J. Awliýakuliýew, Ý. Baratow, G.Ataýew, A.Çaryýew

OPTIKA

Ýokary okuw mekdepleri üçin synag okuw kitaby

Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan hödürlenildi

Aşgabat
Türkmen döwlet neşirýat gullugy
2009

UOK 535
A 90

J. Awliýakuliýew we başg.
A 90 Optika. Ýokary okuw mekdepleri üçin synag okuw kitaby. - A.: Türkmen döwlet neşirýat gullugy. 2009.

TDKP № 170, 2009 KBK 22.343 ýa 73

TÜRKMENISTANYŇ ILKINJI PREZIDENTI
BEÝIK SAPARMYRAT TÜRKMENBAŞY

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET BAÝDAGY

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET SENASY

Janym gurban saňa erkana ýurdum,
Mert pederleň ruhy bardyr köňülde.
Bitarap, garaşsyz topragyň nurdur.
Baýdagyň belentdir dünýäň öňünde.

Gaýtalama
Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym.

Gardaşdyr tireler, amandyr iller,
Owal-ahyr birdir biziň ganymyz.
Harasatlar almaz, syndyrmaz siller,
Nesiller döş gerip, gorar şanymyz.

Gaýtalama
Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym.

SÖZBAŞY

Garaşsyz, baky Bitarap Türkmenistan Beýik Galkynyşlar, özgerişler zamanasynda hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedowyň baştutanlygynda täze ösüşlere, sepgitlere tarap batly gadamlar bilen ynamly öňe barýar. Döwlet Baştutanymyzyň bilim ulgamyny düýpli kämilleşdirmek, özgertmek hakyndaky resminamalary Altyn asyryň altyn nesillerini döwrüň talabyna laýyklykda ylym, bilim we terbiýe bermäge uly badalga berdi.

Hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedow ýurdumyzyň geljegi bolan türkmen ýaşlarynyň ylymly, bilimli we dünýä ülňülerine laýyk gelýän derejede sowatly bolmagy üçin atalyk aladasyny edýär. Bu bolsa her bir bilim işgäriniň Watan öňündäki şahsy jogapkärçiligini has-da artdyrýar.

Bilim ulgamynyň ähli basgançaklarynda mugallymlary we terbiýeçileri, talyplary we okuwçylary dünýä standartyna laýyk gelýän okuw maksatnamalary, okuw kitaplary we okuw gollanmalary bilen üpjün etmek gaýra goýulmasyz, döwlet ähmiýetli wezipeleriň biridir. Çünki bu ýurdumyzda bilim ulgamyny belende galdyrmagyň, öz işine ussat hünärmenleri taýýarlamagyň möhüm şertleriniň berilir.

Bu hödürlenýän kitap mugallymçylyk institutynda umumy fizika dersiniň okuw maksatnamasynyň esasynda ýazyldy. Kitap umumy fizika dersiniň optika bölümini öz içine alýar. Kitabyň mazmuny birnäçe ýyllaryň dowamynda türkmen dilinde okalan umumy sapaklaryň baý iş tejribesini ulanmak bilen nazary maglumatlary baýlaşdyrylan görnüşde düzüldi.

Optika boýunça bu taýýarlanylýan kitap girişden we sekiz bapdan ybarat.

Girişde optika dersine giriş, ýagtylyk baradaky taglymatyň ösüşiniň gysgaça taryhy barada maglumatlar berilýär

Birinji bapda – ýagtylygyň elektromagnit nazaryýetine degişli maglumatlar berýär.

Ikinji bapda – ýagtylygy häsiýetlendirýän ululyklar we olaryň ölçeg birlikleri baradaky maglumatlar berilýär.

Üçünji bapda – ýagtylygyň interferensiýa hadysasy we onuň ulanylyşy baradaky maglumatlar berilýär.

Dördünji bapda – ýagtylygyň difraksiýa we onuň bilen baglanyşykly meselelere seredilýär.

Bäşinji bapda – geometrik optika we optiki abzallar barada maglumatlar berilýär.

Altynjy bapda – ýagtylygyň polýarlanmasy, ikilenen şöhle döwülme, polýarlaýjy abzallar we olaryň ulanylyşy barada maglumatlar berilýär.

Ýedinji bapda – ýagtylygyň dispersiýasy, siňdirilmesi we pytramasy barada maglumat berilýär.

Sekizinji bapda – optikada relýatiwistik hadysalar we hereketli gurşawlarda ýagtylygyň ýaýrama tizligi baradaky maglumatlar berilýär.

Kitap taýýarlanylanda optika degişli adalgalar mümkin bolan derejede türkmen dilinde atlandyryldy.

GIRIŞ

1. Optikanyň esasy meselesi

Optika dersi ýagtylyk baradaky ylym bolup, ol ýagtylygyň şöhlelenmesiniň, siňdirilmesiniň we ýaýramasynyň kanunalaýyklyklaryny öwredýär. Umuman, ýagtylyk düşünjesi görüş duýgusyny oýandyryjy hökmünde kesgitlenilýär.

Elektromagnit meýdany baradaky ylmyň ösmegi bilen ýagtylygyň tebigatynyň elektromagnit taglymaty döredi. Bu taglymata görä, ýagtylyk wakuumda kesgitli (299793 km/s) tizlik bilen ýaýraýan, çalt üýtgeýän elektromagnit meýdanydyr. Görüş duýgusyny oýandyrýan elektromagnit tolkunlary tolkun uzynlygy boýunça kesgitli çäge $[(0,4 \div 0,76)mkm]$ eýedir. Elektromagnit şöhlelenmesi 0-dan ∞-ge çenli tolkun uzynlyklara eýe bolup, biri-birinden ýygylyklary bilen tapawutlanýan radiotolkunlardan, infragyzyl, görünýän, ultramelewşe, rentgen we gamma şöhlelerden ybaratdyr. Elektromagnit şöhlelenmäniň optika degişli çäklerini kesgitlemek esasy mesele bolup durýar.

Ýagtylygyň kwant nazaryýetinde islendik çeşmäniň şöhlelendirýän fotonlary bir-birinden energiýasy arkaly tapawutlanýar.

Elektromagnit şöhlelenmede optiki şöhleleriň çägini kesgitlemek üçin ilki çeşmäniň tebigatyndan ugur almaklyga synanyşyk edildi. Belli bolşy ýaly atomlar, molekulalar, elementar bölejikler we kondensirlenen maddalar radiotolkunlardan tä gamma-şöhlelere çenli çäkdäki elektromagnit tolkunlaryny şöhlelendirýärler. Şoňa görä optiki şöhleleri şöhlelendirijileriň tebigatyna esaslanyp, kesgitlemek mümkin däl bolup çykdy. Şeýle-de optiki şöhleleriň çägini elektromagnit tolkunlaryny kabul edijileriň tebigatynyň esasynda hem anyklamak mümkin däldigi belli boldy.

Optikanyň esasy häsiýetli aýratynlygy onuň usullary ähli ýagdaýlarda nähilidir bir jisimiň (predmetiň) şekilini döretmek bilen baglanyşyklydyr. Bu bolsa öz gezeginde optiki ulgamlaryň kömegi bilen kesgitli ugra gönükdirilen elektromagnit tolkunlarynyň dessesini (şöhle görnüşli akymyny) döretmek bilen baglanyşyklydyr. Optiki ulgam diýlende aýnalardan (zerkalo), linzalardan, prizmalardan, difraksiýa gözeneklerinden utgaşdyrylyp döredilýän gurnamalar göz öňünde tutulýar. Olara mysal hökmünde teleskoplary, mikroskoplary, spektroskoplary we ş.m-leri görkezmek bolar. Bu optiki ulgamlaryň ählisi ýiti şöhle dessesini döretmek ukybyna eýedirler. Başgaça aýdanymyzda şekil döretme we fokuslaýjylyk ukybyna eýe bolýar.

Optiki ulgamlaryň bu häsiýeti elektromagnit tolkunlarynyň tolkun frontunyň ölçegleri (***D***) onuň tolkun uzynlygyndan (λ) has uly bolan şerti kanagatlandyr-

-ýan ýagdaýlarynda saklanýar, ýagny $\left(\frac{\lambda}{D}\right) << 1$.

Häzirki döwürde ösen tehnikanyň hasabyna elektromagnit tolkunlarynyň ýeterlik derejede inçe ugrukdyrylan akymyny tolkun uzynlyklary 0,1A^0-den 1 sm^2-e çenli çäkde almak mümkinçiligi bar. Başgaça aýdanymyzda spektri 0,1A^0-den 1 sm^2-e çenli bolan elektromagnit tolkunlarynyň kömeginde jisimleriň (predmetleriň) şekilini almak mümkin.

Şeýlelikde gelejekde «ýagtylyk» diýlende tolkun uzynlyklary 0,1$\AA$-den 1 sm^2-e çenli çäkde bolan, ýaýraýan elektromagnit meýdany göz öňünde tutulmalydyr. Emma optiki şöhlelenmä goýulan bu çägiň şertli kabul edilendigini bellemek ýerliklidir.

Ylmyň ösmegi bilen alnan netijeler fizikanyň dürli bölümleriniň arasyna kesgitli anyk araçäk goýmak mümkin däldigini görkezýär. Fizikanyň dürli bölümlerinde peýdalanylýan usullar bir-biriniň üstüni doldurýar, baýlaşdyrýar. Ýokarda bellenenleriň esasynda optika dersiniň esasy mazmuny kesgitlenilýär.

Şeýlelikde optika dersine ýagtylygyň tebigatyny anyklamak, ugrukdyrylan akym dessesini döretmek, ýagtylygyň maddalar bilen özara täsirini (şöhlelenme, pytrama, siňdirilme hadysalary) öwrenmek, ýagtylygyň ýaýrama tizligini ölçemek we optiki abzallaryň (teleskop, mikroskop, spektroskop we ş.m) işleýşini esaslandyrmak degişlidir.

Elektromagnit tolkunlarynyň optiki spektri şu wagta çenli belli bolan maddalaryň ähli görnüşleri bilen özara täsirleşýändigine görä optikanyň derňew usullary beýleki usullardan tapawutlylykda uniwersal häsiýete eýedir. Bu bolsa ýagtylyk baradaky taglymaty maddanyň gurluşyny öwrenmek baradaky taglymatyň düýpli bölümine öwürýär.

2. Optikanyň ösüşiniň gysgaça taryhy

Ýagtylygyň terbigaty baradaky ilkinji düşünjeler has gadymydyr. Biziň eýýamymyzdan öň 582-500-nji ýyllarda ýaşap geçen Grek pelsepeçisi we matematigi Pifagor we onuň ylmy mekdebi görüş duýgusy gözden çykýan «gyzgyn bugarmanyň» jisimleriň üstüne düşmegi netijesinde döreýär diýip çak edipdirler.

Bu garaýşyň soňky ösüşi Ýewklidiň (b.e.ö 300 ý.) «görüş şöhlesi» baradaky düşünjesiniň döremegine getirdi.

Bu garaýyşda gözden çykýan «görüş şöhlesiniň» uçlary jisime galtaşmagynyň netijesinde görüş duýgusy döreýär diýip hasap edilýär. Ýewklid ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramasy baradaky taglymaty esaslandyrýar. Ol ýagtylygyň aýnadan (zerkalo) serpikme kanunyny açýar. Bu kanun häzirkizaman geometriki optikasynda hem öz ähmiýetini ýitirmän gelýär.

Aýnalar (zerkalo) bilen baglanyşykly ýagtylyk hadysalary Arhimed (b.e.ö.287-212 ý.) tarapyndan hem öwrenilýär. Empedokl (b.e.ö. 492-432 ý.) görüş duýgusy barada çaklamasyny teklip edip, kesgitli öňe gidişlik döretdi. Onuň çaklamasyna görä ýagtylanýan jisimlerden çykýan akym göze gönükdirilýär, gözden çykýan akym jisime gönükdirilýär. Bu iki akym duşuşanda görüş duýgusy döreýär. Görnükli grek pelsepeçisi, atomistik garaýyş girizen Demokrit (b.e.ö. 460-370 ý.) gözden çykýan «görüş şöhlesi» düşünjesinden doly ýüz öwürip öz çaklamasyny teklip etdi. Demokrit jisimlerden çykýan ownujak atomlaryň göze düşmegi netijesinde görüş duýgusy döreýär diýen garaýşy teklip edýär. Soňy bilen bu garaýşy Epikur (b.e.ö. 341--270 ý.) hem goldaýar. «Görüş şöhlesi» baradaky çaklama düýpgöter garşy çykanlaryň biri görnükli grek pelsepeçisi Aristoteldir.

Antika döwründe tejribede tassyklanan düýpli esaslanma bolmandyr. Şoňa görä gadymyýetiň fizikasynda ýagtylygyň tebigaty baradaky garaýyşlar ýönekeý gözegçiliklere esaslanan pikir ýöretmelerdir. Oňa garamazdan gadymyýetiň çaklamalarynyň optikanyň ösmeginde özüniň oňyn täsirini ýetirendigi anykdyr.

Orta asyrda optikanyň ösüşi

Orta asyryň ilkinji döwründe (b.e. 150-700 ý.) optika degişli düýpli açyşlar bolmady. Biziň eýýamymyzyň 700-nji ýyllarynda araplarda ylmy öňe gidişlikler ýüze çykyp başlaýar.

Arap fizigi Algazen (1038 ý.) öz derňewlerinde optika degişli işleri amala aşyrmagy başarypdyr. Ol gözüň gurluşyny we ýagtylygyň döwülmesini hem-de oýuk (zerkalo) aýnalarda serpikmesini öwrenmek bilen meşgullanypdyr. Algazen ýagtylygyň döwülmesini öwrenmek bilen ýagtylygyň düşme burçy bilen döwülme burçunyň proporsional däldigini subut etdi. Ol sferik aýnalaryň (zerkalo) predmetiň şekilini ulaltmak häsiýetiniň bardygyny ýüze çykarýar we şöhlelenýän jisimlerden çykýan şöhleler göze düşüp, görüş duýgusyny döredýär diýen dogry garaýşa eýeripdir. Algazen ýagtylyk kesgitli tizlik bilen ýaýraýandyr diýip hasap edipdir. Ol Aýyň we Günüň ölçegleri dik depedäki ýagdaýdan kese gözýetimde görünýän mahaly uly bolup görünmegi görüş duýgusynyň aldawy diýip düşündirýär.

Orta asyrlaryň dowamynda ylmyň ösmegi üçin oňaýly şertler bolmandyr. Şoňa görä bu döwürde ýagtylygyň tebigatyna degişli ylmy derňewler ýok diýen ýalydyr.

Dikeldiş döwründe optikanyň ösüşi

XIV asyrdan XVI asyryň birinji ýarymyna çenli döwürde tebigaty öwreniş ylmynda tejribe usullary peýda bolup başlaýar. Bu döwürde optika degişli köp sanly örän wajyp açyşlar amala aşyrylýar. Fransisko Mowrolik (1494-1575 ý.) äýnegiň täsirini dogry düşündirmegi başarýar. Ol uzakdan görme hem-de şowa körlügiň sebäbini gözüň hrustaljygynyň ýagtylygy kadaly döwmeýänliginiň netijesidigini ýüze çykarýar.

Mawrolik gün şöhleleri kiçijik deşikden geçirilende Günüň şekiliniň alnyşyny dogry düşündirmegi başarýar.

1589-njy ýylda italýan alymy Port (1538-1615 ý.) obskur kamerasyny oýlap tapýar. Soňy bilen bu açyş fotoapparatyň döremegine getirdi.

1590-njy ýylda golland oýlaptapyjysy Z.Ýansen mikroskopy döredýär. 1608-1610-njy ýyllarda golland optikleri Z.Ýansen, Ýa.Mesus we G.Lippersgeý görüş turbalaryny ýasap başladylar. Optiki abzallaryň döremegi astronomiýada we biologiýada uly açyşlara getirdi. Nemes fizigi we astronomy I.Kepler (1571-1630 ý.) optiki abzallaryň nazaryýetine we fiziologiki optika degişli düýpli işleri amala aşyrdy.

Fransuz fizigi P.Ferma (1601-1665 ý.) geometrik optikada uly ähmiýete eýe bolan düzgüni teklip etdi. Bu düzgüne laýyklykda giňişligiň iki nokadynyň arasynda ýagtylyk iň gysga wagtda geçilýän ýol boýunça ýaýraýar. Bu ýerden ýagtylygyň gutarnykly tizlik bilen ýaýraýandygy gelip çykýar.

Mark Antoniý de Dominis (1566-1624 ý.) ýagtylygyň reňki we älemgoşar bilen gyzyklanyp içi suwdan doldurylan aýna togalaklarda (şarlarda) ýagtylygyň döwülmesini öwrenýär. Bu döwrüň açyşlarynyň iň saldamlysy Grimaldi (1618-1683 ý.) tarapyndan ýagtylygyň difraksiýa hadysasynyň ýüze çykarylmasydyr. Ol ýagtylyk şöhlesi örän kiçi deşikden ýa-da germewiň gyrasyndan geçende göni çyzykly ýaýramasyndan gyşarýandygyny tejribede görýär. Mundan başga-da ol ýagtylyk şöhleleriniň goşulyşyna gözegçilik etmek bilen interferensiýany ýüze çykarýar. Emma Grimaldi ýagtylygyň tebigaty barada hiç hili teklip girizmeýär.

XVII we XVIII asyrlarda optikanyň ösüşi. Ýagtylygyň tebigaty barada Nýutonyň korpuskulýar nazaryýeti. Ýagtylygyň tebigaty barada Gýuýgensiň tolkun nazaryýeti

Bu döwürdäki uly ylmy açyşlar görnükli iňlis alymy Isaak Nýuton (1643-1727 ý.) bilen baglanyşyklydyr. Nýuton 1666-njy ýylda üçgranly prizmadan ýagtylyk geçende dispersiýa hadysasynyň ýüze çykýandygyny tejribede amala aşyrdy. Nýuton ak ýagtylyk dessesi üçgranly prizmadan geçende tükeniksiz köp dürli reňkli şöhleleriň toplumyna öwrülip, tutuş spektr emele getirýändigini ýüze çykardy. Nýutonyň bu geçiren tejribeleriniň netijesinde ak ýagtylygyň çylşyrymly şöhlelenmedigi belli boldy. Nýuton prizmadan geçen reňkli şöhleleri linzanyň kömegi bilen jemläp ýene-de ak ýagtylygy almagy başardy.

Nýuton tejribeleriň esasynda reňkler baradaky nazaryýetini döretdi. Reňkler baradaky nazaryýetine laýyklykda jisimleriň reňki olaryň serpikdirýän şöhleleriniň spektri bilen kesgitlenip, beýlekileri jisim tarapyndan siňdirilýändir.

Bu açyşlar bilen birlikde ýagtylygyň difraksiýasyna we interferensiýasyna degişli işler hem Nýuton tarapyndan seredilýär. Ol soňy bilen Nýutonyň halkalary diýen ada eýe bolan interferensiýa şekilini tejribede almagy başardy. Bu kanunalaýyklyk interferensiýa hadysasyndaky mukdar gatnaşyklaryny esaslandyrdy.

Nýutonyň çaklamasyna görä ýagtylyk şöhlelenýän (ýagtylanýan) jisimler tarapyndan goýberilýän adatdan daşary ownuk bölejikleriň akymydyr. Şeýlelikde Nýuton ýagtylygyň korpuskulýar nazaryýetini esaslandyrdy. Nýutonyň bu nazaryýetine «akym nazaryýeti» hem diýilýär.

Nýuton ýagtylyk bölejikleri dürli ölçeglerde bolýar diýip hasap edýär: gyzyl reňkli spektre uly bölejikler, melewşe reňkli spektre kiçi bölejikler, aralykdakylar reňkleriň üznüksiz spektrini döreder ýaly şerti kanagatlandyrýan ölçeglerde bolmaly. Nýutonyň akym nazaryýeti spektriň reňklerinden başga-da ýagtylygyň döwülme we ýaýrama kanunlaryny gowy düşündirmegi başarýar. Emma bu nazaryýet ýagtylygyň serpikme, difraksiýa we interferensiýa ýaly hadysalaryny düşündirmekde düýpli kynçylyklara sezewar bolýar. Muňa garamazdan akym nazaryýeti XVIII ýüzýyllygyň dowamynda we XIX ýüzýyllygyň birinji çärýeginde hökmürowanlygyny saklady.

Ýagtylygyň tebigatynyň tolkun nazaryýeti iňlis fizigi Robert Gukuň (1629-1703 ý.) we Gollandiýaly alym Hristiýan Gýuýgensiň (1629-1695 ý.) ylmy işlerinde ýüze çykyp başlaýar.

Gukuň çaklamasyna görä ýagtylyk – bu ýagtylyk çeşmesiniň ýerleşen gurşawyndaky giňişlikde, sferik tolkun görnüşinde ýaýraýan, çalt yrgyldaýan hereketdir (impulsdyr). Bu çalt yrgyldylar häsiýetleri boýunça tapawutly aýratynlyklara eýe bolan älemi dolduryp duran «efir» diýlip atlandyrylýan gurşawda amala aşýar. Guk ýagtylyk tolkunlaryna kese tolkunlar hökmünde seredip, şonuň esasynda ýuka gatlaklaryň reňkini kesgitlemek we ony esaslandyrmak boýunça derňew işleri bilen meşgullanýar. Emma gutarnykly netijä gelip bilmeýär.

Gýuýgens tolkuny kinematiki taýdan jikme-jik seljermäge we dürli kanunalaýyklyklary döretmäge mümkinçilik berýän düzgüni teklip etdi. Gýuýgens öz düzgünininiň esasynda ýagtylygyň serpikme we döwülme kanunlaryny şeýle-de kristallarda ýüze çykýan ýagtylygyň ikilenen şöhle döwülmesini düşündirmegi başarýar. Gýuýgens ikilenen şöhle döwülmäni öwrenmek bilen kristallarda ýagtylygyň polýarlanmasyny açýar. Gýuýgens ýagtylyga boý tolkuny hökmünde seredýänligi sebäpli polýarlanma, reňk nazaryýetine şeýle-de ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramasyna takyk düşündiriş berip bilmeýär.

XIX asyrda optikanyň ösüşi. Ýagtylygyň tebigatynyň tolkun nazaryýetininiň ýeňişi

XIX asyrda fizikanyň taryhynda örän ajaýyp waka ýagny ýagtylygyň tebigatynyň tolkun nazaryýetininiň ýeňişi boldy. Bu babatda iňlis fizigi Tomos Ýunguň hyzmaty uludyr. Ol tolkunlaryň interferensiýasyna degişli derňew işlerini geçirýär. Bu bolsa ýuka ýag (nebit) gatlaryň reňkini (hususy halda Nýutonyň halkalaryny) düşündirmäge mümkinçilik berdi. Ýunguň ýagtylyk tolkunlaryna boý tolkuny hökmünde garamagy sebäpli polýarlanma hadysasyny düşündirip bilmedi. Ýagtylygyň tolkun nazaryýetininiň ýeňişi görnükli fransuz fizigi Freneliň (1788-1827 ý.) işleri bilen baglanyşyklydyr. Frenel Gýuýgensiň düzgünine täzeçe seredip, ony Ýunguň interferensiýa üçin teklip eden düzgüni bilen utgaşdyryp, ýagtylygyň difraksiýasynyň ykjam matematiki nazaryýetini döredýär we şonuň esasynda ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramasyny düşündirýär. Mundan başga-da Frenel tarapyndan Nýutonyň akym nazaryýetini puja çykarýan we ýagtylygyň tolkun tebigatyny tassyklaýan köpsanly ajaýyp tejribeler amala aşyrylýar. Ýagtylygyň interferensiýasyna we polýarlanmasyna degişli geçirilen tejribeler ýagtylyk tolkunlarynyň diňe kese tolkun görnüşinde boljakdygyny tassyklaýar.

Nemes fizigi Kirhgof (1824-1887 ý.) 1882-nji ýylda Gýuýgensiň-Freneliň düzgünini matematiki taýdan esaslandyryp, Freneliň nazaryýetiniň käbir bärden gaýtmalaryny aýyrdy. Kirhgofyň teoremasy difraksiýanyň nazaryýetiniň matematiki esasy bolup durýar. Ýagtylygyň tolkun nazaryýetiniň mundan soňky ösüşinde görnükli amerikan alymy Maýkelsonyň (1852-1931 ý.) saldamly goşandyny görkezmek bolar. Ol iki şöhleli interfereometri oýlap tapyp, uzynlyk ölçeg birligi metriň ülňüsini (etalonyny) ýagtylygyň tolkun uzynlygynyň üsti bilen ölçemegi amala aşyrdy (1824 ý.). Spektral çyzyklaryň aşa inçe gurluşy ilkinji gezek Maýkelson tarapyndan öwrenildi. Has soňky seljermeler bu hadysanyň atom ýadrosynyň gurluşy we himiki elementleriň izotop düzümi bilen berk baglanyşyklydygyny görkezdi. 1890-njy ýylda nemes fizigi Winer durujy ýagtylyk tolkunlaryny aldy.

Ýokarda getirilen ylmy açyşlar, oýlanyp tapylan abzallar, ýagtylygyň tolkun nazaryýetiniň ösüşiniň has wajyp pursatlarydyr. Mundan başga-da köpsanly biri-biriniň üstüni doldurýan ylmy açyşlara ýagtylygyň tolkun nazaryýetiniň üstünlikli ýeňişi hökmünde seretmek mümkin.

Ýöne bu döwürde ýüze çykarylan flýuoressensiýa, fosforesensiýa, şeýle-de ýagtylygyň şöhlelenmesi we siňdirilmesi ýaly hadysalar ýagtylygyň tolkun nazaryýetinde öz düşündirişini tapyp bilmedi.

Optikanyň XX asyrdaky ösüşi

XIX ýüzýyllygyň ahyry, XX asyryň başy fizikada köpsanly hadysalaryň açylmagy we netijede tebigaty öwrenmekde düýpli öwrülişige getirendigi bilen häsiýetlendirilýär. Bu öwrülişik maddanyň gurluşy barada hem-de wagt we giňişlik barada öňden gelýän garaýyşdan ýüz öwürmekden başlanýar. Hereketiň tizligine baglylykda üýtgeýän massa düşünjesiniň girizilmegi şol döwrüň köp sanly görnükli alymlarynda hem bir bada kanagatlanarly ynam döredip bilmedi.

1895-nji ýylda nemes fizigi Rentgen (1845-1923 ý.) örän güýçli geçirijilik ukybyna eýe bolan X-şöhleleri tapdy. Soňy bilen X-şöhleler rentgen-şöhleleri diýen ada eýe boldy.

1886-njy ýylda fransuz fizigi Anri Bekkerel (1852-1908 ý.) radioaktiwlik hadysasyny açdy. Soňy bilen bu hadysa atom we ýadro fizikasynyň döremegine getirdi. 1900-njy ýyl ýagtylygyň tebigaty baradaky täze taglymatyň, eýýamyň başlangyjy boldy. Görnükli nemes fizigi Maks Plank 1900-njy ýylda ýagtylygyň kwant nazaryýetini döretdi we ýagtylygyň şöhlelenmesini hem-de siňdirilmesini düşündirdi. Plank kwant nazaryýetiniň esasynda absolýut gara jisimiň şöhlelenme kanunyny açdy.

1912-nji ýylda M.Laue rentgen şöhleleriniň kristallardaky difraksiýasyny aldy we şonuň esasynda rentgen şöhleleriniň hem ýagtylyk şöhlelerine meňzeşdigini, ýagny örän gysga tolkun uzynlykly elektromagnit tolkunlarydygyny subut etdi. Ýagtylygyň nusgawy elektromagnit taglymatyndan tapawutlylykda kwant nazaryýeti şöhle goýberme we şöhle siňdirme hadysalaryna üznükli aýry-aýry gutarnykly ülüşli hadysa hökmünde seredýär. Şöhle goýbermede jisimleriň oýandyrylan bölejigi bir kwant elektromagnit energiýany goýberýär, şöhle siňdirmede bolsa (gutarnykly gymmata eýe bolan) bir kwant energiýany ýuwudýar. Şeýlelikde ýagtylygyň Plank tarapyndan teklip edilen nazaryýeti onuň korpuskulýar taglymatynyň täze görnüşidir. Şunlukda köpsanly optiki hadysalar ýagtylygyň elektromagnit taglymatynyň esasynda doly düşündirilip, ýene-de birnäçe hadysalar ýagtylygyň kwant taglymatynda öz düşündürişini tapýar, ýagny ýagtylyk şol bir wagtyň özünde tolkun we bölejik görnüşinde ýüze çykýar. Bu bolsa tebigatyň bitewüliginiň esaslandyrylmasydyr.

1905-nji ýylda A.Eýnşteýn diňe şöhle goýberme we şöhle siňdirme kwant häsiýete eýe bolman, eýsem ýagtylyk giňişlikde ýaýranda-da ýagtylyk kwantarynyň, ýagny aýry-aýry fotonlaryň akymy görnüşinde ýaýraýar diýen çaklamany teklip etdi. Kwant nazaryýetinde ýagtylygyň tolkun häsiýeti hem saklanýar, ýagny her bir fotonyň energiýasynyň mukdary ýagtylyk tolkunynyň ýygylygynyň üsti bilen aňladylýar. Ýagtylygyň kwant nazaryýeti şöhle goýberme, şöhle siňdirme, flýuoressensiýa, fotohimiýa, fotoeffekt we ş.m. hadysalary düşündirmekde taýsyzdyr.

1905-nji ýylda A.Eýnşteýn mikrodünýäniň çäginde energiýanyň saklanma kanunynyň esasynda, fotoeffektiň nazaryýetini döretdi. 1913-nji ýylda daniýaly fizik N. Bor atomyň gurluşynyň we atomyň şöhlelenmesiniň nusgawy däl nazaryýetini döretdi. Bu nazaryýetiň esasynda erkin atomlaryň şöhlelenme spektrleri düşündirildi.

Atomyň şöhlelenmesiniň we spektrleriniň nazaryýeti bilen bir hatarda atomyň gurluşy we himiki elementleriň periodiki sistemasynyň nazaryýeti döredildi.

1924-nji ýylda fransuz fizigi Lui de Broýl hereket edýän her bir elementar bölejige tolkun häsiýet mahsusdyr diýip, elementar bölejige maddy tolkun hökmünde seretmekligi teklip etdi. 1927-nji ýylda amerkan fizikleri Dewisson we Džermer elektronlaryň difraksiýasyny tejribede ýüze çykaryp, hakykatdan hem elektronlaryň tolkun häsiýete eýedigini subut etdiler. Geçirilen köpsanly tejribe we nazary derňewleriň netijesinde elementar bölejikleriň dünýäsine degişli ähli bölejiklere tolkun häsiýetiň mahsuslygy, ýagny şol bir wagtyň özünde olaryň tolkun we bölejik görnüşde bolýandygy esaslandyryldy.

1927-1928-nji ýyllarda nazary fizikanyň görnükli wekilleri de Broýl, Geýzenberg, Şredinger, Dirak we beýlekiler tarapyndan elementar bölejikleriň dünýäsiniň kwant nazaryýeti, kwant mehanikasy we kwant elektrodinamikasy döredildi. Bu nazaryýetler şöhlelenme, şöhle siňdirme, pytrama we ýagtylygyň madda bilen köpsanly özara täsiri bilen baglanyşykly hadysalary ylmy esasda jikme-jik düşündirmegi başardy.

XX asyryň ikinji ýarymynda optikanyň ösüşi bilen baglanyşykly fizikanyň täze bölümleri, ýagny elektromagnit şöhlelenmäniň fizikasy — kwant radiofizikasy, kwant elektronikasy, şeýle-de kogerent optika we çyzykly däl optika ýaly bölümler döredi. Häzirki döwürde bu bölümler güýçli depgin bilen ösýär. Lazerleriň we mazerleriň fizikasynyň mundan beýläk ösüşleri güýçli depginde ösýän tehnologiýalary döretmek bilen çäklenmän, eýsem ýagtylygyň tebigaty baradaky esasy meseläniň gutarnykly çözüwini berer diýmeklige ynam döredýär.

I BAP

ÝAGTYLYGYŇ ELEKTROMAGNIT TAGLYMATY

1.1. Ýagtylygyň elektromagnit tebigaty

Optika tebigat baradaky ylymlaryň iň gadymylarynyň biri bolmagyna garamazdan onuň esasy meselesi, ýagny ýagtylygyň tebigaty baradaky mesele diňe XIX asyryň ikinji ýarymynda we XX asyryň birinji ýarymynda öz çözgüdini tapdy.

Iňlis fizigi D.K.Makswell (1831-1879 ý.), elektrik we magnit hadysalaryna degişli kanunlary umumylaşdyrmak bilen ýagtylyk, elektromagnit tebigata eýedir diýen netijä gelýär. Bu netijä gelinmeginiň sebäbi wakuumdaky elektromagnit meýdany üçin Makswelliň deňlemeler ulgamy bilen baglanşyklydyr:

$$div\,\vec{D}=0\,(1)\quad rot\,\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\;(2)\quad div\vec{B}=0\;(3)\quad rot\vec{H}=\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\;(4)\quad (1.1)$$

Bu deňlemeler ulgamy käbir özgertmelerden soň elektrik we magnit meýdanlarynyň güýjenmesiniň wektory üçin tolkun deňlemä getirilýär. Deňlemeleriň çözülişi giňişlikde ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligine deň bolan

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=3\cdot10^8\,\frac{m}{s}$$

tizlik bilen ýaýraýan tolkunyň (hadysanyň) tolkun funksiýasyny berýär.

Hakykatdan hem (1.1) deňlemeler ulgamynyň (2) deňlemesine rotor alamatyny ulanyp, ýagny

$$rotrot\,\vec{E} = -\frac{\partial\, rot\vec{B}}{\partial t} \qquad (1.2)$$

wakuum üçin $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$ we $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ deňlikler almak mümkin. Onda (1.1) deňlemeler ulgamynyň (4) deňlemesini $rotrot\,\vec{E} = graddiv\,\vec{E} - \nabla^2 \vec{E}$ gatnaşygy we $graddiv\,E = 0$ bolýandygyny göz öňüne tutup,

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \qquad (1.3)$$

deňlemäni alarys. Bu deňlemäniň çözülişiniň

$$f(t \pm \frac{\vec{r}\,\vec{m}}{c}) = f(t \pm \frac{x\cos\alpha + y\cos\beta + z\cos\gamma}{c}) \qquad (1.4)$$

bolýandygy üçin oňa tolkun funksiýasy diýilýär.

(1.4) deňlemede $\vec{r}$ – koordinata başlangyjyndan meýdanyň berlen nokadyna geçirilen radius-wektor; $\vec{m}$ – tolkunyň ýaýraýan ugruna ugrukdyrylan birlik wektor. (1.4)-i (1.3)-e goýmak bilen (f) funksiýanyň we şuňa meňzeş funksiýalaryň islendik çyzykly utgaşmasynyň $c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ şert ýerine ýetende tolkun funksiýasyny kanagatlandyrýandygyna göz ýetirmek bolar.

$f(t,r)$ funksiýa islendik görnüşde bolup biler. Hususy halda ony garmoniki görnüşde aňlatmak bolýar. Bu bolsa aýratyn oňaýlylygy döredýär, sebäbi köp fiziki gurluşlar meýdany wagta baglylykda garmoniki üýtgeýän ululyk görnüşinde hasaba alýar. Mundan başga-da Furýeniň teoremasyna görä fizikada ulanylýan islendik funksiýa kesgitli ýygylyga, amplituda we başlangyç faza eýe bolan garmoniki funksiýalaryň jemi görnüşinde aňladylyp bilner.

Mysal üçin $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos\left[\omega\left(t \pm \frac{z}{c}\right)\right]$ görnüşdäki tekiz tolkuny aňladýan funksiýa (z-iň artýan ugruna ýaýraýan $\left[\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)\right]$ argumentli funksiýa ýa-da z-iň kemelýän ugruna ýaýraýan $\left[\omega\left(t + \frac{z}{c}\right)\right]$ argumentli funksiýa) hökmünde ýazylyp bilinýär. Şeýle çözüliş $\vec{H}$ magnit meýdanynyň güýjenmesiniň wektory üçin hem alynýar. $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlar ýagtylygyň ýaýraýan ugruna perpendikulýar ugrukdyrylýar. Şeýlelikde erkin giňişlikde elektromagnit tolkunlarynyň kese tolkunlardygy gelip çykýar. Dielektrik gurşaw üçin $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}$, $\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$ bolýandygyna görä (1.1) deňlemeler ulgamynyň çözülişi $\vec{E} = \vec{E}_0 f\left(t - \frac{z}{v}\right)$ görnüşe eýe bolýar. Bu ýerde

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \tag{1.6}$$

bolup, ε we μ degişlilikde gurşawyň dielektrik we magnit syzyjylyklary; $\vec{E}_0$-elektrik wektorynyň amplituda bahasy.

$\frac{c}{v} = n$ gurşawyň absolýut döwme görkezijisi bolup, para ýa-da diamagnit häsiýetli optiki gurşawlar üçin $\mu \approx 1$ bolýandygyna görä (1.6)-dan $n = \sqrt{\varepsilon}$ deňlik gelip çykýar.

Şeýlelikde ýagtylygyň elektromagnit nazaryýeti tejribede barlanmak mümkinçiligi bolan, optiki ulylyk (absolýut döwülme görkezijisi n) bilen elektrik ululygyň (dielektrik syzyjylygyň ε) baglanyşygyny berýär.

Tolkunyň giňişlikde ýaýrap, käbir t wagt pursatynda baryp ýeten üstüne tolkun fronty diýilýär.

Eger tolkun fronty sfera görnüşli bolsa, onda tolkunyň deňlemesi sferik koordinata ulgamy arkaly aňladylyp, $\vec{E} = \dfrac{\vec{E}_0}{\rho}$ bolýar. Bu ýerde ρ tolkun frontunyň egrilik radiusy. Eger tolkun fronty silindr görnüşli bolsa onda tolkunyň deňlemesi silindrik koordinata ulgamy arkaly aňladylyp $\vec{E} = \dfrac{\vec{E}_0}{\sqrt{\rho}}$ bolýar. Beýle edilmegi degişli tolkunlaryň ýaýramasynda energiýanyň saklanma kanunynyň ýerine ýetmegi üçin zerurdyr.

Elekrodinamikanyň deňlemesinden alynýan iň ähmiýetli we örän wajyp netije elektromagnit meýdanynyň tizlenmeli hereket edýän zarýadyň töwereginde döräp, soňra onuň giňişlikde ýagtylygyň tizligi bilen ýaýramasy üçin zarýadyň zerur bolmazlygydyr. Elektromagnit meýdanyň ýagtylyk geçiriji diýlip hasap edilýän, çaklamanyň çägindäki «efir» düşünjesinden ýüz öwürmäge esas döretdi. Elektromagnit tolkunlary üçin hiç hili gurşawyň geregi ýok, ol materiýanyň maddy görnüş bilen bir hatarda ýüze çykýan fiziki meýdan görnüşidir.

Ýagtylygyň ýaýrama tizligi ýagtylyk çeşmesiniň tizligine bagly däldir we bir inersial hasaplama ulgamyndan beýleki hasaplama ulgamyna geçende inwariantdyr (üýtgewsizdir). Bu hakykat göräligiň ýörite nazaryýetinden has öň ýüze çykarlan hem bolsa Makswelliň deňlemeleri bilen doly ylalaşýar. Makswelliň deňlemeler ulgamy Lorensiň özgertmelerinde inwariant bolup çykdy.

Şeýlelikde ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi fundamental hemişelikleriň biri bolup, tebigatdaky özara täsirleriň geçirilişiniň iň uly tizligidir.

Makswelliň ýagtylygyň elektromagnit tebigaty baradaky çaklamasy 1887-nji ýylda nemes fizigi G.Gers tarapyndan tejribede tassyklanyldy. Ol ilkinji gezek ýygylygy $\nu \approx 10^{7} Gs$ bolan elektromagnit tolkunlaryny almagy başardy. Soňra rus fizigi P.N.Lebedew geçiren tejribelerinde ýygylygy $\nu \approx 10^{10} Gs$ bolan elektromagnit tolkunlary ýüze çykardy.

Makswelliň çaklamasynyň dogrudygyny barlamak üçin ýagtylyk tolkunyny «elektrik» usuly bilen döretmek gerekdi. Bu ugurdaky ilkinji işler XX asyryň 20-nji ýyllarynda A.A.Glagolewa-Arkadýewa tarapyndan amala aşyryldy. Ol Gersiň gurnamasyndan kiçijik dipollar bolup hyzmat edýän metal gyryndylarynda elektromagnit yrgyldylaryny oýandyrýan birnäçe şöhlelendirijileri döredýär. Metal gyryndylar zarýadsyzlanma netijesinde ýanýar we şol pursatda täzesi bilen çalşyrylýar. Şöhlelenme gowşak we monohromatik däl hem bolsa, ýygylygy $5 \cdot 10^{14} Gs -$ e çenli bolan uzyn tolkunly infragyzyl (IG) şöhlelenmäni ýüze çykarýar.

Soňy bilen sinhron tizlendirijilerde elektrony relýatiwistik tizlige çenli tizlendirip, sikliki traýektoriýa boýunça hereket etdirilende ýagtylyk şöhlelendirilýänligi ýüze çykaryldy.

Elektromagnit tolkunlary bilen geçirilen tejribeler görüş duýgusyny döredýän şöhlelenmeleriň ýygylyklary $4 \cdot 10^{14} Gs$-den $8 \cdot 10^{14} Gs$-e çenli bolan elektromagnit tolkunlardygyny görkezdi.

Özüniň fiziki tebigaty boýunça infragyzyl (uly tolkun uzynlykly şöhlelenme) we ultramelewşe (UM) (kiçi tolkun uzynlykly şöhlelenme) şöhlelenmeler birbirinden tapawutlanmaýar. Şoňa görä IG, UM we görünýän ýagtylyk şöhlelenmelerine umumy ýagdaýda **optiki şöhlelenme** diýilýär.

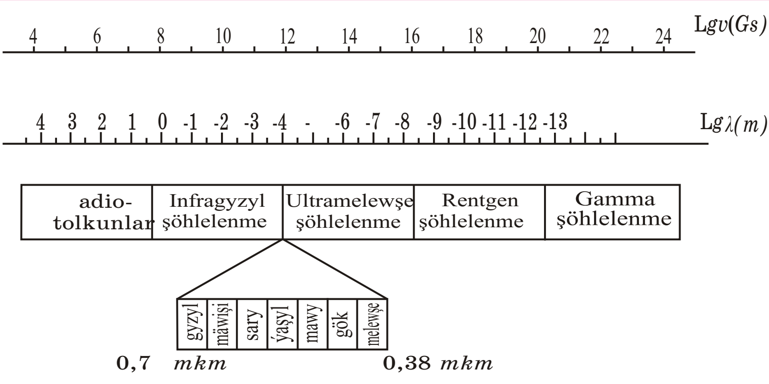
Häzirki döwürde infragyzyl şöhlelenme diýlende ýygylyklary $4 \cdot 10^{14} Gs$-den $8 \cdot 10^{12} Gs$-e çenli we ultramelewşe şöhlelenme diýlende ýygylyklary $8 \cdot 10^{14} Gs$-den $10^{17} Gs$-e çenli aralykda bolan elektromagnit tolkunlary göz öňünde tutulýar.

1895-nji ýylda nemes fizigi W.Rentgen çalt hereket edýän elektronlaryň akymynyň metal üste urlup haýallamasy netijesinde döreýän ýokary ýygylykly şöhlelenmäni ýüze çykardy. Bu şöhlelenmä ($10^{17} Gs$-den $10^{19} Gs$-e çenli) alymyň hatyrasyna **rentgen şöhlelenmesi** diýlip atlandyrylýar. Şuňa meňzeş we ondan has ýokary ýygylykly ($10^{19} Gs$-den $10^{23} Gs$-e çenli) şöhlelenmeler ýadro reaksiýalarynda elementar bölejikleriň özara öwrülişmelerinde döreýärler, beýle şöhlelenme gamma-şöhlelenme diýlip atlandyrylýar. Aşa ýokary ýygylykly şöhlelenmeler Ýere kosmos giňişliginden gelýär.

Optikada tolkun uzynlygy köplenç angstremlerde aňladylýar($\acute{\AA}$):

$$1\acute{\AA} = 10^{-4} mkm = 10^{-10} m.$$

1.1-nji çyzgyda elektromagnit tolkunlarynyň giň köplügi ýygylygynyň we tolkun uzynlygynyň logarifmirlenen tertibi şekillendirilen.



