20-b)+b=1$ $b^2-20 \cdot b+20=0$ La solvoj de tiu ĉi dua-grada ekvacio estas $b_1=18.9$, $b_2=1.1$. La ekvacio havas du solvojn, tio signifas, ke la objekto kaj bildo povas anstataŭi unu la alian.

B 5.3.3 La ekvacio de Newton

Krom la konata ekvacio pri la kunligo de fokuso-objekto-bilddistanco, ankaŭ Newton deduktis ekvacion kiu ofte estas pli facile uzebla ol la jam priskribita.

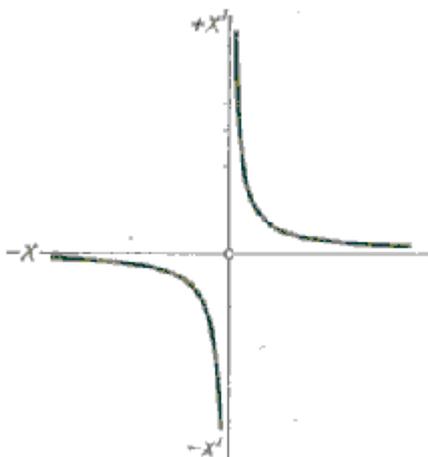
B 5-19

$x=o-f$, $o=f+x$, $x'=b-f$, $b=f+x'$ $1/(f+x)+1/(f+x')=1/f$ $f=b \cdot o/(b+o)$;
 $f=[(f+x') \cdot (f+x)]/[(f+x')+(f+x)]$ el tio deduktita:

F 5.12 $x \cdot x' = f^2$ Jen la newtona formulo.

La rilaton inter la bilddistanco kaj objektodistanco oni povas figurigi per hiperbolo.

B 5-20



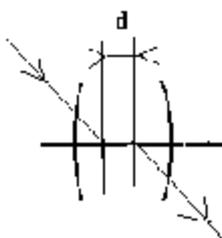
Konstateblas, ke se oni proksimiĝas al la fokuso, la bilddistanco kun la bildo forte grandiĝas kaj fine la bildo estos en la infinito.

5 3.4 Dikaj lensoj

La ĝis nunaj traktitaj aferoj estas nur **modeligo de la realo**. La formuloj estas validaj, nur se la lensoj estas maldikaj, kaj la lumradioj estas preskaŭaksaj. Nur tiam oni rajtas mezuri la distancojn disde la geometria centro de la lenso. **En la realo ĝenerale troviĝas dikaj lensoj.**

Ĉe ili anstataŭ la geometria centro oni uzas en la akso „**ĉefpunktojn**” kaj orte tra ili **ĉefebenojn**. Ili situas en la lenso kaj inter ili estas distanco d , signanta, kvazaŭ maldika lenso estus distranĉita orte tra la mezo je la optika akso, kaj la du partoj disŝiritaj je distanco d .

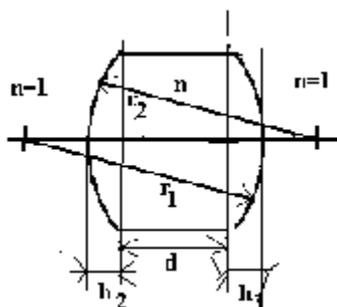
B 5-21



Se **lum** trafas la unuan ĉefpunkton 1, ĝi **trapasas laŭ la originala direkto**, sed tiel, la elirpunkto kvazaŭ estus la dua ĉefpunkto 2. Se temas pri bildo, ĝi pasas de la unua al la alia ĉefpunkto, kvazaŭ ĝi estus paralele forŝovita.

5 3.41 Lokoj de la ĉefpunktoj kaj ĉefebenoj

B 5-22



$$F \ 5.13 \quad h_1 = d \cdot r_1 / [n \cdot (r_1 + r_2) - (n-1) \cdot d]$$

$$h_2 = d \cdot r_2 / [n \cdot (r_1 + r_2) - (n-1) \cdot d]$$

Oni povas kalkuli la fokusdistancon f de dika lenso per la formulo

$$F \ 5.14 \quad 1/f = (n-1) \cdot [(1/r_1 + 1/r_2) - ((n-1)^2/n) \cdot d / (r_1 \cdot r_2)]$$

La fokusdistanco estas la distanco inter la ĉefpunkto kaj fokuspunkto.

E 5.11 Kalkulu la geometrian lokon de la ĉefpunktoj de dika lenso. Poste kalkulu la fokusdistancon per la formulo F 5.14 kaj per la formulo por maldikaj lensoj F 5.10 kaj komparu la rezultojn. La geometriaj dimenzioj: $r_1 = 50$ mm, $r_2 = 30$ mm, $d = 10$ mm, $n = 1.5$. La loko de la ĉefpunkto I. $h_1 = 10 \cdot 50 / [1.5 \cdot (50 + 30) - 0.5 \cdot 10] = 4.35$ mm. La loko de la ĉefpunkto II. $h_2 = 10 \cdot 30 / (1.5 \cdot 80 - 0.5 \cdot 10) = 2.61$ mm.

La plena dikeco de la lenso $h_1 + h_2 + d = 4.35 + 2.61 + 10 = 16.96$ mm.

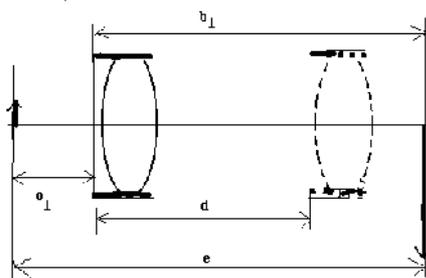
La fokusdistanco de dikaj lensoj laŭ la formulo F 5.16: $1/f = (1.5-1) \cdot (1/50 + 1/30) - [(1.5-1)^2 / 1.5] \cdot 10 / (50 \cdot 30) = 2.594 \cdot 10^{-2}$
 $f = 1 / 2.594 \cdot 10^{-2} = 38.54$ mm.

La fokusdistanco per la formulo F5.10 (por maldikaj lensoj)

$1/f = (1.5-1) \cdot (1/50 + 1/30) = 2.66 \cdot 10^{-2}$ $f = 1 / 2.66 \cdot 10^{-2} = 37.954$ mm. La diferenco: $38.54 - 37.954 = 0.95$ mm; 2.5%, estas ne granda. Tamen se oni planas precizajn optikajn instrumentojn, eĉ nunacoj povas esti gravaj. Sed por supraĵaj, rapidaj kalkuloj la formuloj, deduktitaj por maldikaj lensoj estas sufiĉaj.

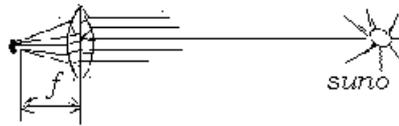
La **fokusdistanco** de ĉiaspecaj lensoj estas facile **mezurebla per la metodo de Bessel**:

B-5-23



Oni metu brilantan objekton (ekz. malgrandan inkandeskan lampon) antaŭ ekranon. La distanco estu proksimume kvaroblo de la fokusdistanco. Tion oni taksas.

B.5-24 (Ekz. per sunradioj)



Se oni metas la lenson inter la lumfonton kaj ekranon, kaj varias ĝian lokon laŭ la akso, estiĝos du akraj bildoj. (Ne samtempe!) Unu estos granda, la alia malgranda. Unue oni metu la lenson proksime al al lumfonto, kaj serĉu la lokon de la akra bildo. Tiam la distanco de iu punkto de la lensokadro disde la lumfonto estu o_1 ; la distanco de tiu ĉi punkto disde la ekrano estu b_1 . Oni marku la lokon de la lenso. Poste oni mezuru la distancon, kiu estas inter la du akraj lokoj. Konante la distancon inter la lumfonto kaj ekrano, kaj distancon d , **la fokusdistancon de la lenso oni povos kalkuli**

F5.15 $f = [(e-d^2)/e]/4$

E 5.12 Oni mezuru la fokusdistancon de dika lenso, kies fokusdistanco estas proksimume 10 cm. (Tion oni povas kontroli per sunradioj, kiuj estas paralelaj .) Estu distanco e 50 cm. Serĉu kaj marku la du lokojn, kie oni vidas akrajn bildojn. Mezuru distancon inter ili. La rezulto: $d=30\text{cm}$. Kalkulu la fokusdistancon per la formulo 5.17: $f = [(50-30^2)/50]/4 = 8\text{cm}$

5 3.5 Lensosistemoj

Ofte okazas, ke oni ne havas lenson kun bezonata fokusdistanco. Tiam oni uzas du aŭ pli lensojn, por havi la deziratan fokusdistancon. Ĉar uzado de lensosistemoj eliminigas plurajn aberaciojn (pri ili poste), en optikaj iloj, kaj aparatoj estas preskaŭ ĉiam uzataj komplikaj lensosistemoj.

Se oni metas unu post la alian du lensojn tiel, ke ilia optika akso estas komuna, ili funkcios kiel unu lenso. **La rezultanta nova fokusdistanco f_r** kaj dioptrioj D_r estas kalkuleblaj per la formulo:

F 5.16 $f_r = f_1 * f_2 / (f_1 + f_2 - e)$, aŭ $D_r = D_1 + D_2 - e * D_1 * D_2$

(f_1, f_2 estas la fokusdistancoj, D_1, D_2 la dioptrioj de la originalaj lensoj, kaj e la distanco inter ili.)

-Se $f_1 + f_2 > e$, la lensosistemo estos kolektanta.

- Se $f_1 + f_2 < e$, ĝi estos diverĝiga (pro la negativa f_r)

-Se $f_1 + f_2 = e$, la trafantaj paralelaj radioj tarpasos paralele; f_r estas infinita.

E 5.13 Estu du similaj lensoj; $f_1 = f_2 = 10$ mm, $e = 0$ tiam $f_r = 10 * 10 / (10 + 10) = 5$ mm. Se $e = 10$ mm, $f_r = 100 / 10 = 10$ mm, se $e = 19$ mm, $f_r = 100 / (20 - 19) = 100$ mm. Estas videble, ke dum $e < f_1 + f_2$, f_r estos malpli granda ol la originalaj fokusdistancoj. Se $e = f_1 = f_2$, f_r

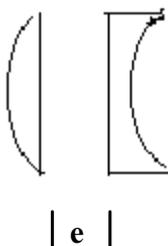
estas egala al la komuna fokuso. Se $f_r < e < f_1 + f_2$, f_r estos pli granda. Se $e > (f_1 + f_2)$, la rezultanta fokusdistanco f_r estos negativa, tial la sistemo diverĝiga.

Se la fokusdistancoj estas malsamaj, ekz $f_1 = 10$ mm, $f_2 = 20$ mm:

e/fr [mm] : 0/6.6, 10/10, 20/20, 29/200, 35/-40

E 5.14 Kalkulu la resultantan fokusdistancon de du lensoj, el kiuj unu estas konkava kaj diverĝiga

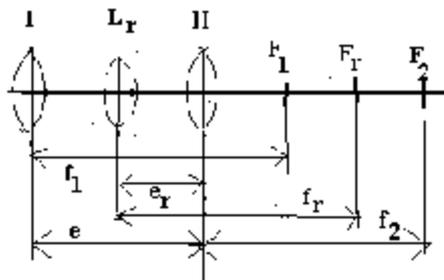
B 5.25 $f = 5$ cm $f = -5$ cm



$e = 0$	$f_r = -25/0 =$	infinita
$e = 3$ cm	$f_r = -25/-3 =$	8.3 cm (kolektanta)
$e = 10$ cm	$f_r = -25/-10 =$	2.5 cm (kolektanta)
$e = 25$ cm	$f_r = -25/-25 =$	1 cm (kolektanta)

Se oni kunmetas lensosistemon el du lensoj, rezultiĝas kvazaŭ nova lenso. Kie situas tiu fokusdistancon, bildodistancon, objektodistancon? imagita nova lenso, rilate al la ekzistantaj, kie estas la punkto, de kiu oni mezuras la

B 5.26



$1/o + 1/b = 1/f$ $f_r = f_1 * f_2 / (f_1 + f_2 - e)$ Estu F_1 la objektopunkto por lenso II. Ĉar ĝi situas dekstre de la lensoj la objektodistanco o estas negativa. $o_2 = f_1 - e$. La bildodistanco b_2 kiu apartenas al o_2 kaj f_2 : $-1/o_2 + 1/b_2 = -1/(f_1 - e) = 1/f_2$, $1/b_2 = 1/f_2 + 1/(f_1 - e)$ $b_2 = f_2 (f_1 - e) / (f_1 + f_2 - e)$
Ĉar b_2 estas la distanco inter la centro de la

rezultanta lenso kaj F_1 $e_r = b_2 - f_r = f_2 * (f_1 - e) / (f_1 + f_2 - e) - f_1 * f_2 / (f_1 + f_2 - e) = [f_2 * (f_1 - e) - f_1 * f_2] / (f_1 + f_2 - e)$

F 5.17 $e_r = -e * f_2 / (f_1 + f_2 - e)$

e_r devas esti negativa, ĉar ĝi estas maldekstre de lenso II. e_r estas la distanco de la mezo de **la rezultanta** lenso disde la mezo de la lenso II. Tial **rezultantaj** f_r , f_o , f_b **distancoj estas mezureblaj de la centro de lenso II**, sed e_r distancon oni ĉiam devas aldoni.

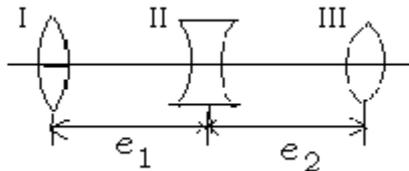
E 5.15 Kiom estas la rezultanta fokusdistanco de lensoj, kiuj havas $f_1 = 10$ cm, $f_2 = 20$ cm fokusdistancon, kaj inter ili la distanco estas $e = 5$ cm ?

$f_r = 10 * 20 / (10 + 20 - 5) = 8$ cm $e_r = -5 * 20 / (10 + 20 - 5) = -4$ cm

E 5.16 Interesa afero: $f_1 = 10$ cm, $f_2 = 20$ cm, $e = 10$ cm. Tiam $f_r = 10$ cm, kaj $e_r = 10 * 20 / (10 + 20 - 10) = -10$. Do la rezultanta lenso estos en la loko de la unua lenso, kaj la rezultanta fokusdistanco estas sama, kiel la fokusdistanco de la unua.

E 5.17 Se la sistemo konsistas el tri lensoj:

B 5-27

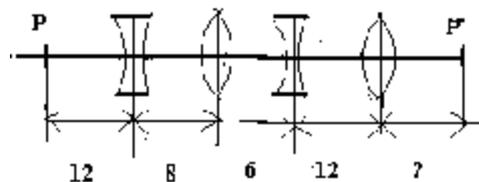


$f_1 = 10$ cm, $f_2 = -5$ cm, $f_3 = 5$ cm, $e_1 = e_2 = 8$ cm. Unue oni kalkulu la rezultantan fokusdistancon de lensoj I kaj II. $f_{12} = 10 * (-5) / (10 - 5 - 8) = -50 / -3 = 16.6$. Poste konsideru la lensojn I kaj II kiel unu tuton, kaj kalkulu la rezultantan fokusdistancon kun la lenso III. $16.6 * 5 / (16.6 + 5 - 8) = 6.1$ cm

E 5.18

Lenso sistemo el kvar membroj. Kalkulu la lokon de la bildo de punkto P, disde la mezo de la kvara lenso. La fokusdistanco de la konveksaj lensoj estas 6 cm.

B 5-28



La objekto por ĉiu unuopa lenso estas la bildo, kiun kreas la antaŭa lenso. Oni devos **kalkuli ilin unu post la alia**. $o_1 = 12$, $b_1 = f_1 * o_1 / (o_1 - f_1) = -4$ cm. Do la unua bildo estas virtuala; ĝi situas apud la objekto. La objektodistanco por la dua lenso: $o_2 = e - b_1 = 8 - (-$

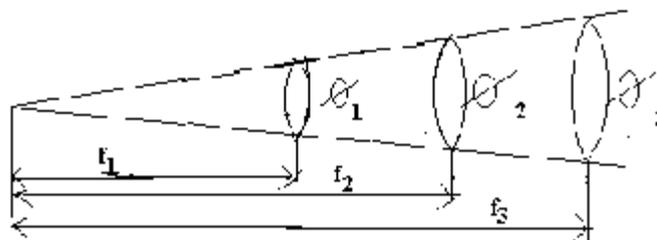
4)=12 cm. La bildodistanco: $b_2=f_2 \cdot o_2 / (o_2 - f_2) = 6 \cdot 12 / (12 - 6) = 12$ cm. Por la tria: $o_3=b_2 - e_2=6$ cm $b_3=(-6) \cdot 6 / (-6+6)=\text{infinito}$. La radioj pasas do paralele. La kvaran lenso trafas kvazaŭaksaj, paralelaj radioj, do ili kolektiĝas en ĝia fokuso. Tie estos la bildo je distanco de 6 cm disde la centro de la kvara lenso.

5.3.6 La relativa aperturo

La „lumforto” estas tre grava eco de lenso. En la fotografado ĝi havas gravan signifon. **La lumforto estas egala al la kvadrato de la relativa aperturo R. $R=\emptyset/f$** , kie \emptyset egalas al la diametro de la libera aperturo por la lenso, f estas la fokusdistanco

F 5.18 Ĝenerale oni skribas ĝin en la sekva formo: **$R=1:(f/\emptyset)$**

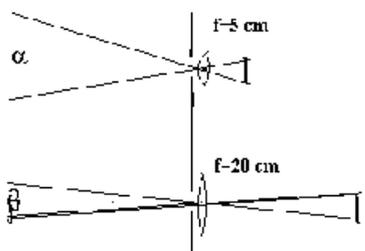
B 5-29



En la figuro por ĉiu lenso la relativa aperturo estas sama.

E 5.16 Ekzemple $f=5\text{cm}$ $\emptyset=2\text{cm}$ $R=1:(5/2)=1:2.5$ En la ĉiutaga nepreciza vortouzo oni diras, ke la lumforto estas 2.5. Eĉ sur la kadro de fotografiaj lensoj estas gravurita nur tiu numero kiel maksimuma lumforto, krome la fokusdistanco. (Ju pli malgranda estas la numero, des pli granda estas la lumforto de la lensosistemo.)

B 5-30



Per la bildoj estas komprenebla kiaspecan rilaton havas la fokusdistanco kun la lumforto. La filmsurfaco estas same granda en ambaŭ kazoj. La bildo pri la objekto, ekz. sunbrila ĉielo en ambaŭ kazoj plene kovras la filmsurfacon. Se la diametro de la lensosistemo en ambaŭ kazoj estas same granda, sed la fokusdistanco malsama, la helo sur la filmo dependos nur de la fokusdistanco. **La helo determinas la spacangulo, tra kiu lumo trafas la filmon.** La ebena angulo, (sur la filmo) dependas de la fokusdistanco. Al kvarobla fokusdistanco apartenas kvarona angulo. Sed **tie temas pri spacangulo, tial al kvarobla fokusdistanco apartenas 16-ona spacangulo, tial ankaŭ 16-ona helo.**

Laŭ alia samrezulta ripenso, se la fokusdistanco estas sama, la surfaco de la lenso, kaj pro tio **la helo de la filmo varias laŭ kvadrato de la diametro de la lenso.** La funkcia diametro estas ŝanĝebla per **diafragma**. Oni faras tion per turno de cilindro, sur kiu estas marko, kaj ĉirkaŭe numeroj pri la relativa aperturo. Inter ĝiaj du numeroj, la areo (proporcie al R^2) de la aperturo proksimume duobliĝas.

T 5.3

R:	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22
R ² :	1.96	4	7.84	16	31.3	64	121	256	484

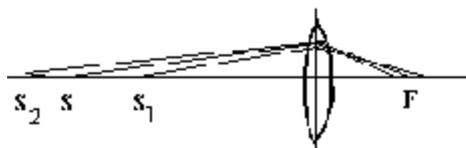
(R² valoroj unu post la alia proksimume duobliĝas.)

Do, se oni reduktas la relativan aperturon, sed volas, ke la prilumiteco de la filmo restu sama, oni devos duobligi la tempon de la prilumado. Ekz. se oni ŝanĝas R-on de 4 al 5.6, tiam oni devas ŝanĝi la tempon de 1/250 sek. al 1/125 sek.

La reguloj estas validaj, nur se la objektodistanco estas relative granda kompare al la fokusdistanco, kaj la bildo plenigas la tutan filmsurfacon.

5 3.7 Objektodistanc-intervalo por akra bildkreo

Kiuj jam fotis per neaŭtomata aparato, scias, ke unue oni devas mezuri la distancon inter la objekto kaj lenso. Poste laŭ tiu distanco reguli la distancon inter la lenso kaj filmo. Nur tiamaniere oni povas fari akran bildon. Sed oni scias ankaŭ tion, ke se la diametro de la diafragma estas malgranda, la fokusdistanco mallonga, kaj la objekto estas ne tro proksime al la fotanto, la bildo restos akra, eĉ se la regulado estas ne preciza. Do la **bildoakreco dependas de la fokusdistanco, de la aperturo-diametro, kaj de la distanco de la objekto**. Bildo estas akra, se **inter la apartaj bildopunktoj la distanco (z) estas almenaŭ 0.1 mm**. El la distanco de la akra vido de la homa okulo (proks. 25 cm) tio respondas al la angulo de $0.01/25=4*10^{-4}$ radianoj (0.023 gradoj) Se temas pri grandigota filmo, la distanco z devas esti ne pli ol 0.03 mm. Ekzistas intervalo inter la objekto kaj lenso, en kiu la kondiĉo plenumiĝas.

B 5-31

S₁: malsupra limo de la intervalo. S₂: supra limo de la intervalo. S: efektiva objekto-distanco. z: aparte videblaj bildpunktoj.

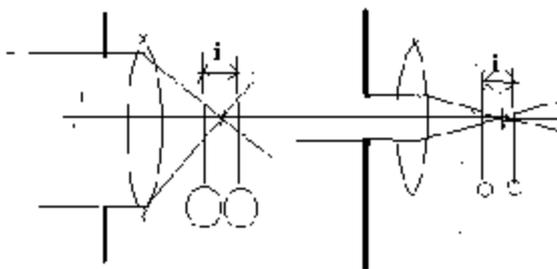
$$\mathbf{F\ 5.19:} \quad S_1 = s * f^2 / [f^2 + R * (s - f) * z] \quad S_2 = s * f^2 / [f^2 - R * (s - f) * z]$$

E 5.17 Estu $f=5$ cm, $s=200$ cm, $z=1/300$ cm, $R=2$

$S_1 = 200 * 25 / (25 + 2 * 195 / 300) = 190.1$ cm $S_2 = 200 * 25 / (25 - 1.3) = 211$ cm .La bildo ŝajnos akra, se la objekto estas en la distanc-intervalo 210...190 cm. Ĉiu restu la sama, nur la relativan aperturon ni malgrandigu ĝis $R=16$. Laŭ samaj kalkuloj: $S_1=141.2$ cm, $S_2=342.5$ cm. La intervalo okulfrape pligrandiĝis.

Jen klarigo pri la afero:

B 5-32



Se la **relativa aperturo estas granda**, la bildon kreas larĝaj, **konusaj lumfaskoj**. Ili povas krei akran bildon nur en unu loko. Se la relativa aperturo estas **malgranda**, la bildon kreas tre **mallarĝaj**, pinglo-similaj **lumfaskoj**. Ili povas krei akran bildon en relative larĝa distanc-intervalo (i). Pri tio oni povas fari tre simplan, tamen tre okulfrapan eksperimenton. Sur peceto de netrasidebla kartono aŭ plasto faru per pinglo mallarĝan truon, ($\varnothing=0.1 \dots 0.5$) mm. Se oni rigardas tra la truo, samtempe oni vidas akra tre proksimajn kaj malproksimajn objektojn, okaze de forta prilumado al la rigardata objekto. Eĉ personoj, kiuj uzas fortajn okulvitrojn, povas vidi (sen okulvitroj) akre per tiu ĉi ilo. Objektojn, kaj ĉefe iliajn prezojn en monstro-fenestroj mi povas vidi nek per okulvitroj, nek sen ili. Tial ĉiam mi kunportas en la poŝo tian ilon, kaj per ĝi ĉion mi povas bone vidi.

5.3.8 La aberacioj de la lensoj

En la ĉapitro 5.3.1 jam estis menciite, ke **perfekta lenso devus havi surfacon, kies ekvacio estus kvara-grada**. Tamen por simpligi la aferon, oni faras la lensojn kun sferaj surfacoj. **Simplaj lensoj** estas uzeblaj, se la **relativa aperturo estas malgranda** (1:11, 1:16). En malmultekostaj fotoaparatoj la lensoj estas tiaj. Se la prilumado estas forta, eĉ per ili oni povas fari bonajn bildojn.

Se oni volas fari lensojn kun granda relativa aperturo, -ili estas bezonataj en bonkvalitaj fotoaparatoj, kiuj estas uzeblaj ankaŭ se la prilumado estas malforta, aŭ la prilumada tempo estas mallonga (1/500, 1/1000 sek.) - oni nepre devas **redukti la aberaciojn** per uzado de **lensosistemoj**. Ankaŭ bonkvalitaj teleskopoj, lornoj, mikroskopoj kaj aliaj precizaj optikaj instrumentoj bezonas bonkvalitan, malsimplan lensosistemon.

Jen la korektendaj aberacioj:

Kolor-aberacio

Estis menciite, ke la refraktivo de diversaj vitroj por diverskoloraj lumoj (kiuj estas diversondolongaj radioj) estas malsamaj. Tial la fokusdistanco por ruĝaj radioj estas pli longa ol por violkoloraj radioj. El tio sekvas, se la lumo estas blanka (kiu estas miksaĵo de ĉiuj koloroj) la bildo estos iom malakra, kaj ĉe la konturoj kolora. La kaŭzo estas ke ankaŭ la bildodistanco estas malsama por diversaj koloroj. Tio validas ankaŭ por perfektaj, kvargradaj surfacoj, kaj dependas nur de la refraktivo de la vitro. Estas vitroj kiuj pli forte, kaj kiuj pli malforte diverĝigas la kolorojn. La eon de la vitro montras numero de Abbe (fizikisto, kiu multe okupiĝis pri perfektigo de lensoj.)

F 5.20 $v = (n_D - 1)/(n_F - n_C)$ La refraktivoj estas n_D por flava (589 nm), n_F por blua (486 nm) n_C por ruĝa (656 nm) koloroj. **Se v estas granda, la diverĝivo de la vitro**

estas malgranda. Se v estas malgranda, la diverĝivo estas granda. La numeroj estas troveblaj en katalogoj de optikaj vitroj, kaj projektantoj de lensoj povas uzi ilin. Ĝia valoro estas inter 25-70. El inter la aberacioj, **la kolora aberacio kaŭzas la plej grandan malakriĝon**, tial la unua tasko de projektistoj estas ties redukto.

E 5.18 Indas kalkuli, kiom varias la fokusdistanco de lenso, kies vitro havas refraktivon $n=1.600$ por la ruĝa (760.8 nm) kaj por la viola (396.8 nm) $n=1.645$. Ĉar la radiusoj estas samaj, estas inde kalkuli nur la proporcion de la fokusdistancoj. El la formulo F 5.10 $n_r-1=1.6-1=0.6$, $f_r*0.6=K$, $f_v*0.645=K$, $f_r*0.6=f_v*0.645$, $f_r/f_v=0.645/0.600 = 1.0667$ do la fokusdistanco estas 1.0667 -oble longa por ruĝa ol por viola koloro. Se $f_v=10$ cm, tiam $f_r=10.67$ cm.

Estu la objektodistanco 30 cm. La bilddistanco: $b=f*o/(o-f)$. La bilddistanco por viola lumo estas: $b= 10*30/(30-10)=15$ cm La bilddistanco por ruĝa lumo estas: $b=10.67*30/(30-10.67)=16.56$ cm. La bilddistanco inter la du ekstremaj koloroj jam estas signife malsama, tial la bildo ne povas esti akra.

La koloran aberacion oni devus elimi por ĉiu koloro aparte. Nature tio ne eblas, kaj tial oni ĝenerale korektas nur la mezan parton de la videbla ondolongo-intervalo. Por specialaj lensoj krome ankaŭ kelkajn aliajn ondolongojn. Tio jam rezultigas multmembran lensosistemon. Al la kolor-aberacio la konduto de kolektaj kaj diverĝigaj lensoj estas inversaj. Tial per konvena kombino de lensoj, inter si, kun malsamaj refraktivoj oni povas redukti la koloran aberacion. Tie estas utila la „Abbe-numero” $v_1*D_1+v_2*D_2=0$

B 5-33



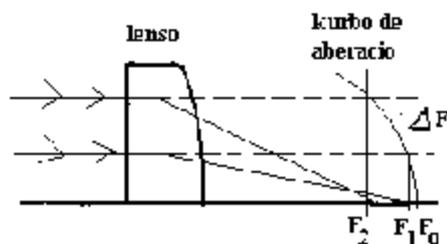
D_1 kaj D_2 estas la forteco de la lensoj en dioptrio. (Por konkavaj lensoj la dioptrio estas negativa.) El la ekvacioj 5.7 kaj 5.16 la bezonataj radiusoj estas kalkuleblaj. Se en la sistemo la lensoj estas strikte unu ĉe la alia, ili estas algluitaj per speciala, plene travidebla gluilo, kies refraktivo estas proksime al tiu de la lensovitro.

La sekvaj aberacioj havas rilaton kun la relativa aperturo. Se ĝi estas granda, ankaŭ la aberacioj estas fortaj. Tio estas reduktebla per konstruo de plurmembra sistemoj.

Sfera aberacio

Pro la sfera formo de la surfaco el inter la radioj, proksimaj kaj paralelaj al la akso renkontiĝas pli fore de la lensocentro, ol kiuj pasas malproksime de la optika akso. Do la fokusdistanco dependas de la distanco de la radioj disde la optika akso. **Se oni uzas unusolan lenson, tiu sfera aberacio estas la plej malgranda, se ambaŭ flankoj de la lenso estas konvekse sferaj, kaj la proporcio inter la radiusoj estas 1:6.** Per plurmembra lensosistemoj, en kiuj troviĝas kaj kolektaj kaj diverĝaj lensoj, la sfera aberacio estas forte reduktebla.

B 5-34



Bone konstruita lensosistemo plenumas la tiel nomatan „**sinus-kondiĉon**”. Laŭ tiu la fokusdistanco devas esti sama, sendepende de la orta distanco de la radioj disde la akso. Ĝi estas egala al la fokusdistanco de kvazaŭaksaj radioj.

La astigmateco

Se la objektpunkto situas fore de la optika akso, estiĝas du bildpunktoj je malsamaj distancoj disde la lenso. La bildoj estos ne punktoj, sed mallongaj strioj, kaj ili estas ortaj unu je la alia. Nature tio kaŭzas malakran bildon. La aberacio estas korektebla per plurmembraj sistemoj, kie inter la lensoj troviĝas diafragmoj.

La komeco

Se la objektpunkto situas fore de la optika akso, la bildpunkto aspektas komeco, kiu malakrigas la bildon. Ankaŭ ĝi estas reduktebla per uzo de lensosistemoj.

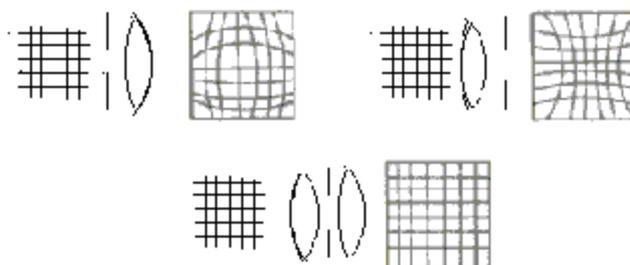
La kurbiĝo de bildsurfaco.

La bilddistanco, la teoria distanco inter la lensocentro kaj ĉiu bildopunkto estas sama. El tio sekvas, ke vere akra bildo povas situi nur sur en interno de sferosurfaco, kies radiuso estas la bilddistanco. Realigi tion ne eblas, tial **la randoj de la bildoj ĉiam estas iom malakraj**. La malakreco estas reduktebla nur per malgrandigo de la relativa aperturo.

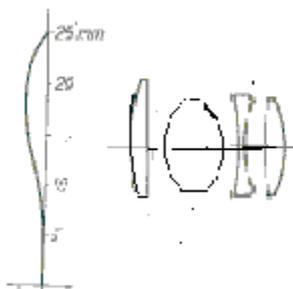
La deformiĝo de la bildo

Tiun ĉi aberacion **kaŭzas la diafragmo**, kaj la deformiĝo dependas de la loko de la diafragmo. Estu la objekto kvadrata krado. Se la diafragmo situas antaŭ la lenso, estiĝas „barel-forma” bildo. Se la diafragmo situas malantaŭ la lenso, estiĝas „kusen-forma” bildo. Se la diafragmo estas inter la lensoj en la lensosistemo, kaj la sistemo estas simetria, tia aberacio ne ekzistas.

B 5-35



B 5-36



Kurbo pri aberacio de bonkvalita lensosistemo:

6. La ondo-optiko

La ondo-optiko konsideras la lumon kiel energio-propagiĝon per elektromagnetaj ondoj. Pruvas tion pluraj fenomenoj, kiujn mi traktos en tiu ĉi ĉapitro.

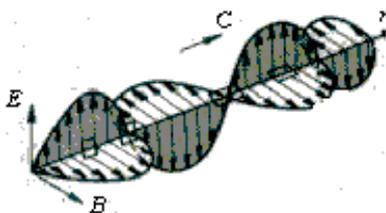
Tamen, komence **mi klarigos kelkajn malfacile eksplikeblajn aferojn**. Kaj la **gravitaj**, kaj la **elektraj** (kulombaj) **altir fortoj estas inverse proporciaj al la kvadrato de la distanco**. Se tio estus valida ankaŭ pri la lumefikoj, la lumo de foraj steloj estus nevideblaj; la nokta ĉielo estus preskaŭ malluma. Tamen tio ne okazas. La kaŭzo estas, ke **la lumefikoj kunligiĝas al la elektromagneta kampintenso, kiu estas inverse proporcia al la distanco**. (do ne al la kvadrato de la distanco.)

Konsideru elektran kondensilon, kiu konsistas el paralelaj ebenaj elektrodoj, inter kiuj la distanco estas 1 metro, kaj la elektra tensio 1 volto. Laŭ la difino de la elektra kampo, ĝi faras 1 julan laboron, se ĝi portas 1 kulomban ŝargon tra 1-volta tensio. Ĉar la kvanto de la laboro estas forto multobligata per distanco; la forto, kiu efikas je 1 kulomba ŝargo, estos 1 neutono. Tie la kampintenso = $1 \text{ V}/1 \text{ m}$. Do la mezurunuo de la elektra kampintenso estas tensio/distanco: V/m . La energio, kiu trapasas certan surfacon estas proporcia al la kvadrato de la elektra kampintenso.