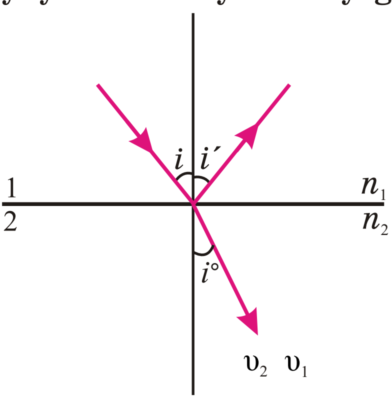
1.1-nji çyzgy

1.2. Ýagtylygyň ýaýrama kanunlary. Gýuýgensiň düzgüni. Fermanyň düzgüni

Makswelliň ýagtylygyň elektromagnit nazaryýetini döreden döwrüne çenli ýagtylygyň ýaýramasyna degişli köp sanly kanunalaýyklyklar bellidi. Uzak ýyllaryň dowamyndaky gözegçilikler we tejribe derňewleriniň esasynda ýagtylyk giňişlikde köplenç inçe desse görnüşinde – ýagtylyk şöhleleriniň toplumy görnüşinde tolkun frontuna perpendikulýar ugurda ýaýraýandygy subut edildi. Ýagtylyk baradaky taglymatyň ösüş taryhynda ýagtylygyň şöhle düşünjesi onuň tolkun düşünjesinden has öň dörän düşünjedir. Optikanyň ilkinji kanunlary hem ýagtylyk şöhlesiniň ýaýramasyna degişli bolup, aşakdaky ýaly beýan edilýär:

1. Ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýrama kanuny. Birjynsly izotrop gurşawda ýagtylyk şöhlesi göni boýunça ýaýraýar;

2. Ýagtylyk şöhleleriniň baglanyşyksyzlyk kanuny. Ýagtylyk şöhleleri giňişlikde biri-birine baglanyşyksyzlykda ýaýraýarlar. Şöhleleriň kesişmesi olaryň ýaýrama häsiýetini üýtgetmeýär;



1.2-nji çyzgy

3. Ýagtylygyň serpikme kanuny. Iki gurşawyň araçägine düşýän şöhle, araçäkden serpigen şöhle we şöhläniň düşýän nokadyna inderilen perpendikulýar, düşme tekizligi diýilip atlandyrylýan tekizlikde ýaýraýar. Şöhläniň i düşme burçy i' serpikme burçuna deňdir *(1.2-nji çyzgy)*;

4. Ýagtylygyň döwülme kanuny. Iki gurşawyň araçägine düşýän şöhle, araçäkde döwlen şöhle we şöhläniň düşýän nokadyna inderilen perpendikulýar düşme tekizligi diýilýän şol bir tekizlikde ýatýarlar *(1.2-nji çyzgy)*. Şöhläniň düşme burçunyň sinusynyň döwülme burçunyň sinusyna bolan gatnaşygy bu gurşawlardaky ýagtylygyň ýaýrama tizlikleriniň gatnaşygyna deňdir:

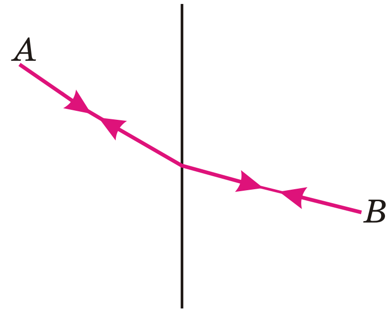
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{1,2}\,. \qquad (1.7)$$

Bu ýerde $n_{1,2}$ ululyga ikinji gurşawyň birinji gurşawa görä ýagtylyk şöhlesini göräli döwme görkezijisi diýilýär;

5. Ýagtylyk şöhlesiniň öwrülme kanuny. Eger ýagtylyk şöhlesi *A* nokatdan *B* nokada käbir *AB* ýol bilen ýaýraýan bolsa onda ol *B* nokatdan *A* nokada, ýagny garşylykly ugra ýaýranda hem onuň ýaýrama tarapa traýektoriýasy üýtgemän öňküligine galýar *(1.3-nji çyzgy)*.

Ýagtylyk şöhlesiniň özüni alyp barşynyň tejribede kesgitlenen kanunalaýyklyklaryny umumylaşdyrmak maksady bilen fransuz fizigi P.Ferma (1601-1665 ý.) özüniň iň gysga wagt düzgünini teklip edýär.

P.Fermanyň düzgünine görä giňişligiň iki nokadynyň arasynda ýaýraýan ýagtylyk şöhlesi iň gysga wagtda geçilýän ýoly saýlap alýar. Fermanyň düzgüniniň esasynda ýagtylygyň serpikme, döwülme we öwrülme kanunlaryny aňsatlyk bilen almak bolýar.



1.3-nji çyzgy

Ýagtylygyň ýokarda sanalyp geçilen kanunlaryny umumylaşdyrmak üçin edilen ýene-de bir synanyşyk gollandiýaly fizik H.Gýuýgense (1629-1698 ý.) degişlidir. Gýuýgensiň düzgüniniň esasynda wagta baglylykda tolkun frontunyň ýagdaýynyň üýtgeýşi kesgitlenilýär we şonuň esasynda ýagtylyk şöhlesiniň serpikme we döwülme kanunlary getirilip çykarylýar.

Emma Fermanyň we Gýuýgensiň düzgünlerinde iki gurşawyň araçäginde serpigen we döwlen şöhlelerde energiýanyň paýlanmasy barada şeýle-de serpikmäniň we döwülmäniň ýagtylygyň ýygylygyna edýän täsiri barada hiç zat aýdylmaýar.

Mundan başga-da, bu düzgünlerde, ýagtylyk maddada ýaýranda tizliginiň onuň ýygylygyna baglylykda üýtgemek mümkinçiligi barada hiç hili görkezme ýok.

Ýokarda görkezilen kemçiliklerden ýagtylygyň elektromagnit nazaryýeti halasdyr.

1.3. Makswelliň ýagtylyk baradaky nazaryýeti we optikanyň esasy kanunlary. Freneliň deňlemeleri

Makswelliň nazaryýeti ýagtylygyň ýaýramasyna degişli esasy kanunlary getirip çykarmaga mümkinçilik berýär. Onuň üçin elektromagnit meýdanynyň nazaryýetinden gelip çykýan netijelere seredip geçeliň.

1. Gönüburçly koordinata ulgamynyň oklary bilen degişlilikde α, β we γ burç emele getirýän ugur boýunça giňişlikde ýaýraýan tekiz elektromagnit tolkunyň deňlemesi aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos\left[\omega\left(t - \frac{x\cos\alpha + y\cos\beta + z\cos\gamma}{v}\right)\right] \quad (1.8)$$

ýa-da

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos\left[\omega\left(t - \frac{\vec{m}\,\vec{R}}{\upsilon}\right)\right] \qquad (1.9)$$

Bu ýerde $\vec{R}$ - koordinata başlangyjyndan tolkun frontunyň koordinatalary x,y,z bolan nokadyna geçirilen radius-wektor; $\vec{m}$ - koordinata oklary bilen degişlilikde α, β we γ burç emele getirýän birlik wektor.

Optikada köplenç $\vec{m}$ birlik wektoryň ýerine $\vec{k}$ tolkun wektory hem peýdalanylýar:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{m}. \qquad (1.10)$$

Onda (1.9) aňlatma

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos\left(\omega t - \vec{k}\vec{R}\right) \qquad (1.11)$$

görnüşe eýe bolar.

2. Elektromagnit tolkunynyň $(\varepsilon; \mu = 1)$ dielektrikde ýaýrama tizligi $\upsilon = \frac{c}{n}L^{-}$; $n = \sqrt{\varepsilon}$, bu ýerde $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ –

– ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi.

3. Elektromagnit tolkunynda elektrik we magnit meýdanlarynyň güýjenme wektorynyň amplitudalary aşakdaky ýaly baglanyşyga eýedir:

$$\vec{H}_m = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\sqrt{\varepsilon}\,\vec{E}_m = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\,n\vec{E}_m\,. \qquad (1.12)$$

4. Tekiz tolkunyň S üstden bir period wagtyň dowamynda geçirýän kuwwaty

$$\rho = \frac{1}{2}E_m H_m S\cos\alpha = \frac{1}{2}E_m^2\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\,nS\cos\alpha = IS\cos\alpha\,. \quad (1.13)$$

Bu ýerde α-üste inderilen perpendikulýar bilen üste düşýän şöhläniň arasyndaky burç; I-amplitudanyň (E_m) kwadratyna proporsional bolup, tolkunyň depginini aňladýar.

5. Iki dielektrigiň $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \mu_1 = \mu_2 = 1)$ araçäginde elektromagnit meýdanynyň $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlarynyň $\vec{E}_{\tau 1} = \vec{E}_{\tau 2}$, $\vec{H}_{\tau 1} = \vec{H}_{\tau 2}$, $\varepsilon_1 \vec{E}_{n1} = \varepsilon_2 \vec{E}_{n2}$ tangensial we normal düzüjileri üçin gyra şertler ýerine ýetýär.

Goý, elektromagnit tolkunynyň ýaýraýan ugry (ýagtylyk şöhlesiniň ýaýraýan ugry) ordinata okuna perpendikulýar bolsun we tolkun iki dielektrigiň yOz tekizlige gabat gelýän tekiz araçägine düşýän bolsun. Bu ýagdaýda ýagtylyk şöhlesiniň bölekleýin serpikmesi we döwülmesi ýüze çykýar.

Bu ýagdaýda tolkuny çyzykly polýarlanan hasap edip (birjynsly izotrop dielektrikde tolkunyň $\vec{E}$ wektory öz ugruny üýtgetmän saklaýar) $\vec{E}$ wektory iki düzüjä dargadyp (tolkunyň düşme tekizligine perpendikulýar ($\vec{E}_I$) we oňa parallel ($\vec{E}_{II}$) ugurlara) olaryň her birine aýratynlykda seredip bileris. Onda düşýän tolkun (0 indeksli), serpiýän tolkun (1 indeksli) we döwülýän tolkun (2 indeksli) üçin (1.11) aňlatmalary ýazyp hem-de gyra şertleriň esasynda islendik wagt pursaty üçin

$$\omega_0 = \omega_1 = \omega_2 \tag{1.1\ \ }$$

ýygylyklaryň deňlik şertini alarys.

Iki dielektrigiň araçäginde $x = 0$ ($\cos\beta = 0$), onda (1.8) aňlatmanyň argumenti diňe z koordinata bagly bolup galýar:

$$\frac{\cos\gamma_0}{v_1} = \frac{\cos\gamma_1}{v_1} = \frac{\cos\gamma_2}{v_2}, \tag{1.16}$$

bu ýerden

$$\gamma_0 = \gamma_1 \tag{1.17}$$

deňdigi gelip çykýar, ýagny serpikme kanuny (serpigen şöhle düşme tekizliginde ýatýar) alynýar.

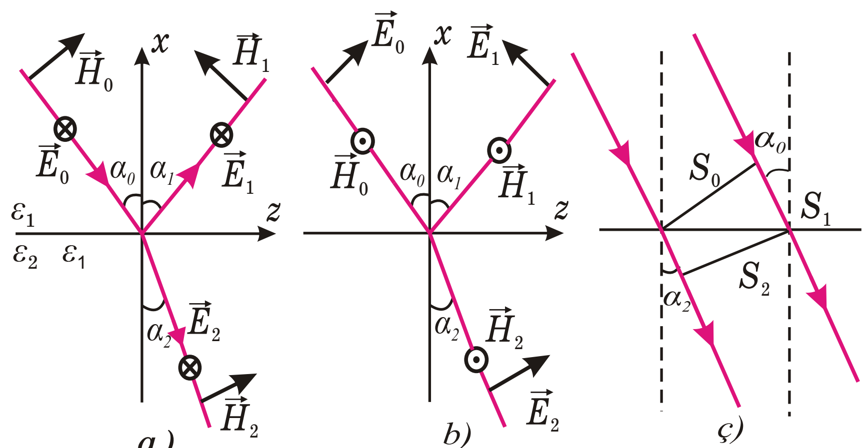
α we γ burçlaryň baglanyşygy $\alpha + \gamma = 90$ görnüşde bolýandygyna görä (1.17) aňlatmany α_0 düşme we α_1 serpikme burçlary bilen aňlatmak amatlydyr. $\alpha_0 = \alpha_1$, bolany üçin (1.16)-dan alynýan

$\dfrac{\cos\gamma_0}{\upsilon_1} = \dfrac{\cos\gamma_2}{\upsilon_2}$ aňlatmany hem döwülme kanuny arkaly aňlatmak amatly bolar:

$$n_1 \sin\alpha_0 = n_2 \sin\alpha_2$$

Düşýän, serpikýän we döwülýän tolkunlaryň amplitudalarynyň gatnaşyklaryny tapmak üçin ilki düşme tekizligine perpendikulýar ($\vec{E}_1$) elektrik wektoryna seredeliň (*1.4-nji a çyzgy*).

$\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlaryň položitel ugry saýlanyp alynyp ($\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{\upsilon}$) wektorlar sag üçlügi emele getirýändigini ýatlamak ýeterlikdir) gyra şertler ulanylanda



1.4-nji çyzgy

$E_0 + E_1 = E_2$, $H_0 \cos\alpha_0 - H_1 \cos\alpha_1 = H_2 \cos\alpha_2$ ýa-da $E_0 - E_1 = E_2 \dfrac{n_2 \cos\alpha_2}{n_1 \cos\alpha_1}$. Bu deňlemeleri goşup aşakdaky aňlatmany alarys:

$$2\,E_0 = E_2\left(1 + \frac{n_2}{n_1}\frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1}\right) = E_2 \frac{\sin\alpha_1\cos\alpha_2 + \sin\alpha_2\cos\alpha_1}{\sin\alpha_2\cos\alpha_1},$$

bu aňlatmadan geçirmekligiň amplituda koeffisiýenti

$$d_\perp = \frac{E_2}{E_0} = \frac{2\sin\alpha_2\cos\alpha_2}{\sin(\alpha_1+\alpha_2)}_\perp \quad . \qquad (1.18)$$

E_2-ni kesgitläp serpikmäniň amplituda koeffisiýentini taparys:

$$r_\perp = \frac{E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_2}{E_0} = \frac{\sin(\alpha_1-\alpha_2)}{\sin(\alpha_1+\alpha_2)}_\perp \quad . \qquad (1.19)$$

Düşýän, serpigýän we döwülýän tolkunlaryň kese-kesikleriniň meýdanlarynyň gatnaşygy (*1.4-nji ç çyzgy*) $S_0 = S_1 = S\cos\alpha_1$; $S_2 = S\cos\alpha_2$, onda serpikmäniň energetiki koeffisiýenti

$$R_\perp = \left(\frac{E_1}{E_0}\right)^2 = r_\perp^2 = \frac{\sin^2(\alpha_1-\alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1+\alpha_2)}_\perp \quad . \qquad (1.20)$$

(1.13) aňlatmadan peýdalanyp geçirmäniň energetik koeffisiýentini taparys:

$$D_\perp = d_\perp^{\,2} = \frac{n_2 S_2}{n_1 S_1} = \frac{4\sin\alpha_1\sin\alpha_2\cos\alpha_2}{\sin_2(\alpha_1+\alpha_2)} . \qquad (1.21)$$

Şeýlelikde energiýanyň saklanma kanuny ýerine ýetmelidir: $R_\perp \quad D_\perp = 1$

Indi elektromagnit tolkunynyň düşme tekizligine parallel ýagdaýyna seredeliň. Onda 1.4-nji *b* çyzgynyň esasynda

$$E_0 + E_1 = \frac{n_1}{n_2} E_2 = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} E_2 , \qquad (1.22)$$

$$E_0 - E_1 = \frac{\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2} E_2 \,. \qquad (1.23)$$

Bu deňlemeleri goşmak arkaly geçirmäniň amplituda koeffisiýentini alarys:

$$d_{\mathrm{II}} = \frac{E_2}{E_0} = \frac{2\sin\alpha_2\cos\alpha_1}{\frac{1}{2}(\sin 2\alpha_1 \quad \sin 2\alpha_2)} = \frac{2\sin\alpha_2\cos\alpha_1}{\sin(\alpha_1+\alpha_2)\cos(\alpha_2-\alpha_1)} \,. \qquad (1.24)$$

(1.22) we (1.23) aňlatmalaryň gatnaşygynyň $\frac{\frac{E_0 - E_1}{E_0 - E_1}}{} = \frac{\sin 2\alpha_1}{\sin 2\alpha_2}$ bolmagyna görä serpikmäniň amplituda koeffisiýenti üçin alarys:

$$r_{\mathrm{II}} = \frac{E_1}{E_0} = \frac{\sin 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_2}{\sin 2\alpha_1 + \sin 2\alpha_2} = \frac{\mathrm{tg}\,(\alpha_1 - \alpha_2)}{\mathrm{tg}\,(\alpha_1 + \alpha_2)} \,. \qquad (1.2\ \ )$$

Degişlilikde serpikmäniň we geçirmäniň energetiki koeffisiýentleri

$$R_{\mathrm{II}} = r_{\mathrm{II}}^2 = \frac{\mathrm{tg}^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\mathrm{tg}^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \,. \qquad (1.26)$$

$$D_{\mathrm{II}} = d_{\mathrm{II}}^2 = \frac{n_2\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1} = d_{\mathrm{II}}^2\frac{\sin\alpha_1\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1\sin\alpha_2} = \frac{4\sin 2\alpha_1\sin 2\alpha_2}{(\sin 2\alpha_1 \quad \sin 2\alpha_2)^2} \,. \qquad (1.27)$$

$\vec{E}$ wektoryň parallel düzüjüsi üçin hem energiýanyň saklanma kanuny ýerine ýetýär:

$$R_{II} + D_{II} = 1 \,.$$

(1.18), (1.19), (1.24), (1.25) aňlatmalar Makswell tarapyndan ýagtylygyň elektromagnit tolkun nazaryýetiniň teklip edilmezinden has öň Frenel tarapyndan alnan we Freneliň deňlemeleri diýilip atlandyrylýar.

(1.24) deňlemeden $\alpha_1 + \alpha_2 = 90^0$ şertde örän ajaýyp netije alynýar:

$$\mathrm{tg}\,\alpha_1 = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \,.$$

ýagny iki dielektrigiň araçäginde serpikme ýüze çykmaýar. Bu kanuna Brýusteriň kanuny diýilýär.

Indi ýagtylyk tolkuny iki dielektrigiň araçäginde dik (normal boýunça) düşýän ýagdaýyna seredeliň ($\alpha \to 0$). Bu ýagdaýda ýagtylygyň polýarlanma tekizligi kesgitsiz bolýar. (1.18) aňlatmany aşakdaky görnüşde ýazyp, çäk ýagdaýa geçeliň:

$$r_{\perp} = -\frac{\sin\alpha_1 \cos\alpha_2 - \cos\alpha_1 \sin\alpha_2}{\sin\alpha_1 \cos\alpha_2 + \cos\alpha_1 \sin\alpha_2} = -\frac{\frac{n_2}{n_1}\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1}{\frac{n_2}{n_1}\cos\alpha_2 + \cos\alpha_1},$$

$$\lim_{\alpha_1, \alpha_2 \to 0} r_{\perp} = -\frac{\frac{n_2}{n_1} - 1}{\frac{n_2}{n_1} + 1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}; \qquad \lim_{\alpha_1, \alpha_2 \to 0} R_{\perp} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2.$$

Edil şu usul bilen R_{II} - alyp, $R_{\perp} = R_{II} = R$ bolýandygyny subut etmek mümkin, bu bolsa garaşylýan netijä gabat gelýändigini görkezýär. Eger $n_1 < n_2$ bolsa $r_{\perp} < 0$ bolýar. Bu bolsa düşýän tolkun bilen serpigýän tolkunyň fazasynyň garşylyklydygyny görkezýär. Başgaça aýdanymyzda serpikmede elektrik tolkuny «ýarym tolkunyny ýitirýär» ýagny serpikmede tolkun böküş arkaly fazasyny π ululyga üýtgedýär.

Gurşaw $n = \frac{n_2}{n_1} > 1$ şerti kanagatlandyrýan bolsa oňa optiki taýdan dykyz gurşaw diýilýär.

Eger tolkun wakuumdan gurşawa (n=1) düşýän bolsa onda

$$R = \left(\frac{n_2 - 1}{n_2 + 1}\right)^2 \tag{1.28}$$

ululyga gurşawyň **serpikdirme ukyby** diýilýär. Şoňa degişli

$$D = \frac{4n_2}{(n_2 + 1)^2} \tag{1.29}$$

ululyga maddanyň **üst durulygy** diýilýär.

Şeýlelikde Makswelliň nazaryýeti diňe ýagtylygyň ýaýrama kanunlaryny düşündirmek bilen çäklenmän, eýsem Fermanyň we Gýuýgensiň düzgünleriniň başarmaýan soraglaryna hem kanagatlanarly jogap berýär.

1.4. Ýagtylygyň tolkun we korpuskula (bölejik) häsiýeti

Elektromagnit tolkunlarynyň optika degişli bölegi öwrenilende olaryň käbir häsiýetli aýratynlygy ýüze çykýar. Birnäçe hadysalarda ýagny interferensiýada, difraksiýada, polýarlanmada, kristallaryň optiki anazitroplygynda, ýagtylyk iki dürli gurşawlaryň araçäginde döwlende onuň tolkun häsiýete eýedigi ýüze çykýar. Beýleki birnäçe: fotoelektrik, absolýut gara şöhlelenme, atomlaryň we molekulalaryň kesgitli spektrli şöhle goýberme hadysalarynda ýagtylyk bolejikleriň akymy görnüşinde, ýagny her biri kesgitli $\varepsilon = \hbar\nu$ energiýa we $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ impulsa eýe bolan fotonlaryň akymy görnüşinde ýüze çykýar. Bu ýerde $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$, $h = 6{,}64 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ – Plankyň hemişeligi, ω - ýagtylygyň aýlaw ýygylygy, $\vec{k}$ - ýagtylygyň tolkun wektory. Hadysalaryň üçünji topary: ýagtylygyň serpikmesi, basyşy, dispersiýasy onuň tolkun we korpuskulýar häsiýetleriniň ikisi bilenem düşündirilip bilinýär. Ýagtylygyň dürli hadysalarda özüni alyp barşynyň düýpli tapawutlanmasy örän täsindir, nusgawy nukdaýnazardan beýle ýagdaý ýol bererlik däldir.

Hakykatdanam eger ýagtylyk elektromagnit tolkuny bolsa, onda şeýle tolkuna degişli fiziki meýdan giňişlikde deňölçegli paýlanyp, wagta baglylykda üýtgemelidir. Netijede ýagtylyk tolkunlarynyň giňişligiň käbir nokadynda jemlenmäge mümkinçiligi bolmaýar. Emma ýagtylygyň korpuskulýar tebigaty şöhle energiýasynyň bir nokatda (bölejikde) bolmalydygyna esaslanýar. Başgaça aýdanymyzda fiziki mysaly şekilleri bilen düýpli tapawutlanýan tolkun we bölejik biri-birini ret edýär we nusgawy nukdaýnazardan beýle ýagdaýyň bolmagy mümkin däl. Emma ýagtylygyň we mikrobölejikleriň dünýäsindäki bölejikleriň (çyzykly ölçegleri $10^{-10} \div 10^{-15} m$ bolan bölejikler) has takyk derňewler arkaly öwrenilmegi nusgawy garaýyşyň nädogrudygyny görkezdi. Elementar bölejikleriň we ýagtylygyň bölejik we tolkun mysaly şekilleri bir-birini ret etmän gaýtam olaryň özüni alyp barşyny beýan etmekde biri-birini dolduryarlar. Mikrobölejikleriň dünýäsindäki bölejikleriň bir wagtyň özünde tolkun we bölejikdigi tejribelerde doly tassyklanylýar. Käbir bölejikleriň tolkun häsiýeti has aýdyň ýüze çykýan bolsa, käbiriniň bölejik häsiýeti has aýdyň ýüze çykýar.

Mikrodünýädäki ownujak bölejikler anyk görnüşdäki tolkun ýa-da bölejik däldir. Ýagtylyga we ownujak bölejiklere bolan şeýle garaýyş N.Bor (1885-1962 ý.), S.I.Wawilow (1891-1951 ý.), M.Born (1882-1970 ý.), P.Dirak (1902-1982 ý.) we beýleki alymlar tarapyndan döredilip, häzirki wagtda doly ykrar edilen garaýyşa öwrüldi.

1.5. Ýagtylygyň tolkun we korpuskula häsiýetleriniň özara baglanyşygy

Ýagtylygyň elektromagnit nazaryýeti ony tolkunyň esasy häsiýetnamalary bolan ýygylyk, tolkun uzynlyk, amplituda we ş.m ululyklar arkaly beýan edýär. Ýagtylygyň kwant nazaryýeti ony fotonlaryň sany, fotonyň energiýasy hem-de impulsy we ş.m. düşünjeler arkaly beýan edýär.

Eger elektromagnit tolkuny ginişlikde

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{\upsilon} \right) \qquad (1.30)$$

görnüşde ýaýraýan bolsa, onda

$$W = \frac{1}{4\pi} \int_V \varepsilon E^2 dV = \frac{1}{4\pi} \int_V \mu H^2 dV \qquad (1.31)$$

aňlatma laýyklykda bu tolkuna degişli bolan V göwrüm üçin (-göwrümi taraplary x_0, y_0, z_0 bolan parallellopiped diýip kabul etsek) energiýanyň deňlemesini aşakdaky görnüşde ýazmak bolýar:

$$W = \frac{\varepsilon E_0^2}{4\pi} \int_0^{x_0} \int_0^{y_0} \int_0^{z_0} \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{\upsilon} \right) dxdydz \qquad (1.32)$$

bu integraly çözsek aşakdaky aňlatmany alarys:

$$W = \frac{\varepsilon E_0^2}{8\pi} V + \frac{\varepsilon E_0^2 x_0 y_0 z_0 \upsilon}{8\pi\omega} \sin \frac{\omega x_0}{\upsilon} \cos 2\omega \left(t - \frac{x_0}{2\upsilon} \right). \qquad (1.33)$$

Elektromagnit energiýasynyň wagta görä orta bahasy

$$\overline{W} = \frac{\varepsilon E_0^2}{8\pi} V. \qquad (1.34)$$

bolar. Kwant nazaryýetinde bu energiýa V göwrümdäki fotonlaryň orta sany $\overline{N}_V$ arkaly aňladylýar:

$$\overline{W} = \overline{N}_V V\hbar\omega \qquad (1.3\ \ )$$

(1.34) we (1.35) deňeşdirmek bilen alarys:

$$E_0 = \sqrt{\frac{8\pi\hbar\omega}{\varepsilon V} N_V}\ . \qquad (1.36)$$

Eger elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň ýerine onuň täsir edýän bahasyny $E^0 = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$ ululygy we $N = \frac{N_V}{V}$ göwrüm birligindäki foton sany diýip belläp hem-de waka wakuumda bolup ($\varepsilon=1$) geçýär diýsek, onda güýjenmäniň täsir edýän bahasy üçin

$$E^0=\sqrt{4\pi\hbar\omega N} \tag{1.37}$$

aňlatmany alarys.

(1.36) aňlatma ýagtylygyň meýdan häsiýetnamalaryny (yrgyldynyň amplitudasy we aýlaw ýygylygy bilen korpuskulýar häsiýetnamasyny (göwrüm birligindäki fotonlaryň sany) özara baglanyşdyrýar. Şu ýerden hem ýagtylyk tolkunynyň elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň amplitudasynyň kwantlanýan ululykdygy gelip çykýar. Kwantlanýan amplitudaly tolkunyň (wakuum üçin) deňlemesi

$$\vec{E}=\vec{E}_1\sqrt{8\pi\hbar\omega}\,\sqrt{N}\cos\omega\left(t-\frac{x}{c}\right) \tag{1.38}$$

görnüşde ýazylyp bilinýär. Bu ýerde $\vec{E}_1$-elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň birlik wektory. Bu aňlatmadan $\vec{E}$ elektromagnit meýdanynyň amplitudasynyň göwrüm birligindäki fotonlaryň sanynyň artmagy ýa-da kemelmegi bilen üýtgeýändigi gelip çykýar.

Eger elektromagnit meýdany köpsanly dürli monohromatik tolkunlardan ybarat bolsa, onda ony jem görnüşinde aňlatmak bolýar:

$$\vec{E}=\vec{E}_1\sum_i\sqrt{8\pi\hbar\omega_i}\,\sqrt{N_i}\cos\omega_i\left(t-\frac{x}{c}+\varphi_i\right). \tag{1.39}$$

Bu ýerde ω_i,φ_i,N_i degişlilikde i-nji monohromatik tolkunyň töwerek ýygylygy, başlangyç fazasy, göwrüm birligindäki fotonlaryň sany. Her biri kesgitli ugurda ýaýraýan tekiz monohromatik tolkunlaryň toplumy üçin elektromagnit meýdanynyň wektorynyň deňlemesini umumy görnüşde aňlatmak amatlydyr:

$$\vec{E}=\sum_i\vec{E}_{1i}\sqrt{8\pi\hbar\omega_i N_i}\cos\omega_i\left(t-\frac{(\vec{N}_i\vec{R})}{c}+\varphi_i\right). \tag{1.40}$$

Bu ýerde $n_i - i$ -nji tekiz tolkunyň üstüne inderilen normalyň birlik wektory; $\vec{E}_{1i} - i$ -nji ýagtylyk tolkunynyň elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň birlik wektory; $\vec{R}$ - koordinata başlangyjyndan meýdanyň gözegçilik edilýän nokadyna geçirilen radius-wektor. Ýygylyklaryň spektrleriniň üznüksiz bolan ýagdaýynda (1.40) aňlatmadaky jem ω bagly üýtgeýän integral bilen çalşyrylýar.

Elektrodinamikanyň kwant nazaryýeti elektromagnit meýdanyň amplitudasyna fotonlaryň sanyna baglylykda kwant-mehaniki funksiýa täsir edýän operatorlar hökmünde seredýär. Bu operatorlary ulanmak arkaly şöhlelenmäni, siňdirmäni, pytramany we ş.m. hadysalary mukdar taýdan beýan etmäge mümkinçilik döredýän fotonlaryň sany bilen baglanyşykly anyk görnüşdäki funksiýalary berýän kwant-mehaniki differensial deňlemeler alynýar. Fizikanyň kwant nazaryýetinden alynýan wajyp netijeleriň biri, energiýanyň aňlatmasynda N_i-iň ýerine $N_i + \frac{1}{2}$ ululygyň alynýanlygydyr. Şonuň esasynda göwrüm birligindäki energiýanyň aňlatmasy aşakdaky görnüşde aňladylýar:

$$W = \sum_i \hbar\omega_i \left(N_i + \frac{1}{2} \right). \qquad (1.41)$$

Şeýlelikde, berlen göwrümde hakyky fotonlar ýok (N_i) mahalynda-da elektromagnit meýdan nola deň däldir. Bu ýagdaýda elektromagnit meýdanyň energiýasy

$$W_0 = \sum_i \frac{\hbar\omega_i}{2} \qquad (1.42)$$

ululyga eýedir.
Bu energiýa elektromagnit (foton) wakuumynyň **nolunjy energiýasy** diýlip atlandyrylýar. Berlen göwrüm (V)

we spektriň kesgitli $\Delta\omega$ çägi üçin i-nji gymmatlaryň sanyny hasaplamak bilen ΔW_0 energiýanyň üýtgemesini tapmak mümkin. Elektromagnit meýdanynyň impulsy

$$\vec{P} = \sum_i \hbar \vec{k}_i N \tag{1.43}$$

görnüşde aňladylýar.

Bu ýerde $\vec{k}_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \vec{n}_i$ i-nji elektromagnit tolkunynyň tolkun wektory. Nolunjy energiýa eýe bolan meýdanyň nolunjy impulsy nola deňdir. Ahyrda, impulsyň momenti

$$\vec{L} = \sum_i \hbar \vec{k}_{1,i} \left\{ N_{i,1} - N_{i,-1} \right\}. \tag{1.44}$$

$\vec{k}_{1,i}$ - birlik tolkun wektory; $N_{i,1}$ spini $l_{i,1} = \hbar \vec{n}_i$ bolan fotonlaryň sany; $N_{\imath,-1}$ spini $l_{i,-1} = -\hbar \vec{n}_i$ bolan fotonlaryň sany. Bu ýeden görnüşi ýaly nolunjy impulsynyň momenti nola deňdir.

Ýokarda alnan netijelerden görnüşi ýaly ýagtylygyň tolkun we korpuskulýar häsiýetlerini baglanyşdyrýan ýeke-täk nazaryýeti döretmek elektromagnit meýdanynyň fizikasynyň esasy we düýpli meselesi bolup durýar. Şu meselä degişli soraglaryň agramly bölegi kwant elektrodinamikasynda öz çözülişini tapan hem bolsa, häzire çenli ýeke-täk nazaryýeti döredilmedik.

1.6. Ýagtylyk çeşmeleri

Görünýän ýagtylygyň şöhlelenmesiniň esasy mehanizmi atomlaryň ýa-da molekulalaryň bir energetik haldan beýleki energetik hala geçmegi bilen energiýasynyň üýtgetmesiniň netijesidir. Atomlaryň elektronlary aşaky energetik dereje geçende energiýasyny ýitirip töweregindäki giňişlikde elektromagnit tolkunyny oýandyrýar. Köpsanly tejribeleriň netijesinde atomlaryň şöhlelenmesini elektrodinamikada beýan edilýän, dipolyň şöhlelenmesine meňzeş diýlip kabul edilse uly ýalňyşlyk goýberilmeýändigi belli boldy. Bu bolsa atom ýadrosy bilen elektronyň çylşyrymly özara täsirinde ýagtylyk şöhlelenmesiniň döreýşiniň mysaly şekilini nusgawy elektrodinamikada kemsiz öwrenilen dipolyň özüni alyp barşy ýa-da dipol momentine wagta baglylykda periodiki üýtgeýän ossillýator ýaly garamaga mümkinçilik berýär.

Şeýle mysaly şekile laýyklykda ýagtylyk çeşmesi-bir-birine baglanyşyksyzlykda, suglar diýlip atlandyrylýan elektromagnit tolkunlaryny goýberýän, elementar dipollaryň toplumydyr. Tolkun sugy diýlende dowamlylygy atom ossillýatorynyň **gowulygy** bilen kesgitlenilýän wagt boýunça çäklenen ýönekeý (garmoniki) tolkunyň «parçasyna» (obrywok) düşünilýär.

Elektrodinamikada subut edilişine görä atom ossillýatorynyň **gowulygy** (dobrotnosty) $Q \approx 10^7$-ä deňdir. Bu bolsa şöhlelenme wagtynyň dowamynda elektromagnit meýdanynyň takmynan 10^7 yrgyldysynyň boljakdygyny görkezýär, ýagny suguň dowamlylygy $\tau = QT_0$ boljakdygyny görkezýär.

Bu ýerde T_0 yrgyldynyň periody bolup, $T_0 = \dfrac{2\pi}{\omega_0} = \dfrac{1}{\nu_0}$ ýaly aňladylýar, ν_0 -yrgyldynyň ýygylygy; Q-ossillýatoryň gowulygy bolup, $Q = \dfrac{\omega_0}{\Delta\omega}$ ýaly aňladylýar.
Onda

$$\tau \cdot \Delta\omega = 2\pi \text{ ýa-da } \tau \cdot \Delta\nu = 1 . \qquad (1.4\ \ )$$

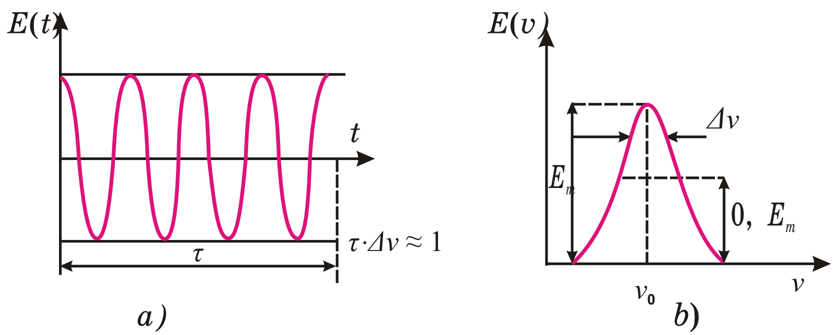
Bu ýerde $\Delta\nu$ -şöhlelenen suguň ýygylyklar zolagy. (1.45) gatnaşyk wagt boýunça çäklenen periodiki hadysalaryň örän ajaýyp häsiýetini aňladýar, ýagny hadysanyň dowamlylygynyň ýygylyklar zolagynyň giňligine köpeldilmegi takmynan bire deň.

τ wagt dowamynda wakuumda elektromagnit yrgyldysynyň ýaýraýan aralygyna ($l = \tau \cdot c$) suguň uzynlygy diýilýär.

$\tau \Delta \nu = 1$ we $|\Delta \nu| = \dfrac{c}{\lambda^2} |\Delta \lambda|$ aňlatmalardan suguň uzynlygy üçin

$$l = \frac{c}{\Delta \nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \equiv m\lambda \qquad (1.46)$$

aňlatmany alarys. Bu ýerde $\Delta\lambda$ ($\Delta\nu$) spektriň giňligine degişli tolkun uzynlygyň çäklenen ululygy; $m = \dfrac{\lambda}{\Delta \lambda}$ interferensiýanyň tertibini aňladýar, ýagny interferensiýa zolaklarynyň iň uly san bahasy.



1.5-nji çyzgy

Adaty ýagtylyk çeşmelerinde ýagtylyk köpsanly atomlaryň şöhlelenmesi bilen döredilýär. Eger ýagtylyk kadaly ertde we gaz molekulalary tarapyndan öhlelendirilýän bolsa, onda her kub santimetrde 10^{19} sany atomy energetiki halyny üýtgemesi bolup geçýär. Eger atomlar bir-birine baglany yksyzlykda ýagtylyk şöhlelendirýän bolsalar, onda her suga degişli yrgyldylaryň fazasy özara baglanyşyp bilmeýär. eýle yrgyldylary biri-birini üstüne dü megi bilen döredilýän meýdany depgini go ulýan yrgyldylary depginlerini jemine de bolýar. öhlelenmäni spektrini ini aýratyn öhlelenijileri spektrleri arkaly kesgitlenilýär. öhlelenmäni spektral çyzyklaryny emele getirýän egrisi her bir atomy öhlelendirýän spektrini emele getirýän egrisine me ze likde gaýtalanýar.

1. -nji *a*) çyzgyda tolkun parçasy, 1. -nji *b*) çyzgyda tolkun parçasyny spektrni ini ekillendirilen. $\tau \cdot \Delta\nu \approx 1$.

Bu ýagdaýda ýagtylyk çe mesini spektral çyzyklaryny gi elmesini birjynslylygy barada gürrü edilýär, ýagny ýagtylyk çe mesini jemleýji meýdany ähli elementar öhlelendirijileri de derejedäki goantlary bilen döredilýär. (1.4) a latma arkaly kesgitlenilýän spektral çyzyklary gi ligine tebigy gi lik diýilýär.

Emma her bir atomy merkezi ýygylygyny birbirinden tapawutlanýan ýagdaýy hem gabat gelýär. Beýle ýagdaý gazlarda hereket edýan atomlarda Dopler effektini esasynda ýüze çykýar. Bu ýagdaýda spektral çyzyklary emele getirýän egrisini görnü i di e her bir atomy öhlelendirýän spektrine bagly bolman, atomlary tizlik boýunça paýlanmasyna hem bagly bolýar. Beýle ýagdaýda spektral çyzyklary gielmesi birjynsly däl gi elme diýlip atlandyrylýar.

Belli bol y ýaly atomlary görünýän ýagtylygy öhlelendirýän wagtyny dowamlylygy takmynan $\tau \cong 10^{-8} s$ bolýandygyna görä, spektri tebigy gi ligi $\Delta\nu \approx 10^{8}\ Gs$ bolýar. $\frac{\Delta\nu}{\nu_0} << 1$ erti kanagatlandyrýan şöhlelenmä kwazimonohromatik öhlelenme diýilýär. Atomlary özara çakny malaryny netijesinde atomy öhlelenme wagtyny dowamlylygy kiçelýär we öhlelenme spektri gi elýär. Mundan ba ga-da öhlelenme spektirini gi elmesi Dopler effektini netijesinde hem bolup bilýär. Mysal üçin, otag temperaturasynda ($18^0\ C \div 20^0\ C$) wodorod atomyny spektral çyzyklaryny ini onu tebigy ininden 00 esse uludyr.

öhlelenme spektrini inini kiçeltmek üçin öhlelenýän ulgamy gowulygyny ýokarlandyrmaly ýa-da aýry-aýry atomlary özara ylala ykly öhlelenmesini üpjün etmäge synany maly. Optiki öhlelenmäni monohromatikligini ýokarlandyrmak lazerlerde amala a yrylýar. Lazer öhlelendirijilerde alynýan tolkun parçasyny uzynlygy aýratyn atomlary öhlelenmesine esaslanan çe meleri tolkun parçasyndan has uludyr. örite lazer arkaly ini takmynan 10^3 Gs-e çenli bolan spektral çyzyklary almak mümkin. Beýle öhlelenmeleri tolkun parçasyny uzynlygy ýüz kilometre ýetýär. De e dirmek üçin Günü öhlelendirýän ýagtylygyny tolkun parçasyny uzynlygyny 10 mkm-den geçýändigini bellemek ýerliklidir.

1.7. Ýagtylygy kabul edijiler

Elektromagnit yrgyldylary wakuumda ýaýramak bilen, akymy Umowyň – Poýntingiň wektory $\vec{S} = \left[\vec{E}, \vec{H}\right]$ arkaly kesgitlenilýän energiýany geçirýär. Elektromagnit meýdanyny madda bilen özara täsirinde birnäçe häsiýetli aýratynlyklara eýe bolan hadysalar ýüze çykýar. Bu hadysalar ýagtylyk akymyny ölçemäge mümkinçilik berýär. Bu hadysalara mysal hökmünde jisime ýagtylyk dü ende gyzýandygyny, içki we da ky fotoelektrik hadysalary görkezmek bolar. Optiki öhlelenmäni madda bilen özara täsirini aýratynlygy onu kwant häsiýetliligi bilen baglany yklydyr. Madda dü ýän ýagtylyk öhlelerini häsiýetli täsiri ýagtylyk tolkunyny elektrik meýdany güýjenmesi arkaly kesgitlenmän, eýsem maddany atomlary bilen özara täsire girýän fotonlary sany arkaly kesgitlenýändigindedir. iziki meýdandaky fotonlary sany bolsa elektromagnit meýdany depginine baglydyr. Maddany öhlelenmäni täsirinde özüni alyp bar yny esasynda elektromagnit meýdanyny depgini kesgitlenilýär. Optiki öhlelenmäni kabul edijiler ýa-da detektorlar ýokarda beýan edilen effektleri esasynda i leýärler. Islendik kabul ediji kesgitli inertlilige eýe bolýandygyna görä ähli kabul edijiler ýagtylygy ortaça depginini duýýarlar. o a görä tegeleklemek arkaly kesgitlenilýän wagt kabul edijini inertlilik wagty bilen kesgitlenilýär. Ba gaça aýdanymyzda ýagtylygy depginini üýtgemesini hasaba almak mümkin bolan i kiçi wagt dowamlylygy Δt_p bilen kesgitlenilýär. Bu wagt dowamlylygy kabul edijini depgini garmoniki kanun boýunça (modulirlenen) üýtgeýän Ω ýygylykly ýagtylyk öhlesi bilen ýagtylandyrmak arkaly tejribede kesgitlenilýär. Modulirleme ýygylygyny artmagy bilen kabul edijini seslenmesini gow aýandygyna gözegçilik etmek mümkin. Mysal üçin, Ω ýygylykda fotoelektrik akymyna. agtylyk kabul edijini inertliligini häsiýetlendirýan i gyraky çäk ýygylygy hökmünde adatça kabul edijini seslenmesini iki esse kiçelýän modulirleýji $\Omega_ç$ ýygylygy kabul edilýär. agtylygy depginini üýtgemesini hasaba almak mümkin bolan i kiçi wagt aralygy bilen modulirlemäni çäk ýygylygyny $(\Omega_ç)$ baglany ygy $\Omega_ç \Delta t_p \approx 1$ görnüşde bolýar.

agtylygy kabul edijileri iki görnü i tapawutlandyrylýar. Olary birinji görnü ine selektiw (saýlaýjylyk ukybyna eýe bolan) diýlip atlandyrylýar, ikinji selektiw däl diýlip atlandyrylýar. Adam gözi selektiw kabul edijilere degi li.

Islendik optiki kabul edijini esasy wajyp häsiýetnamasy olary gow ak ýagtylyk akymyny duýmak ukyby bolup durýar. Gow ak ýagtylyk akymyny inçeden (takyk) duýmak ukyby adam gözüne mahsusdyr. Gara ka uýgunla an adam gözi aýry-aýry fotonlary saýgaryp bilýär.

II BAP

$\Phi=4\pi I$

$E=d\Phi/dS$

ÝAGTYLYGY HÄSIÝETLENDIRÝÄN ULULYKLAR WE OLARYŇ ÖLÇEG BIRLIKLERI (FOTOMETRIÝA)

2.1. Ýagtylyk energiýasynyň akymy. Ýagtylyk akymy

agtylygy göze ýa-da ba ga bir kabul edijä (fotoelemente, fotoýorka we .m) täsiri, olara ýagtylyk tolkunyny geçirýän energiýasyny berilmegi bilen baglany yklydyr. agtylygy elektromagnit tolkunlarydygy 186 -nji ýylda Makswell tarapyndan subut edildi. Ak ýagtylygy spektre dargamagy, onu dürli tolkun uzynlykly elektromagnit tolkunlardan ybaratdygyny a ladýar. pektri dürli tolkun uzynlyklaryny çägine dü ýän energiýasy dürlüdir. Energiýa akymyny tolkun uzynlyklar boýunça paýlanmasy:

$$\varphi(\lambda)=\frac{d\Phi_e}{d\lambda} \tag{2.1}$$

a latma arkaly häsiýetlendirilýär. Bu ýerde $d\Phi_e$ λ-den ($\lambda+d\lambda$) çenli tolkun uzynlyklary çägine dü ýän energiýa akymy. λ_1-den λ_2-ä çenli tolkun uzynlyklary çägine dü ýän energiýa akymy

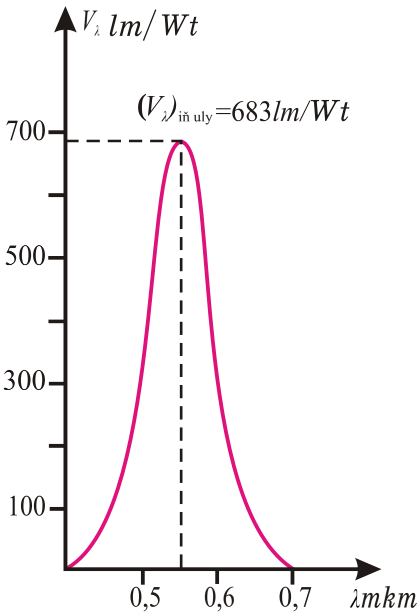
$$\Phi_e=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varphi(\lambda)\,d\lambda \tag{2.2}$$

görnü de a ladylýar.

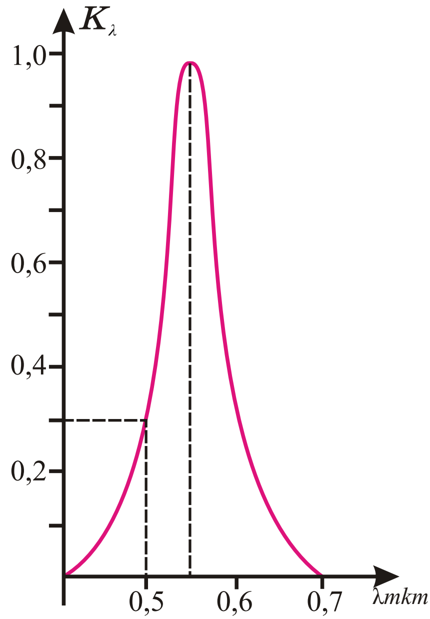
agtylyk tolkunlaryny ajaýyp häsiýetlerinden biri – göze dü ende görü duýgusyny döretmegidir. Dürli tolkun uzynlykly ýagtylygy birde energiýa akymyny döredýän görü duýgusy birme ze däldir. Mysal üçin, 400 nm^2-den gysga we 760 nm^2-den uzyn elektromagnit tolkunlaryny uly energiýa akymy-da hiç hili görü duýgusyny döretmeýär; birde energiýa akymyna eýe bolan ýa yl we gyzyl ýagtylyk tolkunlaryny döredýän görü duýgusy hem bir-birinden birnäçe esse tapawutlanýar. o a görä, gözü öhlelenmäni kabul edi häsiýetini, ýagny spektral duýgurlygyny kesgitlemek zerur. Onu üçin öhlelenmäni görünmesi ýa-da görünme diýlip atlandyrylýan ululyk girizilýär. Energiýa akymyny bir birligini döredýän ýagtylyk akymyny tolkun uzynlyga baglylygyny a ladýan ululyga öhlelenmäni görünmesi ýa-da görünme funksiýasy diýilýär. Ol V_λ ýaly belgilenip lm/Wt birlikde ölçenilýär (lýumen ýagtylyk akymyny ölçeg birligi). Görünme funksiýasy tejribe arkaly kesgitlenilip adam gözüni ortaça görü ukybyny häsiýetlendirýär. Tejribelerden alnan netijeler görünme funksiýasyny i uly bahasy tolkun uzynlygy 0, mkm-ne gabat gelip, san taýdan $(V_\lambda)_{\text{iň uly}} = 683\,\dfrac{lm}{Wt}$ baha deňdigini görkezýär. Bu ululyga öhlelenme kuwwatyny ýagtylyk ekwiwalenti hem diýilýär. agtylyk ekwiwalentini ters ululygyna ýagtylygy mehaniki ekwiwalenti diýlip atlandyrylýar we onu san bahasy $A = \dfrac{1}{(V_\lambda)_{\text{iň uly}}} = \dfrac{1}{683} = 0.00146\dfrac{Wt}{lm}$. Görünme funksiýadan ba - ga-da görü duýgusyny häsiýetlendirmek üçin göräli görünme funksiýasy diýilýän ululyk girizilýär, ýagny

$$K_\lambda = \frac{V_\lambda}{(V_\lambda)_{\text{i uly}}} \qquad (2.3)$$

A akdaky 2.1-nji we 2.2-nji çyzgyda $V_\lambda = f(\lambda)$ we $K_\lambda = f(\lambda)$ baglany yklar ekillendirilen.



2.1-nji çyzgy



2.2-nji çyzgy

Käbir üstden wagt birliginde akyp geçýän, görüş duýgusy bilen kesgitlenilýän ýagtylyk energiýasyna ýagtylyk akymy diýilýär. Tolkun uzynlygyny käbir $d\lambda$ çägi boýunça geçýän ýagtylyk energiýasy $d\Phi_e$ we ýagtylyk akymyny $d\Phi$ arasyndaky baglany yk a akdaky ýalydyr:

$$d\Phi = V_\lambda \varphi(\lambda) d\Phi_e \ . \qquad (2.4)$$

(2.1)-den peýdalanyp ýazsak:

$$d\Phi = V_{\lambda}\varphi\left(\lambda\right)d\lambda \ . \qquad (2.\ \ )$$

Doly ýagtylyk akymyny görünme funksiýasyny we energiýa akymyny üsti bilen a latsak:

$$\Phi = \left(V_{\lambda}\right)_{\text{iň uly}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_{\lambda}\varphi(\lambda)d\lambda \ . \qquad (2.6)$$

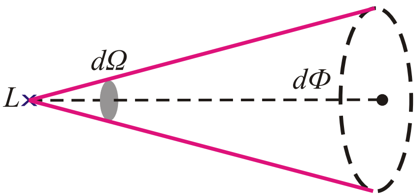
Islendik tolkun uzynlykly ýagtylygy 1 lýumen akymy $\frac{A}{K_{\lambda}}$ Wt energiýa akymyna de dir. Mysal üçin, λ= 0,

mkm tolkun uzynlykly ýagtylygy 1 lm akymyna degi li göräli görünme funksiýasyny bahasy *(2.1-nji çyzgydaky grafikden)* $K_{\lambda} = 0{,}3$. Onda 1 lm $= \frac{0{,}00146}{0{,}3} \approx 0{,}0487\,Wt$.

eýlelikde, fotometrik ululyk bolan ýagtylyk akymy görü duýgusy bilen baha berilýän ýagtylyk öhlelenmesini kuwwaty arkaly kesgitlenilip bilinýär.

2.2. Ýagtylyk ululyklary

1. Ýagtylyk güýji



2.3-nji çyzgy

agtylygy ölçemekde we ýagtylyk tehnikasynda ýagtylyk akymy esasy ululyk bolup hyzmat edýändigine garamazdan ýagtylygy häsiýetlendirmek üçin esasy ululyk hökmünde ýagtylyk güýji kabul edilýär. Nokatlanç ýagtylyk çe mesini güýji berlen ugurdaky ýagtylyk akymyny jisim burçuna bolan gatna ygy ýaly kesgitlenilýär *(2.3-nji çyzgy)*.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \cdot \tag{2.7}$$

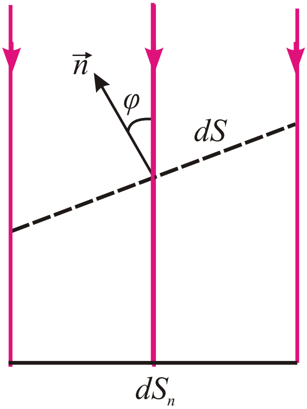
Eger nokatlanç ýagtylyk çe mesi ähli ugurlara de ölçegli öhle göýberýän bolsa, ýagny çe me izotrop bolsa onda ýagtylyk güýji

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \tag{2.8}$$

gatna ykdan kesgitlenilýär. Bu ýerde Φ doly ýagtylyk akymy. lçeg birlikleri halkara ulgamynda esasy birlikleri hatarynda bolan ýagtylyk güýji kandelada (*kd*) ölçenilýär.

Gara jisimi 2042, K temperaturada (kadaly basy da platinany gatama temperaturasy) $\frac{1}{60}\,sm^2$ üst meýdandan perpendikulýar ugra öhlelendirilýän ýagtylyk güýji 1 *kd* diýlip kabul edilen.

agtylyk güýjüni jisim burçuny ululygyna köpeltmek hasylyna ýagtylyk akymy diýilýär. Halkara birlikler ulgamynda ýagtylyk akymy lýumenlerde ölçenilýär: $[\Phi]$ = lýumen = $kd \cdot sr$.



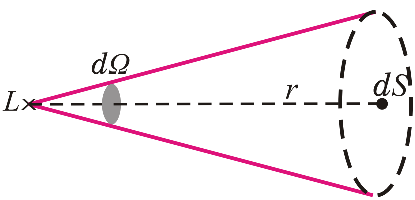
2.4-nji çyzgy

agtylyk üste dü ende ony ýagtylandyrýar. agtylandyryly diýlip, üste dik dü ýan ýagtylyk akymyny bu üstü meýdanyna bolan gatna ygy bilen kesgitlenilýän ululyga aýdylýar:

$$E_0 = \frac{d\Phi}{dS_n} . \qquad (2.9)$$

Eger ýagtylyk dS üste ýapgyt dü ýän bolsa *(2.4-nji çyzgy)*, onda:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi}{dS_n}\cos\varphi , \qquad (2.10)$$



2.5-nji çyzgy

sebäbi $dSn = dS \cos\varphi$ (2.9) de ligi ulanyp, (2.10) de - ligi eýle ýazyp bileris:

$$E = E_0 \cos\varphi . \qquad (2.11)$$

Goý, L nokatlanç ýagtylyk çe mesinden ýagtylyk öhleleri dS_n sferik üste dik dü ýän bolsun. e meden dS_n-e çenli aralyk r bolsun *(2.5-nji çyzgy)*.
Onda jisim burçy

$$d\Omega = \frac{dS_n}{r^2} \qquad (2.12)$$

bolar. (2.7) a latma boýunça

$$d\Phi = Id\Omega = \frac{I}{r^2} dS_n , \qquad (2.13)$$

onda (2.10) a latma boýunça

$$E = \frac{d\Phi}{dS_n}\cos\varphi = \frac{I}{r^2}\cos\varphi \quad \text{ýa-da} \quad E = \frac{I}{r^2}\cos\varphi . \qquad (2.14)$$

Bu a latma üstü ýagtylandyryly yny çe mäni ýagtylyk güýjüne, ýagtylygy dü me burçuna we çe -me bilen üstü arada lygyna baglylygyny görkezýär. Halkara birlikler ulgamynda ýagtylandyryly y birligi lýukslerde (lk) ölçenilýär. $1m^2$ üste bir lýumen ýagtylyk akymyny de ölçegli paýlanmasy netijesinde döreýän ýagtylandyryly bir lýuks ýagtylandyry diýlip kabul edilen.

3.Ýagtylanyjylyk

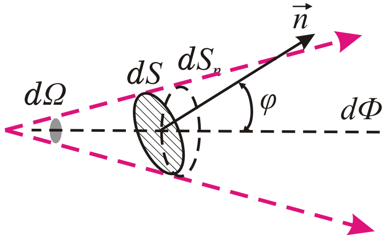
Kesgitli ölçeglere eýe bolan ýagtylyk çe mesini öhlelendirýän ýagtylyk akymyny häsiýetlendirmek üçin ýagtylanyjylyk diýilýän ululyk girizilýär. Eger ýagtylyk çe mesini dS üst meýdançasyndan $d\Phi$ ýagtylyk akymy öhlelendirilýän bolsa, onda

$$R = \frac{d\Phi}{dS} \qquad (2.1\ \ )$$

gatna yk bu üstü ýagtylanyjylygyny kesgitleýär. Eger ýagtylgyç özi öhlelenmän, üstüne dü ýän ýagtylyk akymyny serpikdirmegi hasabyna ýagtylanýan bolsa, onda (2.1) a latmadaky $d\Phi$ ýagtylyk akymy dS meýdançadan serpigen ýagtylyk akymy ýaly kesgitlenilýär. Halkara birlikler ulgamynda ýagtylanyjylyk lýukslerde ölçenilýär.

4. Çeşmäniň ýagtylanma ýitiligi (ýarkost)

Gutarnykly ölçegleri bolan ýagtylyk çe mesi ýagtylanma ýitiligi diýilýän ululyk bilen hem häsiýetlendirilýär. e mäni ýagtylyk güýjüni onu üstüni meýdanyna bolan gatna ygyna çe mäni ýagtylanma ýitiligi diýilýär:



2.6-njy çyzgy

$$B = \frac{I}{dS_n} \ . \qquad (2.16)$$

Bu a latmany almak üçin a akdaky mysaldan peýdalanaly . Goý, ýagtylyk çe mesini dS üst meýdançasyndan, bu üste inderilen normal bilen φ burçy emele getirýan ugur boýunça $d\Omega$ jisim burçuny çäginde $d\Phi$ ýagtylyk akymy öhlelendirilýän bolsun *(2.6-njy çyzgy)*.
Bu ýagdaýda

$$d\Phi = BdS_n d\Omega \ . \qquad (2.17)$$

Bu ýerden

$$B = \frac{d\Phi}{dS_n d\Omega} . \qquad (2.18)$$

(2.7) a latmany peýdalanyp (2.18)-i a akdaky ýaly ýazyp bileris:

$$B = \frac{I}{dS_n} \ .$$

Halkara birlikler ulgamynda çe mäni ýagtylanma ýitiligi nitde (nt) ölçenilýär.

$$[B] = nit(nt) = \frac{kd}{m^2 sr} \ .$$

Ýagtylyk ululyklarynyň energiýanyň we ýagtylygyň ölçeg birliklerinde aňladylşynyň tablisasy

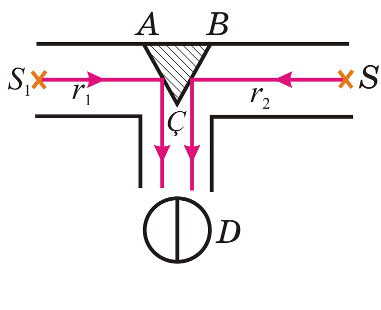
T/b	Ýagtylyk ululyklary	Belgi-lenşi	Energiýa ölçeg birlikleri	Ýagtylyk ölçeg birlikleri
1	Ýagtylyk akymy	Φ	Wt	Lýumen
2	Ýagtylyk güýji	I	Wt/sr	Kandela
3	Ýagtylandyrylyş	E	Wt/m^2	Lýuks
4	Ýgtylanyjylyk	R	Wt/m^2	Lýuks
5	Çeşmäniň ýagtylanma ýitiligi	B	$Wt/m^2\,sr$	Nit

2.3. Ýagtylyk ululyklarynyň ölçenilişi

agtylyk ululyklaryny ölçemek üçin niýetlenen abzallara, gurallara fotometrler diýilýär. otometrler iki topara bolünýär: subýektiw we obýektiw. ubýektiw fotometrlerde ýagtylyk ululyklaryny ölçemekde öhlelenmäni kabul ediji hökmünde adamy gözi hyzmat edýär. Obýektiw fotometrlerde ýagtylyk ululyklaryny ölçemek ýagtylyga duýgur fotoelementler – elektrik abzaly ulanylýar.

ubýektiw fotometrlerde ýagtylyk ululyklary göni gözegçilikde de e dirmek arkaly ölçenilýär. önekeý subýektiw fotometri gurlu yna we i leý ine seredeli .

S_1 we S_2 ýagtylyk çe melerinden çykýan öhleler $ABÇ$ üçgranly prizmanyň $AÇ$ we $BÇ$ granlaryna dü üp serpigýär. Gözegçi ýagtylyk öhlelerini serpigen ugry boýunça seredýär. Meýdançalar arasy çyzyk bilen bölünen iki ýarymtegelek (D) bolup görünýär *(2.7-nji çyzgy)*.



2.7-nji çyzgy

e meleri birini meýdança çenli aralygyny üýtgedip, meýdançalary ikisini hem de derejede ýagtylanmasy gazanylýar. Bu ýagdaýda her çe me ýagtylandyrýan meýdançasyny üst birligine de mukdarda ýagtylyk energiýasyny berýär. Adaty subýektiw fotometrlerde ýagtylyk çe melerini birini ýagtylyk güýji belli bolýar ((etalon) ül i, nusgalygy) beýlekisini ýagtylyk güýji ýagtylandyryly y de e dirilmegi arkaly kesgitlenilýär. S_1 çe mäni ýagtylyk güýji belli diýip kabul edeli . Onda r_1 we r_2 aralyklary käbir gymmatynda $AÇ$ we $BÇ$ granlar de derejede ýagtylanýar. Meýdançalara ýagtylygy dü me burçy birde bolany üçin olary ýagtylandyryly y:

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2}\cos\varphi \; ; \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2}\cos\varphi \tag{2.19}$$

bolar. Meýdançalaryň ýagtylandyryşynyň deňleşen mahaly $E_1 = E_2$ bolar. Onda

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}, \tag{2.20}$$

bu ýerden

$$I_1 = I_2\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2. \tag{2.21}$$

Bu alnan a latma ýagtylyk çe meleri nokatlanç bolan ýagdaý üçin ulanarlyklydyr.

Obýektiw fotometrlerde ýagtylyk ululyklaryny ölçemegi esasynda ýagtylygy elektrik we himiki täsiri ýatýar. agtylygy himiki täsirinde fotoplýonkany (surata dü ürilýän ýorka) garalmasy ýüze çykýar. otoplýonkany garalmak derejesini onu üstüne dü ýän ýagtylyk energiýasyna baglydygyndan peýdalanyp ýagtylyk ululyklary kesgitlenilýär.

agtylygy elektrik täsirine esaslanan fotometrlerde fotoelementler, fotogar ylyklar, fotoelektron köpeldijiler we .m-ler peýdalanylýar.

I ýönekeý fotoelektrik fotometr — fotoelementlerden we duýgur galwonometrlerden ybaratdyr. Galwonometri görkezýän elektrik akymyny ululygy boýunça ýagtylandyryly barada maglumat alynýar. Eger galwonometri görkezýän bölümlerini ölçeg möçberleri lýukslere geçirilen bolsa, onda dessine ýagtylandyryly y ululygyny ölçemek bolýar.

otoelektrik fotometrler subýektiw fotometrlerden tapawutlylykda spektri görünýän infragyzyl we ultramelew e çäklerinde hem i läp bilýär.

III BAP

ÝAGTYLYGYŃ INTERFERENSIÝASY

3.1. Interferensiýa hadysasy. Kogerentlik barada düşünje

agtylygy interferensiýasy onu tolkun tebigatyny subudydyr. Tolkunlary go ulmagy netijesinde interferensiýany ýüze çykmasy tolkunlara mahsus häsiýetdir. agtylygy interferensiýa hadysasy II asyry ortalarynda ýuton tarapyndan açylyp, ýutony halkalary diýlip atlandyrylyp gelinýär.

agtylyk elektromagnit tolkuny bolmak bilen, onda iki wektor yrgyldaýar: elektrik meýdanyny güýjenme wektory $\vec{E}$ we magnit meýdanyny güýjenme wektory $\vec{H}$. Der ewleri görkezi ine görä, ýagtylygy fiziologik, fotoelektrik we ba ga täsirleri onu elektrik wektorlaryny yrgyldylary netijesinde döredilýär. Magnit meýdanyny güýjenme wektoryny yrgyldylaryny ýokarda agzalan täsirlere gatna ygy görnetin duýulmaýar. ol sebäpli elektromagnit tolkunlaryny elektrik meýdany güýjenme wektoryna ýagtylyk wektory hem diýilýär. agtylyk tolkunlary gi i likde biri-birine baglany yksyzlykda ýaýraýarlar. Dürli ugurlar bilen ýaýraýan ýagtylyk tolkunlary biri-birini içinden hiç hili päsgelçiliksiz geçýärler. onu üçin kiçijik de ikden seredilende dürli jisimler aýratyn görünýärler. Ba gaça aýdanymyzda, iki ýagtylyk çe mesinden ýaýraýan tolkunlary , gi i ligi käbir nokadynda biri-birini üstüne dü megi bilen döreýän

elektrik meýdanlaryny güýjenme wektory $\vec{E}$, her çe -
mäni aýratynlykda döredýän elektrik meýdanlaryny
güýjenme wektorlaryny jemine de dir, ýagny

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 .$$

Bu hadysa tolkunlary **goşulma** (superpozisiýa) **düzgüni** diýilýär. Bu düzgün depgini uly bolmadyk adaty çe melerden ýaýraýan ýagtylyk tolkunlary üçin doly ýerine ýetýär, emma depgini has uly bolan (mysal üçin lazer öhlesi) ýagtylyk tolkunlary üçin ýerine ýetmeýär. Biz tolkunlary go ulmak (superpozisiýa) düzgüni ýerine ýetýän ýagtylyk tolkunlaryna serederis.

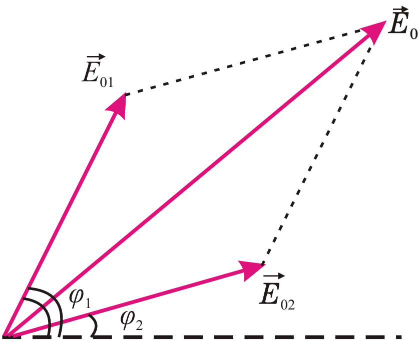
Adaty ýagdaýda dürli ýagtylyk çe melerinden öhlelendirilýän ýagtylyk tolkunlary go ulanda interferensiýa ýüze çykmaýar. Dü ünikli bolmagy üçin a akdaky mysala seredeli . Bir otagda iki-üç ýa-da ondan-da köp elektrik çyralaryny bolmagy mümkin. Goý otagdaky elektrik çyralaryny kuwwatlary özara de bolsun we çyralardan de räk aralykda ýerle en üst ýagtylandyrylýan bolsun. Eger çyralary birini ýaksak, üst belli bir dereje ýagtylandyrylar. Ikinji çyra ýakylanda üstü ýagtylandyrylmasy iki esse artar. çünji çyra ýakylsa üstü ýagtylandyrylmasy üç esse artar. Mysaldan görüni i ýaly üste birnäçe çyradan gelýän ýagtylyk tolkunlary go ulýar, ýöne interferensiýa ýüze çykmaýar. Eger dürli çyralardan gelýän ýagtylyk tolkunlaryny go ulmagy bilen interferensiýa ýüze çykan bolsa, onda gözegçilik edilýän üstü käbir ýerini ýagtylanmasy güýçli, käbir ýerini ki gow ak bolardy. Interferensiýany ýüze çykmak ertine iki sany ýagtylyk tolkunyny go ulmasyny mysalynda seredeli .

Goý, birde ýygylykly we dürli amplitudaly iki sany ýagtylyk tolkuny ýaýramak bilen gi i ligi käbir nokadynda bir tarapa ugrukdyrylan tolkunlary oýandyrýan bolsun. Bu yrgyldylary:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01}\cos(\omega t + \varphi_1), \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{02}\cos(\omega t + \varphi_2) \qquad \mathbf{(3.1)}$$

görnü de ýazaly . rgyldylary düzgün boýunça go up alarys:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_{01}\cos(\omega t + \varphi_1) + \vec{E}_{02}\cos(\omega t + \varphi_2) = \vec{E}_0\cos(\omega t + \varphi). \qquad \mathbf{(3.2)}$$



3.1-nji çyzgy

Diýmek, birtarapa ugrukdyrylan yrgyldylary go ulmagy bilen ol bir ýygylykly jemleýji yrgyldy alynýar. emleýji yrgyldyny amplitudasy we ba langyç fazasy wektor diarammadan kesgitlenilýär. *(3.1-nji çyzgy)*

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\varphi_1 - \varphi_2), \qquad (3.3)$$

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{E_{01}\sin\varphi_1 + E_{02}\sin\varphi_2}{E_{01}\cos\varphi_1 + E_{02}\cos\varphi_2}\,. \qquad (3.4)$$

Bu ýerde φ_1 we φ_2 go ulýan yrgyldylary ba langyç fazasy, φ-jemleýji yrgyldylary ba langyç fazasy. Tolkunlary oýandyrýan yrgyldylaryny $\varphi_1 - \varphi_2$ fazalar tapawudy wagta baglylykda üýtgemeýän bolsa, onda beýle tolkunlara **kogerent** tolkunlar diýilýär. eýle tolkunlary öhlelendirýän çe melere kogerent çe meler diýilýär.

rgyldyny energiýasy onu amplitudasyny kwadratyna göni proporsionaldyr. agtylygy depgini (intensiwligi) ýagtylyk yrgyldylaryny energiýasyna proporsionaldyr. Onda (3.3) a latmany:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) \qquad (3.\ )$$

görnü de ýazyp bileris. Bu ýerde I_1 we I_2 go ulýan ýagtylyk yrgyldylary depginleri, I-jemleýji ýagtylyk yrgyldysyny depgini. Ol go ulýan ýagtylyk yrgyldylaryny fazalar tapawudyna ($\varphi_1-\varphi_2$) baglydyr. Eger $\varphi_1-\varphi_2=0, 2\pi, 4\pi, \ldots, 2m\pi$ bolsa ($m=0,1,2,3\ldots$) $\cos(\varphi_1-\varphi_2)=1$ bu ýagdaýda (3.) a latma:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \qquad (3.6)$$

görnü e geçýär. emleýji ýagtylygy depgini i uly baha eýe bolýar. Eger-de $\varphi_1-\varphi_2=\pi, 3\pi,\ \pi, \ldots, (2m+1)\pi$ bolsa onda $\cos(\varphi_1-\varphi_2)=-1$ onda (3.) a latma:

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \qquad (3.7)$$

görnü e geçýär. Bu ýagdaýda jemleýji ýagtylygy depgini i kiçi baha eýe bolýar. Eger $I_1=I_2$ bolsa onda (3.6) de lik

$$I = 4I_1 \qquad (3.8)$$

(3.7) de lik bolsa:

$$I = 0 \qquad (3.9)$$

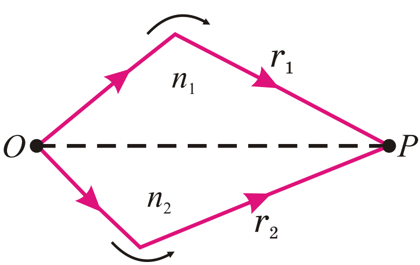
görnü e geçýär. Eger-de $\varphi_1-\varphi_2=$ hemi elik bolsa, onda (3.6) we (3.8) deňlemeleri ýerine ýetýän, gi i ligi nokatlarynda ýagtylygy depgini uly hem-de (3.7) we (3.9) deňlemeleri ýerine ýetýän, gi i ligi nokatlarynda ýagtylygy depgini kiçi bolýar. Bu hadysa ýagtylygy interferensiýasy diýilýär.

Eger-de iki tolkuny gi i ligi käbir nokadynda oýandyrýan yrgyldylaryny fazalaryny tapawudy ($\varphi_1 - \varphi_2$) wagta baglylykda çalt üýtgeýän bolsa, onda $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$ bolar we (3.) a latma

$$I = I_1 + I_2 \tag{3.10}$$

görnü e geçýär. Bu ýagdaýda interferensiýa hadysasy ýüze çykmaýar. Adaty ýagtylyk çe meleri kogerent ýagtylyk çe meleri däldir, onu üçin hem iki ýagtylyk çyrasyndan öhlelenýän ýagtylyklary go ulmagy bilen interferensiýa döremeýär. Munu sebäbi atomlary öhlelenmesi bilen baglany yklydyr. Oýandyrylan atomlar $10^{-10} \div 10^{-8}$ s-niň dowamynda öhle goýberýärler. Indiki öhlelenme pursaty käbir wagtdan so bolýar. Her bir öhlelenme pursatynda tolkun parçasy (sug) göýberilýär. Tolkun parçasyny uzynlygy birnäçe santimetrden iki-üç metre çenli bolýar. zygider öhlelenýän tolkun parçalary fazalary boýunça baglany ykly bolmaýar, ýagny $\varphi_1 - \varphi_2$ tapawut hemi elik däldir.

Kogerent öhleleri almak üçin, bir ýagtylyk çe -mesinden çykýan ýagtylygy iki öhlä bölmeli. Bu öhleler kogerent bolýar we go ulanda interferensiýa döreýär. öne, ikä bölünen öhläni interferensiýa döretmegi üçin, olaryň geçen optiki ýollarynyň tapawudy tolkun parçasyny uzynlygyndan uly bolmaly däldir, ýagny ikä bölünip we ýene-de go ulýan ýagtylyk tolkunlary ol bir tokun parçasyna degi li bolmalydyr.



3.2-nji çyzgy

Goý, tolkun impulsy O nokatda ikä bölünip, r_1 we r_2 ýollary geçip, P nokatda go ulýan bolsun; r_1 ýol döwme görkezijisi n_1 bolan gur awda, r_2 ýol döwme görkezijisi n_2 bolan gur awda geçilen bolsun *(3.2-nji çyzgy)*. Eger O nokatda yrgyldyny fazasy ωt bolsa, onda birinji tolkun P nokatda

$$E_{01}\cos\omega\left(t-\frac{r_1}{v_1}\right) \text{ yrgyldyny, ikinji tolkun}$$

$$E_{02}\cos\omega\left(t-\frac{r_2}{v_2}\right) \text{ yrgyldyny döreder.}$$

Bu ýerde $v_1=\dfrac{c}{n_1}$, $v_2=\dfrac{c}{n_2}$ tolkunlary faza tizlikleri.

P nokatdaky yrgyldylary faza tapawudy

$$\Delta\varphi=\omega\left(\frac{r_2}{v_2}-\frac{r_1}{v_1}\right)=\frac{\omega}{c}(n_2r_2-n_1r_1) \quad \text{bolar.} \quad \frac{\omega}{c}=\frac{2\pi\nu}{c}=\frac{2\pi}{\lambda_0}$$

de ligi (λ_0-wakuumdaky tolkun uzynlyk) hasaba alyp, fazalar tapawudy üçin alarys:

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta r. \tag{3.11}$$

Bu ýerde $\Delta r = n_2r_2-n_1r_1$ tolkunlary optiki ýollaryny tapawudyny a ladýar. Eger

$$\Delta r=\pm m\lambda_0 \tag{3.12}$$

bolsa, onda

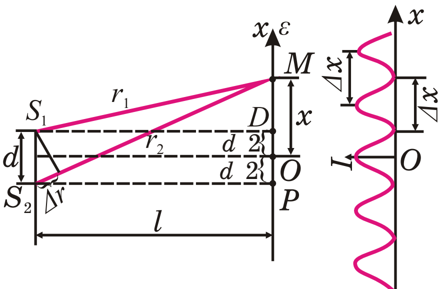
$$\Delta\varphi=\pm 2\pi m, \tag{3.13}$$

ýagny P nokatda iki tolkuny döredýän yrgyldylary bir fazada bolýar we yrgyldyny (ýagtylygy) güýçlenmesi gözegçilik edilýär. onu üçin (3.12) we (3.13) ertler interferensiýa sebäpli ýagtylygy depginini i uly baha eýe bolýan ertleridir. Edil olar ýaly:

$$\Delta r = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2}, \tag{3.14}$$

$$\Delta\varphi = \pm(2m+1)\pi \qquad (3.1\ \ )$$

bolanda, *P* nokatda yrgyldylar ters fazada bolýar. o-nu üçin *P* nokatda döreýän yrgyldylar biri-birini gowşadýar. eýlelikde (3.14) we (3.1) ertler interferensiýa sebäpli ýagtylygy depginini i kiçi baha eýe bolýan ertleridir. Goý, S_1 we S_1 kogerent çe melerden ýaýraýan ýagtylyk öhleleri ε ekranda biri-birini üstüne dü üp interferensiýa ýüze çykýan bolsun *(3.3-nji çyzgy)*.



3.3-nji çyzgy

e meleri aralygy *d*, çe melerden ekrana çenli aralyk *l* bolsun. e melerden monohromatik ýagtylyk (λ_0=hemi elik) öhlelenýän bolsun. Ilki ekrany *O* nokadynda boljak ýagdaýy kesgitläli . Iki çe me üçin hem de da lykda bolan *O* nokatda ε ekranda döreýän interferensiýa ekili merkezi ýerle ýär. S_1O we S_2O aralyklary özara de ligi sebäpli öhleleri geçen ýollaryny tapawudy $\Delta r = 0$ bolar. onu üçin O nokatda ýagtylygy depginini i uly güýçlenmesi ýagny, merkezi güýçlenme emele gelýär. Indi ekrany *M* nokadyna S_1 we S_2 çe melerden çykýan ýagtylyk tolkunlary r_1 we r_2 ýollary geçip barýarlar. ollary tapawudyny S_1MD we S_2MP gönüburçly üçburçluklardan alarys:

$$r_1^2 = \ell^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2; \; r_2^2 = \ell^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$r_2^2 - r_1^2 = \ell^2 + x^2 + xd + \frac{d^2}{4} - \ell^2 - x^2 + xd - \frac{d^2}{4} = 2xd$$

ýa-da $(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2xd, \; r_2 + r_1 \approx 2\ell$. Onda:

$$\Delta r = (r_2 - r_1) = \frac{xd}{\ell} \; . \qquad \textbf{(3.16)}$$

Bu ýerde (3.12) erti ulanyp, alarys:

$$\frac{xd}{\ell} = \pm m\lambda_0 \; .$$

x - i a akdaky bahalarynda interferensiýa hadysasy sebäpli ýagtylygy depginini i uly güýçlenmeleri emele gelýär:

$$x_{\text{iň uly}} = m\frac{\ell}{d}\lambda_0 \; . \qquad \textbf{(3.17)}$$

Bu ýerde m=0,1,2,3,... güýçlenmeleri tertip belgisi.

Eger (3.16)-a (3.14) erti ulansak: $\dfrac{xd}{\ell} = \pm(2m+1)\dfrac{\lambda_0}{2}$.

x - i a akdaky bahalarynda interferensiýa hadysasy sebäpli ýagtylygy depginini i uly gow amasy emele gelýär:

$$x_{\text{iň kiçi}} = \pm(2m+1)\frac{\ell}{d} \cdot \frac{\lambda_0}{2} \; . \qquad \textbf{(3.18)}$$

Interferensiýa zolagyny gi ligi deregine iki ýana yk i uly güýçlenmäni ýa-da i uly gow amany aralygy alynýar. Mysal üçin x_{m-1} we x_m i uly güýçlenmeleri aralygy.

$$\Delta x = x_m - x_{m-1} = \frac{\ell}{d}\lambda_0. \qquad (3.19)$$

Alnan a latmadan görnü i ýaly ℓ-i we λ_0-y käbir üýtgemeýän bahalarynda d-ni kiçelmegi bilen Δx ulalýar, ýagny interferensiýa has aýdy ýüze çykýar. Diýmek, interferensiýany aýdy bolmagy üçin d ℓ bolmalydyr.

3.2. Wagt we giňişlik boýunça kogerentlik

Biz u mahala çenli interferensiýany ýüze çykarýan ýagtylyk tolkunlaryna takyk monohromatiklige (λ-hemi elik) eýe diýip kabul etdik. Hakykatda hiç bir ýagtylyk çe mesi-de takyk monohromatik tolkunlary öhlelendirmeýär. Adaty ýagtylyk çe melerinde öhlelendirilýän ýagtylygy takyk monohromatik bolmazlygy tolkuny parçasyny uzynlygyny çäkli bolmagyndadyr. Her bir tolkun parçasyny dürli ýygylykly tolkunlary bolup, ýygylyklary çägini gi ligi ($d\nu$) tolkun parçasyny uzynlygyna ters proporsionaldyr. ol bir atomy dürli wagt pursatlarynda öhlelendirýän tolkun parçalaryny fazalaryny baglany yksyzlygy sebäpli, interferensiýany ýüze çykarmak üçin, ol bir tolkun parçasyna degi li tolkunlary go mak gerekdir. eýle erti häsiýetlendirmek üçin, kogerentlik wagty (wagt boýunça kogerentlik) diýilýän dü ünje girizilýär. Kogerentlik wagty τ_{kog} – tolkun parçasyny öhlelenme wagtyny dowamlylygydyr. agtylyk wakuumda $c = 3\cdot 10^8 m \; s$ tizlik bilen ýaýraýanlygy üçin tolkun parçasyny uzynlygy, ýagny kogerentlik uzynlyk: $\ell_{kog} = \tau_{kog} c$.

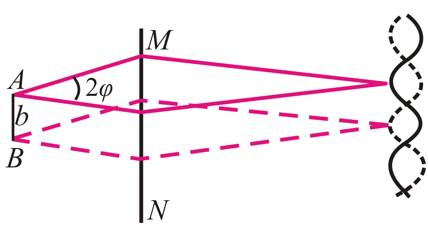
Kogerentlik wagty ýygylyklary çägini gi ligi ($d\nu$) bilen eýle baglany ykdadyr:

$\tau_{kog} = \dfrac{1}{d\nu}$; onda $\ell_{kog} = \tau_{kog}\ c = \dfrac{c}{d\nu} \cdot \lambda = \dfrac{c}{\nu}$ bolmagyna görä

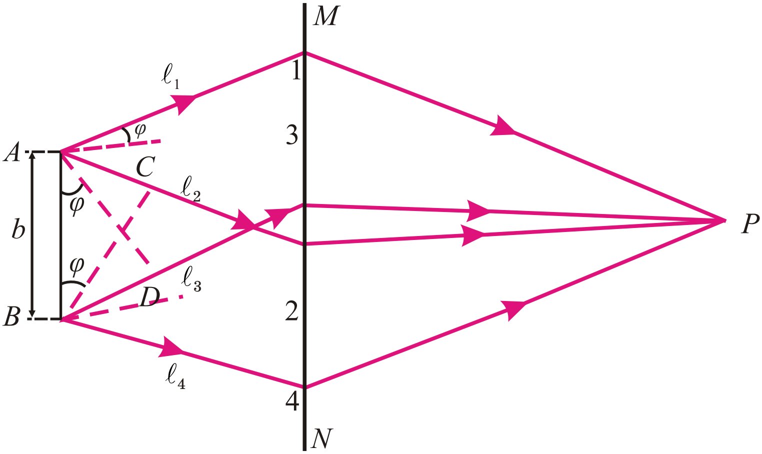
$|d\lambda| = \dfrac{c d\nu}{\nu^2} = d\nu \cdot \dfrac{\lambda^2}{c}$, onda $\ell_{kog} = \dfrac{c}{d\nu} = \dfrac{\lambda^2}{d\lambda}$ we $\tau_{kog} = \dfrac{\lambda^2}{c d\lambda}$.

Adaty ýagtylyk çe melerinde kogerentlik wagty $10^{-10} \div 10^{-8}$ sekunt, kogerentlik uzynlygy birnäçe santimetre deň. Diýmek, bir çeşmeden çykan ýagtylyk ikä bölünenden soň ýene-de goşulýança geçen ýollarynyň tapawudy $r_2 - r_1 < \ell_{kog}$ bolsa interferensiýa ýüze çykýar.

Köplenç ýagtylyk çe mesi hökmünde y peýdalanylýar. Interferensiýa ekilini aýdy lygyna ýagtylygy monohromatikligi bilen bir hatarda y y inini hem uly täsiri bardyr. agtylyk çe mesini (y y) dürli nokatlary ekranda öz interferensiýa ekilini döredýär. Dürli nokatlary interferensiýa ekilleri biri-birinden käbir aralyga süý en bolýar. Goý, b y y iki çetinden geçýän tolkunlar, MN gurnamany kömegi bilen ikä bölünip, ekranda interferensiýa emele getirilýän bolsun *(3.4-nji çyzgy)*. y A nokadyndan çykýan ýagtylygy döredýän interferensiýasyny tutu çyzyk bilen, B nokadyndan çykýan ýagtylygy döredýän interferensiýasyny üzüküzük çyzyk bilen görkezeli . A nokatdan çykýan tolkunlary güýçlenýän nokatlaryna B nokatdan çykýan tolkunlary gowşaýan nokatlary gabat gelmese, interferensiýa görünýär, eger gabat gelse interferensiýa ýitýär. 2φ burça interferensiýany aperturasy diýilýär (ýagtylyk konusyny gyraky öhlelerini arasyndaky burç).



3.4-nji çyzgy



3.5-nji çyzgy

Adaty interferensiýany döremegi üçin ýagtylyk çe mesini (y y) ölçegleri kesgitli ululyga eýe bolmaly. Ony kesgitlemek üçin 3. -nji çyzgydan peýdalanaly .

b y y çetki *A* we *B* nokatlaryndan 2φ apertura burçy bilen çykan ýagtylyk tolkunlary *MN* gurnamany kömeginde ikä bölünip, *P* nokatda go ulýan bolsun. *A* nokatdan çykan tolkunlar *P* nokada çenli ℓ_1 we ℓ_2 ýollary, *B* nokatdan çykan tolkunlar ℓ_3 we ℓ_4 ýollary geçer. eýlelikde:

$$\Delta_A = \ell_2 - \ell_1 \qquad (3.21)$$

$$\Delta_B = \ell_4 - \ell_3 \qquad (3.22)$$

Eger $\Delta_A - \Delta_B$ tapawut ujypsyz bolsa, onda *A* nokady hem, *B* nokady hem ekrandaky interferensiýa ekilleri biri-birine görä ujypsyz üý en bolýar, interferensiýa anyk bolýar.

Eger $\Delta_A - \Delta_B = \dfrac{\lambda}{2}$ bolsa *A* nokatdan çykan tolkunlary *P* nokatda güýçlenmeleri *B* nokatdan çykan tolkunlary *P* nokatda gow amalary gabat gelýär. e-tijede interferensiýa ýitýär. Di e

$$\Delta_A - \Delta_B \le \frac{\lambda}{4} \qquad \textbf{(3.23)}$$

ert ýerine ýetende interferensiýa anyk emele gelýär. Onda **(3.21)**, **(3.22)** we **(3.23)** de liklerden

$$\Delta_A - \Delta_B = (\ell_2 - \ell_1) - (\ell_4 - \ell_3) = (\ell_2 - \ell_4) + (\ell_3 - \ell_1) \quad \textbf{(3.24)}$$

aňlatmany alarys. Eger 1 we 3 tolkunlar *P* nokatdan çykyp ýaýrandyr diýsek, onda *AP* we *DP* de wagtdaky ýollar (tautohron) bolýar (*A* we *D* nokatlar *P* nokatdan ýaýraýan bir tolkuny üstünde ýerle ýär). 1 we 3 öhleler özara parallel diýip alarys:

$$\ell_3 - \ell_1 = BD = b\sin\varphi \ .$$

Edil onu ýaly:

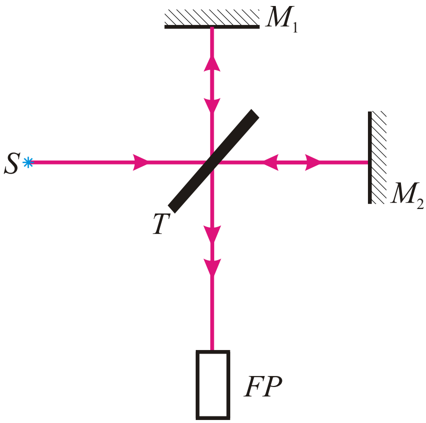
$$\ell_2 - \ell_4 = AC = b\sin\varphi \ .$$

Diýmek $\Delta_A - \Delta_B = 2b\sin\varphi$.
etijäni **(3.23)**-de ornuna goýup alarys:

$$2b\ \sin\varphi \le \frac{\lambda}{4} \ . \qquad (3.2\ \ )$$

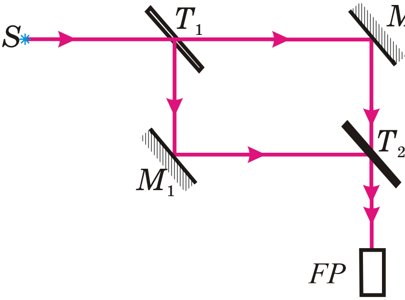
(3.2) erti kanagatlandyrýan ýagtylyk çe mesi gi i -lik boýunça kogerentdir. Bu ýerden eýle netije alynýar: apertura burçy ulalsa, gi i lik kogerentligi saklamak üçin çe mäni (y y) çäk ululygy kiçeldilmelidir.

3.3. Optikada kogerent ýagtylyk şöhlelerini almagyň usullary

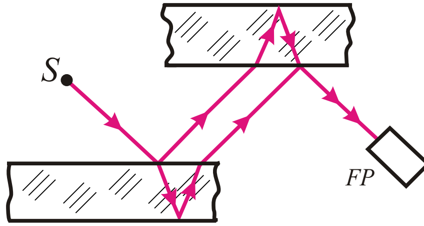


3.6-njy çyzgy

okarda belleý imiz ýaly iki sany kogerent ýagtylyk dessesi inert kabul edijide biri-birini üstüne dü ende interferensiýa hadysasy ýüze çykýar. Kogerent ýagtylyk desselerini almak üçin kogerentlik göwrümini çäginde ikilenji ýagtylyk çe melerini döretmeli. Eger biri-birini üstüne dü ýän kogerent ýagtylyk şöhlelerini geçen ýollaryny tapawudy kogerentlik uzynlygyndan uly bolmasa interferensiýa ýüze çykýar. agtylygy ýylylyk çe melerinde interfe-rensiýany tejribede amala a yrmak kyn meseleleri biridir. ylylyk ýagtylyk çe melerini hasabyna kogerent çe meleri döretmegi iki dürli tejribe usuly peýdalanylýar: ýagtylyk tolkunyny amplitudasyny bölmek usuly we ýagtylygy tolkun frontuny bölmek usuly. agtylyk tolkunyny amplitudasy bölünende çe meden çykýan öhle ýagtylyk bölüji bolup hyzmat edýän maddany ýuka gatlagyna dü ürilýär. Maddadan serpigen we geçen ýagtylyk tolkunlary takmynan özara de amplituda eýe bolýarlar. öhleler ol bir tolkun parçasyndan emele gelendikleri sebäpli kogerentdirler. Optiki gurnamalary kömeginde, mysal üçin aýnalary (zerkalolary) (kä halatlarda olarsyz hem) kömegi bilen kogerent öhleler gi i ligi käbir çäklerinde biri-birini üstüne dü ýärler. Eger öhleleri geçen ýoluny tapa-



3.7-nji çyzgy



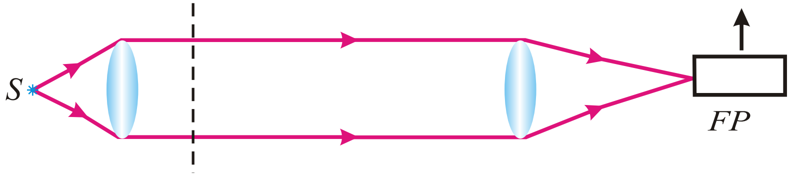
3.8-nji çyzgy

wudy kogerentlik uzynlygyndan uly bolmasa interferensiýa ýüze çykýar. agtylyk tolkunyny amplitudasyny bölünmesini hasabyna ýüze çykýan interferensiýa mysal hökmünde Maýkelsony interferometrinde alynýan interferensiýany görkezmek bolýar. Mundan ba ga-da Mahy – endri , *(3.7-nji çyzgy)*, ameni *(3.8-nji çyzgy)* interferometrleri fiziki derewlerde köp peýdalanylýar.

Bu gurnamalary ählisinde ýagtylyk öhlesi iki gur awy araçäginde serpigip ikä bölünýär, so ra gurnamany optiki ulgamyny kömeginde bu öhleleri biri-birini üstüne dü mesi amala a yrylýar.