Se ie vibras korpusklo kun elektra ŝargo, tiu emisias elektromagnetan ondon. Ja moviĝanta korpusklo estas kurento, kiu ĉiam estigas magnetan kampon, sed la ŝanĝiĝo de magnetika kampo ĉiam induktas elektran kampon, kiu estigas kurenton, kaj **tiu, kiel plektita ĉeno pasas en la infinita spaco**. Sed **tiu ĉeno konsistas el pecoj**, kun certa longeco, **formante tiamniere lumkvanton, la fotonon**.

La amplitudovektoroj de la elektra kaj magnetika kampoj ĉiam estas ortaj unu je la alia, kaj je la direkto de la propagiĝo.

B 6.1



6.1 La propagigo de la lumo laŭ la ondooptiko

La ondooptiko estas konsiderebla tiel, ke en la lokoj, kie la elektromagnetaj kampintensoj adiciiĝante plifortiĝas, estas la plej probablaj momentaj restadlokoj de la fotonoj. Ĉar fotonoj ĝenerale estas multegaj, la ekvacioj, kalkulitaj per ondomekaj metodoj reprezentas la realan situacion. (Fotonoj ĉiam estas tie, kie laŭ la ondomekaniko ili devas esti.)

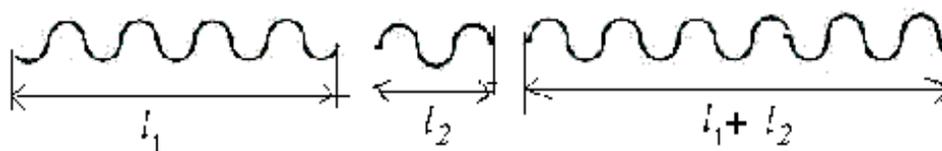
Pluraj optikaj fenomenoj pruvas tion, kie la lumo propagiĝas ne laŭ rekta linio, sed la lumradioj devojiĝas

El punktsimila lumfonto la lumradioj disvastiĝas en la spaco en ĉiu direkto kun la sama amplitudo kaj fazo, se la spaco estas homogena. Hughens kaj Fresnel konstatis, kaj kiel principon deklaris, ke **ĉiu punkto de la ondosurfaco kondukas kiel lumfonto**. La direkto de ilia radio ĉiam estas orta je la ondosurfaco. La ondosurfacoj proksime al la lumfonto estas sferaj, fore de la lumfonto ili konsidereblaj ebenaj, kaj la ondoj ebenaj ondoj. La amplitudo kaj fazo de la ondoj, kiujn estigas la primaraj ondoj, egalas al ties amplitudo kaj fazo. La ondoj estas koheraj, kaj ties interfero estigas la amplitudon kaj fazon de la vibrado en la observata punkto.

6.11 Kohereco, interfero

La ondoj estas koheraj, se ilia fazodiferenco kaj frekvenco estas konstanta. Se koheraj ondoj renkontiĝas, kaj inter ili la vojlongo (l_2) estas ne pli longa ol duonlongo de la ondogrupo (l_1) kiu apartenas al la fronto, interfero estiĝas.

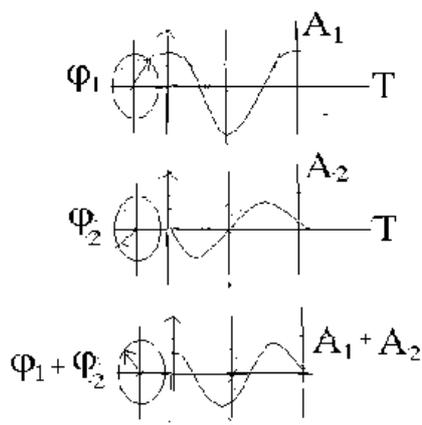
B 6.2



La longo de unu ondogrupo (l_1) dependas de la vibrodaŭro de la emisianta elektrono. Tio estas proksimume 10^8 sek.

Okaze de interfero **la amplitudoj aŭ adiciiĝas aŭ substrahiĝas**. La rezultanta ondo havas amplitudomaksimumon, se la fazodiferenco inter la adiciatoj estas nulo. Amplitudominimumo estiĝas, se la fazodiferenco estas 90 gradoj.

Interfero estiĝas nur se la radioj devenas el la sama lumfonto. Eĉ lumoj de lazeroj estas inter si nekoheraj. **La intenso estas proporcia al la kvadrato de la amplitudo.** La rezultata amplitudo de la du ondoj estas:

B 6.3

F 6.1 $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ La fazo estas sama se $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ aŭ $2 \cdot \pi \cdot k$ ($k=1,2,3,\dots$)

$$\cos 0 = 1 \quad \text{do} \quad A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 \cdot A_1 + A_2 = (A_1 + A_2)^2$$

$$\text{se } A_1 = A_2 \quad A = 2 \cdot A_1 \quad A^2 = 4 \cdot A_1^2$$

Do, la rezulta energio estas kvarobla ol la energio de la komponantoj.

Se la fazo estas inversa : $\varphi_2 - \varphi_1 = (2 \cdot k - 1) \cdot \pi$ ($k=1,2,3,\dots$)

tiam $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ La intenso de la rezultata ondo estas:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2 \cdot A_1 \cdot A_2 = (A_1 - A_2)^2$$

Se $A_1 = A_2$ $A = A^2 = 0$ Tiam la du ondoj neniigas unu la alian.

6.12 La difrakto

La nomo por la devojigo de la lumo estas difrakto. Difrakto estiĝas, se la larĝeco de la truo kiun la lumradio trapasas, aŭ de obstaklo, al kiu ĝi puŝiĝas estas proksimaj al la ondolongo de la lumo.

Difraktoj estas duspecaj:

- Proksime al la lumfonto la ondosurfacoj estas kurboj. Ilia difrakto estas la Fresnel-difrakto.
- Malproksime disde la lumfonto la ondosurfacoj estas jam preskaŭ ebenoj. Tiam temas pri Fraunhofer-Schwerd-difrakto.

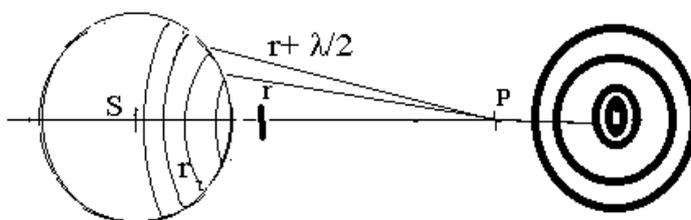
6.13 La zonoj de Fresnel

Por kalkuli la fenomenojn, kiujn kaŭzas difrakto, estas utile uzi „zonoj”-n, kiujn Fresnel uzis.

6.2 Difrakto ĉe la rando de malgranda disko

Oni loku inter lumfonton S kaj punkton P malgrandan diskon, centre kaj orte je la interliga akso. La disko kovros la mezajn zonojn. Kiel efikas en la punkto P la restintaj?

B.6.6



La paraj zonoj neniigas unu la alian. La senparaj zonoj estigas interferon, kaj en la mezo de la ombro de la disketo brilas punkto. Tio estis la unua, samtempe plej efika pruvo de la ondoteorio.

6.21 Difrakto per rondforma truo

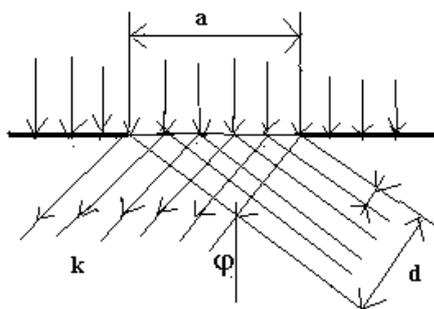
Anstataŭ disketo, nun oni metu netravideblan folion inter lumfonton S kaj punkton P. La folio estu orta je la lumradio, sur ĝi estu malgranda rondforma truo. La radioj pasu tra la truo.

Denove oni povas desegni zonojn. Depende de la distanco inter la truo kaj lumfonto ĝi kovras jen parajn, jen senparajn zonojn. **Se la nombro de la zonoj estas para, en punkto P estos mallumo, ĉirkaŭ ĝi helaj, malhelaj ringoj.** Se oni ŝanĝos la lokon de la diafragma, kaj la truan trapasas radioj el senparaj zonoj, en P estos hela rondsurfaco, ĉirkaŭ ĝi malhelaj, kaj helaj ringoj. **Se la lumo estas blanka, la helaj ringoj estos koloraj.**

6.22 Difrakto per rekta, mallarĝa breĉo

Se oni metos inter lumfonton kaj ekranon ebenan, netravideblan folion, sur kiu estas mallarĝa, travidebla breĉo, kaj la lumfonto estas unukolora, oni vidos sur la ekrano paralelajn, rektajn, brilajn kaj mallumajn striojn. Se la lumo estas blanka, tiam oni vidos spektrokolorajn striojn.

B 6-7

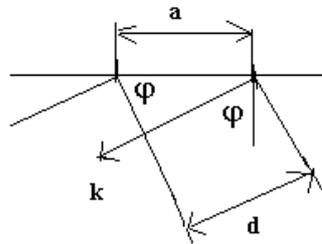


La larĝo de la breĉo estas „a”. Tiun trafos ebena ondo. En la breĉo ĉiuj punktoj estas fonto de novaj ebenaj ondoj. Ties distanco unu de la alia estas $\lambda/2$. (λ estas la ondolongo de la lumo.) La ebenaj ondoj estas paralelaj. Je ili la direkto „k” de la observado estas orta. Al tiu apartenas angulo φ . La efiko de la interfero aperas en la infinito, sed per lenso la bildo estas aperigebla sur ekrano, kiu estas en la fokuso. La direkto de la kolektitaj radioj estas „k”. La nombro de la ondozonoj observeblaj, dependas de direkto „k”. Al la distancoj $\lambda/2$ apartenas tempoj $t/2$. Do la fazoj inter la najbaraj ondofrontoj estas inversa. El tio sekvas, se „k” estas tia, ke la nombro de la ondofrontoj, kiuj apartenas al ĝi estas paraj, ili reciproke estingas unu la alian. Do en tiu ĉi direkto „k” estas malluma strio. Se oni ŝanĝas direkton „k”, oni trovos lokojn, kie la nombro estas nepara, en tiuj kazoj la strio estas videbla. (ĝi ne havas neniigan paron.) Por direktoj „k”, kie aperas videbla strio, validas la for mulo

F 6.4
$$d = (2m+1) \cdot \lambda/2 \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2m+1) \text{ montras la senparecon}$$

$$d = a \cdot \sin \varphi$$

B 6.8

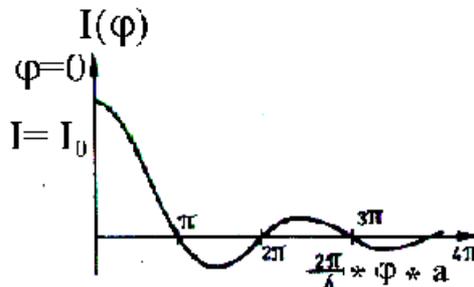


Sekve la interferantaj ondoj fortigas unu la alian en tiuj direktoj, kie. $a \cdot \sin \varphi = (2m+1) \cdot \lambda/2$

F 6.5
$$\sin \varphi = (2m+1) \cdot \lambda / (2a)$$

Tio estas valida en ambaŭ flanko de la strio (do meze $=0$) se $\varphi=0$, la breĉon trafas ebena ondo, kies ĉiu punkto vibras en la sama fazo, do la ondoj plifortigas unu la alian. (φ estas orta je la ebena ondo, $\sin \varphi = \sin 90 = 1$). Ĉar la devojiĝo estas simetria, la mezaj du strioj sur la ekrano situas strikte unu apud la alia. Tial meze estas larĝa, brila lumstrio.

B 6.9

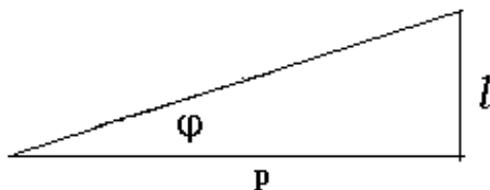


F 6.6
$$I(\varphi)/I_0 = \left[\frac{\sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \varphi \cdot a \right)}{\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \varphi \cdot a \right)} \right]^2$$

La larĝo de la meza brila strio estas kalkulebla el la ekvacio:

$$d = a \cdot \sin \varphi. \quad \text{Se } \varphi \text{ estas malgranda } (< 10^\circ), \sin \varphi \approx \varphi \text{ [rad]}$$

$$(\sin \varphi = 0.174 = 0.175 \text{ [rad.]})$$

B 6.10

F 6.7 $\varphi = \lambda/a$ Se la distanco inter la ekrano kaj breĉo estas "p", la larĝo de la meza brila strio estas: l Ĉar meze la brila strio estas duobla, ĝi estas $2 \cdot l$.

F 6.8 $l = p \cdot \text{tg } \varphi$

La intenso de la lumstrioj sur la ekrano estas simetriaĵoj je la meza plej forta strio. La proporcio inter la intenso de la linioj estas proksimume jena: Meza: 100%, la unuaj ambaŭflankaj maksimumoj 4.5%, la duaj: 1.6%, la triaj 0.9% ... La intenso en mallumaj lokoj estas 0.

B 6.11

Se la uzata lumo estas blanka, en ĉiu ambaŭflanka strio estas plena spektro. Ĉiam la viola koloro estas la komenca, rigardate el la mezo.

Nun oni kalkulos kiamaniere la devojiĝo de la radioj dependas de la larĝo de la breĉo.

E 6.1 Estu la breĉolarĝeco $d=0.01$ mm. La ondolongo $\lambda = 555$ nm. Oni kalkulu la devojiĝan angulon de la meza, hela strio:

$$\varphi = \pm \lambda / d = \pm 0.000555/0.01 = \pm 0.0555 \text{ rad} = \pm 3.18^\circ$$

Se oni projekcias la difraktan bildon sur ekranon, kies distanco estas 50 mm, la larĝo de la meza hela strio estas: $l = 50 \cdot \text{tg } 3.18 \cdot 2 = 5.56$ mm

E 6.2 Iuj fotistoj opinias, ke uzado de mallarĝa diafragmo-aperturo kaŭzas malakran bildon pro la difrakto. Nun oni faru aproksiman kalkuladon, ĉu ili pravas? Oni kalkulu, imagante, ke la longa latero de la diafragmo estus ne cirklo sed kvarangulo, kun la larĝo de la diafragmo. Estu la relativa aperturo de la lenso 1:16, kaj la fokusdistanco 50 mm. Tiam la diametro de la diafragmo estos: ($r=d/f$; $d=r \cdot f=50 \cdot 1/16=3.125$ mm) el la formulo E 6.1 $\varphi = \pm \lambda/d = \pm 0.000555/3.125 = \pm 0.000176 \text{ rad.} = \pm 0.000176 \cdot 57.32 = 0.01$ gradoj. La filmdistanco de la lenso estas preskaŭ 50 mm, la larĝo de a meza hela strio estas $50 \cdot 0.000176 \cdot 2 = 0.0352$ mm. Estas videble, ke la hela strio estas tiom mallarĝa, ke ĝi ne povas malakrigi la bildon.

El la formulo F 6.7 estas videble, ke φ , la angulo de la devojiĝo estas rekte proporcia al la ondolongo. Do, la longondaj ruĝaj lumradioj pli forte devojiĝas ol la violkoloraj. La situacio estas inversa ol kio okazas ĉe prismoj.

E 6.3 Oni kalkulu kiom larĝa estos la meza brila strio, se la breĉo estas 0.1 mm. Unue oni prilumos ĝin per viola, ondolongo 460 nm lumo, poste per ruĝa, ondolongo 660 nm lumo.

Viola: $\varphi = \lambda/a = 460 \cdot 10^{-9} / 10^{-4} = 460 \cdot 10^{-5} \text{ rad.} = 4.63 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$ Aproximante, -ĉar la angulo estas tre malgranda, oni rajtas uzi anstataŭ sinuso mem la gradon en radiano. La ekrandistanco estas 0.2 m. La larĝo (l) de la meza hela strio estos:

$$l = 460 \cdot 10^{-5} \cdot 0.2 \cdot 2 = 1.84 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1.84 \text{ mm.}$$

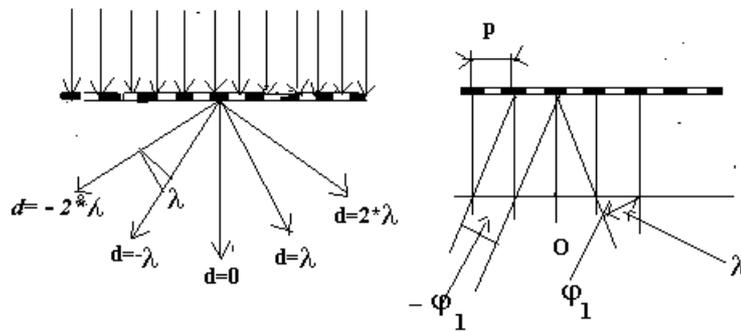
Ruĝa: $\varphi = \lambda/a = 660 \cdot 10^{-9} / 10^{-4} = 660 \cdot 10^{-5} \text{ rad.}$

$$l = 660 \cdot 10^{-5} \cdot 0.2 \cdot 2 = 2.64 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2.64 \text{ mm}$$

6.2 La optika krado

Se oni lokigas unu apud la aliajn travideblajn aŭ reflektivajn mallarĝajn striojn, estiĝas optika krado. La strioj devas regule, periode sekvi unu la alian.

B 6.12



El la travideblaj lokoj foriras ondoj kun sama fazo kaj amplitudo. Ili interferas, kaj estiĝas lummaksimumoj en tiuj direktoj, kie la elementaj ondoj plifortigas unu la alian; kie inter la najbaroj la vojlondiferenco estas 0, 2, ... m

$$\varphi = 0 \quad \sin \varphi_1 = \lambda/p \quad \sin \varphi_{-1} = -\lambda/p$$

$$\sin \varphi_2 = 2 \cdot \lambda/p \quad \sin \varphi_{-2} = -2 \cdot \lambda/p$$

$$\sin \varphi_3 = 3 \cdot \lambda/p \quad \sin \varphi_{-3} = -3 \cdot \lambda/p$$

$$\sin \varphi_m = m \cdot \lambda/p \quad \sin \varphi_{-m} = -m \cdot \lambda/p$$

$$m = 1, 2, 3, \dots \quad -1, -2, -3, \dots$$

Se la prilumado estas blanka, la strioj 1, 2, 3, ktp estas apartaj, malgrandaj spektroj. Tial m estas la ordonumero de la spektro. En ĉiu spektroordo plej forte estas devojigita la ruĝa koloro. En ĉiu spektro la sinuso de la angulo de la devojigo estas rekte proporcia al la ondolongo. (Male, se la devojigo okazas per prismo, la devojigon influas ankaŭ tio, ke la refraktivo estas malsama por diversaj koloroj.)

La maksimumoj estas ju pli akraj, des pli granda estas la nombro de la strioj. Se la nombro estas sufiĉe granda, kaj la distanco inter la strioj estas malgranda, estiĝas preskaŭ nur maksimumoj.

Sur moderna optika krado en ĉiu milimetro troviĝas 570 strioj, kaj la longo de la krado estas 80 mm. Do, sume ekzistas $570 \cdot 80 = 45600$ strioj. Tiu nombro kontentigas la menciitan kondiĉon.

E 6.4 Oni kalkulu la larĝon de diversgradaj spektroj. $p = l/n$, n estas la nombro de la travideblaj kaj netravideblaj strioj en distanco 1mm. Estu $n=570$. $p=1/570$.

Oni rigardu la devojiĝon de violkoloraj radioj:

$$\lambda = 400 \text{ nm}; \sin \varphi_1 = \lambda/p = 0.00078 \cdot 570 = 0.228 \quad \varphi_1 = 13.18^\circ$$

Oni rigardu la devojiĝon de la ruĝkoloraj radioj.

$$\lambda = 780 \text{ nm} \quad \sin \varphi_1 = \lambda/p = 0.00078 \cdot 570 = 0.446 \quad \varphi_1 =$$

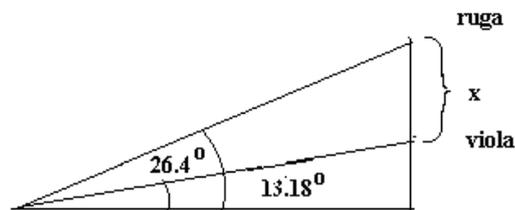
26.4°

La diferenco inter la devojiĝo de la ruĝa kaj viola koloroj:

$$26.4^\circ - 13.18^\circ = 13.22^\circ.$$

Se oni projekcias la striojn sur ekranon kies distanco de la krado estas 500mm: $x = 500 \cdot (\tan 26.4 - \tan 13.8) = 131.1 \text{ mm}$.

B 6.13



Oni kalkulu tion ankaŭ por la duagrada spektro: $\sin \varphi_2 = 2 \cdot \lambda/p$

Por violkoloraj radioj: $\lambda = 0.0004 \text{ nm}$, $\sin \varphi_2 = 2 \cdot 0.0004 \cdot 570 = 0.456$
 $\varphi_2 = 27.13^\circ$

Por ruĝkoloraj radioj: $\lambda = 0.00078 \text{ nm}$, $\sin \varphi_2 = 2 \cdot 0.00078 \cdot 570 = 0.8892$
 $\varphi_2 = 62.77^\circ$

La diferenco: $62.77 - 27.13 = 35.64^\circ$ $x = 715.45 \text{ mm}$

6.3.1 La diferenciga povo de optika krado

Jen la demando: kiom estas la plej malgranda ondolongo-diferenco kiun la krado povas distingi? Estu λ_1 kaj λ_2 ondolongoj de du ondoj, por kiuj m -grada spektro la direkto de la maksimumo de λ_1 samas kun la direkto de la minimumo de λ_2 . En tiu ĉi kazo, ilia difraktita bildo estas diferenciga. Tial Rayleigh difinis la disperso-kapablon jene: $\lambda/\delta\lambda$ kie $\delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$. La m -grada maksimumo por λ_1 estas en la sama loko, kie la m -grada minimumo por λ_2 estas.

F 6.9 $\delta\lambda/\lambda = l/(m \cdot n)$

n estas la plena nombro de la strioj sur la krado, m estas la vicnumero, kaj l estas la larĝo de la krado. La diferenciga povo de la krado: $D = \delta\varphi/\delta\lambda = m/p \cdot \cos\varphi$

El tiu ĉi estas deduktebla:

F 6.10 $r = D \cdot a$, kie a estas la larĝo de la lumfasko, kiu en φ direkto trapasas la kradon.

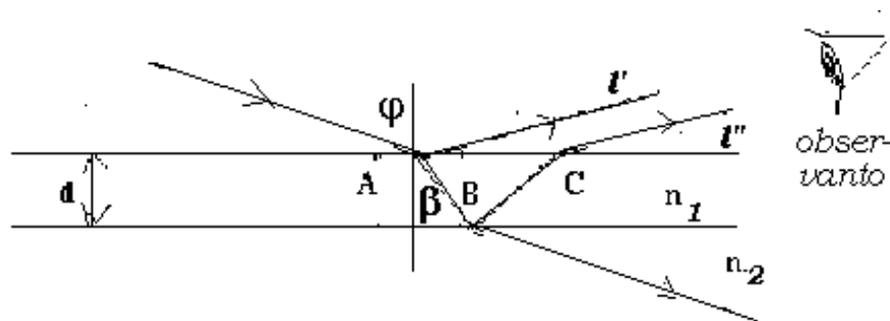
6.4 Fenomenoj fare de disperso kaj interfero

6.41 Interfero per maldikaj tavoloj

n la nin ĉirkaŭanta viva kaj senviva mondo tre ofte oni vidas kolorojn, kiujn estigas interfero, kaŭzita de maldikaj tavoloj. Pensu pri la brilantaj koloroj de **sapoveziko**, de maldikaj tavoloj de **oleomakuloj** sur akvosurfaco, pri koloroj de certaj floroj, de certaj skarabeoj, papilioj, de certaj plumoj de birdoj, kaj pri koloroj de **metalsurfacoj**, kiujn kaŭzas maldikaj, diversaj oksid tavoloj.

Tial estas inde iom detale trakti la estiĝon de tiaspeca interfero.

B 6-14



Lumradioj pasas en aero, poste ili trafas surfacon en punkto A. Ĝi estas maldika, d larĝa, travidebla tavolo kies efraktivo estas n_1 . Parto el ili tuj reflektiĝas (l'). Granda parto refraktiĝas, kaj pasas al punkto B. Tie parto reflektiĝas (l''), kaj pasas al punkto C, alia parto pasas en tavolon, kies refraktivo estas n_2 . Se $n_2 > n_1$ okazos π fazoŝanĝiĝo, al kiu apartenas $\lambda/2$ plilongiĝo de vojo. El punkto C la radio l'' pasas en aeron, ĝia direkto estas paralela kun l' . **Inter la du radioj estas optika vojlongdiferenco, kiu dependas de d, kaj de n_1 kaj n_2 .** La radioj estas koheraj, tial **estiĝas interfero**, kiu aperas sur ekrano, se ĝi estas en la fokuso de lenso, aŭ okule oni povos vidi ĝin, se la okulo estas akomodita al infinito. Nature okaze de larĝa lumfasko la intenso de la efiko estos pli forta. Se la lumradioj l' kaj l'' renkontiĝas en la **sama fazo**, pro la interfero ilia **amplitudo grandiĝas**. Se temas pri unukolora lumo, oni trovos helajn kaj malhelajn lokojn, depende de d. Se la **lumradioj estas blankaj**, kiu estas miksaĵo de spektraj koloroj; ĉar por diversaj koloroj n estas diversa, la fortigo aŭ estingo por alia koloro okazas depende de d. Tial **oni vidas diversajn kolorojn** se ŝanĝiĝas la direkto de la observado.

Do, **la kondiĉo de la fortigo estas, ke la radioj renkontiĝu en la sama fazo.** Tiam validas la ekvacio:

$$\text{F 6.11} \quad AB + BC + \lambda/2 = 2 \cdot k \cdot \lambda/2 \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

(Se oni volas pli precize kalkuli, la distancojn AB BC devas multoblige ilin per n_1 .)

$$d = AB \cdot \cos \beta = BC \cdot \cos \beta \quad AB = BC = d / \cos \beta$$

Tiam oni povas skribi ekvacion F.6.11 en la formo:

$$2 \cdot d / \cos \beta + \lambda/2 = 2 \cdot k \cdot \lambda/2 \quad ; \quad 2 \cdot d / \cos \beta = 2 \cdot k \cdot (\lambda/2) - \lambda/2 = (\lambda/2) \cdot 2 \cdot k - 1 \quad \text{el tio d egalas:}$$

$$\text{F 6.12} \quad d = (\lambda/4) \cdot \cos \beta \cdot (2 \cdot k - 1)$$

F 6.13 $d = (\lambda/2) * \cos\beta * (k-1)$; la radioj estingas unu la alian.

(Se la lumo estas blanka, en ĉiu loko forestas nur unu koloro, la ceteraj lumas, pro kio, pro la interfero oni vidas belan buntan ludon de koloroj.)

E 6.5 Kalkulu dikecon **d de oleotavolo**, kiun trafas lum radio unukolora, $\lambda=527$ nm, kun 45 grada trfangulo, se okazas plifortigo. La refraktivo de la oleo estas $1.515 = \sin 45/\sin \beta$. $\sin \varphi/n = \sin 45/1.515 = 0.468$; $\beta = 27.9^\circ$. Por unuagrada interfero $k=1$; laŭ la formulo F 6.12 la dikeco de la tavolo estas $d_1 = (\lambda/4) * \cos \beta = (527/4) * \cos 27.9 = 116$ nm. Laŭ similaj kalkuloj, se $k=2$ tiam $d_2=348$ nm. Se $k = 3$, $d_3=580$ nm.

Nun oni kalkulu kiuj estas la dikecoj, se okazas estingo? Laŭ la formulo F 6.13, se $k=1$, $d=0$, tio ne havas sencon. Se $k=2$; $d_2=(2-1)*(527/2)*\cos 27.9 = 232$ nm. $K=3$; **lumradio se ofte trafas vitrosurfacon, el la radio proksimume 4% reflektiĝas.** Se temas pri plurmembraj optikaj lensosistemoj, tiuj 4% oj adiciiĝas, kaj la lumintenso signife malgrandiĝas. **La reflektiĝon oni povas forte redukti per specialaj maldikaj „T” tavoloj**, kiuj kovras la lensosurfacojn.

Rigardu tiun aferon pli detale:

La amplitudo de la reflektita lumo, se la trafangulo estas orto, kaj la refraktivo de la vitro estas $n=1.516$

F 6.14 $A_0 = (n-1)/(n+1) = 0.516/2.516 = 0.2051$

La intenso egalas $A^2_0 = 0.042$, do 4.2%.

La kondiĉo de la redukto de la reflektito, ke la reflektita lumo, kiu venas de sur la surfaco de la tavolo, kaj kiu venas el la vitrosurfaco (tra la tavolo) **renkontiĝu en inversa fazo, kaj ilia amplitudo estu egala.**

F 6.15 $n*d = \lambda/4$

estas la kondiĉo de la inversa fazo, kie n estas la refraktivo de la „T”- tavolo, d estas ties dikeco. $\lambda=555$ nm, ĉar tie estas maksimumo de la kurbo de la vido ($V\lambda$) La fazoŝanĝo en ambaŭ kazo estas π , ĉar la refraktivoj de „T” tavolo kaj de la vitro >1 .

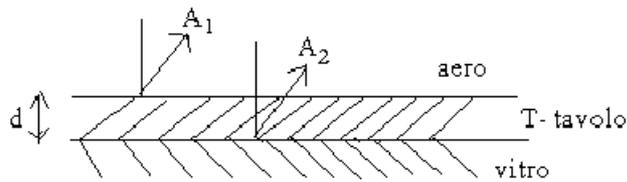
La kondiĉo de la egala amplitudo $1/n = n/n_v$, kie n estas la refraktivo de „T”- tavolo, n_v la refraktivo de la vitro estu >1 .

F 6.16 $n^2 = n_v$; $n = \sqrt{n_v}$

Tio sekvas el la formulo 6.14 la radiko de $1.516=1.23$, estas tro malgranda, ja la refraktivo de la akvo estas 1.33, do **konvena solida materialo por „T” tavolo ne ekzistas.** Kiel kompromiso, ĝenerale estas uzata magnezio fluorido (MgF_2) kies meza refraktivo estas 1.38, kaj $Al F_3$ kies refraktivo estas 1.36.

E 6.6 Rigardu tiun lastan!

B 6-15



Laŭ F 6.15 $n \cdot d = \lambda/4$; $d = \lambda/(4 \cdot n) = 555/(4 \cdot 1.36) = 102 \text{ nm}$

$$A_1 = (n-1)/(n+1) = 0.36/2.36 = 0.1525$$

$A_2 = (n_v - n)/(n_v + n) = 1.56/2.876 = 0.0542$ Ĉar $A_1 \neq A_2$ plena estingo ne okazas, nur redukto. La amplitudo de la reflektita lumo $A = A_1 - A_2 = 0.0983$. La energio estas $A = 0.00966$, proksimume 1% kiu kompare al la originala 4.2% jam estas signifa reduktiĝo. Se en optika **lensosistemo estas pluraj lensoj**, la **restanta lumenergio** post la reflektiĝoj estas **kalkulebla** per la **formulo**:

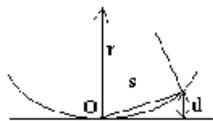
F 6.17 $100 \cdot (1-p/100)^k$ %, kie p estas la perdo sur unu surfaco, k estas la nombro de la surfacoj.

6 42 Interfero en mallarĝaj aero-tavoloj

Se inter travideblaj surfacoj estas maldika aertavolo, **la trapasanta lumo faras interferon**. Ekz. Se oni metas diapozitivan filmon inter vitro-plataĵojn, ofte vidas kolorajn striojn, kurbojn. Interfero kaŭzas ilin. Tiun fenomenon foruzas lensofaristoj: Per precizegaj negativaj ŝablonoj ili kontrolas la surfacon de la enmetita farata lenso. Se ilia surfaco ne kongruas, aperas interfero-ringo.

Unue **Newton** konstatis similan fenomenon, kiam **grandan radiusan lenson metis sur ebenan vitroplataĵon**. Li **vidis ringojn, -helajn, malhelajn** ĉirkaŭ la centro. La fenomenon li ne povis klarigi, ja li opiniis, ke la lumo konsistas el korpuskloj, sed la **radiusojn de la ringoj li mezuris**. Estis konstatite; ĉe helaj ringoj la dikeco de la aertavolo varias laŭ la senparaj nombroj, ĉe malhelaj ringoj, de la paraj nombroj.

B 6-16



Laŭ la formulo de Pitagoro: $(r-d)^2 + s^2 = r^2$, $r^2 - 2 \cdot d \cdot r + d^2 + s^2 = r^2$. Ĉar d^2 estas tre malgranda, ĝi estas neglektebla. $2 \cdot r \cdot d = s^2$ $d = s^2 / (2 \cdot r)$

Laŭ F 6.11 $2 \cdot d + (\lambda/2) = 2 \cdot k \cdot (\lambda/2)$; $d = (2 \cdot k - 1) \cdot \lambda/4$ $k = 1, 2, 3, \dots$

La aero-larĝoj, kiuj apartenas al la helaj ringoj: $\lambda/4, 3 \cdot \lambda/4, 5 \cdot \lambda/4, \dots$

Malhelaj ringoj estiĝas, se: $2 \cdot d + (\lambda/2) = (2 \cdot n + 1) \cdot (\lambda/2)$ $d = (k-1) \cdot \lambda/2 = 2 \cdot (k-1) \cdot \lambda/4$

La aertavoloj, apartenantaj al malhelaj ringoj: $0, 2 \cdot \lambda/4, 4 \cdot \lambda/4, 6 \cdot \lambda/4, \dots$

Se la lumo estas unukolora, estiĝas helaj-malhelaj ringoj, se la lumo estas blanka, estiĝas koloraj ringoj.

E 6.7 Kalkulu la larĝon (d) de aerotavoloj kaj la radiusojn (s) de la ringoj, se $\lambda = 588$, la radiuso de la lenso (r) estas 30 m. Al la helaj ringoj apartenas:

Ĉe la unua ringo $d_1 = (2-1) * 588 / 4 = 147$ nm.

$$s_1 = (2 * r * d_1)^{0.5} = (2 * 30 * 147 * 10^{-9})^{0.5} * 10^{-3} * (8.82)^{0.5} = 2.9 \text{ mm}$$

Ĉe la dua ringo: $d_2 = 441$ nm ; $s_2 = 5.15$ mm

Ĉe la tria ringo: $d_3 = 735$ nm ; $s_3 = 6.46$ mm

Al la malhelaj ringoj apartenas:

Ĉe la unua ringo: $d_1 = 2 * (1-1) * 588 / 4 = 0$.