Ýagtylygyň tolkun frontuny bölmek usuly

Bu usulda tolkun frontuny üstünde optiki enjamlar ýerle dirmek arkaly kogerent çe meler alynýar. Mysal üçin tolkun frontuny üstüne de ik, doly serpikdiriji aýnalar, linzalar we ba galar ýerle dirilip, tolkun fronty bölünýär. Bu enjamlara goýulýan esasy talap olary gi i likde kogerentlik göwrümini çägin-den çykmaly däldigidir. Optiki enjamlar arkaly alynýan ikilenji çe meleri kogerent desseleri biri-birini

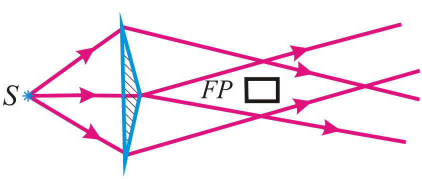


3.9-njy çyzgy

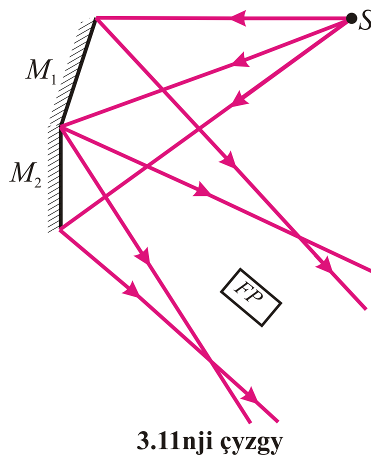
üstüne dü üp, interferensiýany ýüze çykarýar. Mysal üçin, ungy tejribesinde, difraksiýa sebäpli kogerent desseler biri-birini üstüne dü üp, interferensiýany döredýär. ungy tejribesini gurnamasy 3.9-njy çyzgyda ekillendirilen.

 lçemeler geçirilende ýagtylyk kabul ediji çyzgyda ekillendirilen peýkamy ugry boýunça süý ürilýär.

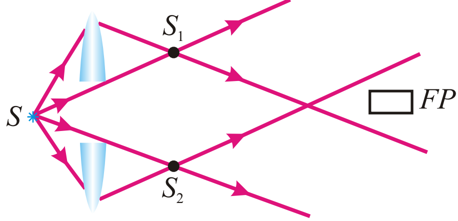
Tolkun frontuny bölmek usuly arkaly kogerent çe meleri döretmegi köpsanly görnü leri bardyr. Olary gi den peýdalanylýanlaryna mysal hökmünde reneli biprizmasyny *(3.10-njy çyzgy)*, reneli bi-zerkalasyny *(3.11-nji çyzgy)*, Biýeni bilinzasyny *(3.12-nji çyzgy)* görkezmek bolar. (*FP*–fotoplastina M_1, M_2 - zerkal aýnalar)



3.10-njy çyzgy



3.11nji çyzgy

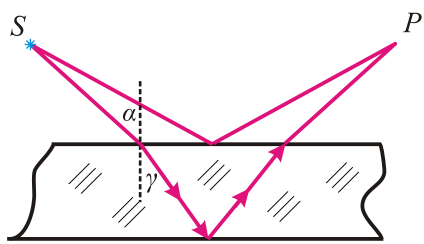


3.12-nji çyzgy

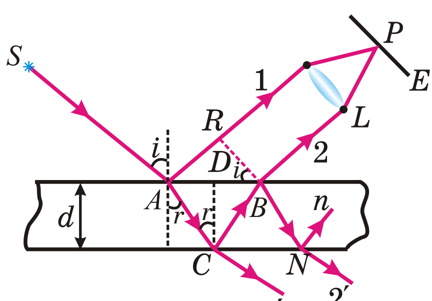
Bu mysal getirilen gurnamalara ýörite dü ündiri bermegi zerurlygy ýok, sebäbi olar çyzgylarda aýdy görkezilen. Bulary ählisi üçin umumy talap bir sany hakyky S çe meden biri-birinden käbir d aralykda we ekrandan ℓ aralykda ýerle en iki sany S_1 *we* S_2 kogerent çe meleri almakdan ybarat.

3.4. Ýuka ýorkalardaky interferensiýa

Tekiz parallel dury ýorka (dury maddany ýuka gatlagy) ***S*** nokatlanç ýagtylyk çe mesini öhlesi dü ende onu ýokarky we a aky üstlerinden serpigen öhleler käbir erkin P nokatda biri-birini üstüne dü üp, go ulup biler *(3.13-nji çyzgy)*. Ol öhleleri ikisi hem ol bir nokatlanç çe melerden çykýanlygy üçin kogerentdirler we interferensiýany ýüze çykarýar. Tekiz parallel ýorkany üstüne parallel öhleler dü ende onu



3.13-nji çyzgy



3.14-nji çyzgy

ýokarky we a aky üstlerinden serpigen öhleler özara parallel ýaýraýarlar. Bu öhleleri interferensiýasyny ekranda görmek üçin olary ýygnaýjy linzadan geçirip, linzany fokal tekizliginde ekran ýerle dirmeli. orkany üstünden geçen öhleler hem özara paralleldir. Olary interferensiýasyna hem gözegçilik edilýär.

Goý galy lygy $\boldsymbol{d}$, döwme görkezijisi **n** bolan tekiz parallel dury ýorkany üstüne monohromatik ýagtylygy (λ-hemi elik) parallel dessesi käbir i burç bilen dü ýän bolsun *(3.14-nji çyzgy)*. Biz çyzgyda öhleleri birini görkezmek bilen çäkleneris. agtylyk öhlesini bir bölegi ýorkany ýokarky üstüni A nokadyndan serpiger (1-nji öhle), galany döwülip ýorkany içine geçip, onu C nokadyna dü ýär. Bu nokatda hem öhläni käbir bölegi serpikýär we ýorkany B nokadyna dü ýär, galany C nokatda döwülip ýorkadan çykýar (*1′-nji şöhle*). B nokatda öhläni bir bölegi serpigip galany ýorkadan çykýar (2-nji öhle). B nokatdan serpigen öhle ýorkany N nokadyna dü üp, bir bölegi serpigýär galany ýorkadan çykýar (2′-nji öhle). eýle hadysany ýene-de birnäçe gezek gaýtalanmagy mümkin, ýöne üçünji, dördünji we .m. gezek serpigen we döwlen öhleleri depgini has kiçi bolýar we interferensiýa olary go andy örän az bolýar. onu üçin biz ol öhlelere seretmeris.

Ilki ýorkany ýokarky we aşakky üstünden serpikdirilen öhleleri *(1-nji we 2-nji şöhleler)* interferensiýasyna seredeli . 1-nji we 2-nji öhleler L linzadan geçip, ε ekrany P nokadynda biri-birini üstüne dü üp, interferensiýany ýüze çykarýar. P nokatda interferensiýa sebäpli ýagtylygy depginini güýçlenmesi ýa-da gow amasy 1-nji we 2-nji tolkunlary fazalar tapawudyna bagly: eger fazalar tapawudy $\Delta\varphi = 2\pi, 4\pi, 6\pi, \ldots, 2m\pi$

(m=1,2,3,...) bahalary birine de bolsa, onda interferensiýa sebäpli ýagtylygy depginini i uly güýçlenmesi bolýar. Eger $\Delta\varphi = \pi, 3\pi, \pi, \ldots, (2m+1)\pi$ bahalary birine eýe bolsa, onda interferensiýa sebäpli ýagtylygy depginini i uly gow amasy bolýar.

Go ulýan tolkunlary fazalaryny tapawudyny olary geçen ýollaryny tapawudy arkaly a latmak ölçeme geçirmekligi a satla dyrýar. Onda

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta r.$$

((3.12) we (3.13)) deňlemelerden tolkunlary geçen ýollaryny tapawudy $\Delta r = \pm m\lambda_0$ (m=0,1,2,3,...), fazalar tapawudy $\Delta\varphi = \pm 2m\pi$ bahalara eýe bolýar we interferensiýa zerarly ýagtylygy depginini i uly güýçlenmesi alynýar.

Eger $\Delta r = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2}$ bolsa, onda $\Delta\varphi = \pm(2m+1)\pi$ bahalara eýe bolýar we interferensiýa zerarly ýagtylygy depginini i uly gow amasy alynýar. 1-nji we 2-nji tolkunlary geçen ýollaryny tapawudyny *(3.14-nji çyzgy)* kesgitlemek üçin B nokatdan birinji tolkuny ýaýraýan ugruna normal geçireliň (BR), onda RP we BP ýollar özara de we $\Delta r = AC + CB - AR$ bolar. öne 2-nji tolkun döwme görkezijisi n bolan ýorkany içinde ýaýraýanlygyna görä onu optiki ýoly $n(AC+CB)$ bolar. Onda

$$\Delta r = n(AC + CB) - AR. \tag{3.26}$$

ABR üçburçlukda burç $B = i$ diýsek, onda

$$AR = AB \sin i. \tag{3.27}$$

ADC üçburçlukda burç $C = r$ diýsek, onda

$$AD = DC\,\mathrm{tg}\,r, \qquad AB = 2AD = 2DC\,\mathrm{tg}\,r = 2d \cdot \mathrm{tg}\,r,$$

Onda

$$AR = 2d \cdot \sin i \cdot \mathrm{tg}\,r. \tag{3.28}$$

Ýene-de ADC üçburçlukdan, alarys:

$$AC = \frac{DC}{\cos r} = \frac{d}{\cos r}; \quad AC = CB; \; AC + CB = 2AC; \; 2AC = \frac{2d}{\cos r}. \qquad (3.29)$$

(3.27), (3.28) we (3.29) a latmalardan peýdalanyp, (3.26) a latmany a akdaky ýaly, ýazarys:

$$\Delta r = \frac{2dn}{\cos r} - 2d \sin i \cdot \mathrm{tg} r = \frac{2dn}{\cos r} - 2\, dn \sin r \frac{\sin r}{\cos r} =$$

$$= \frac{2dn}{\cos r}\left(1 - \sin^2 r\right) = \frac{2dn}{\cos r} \cdot \cos^2 r = 2dn \cos r.$$

Bu de ligi i dü me burçuny üsti bilen a latmak üçin $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ a latmadan peýdalansak, onda

$$\Delta r = 2dn \cos r = 2dn \sqrt{\cos^2 r} = 2dn \sqrt{1 - \sin^2 r} =$$

$$= 2dn \sqrt{1 - \frac{\sin^2 i}{n^2}} = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i}\,. \qquad (3.30)$$

Bu a latmany gutarnykly görnü e getirmek üçin ýene-de bir zady hasaba almaly: ýagtylyk tolkuny optiki dykyz gur awdan serpigende fazasyny bökü arkaly π ululyga üýtgedýär. Bu bolsa $\frac{\lambda_0}{2}$ ululyga de bolan ýolu ýitirilmegine getirýär. ony hasaba alyp, (3.30) a latmany eýle ýazarys:

$$\Delta r = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2}. \qquad (3.31)$$

Onda interferensiýa sebäpli ýagtylygy i uly depginini alynmak erti

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0 \qquad (3.32)$$

bolar. m ululyk, i uly depginli ýagtylygy alynýan nokatlaryny tertip belgisi, ol $m = 1,2,3,\ldots$ bahalary alýar. A akdaky

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \qquad (3.33)$$

de lik i kiçi depginli interferensiýa zolaklaryny alynmak ertidir. orkany içinden geçen 1′-nji we 2′-nji öhleleri geçen ýollaryny tapawudy (3.30) a latma arkaly kesgitlenip bilner. Bu ýagdaýda $\frac{\lambda_0}{2}$ ululyk go ulmaýar, 1′-nji we 2′-nji tolkunlar dykyz gur awdan serpikmeýär. etijede ýorkany içinden geçen tolkunlary i uly depginli interferensiýa zolaklaryny döretmek erti:

$$2d\sqrt{n^2-\sin^2 i}=m\lambda_0; \quad (3.34)$$

i kiçi depginli interferensiýa zolaklaryny döretmek erti:

$$2d\sqrt{n^2-\sin^2 i}=(2m+1)\frac{\lambda_0}{2}. \quad (3.3\ \ )$$

Indi ýorkada bolýan interferensiýany iki sany möhüm ýagdaýyna seredeli . (3.30) a latmadan görnü i ýaly, öhleleri geçen ýollaryny tapawudy öhläni dü me burçuna we ýorkany galy lygyna bagly.

Dü me burçy i hemi elik bolup, ýorkany galy lygyny üýtgemegi sebäpli ýüze çykýan interferensiýa de galy lygy interferensiýasy diýilýär, interferensiýa ekile bolsa de galy lygy zolaklary diýilýär. orkany galy lygy d hemi elik bolup, öhläni dü me burçuny üýtgedilmegi bilen ýüze çykýan interferensiýa de ýapgytlygy interferensiýasy diýilýär. Interferensiýany bu görnü lerine aýratynlykda seredip geçeli .

1. Deňgalyňlygyň interferensiýasy

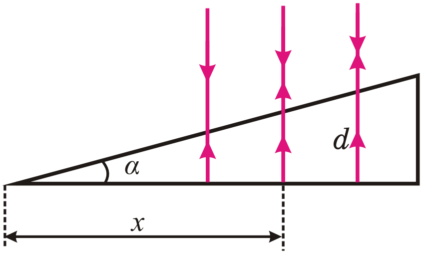
orkany içinden geçen ýagtylygy ýüze çykarýan interferensiýasyndan onu üstünden serpigen ýagtylygy ýüze çykarýan interferensiýasy has aýdy görünýär. onu üçin serpigen öhleleri interferensiýasyna serederis.

önekeý ýagdaý hökmünde öhläni ýorka dü me burçuny nola de $(i=0)$ ýagdaýyna seredeli . Bu ýagdaýda i uly depginli interferensiýa zolaklaryny ýüze çykma erti

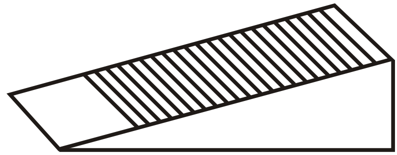
$$2d=\left(m-\frac{1}{2}\right)\lambda_0 \tag{3.36}$$

bolar. d galy lyga eýe bolan ähli ýerlerde $\boldsymbol{m}$-i berlen bahasy üçin i uly depginli interferensiýa zolagy ýüze çykýar. Dürli tolkun uzynlykly ýagtylyklar üçin i uly depginli interferensiýa zolagyny dürli galy lyklarda bolýandygy sebäpli, ýorkany üstüni dürli ýerlerini re ki hem dürli bolýar. Bu hadysa ýuka ýorkany re ki hem diýilýär. Bu hadysany suwu üstündäki ýag meneginde, suwu üstündäki nebit gatlagynda, sabyn köpürjiginde we .m. görmek bolýar.

De galy lygy interferensiýasyna, pahna görnü li dury maddada hem syn etmek mümkin. Pahnany ýokarky we a aky üstlerinden serpikdirilen ýagtylyk tolkunlary interferensiýany döredýärler. Pahnany $\Delta r=\pm m\lambda_0$ ert ýerine ýetýän galy lyklaryny üstünde ýagty zolaklar emele gelýär. $\Delta r=\pm(2m+1)\dfrac{\lambda_0}{2}$ ert ýerine ýetýän galy lyklaryny üstünde gara ky zolaklar emele gelýär. Eger pahnany üstüne ak ýagtylyk dü se, onda onu üstünde re kli zolaklar görünýär. Goý, burçy α we döwme görkezijisi $\boldsymbol{n}$ bolan pahnany üstüne monohromatik ýagtylyk öhlesi normal boýunça dü ýän bolsun *(3.15-nji çyzgy)* (pahnany α burçuny örän kiçiligi sebäpli çyzgyny görkezilen ýagdaýynda-da ýagtylyk perpendikulýar dü ýär diýip



3.15-nji çyzgy



3.16-njy çyzgy

kabul etmek bolýar.) Pahnany $\boldsymbol{d}$ galy lygy üçin tolkunlary (ýokarky we a aky üstlerden serpigen) ýollaryny tapawudy (3.6) de lik boýunça:

$$2dn = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 \qquad \text{bolar.}$$

3.1 -nji çyzgydan $\dfrac{d}{x} = \mathrm{tg}\,\alpha$ onda $2n\ x\ \mathrm{tg}\,\alpha = \left(m - \dfrac{1}{2}\right)\lambda_0$

Alnan a latmany $\boldsymbol{x}$ we $\boldsymbol{m}$ boýunça differensirläp alarys: $2n\mathrm{tg}\alpha\Delta x = \lambda_0\Delta m$, $\Delta m = 1$ (ýana yk ýerle en i uly depginli interferensiýa zolaklary tertip belgilerini tapawudy) diýip, ýana yk zolaklary (i uly ýa-da i kiçi depginli interferensiýa zolaklaryny) aralygy (Δx) üçin a aky a latmany alarys:

$$\Delta x = \frac{\lambda_0}{2n\mathrm{tg}\alpha}. \tag{3.37}$$

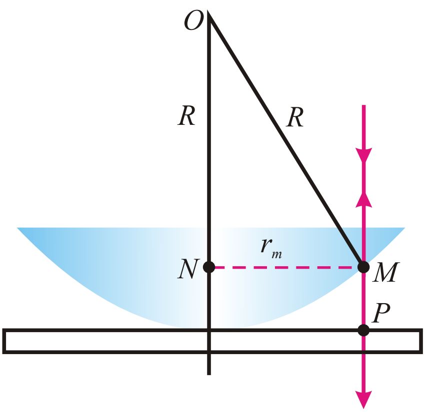
α burçu kiçi bahalarynda $\mathrm{tg}\alpha \approx \alpha$ diýip alarys:

$$\Delta x = \frac{\lambda_0}{2n\alpha}. \tag{3.38}$$

Iki sany tekiz ýuka aýna gatlagyny arasynda döredilen, üýtgeýän galy lykly howa gatlagynda hem, eýle interferensiýa syn etmek mümkin. Pahnadaky interferensiýa ekil 3.16-njy çyzgydaky ýaly bolýar.

Interferensiýasyny ýene-de bir görnü i ýutony halkalary diýen at bilen bellidir. Bu interferensiýa, tekiz ýuka aýnany üstüne tekiz güberçek linzany güberçek üstüni goýmak bilen alynýar *(3.17-nji çyzgy)*. Linza bilen tekiz ýuka aýnany arasynda howa pahnasy emele gelýär. ýutony halkalary monohromatik ýagtylykda ýagty we gara ky konsentrik töwerekler (halkalar) görnü inde ýüze çykýar. Halkalary merkezi linzany aýna bilen galta ýan nokadynda ýerle ýär.

Goý, howa gatlagyny M nokadyna λ_0 tolkun uzynlykly monohromatik ýagtylyk öhlesi normal boýunça dü ýän bolsun. Bu öhläni bir bölegi M nokatda howa gatlagyny ýokarky üstüne serpiger, galan bölegi howa gatlagyny P nokadyna dü er. Bu öhläni hem bir bölegi serpigip, galany aýna geçýär.



3.17-nji çyzgy

eýlelikde M we P nokatlardan serpigen ýagtylyk tolkunlary go ulanda interferensiýa ýüze çykýar. M we P nokatlaryndan serpigen öhleleri go ulýança geçen ýollaryny tapawudy

$$\Delta r = 2d + \frac{\lambda_0}{2}. \qquad (3.39)$$

Bu ýerde $d=MP$ - howa gatlagyny galy lygy. Indi linzany egrilik radiusy R, howa gatlagyny galy lygy $\boldsymbol{d}$ we linzany galta ma nokadyna inderilen perpendikulýardan M nokada çenli aralyk -r_m ululyklary özara baglany ygyny tapaly . Onu üçin ONM üçburçlukdan peýdalanarys *(3.17-nji çyzgy)*.

$r_m^2 = R^2 - (R-d)^2$; $r_m^2 = R^2 - R^2 + 2Rd - d^2$, $2Rd >> d^2$ diýip hasap edip, d^2-y taşlasak, onda alarys:

$$r_m^2 = 2Rd. \tag{3.40}$$

Tolkunlary geçen ýollaryny tapawudyna i uly depginli interferensiýa zolagyny ýüze çykma ertini ulanyp alarys: $2d + \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0$ bu ýerden

$$d = \left(m - \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda_0}{2} . \tag{3.41}$$

d-ni u bahalarynda i uly depginli interferensiýa zolaklary ýüze çykýar. d galy lyk linzany merkezinden r_m aralykda ýerle ýändigine görä linzany ýokarsyndan seretse r_m radiusly ýagty halka görünýär. (3.40) we (3.41) a latmalardan m-nji ýagty halkany radiusy üçin a latmany alarys:

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) R\lambda_0}. \tag{3.42}$$

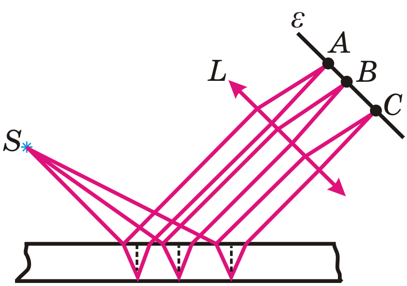
(3.39) de likde i kiçi depginli interferensiýa zolaklary ýüze çykma ertini ulanyp alarys: $2d + \frac{\lambda_0}{2} = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2}$ Bu ýerden: $d = m\frac{\lambda_0}{2}$.

Bu ululygy (3.40) a latmada ornuna goýup, gara ky halkalary radiusy üçin a akadaky a latmany alarys:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0}. \tag{3.43}$$

erpigen ýagtylykda ýüze çykýan halkalar ulgamyny merkezinde gara menek emele gelýär. Bu gurnamada içinden geçýän ýagtylyk hem interferensiýany ýüze çykarýar. Mu a içinden geçen ýagtylygy interferensiýasy diýilýär. Içinden geçen ýagtylygy döredýän ýagty halkalary serpigen ýagtylygy döredýän gara - ky halkalaryna gabat gelýär. onu üçin hem içinden geçen ýagtylykda ýagty halkalary radiusy (3.43) a latma arkaly, gara ky halkalary radiusy (3.42) a latma arkaly kesgitlenilýär. A latmadaky *m* halkalary tertip belgisini a ladýar.

2. Deňýapgytlygyň interferensiýasy



3.18-nji çyzgy

Has ýokary takyklykdaky tekiz parallel ýorkada interferensiýa zolaklary ýagdaýy, di e öhläni üste dü me burçuna bagly bolýar. Goý nokatlanç monohromatik çe meden ýagtylyk öhleleri dürli burçlar bilen tekiz parallel ýorkany üstüne dü ýän bolsun *(3.18-nji çyzgy)*. orkany üstüne belli bir burç bilen dü en öhle ýorkany ýokarky we a aky üstlerinden serpigip, özara parallel ugurlar boýunça ýaýraýarlar. Eger-de ýorkadan serpigen öhleleri ýaýraýan ugrunda ýygnaýjy linza we linzany fokal tekizliginde ekran ýerle dirilse, özara parallel öhleler ekrany käbir nokadynda biri-birini üstüne dü üp interferensiýany ýüze çykarar. 3.18-nji çyzgyda dürli burç bilen ýorka dü ýan üç sany öhläni ektany *A, B, C* nokatlarynda interferensiýa ýüze çykmagy ekillendirilen. Eger bu nokatlarda go ulýan jübüt öhleleri geçen ýollaryny tapawudy $\Delta r = \pm m\lambda_0$ erti kanagatlandyrýan bolsa, onda *A, B, C* nokatlarda i uly depginli interferensiýa zolaklary ýüze çykýar.

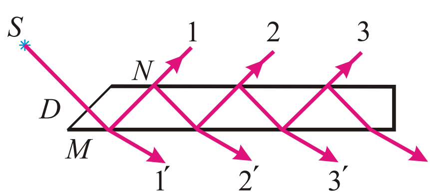
ýollary tapawudy: $\Delta r = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda_0}{2}$ ýagny d galy lyga eýe bolanda, di e i dü me burçuna bagly üýtgeýär.

3.5. Köpşöhleli interferensiýa

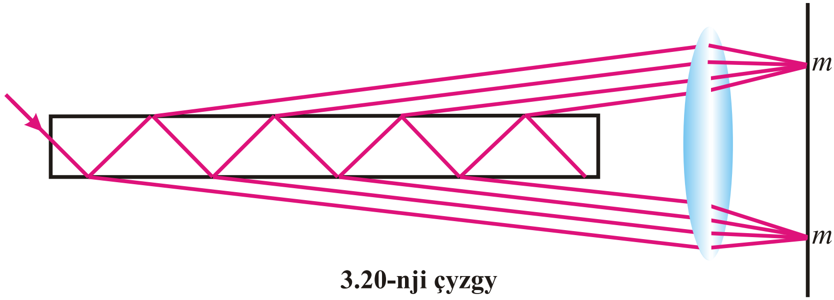
u mahala çenli ýagtylygy serpikdirme koeffisienti kiçi bolan ýorkalarda (maddalarda) bolýan interferensiýa seretdik. Beýle ýorkalarda ýagtylyk bir-iki gezek serpigenden so depgini has gow aýar. onu üçin beýle interferensiýa iki öhleli interferensiýa diýilýär. Emma iki öhleli interferensiýadan tapawutlylykda köp öhleli interferensiýa hem bar. Köp öhleli interferensiýa üstleri ýagtylygy serpikdirme koeffisienti has uly bolan ýorkalarda ýüze çykýar. Bu ýagdaýda ýorkany ýokarky we a aky üstlerinde öhläni köp gezek serpikmesi bolýar. erpigen ýa-da içinden geçen köp öhleleri ýüze çykarýan interferensiýasyna köp öhleli interferensiýa diýilýär. Dury maddany ýuka gatlagynda köp gezek serpikme iki ýagdaýda bolmagy mümkin:

1) Maddany ýuka gatlagyny içinde ýaýraýan öhläni onu ýokarky we a aky üstlerine dü me burçy, doly içki serpikme burçuny çäk ululygyna golaý bolmaly.

3.19-njy çyzgyda S nokatlanç çe meden ýuka tekizparallel dury madda (D) dü en öhle onu ýokarky (N) we a aky (M) üstlerinden köp gezek serpigip, interferensiýany döretmek mümkinçiligi bolan 1,2,3,... we 1′,2′,3′,... öhlelere bölünýär. öhläni dü me burçy $i \approx i_{çäk}$ bolan ýuka tekizparallel dury maddalara Lýummeri -Gerkäni gatlagy



3.19-njy çyzgy



3.20-nji çyzgy

diýilýär. Köp öhleli interferensiýany almak üçin öhleleri ýaýraýan ugrunda ýygnaýjy linza we ekran ýerle dirilýär.
2) Maddany öhläni serpikdirýän üstlerine, serpikdirme koeffisiýenti uly bolan gatlak örtülýär. etijede özara parallel ýerle dirilen bu üstleri arasynda öhle köp gezek serpikdirilýär we her gezek serpikdirilende azajyk mukdary da yna çykýar. abrini -Perony interferometri u usuly esasynda i leýär. 3.20-nji çyzgyda Lýummeri -Gerkäni gatlagynda köp öhleli interferensiýany alny y ekillendirilen.

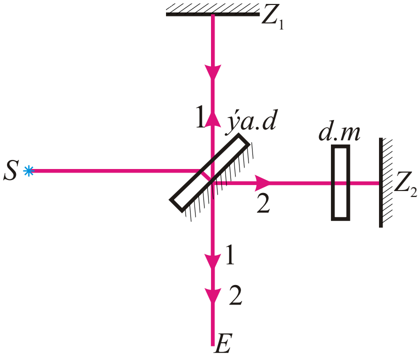
3.6. Interferensiýanyň ulanylyşy

Interferensiýa netijesinde emele gelýän ekil, biri-birini üstüne dü üp, interferensiýany ýüze çykarýan tolkunlary ýollaryny tapawudyny ujypsyzja üýtgemesine-de duýgurdyr. Go ulýan tolkunlary ýollaryny tapawudy, ýagtylygy tolkun uzynlygyny ülü ine de bolan ululyga üýtgände-de interferensiýa ekil düýpli üýtgeýär.

Interferensiýa hadysasyny esasynda i leýän dürli görnü li gurnamalara interferometrler diýilýär. Bu gurnamalar fiziki der ewleri we tehniki ölçegler geçirmek üçin ylmy -tehnikany dürli pudaklarynda gi den peýdalanylýar. Interferometrleri köpüsi iki öhleli düzgünde i leýär: ýagny nokatlanç çe meden çykýan öhle ikä bölünýär, so ra olar täzeden go ulýar. öhleleri birini ýolunda der elýän madda ýerle dirilýär. Maddany içinden geçen öhläni ýoly beýleki öhläni ýolundan tapawutlanýar, netijede iki öhläni ýollaryny tapawudy emele gelýär. Bu bolsa interferensiýa zolaklaryny süý megine getirýär. üý mäni ululygy boýunça der elýän maddany häsiýetleri (galy lygyny takyk ölçegi, döwme görkezijisi we ba galar) kesgitlenilýär. Iki öhleli interferometre mysal hökmünde Maýkelsony interferomtrine seredip geçeli *(3.21-nji çyzgy)*.

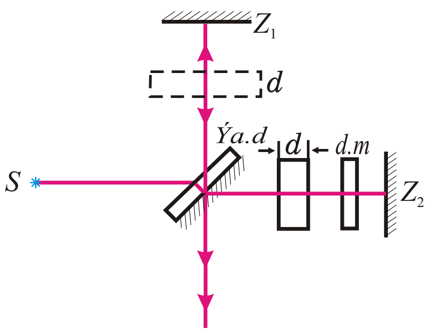
Bu interferometr Z_1 we Z_2 ýagtylygy doly serpikdiriji aýnalardan, ýagtylyk öhlesini ikä bölýän ýarymdury (bir üstüne ýagtylygy serpikdiriji gatlak çaýylan) (a.d) aýnadan, öhleleri geçýän ýollaryny de le diriji (d.m) aýnadan ybarat.

S ýagtylyk çe mesinden çykýan öhle a.d aýnada ikä bölünýär, onu bir bölegi (1-nji öhle) Z_1 aýna gönükýär, galan bölegi (2-nji öhle) ýarymdury aýnadan geçip, Z_2 aýna gönükýär. 1-nji öhle Z_1 aýnadan serpigip, ýarymdury maddadan geçip, *E* nokada tarap ýaýraýar. 2-nji öhle Z_2 aýnadan serpigip, ýarymdury aýna dü ýär, ondan hem serpigip, *E* nokada tarap ýaýraýar. 1-nji we 2-nji öhleleri geçen ýollaryny de e dirmek üçin 2-nji öhläni ýolunda d.m de le diriji aýna gatlagy ýerle dirilýär. Interferensiýa okulýar arkaly gözegçilik edilýär. Interferensiýa ekili dik ýerle en ýagty-gara ky zolaklar görnü inde bolýar. Interferometr i e girizilmeli pursatynda, merkezi, i uly depginli interferensiýa zolagy onu görkezijisini nolunjy çyzygyny üstünde ýerle ýär.



3.21-nji çyzgy

Maýkelsony interferometrinde maddany döwme görkezijisini kesgitleni i- ni mysalyna seredeli . Onu üçin der elýän maddany d galy lykdaky tekizparallel bölegini interferometri ikä bölünen öhlelerini birini ýaýraýan ugruna perpendikulýar ýerle dirmeli *(3.22-nji çyzgy)*.
etijede, merkezi i uly interferensiýa görkezijisini nolunjy çyzygyndan käbir ululyga süý ýär. eýlelikde, öhleleri birini ýolunda ýerle dirilen madda, bu öhläni optiki ýoluny λ ululyga üýtgetse, onda interferensiýa zolaklary bir zolagy inine de bolan ululyga süý er. Eger optiki ýol $m\lambda$ ululyga üýtgese, interferensiýa zolaklary hem m zolagy inine süý er.

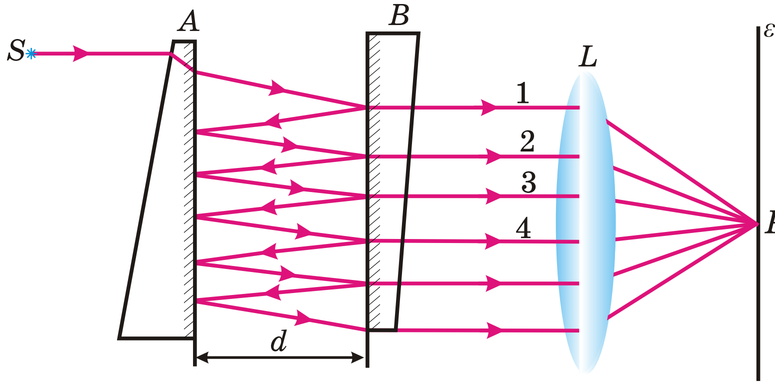


3.22-nji çyzgy

d galy lykly maddany içinden geçen öhläni optiki ýoly dn· bolar. Interferometri beýleki egnindäki öhle d ýoly päsgelçiliksiz (döwme görkezijisi $n \approx 1$ bolan howadan geçýär) geçýär, o a görä onu optiki ýoly d bolýar. Bu interferometrde öhle derelýän maddany içinden iki gezek geçýär, onu üçin iki egindäki öhleleri optiki ýollaryny tapawudy:

$$\Delta r = 2nd - 2d = 2d(n-1).$$

Eger $\Delta r = m\lambda$ bolsa, onda $2d(n-1) = m\lambda$. Bu ýerden



3.23-nji çyzgy

$$n = 1 + \frac{m\lambda}{2d} \quad . \qquad \textbf{(3.44)}$$

Maýkelsony interferometrinden ba ga-da iki öhleli interferometrlere mysal edip ameni , Tuaýmeni , Linnigi interferometrlerini, eleýi pefraktometrini görkezmek bolýar.

Köp öhleli interferometre mysal hökmünde abrini -Perony interferometrine seredeli . Onu gurlu y we ýagtylyk öhlesini ýoly 3.23-nji çyzgydaky ýalydyr.

yzgydan görnü i ýaly abrini -Perony interferometri biri-birinden kesgitli aralykda özara takyk parallellikde ýerle dirilen iki sany (A we B) tekizparallel ýuka aýna (ýa-da kwars) gatlagyndan ybarat. Bu aýnalary içki (biri-birine gar ylykly duran taraplary) üstleri ýagtylygy serpikdirme koeffisiýenti 0,9÷0,9 bolan we ýagtylyk üçin ýarymdury ýuka kümü gatlagy bilen örtülen. S çe meden monohromatik ýagtylyk öhleleri interferometre dü üp, howa gatlagy bilen doldurylan aýnalary arasynda köp gezek serpikmä sezewar bolýar. yzgyda i burç bilen dü ýän bir sany öhle görkezilen. B aýnadan geçen özara parallel 1,2,3,... we .m. öhleler L linzany fokal tekizliginde ýerle en ε ekranda jemlenýär. B aýnadan geçen 1,2,3,... öhleleri depgini olary tertip sanyny artdygyça gow aýar. ana yk ýerle en iki öhläni ekrana çenli geçen ýollaryny tapawudy

$$\Delta r = 2dn \cos i + \lambda$$

bolýar. Bu ýerde d-howa gatlagyny galy lygy; $\boldsymbol{n}$-howany absolýut döwme görkezijisi; λ-ýagtylygy tolkun uzynlygy (a latmany sag tarapyndaky ikinji goulyjy bir öhläni iki gezek serpikmesindäki go maça ýoluny hasaba alýar). Bu a latmany öhleleri faza tapawudyny üsti bilen a latsak: $\Delta\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r = \frac{4\pi dn \cos i}{\lambda} + 2\pi$.

Go ulýan tolkunlary fazasyny 2π-e tapawutlanmagy netijeleýji interferensiýa täsir etmeýär. onu üçin so ky a latmadaky 2π go ulyjyny hasaba almazlyk mümkin. Onda

$$\Delta\varphi_0 = \frac{4\pi dn}{\lambda}\cos i .$$

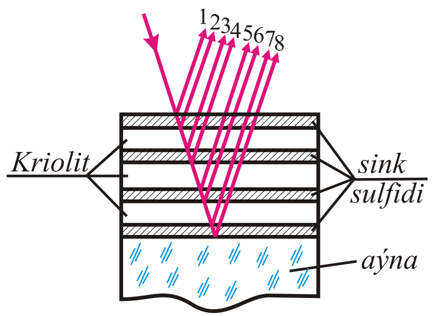
abrini -Perony interferometri de ýapgytlygy interferensiýasyny ýüze çykaryp, konsentrik halkalar görnü li ekili döredýär we ýagtylandyry y i uly güýçlenmesi a akdaky erti kanagatlandyrýar:

$$\Delta\varphi_0 = \frac{4\pi dn}{\lambda}\cos i = 2\pi\lambda \quad \text{ya-da} \quad 2dn\cos i = m\lambda \;, (m = 0, 1, 2, \ldots).$$

Ba gaça aýdanymyzda ekrany gözegçilik edilýän P nokadynda biri-birini üstüne dü üp, interferensiýany ýüze çykarýan ähli tolkunlar ol bir fazada bolýarlar. Bu bolsa interferensiýany has anyk ýüze çykmagyna ýardam edýär.

eýlelikde interferometrleri kömegi bilen ýagtylygy tolkun uzynlygyny, maddalary döwme görkezijilerini, ýuka ýorkany galy lygyny uly takyklyk bilen kesgitlemek mümkin. Mundan ba ga-da, linzalary üstüni ýylmanaklyk derejesini, olary egrilik radiusyny ujypsyzja üýtgemesini, optikada peýdalanylýan dürli maddalary ölçeglerini ujypsyzja üýtgemesini we .m.-leri uly takyklykda kesgitlemekde örän ähmiýetli enjamdyr.

3.7. Interferensiýadan peýdalanyp ýagtylygyň maddalarda serpikmesini köpeltmek we azaltmak



2.24-nji çyzgy

Adaty dury maddalar, üstüne dü ýän ýagtylygy 0,0 ÷0,1 bölegini serpikdirýär. o a görä köp enjamly (aýna, prizma, linza) abzallarda serpikdirilýän ýagtylygy mukdary dü ýän ýagtylygy 0,8÷0,9 bölegine ýetmegi mümkin. Bu zyýanly ýitgini azaltmak üçin aýna (ýa-da beýleki enjamlara) döwme görkezijisi kiçi bolan ýuka gatlak örtülýär (çaýylýar). Eger örtügi optiki galy lygy $d \cdot n' = \dfrac{\lambda}{4}$ bolsa, onda onu ýokarky we a aky üstlerinden serpikdirilen ýagtylyk tolkunlaryny ýollaryny tapawudy $\Delta r = \dfrac{\lambda}{2}$ bolar.

etijede ters fazada go ulýan tolkunlar biri-birini söndürýär we aýnadan geçýän ýagtylyk köpelýär. Optiki ulgamlary üstüne çaýylan maddany n' döwme görkezijisi a akdaky ýaly saýlanylyp alynýar: $n' \approx \sqrt{n}$.

Bu ýerde n optiki enjamy (aýnany , linzany , prizmany we .m.) döwme görkezijisi. agtylygy ýitgisini azaltmagy bu usulyna optikany ýagtyltmak diýilýär we optiki senagatda gi den ulanylýar.

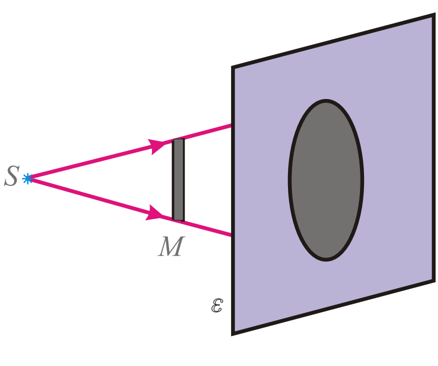
agtylygy serpikdirilmesini azaltmak bilen bir hatarda onu serpikdirilmesini köpeltmek hem esasy meseleleri biridir. Bu meseleleri çözüli i köp öhleli interferensiýany esasynda alynýar. Köp öhleli interferensiýany almak üçin aýnany üstüni uly döwme görkezijili we kiçi döwme görkezijili madda bilen gezekle dirip birnäçe gezek örtýärler. Mysal hökmünde 3.24-nji çyzgyda ekillendirilen galy lygy $\frac{\lambda}{4}$ bolan ýorkalar bilen birnäçe gezek örtülen ulgama seredeli . Aýnany üstüne ilki döwme görkezijisi n_1=2,3 bolan sink sulfidini (ZnS) ýorkasy örtülýär, so ra döwme görkezijisi n_2=1,32 bolan kriolit (Na_3AlF_6) ýorkasy örtülýär... . Ulgama dü ýän öhle gatlaklaryny araçäginde serpigip, ol bir fazada bolýan 1,2,3,... öhleleri döremegine getirýär. Bu öhleler go ulyp köp öhleli interferensiýany ýüze çykarýarlar. etijede serpikdirilen ýagtylygy depgini güýçlenip içinden geçýän ýagtylygy depgini azalýar. Gatlaklary sanyny artmagy bilen ulgamy ýagtylygy serpikdirme koeffisiýenti artýar. edi ýorkadan ybarat bolan ulgamy ýagtylygy geçirme koeffisiýenti 3. , si dirme koeffisiýenti 0, -den kiçi bolanda serpikme koeffisiýenti 96 -e ýetýär. Eger gatlaklary sany 11-e çenli artdyrylsa onda serpikdirme 100 -e ýakynla ýar. Häzirki döwürde köp öhleli interferensiýa esaslanan ýagtylygy serpikdirijiler lazer tehnikasynda ýokary hillilige eýe bolan optiki rezonatorlary döretmekde öz ornuny tapdy. Mundan ba ga-da, bular ýokary monohromatiklige eýe bolan ýagtylyk süzgüçlerini döretmekde gi den peýdalanylýar.

IV BAP

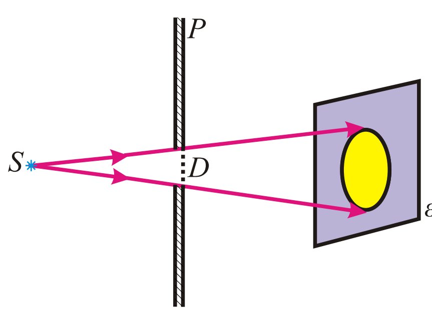
ÝAGTYLYGYŃ DIFRAKSIÝASY

4.1 Gýuýgensiň-Freneliň düzgüni. Freneliň zolaklary. Ýagtylygyň gönüçyzykly ýaýramasynyň tolkun nazaryýetiniň esasynda düşündirilişi

agtylygy gönüçyzykly ýaýrama kanuny gadym eýýämlardan bellidir. ýutony teklip eden taglymatyna görä ýagtylyk – gönüçyzykly hereketlenýän ýagtylyk bölejiklerini (korpuskalaryny) akymydyr. agtylygy gönüçyzykly ýaýramasyny subut edýän hadysalary biri – nokatlanç ýagtylyk çe mesinden çykýan öhleleri ýaýraýan ugrunda ýerle dirilen jisimi kölegesini ol jisimi görnü ine me ze bolmagydyr. Hakykatdan-da S nokatlanç çe meden çykýan öhleleri ýaýraýan ugrunda ýerle dirilen tegelek dury däl M päsgelçiligi kölegesi *(4.1-nji çyzgy)* ekranda tegelek görnü li bolýar.



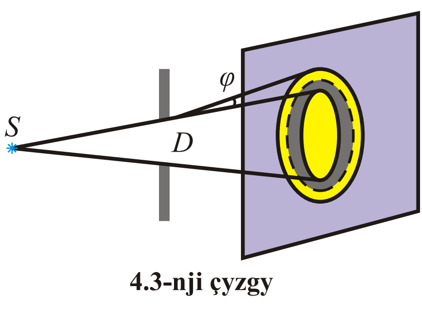
4.1-nji çyzgy



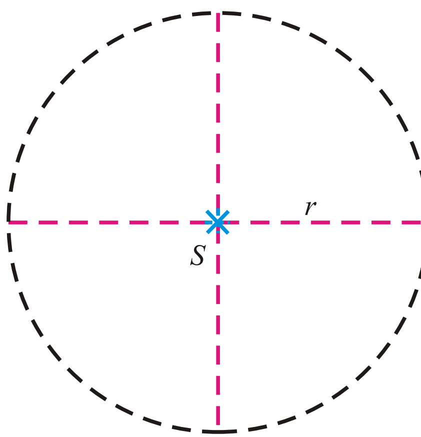
4.2-nji çyzgy

Kölegäni ekrandaky çägi M tegelek jisimi gyrasyna galta yp geçýän öhle bilen emele getirilýär. Eger öhleleri ýaýraýan ugrunda D diametrli tegelek de- ikli P päsgelçilik ýerle dirilse *(4.2-nji çyzgy)*, ekranda tegelek ýagty menek alynýar. Tegelek de igi diametri uly bolsa ($D>>\lambda$) **(**$-\lambda$ ýagtylygy tolkun uzynlygy**)** onda ýagty menek bilen kölegäni araçägi anyk bolýar. Goý, päsgelçilikdäki de igi diametrini üýtgedip bolýan bolsun. Eger de igi diametri yzygider kiçeldilse ε ekrandaky ýagty menegi hem kiçeljekdigi übhesizdir. Emma de igi diametri käbir kiçi ululyga ýetende, geometrik kölegäni çäginde gara ky we ýagty halkalar ýüze çykyp ba laýar. De igi mundan beýläk kiçeldilmegi, geometrik kölege çäginde gezekle ýän gara ky-ýagty halkalary sanyny artmagyna getirýär *(4.3-nji çyzgy)*.

Geometriki kölegäni çäginde ýagty halkalary emele gelmegi, de igi gyrasyndan ýagtylygy sowulyp geçýändigini, ýagny ýagtylygy gönüçyzykly ýaýrama kanunyny bozulýandygyny a ladýar. agtylygy



4.3-nji çyzgy



4.4-nji çyzgy

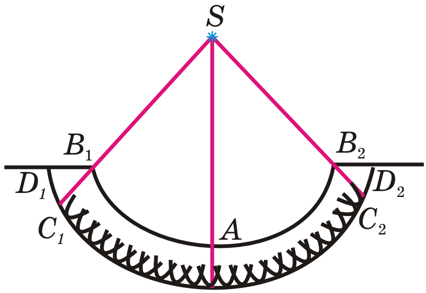
gönü çyzykly ýaýrama kanunyny bozulmagyna **ýagtylygyň difraksiýasy** diýilýär. 4.3-nji çyzgyda geometriki kölegäni çägindäki emele gelýän ahyrky ýagty halkany, gönüçyzykly ýaýramadan φ-burça gy aran öhleler ýüze çykarýar. φ-burça difraksiýa burçy diýilýär. Difraksiýa burçy $\varphi \quad \frac{\lambda}{D}$ gatna ykdan kesgitlenilýär. Bu ýerde D de igi diýametri. D-ni ulalmagy φ-ni kiçelmegine getirýär. Eger $D>>\lambda$ (λ–ýagtylygy tolkun uzynlygy) bolsa, onda $\varphi\to 0$ bolýar we difraksiýa ýüze çykmaýar.