Ĉe la dua ringo $d_2 = 294$ nm; $s_2 = 4.18$ nm.

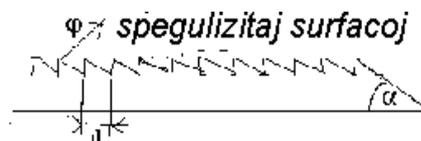
Ĉe la tria ringo: $d_3 = 588$ nm; $s_3 = 5.93$ mm

6.4.3 Optikaj iloj bazitaj je interfero

Jam detale ni traktis la optikajn kradojn. La blankan lumon ĝi dispartigas je spektrokoloroj. Tial ĝi estas uzata en spektroskopoj, spektrografoj. Komence la optikaj kradoj estis faritaj el plataj, poluritaj vitropecoj, sur kies surfaco estis gravuritaj tre dense paralelaj strioj per diamanto. La lumo povas trapasadi nur inter la strioj.

En modernaj spektroskopoj oni uzas reflektajn kradojn. Ili konsistas el tre mallarĝaj spegulo-bendoj, kiuj estas lokitaj simile al dentoj de segilo.

B 6-17



Grandan intenson havas en la spektro la linio, je kiu validas la sekvaj formuloj:

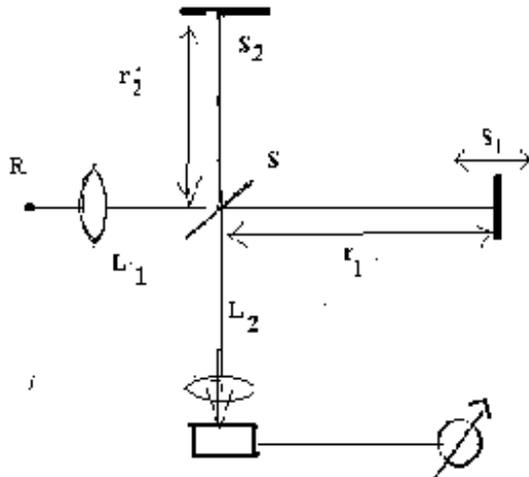
$$\mathbf{F\ 6.12} \quad \lambda = d * \sin\varphi ; \quad \varphi = 2 * \alpha$$

La fenomenon de interfero oni uzas en **interferometroj**. La plej konata estas la **interferometro de Michelson**.

R: unukolora lumfonto, L_1 : lenso por paraleligi la radiojn, S duontravidebla spegulo (45°), S_1 spegulo paralele movebla, S_2 spegulo, fikse lokita, r_1 mezurenda distanco, r_2 konata distanco,

L_2 lenso por kolekti paralelajn lumradiojn.

B 6-18

**La funkciado:**

Lenso L_1 paraleligas la unukolorajn lumradiojn. Tiamniere estiĝas ebenaj ondoj. S duone traridebla spegulo duonigas ilin. Unu parto reflektiĝas kaj pasas al spegulo S_2 . Oni mezuras r_1 kaj r_2 distancojn de trafpunkto sur la supra spegula surfaco de S spegulo. (Ĝi estas farita el tre maldika metaltavolo (arĝento aŭ alumino) kies larĝo estas tia, ke ĝi reflektu precize tiom da lumo kiom ĝi tralastas, se la trafangulo estas 45° .)

La vojlongo, kiun la du vojradioj trapasas apartigite: $2 \cdot r_1$ kaj $2 \cdot r_2$.

La vojlongdiferenco inter ili: $x = 2 \cdot (r_2 - r_1)$. Ĉar al unu ondolonga vojlongdiferenco apartenas $2 \cdot \pi$ radiana fazodiferenco, tio por x longo estas:

$$\delta = \varphi_2 - \varphi_1 = (2 \cdot \pi / \lambda) \cdot x$$

En punkto C oni povas mezuri la intenson, kiu estas sumo de la intenco de la lumradioj r_1 kaj r_2 .

Ĉar la intenco egalas al la kvadrato de la amplitudo,

$$I = A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \cos 2 \cdot \pi \cdot x / \lambda$$

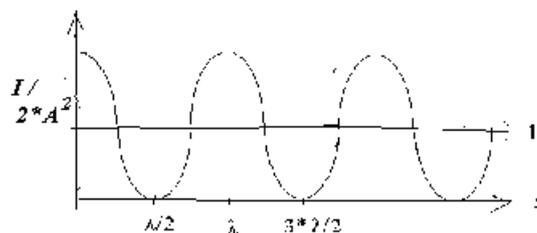
Se spegulo S perfekte duonigas la lumon, $A_1 = A_2$, do

$$\mathbf{F\ 6.13} \quad I = 2 \cdot A^2 \cdot (1 + \cos 2 \cdot \pi \cdot x / \lambda)$$

Se oni delikate ŝanĝas la lokon de S_1 , ŝanĝiĝas ankaŭ x .

En la funkcio de distanco x , $I/2 \cdot A^2$ ŝanĝiĝas laŭ kosinus funkcio.

B 6.19



Se oni konas r_2 -valoron, distanco x estas mezurebla per precizeco de ondolonga distanco. Se $r_1 = r_2$ la ondolongo de la uzata lumo estas tre precize mezurebla. (Ekz. la diferenco inter la du linioj de la natria spektro tiamaniere estas mezurita $0.0005967 \mu\text{m}$.)

Foruzante la precizan mezureblecon **Michelson mezuris la lumrapidon laŭ la turniĝo de tero ĉirkaŭ la suno, poste ofte je tiu ĉi direkto** per konata ondolonga lumo kaj precize mezuritaj distancoj r_1 , r_2 . **La lumrapido estis precize a same en ambaŭ kazoj.**

Tiu ĉi rezulton Einstein uzis en la relativec-teorio kiel bazan konstaton. Nome: la lumrapido estas en la naturo ne superebla. Longe diskutita problemo estis, ĉu etero ekzistas aŭ ne. Se etero ekzistus, kontraŭ etero la lumrapido devus esti malpli granda ol inverse. Laŭ la mezuro de Michelson diferenco ne ekzistas, tial **eĉ dubantoj devis akcepti la ne ekziston de etero.** La lumrapido estas la plej granda rapido, kaj sendependa de la movo de la lumfonto rilate al la observanto.

Similaj interferometroj estis konstruitaj por la plej diversaj celoj. Ekz. por mezuri tre malgrandajn distancojn, distanco- ŝanĝojn. Grava apliko estas la mezuro de la refraktivo de maldensaj materialoj, ekz. tiu de gasoj.

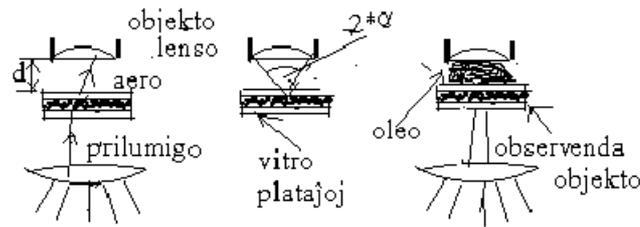
6 44 La rolo de difrakto en mikroskopoj kaj en teleskopoj

La kalkulmetodo de geometria optiko nur alproksimas la realon. Precize kalkuli se oni volas, la **difrakton nepre devas konsideri.** Ekz. laŭ la geometria optiko la grandigo de mikroskopo ne havas supran limon. En la realo, pro la difrakto ekzistas limo.

Abbe faris precizajn kalkulojn kaj ekzamenojn, kaj konstatis, ke la estiĝo de bildo estas klarigebla per la difrakto. Per mikroskopo li ekzamenis malgrandajn objektojn, kies dimensio estis konata. (Ekz. optikajn kradojn.) La dimensio jam estis proksime al la lumondolongo, tial estiĝis difrakto. La meza lumfasko rekte atingis la mikroskopan lensosistemon. Sed inter la difraktitaj radioj kaj la optika akso jam ekzistis α angulo. Li konstatis, ke la mikroskopa bildo estas simila al la originala, se **almenaŭ la unuagradaj devojigitaj radioj povas pasi en la mikroskopon:** Se plenumiĝas la „sinus-kondiĉo” de Abbe:

F 6.14 $d = \lambda/n \cdot \sin\alpha = \lambda/A$ La nomo de A estas **numera aperturo.**

La numera aperturo dependas de α , kiu dependas de la unua lensodiametro, kaj de **la grandigo la lensosistemo.** Sur la tubo de la objektiva lenso estas gravuritaj la grandigo kaj la numera aperturo. La grandigo de la ĉe objektivo lenso ĝenerale estas 6...100, la numera aperturo 0.17...1.9. Estas videble, ke la **grandigo estas ju pli granda, des pli malgranda estas d_1 , kaj la uzata ondolongo.** Tial oni ofte uzas **violkoloran lumon.** (la ondolongo kiu apartenas al korpuskloj estas tre malgranda, tial **elektronaj kaj protonaj mikroskopoj** povas realigi multe pli fortan grandigon, ol lum-mikroskopoj.)

B 6.20

La grandigon oni povas fortigi, se inter la vitroplataĵon, kiu kovras la objekton, kaj objekto-lenson metas **guton da speciala oleo**, kies refraktivo estas granda. Uzante normalan mikroskopon, **la supran limon de la grandigo limigas la numera aperturo**. Plua fortigo rezultigas nur „malplenan grandigon”. Tio signifas, ke novaj detaloj jam ne videbliĝas. Tamen **por perfektigi la bildon, ekzistas metodoj**. Ekzemple prilumado per flankdirekta lumo, aŭ uzado de polarigita lumo. Se oni uzas prilumadon tian, ke la fono restu nigra, estas perceptebla la ekzisto de tre malgrandaj objektoj. Simile, kiel en malluma ĉambro ĉiam estas videblaj tre malgrandaj ŝvebantaj polvoj en akra, mallarĝa lumfasko.

6.45 La efiko de lenso-kadroj

La disperso pro la rondformaj kadroj de lensoj **baras ankaŭ diferencigan kapablon de astronomiaj teleskopoj**. Foraj, malgrandaj steloj estas videblaj per teleskopoj ne kiel malgrandaj brilantaj punktoj, sed kiel brilantaj komun-centraj rondoj, inter ili nigraj ringoj. Du steloj ŝajnas esti apartaj, se la brilanta kerno de la dua estas almenaŭ en la unua nigra ringo de la unua.

B 6-21

Ties kondiĉo estas, ke la radiuso de la unua ringo estu

$$F \text{ 6.15 } R = 1.22 * \lambda * f / D$$

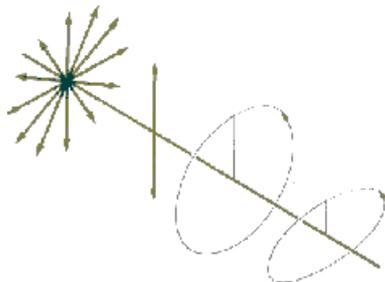
λ estas la ondolongo de la stellumo, f : la fokusdistanco de la teleskopo, D : la diametro de la unua lenso de la teleskopo. Estas interese, se la diametro de la unua teleskopa lenso estas granda, grandiĝas ne nur la lumintenso, sed ankaŭ la diferenciga kapablo.

7. La polara lumo**7.1 Normala lumo**

Jam estis traktita, ke la lumon estigas vibrado de elektre ŝargitaj korpuskloj. La ondo estas la propagiĝo de tiu ĉi vibrado. **La vektoroj de la elektraj kaj magnetaj kampoj**, kiuj propagiĝas en la ondo estas **ortaj je la direkto de la propagiĝo, kaj unu je la alia**. Oni jam menciis, ke la tempodaŭro de ondoemision de unuopa korpusklo estas proksimume $1 * 10^{-8}$. sek. Ties amplitudoj estas samdirektaj. Diversaj korpuskloj samtempe estigas vibradojn en la plej diversaj direktoj, tamen la

ondopropagiĝo estas samdirekta. Sed en je la propagiĝo orta direkta ebena, **la amplitudoj, havas la plej diversajn direktojn.**

B.7.1

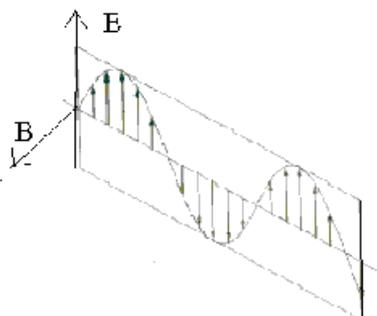


Tia estas la situacio **en normala, natura lumu.**

7.2 Polara lumu

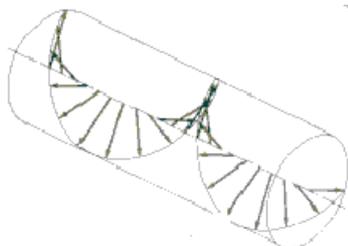
La lumu restas normala ĝis kiam ĝi propagiĝas en homogena medio. Sed la situacio ŝanĝiĝas, se **la lumu oblikve trafas ian materialon.** Tiam **la reflektita lumu jam estos pli-malpli polarigita.** Okazas polarigo ankaŭ tiam, se la lumu propagiĝas **en ne izotropa, travidebla materialo.** La **polarigiteco signifas, ke la amplitudo de la elektra kaj magneta kampoj restos ortaj unu je la alia kaj je la propagiĝo, sed iliaj direktoj situas ĉiam en la sama ebena.**

B 7-2



Se la surfaco de la polarigo estas ebena, la lumu estas **ebene polara.** Se la ebena lokiĝas ĉirkaŭ la propagiĝa direkto kiel spiralo, sed la grandeco de la amplitudoj estas samaj, temas pri **circle polara lumu.**

B 7-3



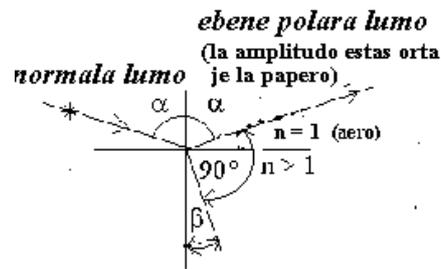
Tiam **la amplitudo-maksimumoj pasas laŭ spiral-linio** sur iu imagita cilindro. La vibro estas disdividebla je du komponantoj, kies amplitudo estas la sama, la fazo-diferenco inter ili estas $\pi/2$.

Elipse polara estas la lumo, se la situacio estas simila al la antaŭa, sed la imagita loko de la amplitudo-maksimumoj estas ne cirklo, sed **elipso-sekcio**. La fazo inter la komponantoj estas $\pi/2$, sed la amplitudoj estas diversaj.

La reflektita lumo estas ĉiam pli-malpli polara, ĉar la grandeco de la amplitudo de la reflektitaj ondoj dependas de la trafangulo.

Plene ebene polara reflektita lumo estiĝas, se la trafangulo egalas al la t.n. **Brewster-(buster) -angulo**. Tio dependas de la refraktivo n de la koncerna materialo.

B 7-4



F 7.1 $\operatorname{tg} \alpha_p = n$, α_p estas la angulo de la polarigo, n estas la refraktivo.

Laŭ alia koncepto la **reflektita lumo estas plene ebene polara**, se inter la la reflektita kaj refraktita radioj la angulo estas 90°

Se temas pri vitro, kies refraktivo estas $n=1.52$, la Brewster-angulo $\alpha_p=56^\circ$

Ne nur la reflektita, sed ankaŭ la trapasanta lumo estas polaraj.

La **maksimuma polara lumintenso en la reflektita parto estas kalkulebla per la jena formulo:**

$$\mathbf{F 7.2} \quad I_p = 0.5 * I_0 * [(n^2 - 1) / (n^2 + 1)]^2$$

I_0 estas la intenso de la originala normala lum; I_p estas la intenso de la polara lum.

Jen I_p/I_0 kalkulita per la supra formulo por kelkaj materialoj:

	I_p
akvo	3.8 %
vitro	7.5 %
optika vitro	10.6%
diamanto	24.5 %

La amplitudojn de la reflektita kaj refraktita polaraj lumoj prikalkulis Fresnel. A_1 estas la paralela, B_1 estas la orta komponantoj de la amplitudo de la trafanta lumo. A_2 , B_2 estas tiuj de la reflektita lumo, A_3 , B_3 estas tiuj de la refraktita lumo.

α =trafangulo =reflektangulo. β estas la angulo de la refraktita lumo. La formuloj de Fresnel:

$$\begin{aligned}
 \text{F 7.3} \quad A_2 &= A_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \beta) / \operatorname{tg}(\alpha + \beta) \\
 B_2 &= -B_1 \cdot \sin(\alpha - \beta) / \sin(\alpha + \beta) \\
 A_3 &= A_1 \cdot 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha / [\sin(\alpha + \beta) \cdot \cos(\alpha - \beta)] \\
 B_3 &= B_1 \cdot 2 \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha / \sin(\alpha + \beta)
 \end{aligned}$$

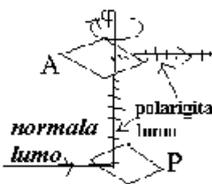
El tiuj formuloj estas deduktebla ankaŭ 7.1 formulo, kaj la 90 gradoj inter la reflektita kaj refraktita radioj okaze de plena polar

7.3 Polarigilo - analizo

Oni nomas polarigilo tiujn ilojn, **per kiuj normala lumo iĝas polara**. Kiel oni jam vidis, por tiu ĉi celo estas konvena ekz. **vitro**, se la trafangulo estas 56 gradoj. Sed ekzistas ankaŭ **aliaj eblecoj**, pri kiuj poste ankoraŭ oni parolos.

Analizilo estas la nomo de iloj, per kiuj oni povas **konstati, determini la polarigitecon de lumo**. Simpla vitropeco, estas uzebla kiel polarigilo, kaj ankaŭ kiel analizilo povas funkcii.

B 7-5

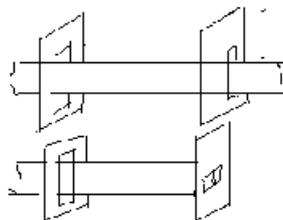


Jen la funkciado de tiu ĉi simpla instrumento: Vitrosurfacon P trafas normala lumradio. Se la trafangulo egalas al Brewster angulo, la reflektita lumo estas ebene polara. Tiu pasas al vitrosurfaco A. Se A estas paralela al P, la polara lumo reflektiĝas, ŝanĝas direkton, sed la polareco kaj la amplitudo restos senŝanĝa.

Se la lumradion, kiu reflektiĝas de sur surfaco P, oni imagas ĝin kiel akson, kaj ĉirkaŭ ĝi **oni turnas A surfacon 90 gradojn**, la **amplitudo de la reflektita lumo iĝos nulo**, do la lumo ĉesos. Ties **kaŭzo** estas, ke la **polariga direkto de P kaj A nun estas orta unu je la alia**.

Imagu du netravideblajn plataĵojn sur kiuj estas mallarĝa fendo. Se la fendoj estas paralelaj, oni povas traŝovi solidan metalbendon (kiu nun anstataŭas la polarigitan lumradion.)

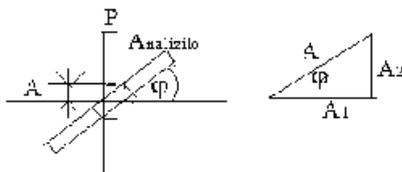
B 7-6



Se la reciproka direkto de la fendoj estas orta, la solidan rubandon oni ne povas taraŝovi. Nun oni imagu, ke la bendo estas lumradio, kaj la amplitudoj de la ondoj situas en la ebena de la bendo; kaj la afero estas komprenebla.

Tamen, **se temas pri polara lumo**, la afero estas ne tiel simpla. **Inter la du ekstremoj** (maksimuma kaj 0 amplitudoj), **estas traŭro**, al kiu apartenas diversaj intencoj inter nulo kaj la maksimumo. **Ties valoro dependas de la kosinuso de angulo**, laŭ la figuro, kiun oni rigardas el orta direkto.

B 7-7



La amplitudo de la polara lumo estas A, kiun oni povas dispartigi je **du komponantoj**. $A_1 = A \cdot \cos \varphi$, $A_2 = A \cdot \sin \varphi$. La ondo apartenanta al A tute ne povas trapasi An analizilon. La energio de la vibrado estas proporcia al la kvadrato de la amplitudo. **La intenco, kiu trapasas la analizilon estas I_o**

$$I_o = k \cdot A^2 \quad A_1 = A \cdot \cos \varphi \quad I = A_1^2 \cdot \cos^2 \varphi$$

F 7.4 $I = I_o \cdot \cos^2 \varphi$ Tiu ĉi formulon deduktis **Malus**.

7.4 Polarigo per optike ne izotropaj materialoj

Bartholin (1669) rimarkis, ke la **islanda kalcitkristalo** (CaCO_3) **videbligas unu malgrandan objekton du**, se oni rigardas ĝin tra tiu kristalo. Tio estis la unua observo pri polara lumo.

La **optikaj ecoj de kristaloj** dependas ĉefe de la anguloj inter ĝiaj facetoj. Ekzistas linioj, laŭ kiuj la **radio trapasas sen disiĝo**. Tiuj estas la **optikaj aksoj** de la kristalo. Ĉiu kristalo havas multnombrajn paralelajn optikajn aksojn. Al ĉiu punkto de la kristalo povas aparteni optika akso. Iliaj direktoj estas difinitaj. Povas esti maksimume du tiaj direktoj. **Ekzistas unu kaj duaksaj kristaloj**.

Se lumradio trafas kalcitkristalon, en kiu ekzistas por unu ondolonga lumo du refraktivoj, la trapasanta radio disiĝas. Ili ambaŭ estas ebene polaraj, kaj la direkto unu je la alia estas orta. La vektora sumo de la du amplitudoj estas egala al la amplitudo de la originalo.

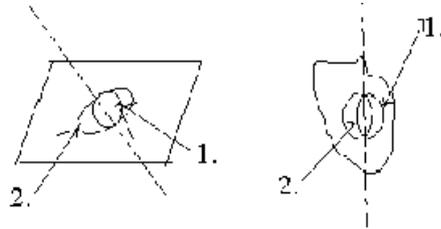
La rapido de la du radioj estas diversa. Unu pasas laŭ la formulo de Descartes; oni nomas ĝin **ordinara radio**. Ĝia rapido estas v_0 . La rapido de la alia radio v dependas de la direkto. Ĝia nomo estas **eksterordinara radio**. La rapido de la eksterordinara radio, se ĝi pasas laŭ optika akso, estas egala al la rapido de la ordinara radio. Se la angulo grandiĝas inter la optika akso kaj lumradio, la rapido de la lumo grandiĝas. Tiu estos la plej granda, se la angulo estas 90 gradoj. **Se $V > V_0$** , oni nomas la kristalon **negativa kristalo**.

Se oni imagas, ke el la centro de tiaspeca kristalo ekiras ordinara radioj en ĉiu direkto, kaj post la paso de tre mallonga tempo oni samtempe mezurus la distancojn kiujn la

radioj atingis, ili lokiĝas sur sferosurfaco. La distancoj ĉe eksterordinaraj radioj formas elipsoidan surfacon.

Sed ekzistas kristaloj, ekz. kvarco, kie la situacio estas inversa: $V < V_0$. **Tiujn oni nomas pozitivaj.**

B 7-8



1. Ordinara, 2. Eksterordinara radio.

Se la kristalo estas pozitiva; la refraktivo estas n eksterordinara $\geq n$ ordinara. Se la kristalo estas negativa; n eksterordinara $\leq n$ ordinara. La **menciitaj** aferoj estas bone **klarigeblaj kaj kalkuleblaj** per la metodoj de **ondooptiko**.

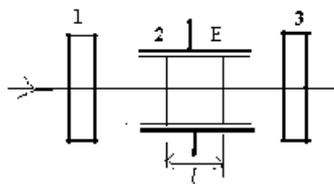
Materialoj fariĝas neizotropaj ankaŭ je elektraj kaj mekanikaj efikoj.

Se oni metas certajn materialojn en fortan elektran kampon, ili iĝas neizotropaj, kaj ŝanĝas la trapason de la polara lumo. Tiun efikon malkovris **Kerr** en 1875. Per tiu ekkono li konstruis la **Ketrr-ĉelon**. alia. Se la direkto de la elektra kampo egalas al la direkto de la lumradio, okazas nenio. Sed se la elektra kampo estas orta je la direkto de la lumradio, en certaj materialoj ekestas fazodiferenco inter la ordinara kaj eksterordinaraj radioj. Ties valoro estas:

$$\text{F 7.5} \quad \Delta\varphi = 2\pi B l E^2$$

E: elektra kampintenso, B: Kerr-konstanto, l : vojlongo en la materialo.

B 7-9



1: polarigilo, 2: Kerr-ĉelo, 3: analizilo.

La **Kerr-ĉelo** estas ebena kapacitilo. Inter la elektrodoj la distanco estas malgranda. Tie estas materialoj, ekz. vitro, olivo-oleo, nitrobenzolo, k.a. Se E elektra kampintenso estas nulo, la lumo sen ŝanĝo povas trapasi. Se E estas sufiĉe granda (kelkaj KV-oj) la lumtrapaso tuj ĉesos. Tio estas seninercia, tial la ĉelo estas uzebla, kiel **rapidega lum-ŝaltilo**. Oni uzas ĝin fari voĉ-bendon sur la rando de kinofilmoj. La Kerr-ĉelo ebligis la mezuron de lumrapido en mallonga diustanco.

Per polara lumo **oni esploras mekanikajn streĉojn** en vitroobjektoj, kiuj estiĝas, se post la fando la malvarmigo estis ne homogena kaj rapida. Sed oni faras modelojn pri

komplikaj objektoj; konstruelementoj, kiuj dum la uzado estas ŝarĝataj. Tiuj travideblaj plasto-modeloj estas ŝarĝataj proporcie al la realo, kaj per polara lumo oni esploras la lokojn kaj grandojn de la mekanikaj streĉoj.

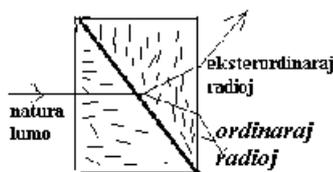
Polarigilo kaj analizilo estas fareblaj el duobligaj kristaloj. La **Nikol-prismo** estas farita el islanda kalcit-kristalo. La kristalo estas distranĉita en konvena loko, polurita, kungluita, kaj tiamaniere oni povas atingi, ke nur la eksterordinaraj lumradioj trapasu.

B.7.10



Pli perfekta estas la **Wallaston-prismo**. Ankaŭ ĝi estas farita el islanda kalcito, sed la materialo povas esti ankaŭ kvarco. El ĝi oni faras du kolonetojn, kies bazo estas trieĝo. Ili estas kungluitaj tiel, ke la optikaj aksoj estu ortaj unu je la alia.

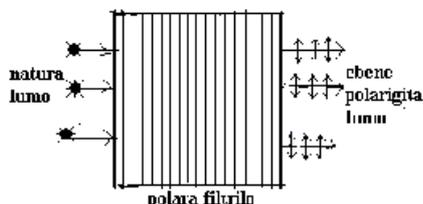
B 7.11



Tiuj prismoj estas uzeblaj kaj kiel polarigiloj, kaj kiel analiziloj. Iliaj malavantaĝo estas, ke ili estas relative malgrandaj, tial per ili oni povas esti nur mallarĝajn polarajn lumfaskojn.

Specialaj materialoj, kiuj konsistas el mallarĝaj, longaj molekukoj (ekz. celofano) estas uzeblaj kiel grandsurfacaj polarigiloj. Se longaj molekuloj estas paralelaj, ili kreas tre delikatan krandon, kiu permesas trapasi el la lumo tiun parton, kies amplitudo estas paralelaj kun la kradfadenoj. Tial post la trapaso la lumo estos ebene polara. Se la materialo estas farata speciale por tiu ĉi celo, la alia parto de la lumo absorbigiĝas.

B 7-12

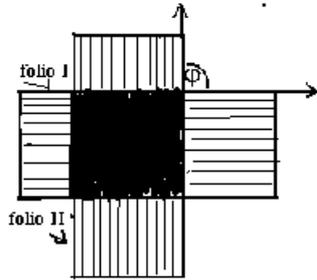


Nuntempe estas uzataj preskaŭ nur tiaspecaj materialoj kiel polarigiloj kaj kiel analiziloj.

Tiaj materialoj estas uzataj ankaŭ kiel **neŭtralaj** (grizaj) **lumfiltriloj**, kies tralasivo estas regulebla per la ŝanĝo de la angulo inter la polar-direkto de la du kunmetitaj plataĵoj. Unu funkcias kiel polarigilo, la alia kiel analizilo. Tio validas el ambaŭ direktoj. Se $\varphi = 0$, la tralasivo estas maksimumo. Se $\varphi = 90^\circ$, la tralasivo egalas al nulo. Inter la du ekstremoj la tralasivo dependas de $\cos \varphi$ (laŭ la formulo F 7.4)

B 7-13

Polarigo okazas ankaŭ tiam, se normalaj lumradioj trafas malgrandajn materio-partojn.

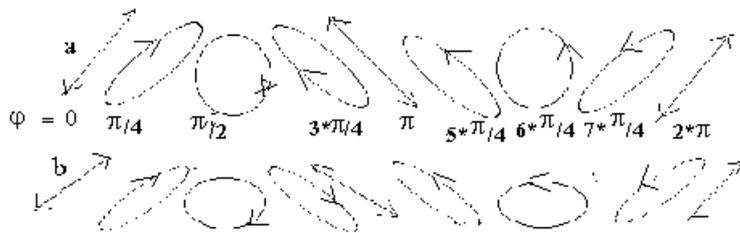


Tiuj partetoj disĵetas la lumon, kaj parto de tiu lumo estas polarigita. La aero-molekuloj disĵetas la sunradiojn, tial parto de la sunradiado estas polara.

En la ĉap. 7.2 estas menciita, ke la reflektita lumo ĉiam estas pli-malpli polara. Ofte okazas, ke ekspoziciitaj bildoj estas malbone videblaj pro la brilo, kiun kaŭzas reflektita lumo. Se oni rigardas la bildon tra analizilo, la ĝenaj briloj malaperos, la bildo estos bone videbla. Ankaŭ fotografantoj ofte uzas polarigan lumfiltrilon; la bildo iĝas pli pura, pli kontrasta.

7.5 Interfero de polara lumo

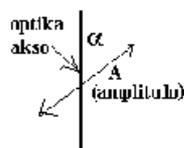
Se oni adicias du ebenajn vibrojn, inter kiuj la fazodiferenco estas konstanta, estiĝas elipsa vibro. Se la amplitudo de la vibroj estas orta unu je la alia, kaj la fazodiferenco ŝanĝas inter 0 kaj $2*\pi$, estiĝas la sekvaj kazoj:

B 7-14

En la vico a la amplitudoj estas samaj, en la vico b malsamaj. La rezultanta energio ĉiam egalas al la sumo de la energio de la komponantoj.

7.51 Interfero de paralelaj lumradioj

Trafu ebene polara lumo optike negativan mallarĝan kristal-plataĵon, kies surfaco estas paralela kun ties optika akso.

B.7-15

Tiam la vibro apartiĝas je du komponantoj, kies amplitudo estas: $a*\cos \alpha$ kaj $a*\sin \alpha$. La unua komponanto estas ordinara, la alia eksterordinara radio. La larĝeco de la

kristalo estu d ; estu v_0 la rapido de la ordinara, v_e tiu de la eksterordinara. Tiam la tempodaŭroj, bezonataj por la trapaso estos: $t_0 = d/v_0$, $t_e = d/v_e$. Estas sciante, ke la rapido de la eksterordinaraj radioj estas pli granda ol tiu de la ordinaraj. Tial **post la trapaso la radioj, kiuj trafis kune la kristalon, ne renkontiĝas en la sama loko**. La tempodiferenco inter la duspecaj radioj post la trapaso $t_0 - t_e = d * (1/v_0 - 1/v_e)$ tial **estiĝas fazodiferenco, kies granda estas:**

$$\Delta\varphi = 2 * \pi * (c/\lambda) * d(1/v_0 - 1/v_e)$$

Ĉar c estas la lumrapido, λ estas la ondolongo en aero, uzante F 5.1, F 5.2 formulojn oni ricevos:

F 7.6 $\Delta\varphi = (2 * \pi / \lambda) * d * (n_0 - n_e)$ (n_0 , n_e estas la refraktivoj por ordinaraj, resp por eksterordinaraj radioj en la kristalo.)

Se la fazodiferenco $\Delta\varphi = \pi/2$ la optika vojlondiferenco en la kristalo $\pi / 2 = (2 * \pi / \lambda) * d * (n_0 - n_e)$ El tiu

F 7.7 $\lambda / 4 = d * (n_0 - n_e)$

Tiun kristalon oni nomas

„**kvaron-ondolonga plataĵo**”; tiu faras la trapasantan lumon **cirkle polara**.

Se la fazodiferenco estas π , (la optika vojlondiferenco $\lambda/2$), la plataĵon oni nomas „**duon-ondolonga plataĵo**. Tiam la trapasanta lumo estos **ebene polara**, sed la direkto de la amplitudo estos alia ol tiu de la enpaŝinto. (vidu B 7 14)

Oni regulu la polardirekton de analizilo orte al tiu de la polarigilo. Ebene polara lumo ne povas trapasi. Se oni metas inter la analizilon kaj polarigilon $\lambda / 4$ kristalplataĵon, lumo trapasas, ĉar en la cirkle polara lumo, kiun faras la plataĵo, ĉiam estos komponanto, kiu estas paralela al la polardirekto de la analizilo. Se la uzata lumo estas blanka, ĉar la refraktivo por diversaj koloroj estas diversa, oni vidas ian koloron. Pro la turno de la plataĵo, la koloro ŝanĝiĝas.

Nun oni metu tien $\lambda/2$ kristalon. Se ĝia polardirekto estas 45 gradoj al la polardirekto de la polarigilo, la ebene polara lumo trapasas. Post la regulo de polardirekto de la analizilo al nulo, la lumo ne povas trapasi. Ĉe aliaj direktoj de la analizilo la lumo pli-malpli intense trapasas. Se la lumo estas blanka, pro la interfero oni vidas diversajn kolorojn, depende de la angulo de la analizilo.

Se inter orten regulitan polarigilon kaj analizilon oni metas kristalplataĵojn, kies larĝeco estas diversa, aperas diversaj koloroj, ĉar la fazodiferenco ŝanĝiĝas pro la alia larĝeco resp. optika vojlondiferenco. Tio okazas ankaŭ tiam, se unue oni metas la kristalon orte je la lumradio, poste grandigas la trafangulon. Pro tio la optika vojlongo en la kristalo grandiĝas, tial aperas diversaj koloroj.

7.6 Turno de la ebena de polarigo

Se la polardirekto de polarigilo kaj analizilo estas paralelaj, la polaran lumon ili tralastas. Nun oni metu inter ilin certan materialon, ekz. kvarc-kristalon. Se la uzata lumo estas unukolora, tra la analizilo oni ne plu vidos lumon. Oni devos turni la analizilon per α angulo, ĝis la lumo denove aperos. Do, **la intermetita materialo turnis la ebenon de la ebene polara lumo**. Tiaspecajn materialojn oni nomas **optike aktivaj**. La turno povas okazi kaj dekstren kaj maldekstren. Tio dependas de la speco de la materialo.