Goý, birhilli gur awda nokatlanç ýagtylyk çe mesi ýerle en bolsun. Onda ýagtylygy gur awy hemme ugry boýunça ýaýrama tizligi birde bolar we käbir wagt dowamynda geçen r ýoly ähli ugurlar boýunça özara de bolar. Bu ýollary uçlaryny birle dirse r radiusly sferik üst alynar. Bu üste ýagtylyk fronty diýilýär *(4.4-nji çyzgy)*.

agtylyk öhlesini ýaýraýan ugry elmydama ýagtylyk frontuna perpendikulýardyr.

agtylygy difraksiýa hadysasyny dü ündirmek boýunça Gýuýgensi düzgünine seredeli . Gýuýgens ýagtylyk tolkunlaryny ýaýraý yna, ses tolkunlaryny ýaýraý yna me ze likde seredýär. Mälim bol y ýaly ses gur awy bölejiklerini yrgyldamasy netijesinde ýaýraýar. Gýuýgensi pikirine görä ýagtylyk gi i ligi dolduryp duran özbolu ly gur awda-efirde ýaýraýan bolmaly.

eýle nukdaýnazardan seredilende, efiri bölejiklerini yrgyldyly hereketi, di e ýagtylyk öhlesini ýaýraýan ugrunda, ýagny S çe me bilen A nokady



4.5-nji cyzgy

birle dirýän *(4.5-nji çyzgy)* gönüni ugrunda ýerle en bölejiklere berilmän, eýsem A nokada ýana yk ýerle en bölejiklere-de berilýär.

eýlelikde ýagtylyk tolkunlary A nokatdan hemme taraplara ýaýran ýaly ýaýraýar. Tolkun frontuny üstünde ýerle en ähli bölejikler bir fazada yrgyldaýarlar. Diýmek, de ige ýeten ilkinji B_1B_2 frontu üstünde ýerle en nokatlar bir fazada, yrgyldap ikilenji (elementar) tolkun çe melerine öwrülýärler. Elementar tolkunlary üsti boýunça geçirilen (galta ýan) çyzyk de ikden geçen ýagtylygy tolkun frontudyr. Eger ýagtylyk gönüçyzykly ýaýraýan bolsa, onda front C_1C_2 nokatlar bilen çäklenmeli. Emma çyzgydan görnü i ýaly tolkun fronty C_1D_1 we C_2D_2 nokatlary arasynda-da bolýar. Diýmek, ýagtylyk öhleleri frontu C_1D_1 we C_2D_2 aralyklaryna hem perpendikulýar ugur boýunça ýaýraýar. etijede ýagtylygy gönüçyzykly ýaýrama kanuny bozulýar.

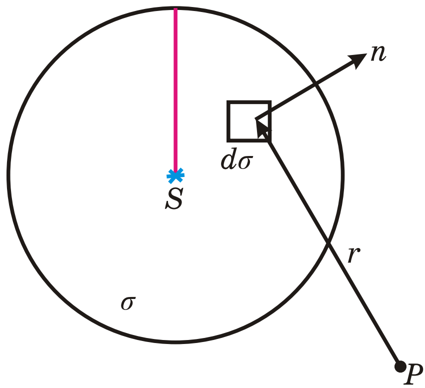
Gýuýgensi düzgüni difraksiýa hadysasyny dü ündirýän hem bolsa, difraksiýa zerarly interferensiýany ýüze çykmasyny dü ündirip bilmeýär. Gýuýgensi düzgüni renel tarapyndan ösdürildi. reneli pikirine görä, elementar (ikilenji) tolkunlar biri-birini üstüne dü üp, go ulmagy netijesinde interferensiýa ýüze çykýan bolmaly.

reneli dü ündiri ine a akdaky mysalda seredeli . S ýagtylyk çe mesinden ýaýraýan öhleleri käbir R radiusly sfera bilen çäklenen σ üstüni tolkun fronty diýip kabul edeli . σ üsti $d\sigma$ kiçi böleklere bölüp, olary ikilenji tolkun çe meleri diýip hasap edeli . Onda gi- i ligi käbir P nokadynda *(4.6-njy çyzgy)* tolkun frontuny $d\sigma_i$ bölegi a akdaky ýaly yrdyldyny oýandyrar:

$$dE_i = E_{0i}\cos(\omega t - kr - \varphi_0).$$

Bu ýerde E_{0i} $d\sigma_i$ üstden ýaýraýan tolkunlary P nokatda döredýän yrgyldylaryny amplitudasy; φ_0-ba langyç fazasy; $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ -tolkun sany; $\boldsymbol{r}$ -$d\sigma_i$ üstden P nokada çenli aralygy uzynlygy.

hli $d\sigma_i$ bölekleri P nokatda döredýän jemleýji yrgyldysy σ üst boýunça alnan integral arkaly kesgitlenilip, yrgyldylary go ulmasyna (superpozisiýasyna) de dir:

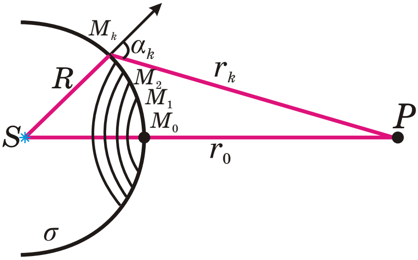


4.6-njy cyzgy

$$E = \int_{\sigma} E_{oi}\cos(\omega t - kr - \varphi_0)\, d\sigma_i\,.$$

Bu a latma Gýuýgensi – reneli düzgünini analitiki görnü idir.

Bu a latmadan peýdalanyp difraksiýa syn edilýän ekrany dürli nokatlarynda ýagtylygy amplitudasyny kesgitlemek ýe il däl. o a görä renel ýagtylyk frontuny zolaklara bölýär. olaklary gi ligi – iki sany ýana yk ýerle en zolakdan difraksiýa syn edilýän nokada (ekrandaky difraksiýa ekili käbir nokadyna)



4.7-nji çyzgy

barýan ýagtylyk tolkunlary, fazasy boýunça π ululyga ýagny, $\frac{\lambda}{2}$ ýola tapawutlanar ýaly bolmaly. Bu zolaklara reneli zolaklary diýilýär *(4.7-nji çyzgy)*.

hli zolaklardan ýagtylyk tolkunlary özara de ba langyç fazalarda ýaýrap ba laýarlar. P nokatda bu tolkunlar biri-birini üstüne dü üp go ulýarlar. Emma dürli zolaklary P nokatda oýandyrýan yrgyldylaryny fazasy we amplitudasy dürli bolmak bilen, zolagy meýdany ($d\sigma_k$), zolakdan syn edilýän P nokada çenli aralyga r_k we zolagy üstüne geçirilen normal bilen $\vec{r}_k$ wektory arasyndaky burça (α_k) bagly bolýar. S ýagtylyk çe mesi monohromatik çe me (λ=hemi elik) bolsa, onda ýokarda belleý imiz ýaly

$$r_1 - r_0 = r_2 - r_1 = r_3 - r_2 = \ldots = r_k - r_{k-1} = \frac{\lambda}{2}. \qquad (4.1)$$

Bu ýerden

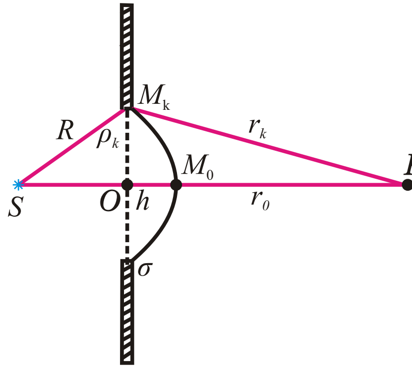
$$r_k - r_0 = k\frac{\lambda}{2} \qquad \text{ýa-da} \qquad r_k = r_0 + k\frac{\lambda}{2}. \qquad (4.2)$$

ana yk zolaklary tolkunlaryny P nokatda oýandyrýan yrgyldylary biri-birine ters fazada bolýandygyna görä oýandyrylan yrgyldylary jemleýji amplitudasy

$$E_0 = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \ldots + E_{0k-1} - E_{0k} \qquad (4.3)$$

görnü de hasaplanylýar. P nokatda oýandyrylýan yrgyldyny amplitudasy zolagy meýdanyna ($d\sigma$) baglydyr. öne ähli zolaklary meýdanlary özara de dir, ýagny $d\sigma_1$=$d\sigma_2$=…=$d\sigma_k$.

Ony subut etmek üçin a ak-daky mysala seredeli . Goý, egrilik radiusy R we üstüni meýdany σ bolan sferik ýagtylyk fronty ρ_k radiusly de ik bilen çäklenen bolsun. Goý bu ýagtylyk frontuny tolkunlary gi i ligi käbir P nokadynda biri-birini üstüne dü - ýän bolsun *(4.8-nji çyzgy)*.



4.8-nji çyzgy

Eger σ üstde k sany zolak ýerle ýär diýip kabul etsek, k-njy zolagy radiusy ρ_k de igi radiusyna de bolar. Onda SOM_k we POM_k üçburçluklardan ρ_k üçin alarys:

$$\rho_k^2 = R^2 - (R - h)^2 = r_k^2 - (r_0 - h)^2 . \qquad (4.4)$$

Bu ýerden

$$R^2 - R^2 + 2Rh - h^2 = r_k^2 - r_0^2 + r_0 h - h^2 , \qquad h = \frac{r_k^2 - r_0^2}{2(R + r_0)} . \qquad (4.\ \ )$$

(4.2) a latmany kwadrata göterip alarys:

$$r_k^2 - r_0^2 = k r_0 \lambda + k^2 \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 .$$

$\lambda_2 << r_0$ hasaba alyp, so ky a latmadaky ahyrky go uly-jyny aýyrsak:

$$r_k^2 - r_0^2 = k r_0 \lambda , \qquad (4.6)$$

onda (4.) a latmany a akdaky görnü de ýazyp *bileris:*

$$h = k \frac{r_0}{R + r_0} \cdot \frac{\lambda}{2} . \qquad (4.7)$$

R radiusly sferik segmenti meýdany $\sigma = 2\pi Rh$.

Onda
$$\sigma_k = k\frac{2\pi Rr_0}{R+r_0}\cdot\frac{\lambda}{2}. \tag{4.8}$$

Bu a latma $\boldsymbol{k}$ sany zolak ýerle ýän ýagtylyk frontuny meýdany kesgitleýär.

Onda bir zolagy meýdanyny $d\sigma = \sigma_k - \sigma_{k-1}$ a latma arkaly hasaplap alarys:

$$d\sigma = \frac{\pi Rr_0\lambda}{R+r_0}. \tag{4.9}$$

u ýerden görnü i ýaly reneli zolaklaryny meýdany onu tertip belgisine (k) bagly däldir we ähli zolaklary meýdanlary özara de dir. Emma zolaklary tertip belgisini artmagy bilen α_k burç ulalýar we Gýuýgens- reneli düzgünine laýyklykda zolaklary P ugra öhlelenmesini depgini azalýar, ýagny A_k amplituda kiçelýär. eýlelikde $E_{01} > E_{02} > E_{03} > \ldots > E_{0k} > E_{0(k+1)}$.

Täk belgili amplitudalary iki ýarym jem ýaly ýazaly :

$$E_{01} = \frac{E_{01}}{2} + \frac{E_{01}}{2}; \quad E_{03} = \frac{E_{03}}{2} + \frac{E_{03}}{2} \ \ldots \text{ we } .\text{m.}$$

Bu ululyklary (4.3) a latmada ornuna goýup, a akdaky ýaly ýazaly :

$\boldsymbol{k}$–täk bolanda
$$E_0' = \frac{E_{01}}{2} + \left(\frac{E_{01}}{2} - E_{02} + \frac{E_{03}}{2}\right) + \left(\frac{E_{03}}{2} - E_{04} + \frac{E_0}{2}\right) + \ldots + \frac{E_{0k}}{2};$$

$\boldsymbol{k}$–jübüt bolanda
$$E_0'' = \frac{E_{01}}{2} + \left(\frac{E_{01}}{2} - E_{02} + \frac{E_{03}}{2}\right) + \left(\frac{E_{03}}{2} - E_{04} + \frac{E_0}{2}\right) + \ldots + \frac{E_{0(k-1)}}{2} - E_{0k}.$$

Bu a latmalary ýaýy içindäki go ulyjylaryny jemi nola de dir.

Onda

$$E_1' = \frac{E_{01}}{2} + \frac{E_{0k}}{2} \tag{4.10}$$

$$E_0'' = \frac{E_{01}}{2} + \frac{E_{0(k-1)}}{2} - E_{0k}\,. \tag{4.11}$$

k uly bolsa $E_{0(k-1)} \approx E_{0k}$, onda

$$E_0'' = \frac{E_{01}}{2} - \frac{E_{0k}}{2}\,. \tag{4.12}$$

(4.10) we (4.12) a latmalardan görnü i ýaly $E'_0 > E''_0$ ýagny, de ik bilen çäklenen ýagtylyk frontuny üstünde ýerle ýän reneli zolaklaryny sany täk bolsa, syn edilýän (*P*) nokatda ýagtylyk tolkunlaryny jemleýji amplitudasy (diýmek depgini) uly, zolaklary sany jübüt bolsa, ýagtylyk tolkunlaryny amplitudasy kiçi bolar. (4.10) we (4.12) de liklerde $k \to \infty$ bolanda $E_{ok} \to 0$ bolýar. etijede

$$E_0' = E_0'' = \frac{E_{01}}{2} \tag{4.13}$$

alnar. Ba gaça aýdanymyzda reneli zolaklaryny sany tükeniksizlige ymtylanda difraksiýa syn edilýän *P* nokatdaky ýagtylyk tolkunlaryny jemleýji amplitudasy, birinji zolakdan gelýän ýagtylyk tolkunlaryny amplitudasyny ýarysyna de bolýar. Bu ýagdaýda zolaklary biri-birine täsiri ýok ýalydyr. onu üçin hem de igi (päsgelçiligi) ölçegleri uly bolanda ($D >> \lambda$) ýagtylyk gönüçyzykly ýaýraýar. Tolkun nazaryýetini esasynda ýagtylygy gönüçyzykly ýaýraý yny dü ündirili i hem undan ybaratdyr.

De ikde ýerle ýän reneli zolaklaryny sanyny 4.8-nji çyzgydan we (4.4), (4.6), (4,7) a latmalardan peýdalanyp hasaplamak mümkin.

$$\rho_k^2 = r_k^2 - (r_0 + h)^2 = r_k^2 - r_0^2 - 2r_0h - h^2 .$$

$r >> h$ hasaba alyp, h^2-go ulyjyny ta lamak bolýar. Onda

$$\rho_k^2 = r_k^2 - r_0^2 - 2\,r_0h \quad \text{we} \quad \rho_k^2 = r_k^2 - r_0^2 - \frac{kr_0^2}{R + r_0^2}\lambda .$$

(4.6) – dan belli bol y ýaly $r_k^2 - r_0^2 = kr_0\lambda$. Onda

$$k = \frac{\rho_k^2 (R + r_0)}{r_0 R\lambda} . \tag{4.14}$$

Bu a latma de ige dü ýän sferik tolkun frontuny üstünde ýerle ýän reneli zolaklaryny sanyny kesgitleýän a latmadyr. Eger de ige parallel ýagtylyk dessesi dü ýän bolsa, onda ýagtylyk tolkunlaryny fronty tekiz bolýar, ýagny $R = \infty$, onda

$$k = \frac{\rho_k^2}{r_0\lambda} . \qquad (4.1\ \ )$$

Bu a latma de ige dü ýän tekiz tolkun frontuny üstünde ýerle ýän reneli zolaklaryny sanyny kesgitleýän a latmadyr.

4.2. Zolak plastinasy

okarda belleý imiz ýaly sferik tolkun frontuny üstünde ýerle ýän reneli zolaklaryny radiusy

$$\rho_k = \sqrt{k\frac{Rr_0}{R + r_0}\lambda} \tag{4.16}$$

a latma arkaly kesgitlenilýär.

Radiuslary r_0, R, λ ululyklary käbir gymmaty üçin (4.16) aňlatmany kanagatlandyrýan, gezekle ýän dury we dury däl halkalardan (zolaklardan) ybarat bolan tekizparallel plastina zolak plastinasy diýilýär. Bu plastina ýagtylyk çe mesinden R we difraksiýa syn edilýän nokatdan r_0 aralykda ýagtylyk öhlesini ýaýraýan ugruna perpendikulýar ýerle dirilse, onda λ tolkun uzynlykly ýagtylygy tolkun frontuny üstünde ýerle ýän jübüt ýa-da täk zolaklaryny ýapýar. Eger jübüt zolaklar ýapylsa täk zolaklar açylýar ýa-da tersine. Goý, jübüt zolaklar ýapylan bolsun, onda (4.3) a latma boýunça difraksiýa syn edilýän nokatda di e täk zolaklary oýandyrýan yrgyldylaryny amplitudalary go ulýar:

$$E_0 = E_{01} + E_{03} + E_0 + \ldots + \ldots .$$

Eger-de täk zolaklar ýapylan bolsa,onda

$$E_0 = E_{02} + E_{04} + E_{06} + \ldots + \ldots .$$

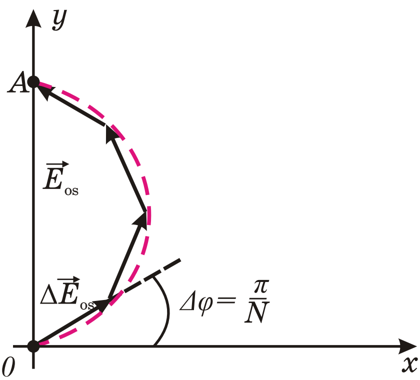
Görnü i ýaly iki ýagdaýda hem difraksiýa syn edilýän nokatda ýagtylyk tolkunlaryny amplitudasy, ähli zolaklary açyk bolan ýagdaýyndan uly bolýar. Bu netijeleri tejribeler tassyklaýar. olaklar plastinasy, reneli , ýagtylyk frontuny zolaklara bölmek usulyny difraksiýasyny dü ündirmekde örän o aýlydygyny tejribe doly tassyklaýar. Eger jübüt zolaklary ýagtylyk tolkunlaryny fazasy π ululyga üýtgedilse, onda olar täk zolaklary tolkunlary bilen bir fazada bolýar. Bu ýagdaýda difraksiýa gözegçilik edilýän nokatda ähli zolaklardan ýaýraýan tolkunlar bir fazada bolup, biri-birini üstüne dü üp, go ulýar we netijeleýji amplituda

$$E_0 = E_{01} + E_{02} + E_{03} + E_{04} + \ldots + E_{0k} \ (k=1,2,3,\ldots)$$

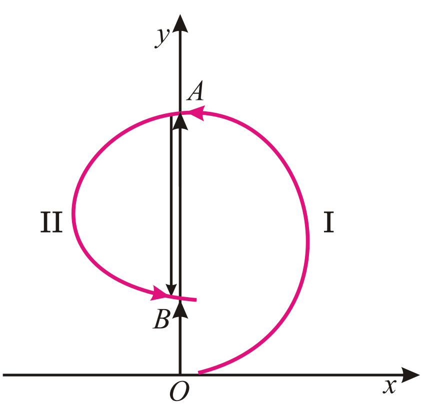
a latma arkaly kesgitlener. Ba gaça aýdanymyzda difraksiýa syn edilýän nokatda ýagtylygy depgini (intensiwligi) has ulalar. Bu ýagdaýda zolak plastinasy ýygnaýjy linza ýaly bolýar. olak palstinasy ilkinji gezek Wud tarapyndan döredilýär. Ol tekiz parallel plastinanyň üstüni ýuka lak gatlagy bilen örtüp, täk zolaklaryň lak örtügini aýyrýar. rtügi galy lygy içinden geçýän ýagtylygy optiki ýoluny $\frac{\lambda}{2}$ ululyga artdyrar ýaly edip alynýar.

4.3. Ýagtylyk tolkunlarynyň amplitudalaryny goşmagyň grafiki usuly

agtylyk frontuny σ üstünden ýaýraýan tolkunlaryny gözegçilik edilýän P nokatda oýandyrýan yrgyldylaryny jemleýji amplitudasyny kesgitlemek üçin grafiki usuldan hem peýdalanylýar. reneli bütin bir zolagyny P nokatdaky täsirini grafiki a latmak üçin ony kiçijik böleklere bölüp, her bir bölegi çäginde yrgyldyny fazasy we amplitudasy hemi elik diýip kabul etmeli. Onda her bir bölejigi täsirinde döreýän yrgyldyny käbir amplituda wektorlary bilen a latmak bolar. hli bölejikleri döredýän yrgyldylaryny amplituda wektorlary uzynlygy (ululygy) boýunça de bolup, ýana yk amplituda wektorlary bir-birine görä käbir burça gy aryýan görnü de bolýar.



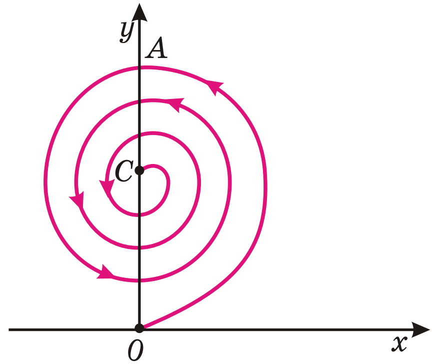
4.9-njy çyzgy



4.10-njy çyzgy

Goý, reneli bir zolagy N sany bölejige bölünen bolsun. Onda iki ýanaşyk bölejigiň amplituda wektorlaryny arasyndaky burç $\Delta\varphi = \dfrac{\pi}{N}$ bolýar, sebäbi iki ýanaşyk zolak fazasy boýunça biri-birinden π ululyga tapawutlanýar.

Eger zolagy her bir bölejigini amplituda wektory $\Delta\vec{E}_{os}$ diýip kabul etsek, onda bütin zolagy jemleýji amplituda wektory $\vec{E}_{os}$ bolýar *(4.9-njy çyzgy)*.



4.11-nji çyzgy

rgyldyny fazasy Ox okundan hasaplansa grafikden görnü i ýaly birinji bölegi amplituda wektory **Ox** oky bilen $\Delta\varphi = \dfrac{\pi}{N}$ burç emele getirýär. Bir zolak üçin jemleýji amplituda $\overrightarrow{OA} = \vec{E}_{os}$ wektor bilen a ladylýar. 4.9-njy çyzgyda amplitudalary go magy wektor diagrammasy ekillendirilen. Eger zolak örän köp bölejiklere bölünse, onda bölejikleri ampltuda wektorlary uzynlygy (ululygy) gysga bolup 4.9-njy çyzgydaky döwük çyzyklary sany köpelip, ýarym töwerek görnü li egri çyzyk emele geler (4.10-njy çyzgyda *I* ekil).

Ikinji zolak üçin gurlan wektor diagramma 4.10-njy çyzgydaky II ekil görnü inde $\left(\overrightarrow{AB}\right)$ bolar. Iki go y zolagy jemleýji amplituda wektory $\left(\overrightarrow{OB}\right)$ bolar. Eger tolkun frontuny üstünde ýerle ýän ähli zolaklary gözegçilik edilýän *P* nokatda döredýän yrgyldylaryny jemleýji amplitudalaryny wektor diagrammasy gurulsa ol 4.11-nji çyzgyda ekillendirilen görnü däki sarymy emele getirer.

arymy fokusy OA kesimi ortasynda C nokatda ýerle ýär. agtylyk frontuny döredýän jemleýji amplitudasy $\overrightarrow{OC}$ wektora de bolýar. Grafikden görnüi ýaly $\overrightarrow{OC} = \frac{\overrightarrow{OA}}{2} = \frac{\vec{E}_{0s}}{2}$, ýagny (4.13) a latma alyndy.

Ba gaça aýdanymyzda $K \to \infty$ bolanda difraksiýa syn edilýän P nokatda ýagtylyk tolkunlaryny jemleýji amplitudasy, birinji zolagy döredýän amplituda wektoryny ýarysyna de bolýar.

4.4. Difraksiýa hadysasyna syn etmegiň usullary

Difraksiýa hadysasy, syn edili usuly boýunça iki topara bölünýär:

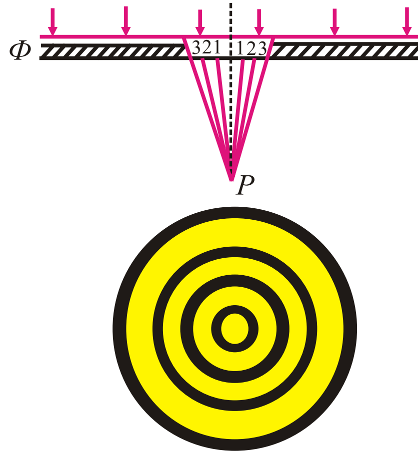
I. Difraksiýa hadysasyna päsgelçilige ýakyn aralykda syn etmek. Beýle difraksiýa hadysalar ilki renel tarapyndan öwrenilendigi sebäpli o a reneli difraksiýasy hem diýilýär;

II. Difraksiýa hadysasyna päsgelçilikden uzak aralykda gözegçilik etmek. Beýle difraksiýa hadysalar ilki raungofer tarapyndan öwrenilendigi sebäpli o a raungoferi difraksiýasy hem diýilýär. eýle-de bu hadysa parallel öhleleri difraksiýasy hem diýilýär.

1. Tegelek deşikde ýüze çykýan difraksiýa

Goý tegelek de igi bolan päsgelçilige monohromatik ýagtylygy parallel dessesi normal boýunça dü ýän bolsun. Bu ýagdaýda ýagtylyk fronty (**Φ**) tekiz front bolup de igi tekizligine parallel ýerle er *(4.12-nji çyzgy)*.

Difraksiýa gözegçilik edilýän ekrany , de ige simmetrik ýerle en P nokadyna seredeli . P nokady ýagty ýa-da gara ky bolmaklygy, *P* nokada görä, de ikde ýerle ýän reneli zolaklaryny sanyny jübüt ýa-da täk bolmagyna bagly. Eger zolaklary sany täk bolsa onda *P* nokat ýagty bolýar we onu daynda gezekle ýän gara - ky we ýagty halkalar emele geler. olagy sany jübüt bolsa, onda halkalary merkezi (*P*-nokat) gara ky bolar.

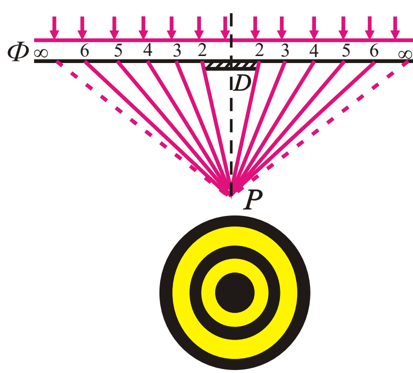


4.12-nji çyzgy

2. Ýagtylyk üçin dury bolmadyk tegelek päsgelçilikde ýüze çykýan difraksiýa

Dury däl tegelek päsgelçilige monohromatik ýagtylygy dessesi dü ýän bolsun. okarda belleý imiz ýaly bu ýagdaýda ýagtylygy tekiz fronty päsgelçilige parallel ýerle er *(4.13-nji çyzgy)*.

Difraksiýa syn edilýän ekrany päsgelçilige görä simmetrik ýerle en *P* nokadyna seredeli . Goý päsgelçilik (*D*) *P* nokada görä reneli zolaklaryny *k* sanysyny ýapýan bolsun. Onda *P* nokada (k 1)-nji zolakdan ba lap ýagtylyk tolkunlary dü er. den bil imiz ýaly *P* nokada ýagtylyk tolkunlaryny



4.13-nji çyzgy

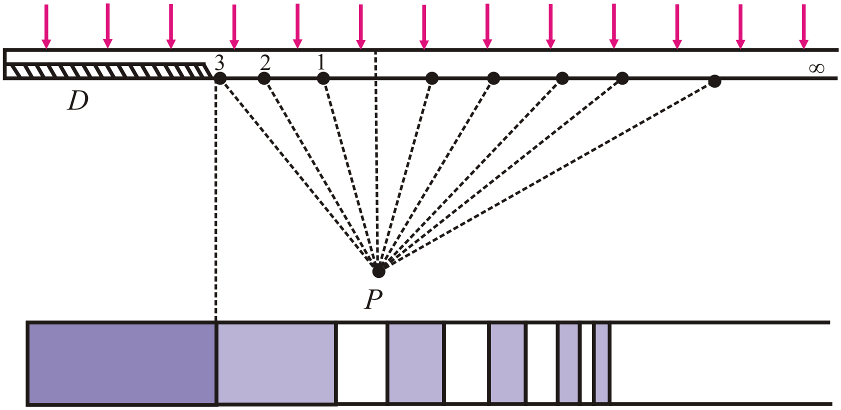
jemleýji amplitudasy $E_0=\frac{E_{0(k+1)}}{2}\pm\frac{E_{0\infty}}{2}$ a latma arkaly kesgitlenilýär:

$$E_{0\infty}=0 \text{ onda } \quad E_0=\frac{E_{0(k+1)}}{2}.$$

Görnü i ýaly (D) päsgelçiligi reneli zolaklaryny näçesini (elbetde ýapylýan zolaklary sany ∞ bolmaly däl) ýapýanlygyna garamazdan ekrany P nokady hökman ýagty bolýar. apylýan zolaklary sanyny artmagy bilen P nokady ýagtylanmasy gow aýar. eýlelikde, dury däl tegelek päsgelçiligi geometrik kölege çäginde, merkezi ýagty bolan gezekle ýän ýagty-gara ky halkalar emele gelýär. Eger dury däl tegelek päsgelçiligi ölçegleri örän kiçi bolsa, onda ýagtylyk tolkunlary onu gyralaryndan doly aýlanyp geçip, ekranda hiç hili kölege döretmeýär.

3. Ýagtylyk üçin dury bolmadyk ýarymtükeniksiz päsgelçiligiň gyrasynda ýüze çykýan difraksiýasy

Gyrasy gönüçyzykly bolan ýarymtükeniksiz dury däl päsgelçilige monohromatik ýagtylygy parallel dessesi dü ýän bolsun. Bu ýagdaýda reneli zolaklary päsgelçiligi gyralaryna parallel bolan gönüçyzyklar görnü inde bolýar. Difraksiýa syn edilýän meýdany P nokadyndaky ýagdaýa seredeli . 4.14-nji çyzgyda görkezili i ýaly ekrany P nokadyna görä çep tarapda 3 sany zolak ýerle en, sag tarapynda bolsa zolaklary sany tükeniksizdir. ag tarapdaky ähli zolaklardan P nokada gelýän ýagtylyk tolkunlaryny jemleýji amplitudasy $E_0'=\frac{E_{01}}{2}$.



4.14-nji çyzgy

ep tarapdaky zolaklardan gelýän ýagtylyk tolkunlaryny jemleýji amplitudasy $E_0'' = \frac{E_{01} + E_{03}}{2}$.

Onda P nokatdaky umumy amplitudalary jemi

$E_0 = E_0' + E_0'' = E_{01} + \frac{E_{03}}{2}$ bolar.

eýle usul arkaly difraksiýa syn edilýän ekrany islendik nokady üçin jemleýji amplitudany kesgitlemek bolýar. Difraksiýa syn edilýän ekranda ýagtygara ky parallel zolaklar emele gelýär. D päsgelçiligi geometrik kölege çäginde ýagtylygy depgini kemkemden azalýar.

4. Fraungoferiň yşdaky difraksiýasy

okarda belleý imiz ýaly raungoferi difraksiýasy, y dan tükeniksiz uzaklykda ýerle en ekranda ýagny parallel öhlelerde syn edilýär. y ölçeglerini örän kiçiligi zerarly ondan geçýän ýagtylygy depgini az bolýar we uzakda ýerle en ekranda difraksiýa gow ak ýüze çykýar. Parallel öhlelerde difraksiýany

aýdy ýüze çykarmak üçin y dan geçen ýagtylyk öh-
lelerini ýaýraýan ugrunda ýygnaýjy linza we onu fokal tekizliginde ekran ýerle dirilýär. ygnaýjy linza özara parallel öhleleri bir nokada jemleýär.

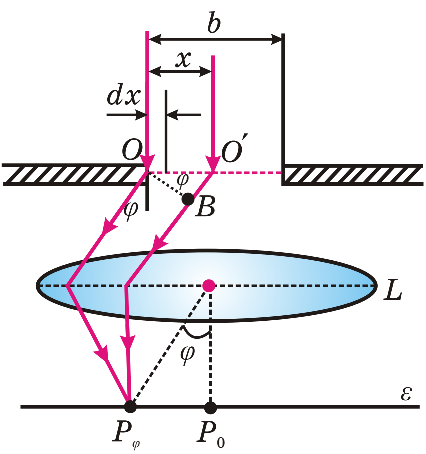
Goý, y a monohromatik ýagtylygy parallel dessesi normal boýunça dü ýän bolsun. bilen çäklenen ýagtylyk frontuny elementar böleklere bölmeli. rontu dx elementar böleginden syn edilýän nokada dü - ýän tolkuny amplitudasy elementar bölegi gi ligine baglydyr:

$$dA = c\,dx. \qquad (4.17)$$

c-proporsionallyk koeffisiýenti, difraksiýa burçy (φ=0) nola de bolan ýagdaýynda y y ähli b gi liginden geçýän tolkunlary jemleýji amplitudasy A_0 diýip kabul edilip, ol

$$A_0 = cb \qquad (4.18)$$

gatna ykdan kesgitlenilýär. Onda $c = \dfrac{A_0}{b}$ we $dA = \dfrac{A_0}{b}dx$.



4.15-nji çyzgy

dan φ burça gy aryp geçen tolkunlar ekrany P_φ nokadynda go ulýar *(4.15-nji çyzgy)*.

Ilki gi ligi x bolan y y böleginden P_φ nokada gelýän tolkunlary go aly . Onu üçin O we O' nokatlardan ýaýraýan tolkunlary faza tapawudyny bilmek gerek. Onu üçin O nokatdan $O'P_\varphi$ öhlä perpendikulýar (OB) geçirilse, OP_φ we BP_φ ýollar özara de   bolup O we O' nokatlardan P_φ nokada gelýän tolkunlary   ýollaryny   tapawudy

$$O'B = x\sin\varphi \qquad (4.19)$$

bolar. Eger O nokada golaý dx elementar bölekden P_φ nokada gelýän tolkunlary   fazasy ωt bolsa, onda onu de lemesini $dE = \frac{A_0}{b} dx \cos\omega t$ görnü de ýazmak bolýar.
O' nokada golaý dx elementar bölekden P_φ nokada gelýän tolkuny   de lemesini $dE = \frac{A_0}{b} dx\cos(\omega t - kO'B)$ ýa-da

$$dE = \frac{A_0}{b} dx \cos(\omega t - kx\sin\varphi) \qquad (4.20)$$

görnü de ýazmak bolýar.
Bu ýerde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - tolkun sany.

(4.20) a latmany integrirlemek arkaly P_φ nokada $\boldsymbol{b}$ y dan gelýän ähli tolkunlary   elektrik wektorlaryny netijeleýjisini alarys:

$E = \int\limits_0^b \frac{A_0}{b}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x\sin\varphi\right) dx$. Integraly hasaplamak üçin üýtgeýänlerini çaly mak usulyndan peýdalanylýar. $\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x\sin\varphi = z$, $\qquad dz = -\frac{2\pi}{\lambda}\sin\varphi\, dx$.
Onda so ky de lemeden

$$\frac{A_0}{b}\left(-\frac{1}{\frac{2\pi}{\lambda}x\sin\varphi}\right)\int\limits_0^b \cos z dz = \frac{A_0 x}{2\pi b\sin\varphi}\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\sin\varphi\right)\Bigg|_0^b =$$

$$= \frac{A_0 x}{2\pi b\sin\varphi}\left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\sin\varphi\right) - \sin\omega t\right].$$

Bu ýerde

$$\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}x\sin\varphi\right)-\sin\omega t=2\sin\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi\cos\left(\omega t-\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi\right).$$

Onda $E=A_0\dfrac{\sin\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi}{\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi}\cdot\cos\left(\omega t-\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi\right)$.

Bu ýerde

$$A_\varphi=A_0\frac{\sin\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi}{\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi} \tag{4.21}$$

P_φ – nokatdaky amplituda.

Köplenç φ burç örän kiçi bolýar, o a görä sin $\varphi\approx\varphi$ diýip kabul etmek mümkin.

Onda $A_\varphi=A_0\dfrac{\sin\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi}{\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi}$ de lemeden $\varphi\to 0$ bolanda

$A_\varphi=A_0$ bolýar, (sebäbi $\lim\limits_{\varphi\to 0}\dfrac{\sin\varphi}{\varphi}=1$) .

(4.21) a latmada A_φ–ni i kiçi bahalary $\sin\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi$ ululygy kiçi bahalary bilen kesgitlenilýär:

$$\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi=\pm n\pi,\qquad (n=1,2,3,\ldots)\ . \tag{4.22}$$

$$b\sin\varphi=\pm\ n\lambda \tag{4.23}$$

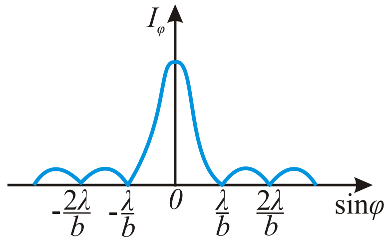
erti kanagatlandyrýan ugurlarda $A_\varphi\to 0$ we ýagtylygy depgini (intensewligi) i kiçi baha eýe bolýar.

$$b\sin\varphi=\pm(2n+1)\frac{\lambda}{2}\ . \tag{4.24}$$

erti kanagatlandyrýan ugurlarda ýagtylygy depgini i uly baha eýe bolýar. agtylygy depgini onu amplitudasyny kwadratyna göni baglydyr, onda

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi\right)^2}. \qquad (4.25)$$

Görnüşi ýaly $I_{(-\varphi)}=I_{(\varphi)}$. Bu bolsa difraksiýa şekiliniň linzanyň ortasyna görä simmetrik bolýandygyny görkezýär. Linzanyň fokal tekizliginde ýerleşdirilen ekranda emele gelýän difraksiýa şekili 4.16-njy çyzgydaky ýaly bolýar.



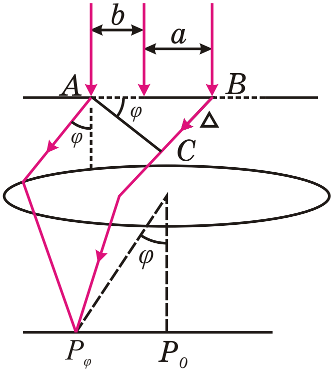
4.16-njy çyzgy

Şekilden görnüşi ýaly iň uly merkezi depgininiň bahasynyň giňligi $\sin\Delta\varphi = 2\frac{\lambda}{b}$. $\Delta\varphi$ kiçi bolany üçin $\sin\Delta\varphi \approx \Delta\varphi$, onda $\Delta\varphi \approx 2\frac{\lambda}{b}$.

Tejribeleriň netijesi yşdan geçýän ýagtylygyň 95% -e golaýy iň uly merkezi depgine düşýändigini görkezýär.

4.5. Difraksiýa gözenegi

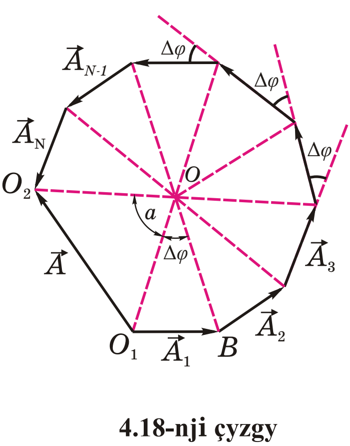
Ýönekeý difraksiýa gözenegi – şol bir tekizlikde we biri-birinden deň daşlykda ýerleşen özara parallel yşlaryň ulgamyndan ybaratdyr. Ony göz öňüne getirmek üçin maýda dişli daragy mysal hökmünde görkezmek bolýar. Difraksiýa gözeneginiň yşlarynyň her biriniň giňligi «b» we dury däl bölekleriň her biriniň giňligi «a» diýip kabul edilse, onda $d=a+b$ ululyga difraksiýa gözeneginiň periody ýa-da hemişeligi diýilýär (*4.17-nji çyzgy*).



4.17-nji çyzgy

Difraksiýa gözeneginiň emele getirýän şekili bir yşyň emele getirýän difraksiýa şekilinden tapawutly bolýar. Sebäbi dürli yşlaryň geçirýän ýagtylyk tolkunlary bir nokada goşulyp, interferensiýa döredýär. Eger difraksiýa gözenegine monohromatik ýagtylygyň parallel dessesi dik düşürilse, onda gözenegiň ähli yşlaryndan tolkun bir fazada geçýärler. Goý, gözenegiň ähli yşlaryndan «φ» burça gyşaryp geçýän tolkunlar ekranyň P_φ nokadynda goşulýan bolsun.

P_φ nokatdaky netijeleýji tolkunyň amplitudasy $\vec{A}\sum_{i=1}^{N}\vec{A}_i$ bolýar. Bu ýerde $\vec{A}_i$ –i-nji yşdan geçen tolkunyň amplituda wektory, N – yşlaryň sany. Şol bir ugur boýunça ähli yşlardan geçýän tolkunlaryň amplitudalary özara deňdir: $\left|\vec{A}_i\right| = A_\varphi$.



4.18-nji çyzgy

$\vec{A}_i$ we $\vec{A}_{i+1}$ wektorlaryň faza tapawudy, iki ýanaşyk ýerleşen yşyň degişli nokatlaryndan P_φ nokada çenli tolkunlaryň geçen ýollarynyň tapawudy *(4.17-nji çyzgydan)* (Δ) bilen kesgitlenýär, ýagny

$\Delta = BC = d\sin\varphi$. Onda

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda}\sin\varphi . \tag{4.26}$$

Difraksiýa gözeneginiň ähli yşlaryndan geçen tolkunlaryň P_φ nokatda döredýän jemleýji amplitudasyny wektorlary goşmagyň wektor diagrammasyndan peýdalanyp kesgitlemek amatlydyr.

4.18-nji çyzgydan O_1OO_2 üçburçlukdan $\frac{\frac{A}{2}}{OO_1} = \sin\frac{\alpha}{2}$,

$$A = 2OO_1\sin\frac{\alpha}{2}, \tag{4.27}$$

$$\alpha = 2\pi - N\Delta\varphi . \tag{4.28}$$

$\left|\vec{A}_i\right| = A_\varphi$ deňligi hasaba alyp O_1OB üçburçlukdan alarys:

$$\frac{\frac{A_\varphi}{2}}{OO_1} = \sin\frac{\Delta\varphi}{2} \quad \text{ýa-da} \quad OO_1 = \frac{A_\varphi}{2\sin\frac{\Delta\varphi}{2}}. \tag{4.29}$$

Onda $A = 2\frac{A_\varphi}{2\sin\frac{\Delta\varphi}{2}}\cdot\sin\frac{2\pi - N\Delta\varphi}{2}$ ýa-da $A = A_\varphi\frac{\sin\left(\pi - \frac{N\Delta\varphi}{2}\right)A_\varphi}{\sin\frac{\Delta\varphi}{2}}$.

$\sin\left(\pi - \frac{N\Delta\varphi}{2}\right) = \sin\frac{N\Delta\varphi}{2}$ aňlatmany hasaba alyp, aşakdaky deňligi alarys:

$$A = A_\varphi\frac{\sin\frac{\pi Nd\sin\varphi}{\lambda}}{\sin\frac{\pi d\sin\varphi}{\lambda}} . \tag{4.30}$$

Bir yşdan geçen tolkunlar üçin ýokarda kesgitleýşimiz ýaly

$$A_{\varphi}=A_0\frac{\sin\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi}{\frac{\pi b}{\lambda}\sin\varphi}.$$

Onda P_{φ} nokatda netijeleýji tolkunyň amplitudasy

$$A=A_0\left|\frac{\sin\left(\frac{\pi b\sin\varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi b\sin\varphi}{\lambda}}\cdot\frac{\sin\frac{\pi Nd\sin\varphi}{\lambda}}{\sin\frac{\pi d\sin\varphi}{\lambda}}\right|. \qquad (4.31)$$

P_{φ} nokatda ýagtylygyň depgini

$$I=I_0\frac{\sin^2\frac{\pi b\sin\varphi}{\lambda}}{\left(\frac{\pi b\sin\varphi}{\lambda}\right)^2}\cdot\frac{\sin^2\frac{\pi Nd\sin\varphi}{\lambda}}{\sin^2\frac{\pi d\sin\varphi}{\lambda}}. \qquad (4.32)$$

Aňlatmalardaky A_0 we I_0 linzanyň fokal tekizliginiň merkezinde (φ=0) bir yşdan geçen tolkunlaryň emele getirýän netijeleýji tolkunynyň amplitudasy we depgini.

Eger $\Delta\varphi$=0,2π,4π,…,2$n\pi$ bolsa (n=0,1,2,…), onda ähli amplituda wektorlary bir göni boýunça ugrukdyrylýar we jemleýji amplituda wektory hem-de difraksiýa gözegçilik edilýän (P_{φ}) nokatda ýagtylygyň depgini iň uly baha eýe bolýar.

Onda

$$\Delta=d\sin\varphi=\pm n\lambda, \qquad (n=0,1,2,....) \qquad (4.33)$$

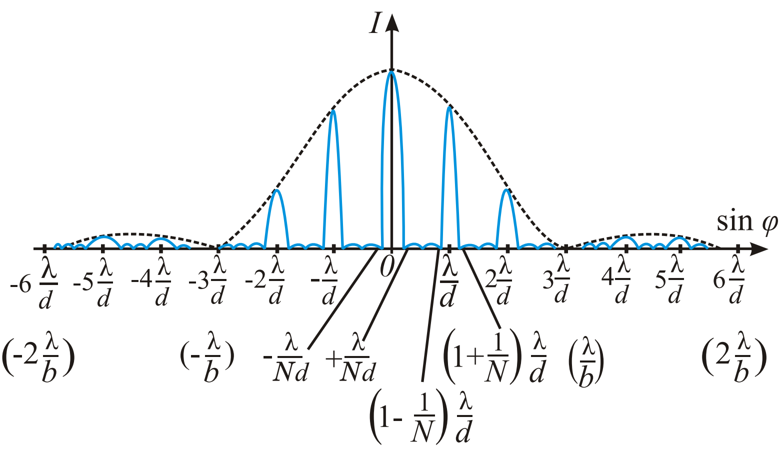
Bu aňlatma difraksiýa gözeneginde ýüze çykýan ýagtylygyň depgininiň iň uly gymmata eýe bolýan şerti diýilýär.

Ýagtylygyň depgininiň iň kiçi baha eýe bolýan şertine baş gowşama şerti diýilýär.