La grandeco de la turnangulo dependas de la eco de la materialo, de la lumvojlongo, de la denso aŭ koncentriteco de la materialo, kaj de la ondolongo de la uzata lumo.

$$\text{F 7.8} \quad \alpha = \alpha_s * l * d$$

α_s estas la **specifa turnokapablo**. Tiu estas difinita en la linio D de natrio. l estas la lum-vojlongo en la materialo, d estas la denso aŭ koncentriteco de la materialo. Ekz. 1 mm larĝa kvarc-plataĵo turnas la ebenon de la polarigo 15 gradojn, se la lumo estas ruĝa, 50 gradojn, se la lumo estas viola.

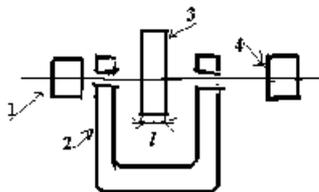
Diversaj materialoj turnas la polarebenon. Nun oni mencias la plej konatajn. Solvaĵo de sukero. Ekzistas **du specaj sukeroj; rapo-sukero kaj frukto-sukero**. **La du specaj sukeroj turnas la polar-angulon en inversajn direktojn**. Uzante tiun econ de sukero, oni konstruis instrumentojn, per kiuj la **sukero-koncentriteco en likvaĵo estas tre precize kaj tre rapide determinebla**.

Ankaŭ vivantaj korpo-likvaĵoj estas optike aktivaj. Estas tre grave, ke **la kanceraj ĉeloj turnas la polardirekton inverse ol la sanaj**. Uzante tion, estas fareblaj rapidaj esploroj.

La polarigita lumo estas bone **uzebla** ankaŭ en la **mikroskopio**. Prilumante la objekton per polara lumo, kaj rigardante la bildon tra analizilo, **videbliĝas detaloj de la objekto, kiuj en normala lumo estas nevideblaj**.

7.61 Efekto, malkovrita de Faraday

B 7-16



Polarigilo; 2. Forta (elektra) magneto; ĝiaj polusoj estas traboritaj laŭ la direkto de la magnetika kampo; 3. Esplora materialo; 4. Analizilo

Estu la polardirekto de la polarigilo kaj analizilo paralela. Se materialo 3 estas optike ne aktiva, la ebene polara lumo trapasas. Se oni estigas fortan magnetan kampon, la lumo malaperas, ĉar **la magnetika kampo la materialon optike aktivigas**. Oni denove povas vidi lumon, se la analizilon turnas per angulo ϕ . La interdependo de la turniĝangulo kaj de la magnetika kampo:

F 7.9

$$\Phi = r \cdot H \cdot l$$

H estas la magneta kampintenso. l estas la longo de la materialo en la magneta kampo. r estas la "Verdet-konstanto", kies grandeco estas inverse proporcia al la kvadrato de la lumondolongo, krome dependas ankaŭ de la materialo.

8

Lumo kaj materio

En tiu ĉi ĉapitro oni trarigardos la interefikojn inter la lumo kaj materio. En lernolibroj oni ĝenerale distingas materialojn **travideblajn** kaj ne **travideblajn**. Inter ili estas la **diafanaj** materialoj, kiuj kvankam tralastas grandan parton de la videbla lumo, tamen bildon oni ne povas vidi tra ili. En ili estas malgrandaj malhomogenajoj, kiuj devojigas, disjetas la lumon, do ĝi ne povas trapasi laŭ rekta linio. Tamen tiuj materialoj -laŭ fizikaj ecoj apartenas al la travideblaj.

Estas pli ĝuste distingi la materialojn elektre konduktivaj kaj izolaj. (Inter ili la duonkonduktivaj.) **Ankaŭ la optikaj ecoj dependas de tiuj elektraj ecoj.**

La diferenco inter konduktivaj kaj izolaj materialoj estas jena:

B 8-1



En konduktivaj materialoj la atomaj zonoj, kie elektronoj povas restadi situas proksime unu al la aliaj. Inter la zonoj povas moviĝi liberaj elektronoj. En izolaj materialoj la distanco inter la zonoj estas granda ($> 2\text{eV}$), inter la zonoj elektronoj ne troviĝas.

8.1 La reflektiĝo

Se lumradioj trafas metalsurfacon ili proksimiĝas al elektronoj, ĉar la distanco inter la zonoj estas tre mallarĝa, eĉ en la intervaloj troviĝas elektronoj. **Pro la efiko de la energio de fotonoj la elektronoj komencas amortizajn vibradojn.** La **tempodaŭro de la vibrado de unusola elektrono estas proksimume 10^{-8} sek.** La **fotono** transdonas ĝian energion al elektrono, tial ĝi **povas penetri en la metalon nur la distancon de 2...3 atomoj.** (Tre maldikaj metaltavoloj, ekz. se ili estas vaporigitaj poste kondenzigitaj je vitrosurfaco, estas iom travideblaj.) Do **elektronoj de surfacaj kaj surfacproksimaj atomoj vibradas kaj emisias lumradiojn, plej ofte tiajn, kiuj apartenis al la fotonoj**, kiuj estigis la vibradon. Estas interesa tasko por la ondomekaniko priskribi, kial la novaj vibroj ekirigas ondojn nur de kaj el la surfaco, laŭ la reguloj, kiujn priskribas la geometria optiko. Tial **ŝajnas tiel, ke la surfaco**

reflektas la originalajn, ĝin trafintajn radiojn. Se la surfaco estas ebena kaj bone **polurita**, tiam ĝi estas **spiegulo**, kaj validas la reguloj de la geometria optiko.

Se la surfaco estas ne polurita, sed kruda, la lumradioj ekiras en ĉiu direkto. Ŝajnas tiel, ke **la trafintaj radioj disĵetiĝas. Tial la objektoj estas videblaj el ĉiu direkto.** Sed **diversaj materialoj povas emisii nur certajn ondolongojn. Tio igas kolora** (krom la interfero) **la materialojn.** Tio signifas, ke ili emisias lumon nur tiam, se trafas ilin lumo, kiun ili povas emisii. Se la lumradio ne povas iom penetri en la materialon, kaj „reflektiĝi” el la interno, la koloro estas ne videbla. Interesa eksperimento: Oni dispecigu je malgrandaj eroj malhelkoloran vitron. Tiam la koloro de la vitropolveroj ŝajnas blanka. La lumradioj disĵetiĝas disde la surfacetoj, ne povas penetri en la materialon. Se oni verŝas akvon sur tiujn vitropolverojn, ilia koloro iĝas la originala. Klarigo: la refrakrivo de la akvo estas proksime al la vitro, ĝi plenigas la porojn inter la vitro-eretoj, tial la lumo povas penetri en ĝin, kaj emisii la originalan lumkoloron.

La blanka kaj griza koloroj devenas el la emisio de la plena videbla spektro. Nigra koloro fakte ne ekzistas. Tio signifas, ke el certaj surfacoj **neniu lumradio povas reflektiĝi.** Tiuj surfacoj konsistas el aro de mikroskopaj „nigraj korpoj”. Ties malo estas la „Lambert radiantoj”, kiuj ĉiun lumradion povas emisii „reflekti” en ĉiu direkto. Ekranoj, sur kiujn okazas projekciado devas esti similaj al la Lambert-radiantoj.

Sed materialoj povas reflekti (radii) nur samajn lumondojn, kiuj trafas ilin. **La originalan koloron de objekto oni povas vidi nur, se trafas ĝin taga sunlumo** kun plena spektro, aŭ lumfonto, kiu havas proksimume saman spektron kiel la suno.

Estas nepre okupiĝi iom pri reflektado de izolaj materialoj. Oni jam kalkulis, ke okaze de orta trafangulo, la vitroj reflektas proksimume 4% -ojn el la trafanta lumintenso. **La reflektado dependas de la grandeco de la refraktivo n .** La refraktivo n de diamanto estas 2.42 (ĉe vitro $n=1.5$), tial la diamanto reflektas 17.2%-ojn. Tio kaŭzas la fortan, koloran brilon de diamanto, krome la specialaj formoj, kiuj en la kristalo kiel prismoj dispersas la lumon.

Teorie veran reflektadon povas kaŭzi nur elektre bone konduktantaj materialoj. Tamen oni spertas, ke en la realo ĉio estas videbla, preskaŭ ĉio havas koloron. Sen reflektiĝo tio ne povus okazi. **La reflektiĝon kaŭzas la neregula lokiĝo de la molekuloj en la materialo.** Tial nek la originala, nek la generita radiado povas nek plene trapasi, nek reflektiĝi, sed absorbiĝas. Tamen, iom ĉiam reflektiĝas, kiu igas la objektojn videblaj.

Sed pli enigma estas la situacio ĉe likvaĵoj, acidoj, kiuj estas elektre konduktivaj, tamen samtempe tute travideblaj!

8.2 La absorbiĝo

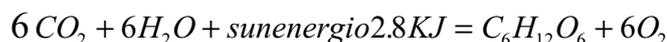
La tielnomataj ne travideblaj materialoj absorbas aŭ reflektas la lumon. Nun oni okupiĝu pri la **absorbado.** Tio **signifas, ke la energio, kiun havas la fotonoj, estas transdonata al la trafata materialo.** Se la atomo ne povas forradii la saman ondolongon, kiu apartenis al la fotono, la ena energio -la **temperaturo de tiu materialo altiĝas.** Krome en certaj materialoj povas okazi kemiaj aŭ elektraj efikoj pro la absorbita lumo.

8.21 La varmiĝo

La varmiĝo de materialoj pro sunradioj estas de longe konata. Tio kaŭzas la varmiĝon de la tersurfaco, kio ebligas la vivon. **La tersurfaco absorbas la -grandparte videblajn- sunradiojn. Ĝi varmiĝas, kaj senpere varmigas la ĉirkaŭantan aeron.** Tial la temperaturo estas la plej alta proksime al la tersurfaco, kaj laŭ la alto forte reduktiĝas. Ekz. sur la tersurfaco la temperaturo estas +20° C , ĉirkaŭ aviadilo, kiu flugas en la alteco de 10 000 m, la temperaturo estas proksimume nur -50°C . **La tersurfaco forradias antaŭruĝajn radiojn.** Parto el ili **pasas en la kosmon, parton retenas, reflektas, reenradias supra gastavolo en la atmosfero.** Tiu gastavolo konsistas ĉefe el **karbondioksido. Ĝi faras la tielnomatan „vitrodoman efikon”.** Tio estas: la ĝardenajn vitrodomojn varmigas sunradioj tiamaniere, ke trapasante la vitron, ili varmigas la grundon kaj kreskaĵojn en la vitrodomo. Ili, pro la relative malalta temperaturo povas forradii nur antaŭruĝajn radiojn. La vitro ne tralastas ilin, tiamaniere iom ĝi konservas la varmon, kiun estigas la sunradioj.

La sunradiado, kiu estas ne tute konstanta pro la efiko de sunmakuloj, la averaĝa absorbivo de la tersurfaco kaj la vitrodomo-efiko kune rezultigas la averaĝan teran temperaturon kaj ties disdividiĝon. La nuna formo de la tera vivo povas ekzisti nur en la nuna, tre mallarĝa temperaturo-intervalo. (Pripensu, tiu 50-60 C-grada intervalo kiel malgranda estas kompare al plurmilionaj gradoj, kiuj ekzistas en la universo.) Pro la rapida forbruligado de karbono, petrolo, kiuj kolektis la energion de sunradioj dum jarmiliardoj, nun denove fariĝas karbondioksido. La forhakado de tropikaj praarbaroj, la neniigo de maraj verdaj planktonoj per malpurigado de la maroj signife grandigas la koncentritecon de karbondioksido, per tio la vitrodomo-efikon. Tial jam **estas spertebla la konstanta kreskiĝo de la averaĝa tera temperaturo.** Por la homaro tio signifas grandan danĝeron, ja pro la temperatur-kresko degeliĝas la glacio-amasoj sur la polusoj, altiĝas la marniveletoj, inundante dense loĝantaj regionojn, agrokulturajn terenojn. Krome kreskos la tereno de dezertoj, do malgrandiĝas la por surtera vivo bezonataj terenoj, kiuj estus neceaj por la ade plimutiĝanta homaro...

Nun oni rigardu, **kiamaniere la absorbado de sunradioj estigis kaj ebligis la teran vivon.** Laŭ la nuna kono, la vivo estiĝis en malprofundaj varmetaj maroj. Komence la tera atmosfero konsistis ĉefe el karbondioksido. Libera oksigeno ne ekzistis. **Oksigenon produktis mem la vivo,** komence per subakvaj verdaj kreskaĵoj, post la apero de atmosfera ozontavolo, (La ozontavolo ŝirmas la vivulojn kontraŭ la motrtiga postviola sunradiado.) ankaŭ per surteraj verdaj kreskaĵoj. Por la **produktado de oksigeno la kreskaĵoj uzas la energion de sunradioj laŭ jena procezo:**



En tiu ĉi kemia procezo grandan rolon havas la **klorofilo**, tiu verda kombinaĵo, kiu donas koloron al kreskaĵoj. El la karbondioksido tiamaniere estiĝas oksigeno, kaj karbo, la **materialoj de la kreskaĵoj; la „biomaso”, per la absorbata energio de sunradioj.**

La nuntempe ankoraŭ **ekzistanta karbo kaj petrolo- havaĵo estiĝis dum jarmiliardoj.** Ili kolektis la absorbitan sunenergion. **Tiun havaĵon la homaro nun facilanime, konkurse forkonsumas dum kelkaj jarcentoj,** ne pensante pri la sorto de la estontaj generacioj.

Alia granda uz-tereno de la absorbita lumoj estas la **fotokemio**. En specialaj (ĉefe) arĝento-kombinaĵoj je la efiko de la absorbita lumoj estiĝas ŝanĝiĝoj. Uzante tiun fenomenon, oni evoluigis la fotografadon, la fotokemian industrion. Ŝajnas ke pri tio jam ne indas detale okupiĝi; la elektronika bildregistrado baldaŭ transprenos ĝian rolon.

La **fotoelektroniko** uzas la fenomenon, ke **certaj materialoj ŝanĝas la konduktivecon je la efiko de la absorbita lumoj**. Aliaj materialoj emicias **elektronojn pro la trafo de fotono**. Tiuj fenomenoj estas tro multflankaj, iliaj traktado bezonas apartan libron.

El la vidpunkto de optiko havas pli grandan signifon la **lumabsorbado per travideblaj objektoj**. Jam estis menciite, ke lumtrapaso okazas tiel, ke je la lumefiko ekvibradas la elektronoj de la atomoj, ankaŭ ili fariĝas etaj lumfontoj, kaj transdonas la vibroenergion unu al la alia. Tio estas rigardebla, kiel mekanika vibrado-transdono. La amortizo pro la froto reduktas la intenson de la forpasantaj vibradoj. Io simila okazas ankaŭ al lumoj, nature nur en simbola senco. Estas facile kompreni, ke **la intenso-perdo estas ju pli granda, des pli granda estas la vojlongo, kiun la radio pasas en la materialo**. Se en iu materialo estas malhomogenaj, fremdaj eretoj, la lumradioj reflektiĝas, devojiĝas, disjetiĝas. El la lumradiado estiĝas varmenenergia. Granda parto de materialoj, escepte la plene travideblajn, kondukas tiel.

Interesa kazo de **absorbado** estas **en gasoj, kies atomoj povas absorbi el la lumoj nur certajn frekvencojn**. Ĝuste tiujn, kiujn la respektiva gaso povas emisii, se ĝi estas iamaniere ekscitita. Se oni prilumas gason per lumoj, kiu havas kontinuan spektron, **en la spektro de la trapasanta lumoj aperas malhelaj linioj**. Unuaokaze **Fraunhofer rimarkis**, ke en la kontinua spektro de la suno estas videblaj malhelaj strioj. Tiamaniere oni malkovris la heliumon.

Sed tie ŝajnas kontraŭdiro: **Ĝuste tie aperas en la spektro malhela linio, kie la gasatomo devus emisii lumojn!** Jen la klarigo: Inter la gasatomoj, kiujn ne povas eksciti certa ondolonga lumoj, ĝi povas trapasi kun plena intenso. Sed se troviĝas eksciteblaj gasatomoj, la fotonoj, kiuj ekscitis ilin, ne povas plu pasi, ja ili transdonis la energion al la gasatomo, kiun ili ekscitis.. La ekscitita gasatomo komencos emisii lumojn en ĉiu direkto, do en la originala direkto de la lumradioj restas el ili nur malgranda parto!

8.3 La trapaso de la lumoj

En la geometria optiko oni studis la trapason de lumoj tra diversaj iloj, faritaj el travideblaj materialoj. Tiam oni konstatis, ke ĉe limsurfacoj la direkto de la lumoj ŝanĝiĝas, se en la alia materialo ĝi povas pli rapide aŭ pli malrapide propagiĝi. Ekz. se lumradio trafas ne orddirekte vitropecon, kies flankoj estas ebenaj, paralelaj kaj plataj, la lumradio post la trapaso propagiĝas plu en la sama direkto, ĝi estas nur iom forŝovita paralele. La grandeco de tiu forŝoviĝo dependas de la longo, kiun la lumradio pasas en la vitro, kaj de la refraktivo de la vitro; kiomfoje malrapide pasas la lumoj en la vitro ol en la aero.

Ĉu la leganto pensis jam pri tio, kiamaniere povas okazi, ke en la vitro la lumradioj havas c/n ($n > 1$) rapidon, do malpli grandan ol en aero, sed poste en la aero denove ili havas c rapidon? Kiaspeca forto povas akceli la lumradiojn, ke ili denove havu la originalan c rapidon? Tiaspeca forto ne ekzistas. Eĉ la malpli granda lumrapido en la pli densaj materialoj estas nur ŝajno. Sed tiu ĉi afero estas inde je pli profunda studo.

Se la fotonoj, el kiuj konsistas la lumo flugus kiel forpafitaj kugloj, la afero estas vere neklarigebla. Sed **la lumo dum la propagiĝo kondukas kiel elektromagneta ondo, kiu kvankam povas perdi energion, tio reduktas ne la rapidon, sed la intenson. La (ŝajna) rapido de la lumo dependas eksklusive de la materialaj ecoj de la medio**, kiun reprezentas n refraktivo kaj de la **ondolongo de la lumo**. (En vakuo kaj en maldensaj gasoj $n=1$, tial la rapido por ĉiu ondolongo estas sama.) Post la trapaso de la vitro, la lumradioj konsistas el du komponantoj. Unu estas la originala, kiu trapasas sen interefiko kun la atomoj, la alia komponanto estas kiun forradias la atomoj – pro la interefiko kun fotonoj - de la trapasita materialo. (Parto el ili propagiĝas en inversa direkto, tiu estas la reflektita parto de la lumo). La **rezultata lumradio**, se la atomoj de la vitro povas forradii la plenan videblan spektron, **havas saman koloron, saman rapidon ol antaŭ la trapaso, nur la fazo diferencas**. Se la vitro estas speciala, ĝiaj atomoj povas vibri nur en certaj frekvencoj, la trapasanta lumo estos kolora, sed en la aero ankaŭ ĝia rapido estos c .

8.4 La disjetiĝo de la lumo

Se atomoj en iu travidebla materialo estas regule aranĝitaj, la lumondo devigas iliajn elektronojn je vibrado. Poste la atoma vibrado kaj la originala, trapasanta radiado kun rezultata nova fazo pasas plu, laŭ la regulo de la refraktiĝo. **Oni rajtas demandi, kial la radiantaj atomoj emisias lumon nur en unu direkto?** La demando estas justa. Ili vere radias en ĉiu direkto, sed tiuj **ondoj estas ne regulaj; ili reciproke neniigas unu la alian**, la rezultata flankradiado estos nulo, **la intenco en la ĉefa direkto signife ne reduktiĝas**.

Sed se la korpuskloj estas ne regule aranĝitaj, ekz. la vagantaj atomoj, molekuloj en la aero, eretoj de likvaĵoj, la situacio estas alia. Tiuj **solece vagantaj atomoj, molekuloj je la efiko de la lumondo ekvibradas, ankaŭ ili komencas radiadi, sed ilia radiado estos ĉiudirekta!** Matematike estas deduktebla, ke tiu ĉiudirekta radiado estas proporcia al la kvadrato de la kampintenco, kiu efikis je la atomo, molekulo.

8.4.1 Kial la ĉielo kaj maro havas bluan koloron?

Estas konstateble, ke nur parto de la atomoj, molekuloj ekvibradas. Se en penso oni surmetas tiun parton unu apud la alian je surfaco, ties areo estos tre malgranda. Oni nomas ĝin efika surfaco. Tiu ĉi efika surfaco estas proporcia al la frekvenco de la elektromagneta ondo. Do, **je la duobliĝo de la frekvenco de la elektromagneta kampo, la efika surfaco ne duobliĝos, sed ĝi estos 16-obla!** La **blukolora lumo** havas proksimume **duoblan frekvencon** ol la ruĝkolora, tial la **efika surfaco je la blukolora lumo estas 16-obla**. Tial el la sunlumo la blua kaj viola koloroj multege pli intense disjetiĝas ol la ruĝaj; **la atmosferon plenigas blu-kolora radiado**. Tial oni vidas la ĉielon blukolora, kaj la astronaŭtoj la teron blua planedo. La blukolora radiado estas polarigita. (Tamen tiu ĉi blua koloro estas ne la sama al la blua koloro de la spektro, ja tiun kaŭzas parta manko de ruĝa kaj aliaj koloroj).

Sama efiko kaŭzas ankaŭ la ruĝan koloron de la sun-leviĝo kaj sunsubirio. Tiun belan spektaklon **kaŭzas la manko de la disjetitaj bluaj radioj**, nur la restintaj ruĝaj venas rekte al niaj okuloj. **Sen atmosfero la ĉielo ŝajnus tute nigra**, kun steloj; oni vidus nur la rekte prilumitajn objektojn. Tion vidis astronaŭtoj sur la luno.

Se jam temas pri naturaj optikaj fenomenoj, rigardu **kial estas blua, eĉ malhelblua la koloro de la maro**. Tion kaŭzas ne nur la reflektiĝo de la blua ĉielkoloro, sed **la maro**

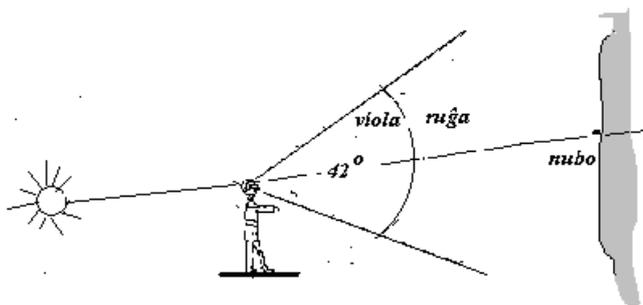
havas ankaŭ propran bluan koloron. La minimuma absorbedo de la pura akvo estas ĉe 470 nm ondolongo (blua). Do, **la lumo kiu pasas en akvo, poste el la profundo reflektiĝas, enhavas ĉefe bluan koloron.** La ceteraj estas ĉefe absorbitaj. (Se la akvo estas ne tute pura, la koloro ĉesas esti blua, ĝi estos verda, verd-flava, flava. (Se oni de sur alta marproksima monto rigardas la maron, estas videblaj diversaj koloroj: La foraj, profundaj partoj ŝajnas malhelbluaj, la partoj, kiuj situas proksime al la bordo, havas diversajn flavajn, verdajn kolorojn, depende de la profundeco de la akvo).

8 4.2 Kial la nuboj estas blankaj?

En la aero ĉiam ĉeestas ankaŭ akvovaporo. Ĝis la vaporetoj konsistas el unuopaj molekuloj, ili disjetas la lumon kiel la aero. Sed se ili kondensiĝas, kunligiĝas, ili estos tre proksime unu al la aliaj, kaj je la efiko de elektromagnetaj ondoj ili vibradas kune, en la sama fazo. Ĝis unu molekulo vibradas, ĝia energio estas proporcia al kvadrato de la kampintenso. Sed se jam du molekuloj kune vibradas ilia energio kvarobliĝas. Tiamaniere la reflektita energio laŭ la kresko de la akvoguto forte kreskas, tial la nuboj estos bone videblaj en blanka koloro. Sed se la grandeco de la akvogutoj proksimiĝas al la dimensio de la ondolongo, la blua kololoro komencos reduktiĝi, tial la ruĝa komencos domini, la koloro de la nubo ŝanĝas el la blanka al la ruĝhava, malhela direkto.

8 4.3 Kiamaniere ĉielarko estiĝas?

B 8-2



Kvankam la kaŭzo de tiu ĉi fenomeno estas reflektado kaj refrakto, oni traktu ĝin kune kun la ceteraj naturaj fenomenoj. **La ĉielarko estiĝas en akvogutoj,** kaj la mekanismo de la estiĝo estas iom komplika.

La bildo montras, ke **la centro de la ĉielarko sur la nubo estas,** - kie la rekta linio, kiun determinas la suno kaj la kapo de la observanto, - trafas la nubon. (Tiu loko povas esti eĉ sub la horizonto.) La angulo, ĉe la kapo de la observanto, inter la fino de la arko estas:

Por la ruĝa koloro (680nm) 42.33° .

Por la flava koloro (560nm) 41.83°

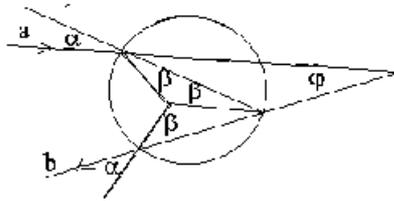
Por la viola koloro (410nm) 40.83°

Ofte estas videbla ankaŭ duagrada ĉielarko super la unuagrada. Ties vidanguloj: ruĝa 50.33° , Flava 51.33° , Viola: 53.33° . Nature **inter la ruĝa kaj viola estas videbla la plena spektro.**

Post kiam oni iom interkonatiĝis kun la ĉielarko, rigardu, **kiamaniere ĝi estiĝas. La suno brilas malantaŭ la observanto, la ĉielarko aperas antaŭ li, ĉiam sur nubo.**

La ĉielarko estiĝas kiel sumo de la refraktitaj kaj reflektitaj sunradioj, kiujn radias reen la globformaj akvogutoj jene:

B 8.3



Kiel estas konate, la plej malgranda estas la refrakto de la ruĝaj lumradioj, nun oni kalkulu nur per ili. "a" lumradio alveninte de la suno trafas akvoguton, penetras en ĝin, refraktiĝante per β angulo. De sur la kontraŭa ena surfaco ĝi reflektiĝas. Nature, pro la sfera aberacio ne ĉiu refraktita radio reflektiĝas de sur la sama punkto, do al la sama direkto. Laŭ la kalkuloj de Descartes la radioj devojiĝas disde la origina direkto inter 138 kaj 180 gradoj. Estas dedukteble, ke la plej malgranda apartenas al tiu radio, je kiu apartenas la ekvacio

$$\cos \alpha = \sqrt{(n^2 - 1) / (n^2 + 2)} \quad \sin \beta = \sin \alpha / n \quad \varphi_{\min} = 2 * (\alpha - \beta) + 180 - 2 * \beta$$

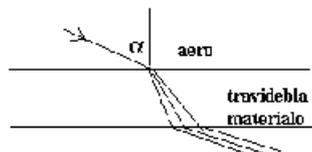
Kaj la angulo de la ĉielarko estas: $\gamma = 180 - \varphi_{\min}$. Por ruĝkoloraj radioj $n = 1.33$, $\varphi_{\min} = 138^\circ$, kaj $\gamma = 42^\circ$. Per simila kalkulado estas determinebla angulo ankaŭ por aliaj koloroj.

8.5 La disperso de la lumo

La fenomeno, kiam lumradio trafas travideblan materialon, kaj en ĝi ŝanĝas direkton, aŭ se la radio estas blanka, okazos **disperso; disiĝo je diverskoloraj komponantoj** (tial la fenomeno estas nomata disperso) ĝi kelkfoje jam rolis, ekzemple en la geometria optiko. Ĉar la disperso estas tre grava fenomeno en la optiko, ĝi estas inda por pli detala, pli profunda traktado.

En vakuo, la elektromagnetaj ondoj sendepende de la frekvenco propagiĝas per la sama 'c' rapido. Travideblaj materialoj ĝenerale estas elektre izolaj, kaj havas dielektrikan konstanton. **Je la efiko de la ŝanĝanta elektromagneta kampo de la lumondo, la atomoj, molekuloj respektive iliaj elektronoj vibradas, kaj tiu vibrado de elektraj ŝarĝoj estigas sekundarajn elektromagnetajn ondojn**, kiuj - same kiel la originalaj propagiĝas per rapido 'c'. Tiuj vibrantaj ŝarĝoj kondukas kiel elektraj rezoniloj, kiuj havas propran frekvencon. **La plu-propagiĝinta lumo konsistas el la sumo de la restintaj originalaj kaj la estiĝintaj sekundaraj ondoj.** La amplitudo, fazo kaj frekvenco de tiuj rezultataj ondoj dependas de ecoj de la originalaj kaj sekundaraj ondoj. Tial **la fazo de la rezultata ondo diferencas je la fazo de la originala ondo.** En materialo kune kun la fazo ankaŭ la rapido diferencas ĉe **diversfrekvencaj ondoj. Tial apartenas al diversaj ondolongoj diversaj refraktivoj.** Nun oni ekzamenos, kiamaniere la refraktivo kaj rapido de la propagiĝo dependas de la ondolongo.

B 8.4



Se α trafangulo $\neq 90^\circ$, tiam la blanka lumo dispersas. La granda de la disperso dependas de la diferenco inter la refraktivoj en diverslongaj ondoj. **La dispersion oni povas karakterizi per la jenaj diferencial-kvociantoj:**

$$\frac{dn}{df}, \quad \frac{dn}{d\lambda}$$

n estas la refraktivo, f : la frekvenco, λ la ondolongo.

$$\lambda = c/f, \quad d\lambda = c/f^2 df$$

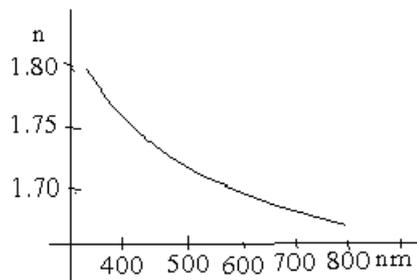
$$\frac{dn}{d\lambda} = \left(\frac{dn}{df}\right) \left(\frac{df}{d\lambda}\right)$$

$$\text{F 8.1} \quad \frac{dn}{d\lambda} = \left(\frac{f^2}{c}\right) \frac{dn}{df}$$

La disperso estas normala se la lumondolongo estas for de tiu ondolongo, kie la koncerna materialo povas forte absorbi. Se la disperso estas normala, validas jenaj konstatoj:

- La refraktivo de la sama materialo **grandiĝas laŭ la malgrandiĝo de la lumondolongo**. (Ekz. ĉe „peza” optika vitro, se $\lambda = 760$ nm, $n = 1.375$. Se $\lambda = 430.8$ nm, $n = 1.792$. La unua ondolongo estas la „fraunhofer A”, la dua, la „fraunhofer G” linioj.
- La disperso de materialo dn/d proporcie kreskas laŭ la malkresko de la ondolongo.

B 8.5

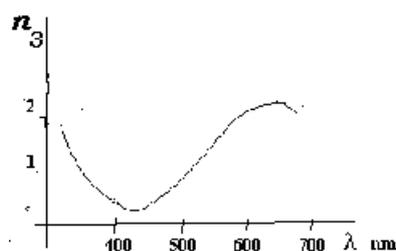


- Ĝenerale la **disperso de materialo**, kies refraktivo n estas granda, **estas pli granda ol tiu de materialoj kies n estas malgranda**.
- Se materialoj kemie estas samaj, sed ilia denseco **diversa, (ekz. solvaĵoj) validas la Lorenz-Lorentz ekvacio. La refraktivo ĝenerale kreskas laŭ la denseco**.

$$\text{F 8.1} \quad A_\sigma = \frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)} \quad A \text{ estas konstanto, } \sigma \text{ estas la denseco.}$$

- La disperso de diversaj materialoj neniam estas sama, eĉ ne proporcia. Do kurboj pri dispersoj laŭ la funkcio de ondolongo ne povas esti paralelaj.
- Malnormala estas la disperso en la proksimo de la absorbataj ondolongoj. En tiuj lokoj la formo de la kurbo estas tre kurioza. Jen ekzemplo: la kurbo pri disperso de iu organika farbo-materialo.

- B 8.6



8.51 La brilo de diamanto

Diamanto estas la plej valora juvel-ŝtono. Ĝian valoron ĝi povas danki ne nur al ĝia **malofteco**, sed ankaŭ al ĝia **beleco**. (Krome industrian uz-valoron pro ĝia eksterordinara **malmoleco**.) La beleco, la fajra, multkolora brilo de diamanto estiĝas pro ĝia tre granda refraktivo. Ĝi estas 2.42, dum tiu de optika vitro, kiu havas la plej altan, estas „nur” 1.76. (Ambaŭ valoro rilatas je la D-linio de natrio-) Tiu **alta refraktivo kaŭzas la unikan brilon** de diamanto laŭ tri manieroj:

- La alta reflektita proporcio de la lumo okaze de orddirekta trafangulo. Tiu estas 17%-oj. (la menciita optika vitro havas nur 7.51%-on.)
- La angulo de la plena reflektiĝo estas multe pli malgranda: 24.44 gradoj; tiu de la optika vitro estas 34.74 gradoj. Tio kaŭzas, ke **la diamanto plene reflektas la lumon ĝis la 55.8 grada trafangulo**. La menciita optika vitro nur ĝis 17.8 grada trafangulo.
- La disperso de diamanto estas multe pli granda ol tiu de la optika vitro. Oni povas karakterizi tion per la malsameco inter la diferenco de la refraktivoj, kiuj apartenas al la ruĝa kaj viola koloroj. Ĉe dianato ĝi estas 0.06, ĉe optika vitro 0.027. Tio signifas, ke la diamanto pli ol dufoje pli forte dispersas la lumon.

Fine, sed ne lastvice al la admirinda brilo de diamanto kontribuas ankaŭ la „**brilianta**” **formo**. La anguloj inter la facetoj, la formo de la facetoj, la nombro de la facetoj estis elektitaj tiel, ke **la brilo de la brilianto estu maksimumo**. Tio estas rezulto ne de geometriaj kalkuladoj, sed de multjarcenta praktiko. Pli perfektan formon per la nuntempaj sciencaj metodoj oni ne povus fari.

8.6 Kvanta traktado

En la antaŭaj ĉapitroj fizike estis klarigitaj la interefikoj de la lumo kun la materialo. Oni rigardu nun kelkajn matematikajn rilatojn, por helpi la pli profundan komprenon.

8.61 Koeficientoj

Reflektiĝo: $r = I_r / I_0$

Absorbado: $a = I_a / I_0$

Trapaso: $t = I_t / I_0$

I_r estas la reflektita lumintenso, r estas la koeficiento de la reflektado. I_a estas la absorbita parto de la lumo, a estas la koeficiento de la absorbado. I_t estas la trapasinta lumparto, t estas la koeficiento de la trapaso. I_0 estas la originala lumintenso antaŭ la trafo al la materialo.

$$I_r + I_a + I_t = I_0$$

F 8.2 $r + a + t = 1$

El optika vidpunkto la plej grava materiala konstanto estas la refraktivo (aŭ refrakto-indico). Laŭ la dedukto de Feymann ĝia valoro estas:

$$F 8.3 \quad n = 1 + (q^2 / (2 * \epsilon_0 * m)) * \sum_k (N / (\omega_p^2 - \omega^2 + i * \delta \epsilon))$$

Tie estas q : ŝargo de elektrono. m : maso de elektrono (senmova maso). ϵ_0 ; dielektrika konstanto de vakuo. N : nombro de la ŝargoj en volumen-unuo $i: \sqrt{-1}$, δ : amortiza konstanto de la vibrantaj elektronoj. ω_p : rezonancia cirklofrekvenco de elektrono (propra frekvenco) **En la formulo pluraj nombroj estas precize ne konataj, tial ĝi ne konvevas por preciza kalkulo pri la refraktivo** de iu materialo. Nuntempe n estas mezurita tre precize jam por preskaŭ ĉiu materialo, kaj estas publikigita en specialaj faklibroj. Tamen **laŭ tiu ĉi formulo oni povas fari bazajn konkludojn**. Por ni estas la plej interesa ω_p . Ĝi estas la propra frekvenco de la atomo, kies nombro estas la reciproko de la rondira tempo de elektrono laŭ Bohr -modelo. La frekvenco de la videbla lumo estas tre malmulta kompare al $\omega_p / 2 * \pi$ tial $\omega_p^2 - \omega^2 \approx \omega_p^2$ do, se lumo propagiĝas en vakuo aŭ en iu gaso, la refraktivo estas tre proksime al 1, sendepende de la frekvenco. En la fora postviola ondolongo-regiono ĝi jam proksimiĝas al ω_p tial la refraktivo forte kreskas, eĉ kiam $\omega_p = \omega$, n estos infinite granda, tial la materialo plene absorbas tiujn ondojn. (Nigraj linioj en la spektro de gasoj.) Eĉ se temas pri Rentgenradioj, ankaŭ kiuj estas elektromagnetaj ondoj, kiel la lumo, nur la frekvenco estas multe pli granda, ω estas pli granda ol ω_p , n fariĝas negativa. Tial la materialoj, kiuj por videbla lumo estas ne travideblaj, por Rentgen-radioj estas facile trapaseblaj. Sed se $\omega_p^2 - \omega^2$ estas negativa, tio signifas, ke en materialo la lumo povas pli rapide propagiĝi ol en vakuo! Tio tamen ne signifas, ke oni povus sendi signalojn pli rapide ol c , nur la „ondo-montoj” propagiĝas pli rapide, do nur la fazo, kaj ne mem la lumo.

El la menciitaj sekvas, ke **la konduto de la la materialoj tre forte dependas de la ondolongo de trafantaj elektromagnetaj ondoj**. Ili kondukas tute alie okaze de antaŭruĝa, postviola aŭ alia ondolonga radio. Tial multaj eksperimentoj pri la ecoj de materialoj okazas en la nevidebla ondolongo-intervalo. (Ekz. AlO_3 , kiu en videbla lumo ŝajnas tute blanka, kun granda reflektivo kaj tre malgranda emisio-kapablo, en la fora antaŭruĝa ondolongo-regiono kondukas tute alie.) La lumtralaso de la tera atmosfero -kiel jam plurfoje tio estis menciite, forte dependas de la ondolongo de radioj, venantaj el la suno. (vidu: fig. B3.3)

Estas interese prikalkuli, kiom el la trafanta lumo povas trapasi la travideblajn materialojn. La redukton de la lumintenso kaŭzas la absorbado kaj la devojigo de la lumo. La devojigo parte plilongigas la vojon en la materialo pro la zigzaga propagiĝo, kaj parto de la lumo flanke forlasas la materialon.

La intenso de la transiĝinta lumo:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} * e^{-4\pi * a\lambda * x / \lambda}$$

F 8.4

Tie estas: I_0 : intenso de la originala, enpasanta lumo. a : koeficiento de la absorbo. x : rekta vojlongo en la materialo. λ la ondolongo de la radiado. $a\lambda$ estas proporcia al la denseco de la materialo, $a\lambda$ aŭ a estas determinebla per la mezurado de la originala lumintenso kaj la lumintenso post la transiĝo. x vojlongo estas measurebla. La valoro de „ a ” estas ne tute preciza, ĝi enhavas ankaŭ la intensoreduktiĝon pro la devojiĝoj. Tamen por praktikaj celoj ĝi estas uzebla. La koeficiento de absorbado kaj ties

dependo de la ondolongo jam estas precize mezurita preskaŭ por ĉiu materialo, kaj trovebla en faklibroj.

En la pasintaj jardekoj, pro diversaj homaj agadoj, la atmosfera ozontavolo forte difektiĝis kaj eĉ nun difektiĝas. Tial la kvanto de postviolaj radioj, kiuj atingas la tersutfacon kreskas, kaj oni devas sin defendi ĉiam pli zorgeme kontraŭ ili.

Plimulto de la plastoj ebligas la trapason de postviolaj radioj. Do, **se iu uzas malhelajn okulvitrojn el plasto, la iriso plilarĝiĝas pro la malhelo. La internan parton de la okuloj atingas pli multe da postviolaj radioj!** Tial en sunbrilo estas utile uzi okulvitrojn el vera vitro, kiuj absorbas la postviolajn radiojn.

8 61 La kompleksa refraktivo de metaloj

Pri la reflektado de metaloj oni jam parolis. Estis menciite ankaŭ tio, ke la lumo povas penetri en metalsurfaco nur distancon de kelkaj atomdiametroj. (ja sen tio oni ne povus vidi la propran koloron de la metalo.) Tial, simile al izolaj materialoj ankaŭ por metaloj estas deduktebla refraktivo.

$$\mathbf{F\ 8.5} \quad n = 1 + \frac{e^2}{2 * \epsilon_0 * m} * \sum N_k / (\omega_k^2 - \omega^2 + i * \delta_k * \omega)$$

Tiu ĉi ekvacio estas preskaŭ sama al F 8.3 . e estas la ŝargo de elektrono, m la maso de elektrono, ϵ_0 la dielektrika konstanto de vakuo. N_k estas la nombro de elektronoj en la N_{ok} oscilatoro de la atomo. ω estas la propra rondfrekvenco de la trafanta lumradio, ω_k estas la propra rondfrekvenco de la trafita elektrono. γ_k estas la amortiza konstanto de la N_{ok} elektrono, $i = \sqrt{-1}$. Tiu i montras, ke **la refraktivo de metaloj estas kompleksa kvanto**. Ĝi estas skribebla jene:

$$\mathbf{F\ 8.6} \quad n = n - i * \kappa = n * (1 - i * \kappa)$$

$n = (\lambda_0 / \lambda)$ la ondolongo-proporcio al la λ_0 vakua ondolongo. κ estas la absorba koeficiento de la metalo. La signifo de κ estas:

$$\mathbf{F\ 8.7} \quad I_d / I_0 = e^{-\kappa * d}$$

d estas la dikeco de la metalo. κ dependas de la lumondolongo. $\kappa = \kappa * \lambda_0$, λ_0 estas la ondolongo en vakuo.

E 8.1 Laŭ mezuroj por arĝento $\kappa = 0.0776$, se ĝia dikeco estas 1nm, kaj la lumondolongo $\lambda = 589$ nm. Tio signifas, ke tre maldikan, $d = 1$ nm, arĝento-tavolon povas trapasi $\phi / \phi_0 = e^{-0.0776} = 0.925$, do preskaŭ 90% el la originala lumokvanto. 1 nm estas la dikeco nur de du atomoj. Se $d = 10$ nm, tiam povas trapasi 46%, se $d = 100$ nm, tiam povas trapasi nur 0.04% el la originala intenco. La ĝusteco de la ekvacio estas konstatebla:

$$\mathbf{F\ 8.8} \quad K = 4 * \pi * n * \kappa / \lambda_0 \quad \text{La konstantoj en la ekvacio estas mezureblaj.}$$

8.62 La reflektokapablo de metaloj

En la ĉapitro 6.41-a estis menciite, ke okaze de orta trafo al izolaj materialoj la amplitudo de la reflektita lumo estas $A_r = (n-1)/(n+1)$ El tiu la proporcio de la trafanta kaj reflektiĝanta lumintenso: $I_r/I_o = (n-1)^2/(n+1)^2$ Iom kompletigita tiun, oni ricevas la formulon por la reflektado de metaloj; puraj, bone polurigitaj:

$$F_{8.9} \quad I_r/I_o = [(n-1)^2 + n^2 * \kappa^2] / [(n+1)^2 + n^2 + \kappa^2]$$

Ĉar n dependas de la trafanta lumondolongo, ankaŭ la reflektado dependas de la lumkoloro, tial la metalspegulojn el arĝento, oro, kupro ktp. oni vidas diverskoloraj. El inter la metaloj plej multe reflektas la arĝento. $I_r/I_o = 95.1\%$; do la plej perfektajn spegulojn oni povas fari el arĝento-tavolo.

La optikaj konstantoj de materialoj estis plurfoje, plurloke determinitaj, kontrolitaj, kaj ili estas troveblaj en diversaj specialaj faklibroj. Jen la reflektoprocento de kelkaj poluritaj metaloj:

T 8 1

Arĝento:	90...92%,
Amalgamizita vitrospegulo:	70%,
Nikelo:	53...60%,
Kromo:	60...70%,
Aluminio:	65...70%,
Stano:	59...66%

8.7 Lumo kaj homa korpo

Lumo estas necesa ne nur por verdaj kreskaĵoj, sed ankaŭ por la sana vivo de bestoj kaj homoj. Ĝi ebligas ekzemple la kreiĝon de vitamino D, kiu estas necesa por la evoluo de ostoj. La **sunlumo apartenas al la vivo** de plimulto de bestoj, ĉu rampuloj, ĉu mamuloj. Ili ĉiuj volonte varmigas sin per la sunradioj. Sed la **sunradioj havas ne nur bonajn efikojn por la vivantaj organismoj**. Kiel jam estis menciite, la postviola radiado ekstermas la vivajn organismojn. Tial la vivo estiĝis unue en marakvo, kiu absorbas la postviolajn radiojn. Nur post la -pro verdaj kreskaĵoj elformiĝo de oksigeno kaj ozontavolo en la supra parto de la atmosfero, aperis surteraj kreskaĵoj, kaj la bestoj povis forlasi la mar-akvon. La ozontavolo ja grandparte absorbas la danĝerajn postviolajn radiojn. Tamen **parto de la postviola radiado povas atingi la tersurfacon. La plej danĝera ondolongo-intervalo estas inter 280 nm kaj 320 nm: Oni nomas ĝin UV-B-intervalo**. Ĝi kaŭzas inflamon sur la haŭto kaj en la okuloj, eĉ kancero minacas. La naturo iom defendas la homan korpon kontraŭ tiu danĝero, per estigo de bruna aŭ nigra pigmento en la ekstera tavolo de la haŭto. Je unua vido tio ŝajnas kontaraŭdiro. Ja **por defendi la korpon kontraŭ sunradioj oni portas blankajn vestojn**, kiuj bone reflektas la radiojn. Sed **se mankis ekstera ŝirmo, mem la naturo zorgis pri la defendo** de tiuj popoloj, kiuj ĉiam vivas en sunbrilo. **La haŭto de homoj bruniĝis kaj nigriĝis**. Kiamaniere tio defendas la haŭton? La klarigo estas simpla: **La ekstera bruna tavolo absorbas la radiojn, faras el ili varmon. Tial la**

sentemajn internajn partojn ne povas atingi postviola radiado. Do, homoj, kiuj havas senteman blankan haŭton, nur singardeme, laŭgrade sunbruniĝu, ĉiutage iom pli longe. Krome ankaŭ certaj ŝmirajoj defendas la haŭton kontraŭ postviolaj radioj.

Por defendi la okulojn oni uzas specialajn malhelajn okulvitrojn. Sed atentu! La plimulto de la plasto ebligas la trapason de postviolaj radioj. Do, se iu uzas malhelajn okulvitrojn el plasto, pro la lumredukto la iriso plilarĝiĝas, tial la internan parton de la okuloj trafas pli da postviola radio ol sen okulvitroj. Tial en sunbrilo estas utile uzi okulvitrojn, kies materialo estas el vera vitro; ĝi absorbas la postviolajn radiojn.

En la pasintaj jaroj pro diversaj homaj agadoj la atmosfera ozontavolo forte difektiĝis. Tial la kvanto de postviolaj radioj kiuj trafas la tersurfacon signife plimultiĝis. **Oni devas** pli zorgeme defendi sin kontraŭ ili. Kaj tuj **ĉesi tiujn agadojn**, kiuj produktas gasojn, kiuj detruas la ozontavolon, ja ni deziras, ke ankaŭ niaj nepoj povu ĝui la sunbrilon ĉe marbordo.

9.

La okuloj

Kiel en la enkonduko mi jam menciis, la vivuloj akiras grandan parton de la informoj per vido. La organo kiu ebligas tion, estas la okulo. **La okulojn la naturo evoluigis komforme al la bezonoj**, komforme al la geometriaj dimensioj de la koncernaj vivuloj. Se iu vivulo evoluas en konstanta mallumo, ekz. certaj grotaj fiŝoj kaj rampuloj, ne havas okulojn; en la ĉiama mallumo ili ja ne bezonas tiujn.

La senvertebruloj ĝenerale havas mozaikan aŭ alian, ankoraŭ pli simplajn okulojn. Tamen ekzistas esceptoj. La okulo de polipo estas preskaŭ tia, kia la homa okulo. Pli grandan okulon havas la giganta sepio; ĝia diametro povas esti eĉ 40 cm. La okuloj de fiŝoj malgraŭ la simileco, ĝenerale kreas aliforman bildon ol homaj okuloj. Ili povas sen movo percepti preskaŭ la tutan spacangulon ĉirkaŭan. **La rabobestoj povas vidi antaŭen, en relative malgranda vidangulo ~ 90 gradoj. La okuloj de certaj rabobirdoj povas funkcii kiel teleskopo. Bestoj, kiuj manĝas nur kreskaĵojn, kaj devas esti ĉiam pretaj por rifuĝo**, ekz. leporo, kapreolo, **havas okulojn kies vidangulo estas granda.**

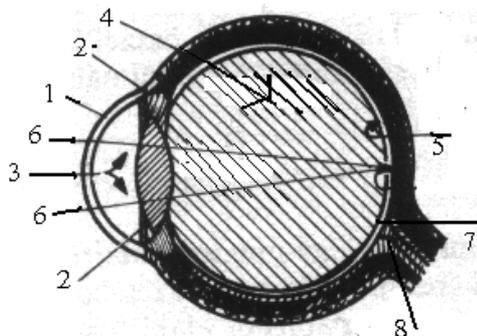
9.1 Mozaikaj okuloj

Malgrandaj bestoj, ekz. insektoj kaj skarabeoj havas mozaikajn okulojn. Pro la malgrandeco de ilia kapo, similan okulon, kiun la vertebruloj posedas ili ne povus havi. **La minimuman dimension de okuloj**, kiaspecan havas vertebruloj, **limigas optikaj kaj materialaj konstantoj; refraktivo kaj reguloj de la optika bildkreo.** La mozaik-okulo, kiel maldika tavolo kovras preskaŭ la tutan kapon de la besto. La mozaikĉeloj estas konusformaj, kaj estas strikte unu apud la alia. La diametron de la supra surfaco de unu mozaikero baras la lumdifrakto. **La mozaikĉeloj ne kreas bildon, sed transdonas la luminformojn al la cerbo.** La malsupra parto de la konuseto estas fino de nervofibro, el la lumo (ĉeesto, intenso, koloro) ĝi formas signalon, kaj la nervofibro transportas ĝin al la cerbo. Plej detale oni ekzamenis la okulojn de abeloj. Estis konstatite, ke la **abeloj vidas pli larĝan spektron ol homoj.** Ili vidas ankaŭ en la postviola bendo ĝis ondolongo de 300 nm. Tio signifas, ke por ili la mondo estas multe pli kolora ol por homoj, ja ili vidas koloraj eĉ florojn, kiujn la homoj vidas blanka.

La diferenciga kapablo de la abela okulo estas malpli ol tiu de la homa estas. Sed **ili vidas ankaŭ la polarecon** de la disĵetitaj lumradioj. Krome la abeloj **povas aparte vidi 200 lumsignojn en sekundo, sed la homoj nur 10 signojn.**

9.2 La homa okulo

B 9-1 La optika sistemo de la homa okulo



- | | |
|------------------|-------------------------|
| 1. Korneo | 5. Retino. |
| 2. Iriso | 6. Flava areo |
| 3. Okulo-lenso | 7. Blinda areo |
| 4. Vitreca korpo | 8. Fasko de nervofibroj |

La korneo estas elasta, proks. 1 mm dika, travidebla, sfer- simila parto de la okulo. Tamen ĝi estas **ne perfekta sfero ĉar ĝiaj randaj partoj estas iom plataj**; tio korektas la sferan aberacion. La refraktivo de la korneo estas: $n = 1.37$. Ĝia radiuso estas proksimume 8 mm

Malantaŭ la korneo estas akvo, kies refraktivo estas: $n = 1.33$. Kune kun la korneo ĝi funkcias kiel **duoble konvekso kolekta lenso**.

De la ekstera mondo **la okulojn ŝirmas palpebro**. La densaj, fortaj haroj sur la rando de la palpebro, havas la saman taskon. Se io proksimiĝas al la palpebro, **ĝi reflekse fermiĝas**. Inter la palpebro kaj korneo estas larmotavolo; ĝi malhelpas la sekiĝon de la korneo.

La iriso estas diafragma, kies diametron speciala muskolo povas ŝanĝi inter 2 kaj 8 milimertoj. **La diametron regulas la cerbo** tiel, ke ĉiam por la akra vido konvena lumintenso povu trapasi. Al la iriso apartenas du muskulositemoj; unu estas ringa, kaj povas redukti la diametron. Tiun procezon oni nomas „**adaptiĝo**”. La koloro de la iriso mem estas la koloro de la okulo. Ĝi povas esti nigra, bruna, blua, griza, verda k.a. Se la iriso estas tute malfermita, la iriso mem kaj ĝia koloro estas nevideblaj. Tiam oni vidas la internan parton de la okulo, kiu ŝajnas malhela. (En la atikva tempo virinoj ŝatis la malhelan okul koloron. Tial ili metis guton da atropino en la okulojn, kiu malfermis la irisojn kaj ŝajnis la okulojn malhelaj.) La atropinon ili akiris el kuracherbo, kiun oni nomis poste „beladonna” (bela virino) pro tiu uzado. Kuracistoj eĉ nuntempe uzas ĝin.

La okulolens estas **dukonvekso**. Ĝiajn du radiusojn ŝanĝas la okulmuskoloj. Kiam oni rigardas foren, la okulomuskuloj ne funkcias, tiam ili ripozas. La radiusoj de la

okulolenso tiam estas la plej longaj. La radiusoj de normala okulolenso tiam estas antaŭe 10 mm kaj malantaŭe 6 mm. **La okulomuskoloj variigas la radiusojn kaj per tio la fokusdistancon, laŭ la regulado de la cerbo ĉiam tiel, ke la bildo,** kiun la okulolenso projekcias sur la retinon **laŭeble ĉiam estu akra.** Tiu procezo estas la **akomodigo.** La okulolenso konsistas el tavoloj (kiel cepo). **La refraktivo de tavoloj laŭgrade ŝanĝiĝas.** Meze ĝi estas 1.4 kaj ekstere 1.38. **Tio kaj la neperfekta sferoformo de la korneo eliminis la aberaciojn.**

La tuto de **la okulo, kiel optika lensosistemo havas jenajn karakterizojn:** Mezurate de la meza punkto de la ekstera korneosurfaco la distanco al la unua ĉefpunkto estas 1.35 mm. Tiu al la dua estas 1.6 mm. La unua fokuspunkto disde la unua ĉefpunkto situas je la distanco de 17.05 mm. La alia (en la okulo) disde la dua ĉefpunkto estas je 22.8 mm. Se la okulo apartenas al juna homo, se ĝi estas tute normala kaj sana, kaj estas neakomodita, t.e. rigardas infiniten, **la tuta komplekso havas 60 dioptriojn. La akomodikapablo kaj la loko de la punkto, kiun la la okulo ankoraŭ povas akre vidi ŝanĝiĝas laŭ la aĝo.** La kaŭzo estas **malmoliĝo de la lensomaterialo.** La muskoloj devas uzi pli grandan forton por kurbigi la lensosurfacojn; ili laciĝas pli rapide, ili jam ne povas sufiĉe kurbigi la surfacojn. Tial **la plej proksima punkto de la akra vido malproksimiĝas disde la okulo. La sekva tabelo montras tion:**

T 9.1

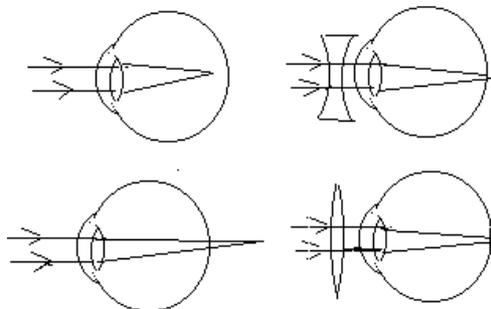
aĝo (ĝis) jaroj	dioptrio ŝanĝokapablo	minimuma distanco de la akra vido: cm
10	+14	6.5
15	12.5	7.5
20	11	8 12
25	10	13
30	9	14 15
40	6	20 30
50	2	60 100
60	0 1	60 100

Tio signifas ke okuloj de 10-jara infano povas adptiĝi jene: Okaze de rigardo malproksimen, la okuloj havas 60-dioptriojn; okaze de rigardado plej-proksimen (6.5 cm) la nombro de dioptrioj estas $60+14=74$. Laŭ la aĝo la ŝanĝokapablo reduktiĝas, tial ke la loko de la plej proksima akre videbla punkto malproksimiĝas. **La plej proksima loko de akra vido, kiun la junaj, normalaj okuloj dum longa tempo povas rigardi sen laco, estas proksimume 25 cm.** En tiu ĉi distanco kvardekjara homo povas legi kaj fari delikatajn laborojn, sed 50-jaruloj jam vane streĉas la okulojn. Se ili volas akre vidi, ili devas rigardi el pli granda distanco. Tiam jam okulvitroj estas bezonataj. Ili estas kolektaj lensoj kun malmulto da dioptrioj. **Kun la okulvitroj kaj okuloj estiĝas lensosistemo, por kiu la distanco de akra vido denove estas 25 cm.** En la pasinteco oni elektis konvenajn okulvitrojn per provado. Nuntempa tio okazas per mezurado kaj komputila kalkulado. **Uzado de okulvitroj por**

legado, skribado kaj delikata laboro **estas natura afero se oni havas pli ol 40 jarojn**. Laŭ la kresko de la jaroj oni devas uzi ĉiam, pli fortajn okulvitrojn, kies dioptrioj estas pli multnombraj. ĉe 4 ... 5 dioptrioj la procezo ĉesas. Tiam okulvitroj estas bezonataj jam ne por rigardi proksimen, sed ankaŭ iom pli malproksimen. Nature por tio estas bezonataj aliaj okulvitroj kun malpli multaj dioptrioj. **Estas oportune uzi okulvitrojn, kiuj havas du fokusdistancojn**. La supra parto kun malmultaj dioptrioj, por rigardi malproksimen, la malsupra parto, kun pli multaj dioptrioj por legi, skribi kaj fari delikatajn laborojn. Sed se oni faras laborojn por kiuj devas rigardi kaj akre vidi al plej diversaj (de duonmetro ĝis kelkmetraj) distancoj, aŭ nur rigardi televidilon, oni devas uzi plurajn diversfokusajn okulvitro-parojn. Jam ekzistas okulvitroj, kies dioptrioj kontinue ŝanĝiĝas laŭ la diametro. Per ili oni povas akre vidi al diversaj distancoj.

Ekzistas homoj, kiuj naskiĝis kun ne tute normalaj okuloj. Ili ne povas akre vidi sen okulvitroj eĉ en juna aĝo. Okazas, ke infano en lernejo ne vidas akre la tekston sur la tabulo. Tiaj estas la „**mallong-vidantoj**” (alinome miopuloj). Tion kaŭzas, ke la okulo-lenso kreas bildon antaŭ la retino, ĉar ĝia fokusdistanco estas tro mallonga. La mallongan fokusdistancon **oni povas plilongigi per aldono de konvena malkolekta lenso**. Tiam la bilddistanco plilongiĝas ĝis la retino. En tiu ĉi aĝo la akomodigo bone funkcias, kaj tial per tiu ĉi unusolaj okulvitroj la infano aŭ juna homo povas akre vidi kaj malproksimen kaj proksimen. Alia manko povas esti, ke la infano ne vidas akre la librojn kaj objektojn kiuj estas proksime al li. Ili estas la „**foren-vidantoj**”. Tio okazas, se la fokusdistanco de la okulolenso estas tro longa, kaj la bildo pri proksimaj objektoj kreiĝas malantaŭ la retino. Tion **oni povas korekti per okulvitroj, kies lensoj estas kolektaj**. **Kune kun la okulo la fokusdistanco devas esti tia, ke la akra bildo kreiĝu sur la retino**.

B 9-2



Por elimini la malkomfortaĵojn, kiujn kaŭzas la uzado de okulvitroj, oni evoluis „**kontakt-lensojn**”. Ili estas faritaj el travidebla, mola plasto, kaj estas metitaj senpere sur la korneon, sur larman likvortavolon. (Nature ili estas facile forigeblaj.) Sportistoj kaj aktoroj uzas ĉefe tiajn „nevideblajn okulvitrojn”. Cetere la nomo „okulvitroj” jam estas ne ĉiam ĝusta, ĉar multaj „normalaj” okulvitroj estas faritaj el travidebla plasto.

La okuloj povas denaske havi ankaŭ **alispecajn difektojn**. Ekzemple **la optikaj aksoj de la du okuloj estas ne paralelaj**. Per specialaj okulvitroj granda parto de tiuj malregulaĵoj estas korekteblaj.

La pej delikata, plej grava parto de la okulo estas la **retino**. La optika sistemo de la okulo projekcias la bildon sur la retinon, kaj **tiu transformas la lumdiferencojn je signaloj, kiujn la nervfibroj kondukta al la cerbo**. La retino havas diversajn partojn. La flava tereno povas plej bone percepti la kolorojn, ĉefe tiu parto, kie troviĝas malgranda konkavaĵo. **La retino-areon dense kovras percept-organismoj: Bastonetoj**; iom mallongaj kaj dikaj (la diametro estas 6...7 μm , la longeco estas

proksimume 35 μm .), Ili povas bone **percepti la kolorojn**. Sur la flava tereno troviĝas ĉefe bastonetoj. Ilia nombro estas proksimume 4000. Sur la tuta retino troviĝas proksimume 6...7 milionoj da bastonetoj. La pli granda parto de la perceptiloj estas la **stangetoj**. Ilia diametro estas proksimume 2 μm , la longeco 60 μm ; la nombro estas 100...125 milionoj. **Ili perceptas la intenson de la lumo**. Proksime al la flava areo estas la „blinda areo”. Tiu ĉi parto ne havas perceptilojn; tie la nervofasko forlasas la okulon. Estas interese, ke la bastonetoj kaj stangetoj estas ne senpere ligitaj al la nervofibro. Inter ili ekzistas iaspeca interefiko, kiun estigas tre maldika tavolo, kies strukturo iom similas al la cebo. Tie okazas iaspeca prilaboro de la vid-informoj, kaj nur poste ili estas transportitaj al la vid-centro de la cerbo, pere de la nervofibro.

9.21 La funkciado de la okulo

Mallonge traktata, jene funkcias la okulo: **La lumon**, kiun emisias primaraj aŭ sekundaraj lumfontoj (ĉiuj objektoj kiuj reflektas la lumon kaj tial estas videblaj) **kolektas** la optika sistemo de la **okuloj**, kaj **tra la iriso ili projekcias ĝin sur la retinon**. **La okulmuskoloj regulas la fokusdistancon de la okulolensoj tiel, ke la bildo de la rigardata objekto estu laŭeble plej akra sur la retino**.

La **diferenciga kapablo de la okulo** estas proksimume 1/60 gradoj. Tio signifas, se la diametro de la iriso estas 3 mm, la lumondolongo 600 nm, **la okuloj povas aparte vidi du punktojn inter kiuj la distanco estas 0.2 mm, kaj la distanco inter ili kaj la okuloj estas 1 m**. La diferenciga kapablo dependas de la intenso, de la koloro kaj de la prilumado. Okaze de forta kaj verd-flava prilumado, la irisdiametro estos malgranda, tial sur la retino la bildo estos akra kaj la diferenciga kapablo granda. Se la prilumado estas malforta, la diametro de la iriso pligrandiĝas, tial la bildo sur la retino estos malakra, la diferenciga kapablo malgranda.

Se la helo de la rigardata objekto estas pli ol 10 cd/m^2 , sur la retino **funkcias nur la bastonetoj**. Tion oni nomas **tagluma vido**. La mondo tiam estas kolora. La perceptemon de homa okulo en la funkcio de koloroj montras la figuro B 2.1. La maksimumo de la kurbo situas ĉe 555 nm ondolongo. Se la helo-intervalo situas en la intervalo 10 cd/m^2 ...0.01 cd/m^2 funkcias ankoraŭ la bastonetoj, tamen jam ĉefe la **stangetoj**. Tiam la akreco de la bildo sur la retino estas proksimume 1/3 kompare al la taga vido. Oni nomas tiun vidon „**krepuska vido**”. Oni vidas ankoraŭ kolorojn, sed la perceptemo jam malfortiĝis. La formo de la kurbo en tiu kazo estas tute simila al B 2.1, sed la maksimumo situas ĉe la ondolongo 507 nm. Laŭ la redukto de la prilumado unue la ruĝa koloro fariĝas nevidebla, poste ankaŭ la ceteraj. Plej longe estas videbla la blanka koloro. **Se la helo estas malpli granda ol 0.0001 cd/m^2 funkcias nur la stangetoj. Tiam oni ne povas percepti kolorojn**. La akreco de la vido estas malgranda. La homa okulo povas percepti lumon proksimume ĝis 0.0000001 cd/m^2 , sed inter la okuloj de homoj estas granda diferenco. La **malsupra limo** dependas ankaŭ de la **adaptiĝo** de la okulo. Se oni longe restadas en plena mallumo, la perceptemo plifortiĝas.

La lum-koloro de la luno ŝajnas arĝent-blua. La lunlumo povas kaŭzi maks. 0.2 cd/m^2 prilumadon. Tiam funkcias preskaŭ nur stangetoj, la bastonetoj ankoraŭ iom perceptas la blukoloran lumon. Tio kaŭzas la karakterizan, romantikan koloron de la lunlumo.

La homa okulo povas aparte percepti lumimpulsojn, se inter ili la tempointervalo estas almenaŭ 0.1 sekundoj. Se la ritmo estas iom pli rapida, oni povas vidi la movon kontinua. Tiu malperfekteco de la okulo **ebligas la uzadon de kinofilo kaj televido**.

9.22 Kial la okuloj laciĝas?

Estis traktita, ke dum vido la fokusdistanco de la okulolenso kaj la diametro de la iriso estas regulata per la cerbo, kaj la reguladan laboron faras diversaj muskoloj. Kiel ankaŭ aliaj muskoloj de la korpo, **ankaŭ la muskoloj de la okulo laciĝas**. Tial la vido malboniĝas, la farata laboro iĝas malfacila, ne perfekta, eĉ danĝera. Do oni devas labori inter tiaj cirkonstancoj, ke la okulmuskoloj ne devu multe labori.

Por la okulmuskoloj estas **la plej komforta stato, se oni rigardas foren**, kaj la **intenso** de la prilumado estas konstanta. **Tiam la okuloj estas en baza stato**, la fokusdistanco estas la ebla plej longa, la okulmuskoloj povas esti en trankvila stato.

Laciĝas la okulo, se la iriso tro ofte devas ŝanĝi la diametron. Tio okazas ekzemple, se en malluma ĉambro oni rigardas televidprogramon. Tiam la iriso devas sekvi ĉian helŝanĝon de la ekrana bildo. Por malhelpi tion, estas bone, se oni iom prilumas la fonon malantaŭ la televidilo.

La situacio estas sama, se oni metas labortablon apud fenestron, kaj skribas, laboras sidante kontraŭ la fenestro. Inter la ekstera sunlumo kaj la prilumado de la labortablo estas granda diferenco. Dum la laboro oni senkonscie ofte levas la kapon, kaj rigardas eksteren. Tiam la iriso mallarĝiĝas, sed ĝi denove larĝiĝas se oni rigardas je la tablo. **Por la okuloj, por la laboro estas plej bone, se oni sidas tiel, ke la fenestro situu en la direkto de la maldekstra mano**. (Tiam eĉ ombro da la mano ne ĝenas la laboron. Nature, se iu por skribo uzas la maldekstran manon, la situacio devas esti inversa.)

Se la prilumado de la laborloko estas artefarita, **la lokan lumadon devas kompletigi ĝenerala lumado** kies intenso estas tia, ke la okulon trafu sama lumkvanto ajne de la labortablo, ajne de la medio. (la prilumado de la medio estas nature multe pli malforta, sed la okulo kolektas tiam lumon el multe pli granda spacangulo.) En la konservo de la bona stato de la okulo, de la konservo de laborkapablo, laborintenso, de la ĝenerala bonfarto de la laboranto **havas gravan lokon la bona prilumado**, eĉ de la koloroj de la laborloko. Sed pri tio temo okupiĝas aparta scienco.

Ĝis nun ni traktis la laciĝon de muskoloj, kiuj larĝiĝas, mallarĝiĝas la irison. Eble nenie traktata temo estas la laciĝo de la **muskoloj, kiuj regulas la fokusdistancon de la okulolenso**. Ili ĉiam regulas la fokusdistancon tiel, ke la bildo estu laŭeble la plej akra sur la retino.