Bu şert $A_\varphi=0$ bolan ugurlarda emele gelýär, ol $b \sin \varphi = \pm n\lambda$ aňlatmadan kesgitlenilýär. Baş şertden başga-da örän göwşak depginli birnäçe goşmaça güýçlenmeler emele gelýär. Bu güýçlenmeler goşmaça gowşamalar bilen bölünýärler. Goşmaça gowşamalar $\frac{\pi N d \sin\varphi}{\lambda} = \pi, 2\pi, 3\pi, \ldots$ aňlatmadan alynýar. Bu ýagdaýda

$d \sin\varphi = \frac{P\lambda}{N}$; $P \neq 0, N, 2N, \ldots$. şerti kanagatlandyrmalydyr.

Görnüşi ýaly, difraksiýa gözeneginiň yşlarynyň sany N-e deň bolsa onda, her iki ýanaşyk baş güýçlenmeleriň arasynda (N-1) sany goşmaça gowşamalar ýerleşýär. Difraksiýa gözeneginiň kömegi bilen ýagtylygyň depgininiň üýtgeýşi, ýagny (4.32) aňlatmanyň grafigi 4.19-njy çyzgyda şekillendirilen.



4.19-njy çyzgy

Gözenegiň yşlarynyň sanynyň artmagy bilen iki ýanaşyk baş güýçlenmeleriň arasynda ýerleşýän goşmaça gowşamalaryň hem sany artýar. Bu bolsa baş güýçlenmeleriň gysylmagyna we olaryň depgininiň ýokarlanmagyna getirýär. Netijede baş güýçlenmeler çyzyk görnüşine geçýär. Oňa spektr çyzygy diýilýär.

4.6. Difraksiýa gözeneginiň dispersiýasy we saýgaryjylyk (çözüjilik) ukyby

Difraksiýa gözenegi ak ýagtylygy spektre dargatmak üçin hem peýdalanylýar. Ýagtylygy spektre dargatmak üçin prizma hem ulanylýar. Emma difraksiýa gözeneginiň prizmadan amatly taraplary köpdür: ol spektriň islendik çäklerinde işläp bilýär, difraksiýanyň kiçi burçunda onuň dispersiýasy üýtgemeýär, netijede spektri okamak ýeňilleşýär.

$d \sin \varphi = \pm n\lambda$ şertden görnüşi ýaly dürli tolkun uzynlykly ýagtylygyň iň uly güýçlenmesi, spektriň şol bir tertibinde, aýratyn ýerleşýär (nolunjy tertipden başgasynda). Bu ýagdaý bolsa gözenegiň ýagtylygy spektre dargatmasyna getirýär. Difraksiýa gözeneginiň baş güýçlendirme şertiniň aňlatmasyny differensirläp,

$$d \cos \varphi \, d\varphi = nd\lambda \tag{4.34}$$

aňlatmany alarys ýa-da

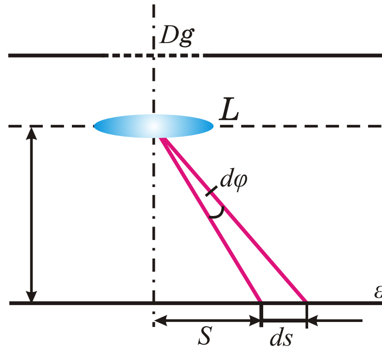
$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{n}{d \cos \varphi}. \tag{4.35}$$

Bu ýerde $D = \dfrac{d\varphi}{d\lambda}$ difraksiýa gözeneginiň burç dispersiýasy diýilýär.

φ-burçuň kiçi bahalarynda

$$D = \left(\frac{d\varphi}{d\lambda}\right)_{\varphi \to 0} = \frac{n}{d}. \tag{4.36}$$

Şu ýerden görnüşi ýaly gözenegiň burç dispersiýasy onuň periodyna we spektriň tertibine baglydyr. Burç dispersiýasynyň ölçeg birligi $\dfrac{rad}{angstrem}$ ýa-da $\dfrac{grad}{angstrem}$ bolýar. Köplenç spektr çyzyklara ekranda ýa-da fotoplastinada gözegçilik edilýär. Şol sebäpli spektr çyzyklaryň burç ululygyny ($d\varphi$) çyzyk aralygynyň (ds) üsti bilen aňlatmak amatly bolýar. Eger-de spektre gözegçilik üçin peýdalanylýan linzanyň fokus aralygy F bolsa *(4.20-nji çyzgy)*, onda $ds = F \cdot d\varphi$ bolýandygyna görä, çyzyk dispersiýasy:



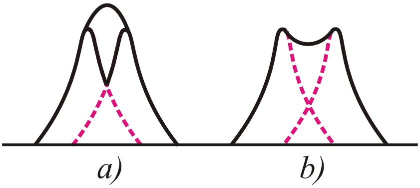
4.20-nji çyzgy

$$D' = \frac{ds}{d\lambda} = F \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda} = F \cdot D. \qquad (4.37)$$

Çyzyk dispersiýasynyň ölçeg birligi $\dfrac{mm}{angstrem}$.

Indi difraksiýa gözeneginiň saýgaryjylyk ukybyna seredeliň. Iki sany ýakyn ýerleşen spektr çyzyklaryň saýgarylmak mümkinçiligi (aýratynlykda görünmegi) diňe ol çyzyklaryň aralygyna bagly bolman spektr çyzyklaryň giňliginede bagly bolýar. 4.21-nji çyzgyda iki sany jemleýji depginiň şekili görkezilen

4.21-nji *a*) çyzgyda iň uly güýçlenme bir sany bolup görünýär (güýçlenmeler saýgarylmaýar). 4.21-nji *b*) çyzgyda bolsa iki sany güýçlenmäniň aralygynda käbir gowşama bar. Releýiň kriteriýasyna görä deň depginli iki güýçlenmäniň arasyndaky gowşamanyň



4.21-nji çyzgy

depgini, güýçlenmäniň depgininiň 80%-den geçmese olar saýgarylýar (aýratyn görünýär). Bu şertiň ýerine ýetmegi üçin bir spektr çyzygyň iň uly güýçlenmesi beýleki spektr çyzygyň iň uly güýçlenmesiniň golaýyndaky birinji iň uly gowşama gabat gelmeli.

Difraksiýa gözenegininiň saýgaryjylyk ukyby:

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} \quad . \tag{4.38}$$

gatnaşyk arkaly kesgitlenilýär. Goý, λ_1 we λ_2 tolkun uzynlykly ýagtylyk tolkunlarynyň n-nji iň uly güýçlenmeleriniň saýgarylma çägini kesgitlemek talap edilýän bolsun.

Onda λ_1-tolkun uzynlykly ýagtylyk tolkunynyň n-nji iň uly güýçlenmesi

$$d \sin \varphi_1 = n\lambda_1 .$$

λ_2- tolkun uzynlykly ýagtylyk tolkunynyň n-nji iň uly güýçlenmesi $d \sin \varphi_2 = n\lambda_2$

λ_1- tolkun uzynlykly ýagtylyk tolkunynyň n-nji iň uly güýçlenmesinden soňky birinji iň kiçi gowşamasy

$d \sin \varphi_1' = n\lambda_1 + \dfrac{\lambda_1}{N}$ deňleme arkaly kesgitlenilýär.

Eger $\lambda_2 > \lambda_1$ bolsa onda Releýiň kriteriýasy boýunça $\varphi_1' = \varphi_2$. Şu ýagdaý 4.20-nji *b* çyzgyda şekillendirilen.

Onda $n\lambda_1 + \dfrac{\lambda_1}{N} = n\lambda_2 .$

Bu ýerden $n(\lambda_2 - \lambda_1) = \dfrac{\lambda_1}{N}$; $\quad \lambda_2 - \lambda_1 = d\lambda$ ýa-da

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = n \cdot N. \tag{4.39}$$

Soňky aňlatmadan görnüşi ýaly difraksiýa gözeneginiň saýgaryjylyk ukyby spektriň tertibine (n) we gözenegiň yşlarynyň sanyna (N) baglydyr.

Ýokarda seredilen difraksiýa gözenegimize dury (içinden geçiriji) difraksiýa gözenegi diýilýär. Mundan başga-da serpikdiriji difraksiýa gözenekler hem bolýar. Ilkinji geçiriji difraksiýa gözenegi 1821-nji ýylda Fraungofer tarapyndan ýasalýar. Ol, özara parallel ýerleşen iki sany hyrly çüýe inçe simi saraýar, sarymyň simleriniň aralygy yş bolup hyzmat edýär. Soňra Fraungofer ýörite guralyň kömegi bilen aýnanyň üstüne örtülen altyn gatlagy çyzyp, gözenek ýasaýar. Fraungoferiň döreden difraksiýa gözenekleriniň iň gowusynyň bir millimetrdäki yşlarynyň sany 520-ä deň bolupdyr.

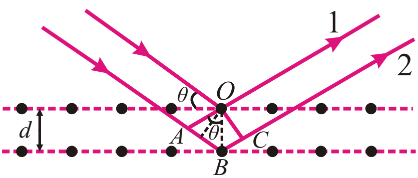
XIX-asyryň 80-nji ýyllarynda Rouland (1848-1901 ý., amerkan fizigi) ýörite gural oýlap tapyp, onuň kömegi bilen 1 *mm*-de 800 yşy bolan gözenegi ýasamagy başarýar. Roulandyň guraly Anderson we Wud tarapyndan kämilleşdirilip XX-asyryň 50-nji ýyllarynda 1 *mm*-de 1200 yşy bolan gözenek döredilýär. Häzirki wagtda 1 *mm*-de 2400 yşy bolan difraksiýa gözenekleri hem bar. Serpikdiriji difraksiýa gözenekleri metalyň (köplenç alýuminiň) ýa-da aýna plastinkasynyň üstüne, ýörite (almaz kesgiçli) guralyň kömegi bilen çyzmak arkaly ýasaýarlar.

Difraksiýa gözenekleri bilen bir hatarda, ýasamagy ýeňil we arzan bolan replikalar hem üstünlikli peýdalanylýar.

Tekiz we oýuk difraksiýa gözeneklerinden başgada, basganҫakly difraksiýa gözenekleri hem bar. Oňa

Maýkelsonyň eşalonyny we Maýkelson-Wilýamsyň eşalonyny mysal görkezmek bolýar. Has gysga tolkun uzynlykly elektromagnit tolkunlarynyň (mysal üçin rentgen şöhlesiniň) difraksiýasyny ýüze çykarmak üçin, üç ölçegli difraksiýa gözeneklerine eýe bolan tebigy gözenekler diýlip atlandyrylýan kristallar peýdalanylýar.

4.7. Rentgen şöhleleriniň difraksiýasy



4.22-nji çyzgy

Difraksiýa gözeneginiň kömegi bilen difraksiýanyň aýdyň ýüze çykmagy üçin gözenegiň periody, düşýän tolkunynyň uzynlygyna ($d \approx \lambda$) golaý bolmaly.

Şol sebäpli, görünýän we ultramelewşe çäkdäki elektromagnit tolkunlaryna ulanylýan difraksiýa gözenekleri, rentgen şöhleleriniň difraksiýasyny ýüze çykaryp bilmeýär. Rentgen şöhleleriniň difraksiýasyny ýüze çykarmak üçin tebigy difraksiýa gözenekleri, ýagny kristallar peýdalanylýar. Kristallaryň biri-birinden kesgitli aralykda ýerleşen elementar öýjükleri (ýaçeýkalary) yş bolup hyzmat edýär. Rentgen şöhleleriniň difraksiýasyny ýüze çykarýan kristal öýjükleriň periody 10^{-3} *sm* çemesindedir.

Kristaly difraksiýa gözenegi hökmünde ulanyp, nemes fizigi Laue (1879-1960 ý.) 1912-nji ýylda ilkinji gezek rentgen şöhleleriniň difraksiýasyna gözegçilik etmegi başardy. Monohromatik rentgen şöhlesi kristal gözenege düşüp, pytraýar *(4.22-nji çyzgy)*. Özara parallel we biri-birinden deň aralykda ýerleşen ion gatlakda pytran tolkunlar kogerentdirler we interferensiýany döredip bilýärler.

Iki gatlakdan pytran tolkunlaryň biri-birini güýçlendirmegi üçin olaryň geçen ýollarynyň tapawudy $\Delta r = n\lambda$ şerti kanagatlandyrmaly (n=1,2,3,...). 4.21-nji çyzgydan

$\Delta r = AB + BC = 2d\sin\theta.$

bu ýerde d-goňşy gatlaklaryň aralygy, onda

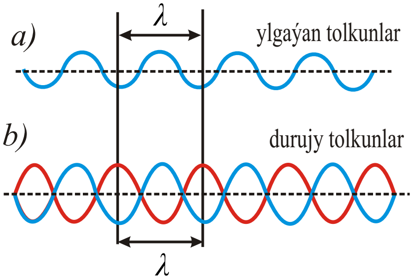
$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{4.40}$$

şert ýerine ýetende, difraksiýa sezewar bolan rentgen şöhleleriniň güýçlenmesi bolýar. θ- rentgen şöhlesiniň kristalyň üst tekizligine ýapgytlanma burçy. (4.40) aňlatma Wulfyň – Breggiň aňlatmasy diýlip atlandyrylýar. Bu aňlatmanyň kömegi bilen belli tolkun uzynlykly rentgen şöhlesi üçin θ,n we d ululyklar kesgitlenilýär. Eger kristalyň ion gatlaklarynyň aralygy (d) belli bolsa, onda θ,n we λ ululyklar kesgitlenilýär. Rentgen şöhleleri arkaly maddalaryň gurluşlaryny öwrenýän fizikanyň bölümine rentgenospektroskopiýa diýilýär.

4.8. Ultrasesiň durujy tolkunlaryndaky ýagtylygyň difraksiýasy

Ýygylygy 20 *kGs*-den ýokary bolan maýyşgak yrgyldylara ultrases diýilýär. Köplenç ultrasesler magnitostriksiýa we pýezoelektrik effektlerine esaslanan öndürijiler (generatorlar) tarapyndan şöhlelendirilýär.

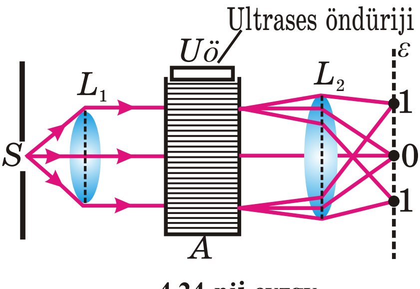
Mälim bolşy ýaly, ses boý tolkunlar bolmak bilen gurşawyň periodiki dykyzlanmasyny ýa-da seýreklenmesini döretmek arkaly ýaýraýar. Netijede gurşawyň



4.23-nji çyzgy

dykyzlygy periodiki üýtgeýär. Bu bolsa gurşawyň ýagtylygy döwülme görkezijisiniň periodiki üýtgemesine getirýär. Eger ultrases suwuklyga gönükdirilen bolsa, onda beýle suwuklyk ýagtylyk üçin difraksiýa gözenegi bolup hyzmat edip bilýär. Eger ultrases ýaýraýan suwuklygynda käbir päsgelçilikden serpikdirilse onda öňe we yza ýaýraýan tolkunlar goşulyp, durujy tolkuny emele getirýär *(4.23-nji çyzgy)*.

Suwuklykda ýaýraýan ultrases tolkunlaryň-da durujy ultrases tolkunlaryň-da döredýän difraksiýa gözeneginiň periody ultrasesiň tolkun uzynlygyna deňdir. Suwda we ksilolda ultrasesiň ýaýrama tizligi $v \approx 1000\frac{m}{s}$. Onda ýygylygy $\nu = 10^{8} Gs$ bolan ultrasesiň tolkun uzynlygy $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{10^3}{10^8} = 10^{-5} m = 10 mkm$ bolup, suwuklykda periody $10 mkm$ bolan faza difraksiýa gözenegini emele getirýär.

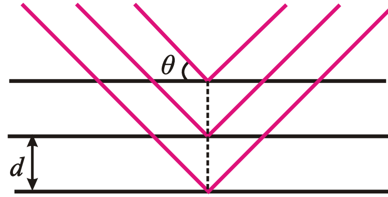


4.24-nji çyzgy

Beýle gözenekde, görünýän ýagtylygyň difraksiýasyna syn etmek mümkin.

Ultrasesi döredýän kristallaryň (kwars, turmalin) özünde-de durujy ultrases tolkunlary ýüze çykarýar we kristaly difraksiýa gözenegi hökmünde peýdalanmaga mümkinçilik berýär.

Beýle gözenekde difraksiýanyň ýüze çykyşy 4.24-nji çyzgyda şekillendirilýär. S-yşdan ýaýraýan ýagtylyk L-linzanyň kömeginde parallel desse görnüşinde ultrasesiň täsirinde döredilen gözenege gönükdirilýär.



4.25-nji çyzgy

Gözenekden geçen ýagtylyk difraksiýa zerarly spektre dargaýar. L_2 linzanyň fokal tekizliginde ýerleşdirilen ε ekranda difraksiýa şekili emele gelýär. 4.24-nji çyzgyda nolunjy we 1-nji tertipli difraksiýa zerarly ýagtylygyň iň uly güýçlenmeleri şekillendirilen.

Eger gözenegiň periody ultrases tolkunlarynyň λ tolkun uzynlygyna deň diýip hasap etsek, onda ýagtylygyň difraksiýa zerarly iň uly güýçlenmesini Wulfyň – Breggiň aňlatmasynyň esasynda kesgitläp bileris. 4.25-nji çyzgydan

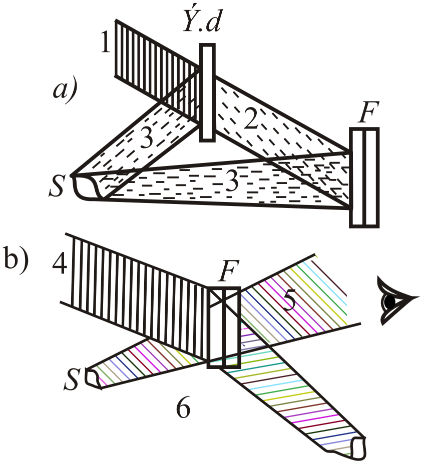
$$2d \sin \theta = n\lambda, \qquad (n=1,2,3,...).$$

Ultrases tolkunlaryndaky ýagtylygyň difraksiýasy ultrasesiň maddalarda ýaýrama kanunlaryny derňemekde wajyp usullaryň biri bolup hyzmat edýär.

4.9. Golografiýa barada düşünje

1948-nji ýylda iňlis fizigi Dennis Gabor (1900-1979 ý.) optiki abzallaryň kömegi bilen alynýan şekilden düýpgöter tapawutlanýan täze şekili teklip etdi.

Adaty optiki abzallarda (fotoabzal, proýektirleýän abzallar, kinoabzallar, göz we ş.m.) tolkunlaryň diňe depgini hasaba alynýar. Gaboryň teklip eden usulynda



4.26-njy çyzgy

interferensiýa hadysasy arkaly tolkunyň ýygylyk we faza gatnaşyklary hasaba alnyp, emele getirilen şekil soňra tolkunyň amplituda gatnaşyklaryny ýüze çykarmak üçin peýdalanylýar. Adaty fotosuratda tolkunyň diňe bir sany häsiýetnamasy, ýagny onuň amplitudasy hasaba alynýar. Gaboryň usulynda tolkun baradaky ähli maglumat ýagny tolkunyň ýygylygy, fazasy we amplitudasy doly hasaba alynýar. Gaboryň usulynda döreýän interferensiýa zolaklaryna gologramma, şekil almagyň usulyna bolsa golografiýa diýilýär. Gologramma — grek sözi bolup (holos-doly, ähli; gramma-ýazgy) doly ýazgy diýmegi aňladýar.

Gologrammany almak üçin *(4.26-njy a çyzga seret)* ýagtylyk dessesi 1 ýarymdury aýna (Ý.d) gönükdirilýär. Ýagtylyk dessesi 1 ýarymdury aýnada iki dessä bölünýär.

Ýarymdury aýnadan geçen desse 2 fotoemulsiýaly gatlaga düşýär (daýanç desse diýlip atlandyrylýar). Desse 1-iň ýarymdury aýnadan serpigen bölegi *S* predmetiň üstüne düşüp ýagtylandyrýar we predmetde pytraýar. Pytran dessäniň bir bölegi (predmet dessesi diýlip atlandyrylýar) fotoemulsiýa gatlaga düşüp, daýanç desse bilen interferensiýany ýüze çykarýar. Netijede fotoemulsiýa gatlakda interferensiýa şekili döreýär. Şeýle usulda döredilen şekile gologarmma diýilýär. Gologramma daşky görnüşi boýunça predmete meňzeş bolmaýar. Ol interferensiýa sebäpli ýagtylygyň depgininiň güýçlenmeleriniň we gowşamalarynyň şekili interferensiýa zolaklary görnüşinde bolýar. Başgaça aýdanymyzda «Nýutonyň halkalary» görnüşinde bolýar.

Gologrammadan anyk şekili almak 4.26-njy *b* çyzgyda şekillendirilýär. Şekili täzeden ýüze çykarmak (dikeltmek) üçin daýanç dessäniň fotoemulsiýa gatlaga düşme burçuna deň bolan burç bilen kogerent yagtylyk dessesi 4 fotoemulsiýa gönükdirilýär. Gologrammada desse 4 pytrap ýaýbaňlanýan 5 dessä we ýygnanýan 6 dessä bölünýär. Desse 6 predmetiň göwrümleýin hakyky şekilini ýüze çykarýar. Beýle şekiliň kemçilikli tarapy onuň aýnada (zerkalo) alnan ýaly görünmesidir. Adatça gologramma ýaýbaňlanýan dessede (5) gözegçilik edilýär we predmetiň hyýaly anyk şekili ýüze çykarylýar.

Golografiýa usuly arkaly şekil almagyň aýratynlyklaryna seredip geçeliň.

Adaty ýagtylyk çeşmeleri ýokary monohromatiklige eýe bolmaýanlygy sebäpli gologrammany aýdyň görnüşde almak örän kyn. Bu kynçylyk 1962—1963-nji ýyllarda kwant generatorlary — lazerler oýlanyp tapylmagy bilen aradan aýryldy. Lazer çeşmeleriniň kogerent ýagtylyk tolkunlarynyň kömeginde ýokary hilli gologrammalar alynýar.

1962-nji ýylda rus fizigi Ý.M.Denisýuk fransuz fizigi Gabriel Zippmanyň reňkli fotosuratyň alynyş usuly baradaky taglymatyndan ugur alyp reňkli golografiýany almagyň usulyny döretdi. Zippman tekiz üstde göwrümleýin şekil almagy amala aşyrdy.

Golografiýa predmetiň tutuş göwrümini şekillendirýär. Onuň islendik tarapyny suratda görmek mümkin. Häzirki döwürde güýçli depgin bilen ösýän ugra öwrülen golografiýanyň mümkinçiliklerine seredip geçeliň.

1. Adaty ak-gara we reňkli fotosuratda surata düşürilen her bir zadyň şekili tutuşlygyna saklanmalydyr. Eger onuň käbir bölegi zaýalansa ýa-da bölünip alynsa onda ol fotosuratyň zaýalanan ýa-da bölünip alnan ýerindäki maglumaty berip bilmeýär. Gologrammada her bir bölünip aýrylan bölek tutuş predmet barada doly maglumat berip bilýär. Bu ýagdaý edil linzanyň uly bolmadyk böleginde şekil alnyşy ýaly bolýar, emma abat linzada alnan şekilden öçügsi bolýar. Şu ýerden görnüşi ýaly gologramma maglumaty saklamakda adaty fotosuratlardan has ygtybarlydyr.

2. Gologrammanyň adaty fotosuratdan tapawutlylykda maglumat saklamak sygymy has uludyr. Mysal üçin adaty fotokagyzyň ýa-da fotoýorkanyň (6 x 9) mm^2 ölçegli böleginde bir çap sahypadaky ýazgylar ýerleşdirilip bilinýär. Gologrammada bu ölçegdäki meýdança emulsiýanyň hiline baglylykda 100-den 300-e çenli çap sahypalyk maglumat ýerleşýär. Bilişimiz ýaly häzirki döwürde çap-ýazgy önümler örän uly mukdarda yzygider öndürilýär. Olary ygtybarly we ykjam görnüşde saklamakda gologramma taýsyzdyr.

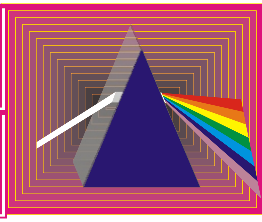
3. Golografiýanyň kömeginde steriokopik reňkli kino we telewideniýe döredilýär.

4. Eger λ tolkun uzynlykly ýagtylykda gologramma geçirilen şekil $\lambda_1 > \lambda$ tolkun uzynlykdaky ýagtylyk arkaly täzeden dikeldilse onda onuň ölçegleri $\frac{\lambda_1}{\lambda}$ gatnaşyk ýaly ulaldylan görnüşde alynýar. Bu bolsa mikroskopyň ulaldyşyny artdyryp saýgaryjylygyny ýokarlandyrmada mümkinçilik döredýär.

5. Akustiki golografiýa has gyzyklandyryjydyr. Bilşimiz ýaly kogerent ses çeşmelerini döretmek kyn däl, ses suwuklyklarda we gaty jisimlerde has gowy

ýaýraýar. Bu bolsa dury däl zatlaryň üç ölçegli akustik gologrammasyny almagy ýeňilleşdirýär. Akustiki gologrammadaky şekili görünýän ýagtylyk arkaly täzeden dikeldip, predmetleriň mysal üçin, demirbeton guýmalaryň, metal guýmalaryň, janly organizmleriň içki gurluşyny görmek mümkin. Gologrammanyň bu häsiýeti tehnikada we lukmançylyk işlerinde deňi-taýy bolmadyk mümkinçiliklere ýol açýar. Golografik usulyň mümkinçilikleri gitdigiçe kämilleşýär we ýakyn geljekde bu usul gündelik durmuşymyzda öz mynasyp ornuny eýeläp ýeňillikler döreder.

V BAP



GEOMETRIK OPTIKA

5.1. Geometrik optika – tolkun optikasynyň çäk ýagdaýy hökmünde

Ýagtylygyň interferensiýa we difraksiýa hadysalary onuň tolkun görnüşinde ýaýraýandygyny subut edýär. Tolkun nazaryýetiniň kömegi bilen ýagtylygyň islendik optiki gurşawlarda ýaýraýşyny we dürli üstler bilen çäklenen optiki ulgamlardan geçişini düşündirmek mümkin. Emma, ýagtylyk dessesini döretmek, şekil emele getirmek meselelerini geometrik optika arkaly has ýönekeý ýol bilen düşündirmek mümkin.

Geometrik optika ýagtylygyň ýaýraýşyny düşündirmekde ýagtylygyň serpikme we döwülme kanunlaryna boýun egýän şöhle düşünjesine esaslanýar. Şöhle diýlende, birhilli (birjynsly) gurşawda ýaýraýan ýagtylygyň inçejik dessesi göz öňünde tutulýar. Ýagtylygyň inçejik dessesini bir ýa-da birnäçe germawlar (diafragmalar) arkaly almak mümkin. Germawdaky ýagtylygyň geçýän deşiginiň ölçeglerini tükeniksiz kiçeltmek bilen tükeniksiz inçe şöhläni almak başartmaýar. Sebäbi deşigiň ölçegleriniň çakdanaşa kiçelmegi bilen difraksiýa zerarly şöhläniň ýaýbaňlanmasy ýüze çykýar. Deşiginiň diametri D bolan germawdan geçen ýagtylyk dessesiniň giňelmesi $\varphi \sim \dfrac{\lambda}{D}$ gatnaşyga bagly bolan difraksiýa burçy arkaly kesgitlenilýär.

Diňe deşigiň diametri *(D)* ýagtylygyň tolkun uzynlygyndan *(λ)* has uly ($D>>\lambda$) bolanda ýa-da $\lambda \to 0$ ýagdaýynda $\varphi \to 0$ bolýar, ýagny difraksiýa ýok bolup dessäniň giňelmesi ýüze çykmaýar. Diňe şu çäk şertde, ýagtylyk energiýasynyň ýaýraýan ugry bolan geometrik çyzyga ýagtylyk şöhlesi diýmek mümkin. Şeýlelik bilen, geometrik optika ýagtylygyň tolkun uzynlygynyň tükeniksiz kiçi $\lambda \to 0$ ýagdaýyna laýyk gelýän, hakyky tolkun optikasynyň çäk ýagdaýydyr.

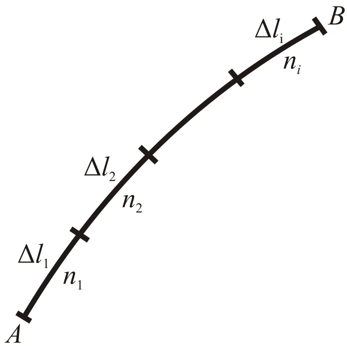
5.2. Fermanyň düzgüni

Geometrik optikanyň esasy kanunlary: ýagtylygyň birjynsly gurşawda gönüçyzykly ýaýramagy, dürli döwme görkezijili birjynsly gurşawlaryň araçäginde döwülmegi we serpikmesi gadym eýýämlardan bäri bellidir.

Döwme görkezijisi üznüksiz üýtgeýän gurşawda ýa-da islendik gurşawda ýagtylygyň ýaýraýşyny beýan edip bilýän umumy kanunalaýyklyk 1679-njy ýylda fransuz matematigi Ferma tarapyndan esaslandyryldy. Fermanyň pikirine görä, ýagtylyk gurşawda ýaýranda mümkin bolan ýollaryň iň gysga wagtda geçip bolýany boýunça ýaýraýar. Bu kanunalaýyklyga Fermanyň düzgüni diýilýär.

Eger ýagtylyk birjynsly gurşawda ýerleşen iki nokadyň arasynda ýaýraýan bolsa onda iň gysga wagtda geçilýän ýol ol iki nokady birleşdirýän gönüdir. Eger gurşawyň iki nokadynyň arasynda döwme görkezijisi üýtgeýän bolsa, onda iň gysga wagtda ýagtylygyň geçip biljek ýoly optiki ýol düşünjesinden peýdalanyp kesgitlenilýär. Ýagtylygyň geometrik ýolunyň gurşawyň döwme görkezijisine köpeltmek hasylyna optiki ýol diýilýär:

$$L = n \cdot l \ .$$



5.1-nji çyzgy

Bu ýerde L-optiki ýol, l-geometrik ýol, n-gurşawyň döwme görkezijisi.

Ýagtylyk birjynsly bolmadyk gurşawda ýaýraýan bolsa optiki ýoly kesgitlemek üçin her bir böleginiň çäginde döwme görkezijisi hemişelik bolan kiçijik böleklere bölmeli *(5.1-nji çyzgy)* we her bölek üçin optiki ýoly aýratyn kesgitläp soňra jemlemeli. Bu ýagdaýda gurşawyň A nokadyndan B nokadyna çenli optiki ýoluň uzynlygy:

$$L = n_1 \cdot \Delta l_1 + n_2 \cdot \Delta l_2 + \ldots + n_n \cdot \Delta l_n = \sum_{i=1}^{n} n_i \cdot \Delta l_i$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär.

Jemi integral bilen çalşyp $L = \int_A^B n dl$ görnüşde ýazmak bolar. dl elementar geometrik ýoly ýagtylygyň gurşawda ýaýrama υ tizliginiň we dl aralygy geşmek üçin gerek bolan dt wagtyň üsti bilen aňladyp, ýagtylygyň gurşawyň A nokadyndan B nokadyna barýança gerek bolan wagty kesgitläp bileris:

$$\upsilon = \frac{dl}{dt}; \qquad dt = \frac{dl}{\upsilon}\ ; \qquad \upsilon = \frac{c}{n}\ ; \qquad t = \int_A^B \frac{dl}{\upsilon} = \int_A^B \frac{ndl}{c} = \int_A^B \frac{dL}{c}.$$

Bu ýerde c-ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi. Fermanyň iň kiçi wagt düzgüni boýunça, ýagtylygyň ýaýrama wagty kesgitlenilýän integralyň üýtgemesi (wariasiýasy) nola öwrülmelidir:

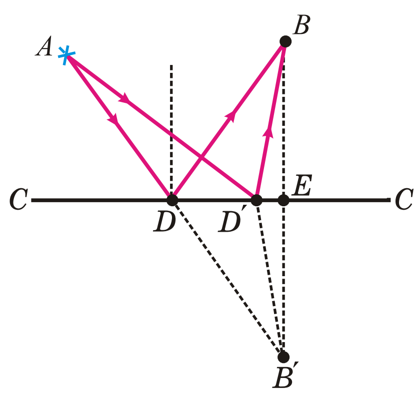
$$\delta t = \delta \int_A^B \frac{dl}{v} = \delta \int_A^B \frac{ndl}{c} = 0 \ .$$

Ynha, şu Fermanyň düzgüniniň matematiki aňladylyşydyr.

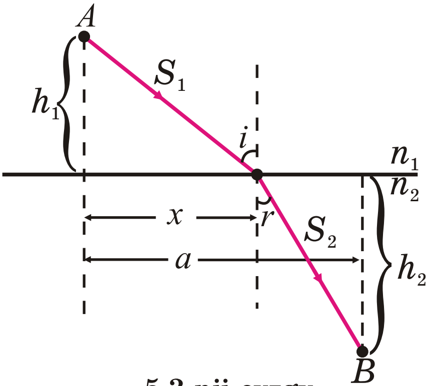
Fermanyň düzgünini aşakdaky ýaly hem beýan etmek bolýar: Ýagtylyk, optiki uzynlygy iň kiçi bolan ýol boýunça ýaýraýar.

Dürli döwme görkezijili iki gurşawyň tekiz araçäginde ýagtylygyň serpikme we döwülme kanunlary Fermanyň düzgüniniň esasynda getirilip çykarylýar. Oňa göz ýetirmek üçin aşakdaky mysallara seredeliň.

Goý, ýagtylyk şöhlesi A nokatdan çykyp, CC' üstden serpigip, B nokada düşýän bolsun *(5.2-nji çyzgy)*. Şöhle üçin iki sany ýoly saýlap alalyň: Serpikme kanunynyň ýerine ýetýän ADB ýoly we islendik $AD'B$ ýoly. B nokatdan CC' üste perpendikulýar BE göni geçireliň we onuň dowamynda $EB' = BE$ kesimi alalyň. D we D' nokatlary B' nokat bilen birleşdireliň. Onda $\Delta DBE = \Delta DB'E$ bolar. Bu ýerden: $D'B = D'B'$. Diýmek ADB ýoluň uzynlygy $AD + DB = AD + DB'$ bolar. $AD'B$ ýoluň uzynlygy bolsa $AD' + DB' = AD' + D'B'$ bolar. 5.2-nji çyzgydan görnüşi ýaly $AD+DB'<AD'+D'B'$. Diýmek $AD + DB < AD' + DB'$.



5.2-nji cyzgy



5.3-nji cyzgy

Başgaça aýdanymyzda D' nokadyň D nokada gabat gelmeýän islendik ýagdaýynda $AD'B'$ döwük çyzyk ADB' göni çyzykdan uzyndyr. Şonuň üçin şöhle diňe iň gysga ýol bolan ADB ugur boýunça ýaýraýar.

Goý, şöhle dürli döwülme görkezijili gurşawlarda ýerleşen A we B nokatlaryň arasynda ýaýraýan bolsun *(5.3-nji çyzgy)*. Optiki ýoluň iň gysga bolmagy üçin gurşawlaryň araçäginiň haýsy nokadynyň üsti bilen şöhläniň geçjekdigini kesgitläliň. A nokatdan B nokada çenli geçilen optiki ýoluň umumy uzynlygy

$$L = s_1 n_1 + s_2 n_2 = n_1\sqrt{h_1^2 + x^2} + n_2\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}\ .$$

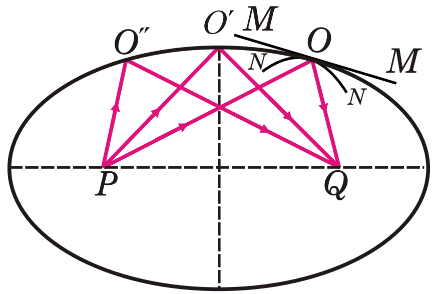
Ýoluň iň gysga uzynlygyny kesgitlemek üçin soňky aňlatmany x boýunça differensirläp, nola deňlemeli:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{n_1}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{n_2(a - x)}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}} = n_1\frac{x}{s_1} - n_2\frac{x}{s_2} = 0.$$

5.3-nji çyzgydan görnüşi ýaly

$$\frac{x}{s_1} = \sin\ i, \quad \frac{x}{s_2} = \sin\ r.$$

Diýmek $n_1 \sin\ i = n_2 \sin\ r$, ýagny ýagtylygyň iki gurşawyň araçäginde döwülme kanuny alyndy. $\frac{dL}{dx} = 0$ ekstremal şert. Bu şert diňe bir iň kiçi we iň uly şertleri kanagatlandyrmak bilen bir hatarda durnuklylyk şerti hem kanagatlandyrýar. Diýmek ýagtylygyň ýoly diňe bir iň kiçi bolman iň uly hem, üýtgewsiz hem (mümkin bolan ýollaryň islendigi hem) bolup bilýär. Ýagtylygyň ýolunyň durnuklylyk şertiniň ýerine ýetýän mysalyna seredeliň.



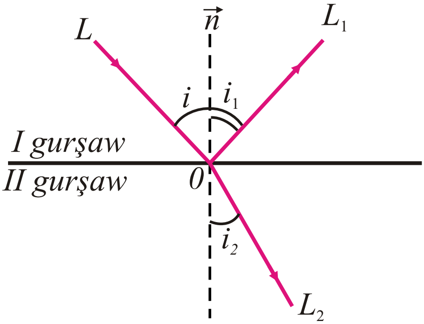
5.4-nji çyzgy

Eger nokatlanç ýagtylyk çeşmesi P, aýlanma ellipsoidiň fokuslarynyň birinde ýerleşen bolsa, onda çeşmeden çykýan şöhleler ellipsoidiň içki üstünden serpigip, onuň beýleki fokusynda (Q) ýygnanýar we P nokadyň şekilini emele getirer *(5.4-nji çyzgy)* .

Ellipsoidiň häsiýeti boýunça $PO+OQ$ ululyk O nokadyň islendik ýagdaýy üçin hem hemişelikdir, ýagny: $PO''+O''Q=PO'+O'Q=PO+OQ$. Şu mysalda ekstremal şertiň üç ýagdaýyny hem jemlemek mümkin: ellipsoidiň O nokadyna galtaşýan uly egrilik radiusly MM üstden ýagtylyk serpigende POQ ýagtylygyň ýoly, beýleki ýollaryň iň gysgasy, egrilik radiusy kiçi bolan NN üstden serpigende bolsa POQ ýagtylygyň ýoly, beýleki ýollaryň iň uzyny bolýar.

5.3. Döwme görkezijileri dürli bolan iki gurşawyň tekiz araçäginde ýagtylygyň serpikme we döwülme kanunlary

Ähli dury maddalar (howa, wakuum, suw, aýna we ş.m.) ýagtylygyň ýaýrap bilýän gurşawlarydyr. Ýagtylygyň ýaýraýan gurşawlary birhilli (birjynsly) we birhilli däl, izotrop we anizotrop bolýarlar. Biz bu bölümde diňe izotrop gurşawlarda ýagtylygyň ýaýraýşy-



5.5-nji çyzgy

na serederis. Dielektrikler biri-birinden dielektrik syzyjylygynyň ululygy bilen tapawutlanýarlar. Eger ýagtylygyň ýaýraýan ugrynda gurşawyň dielektrik syzyjylygy üýtgemese ($\varepsilon =$ **hemişelik**), onda beýle gurşawa izotrop gurşaw diýilýär. Izotrop gurşawlara howa, wakuum, suw, aýna, gazlar, dury erginler, ýaglar we ş.m. degişlidir. Birhilli, izotrop gurşawlarda ýagtylyk şöhlesi gönüçyzykly ýaýraýar.

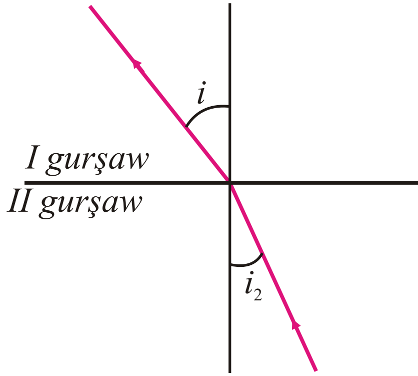
Goý, ýagtylyk şöhlesi iki gurşawyň (howa-suw, howa-aýna, suw-aýna we ş.m.) tekiz araçäginde O nokada düşýän bolsun. LO ýagtylyk şöhlesi O nokatda ikä bölünýär: bir bölegi serpigýär (OL_1 şöhle), galany döwlüp ikinji gurşawa geçýär (OL_2 şöhle) *(5.5-nji çyzgy)*.

Şöhläniň gurşawlaryň tekiz araçägine düşen O nokadyna tekiz araçäge (perpendikulýar) ($O\vec{n}$) normal geçireliň.

Düşýän (LO) şöhle bilen ($\vec{n}O$) normalyň arasyndaky burça (i) şöhläniň düşme burçy diýilýär: serpigen (OL_1) şöhle bilen ($\vec{n}O$) normalyň arasyndaky burça (i_1) şöhläniň serpikme burçy diýilýär.

Döwlen şöhle (OL_2) bilen ($\vec{n}O$) normalyň arasyndaky burça (i_2) şöhläniň döwülme burçy diýilýär. Dürli döwme görkezijili iki gurşawyň tekiz araçägine düşýän, ondan serpigen we döwlen şöhleleriň üçüsi-de şol bir tekizlikde ýatýarlar. Bu tekizlige ýagtylyk şöhlesiniň düşme tekizligi diýilýär. Düşme tekizlik diýlende, düşýän şöhle bilen düşme nokadyna inderilen normalyň üstünden geçýän tekizlik göz öňünde tutulýar.

Ýagtylygyň serpikme kanuny: düşýän we serpigýän şöhleler bir tekizlikde, düşme nokada inderilen normala simmetrik ýerleşýär, düşme burçy serpikme burçuna sanmasan deňdir:



5.6-njy çyzgy

$$i = i_1 . \qquad (5.1)$$

Ýagtylygyň döwülme kanuny: düşýän we döwlen şöhleler bir tekizlikde ýatýarlar; düşme burçunyň sinusynyň döwülme burçunyň sinusyna bolan gatnaşygy berlen gurşawlar jübüti üçin hemişelikdir:

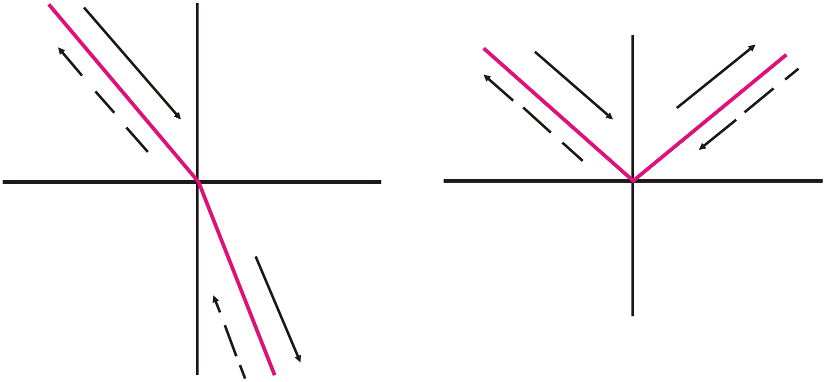
$$\frac{\sin i}{\sin i_2} = n_{2,1} . \qquad (5.2)$$

Bu ýerde $n_{2,1}$-a ikinji gurşawyň birinji gurşawa görä döwme görkezijisi.

Eger şöhle ikinji gurşawdan araçäge i_2 burç bilen düşse, onda döwülme burçy i-e deň bolýar *(5.6-njy çyzgy)*.

5.5-nji we 5.6-njy çyzgylardan görnüşi ýaly şöhle haýsy ýol bilen ýaýraýan bolsa, yzyna hem şol ýol bilen ýaýraýar. Muňa ýagtylyk şöhleleriniň ýaýramasynyň ikitaraplylyk ýa-da öwrülişiklik kanuny diýilýär.

Bu kanun ýagtylyk şöhlesiniň serpikmeginde-de, döwülmeginde-de doly ýerine ýetýär *(5.7-nji çyzgy)*.



5.7-nji çyzgy

Ýagtylyk II gurşawdan I gurşawa geçende (5.6-njy çyzgy) ýagtylygyň döwülme kanuny

$$\frac{\sin\, i_2}{\sin\, i} = n_{1,2} \qquad (5.3)$$

görnüşde aňladylýar. Bu ýerde $n_{1,2}$ I gurşawyň II gurşawa görä döwme görkezijisi diýilýär. (5.2) we (5.3) deňlemeleri deňeşdirip alarys:

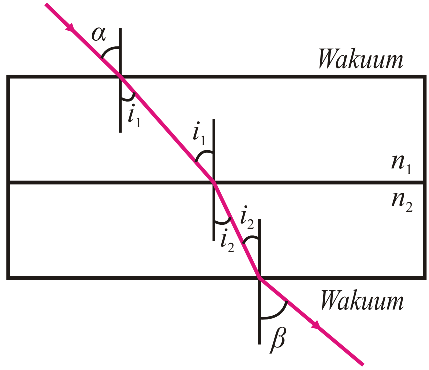
$$n_{2,1} = \frac{1}{n_{1,2}} \quad . \qquad (5.4)$$

Islendik gurşawyň wakuuma görä döwme görkezijisine absolýut döwme görkezijisi diýilýär. Eger 5.5-nji çyzgyda birinji gurşaw wakuum diýsek onda (5.2) aňlatma

$$\frac{\sin\, i}{\sin\, i_2} = n_2 \qquad (5.5)$$

görnüşe eýe bolar. n_2 ikinji gurşawyň absolýut döwme görkezijisi.