En la ĉapitro 5.37 oni traktis pri la objektodistanc-intervalo en kiu okazas kreo de akra bildo. Tie estis klarigita, se la diametro de la diafragmo -se temas pri okulo, la diametro de iriso, estas granda, la distancintervalo de la objekto devas esti mallonga, por ke la projekciita aŭ fotita bildo estu akra. Estas facile kompreni, **se pro nesufiĉa prilumado la diametro de la iriso estas granda, la muskoloj tuj devas labori por korekti la fokusdistancon, se la objektodistanco iom ŝanĝiĝas**. Dum neniaspeca laboro estas imagebla, ke la kapo senĉese restas konstante en la sama loko. Mi divenis tion, kiam mi legis dum veturado per aŭtobuso -tie pro la skuado la distanco inter la okulo kaj la literoj senĉese ŝanĝiĝas. Se mi veturis vespere, kiam la prilumado estis malforta, kaj mi provis legi, miaj okuloj tre rapide laciĝis, eĉ larmoj komencis aperi.

Se la rigardata objekto estas forte prilumata, la diametro de la iriso malgrandiĝas, la distancintervalo de la akra vido plilongiĝas. Tiam malgraŭ malgranda ŝanĝiĝo de la objektodistanco, la fokusdistanco de la okulo-lenso restas sama, la bildo sur la retino restas akra, la okulomuskoloj ne devas ĉiam

labori, do ili ne laciĝas rapide. Tial estas bezonate konvena prilumado de la rigardata objekto.

Tio estas tre facile kontrolebla. Homo, kiu por lego devas uzi okulvitrojn du dioptriajn, se metas la libron sur lokon, kiun la suno forte prilumas, konstatos, ke la literoj iĝis bone videblaj eĉ sen okulvitroj. (Pro la malgrandiĝo de la diametro de la iriso.) Tamen, krom la bezonata prilumado ankaŭ uzado de **konvena okulvitro estas tre grava**, ja **sen tio** por la akra vido **la okulumskoloj ĉiam devas esti en streĉita stato**, kaj nature ili rapide laciĝas. (La bezonataj heloj por diversaj laboroj estas priskribitaj en la ĉapitro 2.6.)

9.3 La funkciado de la retino

Ĝis nun oni traktis la okulon, kiel optikan instrumenton, kiu aŭtomate povas ŝanĝi la fokusdistancon -ĉiam konvene al la distanco de la rigardata objekto (akomodigo), kaj la diametron de la iriso tiel, ke la retinon trafu ĉiam laŭeble la plej konvena lumkvanto (adaptiĝo). Jam estis menciite ankaŭ tio, ke en la retino stangetoj kaj bastonetoj faras el lumŝanĝiĝoj signojn por la cerbo.

9.3.1 Vido per stangetoj

Unue oni rigardu, kio okazas en la stangeto-ĉelo je la efiko de la lumo. **En la stangeto estas purpurkolora pigmento.** (Tiun materialon mem la homa korpo ne povas produkti, tiun oni devas manĝi, kiel **vitaminon A**. Se el tiu estas malmulta en la organismo, malboniĝas la vido en krepusko.) Tiu pigmento bone absorbas la lumon, kaj faras signalon por la vid-nervaro. **En forta lumo la pigmento malkomponiĝas, kaj la stangeto provizore perdas la perceptemon.** (Tial en forta lumo funkcias preskaŭ nur bastonetoj.) **La reakiro de perceptemo bezonas tempodaŭron de kelkaj sekundoj.** Jam ĉiu spertis tion, se el sunbrilo iris en relative malluman ejon. Estis bezonataj kelkaj sekundoj, ĝis la tieaj objektoj iĝis videblaj.

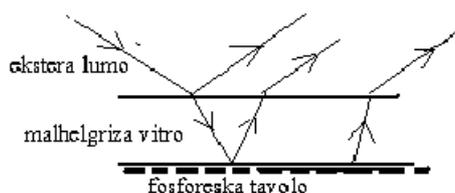
La longa inercio de la vido estas tre danĝera en la nokta trafiko. Se kontraŭ mia veturilo venas iu alia, kies lumjetiloj „blindigas” min, post la renkontiĝo mi vidas nenion. Se tiam antaŭ mi estas ne bone prilumata objekto aŭ piediranto, biciklanto, ĉaro, nur granda bonŝanco povas malhelpi la kolizion. Tial **la veturiloj havas duspecajn lumjetilojn:** Unu povas lumigi foren, antaŭen. Se ŝoforo rimarkas ke kontraŭe proksimiĝas alia veturilo, tiun lumjetilon li devas malŝalti, por eviti la blindigon de la kontraŭveturanta ŝoforo. La ŝoforo de la kontraŭa veturilo devas same fari. Samtempe, kiam **okazas la malŝalto, aŭtomate ŝaltiĝas aliaj lumjetiloj, kiuj prilumas foren nur la dekstran randon de la vojo**, antaŭen nur mallongan distancon. Tiuj lumjetiloj devas esti ekzakte muntitaj, kaj ofte kontrolitaj, ke ilia lumo ne ĝenu aliajn ŝoforojn.

B 9-3



Tiu eco de la stangetoj havas interesan rolon ankaŭ se oni rigardas ekranon de televidilo aŭ komputilo. Unue rigardu, **kial la vitro de ekranoj ĝenerale havas malhelgrizan koloron.**

B 9-4



La ekstera lumo parte reflektiĝas, de sur la ekstera, desur la interna parto de la vitro de ekrano kaj de sur la fosforeska tavolo. La lumu kiu reflektiĝas de la interna parto devas dufoje trapasi la grizan vitrotavolon, kie multe el ĝi absorbiĝas. **La utila lumu de la fosforeska tavolo devas nur unuokaze trapasi la grizan vitron, do el ĝi absorbiĝas malpli ol el la ĝena ekstera lumu. Tial la kontrasto grandiĝas.**

Se televidaparato staras en ĉambro, kiu estas ne tre prilumata, **la koloro de la tuta ekrano ŝajnas helgriza. Post la ŝalto kaj apero de la bildo, sur la bildo ŝajnas tute nigraj lokoj.** Mem la koloro de la ekrano kaj lumineska tavolo ne povas esti pli malhela ol antaŭ la ŝalto ĝi estis. Sed **pro la apero de forta lumu** de la bildo, eĉ se la brila surfaco estas malgranda, **la perceptemo de la stangetoj en la okulo forte reduktiĝas, tial kio ŝajnis ĝis nun griza, nun ŝajnas tute nigra!**

En ĝi havas rolon ankaŭ la malgrandiĝo de la diametro de la iriso, tamen la ĉefrolantoj estas la stangetoj. Oni diras, se iu rigardas en profundan puton, eĉ tage li vidas respeguliĝi la ĉielajn stelojn. La kaŭzo estas, ke la malhelo aktivigas la perceptemon de la stangetoj, kaj ili funkcias, kvazaŭ estus nokta mallumo. La kapablo de adaptiĝo povas funkcii en 1:1000000 larĝa helintervalo. Kalkulu, kiom en ĝi estas la rolo de la ŝanĝiĝo de la iris-diametro. En la ĉapitro 9.2.1 estas menciita, ke la diametro de la iriso povas ŝanĝiĝi pro la ŝanĝiĝo de la helo de 2 mm ĝis 8 mm. La trapasanta lumintenso dependas de la surfaco, de la kvadrato de la diametro. $2*2=4$ $8*8=64$ $64/4=16$ la diametroŝanĝiĝo de la iriso povas kaŭzi maksimume 16-fojan perceptemo-ŝanĝiĝon, kio estas neglektebla kompare al la rolo de la stangetoj. (Krome la diametro-ŝanĝiĝo okazas rapide, tio ne kaŭzus plursekundan inercion.)

9.4 La kolora vido

Tage la suno prilumas la vivan kaj senvivan mondon per la spektro de per homo videblaj lumondoj. La vivuloj kaj senvivaj aĵoj el tiu spektro reflektas nur parton aŭ partojn. **La koloro dependas de tio, kiun aŭ kiujn ondolongojn povas reflekti la koncerna aĵo.** La menciitaj validas nur el homa vidpunkto. **Oni nomas videbla lumu tiun ondolongo-intervalon, kiun la homa okulo povas percepti.** Normala, sana homa okulo povas percepti la tutan videblan spektron. Jam estis menciite, ke certaj insektoj, ekz. abeloj povas vidi ankaŭ en la postviola intervalo. Por ili la mondo estas pli kolora. Sed ekzistas vivuloj kiuj ne povas diferencii la kolorojn. Laŭ certaj publikaĵoj ekz. hundo vidas la mondon nigra-blanka.

Ankaŭ homoj ekzistas, kies okulo estas ne perfekta el tiu vidpunkto. Certajn kolorojn ili ne povas diferencii. Oni nomas ilin „blinda je koloroj”. En certaj laborterenoj, en la ĉiutaga vivo, ekz. en la trafiko, tio estas grava malavantaĝo. Antaŭ ne longe aperis artikolo pri eltrovo de speciala okulvitro, kiu povas helpi al tiaj homoj.

9.41 La mekanismo de la kolora vido

Ĉapitro 2.5 mencias, ke ĉiu koloro estas kunmetebla el tri aliaj sendependaj koloroj. La konvena proporcio de la kunmetitaj ruĝa, verda, blua bazkoloroj povas sentigi blankan, flavan, aŭ iun ajn alian koloron. Por klarigi la precizan mekanismon de la kolora vido oni faris multajn teoriojn, multajn eksperimentojn, sed la problemo eĉ nuntempe estas ne tute solvita. **La koloran vidon ebligas la bastonetoj, ĉefe sur la flava tereno de la retino; tio jam estas certa.** La plej verŝajna teorio estas, ke **ekzistas trispecaj bastonetoj**, el kiuj **perceptas unu la ruĝan, alia la verdan, la tria la bluan koloron.** Por tiu ĉi celo ili havas apartajn, diversajn pigmentojn. Tamen ilia kvanto estas tiom malgranda, ke kemie oni ankoraŭ ne sukcesis apartigi kaj ekzameni ilin. Oni ekzamenis la okulojn de la -jam menciitaj”blinda je koloroj” homoj. Estis mezurate kiomgrade la retino reflektas diverskolorajn lumradiojn, kaj tiuj mezuroj ŝajnas pruvi la priskribitan teorion.

Do, la optika sistemo de la okulo projekcias akran bildon sur la retinon. **Se la helo estas sufiĉe granda, tiam funkcias ĉefe nur la bastonetoj.** El inter ili **estas kiuj absorbas la ruĝan, verdan, bluan kolorojn.** La bastonetoj estas strikte unu apud la alia, ĉar ili estas tre malgrandaj, ĉiu bildpunkto kovras samtempe plurajn bastoneto-finaĵojn. En la bastonetoj absorbiĝas diversgrade la ruĝa, verda, blua koloroj, proporcie al la koloro de la bildpunkto. **La signalo, kiun la unuopa bastoneto forsendas, estas proporcia al la kolorforto de la absorbita lumo.** Tiamaniere tra la nervofibroj atingas la vidcentron de la cerbo etaj kolorsentoj, el kiuj la cerbo kunmetas koloran bildon. La okulo povas distingi 130...250 purajn kolorojn, kaj proksimume 5 000 000 koloro-nuancojn. La originalajn kolorojn de la objektoj oni povas vidi, se prilumas ilin natura sunlumo. Ja la aĵoj povas reflekti nur el tiuj koloroj, kiuj trafis ilin. (Ekz. se oni prilumas ian ruĝkoloran surfacon per artefarita lumo, el kiu mankas la ruĝa spektroparto, la surfaco ŝajnos nigra. Tial estas unu el la ĉefaj celoj de la evoluigo de la lumfontoj, ke ilia spektro estu simila al tiu de la suno.)

9.5 La tridimensia vido

La tridimensian vidon ebligas la ekzisto de du okuloj, kaj tio, ke inter ili estas distanco de proksimume 6,5 cm.. (Estas tre grave, ke inter la optika centro de la du okulvitroj estu la distanco sama, kiel tiu estas inter la okuloj.) Tiu ĉi relative malgranda distanco jam ebligas, ke la du okuloj vidu la objekton el iom malsama direkto. La du bildoj ne estas samaj. La diferenco estas bazo por la tridimensia vido. **La okulmuskoloj movas la du okulojn ĉiam tiel, ke ili rigardas la saman punkton. Tial oni vidas unu bildon.** La okuloj faras senĉese senkonsciajn movetojn, kiuj kreskigas la akrecon de la vido.

10. La optikaj instrumentoj

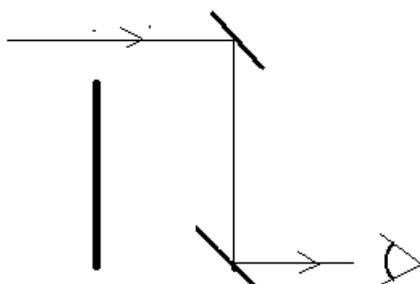
La traktitajn optikajn fenomenojn oni uzis, uzas konstrui instrumentojn por ĉiutagaj, industriaj, sciencaj, militistaj aplikoj. Optikaj instrumentoj estas multspecaj. Por priskribi ĉiujn, estus bezonata dika, plurvoluma libro. Tial mi nur traktas la plej signifajn, plej konatajn, plej ofte uzatajn instrumentojn.

Jen kelkaj el tiuj iloj:

Al la plej simplaj optikaj iloj apartenas la jam menciitaj **ebenaj sperguloj**. Ili estas konataj, kaj ĉiutage uzataj. Plej ofte oni faras ilin el pli-malpli granda ebena, plata vitro tabuloj, tabuletoj. La dorsa flanko estas kovrita per amalgamo, kovrita por ŝirmo plej ofte per iaspeca farbo. La lumo, kiu trafas la liberan flankon reflektiĝas de la amalgamo kaj tra la vitro pasas plu. Tre bonkvalitaj sperguloj estas fareblaj el poluritaj ebenaj metaltabuletoj, kaj per kondensigo de vaporigitaj metaloj sur poluritaj, ebenaj ajanaj surfacoj.

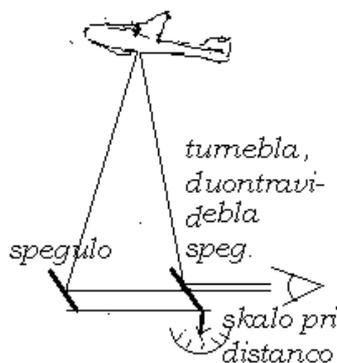
La plej simpla aparato kiu funkcias per ebena spergulo estas la **periskopo**. Per periskopo oni vidas la originalan realan objekton paralele forsovita je la distanco, kiu estas inter la du paralelaj ebenaj sperguloj. Plej ofte ĝi estas kompletigita per du bonkvalitaj lensoj, kaj stativo, tiam ĝi funkcias kiel speciala teleskopo. En la armeo uzas ĝin submaraj ŝipoj, tankoj, kaj observantoj el ŝirmitaj lokoj.

B 10--01



La **optika distancmezurilo** konsistas el normala ebena spergulo kaj el apud skalo turnebla duontravidebla spergulo. Ambaŭ sperguloj staras orte je la direkto de la mezuro. Inter la du sperguloj estas distanco l . Ju pli granda estas tiu ĉi distanco, des pli preciza estas la rezulto de la mezuro. En tiu ĉi ilo komence oni vidas duoblan bildon. Tiam oni ekturnas la turneblan spegulon ĝis la du bildoj kovras unu la alian. Al tiu situo apartenas distanco, kiu estas legebla el la skalo, kiu estas apud la turnebla, duontravidebla spergulo.

B 10—02



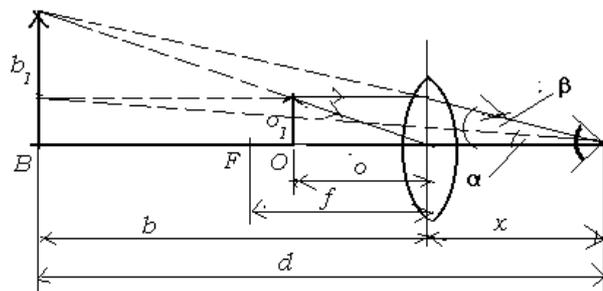
Tiaspecajn distancmezurilojn oni uzis en malnovtoipaj fotoaparatoj kaj en la armeo por mezuri la distancon de aviadiloj. Nuntempe oni uzas por mezuri distancojn ĉefe radarojn, (elektromagnetaj- ondajn, voĉajn) kaj satelitojn.

Tre spritajn marnavigadajn mezurilojn oni uzis –por determini la situon de la ŝipoj, en kiuj gravajn rolojn rolis ebenaj sperguloj. Sed nuntempe oni uzas por tiu ĉi celo preskaŭ ekskluzive satelitojn.

10.1 Lupeo -- -okulvitroj

Ankaŭ lupeo estas simpla optika instrumento. Ĝi estas kolekta lenso, dukonvekxa aŭ eben-konvekxa. La lupeo estas uzata por observi malgrandajn objektojn. Ĝi **grandigas la vid-angulon**, tial la etaj detaloj estas pli bone videblaj. **La lupeo ne kreas realan bildon.**

B 10-1



Nun oni prikalkulas la angulgrandigon (G_a) de lupeo.

F 10-1 $G_a = \beta/\alpha \approx \text{tg}\beta/\text{tg}\alpha$ (se la anguloj estas malgrandaj)

Se oni rigardass objekton o_1 tra lupeo, en la distanco de la akra vido (d), oni vidas grandigitan, virtualan, originaldirekton bildon b_1 . Tiam la angulgrandigo G_a egalas al la linea grandigo. (Pro la virtualeco ĝi estas negativa.)

F 10-2 $G_a = \beta/\alpha \approx \text{tg}\beta/\text{tg}\alpha = (b_1/d) / (o_1/d) = b_1 / o_1$

La virtuala bilddistanco $b = -(d-x)$ kaj $1/o = 1/f - 1/b$ $b/o = (b-f)/f$ sekvas el ili sekvas:

$$G_a = (b-f)/f = (-d-x) - f / f = (-d+x-f) / f = -d/f + x/f - 1$$

F 10-3 $G_a = -(1+d/f) + x/f$

E 10.1 Oni kalkulu kiom longa estas la fokusdistanco de lupeo, kies grandigo estas 5-
obla. Ĝia distanco de la okulo $x=2$ cm, $G_a=5$, $d=25$ cm, $G_a = -1 - (d/f) + (x/f)$,
 $G_a + 1 = -(d/f) + (x/f) = -(x+d)/f$; $-f = (x+d)/(G_a - 1)$ $f = -(2+25)/(5+1) = -27/6 = -4.5$ cm Nature fokusdistanco ne povas esti negativa, la negativan signon kaŭzas, ke la bildo estas virtuala.

T 10 1 Karakterizoj de la plej ofte uzataj lupeoj:

.	Fokus distanco[mm]:	200	100	50	25	2.5
	Grandigo:	2.2	3.4	5.8	10.6	20.2

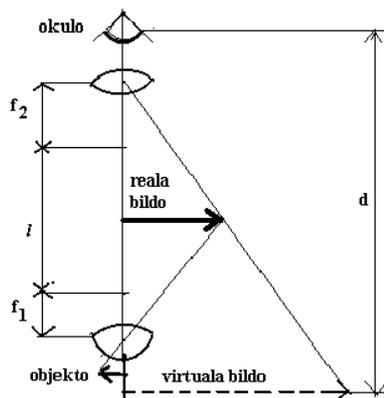
Kiel estas videble, **la grandigo estas inverse proporcia al la fokusdistanco**. Sed al forta grandigo apartenas tre malgranda akre rigardebla tereno. Krome la grandigo dependas de la distanco inter la lenso kaj okulo . Tra lupeo oni vidas originaldirektan, nerealan bildon. Ankaŭ la okulvitroj apartenas al tiuj instrumentoj, sed ili jam estis traktitaj ĉe la okuloj.

10.2 Mikroskopo

Por observi tre malgrandajn objektojn, vivulojn, oni uzas mikroskopojn. La mikroskopio jam estas aparta scienco. Mikroskopo povas esti du simplaj lensoj en tubo, kaj tre komplikaj aparatoj, kun specialaj lensosistemo kaj prilumado.

La bazajn ecojn de la mikroskopo oni povos studi per la plej simpla aparato, kiu konsistas el du kolektaj lensoj, kiuj estas en tubo, kaj la distanco l inter ili estas ŝanĝebla.

B 10-2



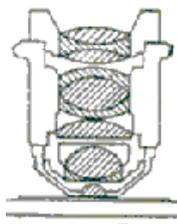
La funkciado de la mikroskopo: **La unua (ĉe objekto-) lenso faras pri la objekto inversdirektan, realan, grandigitan bildon. La bildon oni rigardas per la dua (ĉe okulo-) lenso, kiu funkcias, kiel lupeo. Tial per mikroskopo oni vidas nerealan bildon.**

La grandigo de la mikroskopo estas kalkulebla:

$$\text{F 10.4} \quad G_a = d \cdot l / f_1 \cdot f_2:$$

G_a estas la **angulgrandigo**; d : la distanco de la akra vido de la homaj okuloj (tio estis traktita ĉe la grandigo de la lupeo) f_1 : la fokusdistanco de la lenso ĉe la objekto; (de la objekto-lenso) f_2 : la fokusdistanco ĉe la okulo; (de la okulo-lenso) l estas la distanco inter la fokuspunktoj de la du lensoj.

B 10-3

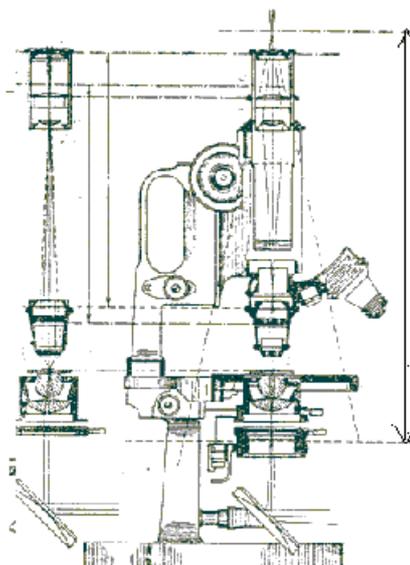


Bonkvalita lensosistemo por mikroskopo.

E. 10.1 Oni kalkulu la angulgrandigon (G_a) de mikroskopo kies objekto-lenso havas; $f_1=4$ mm, la okulo-lenso havas; $f_2=10$ mm fokusdistancon. La distanco inter la du fokuspunktoj $l=100$ mm. $d = 250$ mm $G_a = d \cdot l / f_1 \cdot f_2 = 250 \cdot 100 / (4 \cdot 10) = 625$. Se oni volas fari tiel fortan grandigon, necesas uzi bonkvalitajn lensosistemojn kaj kiel objekto-, kaj kiel okulo-lenson.

Ofte estas bezonate fotografii aŭ registri sur kinofilmo aŭ videobendo la mikroskopajn bildojn. Tiam anstataŭ okulo-lenso oni devas munti la konvenan aparaton. Jam estis menciite, se oni volas fari fortan grandigon, por elimini la aberaciojn devas uzi komplikan, multekostan lensosistemon, kiel objekto-lenson.

B 10-4 Mikroskopo por ĝenerala uzado.



Por estigi diversajn grandigojn, al la mikroskopoj apartenas pluraj lensosistemoj. Ili estas muntitaj sur disko, kaj per ties turno, la konvenan lensosistemon oni povas loki sur la finon de la optika tubo. Ankaŭ okulo-lensoj estas pluraj, kun diversaj grandigoj. En la ĉapitro 6.44 estis traktita la **limo de la grandigo**. Tiun baras difraktaj fenomenoj.

Mikroskopoj estas produktataj por diversaj celoj.

En la tekniko oni uzas mikroskopojn por **mezuri malgrandajn distancojn**. Tio eblas, se en la tubo kiu enhavas la okulan lenson oni muntas delikatan skalon, kio estas videbla kune kun la reala bildo. Tiamaniere grandigite per la okulo-lenso estas mezureblaj distancoj inter partoj kiuj estas en la vidkampo. Alia metodo, ke anstataŭ skalo oni muntas tie nur signon, kaj per delikata ŝraŭbo la objekto estas movebla en horizontala ebena laŭ x,y koordinatoj. Sur tiuj ŝraŭboj estas cilindraj skaloj, kaj per tiuj estas mezureblaj la distancoj. Sed ankaŭ laŭ vertikala direkto la tubo estas movebla per ŝraŭbo, kiu havas skalon. Per tiu ĉi ŝraŭbo oni povas reguli la bildon akra, per la distanc-ŝanĝo inter la objekto-lenso kaj objekto. Pro la malgranda fokusdistanco tie la intervalo de la akra bilddistanco estas tre malgranda. Tial kune kun la regulado de akraj bildoj estas mezureblaj la lokoj, kaj noteblaj la apartenantaj skalonumeroj. El la diferenco inter ili, ilia vertikala distanco estas kalkulebla.

Mikroskopojn komence oni uzis, kaj ankaŭ nuntempe ĉefe oni uzas por biologiaj esploradoj. La uzado de mikroskopoj en tiu sfero estas aparta fakscienco. El la esplora materialo oni **tranĉas tre mallarĝajn diafanajn sekciojn**. Ĝenerale ili estas senkoloraj aŭ unukoloraj. Ĉar la detaloj estas nevideblaj, tial per specialaj pigmentoj oni traktas ilin. Nur certajn malhomogenaĵojn ili kolorigas, kaj igas videblaj. Poste **la sekcion oni metas inter du vitroplataĵojn**, kaj tiel sub la objekto-lenson de la mikroskopo. Se detaloj pro diversaj travidebleco igas videblaj, ili estas

„**amplitudo-objektoj**”. Sed estas ankaŭ lokoj kie la fazo de la trapasanta lumo estas diversa. Ili estas „**fazo-objektoj**”; sed pri ili poste. Se estas bezonata grandigo, proksime al la limo de la optika ebleco, **oni metas specialan oleon inter la objekto-lenson kaj vitroplataĵon, kaj uzas violkoloran lumon.**

Estas tre grave la konvena prilumado de la objekto. La plej simpla metodo, se per spegulo oni direktas la sunlumon tra la objekto. Se estas bezonate forta lumo kaj speciala prilumado ankaŭ la prilumado okazas tra speciala lensosistemo kaj speciala lumfonto. La fazo-objektoj estas ne kolorigitaj, sed la detalojn, kiuj faras **fazodiferencon speciala prilumado igas videblaj**. Tiu ĉi metodo estas la **fazo-kontrasto-mikroskopio**. Ekzistas metodoj, kie interfero videbligas la samkolorajn detalojn. Tio estas la **interfero-mikroskopio**. Per **polarigita lumo** oni povas fari videbla alimaniere nevideblajn detalojn. Tiam post la okulo-lenso devas esti analizilo. **Ekzistas metodoj, aparatoj, kiuj uzas la kombinojn de la menciitaj manieroj**. La metodoj, kie estas ne bezonata farbado estas tre konvenaj por observado de vivantaj ĉeloj. Per mikroskopoj estas observebaj ankaŭ tre malgrandaj objektoj, kies dimensioj jam apartenas al grandaj atomoj, molekuloj. Tiuj estas prilumataj el flankadirekto, la fono estas tute malluma. Oni povas konstati nur la ĉeeston de eretoj, la formoj estas nevideblaj; simile kiel en malluma ejo la polvoj en mallarĝa lumfasko.

Komence oni uzis unu okulo-lenson. Sed por igi la observon pli komforta, per prismo oni disdividas la lumradiojn kaj rigardas la objekton per du okul-lensoj, duokule. Tamen, mem la bildo restis la sama. Nuntempe oni jam uzas -se la grandigo ne devas esti tro granda-, mikroskopojn, kie **la observado okazas samtempe el du direktoj**, tial la observado povas vidi **tridimensian bildon**.

Per lummikroskopoj **la supra limo de la grandigo estas proksimume iom pli ol milfoja**.

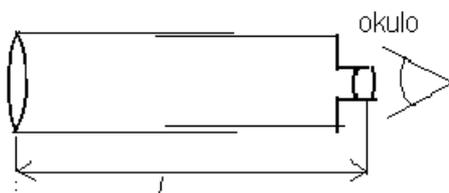
Oni vidis, ke per mallongaj lumondoj (violkolora lumo) estas atingebla pli forta grandigo. **Tio donis la ideon konstrui unue elektronajn, poste jonajn mikroskopojn**. De Broglie malkovris, ke al rapidaj korpuskloj apartenas ondolongoj, tre mallongaj. Uzante tiujn korpusklojn por mikroskopio, estis atingebla multe pli forta pligrandigo, tio povas esti plur-miliono-foja. Sed tiuj aparatoj apartenas al la atomfiziko. Mi pensas, eĉ diri estas superflue, ke sen mikroskopoj la nuntempa scienco kaj tekniko estas neimageblaj.

10.3 Teleskopoj, lornoj

Observadon de foraj objektoj ebligas teleskopoj kaj lornoj. Ĝenerale oni nomas teleskopo la grandajn instrumentojn kun stativo, per kiuj plej ofte oni observas stelojn. Lornoj estas malgrandaj, facile kunporteblaj optikaj aparatoj, por uzi ilin en ekskursoj, en teatroj.

La plej simpla teleskopo konsistas el du kolektaj lensoj. (Tiun teleskopon eltrovis Kepler.)

B 10-5



l : Longo de la teleskopo = $f_1 + f_2$

La unua, ĉe-objekto-lenso havas longan fokusdistancon (f_1), la fokusdistanco (f_2). de la alia, ĉe-okulo-lenso estas mallonga. Ĝi estas simila al tiuj, kiujn oni uzas en mikroskopoj. **La teleskopoj grandigas la vidangulon**, tial ŝajnas la objektoj pli proksime al la observanto.

Se per la menciita teleskopo, kiun oni nomas astronomia teleskopo, oni observas foran objekton, la bildo aperas tre proksime al la fokuso de la objekto-lenso. Tio estas **inversdirekta reala bildo**. Oni rigardas ĝin per la okulo-lenso, kiu funkcias kiel lupeo; faras **nerealan grandigitan bildon**. La bildodirekto restas inversa, sed por astronomiaj observadoj tio ne havas signifon. La angulgrandigo de la teleskopo estas:

F 10.4 $G_a = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} = \frac{f_1}{f_2}$; α estas la angulo, en kiu oni vidas la objekton sen teleskopo, β estas la per teleskopo grandigita angulo. La longo de la teleskopo estas $f_1 + f_2$

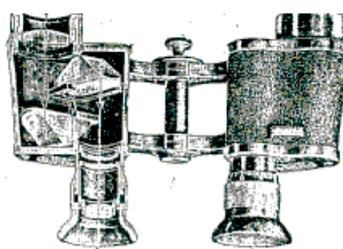
E 10.2 Estu la fokusdistanco de la okulo-lenso $f_2 = 10$ mm. Se oni volas, ke la grandigo estu 100-obla, kiom devas esti la fokusdistanco de la objekto-lenso; f_1 ?

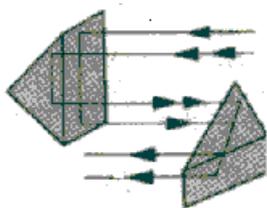
$F_1 = G_a * f_2 = 100 * 10 = 1000$ Do, la fokusdistanco de la objekto-lenso devas esti 1000 mm aŭ 1 m. Tia fokusdistanco havas la 1 dioptria okuvito. Do el tiu lenso, kun alia magrandata lupeo-lenso kun 10 mm fokusdistanco oni povas fari simpan astronomian teleskopon. La tubo, en kiu la lensoj estas, interne devas esti kolorigita nigra, por malhelpi la ĝenajn reflektitajn lumojn. Pro la malgranda diametro de la objektolenso kompare al la longa fokusdistanco, **la relativa aperturo estas malgranda**, en la bildkreo partoprenas laŭaksaj radioj, tial la bildo povas esti akra. Sed la observata objekto devas havi grandan lumintenson. **Teleskopo, kiu havas grandigon pli ol 10-oblan, estas uzebla nur sur stativo**, aliokaze pro la vibrado de la mano la bildo estos malakra.

Se oni volas uzi tiaspecan teleskopon **por observado de teraj objektoj, devas aldoni ankaŭ plusan kolektan lenson, por turni la inversdirektan bildon**. Tio plilongigas la teleskopon. La **mallongigon** de la teleskopo, kaj samtempe la **reenturnon de la bildodirekto oni solvis per du prismoj**.

B 10-6

B 10-61



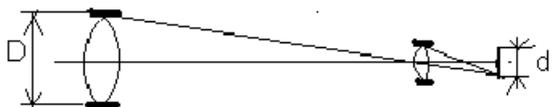


Por pli komforta observado, en malgrandajn teleskopojn lornojn, **oni muntas paralele du teleskopojn**. La distanco estas regulebla laŭ la du okuloj, inter la du tuboj estas regulilo de la distanco inter la objekto kaj okulo-lensoj, do la regulilo de akreco.

Krom la angul-grandigo estas **grava eco** de la teleskopoj la **lumforto**; la lumintenso, kiu tra la teleskopo atingas la okulojn. El 10.2 formulo estas videble, se oni volas estigi grandan angul-grandigon, la fokusdistanco de la objekto-lenso devas esti longa. En 5.3.6 ĉap. estas traktata, ke la lumforto estas karakterizebla per la kvociento de la diametro / fokusdistanco de la objekto-lenso. Do, se al longa fokusdistanco ne apartenas granda objekto-lenso-diametro, la lumforto estos malgranda. Samtempe ankaŭ la vidangulo de la teleskopo estos malgranda.

La okulo lenso kreas realan bildon pri la diafragma de la objekto-lenso ie (malantaŭ la okulo). Ties diametro estos 'd'.

B 10-7



La **angulgrandigon** karakterizas ankaŭ la kvociento de la du diametroj. La **lumforto de teleskopo dependas ankaŭ de la kvadrato de 'd'**. $E=d^2$ La teleskopo grandigas ankaŭ la diferencigan kapablon de la observanto. Tiu de sana homa okulo averaĝe estas 1/60 gradoj. Se oni dividos ĝin per la angulgrandigo, la rezulto estos la **diferenciga kapablo de la teleskopo**.