Goý, absolýut döwme görkezijileri degişlilikde n_1 we n_2 bolan iki sany tekiz parallel dury gurşawlar wakuumda özara galtaşdyryp ýerleşdirilen bolsun *(5.8-nji çyzgy)*. Şeýle ulgamdan geçen ýagtylyk şöhlesi ilkibaşdaky ugruna parallel ýaýraýar, ýagny



5.8-nji çyzgy

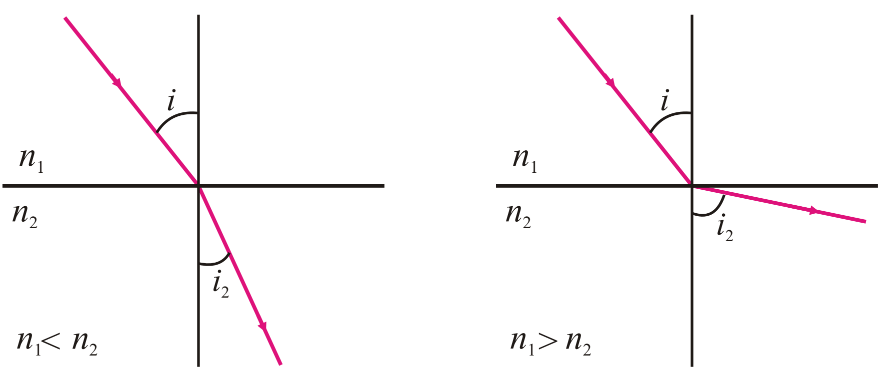
$$\alpha=\beta. \tag{5.6}$$

Çyzgyda görkezilen üç araçäk üçin ýagtylygyň döwülme kanuny:

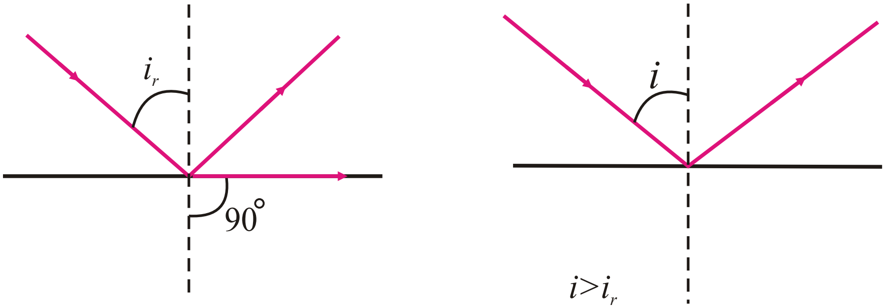
$$\frac{\sin\ \alpha}{\sin\ i_1} = n_1,\ \frac{\sin\ i_1}{\sin\ i_2} = n_{2,1},\ \frac{\sin\ i_2}{\sin\ \beta} = \frac{1}{n_2}\ . \tag{5.7}$$

Bu ýerde
$$\frac{\sin\ i_1}{\sin\ i_2} = \frac{n_2}{n_1};\ n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}\ . \tag{5.8}$$

Şeýlelikde, ikinji gurşawyň birinji gurşawa görä döwme görkezijisi, ol gurşawlaryň absolýut döwme görkezijileriniň gatnaşygyna deňdir. (5.8) aňlatmadan görnüşi ýaly $n_1>n_2$ bolsa $i_2>i$ ýa-da tersine *(5.9-njy çyzgy)*.



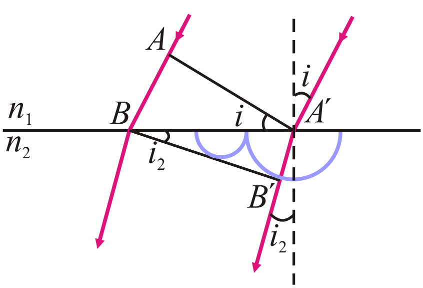
5.9-njy çyzgy



5.10-njy çyzgy

Çyzgydan görnüşi ýaly ýagtylyk şöhlesi döwme görkezijisi uly gurşawdan döwme görkezijisi kiçi gurşawa geçende, döwülme burçy düşme burçundan uly bolýar (eger $i \neq 0$ bolsa). Bu ýagdaýda döwülme burçy 90^o bolanda-da düşme burçy ($i < 90^o$) 90^o–dan kiçi bolýar. Döwülme burçy 90^o bolanda döwlen şöhle iki gurşawyň araçägi boýunça ýaýraýar *(5.10-njy çyzgy)*. Döwülme burçy 90^o bolanda düşme burçunyň ululygyna çäk burç diýilýär. Düşme burçy çäk burçdan uly bolsa döwlen şöhle serpigen şöhlä goşulýar. Bu hadysa ýagtylygyň doly içki serpikmesi diýilýär.

Ýagtylygyň gurşawda ýaýrama tizligi, gurşawyň döwme görkezijisine baglydyr. Bu baglanşygy Gýuýgensiň düzgüninden peýdalanyp getirip çykarmak mümkin. Goý, absolýut döwme görkezijileri degişlilikde n_1 we n_2 bolan gurşawlaryň araçägine AA' tekiz tolkun fronty düşýän bolsun. Onda Gýuýgensiň düzgünine laýyklykda döwlen şöhläniň BB' tekiz tolkun frontuny alarys *(5.11-nji çyzgy)*.



5.11-nji çyzgy

Eger ýagtylygyň birinji gurşawda ýaýrama tizligi v_1 we ikinji gurşawda ýaýrama tizligini v_2 diýip kabul etsek, onda AA' tolkun frontunyň A nokady iki gurşawyň araçägine Δt wagtda B nokada ýeter. Bu wagtyň dowamynda A' nokat B' nokada süýşer, ýagny:

$$AB = v_1 \Delta t, \quad A'B' = v_2 \Delta t.$$

5.11-nji çyzgydan:

$$\sin i = \frac{v_1 \Delta t}{BA'}, \ \sin i_2 = \frac{v_2 \Delta t}{BA'} .$$

Deňlikleri gatnaşdyryp alarys:

$$\frac{\sin\ i}{\sin\ i_2} = \frac{v_1}{v_2} . \tag{5.9}$$

(5.8) we (5.9) deňliklerden:

$$\frac{\sin\ i}{\sin\ i_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} . \tag{5.10}$$

Eger birinji gurşaw wakuum diýsek, onda

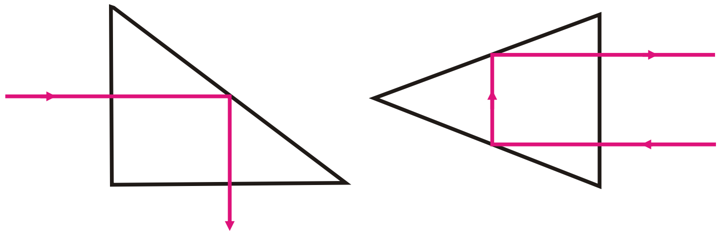
$$n_1 = 1 \ , \ v_1 = c \ , \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \tag{5.11}$$

Eger ikinji gurşaw wakuum diýsek, onda

$$n_2 = 1 \ , \ v_2 = c \ , \quad n_1 = \frac{c}{v_1} . \tag{5.12}$$

(5.2) we (5.9) aňlatmalarda gurşawlaryň absolýut döwme görkezijileriniň fiziki manysy ýüze çykýar. Döwme görkezijisiniň fiziki manysy: ýagtylygyň gurşawda ýaýrama tizligininiň onuň wakuumda ýaýrama tizliginden näçe esse kiçidigini aňladýar.

5.4. Süýüm optikasy



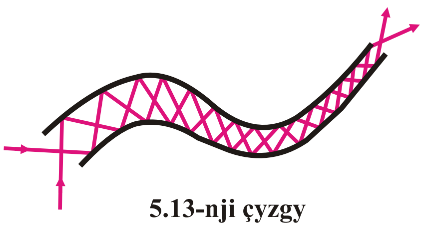
5.12-nji çyzgy

Optikanyň ýagtylyk energiýasyny inçe turbajyklar arkaly aralyga geçirmek meseleleri bilen meşgullanýan ýörite bölümine «süýüm optikasy» diýilýär.

Ýagtylygyň doly içki serpikme hadysasyndan peýdalanyp onuň islendik ugra ugrukdyrylmagyny gazanmak mümkin. Mysal üçin, prizmanyň kömegi bilen ýagtylygyň ýaýraýan ugruny 90°-a ýa-da 180°-a üýtgedip bolýar *(5.12-nji çyzgy)*.

«Ýagtylygy äkidiji» (swetowod) diýlip atlandyrylýan abzal ýagtylygyň doly içki serpikme hadysasynyň esasynda ýasalýar. Ýagtylygy äkidiji – içi dury madda bilen örtülen çeýe turbajyk (süýüm) görnüşinde bolýar.

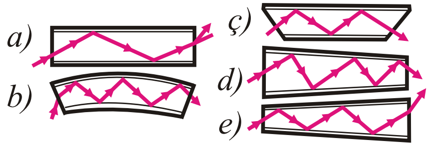
Ýagtylygy äkidiji boýunça ýagtylygyň ýaýramagy üçin ýagtylygyň ýagtylykgeçirijiniň diwaryna düşme burçy doly içki serpikme burçundan uly bolmagy üpjün edilýär. Käbir ýagtylygy äkidijilere seredip geçeliň, *(5.13-nji çyzgy)*.



5.13-nji çyzgy

Eger optiki süýmüň diametri ýagtylygyň ýaýraýan ugruna barha kiçelip gidýän bolsa oňa «fokon» süýüm diýilýär

(5.14-nji d çyzgy). Fokonlar aralyga berilýän şekili kiçeldip geçirýärler. Eger optiki süýmüň diametri ýagtylygyň ýaýraýan ugruna barha ulalyp gidýän bolsa oňa «afokon» süýüm diýilýär, 5.14-nji *e* çyzgy. Afokonlar aralyga berilýän şekili ulaldyp geçirýärler.



5.14-nji çyzgy

Häzirki döwürde optiki süýümleriň iki görnüşi giňden peýdalanylýar: 1) Daşy gorag gatlagy bilen örtülen inçe süýümleriň dessesi görnüşinde; 2) Ýokary çeýelige eýe bolan süýümler döwülme görkezijisi kiçi bolan maddada ýerleşdirilen görnüşde.

Optiki süýümler barha giň gerim bilen halk hojalygynyň dürli pudaklarynda ulanylýar.

Optiki süýümli aragatnaşyk serişdesiniň esasy bölegi bolan ýagtylyk çeşmesiniň täze görnüşi lazerler geçen asyryň 60-njy ýyllarynda peýda bolup başlady. Şeýlelikde ýokary kogerentlige eýe bolan inçe zolakly ugrukdyrylýan ýagtylygyň optiki şöhlelendirijileri süýüm optikasynyň ösmegine uly itergi berdi.

Ýarymgeçirijili lazer diodlarynyň elektrik toguny ýokary tizlikde modulirlemegi amala aşyrmagy fotodiodlaryň bolsa giň zolakly optiki signallary kabul etmäge ukyplylygy aragatnaşygyň süýümli-optiki ulgamynyň döremegine getirdi.

Häzirki wagtda optiki süýümli ýagtylyk geçirijiler daşky gabygy bolan köp sanly inçe sapaklardan ybarat kabel görnüşinde ýasalýar. Saçyň ýogynlygyndaky ýekeje süýüm kiçiräk kärhananyň ulanýan telefonlaryny, kompýuterlerini we telewizorlaryny işletmek üçin zerur bolan signallary geçirmäge ukyplydyr.

Optiki süýüm kabellerinde 72-den 144-de çenli sapak görnüşli ýagtylyk geçirijiler ýerleşýärler. Täze tehnologiýanyň esasynda döredilen ýeke modaly süýmlerde ýagtylygyň depgininiň aralyga baglylykda ýitgisi örän az. Ýeke modaly süýümlerden ybarat kabeller 1 sekundyň dowamynda 1,2 mlrd bit mukdardaky signallary geçirmäge ukyplydyr, mundan başgada gaýtalap güýçlendirijileriň hyzmat edýän aralygy 50 *km-e* çenli ýetirildi.

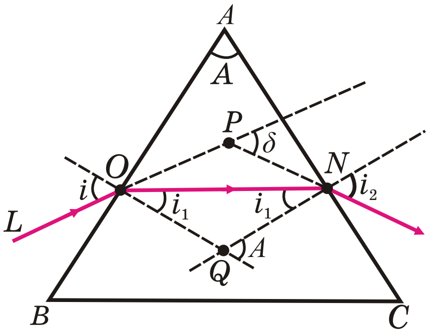
Telefon aragatnaşygy uly aralykda amala aşyrmaga niýetlenen optiki süýümli kabeller ABŞ-da, Ýaponiýada, Günbatar Ýewropada ýarym asyra golaý wagtdan bäri hyzmat edýär. Demirgazyk Amerika bilen Ýewropany şeýlede Aziýany birleşdirýän ummanaşa optiki süýümli kabelli aragatnaşyk ulgamy 1990-njy ýyldan bäri bökdençsiz işläp gelýär.

Süýüm optikasy lukmançylykda ulanylýan dürli abzallarda giňden peýdalanylýar. Adamyň içki organlaryna ýeňillik bilen aralaşyp bilýän optiki süýüm nähoşuň zeper ýeten bölegi baradaky maglumaty telekamera bermäge ýa-da göni gözegçilik etmäge mümkinçilik berýär. Tehnika babatda süýüm optikasy zawod-fabriklerdäki stanoklaryň we beýleki iş-enjamlarynyň işini sazlamakda we uzak aralykdan telewizor arkaly gözegçilik etmekde bahasyna ýetip bolmajak mümkinçilikler döredýär.

5.5. Ýagtylygyň üçgranly prizmadan geçişi

Optikada üç granly prizma dürli maksatlar üçin peýdalanylýar. Ýagtylyk şöhlesi prizma düşürilse onuň tekiz granlarynda serpikmä we döwülmä sezewar bolýar. Döwme görkezijisi n bolan üç gyranly prizmadan ýagtylyk şöhlesiniň geçişine seredeliň *(5.15-nji çyzgy)*.

Çyzgydaky ýaly prizma gönükdirlen L-ýagtylyk şöhlesi onuň AB we AC tekiz granlarynda döwülip, prizmanyň içinden geçýär. Ýagtylyk şöhlesiniň döwülýän granlarynyň arasyndaky burça ($\angle A$) prizmanyň döwüji burçy diýilýär. Prizmadan geçen ýagtylyk şöhlesi başlangyç ugurdan δ burça gyşarýar. Bu burça prizmanyň gyşartma burçy diýilýär. Prizmanyň gyşartma burçy ýagtylygyň düşme burçuna baglylykda üýtgeýär, ýöne prizmanyň gyşartma burçunyň kiçi ululygynyň kesgitli çägi bolýar. Beýle iň kiçi gyşarma ýagtylyk prizmadan simmetrik geçende ýüze çykýar. Deňýanly üçburçlygy emele getirýän prizmanyň içinde ýagtylyk şöhlesi prizmanyň esasyna parallel ýaýraýan bolsa, onda ol prizmadan simmetrik geçýär *(5.15-nji çyzgy)*



5.15-nji cyzgy

Bu ýagdaýda

$$i = i_2, \quad i_1 = i_1' \ . \tag{5.13}$$

Eger prizma howa gurşawda ýerleşen bolsa ($n_h \approx 1$) onda prizmanyň AB grany üçin ýagtylygyň döwülme kanuny

$$\frac{\sin\ i}{\sin\ i_1} = n \tag{5.14}$$

görnüşde bolar. δ burç OPN üçburçlugyň daşky burçudyr. Belli bolşy ýaly üçburçlugyň daşky burçy, onuň bilen ýanaşyk bolmadyk iki içki burçynyň jemine deňdir.

Diýmek:

$$\delta = (i - i_1) + (i_2 - i_1') \ . \tag{5.15}$$

OQ we NQ çyzyklar degişlilikde prizmanyň AB we AC granlaryna geçirilen normaldyr. Şoňa görä olaryň kesişmegi bilen emele gelen A burç prizmanyň döwüji burçuna deňdir. Bu ($\angle A$) burç OQN üçburçlugyň daşky burçudyr. Diýmek

$$A = i_1 + i_1' \ . \tag{5.16}$$

(5.15) deňligi $\delta = (i + i_2) - (i_1 + i'_1)$ görnüşde ýazyp, (5.13) we (5.16) deňlemelerden alarys: $\delta = 2i - A$. Bu ýerden

$$i = \frac{A + \delta}{2} \ . \tag{5.17}$$

(5.13) we (5.16) aňlatmalardan alarys:

$$A = 2\,i_1, \text{ we } i_1 = \frac{A}{2} \ . \tag{5.18}$$

Onda (5.14) aňlatmany aşakdaky ýaly ýazyp bileris:

$$n = \frac{\sin\dfrac{A + \delta}{2}}{\sin\dfrac{A}{2}} \ . \tag{5.19}$$

Eger δ burçuň ululygy (5.19) şerti kanagatlandyrýan bolsa, onda oňa iň kiçi gyşartma burç diýilýär. Prizmanyň döwüji burçy kiçi bolsa onuň gyşartma burçy hem kiçi bolýar. Bu ýagdaýda prizma pahna görnüşli prizma ýa-da ýöne pahna diýilýär. Pahna görnüşli prizmalar üçin $\sin\dfrac{A+\delta}{2} \approx \dfrac{A+\delta}{2}$ we $\sin\dfrac{A}{2} \approx \dfrac{A}{2}$ diýip hasap etmek mümkin.

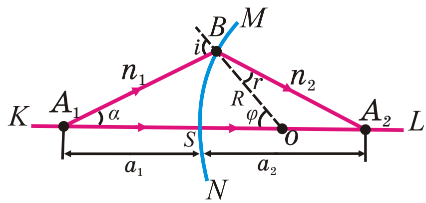
Onda pahnanyň ýagtylyk şöhlesini gyşartma burçy üçin aňlatma

$$\delta = (n - 1)\,A \tag{5.20}$$

görnüşe eýe bolar.

5.6. Sferik üstde ýagtylygyň döwülmesi

Döwme görkezijileri degişlilikde n_1 we n_2 gurşawlaryň araçäginden geçýän R radiusly MN sferik üstden ýagtylyk şöhlesiniň geçişine seredeliň *(5.16-njy çyzgy)*.



5.16-njy çyzgy

Sferanyň merkezi O nokatdan we sferanyň depesi S nokatdan geçýän KL göni çyzygy geçireliň. S depeden a_1 uzaklykda A_1 nokatda ýagtylanýan çeşme ýerleşen bolsun. A_1 nokatdan çykýan şöhle sferanyň B nokadyna düşüp, döwlenden soň KL gönüniň A_2 nokadyna düşýän bolsun. A_2 nokat sferanyň S depesinden a_2 aralykda ýerleşýär. A_2 nokat A_1 nokadyň şekili bolmagy üçin A_1 nokatdan çykýan şöhleleriň ählisi MN üstde döwlip A_2 nokada düşmelidir. Bu ýagdaýda A_1 nokatdan çykan şöhleleriň ählisiniň A_2 nokada çenli optiki ýollary özara deň bolýarlar. Muňa optiki ýollaryň deňlik düzgüni diýilýär.

KL göni çyzyga, berlen ulgamyň optiki oky diýilýär. Optiki okuň golaýynda $A_1B \approx A_1S$ şerti kanagatlandyrylýan şöhlelere **paraksial (**oka ýakyn**) şöhleler** diýilýär. Onda A_1 çeşmeden 2α burçuň çäginde ýaýraýan şöhleler A_2 nokatda kesişer, ýagny olar paraksialdyr. Diýmek: $A_1B \approx A_1S$, $A_2B \approx A_2S$,

$$A_1BO \text{ üçburçlykdan } \frac{A_1O}{A_1B} = \frac{\sin\left(180^\circ - i\right)}{\sin\varphi} = \frac{\sin i}{\sin\varphi},$$

$$A_2BO \text{ üçburçlykdan } \frac{A_2B}{A_2O} = \frac{\sin\left(180^\circ - \varphi\right)}{\sin r} = \frac{\sin\varphi}{\sin r}.$$

Alnan deňlikleri özara köpeldip alarys:

$$\frac{A_1O}{A_1B}\cdot\frac{A_2B}{A_2O}=\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{n_2}{n_1}. \qquad (5.21)$$

Ulgamyň optiki okunyň üstünde ýatan kesimler S nokatdan başlap ölçenilýär we şöhläniň ýaýraýan ugrunda kesimleri položitel, garşylykly ugurda bolsa otrisatel alamaty bilen almak kabul edilen. Diýmek

$$BA_1 \approx SA_1 = -a_1,$$

$$BA_2 \approx SA_2 = a_2,$$

$$BO = SO = R.$$

Onda
$$A_1O = -a_1 + R,$$

$$A_2O = a_2 - R.$$

Bu ululyklary (5.21)-de ornuna goýup alarys:

$$\frac{-a_1+R}{-a_1}\cdot\frac{a_2}{a_2-R}=\frac{n_2}{n_1}.$$

Bu ýerden $(-a_1)a_2\cdot n_1 + a_2Rn_1 = (-a_1)a_2\cdot n_2 + a_1Rn_2$.

Alnan aňlatmanyň ähli agzalaryny a_1a_2R ululyga bölüp, alarys:

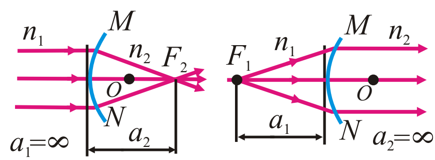
$$n_1\left(\frac{1}{a_1}-\frac{1}{R}\right)=n_2\left(\frac{1}{a_2}-\frac{1}{R}\right)=Q. \qquad (5.22)$$

(5.22) aňlatmadan görnüşi ýaly $n\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{R}\right)=Q$ ululyk sferik üstde ýagtylyk döwlende üýtgemän galýar. Bu Q ululyga Abbeniň **nolunjy inwarianty** diýilýär. Käbir maksatlar üçin (5.22) aňlatmany

$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_1 - n_2}{R} \qquad (5.23)$$

görnüşde ýazmak amatlydyr.

Bir nokatdan çykýan şöhlelere gomosentrik (umumy bir merkezi bolan) şöhleler diýilýär. (5.23) deňlik islendik paraksial ýagtylyk şöhleleri üçin adalatlydyr. Şeýlelikde A_1 nokatlanç çeşmeden çykýan paraksial gomosentrik ýagtylyk dessesiniň ähli şöhleleri, KL optiki oky şol bir A_2 nokatda kesip geçýärler. Şonuň üçin A_2 nokat A_1 nokadyň stigmatik (ýokary takyklykda A_1 nokada meňzeş) şekili bolup hyzmat edýär. Eger sferik üstüň egrilik radiusy $R>0$ bolsa, onda ol güberçek üst hasap edilýär.



5.17-nji çyzgy

Eger şekil we çeşme sferik üstüň garşylykly taraplarynda ýerleşýän bolsalar, onda $a_2>0$ bolýar. Beýle şekile hakyky şekil diýilýär. Eger şekil we çeşme sferik üstüň haýsy-da bolsa bir tarapynda ýerleşen bolsalar, onda $a_2<0$. Beýle şekile hyýaly şekil diýilýär, sebäbi sferik üstde döwlen şöhleler dargaýar, şekil bu şöhleleriň hyýaly kesişýän nokadynda emele gelýär.

(5.23) aňlatmadan peýdalanyp sferik üstüň fokusy kesgitlenilýär.

Goý, nokatlanç ýagtylyk çeşmesi sferik üstden tükeniksiz uzak aralykda ýerleşen bolsun, ýagny $a_1=\infty$ bolsun. Bu ýagdaýda ýagtylyk şöhleleri sferik üstüň optiki okuna parallel ýaýraýar diýip kabul etmek mümkin. Onda:

$$a_2 = \frac{n_2 R}{n_2 - n_1} = F_2 \, . \qquad (5.24)$$

ýagny sferik üstde döwlen şöhleler $a_2=F_2$ nokatda kesişýärler. Bu nokada sferik üstüň **fokusy** diýilýär (5.17-nji çyzgynyň çepdäkisi).

Eger şekil sferik üstden tükeniksiz uzaklykda emele gelýän bolsa, onda $a_2=\infty$ bolýar. Bu ýagdaýda sferik üstde döwlen şöhleler optiki oka parallel ýaýraýarlar (5.17-nji çyzgynyň sagdakysy). Onda

$$a_1=\frac{n_1 R}{n_1-n_2}=F_1. \tag{5.25}$$

Diýmek, nokatlanç ýagtylyk çeşmesi $a_1=F_1$ nokatda ýerleşende sferada döwlenden soň parallel ýaýraýanlygy sebäpli F_1 nokat onuň fokusydyr. Şeýlelikde, sferik üstüň iki fokusy bolup, F_1-e öňki fokus F_2-ä yzdaky fokus diýilýär. Sferik üstden fokus nokada çenli aralyga **fokus aralyk** diýilýär.

Sferik üst döwme görkezijileri degişlilikde n_1 we n_2 bolan gurşawlaryň araçäginde ýerleşendigine görä $n_1\neq n_2$ bolsa $F_1\neq F_2$ bolýar. Eger $n_1=-n_2$ bolsa, ýagny sferik üst aýna (zerkalo) diýsek (5.23) aňlatma aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a_2}=\frac{2}{R}. \tag{5.26}$$

Şu ýerden görnüşi ýaly sferik aýnanyň (zerkalonyň) fokus aralygy:

$$F=\frac{R}{2}. \tag{5.27}$$

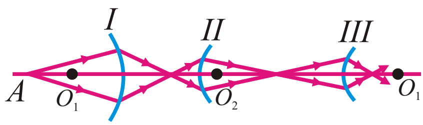
$n_1=-n_2$ diýlip alynmagynyň sebäbi, aýnadan ýagtylygyň doly serpigýänligi üçindir. Eger (5.26) aňlatmada $R=\infty$ diýip kabul etsek, onda

$$a_1 = -a_2 . \qquad (5.28)$$

Ýagny predmet tekiz aýnadan näçe uzaklykda ýerleşen bolsa, şekil hem aýnadan şonça aralykda ýerleşýär diýmekdir.

5.7. Ýuka linzalar. Linzanyň deňlemesi

Adaty optiki ulgamlar, iki ýa-da ondan köp ýagtylygy döwüji üstlerden ybarat bolýar.

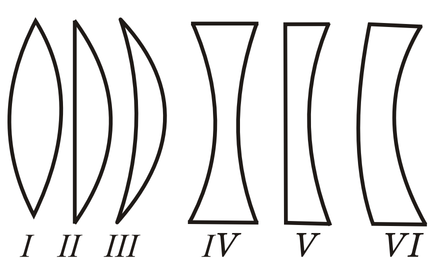


5.18-nji çyzgy

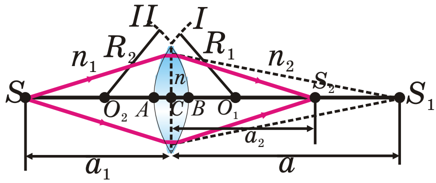
Eger optiki ulgama girýän sferik üstleriň ählisiniň merkezleri bir gönüde ýatýan bolsalar, onda beýle optiki ulgama merkezleşdirilen diýilýär *(5.18-nji çyzgy)* .

Optiki ulgamdaky sferik üstleriň merkezlerinden geçýän göni çyzyga **baş optiki ok** diýilýär. Merkezleşdirilen optiki ulgam, paraksial dessäniň gomosentrikligini saklamak häsiýetine eýedir. Ýagny, bu ulgamda döwüji (ýa-da serpikdiriji) üstleriň sanyna garamazdan gomosentrik paraksial desse gomosentrik bolup galýar.

Has ýönekeý merkezleşdirilen optiki ulgama mysal hökmünde linzany görkezmek bolar. Linza – iki sany üst bilen çäklenen, dury maddadan (köplenç aýnadan) ybaratdyr. Onuň çäklenýän üstleriniň biri hökman sferik bolup beýlekisi sferik ýa-da tekiz bolup biler. Çäklenen üstleriň görnüşi boýunça linzalar goşagüberçek, tekizgüberçek, goşaoýuk, tekizoýuk, oýukgüberçek bolup bilýärler *(5.19-njy çyzgy)*.



5.19-njy çyzgy



5.20-nji çyzgy

Eger linzanyň maddasynyň döwme görkezijisi onuň ýerleşen gurşawynyň döwme görkezijisinden uly bolsa, onda I, II, III linzalara ýygnaýjy linzalar, IV, V, VI linzalara dargadyjy linzalar diýilýär. Eger tersine bolsa, onda I, II, III linzalara dargadyjy linzalar, IV, V, VI linzalara ýygnaýjy linzalar diýilýär.

Goşagüberçek linzalardan ýagtylyk şöhlesiniň geçişine seredeliň *(5.20-nji çyzgy)* Eger linzanyň galyňlygy (*AB*), ony çäklendirýän sferik üstleriniň egrilik radiuslaryndan has kiçi bolsa, onda beýle linza ýuka linza diýilýär. Ýuka linzalarda *A* we *B* depeler *C* merkez bilen gabat gelýär diýip hasap edilýär. Linzanyň optiki merkezinden (*C*) geçýän islendik göni çyzyga **optiki ok** diýilýär. Diýmek linzanyň optiki oklarynyň sany tükeniksiz bolup, baş optiki oky ýekedir.

Goý, döwme görkezijisi n bolan linza döwme görkezijileri degişlilikde n_1 we n_2 bolan gurşawlaryň araçäginde ýerleşen bolsun *(5.20-nji çyzgy)*.

Linzanyň baş optiki okunda ýerleşen nokatlanç ýagtylyk çeşmesiniň şekiliniň alnyşyna seredeliň. Onuň üçin ilki R_1 radiusly sferanyň kömegi bilen şekili gurmaly. Bu ýagdaýda sferadan çep tarapda n_1 döwme görkezijili gurşaw ýerleşer we (5.23) şerte laýyklykda, alarys:

$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n}{a} = \frac{n_1 - n}{R} \quad . \tag{5.29}$$

S nokatlanç ýagtylgyjyň şekili S_1 nokat bolar. S_1 nokat R_2 radiusly sfera üçin hyýaly nokatlanç ýagtylgyç bolup hyzmat edýär. R_2 radiusly sferanyň kömegi bilen S_1 ýagtylgyjyň şekili S_2 nokatda bolar. Bu ýagdaýda R_2 radiusly sferanyň çep tarapynda döwme görkezijisi n bolan gurşaw, sag tarapynda döwme görkezijisi n_2 bolan gurşaw ýerleşer. Onda (5.23) şerte laýyklykda, alarys:

$$\frac{n}{a}-\frac{n_2}{a_2}=\frac{n-n_2}{R_2} \quad . \tag{5.30}$$

Adaty şertlerde linzanyň iki üsti hem şol bir gurşawda ýerleşýär, onda $n_1=n_2$ diýip, (5,29) we (5.30) deňlemeleri goşup alarys:

$$n_1\left(\frac{1}{a_2}-\frac{1}{a_1}\right)=(n-n_1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

ýa-da

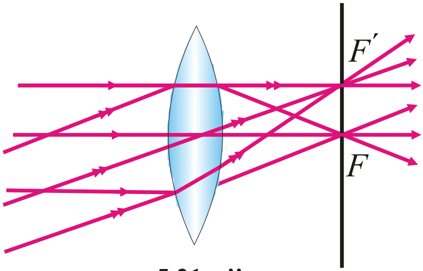
$$\frac{1}{a_2}-\frac{1}{a_1}=\left(\frac{n}{n_1}-1\right)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right).$$

Bu ýerde $\frac{n}{n_1}=N$ linzanyň gurşawa görä döwme görkezijisini aňladýar.

Onda

$$\frac{1}{a_2}-\frac{1}{a_1}=(N-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right). \tag{5.31}$$

Bu alnan deňlemä ýuka linzanyň deňlemesi diýilýär. Bu aňlatma islendik görnüşli yuka linzalar üçin hem dogrudyr. Öň kabul edişimiz ýaly ölçemeler linzanyň merkezinde ölçenilip, ýagtylygyň ýaýraýan ugruna položitel, ýagtylygyň ýaýraýan ugruna garşylykly ugurlarda bolsa otrisatel hasap edilýär.



5.21-nji çyzgy

Baş optiki okda ýerleşen ýagtylanýan S nokat linzadan daşlaşdyrylsa onuň şekili S_2 nokat linza ýakynlaşýar. S ýagtylgyç tükeniksizlige çenli daşlaşdyrylanda onuň şekiliniň emele gelýän nokadyna linzanyň fokusy diýilýär. Fokus nokatdan linzanyň baş optiki okuna perpendikulýar geçýän tekizlige linzanyň **fokal tekizligi** diýilýär.

Eger parallel şöhleler baş optiki ok bilen käbir burç emele getirip, linzanyň üstüne düşse onda olar hem fokal tekizlikde bir nokatda kesişerler *(5.21-nji çyzgyda F′ nokat)*.

(5.31) aňlatmadan yuka linzanyň fokus aralyklary üçin aňlatmalary alarys: $a_1 = \infty$ bolanda

$$a_2 = F_2 = \frac{1}{(N-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}, \qquad (5.32)$$

$a_2 = \infty$ bolanda

$$a_1 = F_1 = -\frac{1}{(N-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}, \qquad (5.33)$$

ýagny

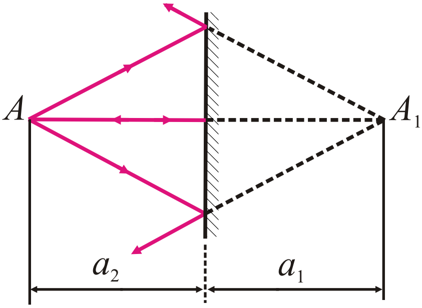
$$F_1 = -F_2. \qquad (5.34)$$

F_1 ululyga linzanyň birinji fokusy, F_2 ululyga bolsa lin-zanyň ikinji fokusy diýilýär. Ýuka linzalarda birinji we ikinji fokuslar ululyklary boýunça deň we alamat-lary boýunça garşylyklydyrlar. Başgaça aýdanymyzda fokuslar linzanyň garşylykly taraplarynda ýerleşýär-ler. R_1 we R_2 hem-de (N-1) ululyklaryň alamatyna baglylykda F_1-iň we F_2-iň alamatlary položitel ýa-da otrisatel bolup bilýär. Eger fokusyň alamaty položitel bolsa hakyky, otrisatel bolsa hyýaly fokus diýilýär. Eger linzanyň fokusy hakyky bolsa, onda linza düşýän parallel şöhleler linzada döwlenden soň bir nokatda kesişýärler (ýygnanýarlar). Beýle linzalara **ýygnaýjy** ýa-da **položitel** linzalar diýilýär. Eger fokus hyýaly bolsa, onda parallel şöhleler linzada döwlenden soň ke-sişmeýärler (dargaýarlar). Beýle linzalara **dargadyjy** ýa-da **otrisatel** linzalar diýilýär. Ýuka linzalaryň fo-kus aralygy üçin alnan 5.32 we 5.33 aňlatmalardan peýdalanyp, 5.31 aňlatmany aşakdaky ýaly ýazyp bileris:

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{F}. \tag{5.35}$$

5.8. Aýnalarda we linzalarda şekil gurmak

Aýnada şekil gurmak üçin ýagtylygyň serpikme kanuny ýeterlikdir. Predmetiň şekilini gurmak üçin ilki nokadyň şekilini gurmaly. Sebäbi islendik jisime nokatlar ulgamy hökmünde seretmek mümkin. Aýnada nokadyň şekili, şol nokatdan ýaýraýan şöhleleriň aýnadan serpigenden soň olaryň kesişmegi ýa-da hyýaly kesişmesi bilen emele gelýär. Eger şöhleler aýnada serpigip, soňra kesişmesi bilen şekil emele gelse, onda

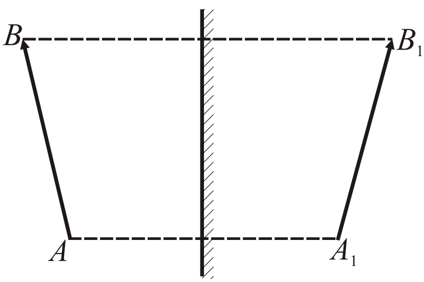


5.22-nji çyzgy

hakyky şekil alynýar. Eger şöhleler aýnada serpigip olaryň hyýaly kesişmesi bilen şekil emele gelse, onda hyýaly şekil alynýar. Çyzgyny sadalaşdyrmak üçin nokadyň şekili gurlanda, diňe iki ýa-da üç şöhle peýdalanylýar.

Tekiz aýna düşýän şöhleler serpigip hyýaly kesişýärler *(5.22-nji çyzgy)*.

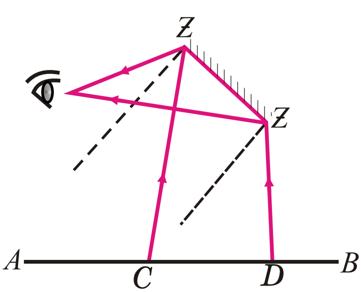
Çyzgydan görnüşi ýaly A nokadyň tekiz aýnadaky A_1 şekili hyýalydyr. Tekiz aýnada aýnadan nokadyň şekiline çenli aralyk a_2 elmydama nokatdan aýna çenli a_1 aralyga deňdir. Şu düzgüniň esasynda gurlan AB gönüniň şekili A_1B_1 göni *(5.23-nji çyzgy)*.



5.23-nji çyzgy

Tekiz aýnada alynýan şekiliň ululygy elmydama predmetiň ululygyna deň bolýar. Şekiliň ululygynyň predmetiň hakyky ululygyna gatnaşygyna **ulaldyş** diýilýär. Tekiz aýnanyň ulaldyşy bire deňdir.

Tekiz aýnada şekil gurmak bilen baglanyşykly aşakdaky ýaly mysala seredeliň. Kesgitli ölçegleri bolan we erkin ýerleşen aýnada, käbir predmetiň gözegçä görünýän böleginiň çägini kesgitlemek gerek bolsun.



5.24-nji çyzgy

Goý käbir *AB* ölçegli predmete *ZZ* tekiz aýna arkaly syn edilýän bolsun *(5.24-nji çyzgy)*.

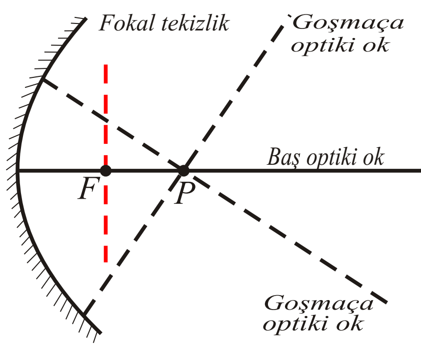
AB predmetiň ähli nokatlaryndan aýnanyň üstüne şöhleler düşmegi mümkin, ýöne ol şöhleleriň aýnadan serpigip gözegçiniň gözüne düşýänleri predmetiň käbir bölegini görkezip biler. Predmetiň gözegçä görünýän böleginiň çäklerini kesgitlemek üçin ilki *ZZ* aýnanyň iň çetki nokatlaryndan gözegçiniň gözüne şöhle düşürmeli. *(5.24-nji çyzgydaky ýaly)*. Soňra serpikme kanunynyň esasynda ol şöhleleriň predmetiň haýsy nokatlaryna düşjekdigini kesgitlemeli.

Çyzgydan görnüşi ýaly *AB* predmetiň görünýän bölegi *CD*-e deňdir. Bu ululyk gözegçi bilen aýnanyň we predmet bilen aýnanyň aradaşlygyna baglydyr.

Sferik aýnalarda şekiliň guralyşyna seretmek üçin käbir düşünjeleri girizeliň.

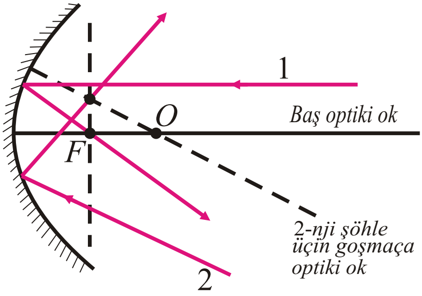
Sferik aýnanyň ortasyndaky nokatdan we egrilik merkezinden geçýän göni çyzyga **baş optiki ok** diýilýär; baş optiki oka parallel şöhleleriň sferik aýnadan serpigenden soň kesişýän nokadyna **baş fokus** diýilýär; baş optiki oka perpendikulýar we baş fokus nokadyň üstünden geçýän tekizlige **fokal tekizlik** diýilýär.

Sferik aýnada hem, linzalarda bolşy ýaly, baş optiki ok bir sanydyr, goşmaça optiki oklar köpdür *(5.25-nji çyzgy)*.



5.25-nji çyzgy

Sferik aýnalarda baş optiki oka parallel şöhleler serpigenden soň baş optiki ok bilen baş fokus-



5.26-njy çyzgy

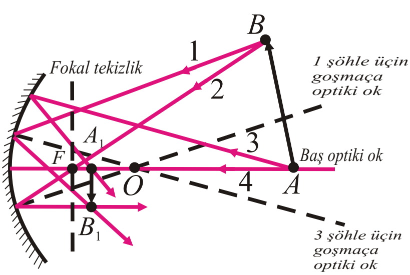
da kesişýärler; baş optiki oka parallel bolmadyk şöhleler serpigenden soň düşýän şöhlelere parallel bolan goşmaça optiki ok bilen fokal tekizlikde kesişýärler *(5.26-njy çyzgy)*.

Bu kesişme nokat goşmaça fokusdyr. Sferik aýnalaryň ähli goşmaça fokuslary fokal tekizlikde ýerleşýärler.

Oýuk sferik aýnada *AB* gönüniň şekiliniň alnyşyna seredeliň. *(5.27-nji çyzgy)*.

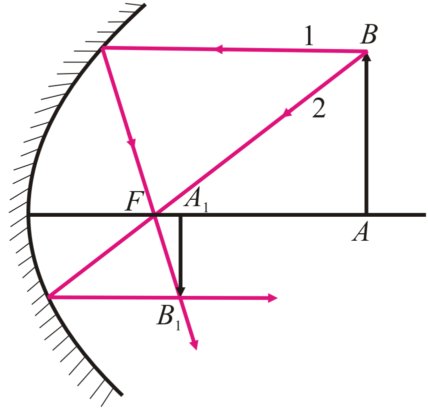
Göni çyzygyň şekilini gurmak üçin onuň iki nokadynyň şekilini gurup, soňra ol iki nokady göni arkaly birleşdirmeli. Ilki *B* nokadyň şekilini guralyň. Onuň üçin *B* nokatdan oýuk aýna iki sany şöhle (1 we 2) düşürilýär. Şöhle 2 baş fokusdan geçýändigine görä aýnadan serpigenden soň baş optiki oka parallel ugurda ýaýraýar. Şöhle 1 aýnadan serpigenden soň goşmaça optiki ok bilen fokal tekizlikde kesişip, şöhle 2 bilen B_1 nokatda kesişýär.

A nokadyň şekilini gurmak üçin hem *A* nokatdan iki sany şöhläni (3 we 4) aýna düşürmeli. Şöhle 4 baş optiki okuň ugry bilen ýaýrap, aýnadan serpigenden soň şol ýol bilen yzyna ýaýraýar. Şöhle 3 bolsa aýnadan serpigenden soň şöhle 4 bilen A_1 nokatda kesişýär. A_1 we B_1 nokatlary birleşdirip *AB* gönüniň A_1B_1 şekilini alarys.



5.27-nji çyzgy

Goý bir ujy (*A* nokat) sferik aýnanyň baş optiki okunda ýerleşen predmetiň (*AB*) şekilini gurmak talap edilýän bolsun *(5.28-nji çyzgy)*.

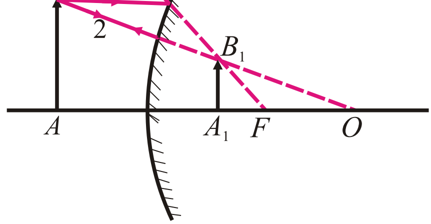


5.28-nji çyzgy

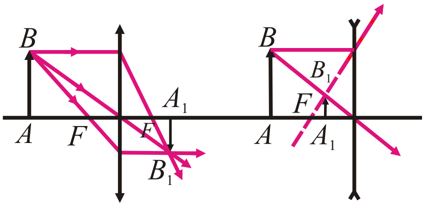
B nokadyň şekilini gurmak üçin *B* nokatdan iki sany şöhläni aýna gönükdirmeli. Şöhle 1 baş fokusa parallel, ol aýnadan serpigenden soň baş fokusyň üstünden geçýär; şöhle 2 bolsa baş fokusyň üstünden geçýär, aýnadan serpigenden soň öňki ýoly bilen tersine ýaýraýar. Şeýlelikde şöhle 1 we 2 B_1 nokatda kesişip, *B* nokadyň şekilini emele getirýär. B_1 nokatdan baş optiki oka perpendikulýar geçirip, onuň baş optiki ok bilen kesişýän nokadynda *A* nokadyň şekili A_1 nokady alarys. Netijede *AB* predmetiň A_1B_1 şekili alynýar.

Güberçek aýnalarda hem şekil gurmagyň düzgüni oýuk aýnalaryňky ýaly. Ýöne bu ýagdaýda aýnadan serpigen şöhleleriň hyýaly kesişmesi arkaly şekil alynýar.

Güberçek sferik aýnada *AB* predmetiň şekilini almak üçin ilki predmetiň *B* nokadynyň şekilini iki şöhläni (1 we 2) aýna gönükdirip almaly. Şöhle 1 baş optiki oka parallel, şonuň üçin ol baş fokus bilen hyýaly kesişýär.



5.29-njy çyzgy



5.30-njy çyzgy

Şöhle 2 bolsa goşmaça optiki oka parallel ugurda ýaýraýar. Şeýlelikde 1 we 2 şöhleler B_1 nokatda hyýaly kesişýärler hem-de B nokadyň hyýaly şekilini emele getirýärler. B_1 nokatdan baş optiki oka perpendikulýar göni geçirip, olaryň kesişýän nokadynda A nokadyň şekili A_1 nokat alynýar. Ýokarda getirilen mysallardan görnüşi ýaly, oýuk aýnada hakyky, güberçek aýnada bolsa hyýaly şekil alynýar.

Linzanyň kömeginde şekiliň alnyşy sferik aýnadaka meňzeş bolýar. Sebäbi linzalarda-da baş optiki ok, goşmaça optiki oklar, baş fokus, fokal tekizlik diýilýän häsiýetlendiriji ululyklar bar.

Linzalary aýnalardan tapawutlandyrýan häsiýeti şöhläniň linzadan geçýänligidir.

Linzalarda hem şekil gurmak üçin 2 ýa-da 3 şöhle peýdalanylýar.

Goşagüberçek (ýygnaýjy) linzalaryň baş optiki okuna parallel şöhleler düşürlende olar linzada döwlüp, baş fokus nokatdan geçýärler. Linzanyň optiki merkezinden geçýän şöhleler öz ugruny üýtgetmeýär. Baş fokusdan geçip, linza düşýän şöhleler döwlüp baş optiki oka parallel ýaýraýarlar.