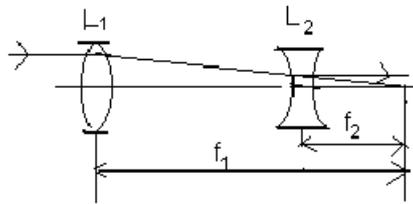
E 10.3 Kiom granda estas la lumforto de tiu teleskopo, kiun oni traktis en E 10.2? La karakterizoj de la lensoj estas: $f_1=1000$ mm, $f_2=10$ mm, la diametro de la objekto-lenso: $D=30$ mm la objektodistanco por la okulo-lenso, kiam ĝi kreas bildon pri la kadro de la objektolensoj estas: $f_1+f_2=1010$ mm. Tiam la bilddistanco el la formulo $1/o+1/b=1/f$ estos: $1/1000+1/b=1/10$, $1/b=0.1-0.001$; proks. 0.1 mm $b=1/0.1=10$ mm. La diametro de la bildo pri la objekto-lensokadro: $30:1010=d:10$ $d=\text{proks.}$ $300/1000=0.3$ la lumforto estas ties kvadrato: $E=0.3^2=0.09$. Kiel jam estis menciite la lumforto pro la malgranda objektolensoj-diametro kaj pro la longa fokusdistanco estas tre malgranda. Oni rigardu, kio okazos, se ĉio restas la sama, nur la fokusdistanco de la objektolensoj estos anstataŭ 1000 mm nur 100 mm. El la formulo $G=f_1/f_2$ sekvas, ke la grandigo anstataŭ 100-obla estos nur 10-obla. Kiom estos la lumforto? La bilddistanco por la bildo de la kadro de la objekto-lensoj, kreata de la okulo-lensoj estos: $1/110+1/b=1/10$; $0.009+1/b=0.1$; $1/b=0.091$; $b=\text{proks.} 11.0$ mm la diametro de la elira pupilo: $30:100=d:11$; $d=329/110=\text{proks.} 3$ La lumforto estas ties kvadrato: $E=3^2=9$ Estas videble, ke laŭ la mallongigo de la fokusdistanco la lumforto kreskas proporcie laŭ la kvadrato de la distanc redukto. Sur teleskopoj ĝenerale estas gravurita la angulgrandigo kaj la lumforto. Ekzemple: 10 X 20; kie 10 estas la angul grandigo. El

ili estas kalkulebla la diametro de la elira kaj eniraj pupiloj: $d = \sqrt{20} = 4.45$, kaj la libera diametro de la objekto-lenso: $D = G_a * d = 10 * 4.45 = 44.5$ mm.

Por estigi akran grandigitan bildon, estas bezonataj bonkvalitaj lensosistemoj kaj por kiel objekta, kaj por kiel okula lensoj. **La diferenciga kapablo de astronomiaj teleskopoj estas limigita per la difrakto.** Tio estas priskribita en la ĉapitro 6.44 per la formulo F 6.15, kaj prezentita per figuro B 6.19. La diferenciga kapablo estas bonigebla per la grandigo de la diametro de la objekto-lenso. Ties plugrandigon baras teknologiaj problemoj. Nuntempe la plej granda diametro estas proksimume 1m.

Malgrandaj, kaj bone uzeblaj **lornoj** estas fareblaj **el unu kolekta kaj unu malkolekta lensoj.** (Tiun tipon **malkovris Galilei**)

B 10-8



Objekto-lenso L_1 kolektas la radiojn el la observata objekto. En tiun lumfaskon estas lokita malkolekta lenso tiel, ke la fokuso de la du lensoj estu proksimume en la sama loko. (Depende de la distanco de la observata objekto). La malkolekta lenso ŝanĝas la direkton de la bildo tiel, ke en la okulo de la observanto **aperas originaldirekta, grandigita, virtuala bildo.** La angulgrandigo de tiu ĉi lorno estas kalkulebla per la formulo:

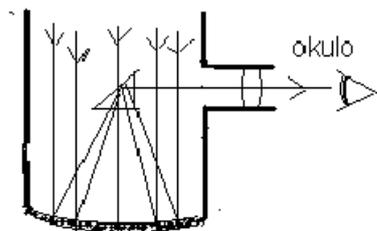
F 10.5 $G_a = f_1 / f_2$

Lornoj estas farataj por ambaŭ okuloj; la tubo-distanco estas ŝanĝebla laŭ la okulodistanco. La distanco inter la lensoj estas ŝanĝebla laŭ la objektodistanco. Tiaspecajn, simplajn, malmultekostajn lornojn oni uzas en teatroj, dum ekskursoj, sed mi spertis, ke ili estas bone uzeblaj por rigardi artmemoraĵojn; partojn de foraj freskoj en katedraloj k.s.

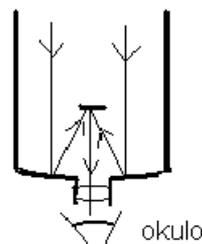
10.31 Spegulaj teleskopoj

Parto de **astronomiaj teleskopoj**, ĉefe la plej grandaj, anstataŭ objektolenso estas farataj el **parabolo- spiegulo.**

B 10-9



B 10-91



La lumradioj, kiuj reflektiĝas de la parabola spegul-surfaco, venintaj de tre foraj objektoj, kreas bildon preskaŭ en la fokuspunkto. Sed antaŭ la fokuso en la

lumkonuso estas fiksita bonkvalita **prismo**, kiu per plena reflektiĝo **la radiojn deflankigas 90 gradojn**. Tiamaniere **la bildo per okula lenso estas rigardebla ĉe la flanko de la teleskop-tubo**. La enmetita prismo ne ĝenas la bildon, nur reduktas iomete la funkciantan surfacon de la parabolo. Ekzistas ankaŭ **alispeca spegula teleskopo: La parabola spegolsurfaco meze havas rondan truon**, kies surfaco kompare al la plena parabola surfaco estas malgranda. Antaŭ la fokuso de la parabolo estas fiksita bonkvalita **spegulo**, kiu **respegulas la lumkonuson tra la truo, kie per okula lenso ĝi estas rigardebla**. La grandigo estas same kalkuebla, kiel tiu de la alia. Ambaŭ teleskopo produktas **inversdirektan bildon**. Se oni volas uzi ilin -ĉefe la dua-speca estas uzata por rigardi terajn objektojn, antaŭ la okula lenso, per alia kolekta lenso oni devas turni la bildodirekton. **La diametro de la spegulaj teleskopoj povas esti multe pli granda ol tiu de la lensaj**. (la plej granda diametro estas proksimume 5 metroj.) Tiaspecaj teleskopoj havas grandegan lumforton, diferencigkapablon, tial per ili oni povas observi tre forajn astronomiajn objektojn. Ilia distanco povas esti eĉ dekmiliardoj da lumjaroj. (lumjaro estas distanco, kiun la lumo traflugas dum unu jaro; tiu estas $9.6 \cdot 10^{12}$ km. Por komparo, la distanco inter la Suno kaj Tero estas $149.5 \cdot 10^6$ km. La lumradio traflugas tiun distancon dum 8.3 minutoj!) Tio signifas, ke **per tiuj gigantaj teleskopoj oni nuntempe vidas astronomiajn eventojn, kiuj okazis, kiam sur la tero eĉ ne ekzistis vivo!**

Nature tiuj teleskopoj estas sur **specialaj stativoj**, kiujn movas speciala horloĝ-mekanismo. Tiu garantias, ke la teleskopo vidu precize la celitan objekton, malgraŭ la forturno de la tero. **Ofte anstataŭ okula observado okazas fotado per tiuj teleskopoj**. Tiam la okulo-lenson anstataŭas speciala fotografia aparato. Se temas pri astronomia objekto, kies lumoj estas tre malgranda, la prilumigado de la filmo daŭras plurajn horojn. Krome **ankaŭ spektrografo estas munteba al tiuj teleskopoj**. Per ili oni povas esplori la materialojn de foraj astronomiaj objektoj.

Krom la menciitaj avantaĝoj, estas tre grava, ke **per parabolsurfaca spegulo oni povas krei bildon sen aberacioj**. La observejojn nur malhelpas ĉefe la tera atmosfero, kaj la ĝeno de la lumoj de loĝlokoj. Tial oni konstruas observejojn en foraj, neloĝataj, montaraj regionoj. Tamen la ĉeesto de **la tera atmosfero estas ne eliminebla**. Sed antaŭ ne longe ankaŭ tiu

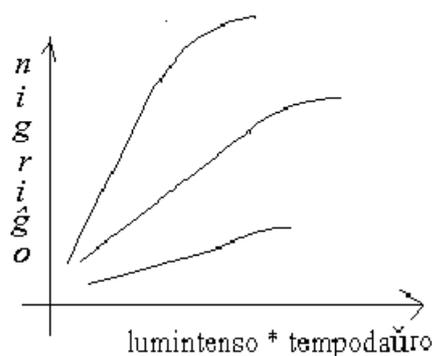
problemo estis solvita. **Oni muntis teleskopon sur satelito**, kaj tiu transformante la bildojn je radioondoj, sendas ilin al la observantoj.

La steloj krom la videbla lumoj emisias ankaŭ radioondojn. Tiujn kaptas la „radioteleskopoj”, kiuj estas grandegaj parabolsurfacaj antenosistemoj. Ilia surfaco estas kradaro el metalaj stangoj. Tiuj aparatoj povas kapti radiosignojn el pli foraj regionoj, eble de la „rando” de la universo, kaj per ili oni havas tre gravajn informojn pri la universo.

10.4 Fotografiaj instrumentoj

Fotografiaj aparatoj (escepte la mikro-fotografion) projekcias malgrandigitan bildon sur materialon, en kiu estiĝas kemia ŝanĝo, proporcia al la intenso kaj tempodaŭro de la trafanta lumoj. Tiamaniere estiĝas nevidebla bildo, kiun oni poste povas videbligi kaj stabiligi per kemiaj procezoj. En la lum-sentiva materialo la ŝanĝo estas proporcia al la produkto de la lumintenso kaj de la tempodaŭro de la prilumado. Se la lum-sentiva materialo estas „nigra-blanka”, tiam post la kemia traktado la ŝanĝo estas nigriĝo. Tiun nigriĝon oni povas karakterizi per „kurboj de nigriĝo”.

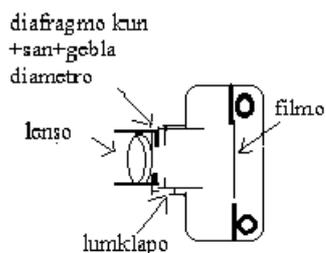
B.10-10



Se la kurbo estas kruda, la fotografian materialon oni nomas „malmola”. Se la angulo inter la kurbo kaj la horizontala akso estas proksime al 45 gradoj, la materialo estas „normala”. Se la angulo inter la kurbo kaj horizontala akso estas malgranda, la materialo estas „mola”. Se la kontrasto en la fotota aŭ grandigota temo estas malgranda, oni uzas malmolan fotografian materialon. Okaze de tro grandaj kontrastoj oni uzas molan materialon. En la tradicia fotografado la lumsentiva materialo kovras (en la komenco vitron) flekseblan, travideblan rubandon. Ĉar je la lumefiko tiu materialo nigriĝas, la originale helaj objektopartoj sur la filmo estos malhelaj, nigraj. Tie estiĝas negativa bildo. (Okaze de kolora fotografado sur la filmo aperas la kompletigaj koloroj.) Pri la negativa filmo, pro simila kaŭzo dum kopiado aŭ grandigo estiĝas „pozitiva” bildo. Se temas pri kolora fotografado, la filmon (kaj fotografian paperon) kovras tri diversaj kemiaj materialoj, kiuj estas sentivaj je diversaj koloroj. El la tri bazkoloroj ĉiuj koloroj estas kunmeteblaj, do la koloroj de la bildo estos similaj al la originalo. Kiel jam estis menciite, post la prilumado sur la filmo konserviĝas nevidebla bildo. Tiu bildo iĝos videbla post kemia procezo, kiun oni nomas „rivelado”. Pri la rivelita, fiksita filmo, oni faras kopiitajn aŭ grandigitajn bildojn. Nuntempe jam ekzistas la tiel nomata „polaroid-tekniko” per kiu en unu paŝo post la prilumado el la aparato elvenas la fotografia papero (la revelo, fikso komenciĝas jam en la aparato) kaj post mallonga ekstera prilumado aperas pozitiva bildo. Tion ebligas, ke tavolo sur la fotografia papero enhavas la materialojn, necesajn por la revelo kaj fikso. La detala traktado de tiuj aferoj apartenas al la fotokemio.

La klasika fotoaparato konsistas el kamero -ene nigre kolorigita, tute fermebla skatolo-, sur ĝia antaŭa parto estas la lenso kun diafragmo, kies diametro estas ŝanĝebla. La distanco inter la lenso kaj filmo, kiu situas kontraŭ la lenso, estas ŝanĝebla, konforme al la objektodistanco.

B.10-11



Post la diafragmo sekvas la „lumklapo”, kiu dum difinita tempo lasas enveni la lumon, tiam la bildo estas projekciita sur la filmon. (Tio estas la „ekspozicio”) Sur la tubo de

la lenso estas gravuritaj la distancoj de objekto, al kiuj apartenas akra bildo sur la filmo. Se la objekto estas fora, la bilddistanco estas egala al la fokusdistanco. Se temas pri simpla aparato, la plej malgranda objektodistanco estas 0.5...1m, tiam la lenso estas plej malproksime al la filmo. Se la relativa aperturo estas malgranda, (1:8, 1:11) la intervalo de la akra bildkreo estas larĝa, tial la bildo povas esti akra sen preciza regulo de la lensodistanco. Se la fokusdistanco estas mallonga, (20...30mm) la bildo povas esti akra sen la regulo de la lensodistanco. (Tamen oni devas esti singarda se fotografas per tiaspecaj aparatoj: -grandoj de proksimaj partoj de objektoj sur la bildo estos nerealaj, ekz. la nazo de persono estos tro granda. Ekzistas modernaj aparatoj, kie la fotanto devas la aparaton nur direkti al la temo, la reguligon de la distanco, diafragmodiametro, prilumiganta tempo, se estas bezonate la ŝalton de enmuntita fulmolampo mem la aparato aŭtomate faras. Tamen profesiaj fotistoj aŭ spertaj amatoroj pli volonte mem faras la menciitajn reguladojn. Por fari perfektajn bildojn aŭ specialajn efikojn, estas bezonata la kreivo de la fotanto. (Ekzistas aparatoj kiuj estas funkciigeblaj kaj aŭtomate, kaj de la fotanto.) Sur la skatolo de la filmo estas signita la sentivo laŭ diversaj normoj (DIN, ASA, k.a.) La produkto de la prilumiganta tempo kaj lumintenso devas esti konvena al la filmsentivo. La lumintenson oni povas mezuri, sed sperta fotisto povas bone taksigi ĝin. Se la tempo devas esti mallonga, ekz. dum fotado de iu rapide moviĝanta temo, tiam la relativa aperturo devas esti granda (1:1.5, 1:2 ...) Por tiu celo estas bezonataj bonkvalitaj, multekostaj lensosistemoj. Se oni volas akre vidi sur la bildo kaj proksimajn kaj malproksimajn objektojn, devas uzi malgrandan (1:11, 1:16 ...) relativan aperturon. Tiam oni devas konvene plilongigi la tempon. (1/25 ...1 ... Sek.) Sed tiam oni devas uzi stativon, ĉar pro la vibrado de la mano la bildo iĝos malakra. Nun rigardu la uzatajn lensojn. Por simplaj, malmultekostaj aparatoj oni uzas ĉefe dumembrajn sistemojn, kiuj estas iom korektitaj kontraŭ kolora aberacio. Tial iliaj relativa aperturo devas esti malgranda, en la bildkreado partoprenas nur kvazaŭaksaj lumradioj. Se la prilumado estas sufiĉe forta per tiu ĉi aparatoj estas fareblaj bonkvalitaj eĉ artnivelaj bildoj. Nuntempe oni produktas relative malmultekostajn aparatojn kun simplaj lensoj, kun malgranda, fiksa relativa aperturo. La konvenan prilumadon oni certigas per enkonstruitaj fulmolampoj. Tamen okazas, ke oni devas foti en malforta lumo. Ekz. en muzeoj, galerioj estas malpermesata la uzado de fulmolampoj, ĉar ili krom la videbla, ankaŭ postviolajn radiojn emisias. La ofta postviola prilumado damaĝas la objektojn, bildojn. Tiam oni devas uzi longan tempon kaj lenson kun granda lumforto. Se la fotanto devas uzi tre mallongajn tempojn (ekz. 1/1000 sec.) ekz. en sporteventoj, ankaŭ tie oni devas uzi komplikajn lensosistemojn kun granda lumforto. Ĉar la relativa aperturo devas esti garanda, en la bildokreo partoprenas ne nur laŭaksaj radioj. Por redukti la aberaciojn, oni devas konstrui komplikajn, multmembrajn sistemojn. **Ekzistas tiel nomataj „normalaj” fotolensoj.** Ilia fokusdistanco estas proksimume 50 mm. Ilia vidangulo estas simila al la homa vidangulo. Tiaspecaj lensoj estas plej ofte uzataj. Sed ekzistas situacioj, kiam tiuj lensoj estas ne uzablaj. Ekz. en malgranda placo la preĝeja turo estas ne videbla. Aŭ iu volas foti sur la sama bildo larĝan panoramon. Por tiuj celoj estas uzataj la **grand-vidangulaj lensoj.** Ilia fokusdistanco kompare al la dimensio de la film-bildo estas mallonga. Se temas pri normala filmo, la fokusdistanco de tiuj lensoj estas 20...35 mm. **Por fotografii forajn objektojn,** tamen ŝajniĝi ilin proksimaj, **oni uzas tele-lensojn.** Ilia fokusdistanco kompare al la filmdimensio estas longa. Ĝenerale pli ol 100 mm. (la menciitaj fokusdistancoj rilatas nur je filmsurfaco 24 x 36 mm. Por 8 mm larĝa kinofilmo, lenso kun 50 mm fokusdistanco jam estas telelenso.) Ekzistas **lensosistemoj, kies fokusdistanco estas variigebla.** La variado okazas per la movo de iu interna lenso en la sistemo. Dum la fokusdistanco estas ŝanĝata, la relativa aperturo devas resti la sama. Per tiuj „gumo-lensoj” oni povas foti tre komforte, ja ili ebligas

fari pri foraj objektoj grandigitajn pri proksimaj objektoj normalajn bildojn. Modernaj fotoaparatoj ebligas, ke la menciitaj lensosistemoj estu uzeblaj al la sama aparato.

La plimulto de fotoapartatoj apartenas al du grupoj:

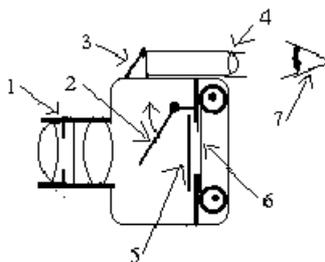
La simpla aparato, kiu estas videbla sur la figuro B-12. Tiu estas kompletigita per malgranda, tre simpla lorno, tra kiu oni povas vidi precize la bildon, kiun la lenso projekcias sur la filmon, se la lumklapo estas malfermata. Tiuj malmultekostaj fotoaparatoj havas tre simpla lensosistemon. Ĝi havas tre malgrandan relativan aperturon, tial la intervalo de la akra bildkreo kaj objektodistanco estas larĝa. Tial la distanco inter la lenso kaj filmo estas konstanta. En multekostajn aparatojn oni muntas valorajn lensosistemojn. La distanco inter la lenso kaj filmo estas ŝanĝebla. Sur la tubo de la lenso estas signita la objektodistanco al kiu apartenas akra bildo. La distanco inter la lenso kaj objekto estas mezurebla per simpla ilo, kiu estas videbla sur bildo B 10-02. La lumintenso estas, mezurebla per optikelektra instrumento kaj la relativa aperturo kaj prilumiga tempo estas regulata laŭ la mezurita lumintenso kaj sentivo de la filmo.

Lumklapoj estas duspecaj: La centraj, kie la rondforman aperturon horloĝmekanismo ŝanĝas de la maksimumo ĝis nulo. La tempo de la prilumado dependas de la rapido de tiu diametro-reduktingo. La uzataj tempoj estas reguleblaj, kaj iliaj valoroj estas gravuritaj apud la lumklapo. Ĝenerale, se temas pri centra lumklapo, la tempoj estas 1/250, 1/100, 1/50, 1/25, 1/10, 1/5, 1/2, 1 sekundoj.

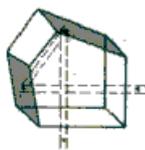
Alia grupo de lumklapoj estas la rigloj. Ili estas plataj nediafanaj materialoj antaŭ la filmo. Sur ili estas parto, kie troviĝas kvareĝa diafragmo, kies larĝeco estas ŝanĝebla, kaj la tempo de la prilumado dependas de la larĝo de la diafragmo. La riglon movas antaŭ la filmo horloĝmekanismo. Tiaspecaj lumklapoj estas konvenaj ankaŭ por mallongaj (de 1/2000 ĝis 1/25 sek.) prilumadaj tempoj.

Alia granda grupo de fotoaparatoj, ĝenerale pli valoraj, estas la movspegulaj. Oni rigardu la skizon kaj funkciadon:

B 10-12



1. Lensosistemo kun ŝanĝebla diafragmo
2. Turnigata spegulo
3. Kvinfaceta prismo
4. Ĉe okulo-lenso, kiu funkcias kiel lupeo
5. Rigla lumklapo
6. Filmo
7. Okulo

B 10-121**Kvinfaceta prismo**

En baza stato inter la spegulo kaj optika akso estas 45 gradoj. Realan bildon lensosistemo (1). per la spegulo (2) kreas en supra ebena. Ties distanco ĉiam egalas al la distanco inter la filmo (6) kaj lenso. La inversdirektan bildon kvinfaceta prismo (3) turnas al la originala direkto kaj samtempe la lumfasko turniĝas 90 gradojn. Tial per ĉe okulo-lenso (4) oni vidas originaldirektan grandigitan virtualan bildon. Oni ŝanĝas la lokon de la fotografia lenso tiel, ke la bildo estu laŭeble la plej akra. Helpas tion, se la fotanto uzas maksimalan aperturon, kaj en certaj aparatoj speciala prismosistemo. Se la bildo ŝajnas akra, tiam ĝi estos akra ankaŭ sur la filmo dum la prilumado. La rigla lumklapo situas proksime al la filmo. Se oni premas la startig-butonon unue la blendo revenas al la originala loko. Poste la spegulo turniĝas supren, iĝas paralela kun la optika akso, kaj ne ĝenas la bildon. Fine la lumklapo flankentiriĝas laŭ la antaŭe regulita maniero, kaj la filmo estos prilumata. (Samtempe ekfunkcias ankaŭ elektra ŝaltilo, kaj se estas bezonate, ŝaltas la fulmolampon.) La filmo estas streĉita inter du cilindroj, sur kiuj ĝi estas volvita. La fortiro de la prilumigita filmo kaj la streĉo de la mekanismo de la lumklapo okazas samtempe, per la premo de la sama braketo. (En modernaj aparatoj tiujn faras aŭtomato.)

Kiel jam estis menciite en modernaj, multekostaj aparatoj la supre priskribitaj procezoj okazas plene aŭtomate. La fotanto devas nur celi la temon, poste premi la startilbutonon.

Estas nepre menciinde la plej novaj fotoprocezo, kiu uzas nek filmon, nek fotopaperon. La lenso projekcias la bildon sur matrikso, kiu konsistas el tre delikataj tre malgrandaj optikelektraj elementoj. En la aparato estas malgranda komputilo kiu havas grandan elektronikan memorion. Post la prilumado tiu konservas la bildojn, kiel serion de elektraj signoj. Tiuj bildoj estas projekcieblaj sur ekranon de hejmaj komputiloj aŭ televidaparataoj.

10.5 Kino, video-aparatoj

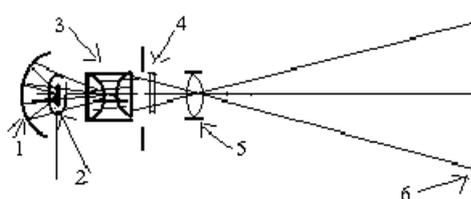
Post tiu ĉi detala traktado de fotografado jam estos facile kompreni la funkciadon de kino kaj video-registritoj. La funkciado de aparatoj, per kiuj **oni povas registri moviĝon** de personoj, bestoj, objektoj, **baziĝas je la inercio de la okuloj**. Tiu inercio signifas, ke la okulo ne povas percepti akrajn, apartajn bildojn, se inter ili la tempointervalo estas ne pli ol 1/10 sekundo. **Se inter la bildoj, kiuj sekvas unu la alian**, kaj ili nur iomete diferencas, se oni montras aŭ **projekcias el tiuj bildoj pli ol 16 dum unu sekundo**, tiujn bildojn oni vidas **kvazaŭ okazus kontinua moviĝo**. La kinofilm-registritilo el optika vidpunkto funkcias kiel fotoaparato. Speciala mekanismo puŝadas anataŭen la filmon, kiu estas longa rubando kun perforaĵoj. La prilumado okazas en tiu momento, kiam la filmo staras. Por profesiaj celoj oni uzas negativajn filmojn, kaj post la rivelado oni faras kopiaĵojn. Amatoroj ĝenerale uzas specialajn filmojn, kiuj post la prilumado kaj komplika kemia procezo fariĝas diapozitiva filmo. Okupiĝi pli detale pri tiu ĉi temo jam estas ne inde, ja anstataŭ tiu **nuntempe jam oni uzas ĉefe optikelektronikan reregistradon**. La tielnomataj „video-registritoj” laŭ

optika vidpunkto funkcias kiel kinofilm-registritoj, sed anstataŭ filmo la informoj pri la bildo; koloro, intenso, formo, moviĝo estas registritaj en formo de elektraj impulsoj sur rubando, kiu estas simile al magnetofona bendo. Tiu ĉi metodo havas multajn avantaĝojn. Ekzemple la registraĵo tuj post la registro per la sama aparato estas rigardebla, kontrolebla, se estas necese, ripetebla. La sama bendo plurfoje estas uzebla, se jam la antaŭa registraĵo estas ne bezonate. Tiaspecaj aparatoj estas jam preskaŭ plene aŭtomataj. La uzanto devas nur direkti la lenson sur la temon, kaj premi la startigbutonon. Tamen ili ebligas ankaŭ plurajn eksterajn reguladojn. **La enhavo de la magnetita rubando pere de video-recitilo estas vidigebla per normala televidilo.** Eĉ menciis estas ne bezonate, ke kune kun la bildo ankaŭ la voĉo estas registrita, kaj aŭdigebla per la televidilo.

10.6.1 Projekciiloj

Optikaj projekciiloj, diversspecaj, estas vaste uzataj. La plej konata estas la projekciilo por diapozitivaj filmoj.

B.10-13



La funkciado: sfera spegulo (1) projekcias la lumon de lampo (2) (inkandeska lampo, kun speciala spiralo) sur lensosistemon (3). La distancoj estas elektitaj tiel, ke la lampo estu en la fokuso de spegulo (1). La fokuso de lensosistemo (3) estas proksimume en projekcia lensosistemo (5). Tiamaniere estas atingebla, ke la maksimumo de la lumo homogene trafu la filmon (4), kaj de tie portante la bildinformojn atingu lensosistemon (5). La loko de lensosistemo (5) estas ŝanĝebla, tial sur ekranon (6) estas projekciebla akra bildo. La ekrano devas esti blanka kaj difuzsurfaca, ke ĝi laŭeble en granda angulo samintense reflektu la lumon. Por atingi la maksimuman lumintenson, ankaŭ la loko de lensosistemo (3) estas ŝanĝebla. Nature la bildo aperus inversdirekte; por korekti tion, oni metas la filmon en la aparaton inversdirekte. La filmo povas esti en rubanda stato, sed valoraj filmoj estas dispecigitaj je unuopaj bildoj, kaj metitaj strikte inter du vitroplataĵojn, kaj kadritaj. Tiamaniere oni povas gardi la filmojn kontraŭ difektiĝo.

10.7 Projekciado de kinofilmoj

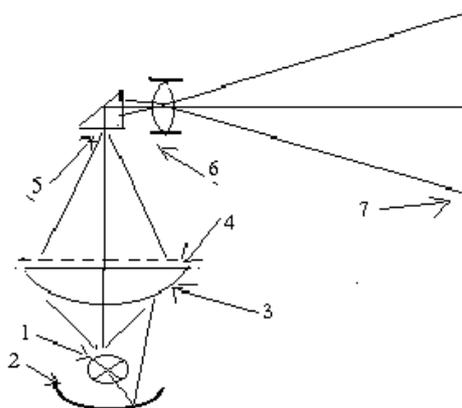
El optika vidpunkto **la aparto estas esence sama al la ĵus traktita projekciilo.** La diferenco estas, ke la **diapozitivo- bildoj sur longa rubando estas lokitaj unu post la alia.** **La rubando** estas volvita sur cilindroj, kaj **estas regule perforita.** Per la perforaĵoj la rubando estas **antaŭen puŝata en ĉiu sekundo 25 foje.** (Amatoraj kinofilmoj 16-foje.) Estas grave, ke la registrado kaj projekciado okazu laŭ la sama ritmo.) Dum la movo de la filmo la itinero de la lumo estas fermata per turnita ŝirmilo. Tiamaniere estas eviteblele vibrado de la bildo, kaj **la moviĝoj ŝajnas kontinuaj.** Por la prilumado de la filmo estas uzata grandpovuma (pluraj kilovatoj) elektra lampo

(nuntempe ksenon-gas arko). Tio estas necesa, ĉar la grandan ekransurfacon devas tafi granda lumintenso.

La voĉo estas registrita sur la rando de la filmo, sur la t.n. „voĉo -strio”. Tie la filmo estas pli malpli nigra, proporcie al la laŭto kaj ritmo de la voĉo. Se per konvena elektrooptika aparato la lego kaj **transformo de tiuj signoj okazas en sonojn laŭ la ritmo de la registro; oni aŭdas la originalan registritan voĉon.** Anstataŭ tiu ĉi optika voĉregistro, oni uzas ankaŭ magnetan voĉregistradon. Tiam la „voĉ-strio” estas simila al magnetofona sonbendo.

La skribo-projekciilo estas bona helpilo por prelegantoj.

B 10-14



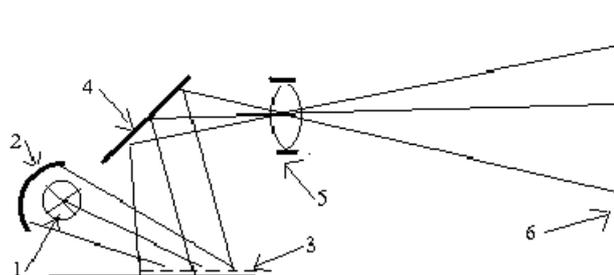
1. Elektra lampo kun granda povumo
2. Sfera spegulo
3. Kolekta lenso kun granda diametro
4. Travidebla folio kun skribo kaj desegno
5. Prismo.
6. Projekcia lenso.
7. Ekranon

La funkciado: Lampo 1. per sfera spegulo 2. kaj lenso 3. forte, homogene tralumas la vitroplataĵon, sur kiu estas travidebla folio 4. kun la projekciataj bildoj kaj skribaĵoj. Ties surfaco estas relative granda, ekz. A/4 formata. **Preleganto ankaŭ dum la pelego povas skribi aŭ desegni sur tiu ĉi folio.** Prismo 5. turnas orten la lumdirekton, lenso 6. projekcias la bildon sur ekranon 7.

La projekciilo havas grandan lumintenson, tial ĝi estas uzebla eĉ en ne tute malluma ejo. Tial la aŭskultantaro povas fari ankaŭ notojn dum la prelego.

Alia, nuntempe malofte uzata projekciilo estas la **reflekt-projekciilo**.

B 10-15



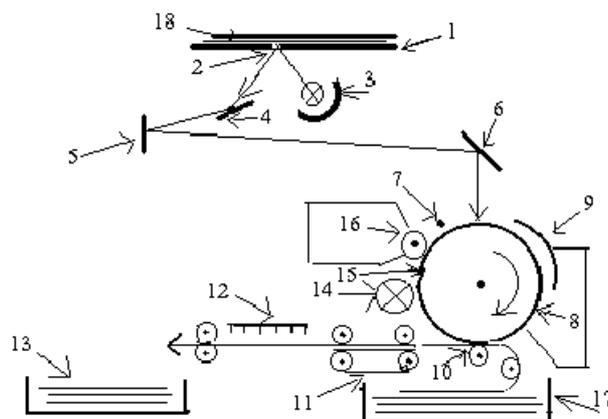
Lampo (1) kun sfera spegulo (2) forte prilumas ebenon (3), kie **povas esti ajna presita teksto, bildo, skribaĵo aŭ kompleta libro**. La reflektitan lumon spegulo (4) direktas en lenson (5), kiu projekcias la bildon sur ekranon (6). Ĉar la prilumado de la ekrano estas ne forta, **tiu projekciilo estas uzbla nur en malluma ejo**.

10.8 Kseroks-kopiilo

estas tre ofte uzata optika aparato. **Ĝi ebligas rapidan kopion de ia ajn teksto aŭ desegnaĵo**. Hodiaŭ jam **ekzistas eĉ koloraj kopiiloj**, tiel perfektaj, ke iuj uzas ilin por fari falsajn monbiletojn, kiujn nur spertuloj povas malkaŝi.

Jen la skemo kaj funkciado de tre simpla kseroks-kopiilo.

B 10-16



La kopiota teksto aŭ desegnaĵo estas metita sur vitroplataĵon (18). Sub la vitro moviĝas -sinkrone kun cilindro (8) optika sistemo, kiu konsistas el grandpovuma lampo (3), **mallarĝa travidebla fendo (2)**, (la ceteraj partoj de la vitro estas kovritaj netravideble) tra kiu lampo (3) **forte prilumas laŭ mallarĝa linio la kopiaton**. **Optika sistemo**, kiu konsistas el speguloj (4, 5, 6) kaj cilindra lenso, **projekcias la bildon** pri la prilumita strio **sur la surfaceton de la cilindro 8**. La surfaco de tiu metalcilindro estas kovrita per **selen-tavolo**. Sed antaŭ la projekcio **tiu ĉi selen-tavolo estas elektre ŝargita** per maldika drato. (7). Inter tiu kaj la cilindro la tensio estas 5...10 KV. Je la efiko de la prilumado pro duonkonduktilaj procezoj **la prilumataj surfac-partoj perdas la ŝargon**. La ŝargoperdo estas proporcia al la intenso de la prilumado. Do sur la cilindro estiĝas bildo el elektraj ŝargoj. Al la plej helaj partoj apartenas la plej malaltaj tensioj, al la plej malhelaj, la plej altaj tensioj. Ujo (9)

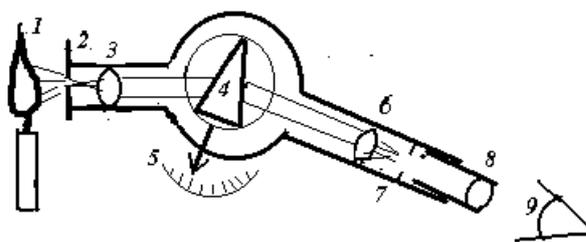
enhavas specialan **farbo-polvon**, kies eretojn altiras la ŝargitaj cilindro partoj, proporcie al la grando de la tensio. Tiamaniere estiĝas vera, videbla, **pozitiva bildo sur la cilindro-surfaco**. Tiun bildon cilindro (10) premas sur paperon, kiu dume alvenis el ujo (14), kaj transportsistemo (11) tiras plu. La polvo-bildon antaŭruĝaj radiantoj (12) varmigas ĝis degeliĝo de la farbo-polvo, tial la plena bildo gluiĝas al la papero per la absorbado de la farbo en la paper-porojn. Estas grave, ke la farbo havu malaltan fand-temperaturon, ke dum la antaŭruĝa varmigo la papero restu nedifektita. (Ekzistas ankaŭ alia metodo, laŭ kiu la farbo per premado estas fiksita al la papero.) La pretaj kopiaĵoj kolektiĝas en la ujo (13). Post la kopia ciklo la cilindro **denove devos esti uzebla**. Tial lampo 14, per malŝargigo forigas la restintajn ŝargojn kaj purigilo (15) forigas la farbo-restaĵojn. Modernaj aparatoj la kopiojn povas fari pli grandaj kaj pli malgrandaj ol kia la originalo estas. Tio estas atingebla per rapido ŝanĝo de la cilindro kaj per samtempa konvena kurbigo de la cilindro-lenso. La kolora kopiado uzas tri baz-kolorojn unu post la alia, simile, kiel la farba presado okazas. (Nature ankaŭ la prilumado de la kopiato devas okazi per tri diversaj koloroj.) Nuntempe jam ekzistas plene aŭtomataj kopiiloj, regataj per komputilo. Ekzistas tipo, kie la bildo de sur la cilindro estas transportata en memorion de komputilo. La komputilo korektas la eventualajn ne perfektajn literojn, kaj per komputila presilo surpaperigas la tekstojn aŭ bildojn.

10.9 La spektroskopio

La spektroskopio estas grava tereno de la optiko, ĉar ĝi estas **efika ilo por esplorado de la materio**. Ĝia bazo estas la disperso; nome prismoj aŭ optikaj kradoj dispersas la lumon. Diversgrade ili devojigas la diversajn ondolongajn lumradiojn. En la ĉapitro 5.12 estas priskribita, ke la prismoj plej forte devojigas la violkoloran lumon. Ĉapitro 6.3 traktas, ke optikaj kradoj plej forte devojigas la ruĝajn lumradiojn. Por spektroskopio estas uzataj kaj prismoj, kaj optikaj kradoj.

La tradicia spektroskopo havas du tubojn kaj meze prismon (aŭ optikan kradon), kiu ĉirkaŭ vertikala akso estas turnebla. Jen, skizo pri la plej simpla spektroskopo:

B.10-17



Lumfonto (1), ekz, gasflamo, en kiu oni povas **vaporigi la esplorendan materialon**. (Se oni metas salon en gasflamon, ĝia koloro fariĝos flava pro la radiado de natrio. La kupro kolorigas la flamon verda. Pluraj materialoj estas determineblaj per simpla kolorigo de flamo.) Ties lumo tra mallarĝa fendo (2) eniras la tubon, tie lenso (3) paraleligas ĝin, poste ĝi trafos la prismon (4). (aŭ kradon). Ĝi estas muntita sur disko, kiu estas turnebla ĉirkaŭ vertikala akso. **Sur la rando de la disko estas skalo, kaj al ĝi apartenas signo (5)** La prismo diversgrade deflankigas la diversajn ondolongajn radiojn. En la alia tubo lenso (6) kreas realajn bildojn sur diafragmon (7) pri diafragmo (2); unu apud la alia en diversaj koloroj. **La larĝo de diafragmo (2) estas variebla**, oni uzas ĝenerale mallarĝan 0.01...0.1mm-an diafragmon, **por ke la ondolonga**

diferenciga kapablo estu granda. La bildon de la linioserio oni povas observi (9) per lupeo (8). (Nature la konstruelementoj estas fermitaj en skatolo, kiu malhelpas la ĝenon de la ekstera lumo.) **Se lumfonto (1) estas ardanta solida korpo,** ekz. inkandeska lampo, **aperos kontinua spektro,** kiel tiu estas de la ĉielarko. **Se oni observas la spektron de ardantaj gasoj,** kiel jam oni menciis, se en gasflamon oni metas iun materialon, eks. salon, kiu tie forvaporigās, aŭ observas la spektron de elektra gasmalŝargiĝo, **aperas diverskoloraj, apartaj linioj, kiuj karakterizas la koncernan materialon.** Se en la tubon, kie la reala bildo de la linioj aperas, oni muntas indikilon (ekz. pinglon), poste turnas la prismon kun la skalo, **oni povas noti, ke al kiu linio kioma skalostrio apartenas.** Poste oni metas antaŭ la **spektroskopon gasmalŝargajn tubojn,** en kiuj estas konata, ke al la **spektrolinioj kiuj ondolongoj apartenas. Oni povas fari tabelon kaj povas desegni kurbon, kiu montros,** ke ĉe la prismo **al kiu skalostrio kiu ondolongo apartenas.** La observado plej ofte okazas ne okule, sed en la tubon, kie la reala spektrobildo aperas, oni metas mallarĝan diafragmon (7)., tiam per optoelektronika instrumento, ekz per elektronmultobligilo oni povas ne nur konstati la ekziston de iu linio, sed **oni povas mezuri ties lumintenson;** ĉar la materialojn karakterizas la spektrolinioj kaj ties lumintenso, **oni povas determini la ekziston** de certaj materialoj en nekonata miksaĵo. **Ekzistas spektrografoj,** en kiuj **la plena spektro** estas projekciita sur **fotografian filmon.** Post la rivelado la ekzisto kaj nigriĝo de la linioj ebligas la determinon de la ekzamenata materialo. **En modernaj aparatoj** anstataŭ filmo **estas serio de tre delikataj, tre malgrandaj fotodiodoj. Ili estas konektitaj al komputilo, kiu sur la ekrano desegnas la grandon de intenso de la spektrolinioj laŭ la funkcio de la ondolongo.** En la memorio de la komputilo estas konservataj spektrokurboj de multaj konataj materialoj, uzante ilin, **mem la komputilo povas kompari la spektron** de la nekonata materialo, tiamaniere ĝi povas determini la kvaliton kaj kvanton de la esplorenda materialo.

En tiuj spektroskopoj kiel lumfonton **nuntempe oni uzas du manierojn: Emisia spektroskopio, kie en alttemperatura flamo aŭ plasmato estas vaporigita la esplorenda materialo.**

Atomabsorbiga spektroskopio: Alttemperatura flamo vaporigas, atomigas la esplorendan materialon. Tiu flamo estas tralumata per **speciala gasmalŝarga lampo,** kiu **radias la spektron** de konata materialo. Se la esplorenda materialo estas sama, kiu estas en la spektro-lampo, **aperas nigra linio en la loko de la spektrolinio.** El la du metodoj oni uzas, kiu estas pli efika koncerne la esplorendan materialon .

Kvantan analizon oni povas fari, se **antaŭe oni faras solvaĵojn el puraj materialoj,** kiuj estas samaj kiel la esplorendaj. **La koncentriteco de tiuj solvaĵoj estas konata. La analizo okazas per komparo.** En modernaj aparatoj la komparon faras komputilo, kaj la rezultoj aperas sur ekrano, aŭ presite sur papero. La ondolongo-intervalon oni povas varii per la ŝanĝo de la prismo aŭ de la optika krado. **La plej gravaj karakterizoj de tiaspecaj aparatoj estas la ondolongo-intervalo en kiu ili povas funkcii,** kaj la **minimuma ondolongo-diferenco, kiu estas aparte perceptebla; la diferenciga povo.**

10.10 Laseroj – hologramoj

Lasero estas **speciala lumfonto;** ĝi radias **kvazaŭ paralelan lumfaskon el koheraj radioj.** Ekzistas laseroj ekde tute malgrandaj povumaj, proks. de kelkaj mW-oj, ĝis

potencaj povumaj, kiuj estas uzeblaj kiel armiloj por neniigi aviadilojn, raketojn, tankojn. **Laseroj povas emisii kontinuan kaj impulsan radiadon.** Laseroj emisias radiadon, kies koloro **dependas de la lasermaterialo.** Ĉiu el ili radias nur la propran koloron. Sed **ekzistas laseroj kies radiadkoloro estas variigebla** ekde la antaŭruĝa ĝis la postviolaj koloroj. La menciitaj ecoj ebligas la plej **diversajn uzadojn**; plurajn tiajn, **kiuj sen laseroj estus nesolveblaj.** El inter ili la plej interesa estas la **holografio.**

10.11 Funkciado de laseroj

La nomo konsistas el la komencliteroj de anglaj vortoj: „Light Amplifikation by Stimulated Emission of Radiation”. „LASER” (Fortigo de Lumo per Stimulata Emisio.)

Ĉiaspecaj ekzistantaj lumfontoj emisias **lumradiojn el atomoj, per la reenfalo de ekscititaj elektronoj aŭ jonaj al la baza energionivelo.** La ekscitoj, jonigoj, reenfaloj okazas neregule, kaj la ekscitita aŭ jonigita stato de elektrono **daŭras nur mallongan tempon.**

Laseroj funkcias nur tiam, se pli ol duono de la ĉeestantaj atomoj estas ekscititaj aŭ jonigitaj. Tio estas la kondiĉo de laserfunkciado. Se en tiu ĉi stato pro impulso de fotono okazas nova ekscitiĝo, pro kio **unu elektrono reenfalas al la originala nivelo, povas okazi, ke tio ekirigas amasan reenfalon en la sama tempo, tial elliberiĝas granda lumenergio.**

Oni uzas **diversajn lasermaterialojn.** Solidajn **kristalojn, gasojn, likvaĵojn.** Ankaŭ la maniero de **ekscitigo estas diversa:** Elektra kurento, lumo, kemia reakcio, alia lasero.

La **unua lasero** estis farita el tre pura **rubenkristalo.** Funkciigas ĝin fortaj lumimpulsoj de speciala fulmolampo. (Konata el la fotografado). Ankaŭ nuntepe oni uzas tiaspecajn laserojn, se malgranda lumpovumo estas bezonate.

La **gaslaseroj** estas malŝargigaj tuboj. Plenigas ilin malaltprema gaso. Plej ofte oni uzas **karbodioksidon, helium-neon-miksaĵon, kriptonon, vaporon de diversaj metaloj.** La koloro dependas de la speco de la gaso, la povumo de la dimensio kaj de la grandeco de kurento kiu fluas per la jonigaj gasatomoj.

Menciindaj estas ankaŭ la **laserdiodoj,** kies apliko jam estas tre multflanka en la ĉiutaga vivo. Ili estas **specialaj lumemisivaj diodoj kun malgrandaj dimensio kaj povumo.** Plej ofte ili radias ruĝan laserlumon.

Komuna konstruelemento estas en plimulto da laseroj la **cilindroforma tubo sur kies du finon kovras tre precize orte speguloj.** Unu el ili **reflektas** la lumon preskaŭ **centprocente,** la alia **malgrandan parton tralasas.** La lumradioj konstante reflektiĝas tien kaj reen inter la du speguloj. La tralasata parto estas la laserlumo.

Menciinde estas la **farbo-lasero.** Tie laserlumo trapasas ujon en kiu estas **kolora likvaĵo, kiu kolorigas la laserlumon.** Tamen tiu ĉi koloro estas ne perfekta spektrokoloro. Tial la trapasantan lumon oni kondukas tra prismo, per kies turno la bezonata ondolongo estas akirebla.

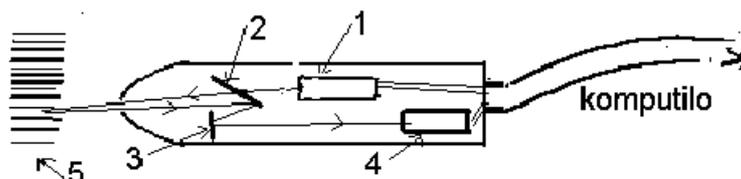
10.82 Uzado de laseroj

Ĉiutage oni renkontiĝas kun uzado de laseroj. Ili estas ĝenerale malgrandpovumaj laseroj. En vendejoj, apotekoj ili apartenas jam al ĉiuj kasomaŝinoj, kiel ĉefelementoj;

la „**lumkrajonoj**”. Per ili la kasisto „legas” la „**strikodon**”, kiu jam troveblas preskaŭ sur la skatolo aŭ etikedo de ĉiu varo. **La strikodo estas serio de diverslarĝaj, diversdistancaj strioj**, per kies senfina variaĵo ĉiaspeca varo estas markebla, distingebla. La bazo-**strikodo ĝenerale estas presita per nigra farbo sur hela bazo**. La esenco: **la nigra strio apenaŭ, la hela intervalo inter la strioj bone reflektas la lumon**.

Jen la lumkrajono kaj strikodo:

B 10-12



La funkciado:

Malgranda lasero (1) (plej ofte laserdiodo) radias tra duontranslasiva spegulo (2) je strikodo (5). La kasisto tiras la pinton de la lumkrajono laŭ la strikodo de la komenco ĝis la fino. Tiamaniere **estiĝas lumimpulsoj**. De tie la jam laserlumo-impulsoj reflektiĝas, kaj trafas la dorsflankon de spegulo (2) Refletiĝinte de tie, ĝi trafas spegulon (3) poste detektilon (4). La **detektilo** povas esti fotodiodo aŭ fotopilo, kiu **la lumimpulsojn transformas elektraj impulsoj**. Komputilo prilaboras ilin, deĉifras la kodon, determinas la antaŭprogramitan prezon, kaj vidigas ĝin sur la ekrano de komputilo. Se temas pri pluraj varoj la kasomaŝino adicias la prezojn, kaj presas fakturon. (Eblas kontakti la kaso-komputilon kun centra komputilo de la magazeno, tiamaniere en ĉiu momento estas determinebla la ekzistanta varo-stoko, kaj la bilanco de la kaso.)

Alia **populara apliko** de malgrandaj laseroj estas en **la poramuzaj muziko kaj videoaparatoj**. Anstataŭ magnetofona rubando ili uzas tielnomatan „**kompaktdiskon**”. Ili estas similaj al normalaj malgrandaj gramofondiskoj, sed tre densa kaj delikata **spirallinio enhavas** ne bildojn de vibroj, sed per lasero faritaj, **kavetojn**. **La surfaco de la disko estas kovrita per maldika metalspegulo**. La voĉo kaj bildelementoj **estas registritaj ne analoge sed diĝite**. Tiamaniere en tre bona kvalito estas registritaj multegaj informoj. Ekzemple **kompaktdisko (CD)** kies diametro estas 115 mm **povas registri unuhoran muzikon aŭ ludfilmon**.

Se temas pri registro de presitaj tekstoj, la kapacito estas eĉ pli granda. Plena, **ampleksa leksikono, enciklopedio estas registrebla per kelkaj diskoj**. (Nature nur la unua disko estas farita per lasero, la kopioj, laŭ tiu, per prestekniko.) Sed ankaŭ la **moderna komputadtekniko ne povas malhavi la laserdiskojn**. La grandaj programoj estas registritaj sur laserdiskoj. Unu **laserdisko havas 650 MB** (megabajtoj) kapaciton dum unu **magneta disko** „nur” maks. **2 MB** –ojn.

Tiuj laserdiskoj estas legataj per ilo, kiu estas simila al la jam traktita laserkrajono. **Grandega avantaĝo** estas krom la giganta kapacito, ke **la laserkrajono dum uzado ne tuŝas la diskon** (trafas ĝin nur la laserlumo), tial **la vivdaŭro de la disko** (kaj ankaŭ tiu de la krajono) teorie estas **senfina**, dume la **kvalito restas konstante bona**. Nature por fari el la impulsoj muzikon aŭ ludfilmon estas bezonate speciala aparato aŭ bonkvalita, moderna komputilo.

Laseroj, kiel jam estis menciite krom la traktitaj, estas uzeblaj por la plej diversaj celoj. **Per „lumkablo”, kie plena reflektiĝo fermas la lumradion en maldika vitrofibro, laserlumo estas konduktebla ien ajn. La laserlumo povas transporti en la formo de impulsoj informojn multe pli ol la elektra informo-transporto.**

En la medicino la leseroj havas plurajn aplikeblecojn kaj en la **diagnostiko kaj en la terapio**. Per maldikaj flekseblaj lumkonduktaj kabloj **laserlumo estas konduktebla en la kavajoj de la korpo por prilumi ĝin**, kaj la reflektita lumo estas reenkondukebla per lumkondukta kablo. Tiamaniere la **internaj kavoj**, ekz. surfaco de stomako **estas bone ekzamineblaj**, eĉ apliko de iom pli forta laserlumo estas konvena por **fari malgrandajn operaciojn** sen sangofluo.

Laseroj estas bone uzeblaj por **kuraci** certajn **haŭtmalsanojn**. Tamen eble plej utile ili estas uzeblaj en la **okulkuracado** (operacioj sur la retino, korekto de la formo de korneo.) ..

Grandpovumaj laseroj en la industrio estas bone **uzeblaj kiel laboriloj**: boriloj, segiloj gravuriloj veldiloj ktp. Per ili la materialo estas tre precize prilaborebla, forfalaĵo ne estiĝas, ĉar ĝi tuj forvaporigaĝas. Ĝi estas bone uzebla en traktado de surfacoj. Per spegulo estas direktebla, per lensoj estas variebla la diametro de la radiofasko.

Per ili estas **prilaborebla ĉiaspeca materialo** de mola ŝaumo ĝis diamanto.

Laserlaboriloj estas bone regeblaj per komputiloj, tial ili estas **tre konvenaj por aŭtomataj aparatoj**.

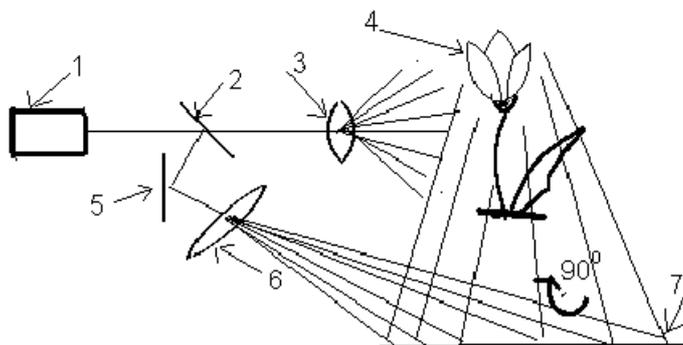
Laserlumo estas tre bone uzebla por diversaj **distancmezuroj**, en geodezio, en konstruadoj. Per ili oni faris tre precizan distancmezuron inter Tero kaj Luno. Pro la kohereco ankaŭ **en interferometroj** ili estas tre konvenaj.

En kemio per laserradioj oni povas influi certajn reakciojn.

Intensaj esploradoj okazas ankaŭ en armadfarado. Kiel direktiloj de raketoj, obusoj, bomboj ili jam estas uzataj, sed laŭ mia scio, kiel senperaj detruaj armiloj ankoraŭ ne.

10.13 Holografio

Tre interesa uzado de laserradioj estas en la holografio. **Tio estas speciala fotografado**. Pri la objektoj normala fotografio povas registri la intenson de la reflektita lumo (per tio la formojn, lumojn, ombrojn) kaj kolorojn, **la holografio registras ankaŭ la fazojn**. Tio ebligas, ke la objektojn, fotitajn tiamaniere, **ŝajnigas** tiel, **kvazaŭ senpere oni rigardus la veran objekton**. La hologramo estas tia bildo, kiu krom la amplitudo, koloro, ankaŭ la fazon registras.

B 10-19 Farado de hologramo:

Lumon de lasero (1) oni direktas sur duontranslasivan spegulon (2). **Parto el la lumo trapasas kaj trafas lenson (3). ĝi disĵetas la laserlumon kaj la radioj prilumas objekton (4).** De la objekto ili reflektiĝas kaj trafas (7) **fotografian plataĵon.** Alia parto de la laserlumo trafas spegulon (5), post la direktoŝanĝo lenson (6) trafas **la referenca laserlumo.** Tie ĝi disĵetiĝas kaj prilumas **la fotografian plataĵon.**

Estiĝas interfero-bildo sur la plataĵo, kaj tiu registras ĝin. Poste oni rivelas la fotografion pri la interfero-bildo. Se oni rigardas tiun bildon el la direkto de la referenca lumo, **vidas ŝvebantajn bildon en la spaco; ĝi ŝajnas precize tia, kvazaŭ oni rigardus la originalan objekton.** La grandeco de la bildo ĉiam estas egala al la grandeco de la objekto.

La faro de hologramoj okazas sen projekcio per lensoj!

Hologramoj havas plurajn **uzeblecojn.** Ekz. **muzeaj objektoj** povas esti prezentitaj per hologramoj. La spektantoj havas iluzion, ke ili vidas la originalan objekton.

Bankaj kartoj, telefonkartoj, se estas provizitaj per hologramo, ili estas **ne kopieblaj, falseblaj.** Ĉar la dimensioj estas precize samaj kun la originalo, certaj distancoj sur hologramo estas pli facile mezureblaj ol sur la originala objekto.

Krome **hologramoj, kiel ludo de laserlumoj estas uzataj en amuzejoj, estigante tre belajn, interesajn lumefikojn.**

El malgrandaj hologramoj oni faras eĉ juvelojn, lokigantan ilin en konvenan kadron.

Ĉar tiuj kreaĵoj ankoraŭ estas tre junaj, **multaj aplikeblecoj ankoraŭ atendas eltrovintojn.**

Konsultita literaturo:

Bakonyi Gábor: Termodinamika – Optika – Atomfizika (Termodinamiko-Optiko-Atomfiziko)

Bernolák Kálmán: A fény (La lumo)

Brückner János: Optika (Optiko)

Feynman: (En serio) Optiko

Holics László: Fizika (Fiziko)

Lynn Myring & Maurice Kimmit: Lézer (Lazero)

N.D. Papalekszi: Fizika (Fiziko)

Sárközi János: Modernaj elektraj lumiloj

Texas: Optoelektronikai receptek (Receptoj por optikelektroniko)

Registro

Abbe	5.3.8	bruniĝo de haŭto	7
Abbe-numero	5.3.8	centra lumklapo	10.4
absoluta refraktivo	5.1	centro de la lenso	5.3.12
absorbado	3.1, 8.8	cilindro kun selen- tavolo	10.8
akcesoraĵo	3.4	cirkle polara	7.2
akomodigo	9.2	cirkvito de lumtubo	3.4
akra bildo	5.3.7		
amortiza vibrado	8.1	ĉefebenoj	5.3.4
amplitudo	6.1	ĉefpunktoj	5.3.4
amplitudo-objektoj	10.2	ĉe objekto-lenso	10.2
amplitudo-vektoro	6	ĉe okulo-lenso	10.2
ampolo	3.3	ĉielarko	8.4.3
analizilo	7.3		
Angström	1.5	dedukto pri formulode lenso- fokusdistanco	5.3.1
angul-grandigo	5.3.3, 10.1	defopmiĝo de la bildo	5.3.8
anodo	3.4	Descartes	8.4.3
antaŭruĝa lumo	1.5	devojiĝo	6.1, 6.12, 6.22
antaŭruĝa radio	8.21	devojjigitaj radioj	6.4.4
apeerturo	5.3.6	diafana	2.6
apostilbo (asb)	2.6	diafana materialo	8
astigmateco	5.3.8	diafragmo	5.3.6
atmosfero	8.21	diametro de la lenso	5.3.1
atomabsorbiga spektroskopio	10.9	diapozitiva filmo	10.6.1
averaĝa tera temperaturo	8.21	diferenciga kapablo de okuloj	9.2
		diferenciga kapablo de teleskopoj	6.4.5
Bartholin	7.4	diferenciga povo de optika krado	6.3.1
bastonetoj	9.2, 9.4	difraktita bildo	6.3.1
Bessel-a metodo	5.3.4	difrakto	6.4.4, 6.12, 10.3
Bewster-angulo	7.2, 7.3	difrakto ĉe malgranda disko	6.2
bilddistanco	5.3.3	difrakto per rondforma truo	6.21
bildkreo	4.3.1	difuziga materialo	2.6
bildkreo de maldikaj lensoj	5.3.3.	dikaj lensoj	5.3.3
bildo pri lampoj		dioprio de la lenso	5.3.1
bildo pri lampoj kun la spektroj	3.4	disjetiĝo de la lumo	8.4
bildpunkto	5.3.2	disperso	10.9
bildregistro per mikro- elektronika matrikso	10.4	disperso de la lumo	8.5
biomaso	8.21	disperso-kapablo	6.3.1
blanka koloro de nuboj	8.4.2	distanc-mezurilo	43, 10
blua koloro de la ĉielo kaj maro	8.4.1	distanco de akra vido	9.2
Bohr-modelo	8.6	diverĝiga lenso	5.3
brilaj s2.6		diversgradaj spektro	6.3
brilo de diamanto	8.51	duaksa kristalo	7.4
		duone travidebla spegulo	6.3.4

duonombro	4.2	foot-Lambert (<i>f</i> <i>l</i>)	2.6
duon-ondolonga plataĵo	7.51	foren vidanto	9.2
duop-konkava lenso	5.3	forlasangulo	5.2
dusfera lenso	5.3	formulo de Descartes kaj Snellius	5.1
ebena angulo	5.3.6	formulo por fokusdistanco	
ebena spegulo	4.3	formulo por...	
ebene polara	7.2	fokusdistanco de lenso	5.3.1
eben-konkava lenso	5.3	formuloj de Fresnel	7.2 fosforeska
eben-sfera lenso	5.3	tavolo	3.4
efikoj de postviolaj radioj	8.7	fotoaparato	5.3.3
Einstein	6.4.3	fotodiodo	2.5
ekbrul-tensio	3.4	fotodiodo-serio	10.9
ekrano	5.3.4	fotoelektroniko	8.21
ekranoj de televidiloj, monitoroj	9.3	fotografiaj instrumentoj	10.4
ekscititaj gasoj	3.4	fotokemio	8.21, 10.4
eksterordinara radio	7.4, 7.5	fotometrado	2, 2.5
elektra arko	2.6, 3.3, 3.4	fotono	1.5, 6, 6.1, 8.1
elektra kampo	3.4	fotopilo	2.5
elektra rezistoro	33.4	fototransistoro	2.5
elektra ŝarĝo	6	Fraunhoffer-a difrakto	6.12
elektraj impusoj	10.2	Fraunhoffer	8.21
elektre izolita materialo	8	frekvenco	1.3, 1.5
elektre konduktiva materialo	8.1	Fresnel-a difrakto	6.12
elektromagneta kampintrenso	6	Fresnel-aj zonoj	6.13
elektromagneta ondo	1.3, 3.4, 6	frukto-sukero	7.6
elektronaj mikroskopoj	6.4.4	fulmolampo	10.4
elektronmultobligilo	2.5	funkciado de retino	9.
elektrono	8.1	Galilei	10.3
elipse polara	7.2	gama radiado	1.5
emisja spektroskopio	10.9	gaslaseroj	10.11
energio-kvanto	3.3	geometria centro	4.3.1, 5.3.1
ϵ (epsilon) koeficiento de radiado	1.3.3	geometria optiko	.1
etero	6.4.3	grand-vidangula lenso	5.3.3 10.4
Faraday-efekto	7.6.1	grupo-rapido	1.4
farbo-lasero	10.11	gumo-lenso	10.4
fata morgana	5.1	ĝenerala prilumo	9.22
fazo	6.1, 6.41	„h” Planck-konstanto	3.3
fazodife- renco	6.11, 6.13, 6.4.3, 7.51	halogenaj lampoj	3.3
fazo-objekto	10.2	helaj ringoj	6.21
fazo-rapido	1.4	helo	2.2
Fermat-principo	4.2, 5.3.1	hidrarga vapora lampo	3.4
Feymann	8.6	hidrargo-vaporo	3.4
filamento	2.6, 3.3	holografio	10.13
fokusdistanco	4.3.1, 5.3.3	homa okulo	9.2
fokusdistanco de lenso	5.3.1	impulsa radiado	10.10
fokuso	4.3.1	inercio de la vido	9.3
fokuspunkto	4.3.1	inercio de la okuloj	10.5
fokuspunktoj de lensoj	5.3.1	infinito	6.22
		inkandeska lampo	2.6
		intenso-perdo	8.21
		interedra angulo	5.2

lumradio	1, 1.2, 1.3	okuloj de rabobestoj	9.
lumrapido (c)	6.4.3	okulvitroj	9.2
lupeo	10	ondo-optiko	6.
magneta kampo	7.61	ondogrupo	6.11
magneta rubando	10.5	ondolongo	1.3, 1.5, 2.2
malŝargiĝo en gasoj	3.4	ondolongo diferenciga povo	10.9
maldika lenso	4.3.1, 5.3.1	ondomekaniko	6.1
maldika tavolo	6.4.1	ondooptiko	5.1
malhelaj linioj	8.21	ondosurfaco	6.1
malhelaj okulvitroj	8.6, 87	optika centro	4.3.1, 5.3.1
malhelaj ringoj	6.21	optika filtrilo	2.2
mallarĝa breĉo	6.22	optika krado	6.4.3
mallong-vidantoj	9.2	optike izotropa materialo	7.4
malnormala disperso	8.5	optikelektroniko	2.2
malplena grandigo	6.4.4	optikelektronika bildregistrado	10.5
Malus-a formulo	7.3	ordinara radio	7.4, 7.5
masodiferenco	3.1	ordonumero	6.3
meĉo	3.2	original-direkta	5.3.3
mekanikaj streĉoj	7.4	orta direkto	2.2
memindukta bobeno	3.4	ortanto	2.3, 4.3
memnutranta malŝargiĝo	3.4	ozontavolo	3.1
metal-halogeno	3.4	parabola spegulsurfaco	10.31
mezuro de malgrandaj distancoj	10.2	parabola surfaco	4.3.1
Michelson	6.4.3	paraj zonoj	6.2
mikroskopo	4.3.1, 10.2	percepti	1.2
mikroskopoj en la biologio	10.2	perceptivo	2, 2.5,
movspegula fotoaparato	10.4	percepto de lumimpulsoj	9.2
mozaikaj okuloj	9.1	perforita filmrubando	10.7
nanometro	1.5	periskopo	4.3, 5.2, 10.
natriovapora lampo	3.4	phot (ph)	2.6
neŭtrala gaso	3.3	phot candle (ph cd)	2.6
negativa filmo	10.4	Pitagora ekvacio	4.2, 5.3.2
negativa rezistanco	3.4	Planck-formulo	3.3
Newton-a formulo	5.3.3	Planck-konstanto (<i>h</i>)	1.5
nigra korpo	2.2, 3.3, 8.1	plasma	3.4
nigra strio	3.1, 6.22	plena reflektiĝo	5.1, 5.2
Nikol-prismo	7.4	plena vibrado	1.3
nito (<i>nt</i>)	2.2	postviola lumo	1.5, 2.
nordpolusa lumo	3.1	polara lumo	7.1
normala disperso	8.5	polariga lumfiltrilo	7.4
normala fotografia lenso	10.4	polarigilo	7.3
numera aperturo	6.4.4	polarigo de lumo	7.
objektodistanc intervalo por akra bildkreo	5.3.7	polaroid-tekniko	10.4
objektodistanco	5.3.3	postviola	3.1
objektopunkto	5.3.2	postviola „B” intervalo	8.7
obskura kamero	4.2	postviola radiado	3.4
okulmuskoloj	9.2	povun-kvanto	2
okuloj	9.	povumo	2.2
okuloj de kreskaĵmanĝaj bestoj	9.	pozitiva-negativa kristalo	7.4
		pozitiva bildo	10.4
		preskaŭaska radio	5.3.1
		prilumado	2.5, 2.6, 5.3.6
		prilumiganta tempo	10.4
		prilumiteco	2.4, 5.3.6

prismo	5.2, 10.9	spekrografo	10.9
projekciilo	4.3.1, 10.61	spektra linio	6.22
propagiĝo de a lumo	1.3, 6.1	spektro	1.5, 2.5
protonaj mikroskopoj	6.4.4	spektroskopio	5.2, 10.9
purpurkolora pigmento	9.3.1	spiraligo	3.3
		stangetoj	9.2
radiano	2.2, 6.2.2	startigilo	3.4
radio-povumo	3.3	stativo	10.3
radioteleskopo	10.3	Stefan-Boltzmann-formulo	3.3
rapido de propagiĝo	1.3	stilbo (<i>st</i>)	2.2
rapo-sukero	7.6	strikodo	10.12
reala bildo	5.3.3, 10.3	strio	6.3
redukto de reflektio	6.41	sunradioj	1.1, 8.2
reflektangulo	4.3, 5.3		
reflektiĝo	5.1, 6.41, 8.1, 8.6	tagluma vido	9.2
reflektilo	3.1	tele-lenso	10.4
reflektita lumo	6.41	teleskopo	4.4.1, 10.3
reflektiva	6.3	teleskopo sur satelito	10.3
reflekto	1.41, 6.41, 8.1	televido	9.2, 9.21
reflektokapablo de metaloj	8.62	temperatura radiado	3.3
reflekt- projekciilo	10.7	temperaturo	8.2
refraktiĝo	6.41	torĉo	3.2
refraktivo	5.1, 5.2, 5.3.1, 6.4.3, 8.1	trafangulo	2.3, 4.3, 5, 5.1, 5.2
refrakto	1.4, 5	trafpunkto	6.4.3
refraktangulo	5.1	tralasivo	7.4
relativa		tralaso	2.5
aperturo	5.3.6, 5.3.7, 10.3	trapasinta lum-intenso	8.6
relativec-teorio	6.4.3	trapaso	8.6
Rentgen-a radiaro	1.5, 8.6	trapaso de la lumo	8.3
retrorigardilo	4.3.1	travidebla	6.3
rezultanta bilddistanco	5.3.5	travidebla materialo	8
rezultanta fokusdistanco	5.3.5	tridimensia vido	9.5
rezultanta objektodistanco	5.3.5	T-tavolo	6.41
rezultanta amplitudo	6.11	turno de la polarebeno	7.7
rezultanta ondo	8.5		
rigla lumklapo	10.4	unuagrada interfero	6.41
rivelo	10.4	unuaksa kristalo	7.4
ruben-kristalo	10.11	unukolora	1.5
		unukolora lumo	6.4.3
sekstanto	4.3	unukolora radiado	2.2
sekundaraj elektromagnetaj		uzata ondolongo-intervalo	10.9
ondoj	6.1	uzo de prismoj	10.3
senparaj zonoj	6.22		
sentivo de fotomaterialoj	10.4	vakuo	3.3
sfer-ĉapo	4.3.1, 5.3.1	variigebla koloro	10.10
sfera aberacio	5.3.8	varmiĝo	8.21
sfera spegulo	4.3.1	voĉo registro	10.7
SI mezurunuo	2.2	Verdet-konstanto	7.61
sinus-kondiĉo	3.5.8, 6.4.4	vidangulo	10.3
skribo-projekciilo	10.7	videbla intervalo	3.1
spacangulo	5.3.6	videbla lumo	1.5
spacadiano	2.2	video-aparato	10.5
specifa turnokapablo	7.6	video-recitilo	10.5
spegulaj teleskopoj	10.31	vido de abeloj	8.12
spegulo	6.4.3	vido en kreousko	9.2
spektra linio	6.22	vido per stangetoj	9.3

virtuala bildo	4.3, 10.1
virtuala fokuso	4.3.1
vitamino A	9.3
vitrodoma efiko	8.21
vivdaŭro	3.3
vojlondiferenco	6.3, 6.4.3
Wallaston-prismo	7.4
Wien-formulo	3.3