Ýygnaýjy we dargadyjy linzalarda şekiliň alnyşynyň mysaly 5.30-njy çyzgyda görkezilen.

5.9. Linzalaryň aberrasiýasy

Linzanyň aňlatmasy çykarylanda we linzanyň kömeginde şekil gurlanda, bir nokatdan çykýan ýagtylyk dessesi linzada döwlenden soň, bir nokatda ýygnanýar diýen düşünjeden ugur alyndy. Bu ýagdaý diňe aşakdaky şertler ýerine ýetende bolup bilýär:

1) ýagtylyk linza paraksial (inçe) desse görnüşinde düşende;

2) ýagtylyk şöhleleri linzanyň baş optiki oky bilen kiçi burç emele getirýän ýagdaýynda;

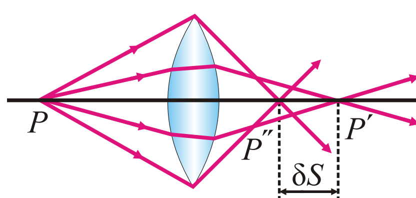
3) linzanyň döwme görkezijisi ähli ýagtylyk tolkunlary üçin birdeň bolanda.

Bu şertler amalýetde doly ýerine ýetmeýär. Linzanyň döwme görkezijisi dürli reňkli ýagtylyk üçin dürli bolýar (dispersiýa), linzanyň ýagtylyk güýjüni ulaltmak üçin giň şöhle dessesinden peýdalanmaly bolýar. Bu bolsa linzanyň kömeginde alynýan şekiliň ýoýulmagyna getirýär we linzanyň aberrasiýasyny ýüze çykarýar. Linzanyň aberrasiýasynyň dürli görnüşleri tapawutlanýar, olara aýratynlykda seretmek maksadalaýykdyr.

1. Sferik aberrasiýa

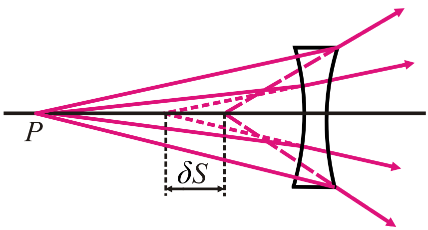
Eger P nokatlanç ýagtylyk çeşmesinden çykýan şöhleler ýygnaýjy linza giň desse görnüşde düşýän bolsa *(5.31-nji çyzgy)*, onda döwlen şöhleler linzadan dürli aralykda baş optiki ok bilen kesişýärler. Baş optiki oka ýakyn ýerleşen şöhleler linzadan uzagrakda (P' nokat), baş optiki okdan uzak aralykda ýerleşen şöhleler linza ýakynrak aralykda kesişýärler (P'' nokat).

Şeýlelikde, ekran P' nokatda ýerleşdirilse-de, P'' nokatda ýerleşdirilse-de P nokadyň şekili käbir dia-



5.31-nji çyzgy

metrli ýagty menek görnüşde alynýar. Bu bolsa linzanyň kömeginde alnan şekiliň ýoýulýandygyny görkezýär. Linzanyň şekili ýoýmasynyň bu görnüşine **sferik aberrasiýa** diýilýär. $\delta S = P'' - P'$ aralyk sferik aberrasiýanyň



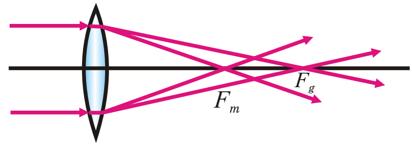
5.32-nji çyzgy

ululygyny kesgitleýär. Bu ululyk ýygnaýjy linza üçin otrisatel **(δS<0)**, dargadyjy linza üçin položitel **(δS>0)** hasap edilýär *(5.32-nji çyzgy)*.

Ýygnaýjy we dargadyjy linzalaryň sferik aberrasiýalarynyň garşylykly alamatly bolmaklary bu linzalary utgaşdyryp ýerleşdirmek bilen sferik aberrasiýany ýok etmäge mümkinçilik berýär. Şeýlelikde, sferik aberrasiýanyň bolmazlygyny gazanmak üçin: paraksial şöhle dessesini peýdalanmaly; ýa-da ýygnaýjy we dargadyjy linzalary utgaşdyryp ýerleşdirmek usulyndan peýdalanmaly.

2. Hromatik aberrasiýa

Bilşimiz ýaly, linzanyň fokus aralygy $F = -\dfrac{1}{(n-1)\left(\dfrac{1}{R_1} - \dfrac{1}{R_2}\right)}$ aňlatma arkaly kesgitlenilýär. Bu ýerde n linzanyň döwme görkezijisi bolup, ol ýagtylygyň reňkine (tolkun uzynlygyna) baglydyr. Başgaça aýdanymyzda dürli reňkli ýagtylyk üçin döwme görkezijisi dürlüdir we şoňa laýyklykda linzanyň fokus aralygy (*F*) dürlüdir. Eger melewşe ýagtylyk üçin döwme görkezijini n_m, gyzyl ýagtylyk üçin n_g diýip bellesek, onda $n_m > n_g$ bolmagyna görä $F_m < F_g$ bolar. *(5.33-nji çyzgy)*.



5.33-nji çyzgy

Eger linza «ak» ýagtylyk düşýän bolsa, onda linzadan döwlüp geçen melewşe şöhleler linza ýakynrak aralykda ($F_m$nokat), gyzyl şöhleler linzadan uzagrak aralykda (F_g nokat) ýygnanýarlar.

Netijede, F_m nokatda ekran ýerleşdirilse, ortasynda melewşe, onuň daşynda dürli reňkli halkalar alynýar. Iň daşky halkanyň reňki gyzyldyr. Beýle hadysa *hromatik* (hromos-reňk) *aberrasiýa* diýilýär. Linzanyň beýle kemçiligini ýok etmek üçin monohromatik ýagtylyk peýdalanylýar ýa-da ýygnaýjy we dargadyjy linzalar utgaşdyrylyp ýerleşdirmek usuly peýdalanylýar. Hromatik aberrasiýasy ýok edilen linza *ahromatik linza* diýilýär.

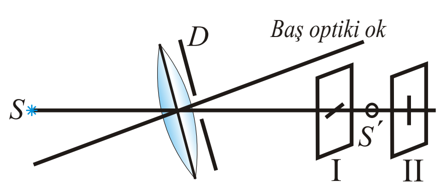
3. Astigmatizm

Eger linzanyň üstüne onuň baş optiki oky bilen käbir burç emele getirýän şöhleler düşürilse, onda nokadyň stigmatik şekili alynmaýar, ýagny ýagtylanýan nokadyň şekili nokat görnüşinde bolmaýar. Linzalaryň beýle kemçiligine *astigmatizm* diýilýär. Astigmatizme aşakdaky mysalda gözegçilik etmek bolar *(5.34-nji çyzgy)*.

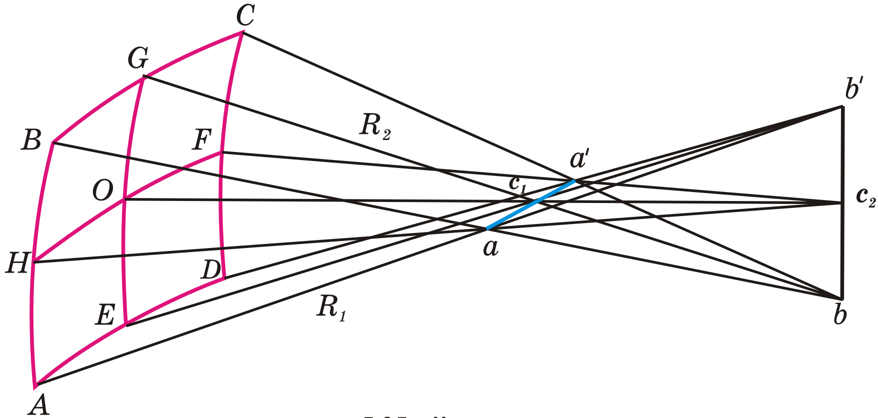
Goý, linza SS' şöhle linzanyň baş optiki oky bilen $(30–40)^o$ burç emele getirer ýaly düşürilýän bolsun.

Linzadan geçen şöhleleriň inçe dessesi *D* germawyň (diafragmanyň) kömegi arkaly alynýar.

SS' şöhlä (oka) perpendikulýar süýşýän ekran



5.34-nji çyzgy



5.35-nji çyzgy

ýerleşdirilýär. Ekrany linza görä şüýşürip, iki ýagdaýda anyk şekil (I we II) almak bolar. Ol şekiller: I ýagdaýda kese ýagty çyzyk, II ýagdaýda dik ýagty çyzyk görnüşinde bolýar. Ekran I we II ýagdaýlaryň ortasynda ýerleşdirilende S' tegelek ýagty menek alynýar. Beýle şekilleriň ýüze çykmagynyň sebäbi aşakdaky ýaly düşündirilýär:

Eger ýagtylyk fronty linzanyň üstüne gyşyk düşse, ýagny 5.34-nji çyzgydaky ýaly, onda linzadan döwlüp geçen ýagtylyk frontunyň dürli bölekleriniň egrilik radiusy birmeňzeş bolmaýar.

Goý, belli bir R radiusly $ABCD$ sferik ýagtylyk fronty, linzadan geçende onuň kese we dik ugurlar boýunça egrilik radiusy üýtgeýän bolsun *(5.35-nji çyzgy)*.

Tolkun frontunyň özara perpendikulýar HOF we FOG kesiklerine seredeliň.

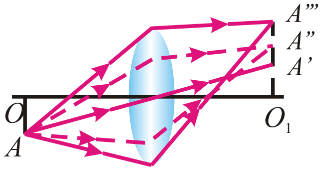
Goý, EOG kesige R_1 egrilik radiusy, HOF kesige R_2 egrilik radiusy degişli bolsun. R_1 radiusly tolkun frontunyň E,O,G nokatlaryna inderilen perpendikulýar çyzyklar egriniň merkezi bolan C_1 nokatda kesişýärler, R_2 radiusly tolkun frontunyň *H,O,F* nokatlaryna inderilen perpendikulýar çyzyklar egriniň merkezi bolan C_2 nokatda kesişýärler. *EOG* egrä parallel bolan *AHB* we *DFC* egriler R_1 radiusly üste degişlidirler, şoňa görä *A,H,B* nokatlara inderilen perpendikulýar çyzyklar *a* nokatda, *D,F,C* nokatlara inderilen perpendikulýar çyzyklar *a′* nokatda kesişýärler. *HOF* egrä parallel bolan *AED* we *BGC* egriler R_2 radiusly üste degişlidirler. Şoňa görä, *A,E,D* nokatlara inderilen perpendikulýar çyzyklar *b′* nokatda, *B,G,C* nokatlara inderilen perpendikulýar çyzyklar *b* nokatda kesişýärler. *aa′* we *bb′* gönüler özara perpendikulýardyr.

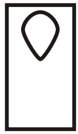
Nokadyň şekiliniň özara perpendikulýar iki sany ýagty çyzyk görnüşde emele gelmegine *astigmatik şekil* diýilýär. *aa′* we *bb′* nokatlarynyň aralygyna *astigmatik tapawut* diýilýär.

Astigmatizmi ýok etmek üçin döwüji üstleriň dürli bölekleriniň egrilik radiusyny üýtgetmek ýaly çylşyrymly usullar peýdalanylýar. Astigmatizmi ýok edilen optiki ulgama *anastigmat ulgam* diýilýär.

4. Koma

Ýagtylyk şöhleleri linzanyň baş optiki oky bilen käbir burçy emele getirip, linzanyň üstüne düşende, *koma* diýlip atlandyrylýan aberrasiýa ýüze çykýar. Linzanyň baş optiki okunyň üstünde ýatmaýan nokatlanç ýagtylyk çeşmesinden şöhleler giň desse görnüşinde linzanyň üstüne düşse, linzanyň fokal tekizliginde ýerleşen ekranda ýagty nokat alynman, süýndü-





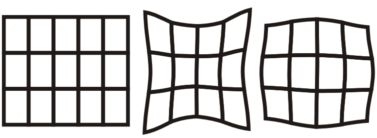
5.36-njy çyzgy

rilen simmetrik bolmadyk ýagty menek alynýar. Bu menek, görnüşi boýunça kometa (guýrukly ýyldyz) meňzeş bolýanlygy sebäpli, oňa ***koma*** diýilýär.

Aberrasiýanyň koma görnüşiniň alnyşy we onuň hususy görnüşi 5.36-njy çyzgyda şekillendirilen.

Koma görnüşli aberrasiýa ýygnaýjy we dargadyjy linzalary utgaşdyryp ýerleşdirmek bilen ýok edilýär.

5. Distorsiýa



5.37-nji çyzgy

Aberrasiýanyň bu görnüşi görüş meýdanynyň çäginde ulaldyşyň hemişelik bolmazlygy sebäpli ýüze çykýar.

Beýle aberrasiýanyň netijesinde, gönüburçly öýjüklere linza arkaly syn edilende göni çyzyklar gyşyk görnüp, öýjükleriň görnüşiniň üýtgemesi ýüze çykýar. Distorsiýa sebäpli şekiliň ýoýulmasy 5.37-nji çyzgyda görkesilen.

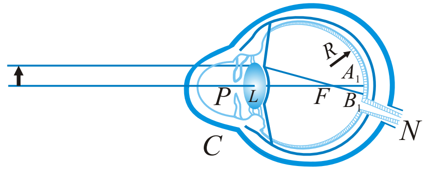
Distorsiýany ýok etmek üçin hem dürli dury maddalardan ýasalan ýygnaýjy we dargadyjy linzalary utgaşdyrmak usuly peýdalanylýar.

5.10. Göz optiki ulgam hökmünde

Görünme, gözüň duýujy elementlerinde ýagtylyk energiýasynyň himiki energiýa öwrülmegi bilen baglanyşyklydyr.

Adamyň gözi diametri ortaça 2,5 **sm** bolan, sfera görnüşe eýedir. Adam gözüniň kese-kesigi 5.38-nji çyzgyda şekillendirilen görnüşdedir.

Gözüň öňündäki böleginde göz perdesi (*C*) ýerleşýär. Perde bilen hrustaljygyň (*L*) arasynda suwuklyk bolýar. Hrustaljyk goşagüberçek linza görnüşindäki dury maddadyr.



5.38-nji çyzgy

Göz myşsalarynyň täsiri arkaly hrustaljygyň üstleriniň egrilik radiusy we onuň bilen baglanyşyklykda fokus aralygy üýtgedilýär. Bu bolsa ýakyndaky we uzakdaky zatlary anyk görmekligi üpjün edýär. Hrustaljygyň yzynda aýna şekilli goýy dury suwuklyk bolýar. Hrustaljygyň öňündäki suwuklyk, hrustaljyk we dury aýna şekilli suwuklyk gözüň optiki ulgamy bolup hyzmat edýär. Gözüň fokusy (*F*) dury aýna şekilli maddanyň içinde ýerleşýär.

Hrustaljygyň edil öňünde ortasy deşikli reňkli ýorka ýerleşýär. Bu deşige *göreç* ýa-da *gözüň garasy* diýilýär. Ýagtylandyrylyşa baglylykda görejiň ölçegleri üýtgeýär: ýagtylandyryş uly bolsa göreç kiçelýär we tersine.

Gözüň töründe torjumak (setçatka) örtük ýerleşýär. Torjumak örtükde ýagtylygy duýujy nerwler bar. Görünýän zadyň (*AB*) şekili A_1B_1 torjumak örtügiň üstünde emele gelýär. Görüş nerwleri (*N*) kelle beýnisi bilen göni biriýär. Ýagtylygy duýujy nerwler iki görnüşde bolýarlar. Olar taýajyklar we küýzejikler diýlip atlandyrylyp, mukdary hem-de ýagtylygy duýujylygy bilen biri-birinden tapawutlanýarlar.

Küýzejikleriň sany $7 \cdot 10^5$ çemesi, taýajyklaryň sany $133 \cdot 10^6$-e çenli bolýar. Taýajyklar ýagtylyga has duýgur bolup, reňkleri tapawutlandyryp bilmeýärler. Küýzejikleriň ýagtylygy duýuşy taýajyklaryňkydan gowşak bolup, reňkleri gowy tapawutlandyrýarlar. Şu sebäpli, görüş iňrik garalan wagty we gije taýajyklar arkaly amala aşyrylýar, ähli zatlar bir reňkde görünýär.

Küýzejikleriň duýgurlygy gowşak bolan göz reňki saýgaryp bilmeýär. Beýle gözli adama *daltonik* diýilýär.

Ýagtylandyryşy kadaly ýerden, dessine has gowşak ýagtylandyryşly ýere geçende göz bir bada görmeýär, sebäbi göreç kiçi bolýar we az mukdardaky ýagtylandyryş görüş duýgusyny döredip bilmeýär. Garaňkyda göreç ýuwaş-ýuwaşdan ulalýar (garaňka uýgunlaşýar) we göz görmek ukybyna eýe bolýar. Edil şonuň ýaly garaňkydan dessine güýçli ýagta çykan adamyň gözi gamaşýar. Sebäbi garaňka uýgunlaşan gözüň göreji uly bolup, ýagta çykanda ondan geçýän ýagtylygyň mukdary has köp bolýar we görüş nerwlerini gyjyndyrýar. Biraz wagtdan göreç kiçelýär we adam ýagta uýgunlaşýar. Gözüň dürli ululykdaky ýagtylandyryşlara uýgunlaşmasyna *adaptasiýa* diýilýär.

Uzakdaky zatlary görende göz ýadamaýar. Sebäbi hrustaljygyň egrilik radiusyny üýtgedýän myşsalar erkin ýagdaýda bolýar. Göze ýakyn ýerleşen zatlar görlende, göz myşsalary dartgynly ýagdaýda bolup, hrustaljygyň egrilik radiusyny ulaldyp saklaýar. Şonuň üçin hem göz ýadaýar.

Kadaly gözüň ýakyndan görmek aralygy ýaş aýratynlygyna baglylykda dürli bolýar. 20 ýaşa çenli görmek aralygy 10 *sm* töwereginde, 40 ýaşa çenli 22 *sm* töwerekleri bolýar. Kadaly göz üçin ýakyndan görmek aralygy ortaça 25 *sm* hasap edilýär. Ýaşyň ulalmagy bilen ýakyndan görmek aralygy hem artýar. Kadaly gözde 25 *sm*-den başlap islendik uzaklykdaky zatlaryň anyk şekili torjumak örtügiň üstünde emele gelýär. Kemçilikli gözde uzakdaky ýa-da ýakyndaky zatlaryň anyk şekili torjumak örtügiň üstünde emele gelmeýär. Beýle ýagdaýda zatlar aýdyň görünmeýär. Bu kemçilik äýnegiň kömegi bilen düzedilýär.

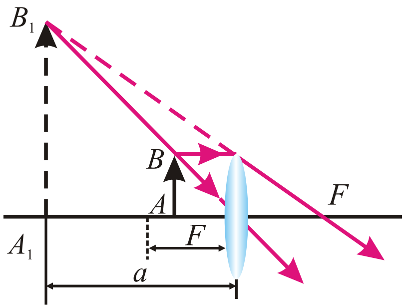
Görüş duýgusy göze ýagtylyk düşen badyna döremeýär. Ol ýagtylygyň depginine baglylykda göze ýagtylyk düşenden (0,1÷0,25 s-de) soň oýandyrylýar. Ýagtylyk göze düşmesini bes edende-de, görüş duýgusy bada-bat aýrylmaýar. Gözüň bu häsiýeti kino, telewizora tomaşa edende, çalt üýtgeýän ýagtylygy üznüksiz görnüşde kabul etmäge mümkinçilik berýär.

5.11. Optiki abzallar

Optiki abzallaryň dürli kysymlylary we örän köp görnüşleri bardyr. Olaryň käbirlerine, ýagny gözi ýaraglandyryjy optiki abzallara seredip geçeris. Bu abzallaryň aglabasynda obýektiwi we okulýary bolýar. Obýektiw-aberrasiýalardan halas bolan linza ýa-da linzalar ulgamydyr. Ol predmetleriň ulaldylan hakyky şekilini almak üçin niýetlenendir. Okulýar hem aberrasiýalardan halas bolan linza ýa-da linzalar ulgamy bolmak bilen, obýektiwiň kömeginde alnan şekili has ulaldyp, göze düşürmek wezipesini ýerine ýetirýär. Eger ýakyn aralykda ýerleşen ownuk zatlaryň 10÷20 esse ulaldylan şekilini görmek ýeterlik bolsa, onda diňe okulýar peýdalanylyp bilner. Şeýle okulýara mysal hökmünde lupany görkezmek bolar.

1. Lupa

Lupa gysga fokusly ýygnaýjy linzadyr. Ölçegleri ulaldylyp görülmäge degişli zat (AB) fokus nokat bilen linzanyň aralygynda fokus nokada ýakyn ýerleşdirilýär *(5.39-njy çyzgy)*.



5.39-njy çyzgy

Lupa predmetiň ulaldylan hyýaly şekilini (A_1B_1) d aralykda emele getirýär. Bu aralyk kadaly göz üçin iň gowy görünme aralygy hasap edilip, d=25*sm*. ABC we $A_1B_1C_1$ üçburçluklaryň meňzeşliginden alarys:

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{d}{F} \quad .$$

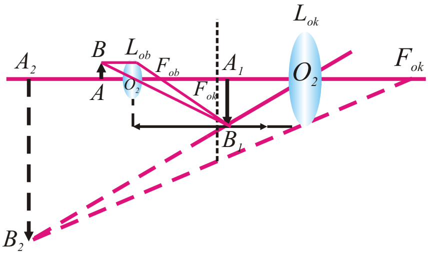
Bu ýerde $AC \approx F$ diýip kabul etdik. Bu gatnaşyk lupanyň ulaldyşyny berýär. Onda lupanyň ulaldyşy üçin ýazyp bileris:

$$\Gamma = \frac{25\ sm}{F} \quad . \qquad \textbf{(5.36)}$$

Lupa üçin $F \approx (1,2 \div 5)sm$. Diýmek, lupanyň aňrybaş ulaldyşy 20 esse çemesidir, abzallarda ulaldyş N^x görnüşde (N=5,10,20,...) belgilenýär.

2. Mikroskop

Örän kiçi (mikrometriň çäklerinde) bölejikleri görmek üçin *mikroskop* diýlip atlandyrylýan optiki abzal peýdalanylýar. Mikroskop gysga fokusly obýektiwden we gysga fokusly okulýardan ybaratdyr. Mikroskopda şekiliň alnyşyny görkezmek üçin, onuň obýektiwini (L_{ob}), şeýle-de okulýaryny (L_{ok}) bir sany linzadan ybarat, sadalaşdyrylan görnüşde şekillendireris. Hakykatda mikroskopyň obýektiwi birnäçe linzadan ybaratdyr.



5.40-njy çyzgy

Görmek gerek bolan ownujak bölejik (AB) obýektiwiň birinji fokus nokadyna ýakyn ýagdaýda ýerleşdirilýär *(5.40-njy çyzgy)*.

Obýektiwiň kömeginde bölejigiň ulaldylan hakyky şekili (A_1B_1) emele getirilýär. Obýektiwiň ulaldyşy

$$\Gamma_{ob} = \frac{\Delta}{F_{ob}} = \frac{A_1 B_1}{AB} . \quad (5.36)$$

Bu ýerde Δ-obýektiwiň ikinji fokusyndan okulýaryň birinji fokusyna çenli aralyk. Obýektiwiň fokus aralygy kiçi bolýandygyna görä Δ-aralyk A_1B_1 şekile çenli aralyga deň diýlip kabul edilýär. Obýektiwiň şeýle-de okulýaryň fokus aralyklarynyň kiçiligi sebäpli, köplenç Δ ululyk obýektiwden okulýara çenli aralyga, ýagny mikroskopyň turbasynyň uzynlygyna deň hasap edilýär. Obýektiwiň kömeginde alnan şekil (A_1B_1) okulýaryň birinji fokusyndan azajyk geçip ýerleşýär. Okulýar, obýektiwiň emele getiren şekilini (A_2B_2) ulaldyp hyýaly şekili emele getirýär. Okulýaryň ulaldyşy lupanyň ulaldyşy ýaly kesgitlenilýär:

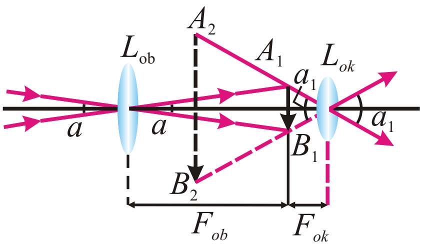
$$\Gamma_{ok} = \frac{A_2 B_2}{A_1 B_1} = \frac{25\, sm}{F_{ok}} . \quad (5.37)$$

Onda mikroskopyň ulaldyşy

$$\Gamma_m = \frac{A_2 B_2}{AB} = \Gamma_{ob} \cdot \Gamma_{ok} = \frac{\Delta\, 25\, sm}{F_{ob} \cdot F_{ok}} . \quad (5.38)$$

Optiki (görünýän ýagtylykda işleýän) mikroskoplaryň ulaldyşy 2000 essä çenli bolýar.

3. Teleskop



5.41-nji çyzgy

Örän uzakdaky jisimleriň (mysal üçin, asman jisimleriniň) ulaldylan şekilini görmek üçin niýetlenen optiki abzala *teleskop* diýilýär. Teleskop uly fokusly obýektiwden we kiçi fokusly okulýardan ybaratdyr.

Teleskopyň obýektiwiniň ikinji fokusy onuň okulýarynyň birinji fokusyna gabat geler ýaly edilip, bir optiki okda ýerleşdirilýär *(5.41-nji çyzgy)*.

Şeýle optiki ulgama teleskop diýilýär. Uzak aralykdaky jisimleriň şekili (A_1B_1) teleskopyň obýektiwiniň fokal tekizliginde emele gelýär. Okulýar onuň ulaldylan hyýaly (A_2B_2) şekilini berýär.

Uzakdaky jisime obýektiwiň merkezinden serededende nähili α burçuň çäginde görünýän bolsa, şol burç bilen ol obýektiwden geçýär. Okulýardan seredilende B_1A_1 şekil α_1 burçuň çäginde görünýär. Diýmek, obýektiw üçin B_1A_1 şekiliň burç ululygy $\alpha = \dfrac{A_1B_1}{F_{ob}}$ bolar.

Okulýar üçin A_1B_1 şekiliň burç ululygy $\alpha_1 = \dfrac{A_1B_1}{F_{ok}}$

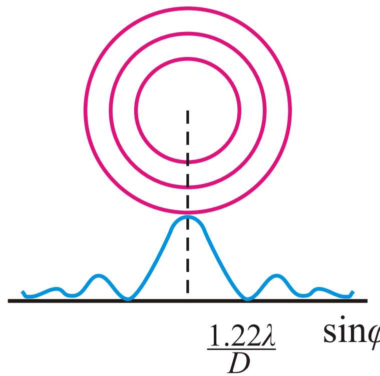
bolýar. Onda teleskopyň burç ulaldyşy

$$\Gamma_t = \frac{\alpha_1}{\alpha} = \frac{F_{ob}}{F_{ok}}. \quad (5.39)$$

Teleskopda jisimleriň ters şekili alynýar. Asman jisimlerine gözegçilik edilende onuň ähmiýeti bildirmeýär. Emma Ýeriň üstündäki uzak aralykdaky jisimlere gözegçilik edilende şekil öz bolşy ýaly görünmegi amatlydyr. Bu kemçiligi aýyrmak üçin teleskopa ýörite şekili öwrüji ulgam oturdylýar. Ýeriň üstünde uzak aralykdaky zatlary görmek üçin, şeýle-de umman gämilerinde ulanylýan teleskoplara *görüş turbasy* diýilýär.

5.12. Şekiliň difraksiýa tebigaty. Optiki abzallaryň saýgaryjylyk ukyby

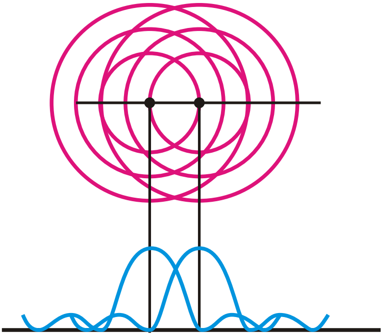
Islendik optiki abzalda (teleskop, mikroskop we ş.m-de) şekil abzalyň içine, apertura germawynyň kömegi bilen çäklendirilip geçirilýän ýagtylyk dessesi arkaly emele getirilýär. Apertura germawyň kiçelmegi bilen optiki ulgamlaryň aberrasiýasy azalýar, ýöne difraksiýa güýçlenýär. Netijede, ýagtylanýan nokadyň şekili interferensiýa halkalar bilen gurşalan ýagty menek görnüşde bolýar. Bu ýagdaý optiki abzallaryň saýgaryjylyk ukybyny, ýagny iki sany, bir-birine ýakyn ýerleşen nokatlaryň aýratyn şekillerini emele getirmegi çäklendirýär. 5.42-nji çyzgyda ýagtylanýan nokadyň optiki abzalda emele getirýän şekili we difraksiýasynyň grafigi şekillendirilen.



5.42-nji çyzgy

Garaňky halkalaryň radiusy

$$\sin\varphi = m\frac{1,22}{D}\lambda \qquad \textbf{(5.40)}$$



5.43-nji çyzgy

aňlatma arkaly kesgitlenilýär. Bu ýerde D-germawyň ýagtylygy geçirýän deşiginiň diametri, φ difraksiýa burçy, m garaňky halkalaryň tertip belgisi. Nokadyň şekili hökmünde difraksiýa zerarly ýagtylygyň depgininiň iň uly güýçlenmesi (ortadaky ýagty menek) alynýar. Grafikde görnüşi ýaly merkezi iň uly güýçlenme, iki tarapyndan iň kiçi gowşama bilen çäklenýär. Merkezi iň uly güýçlenmäniň radiusy (5.40) aňlatma boýunça

m=1 bolanda $\sin\varphi = 1{,}22\dfrac{\lambda}{D}$ gatnaşykdan kesgitlenilýär.

Ýanaşyk ýerleşen iki nokat iki sany difraksiýa şekili emele getirýär *(5.43-nji çyzgy)*.

Ýanaşyk ýerleşen nokatlaryň aýratyn görünmegi üçin merkezi iň uly güýçlenmeler saýgarylýan bolmaly. Releýiň kanuny boýunça iň uly güýçlenmeleriň aralygy:

$$\sin(\Delta\varphi) \geq \frac{1{,}22}{D}\lambda \tag{5.41}$$

gatnaşygy kanagatlandyrýan bolsa, onda olar saýgarylýandyr. Difraksiýa burçunyň kiçiligi sebäpli (5.41)

gatnaşygy $\Delta\varphi \geq 1{,}22\dfrac{\lambda}{D}$ görnüşde ýazmak mümkin.

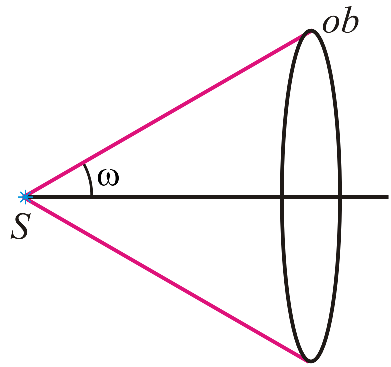
5.43-nji çyzgyda $\Delta\varphi = 1{,}22\dfrac{\lambda}{D}$ şerti kanagatlandyrýan

ýagdaý şekillendirilen. Eger-de teleskopda iki sany ýakyn ýerleşen ýyldyzlar görünýän bolsa we ol ýyldyzlaryň şekili (5.41) şerti kanagatlandyrýan bolsa, onda olar aýratyn görünýär diýlip hasap edilýär.

$\Delta\varphi_0 = 1,22\dfrac{\lambda}{D}$ ululyga teleskopyň saýgarma burçunyň çägi, $\dfrac{1}{\Delta\varphi_0}$ ululyga teleskopyň saýgarma güýji diýilýär.

Kadaly gözüň saýgarma burçunyň çägi $\Delta\varphi_0 \approx 1'$ çemesidir (görejiň diametri $D \approx 2mm$).

Mikroskopyň saýgaryjylyk ukyby diýlende, ýanaşyk ýerleşen iki nokadyň aýratyn görünýän şekilleriniň arasyndaky iň kiçi aralyk (Δl_0) göz öňünde tutulýar:



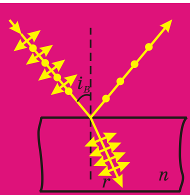
5.44-nji çyzgy

$$\Delta l_0 = \frac{0,61}{A}\lambda_0.$$

Bu ýerde λ_0-ýagtylygyň wakuumdaky tolkun uzynlygy, $A=n\sin\omega$ - obýektiwiň san aperturasy, n_0-obýektiwiň ýerleşen gurşawynyň döwme görkezijisi, ω_0 - predmetiň nokadyndan çykyp, mikroskopyň obýektiwine düşýän şöhläniň giňelme burçunyň ýarysy *(5.44-nji çyzgy)*.

Eger gözegçilik edilýän bölejigiň özi ýagtylanýan bolsa, onda $\Delta l_0 \geq \dfrac{\lambda_0}{A}$ bolar. Şu ýerden görnüşi ýaly, mikroskopyň saýgaryjylyk ukybyny artdyrmak (Δl_0-y kiçeltmek) üçin λ_0 kiçi ýa-da A uly bolmalydyr.

VI BAP



ÝAGTYLYGYŇ POLÝARLANMASY

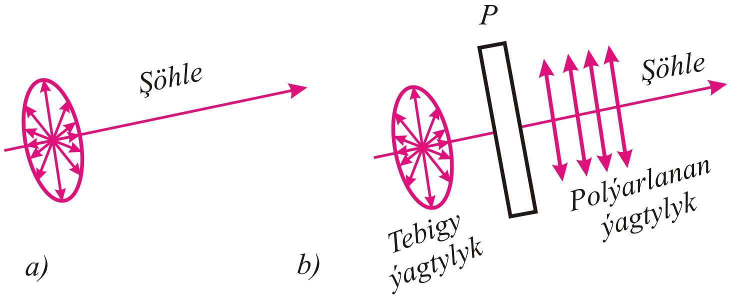
6.1. Polýarlanan we polýarlanmadyk ýagtylyk. Çyzykly, ellips görnüşli we töwerekleýin polýarlanma

Tolkunlaryň interferensiýa, difraksiýa hadysalary kese tolkunlarda-da, boý tolkunlarda-da ýüze çykýar. Emma diňe kese tolkunlarda ýüze çykýan hadysalar hem bar. Şeýle hadysa mysal hökmünde ýagtylygyň polýarlanmasyny görkezmek bolýar.

Ýagtylygyň, elektrik we magnit wektorlary ýagtylygyň ýaýraýan ugruna perpendikulýar bolan, kese elektromagnit tolkundygy Makswell tarapyndan nazary taýdan subut edilen hakykatdyr. Emma ýagtylygyň kese tolkundygy, şonuň bilen baglanyşykly polýarlanmasynyň Makswelliň elektromagnit nazaryýetinden (1865 ý.) has öň ýüze çykarylandygyny bellemek ýerliklidir.

Belli bolşy ýaly, ýagtylyk oýandyrylan atomlar tarapyndan aýry-aýry suglar (tolkun parçalary) görnüşinde şöhlelendirilýär. Her bir atom bir şöhlelenme pursatynda bir tolkun parçasyny goýberýär. Tolkun parçasynyň elektrik ($\vec{E}$) we magnit ($\vec{H}$) wektorlary özara perpendikulýar bolup giňişlikde käbir ugur boýunça ugrukdyrylýar.

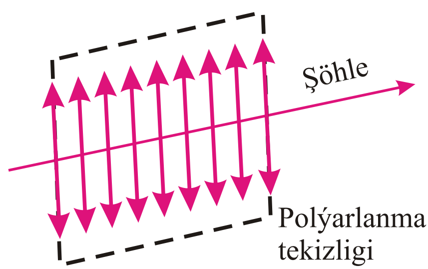
Ýagtylyk hadysalarynda onuň elektrik wektory esasy orny eýeleýändigini göz öňünde tutup, magnit wektory barada gürrüň etmeris.



6.1-nji çyzgy

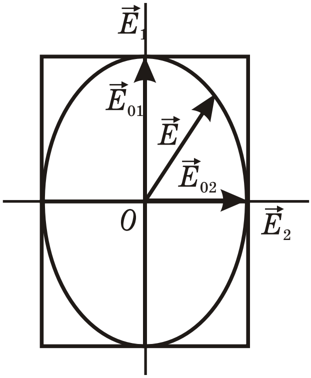
Maddanyň oýandyrylan atomlary bir-birine baglanyşyksyz şöhlelenýärler. Şoňa görä dürli atomlaryň şöhlelendirýän tolkun parçasynyň elektrik wektorlary giňişlikde dürli ugra ugrukdyrylandyr. Beýle ýagtylyga *tebigy* ýa-da *polýarlanmadyk ýagtylyk* diýilýär. Ol 6.1-nji «*a*» çyzgydaky ýaly şekillendirilip bilinýär. Elektrik wektorlary özara parallel bolan ýagtylyga *polýarlanan ýagtylyk* diýilýär. Tebigy ýagtylyk käbir maddanyň ýuka gatlagyndan geçende, onuň elektrik wektorlary özara parallel ýagdaýda bolýar. Ol 6.1-nji «*b*» çyzgydaky ýaly şekillendirilýär.

Bu ýerde *P* madda *polýarlaýjy* diýilýär. Polýarlanan ýagtylygyň elektrik wektorynyň ýerleşen tekizligi üýtgemese, onda oňa *tekiz* ýa-da *çyzykly polýarlanan ýagtylyk* diýilýär. Bu tekizlige ýagtylygyň polýarlanma tekizligi diýilýär. 6.2-nji çyzgyda şekillendirilen tekizlik.



6.2-nji çyzgy

Polýarlanma tekizlikleri özara perpendikulýar bolan iki sany kogerent, çy-



6.3-nji çyzgy

zykly polýarlanan ýagtylyklary goşmak bilen ellips görnüşli ýa-da töwerekleýin polýarlanan ýagtylyklary almak mümkin. Beýle ýagtylyk giňişlikde ýaýranda, onuň elektrik wektorynyň ujy ellips ýa-da töwerek çyzýar.

Goý, bize elektrik wektorlary degişlilikde $\vec{E}_1$ we $\vec{E}_2$ bolan we özara perpendikulýar tekizlikde yrgyldaýan garmoniki yrgydylar berlen bolsun:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos, \omega t$$
$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \sin. \omega t \tag{6.1}$$

Bu ýerde $\vec{E}_{01}$ we $\vec{E}_{02}$ degişlilikde yrgyldylaryň wertikal we gorizontal ugurlardaky amplituda wektorlary, $\omega=2\pi\upsilon$ – yrgyldylaryň aýlaw ýygylygy.
Bu iki yrgyldynyň goşulyp emele getirýän netijeleýji yrgyldysynyň deňlemesi:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cos \omega t + \vec{E}_{02} \sin \omega t. \tag{6.2}$$

Eger $|\vec{E}_{01}| = |\vec{E}_{02}|$, onda $\vec{E}$ wektoryň ujy töwerek çyzýar. (6.2) aňlatma töwerek boýunça sagyna polýarlanan ýagtylyga degişli (elektromagnit meýdanynyň wektorlary sagat diliniň hereketiniň ugruna aýlanýan ýagdaýy). Töwerek boýunça çepine polýarlanan ýagtylygyň deňlemesi:

$$\vec{E}' = \vec{E}_{01} \cos \omega t - \vec{E}_{02} \sin \omega t. \tag{6.3}$$

$\vec{E}_{01}$ we $\vec{E}_{02}$ amplituda wektorlaryň ululyklarynyň deň ýagdaýy üçin

$$\vec{E}_{02} = \left[\vec{E}_{01}\vec{n}\right] \tag{6.4}$$

aňlatmany ýazmak mümkin.

$\vec{E}_{01}$ amplituda wektoryny $\vec{E}_0$ bilen belläp (6.2) we (6.3) aňlatmalary aşakdaky ýaly ýazyp bileris:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 \cos \omega t + \left[\vec{E}_0 \vec{n}\right] \sin \omega t, \\ \vec{E}' &= \vec{E}_0 \cos \omega t + \left[\vec{E}_0 \vec{n}\right] \sin \omega t, \end{aligned} \tag{6.5}$$

Ähli amplituda wektorlarynyň ululyklary özara deň diýip kabul edilen ýagdaýynda

$$\left|\vec{E}\right| = \left|\vec{E}'\right| = \left|\vec{E}_{01}\right| = \left|\vec{E}_{02}\right| = \left|\vec{E}_0\right| = E_0 \, .$$

Bu ýerde E_0 -$\vec{E}_0$ wektoryň we beýlekileriň skalýar bahasy.

(6.1) aňlatmalaryň ikisini hem kwadrata göterip, goşup, degişli matematiki özgertme geçirip, aňlatmany alarys:

$$\frac{E_1^2}{E_0^2} + \frac{E_2^2}{E_0^2} = 1. \tag{6.6}$$

Bu deňleme E_1, E_2 koordinata ulgamynda töweregiň deňlemesini aňladýar. Deňlemedäki E_1 we E_2 degişlilikde $\vec{E}_1$ we $\vec{E}_2$ wektorlaryň skalýar bahalary.

Şeýlelikde, töwerekleýin polýarlanan ýagtylygy iki sany çyzykly polýarlanan ýagtylyk tolkunlarynyň jemi hökmünde seredip boljakdygyny subut etdik.

Eger $\left|\vec{E}_{01}\right| \neq \left|\vec{E}_{02}\right|$, onda (6.2) we (6.3) deňlemeler ellips görnüşli polýarlanan ýagtylygy berýär.

(6.1) aňlatmalaryň ikisini hem kwadrata göterip, käbir matematiki özgertmeleriň esasynda

$$\frac{E_1^2}{E_{01}^2} + \frac{E_2^2}{E_{02}^2} = 1 \tag{6.7}$$

aňlatmany alarys. Bu deňleme E_1, E_2 koordinata ulgamynda ellipsiň kanoniki görnüşdäki deňlemesidir. 6.3-nji çyzgyda (6.7) deňlemäniň esasynda alnan ellips şekillendirilen.

Has umumy görnüşde $\vec{E}_1$ we $\vec{E}_2$ wektorlaryň deňlemesi aşakdaky görnüşde aňladylýar:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos, \ \omega t$$
$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \cos\ (\omega t - \delta). \qquad (6.8)$$

Bu ýerde δ -$\vec{E}_1$ we $\vec{E}_2$ wektorlaryň faza tapawudy .
Bu ýagdaýda netijeleýji wektor

$$\vec{E} = \vec{E}_{01} \cos \omega t + \vec{E}_{02} \cos(\omega t - \delta) \qquad (6.9)$$

görnüşde aňladylýar. (6.8) aňlatmalary

$$\frac{E_1}{E_{01}} = \cos, \ \omega t$$
$$\frac{E_2}{E_{02}} = \cos\ \omega t\ \cos\delta + \sin\ \omega t\ \sin\ \delta \qquad (6.10)$$

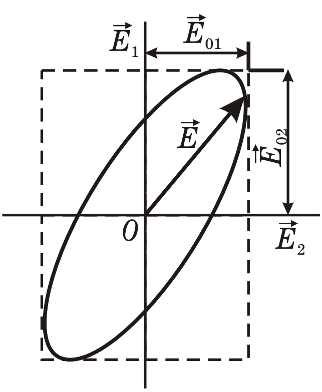
görnüşde ýazalyň.
Bu ýerden

$$\frac{E_2}{E_{02}} - \frac{E_1}{E_{01}} \cos\delta = \sin\omega t\ \sin\delta . \qquad (6.11)$$

(6.10) aňlatmanyň birinjisini sin δ köpeldip, kwadrata göterip, (6.11) aňlatmany hem kwadrata göterip özara goşmak arkaly

$$\frac{E_1^2}{E_{01}^2} + \frac{E_2^2}{E_{02}^2} - 2\left(\frac{E_1}{E_{01}}\right)\left(\frac{E_2}{E_{02}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta \qquad (6.12)$$

görnüşdäki aňlatmany alarys.



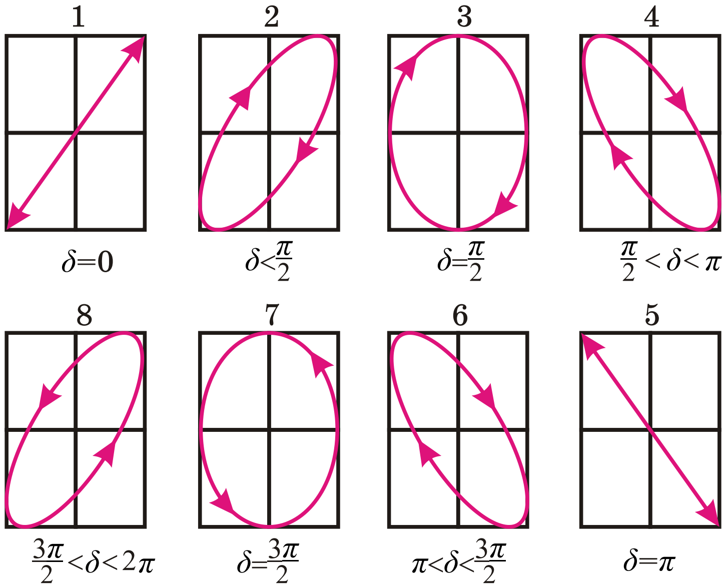
6.4-nji çyzgy

Bu (6.12) deňleme E_1, E_2 koordinata ulgamynda taraplary degişlilikde $2E_{01}$ we $2E_{02}$ bolan gönüburçlukda çyzylan ellipsiň deňlemesidir.

Şu ýerden görnüşi ýaly, netijeleýji tolkunyň elektrik wektory goşulýan tolkunlaryň elektrik wektorlarynyň geometrik jemine deň bolup $\vec{E} = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$, onuň ujy ýagtylyk şöhlesiniň ýaýraýan ugruna perpendikulýar ýerleşen tekizlikde ellips görnüşli traýektoriýany çyzýar.

Belli bolşy ýaly, töwerekleýin polýarlanmada aýlanmanyň ýygylygy ýagtylyk yrgyldylarynyň υ ýygylygyna deň bolýar. Eger $\delta = \frac{\pi}{2}$ ýa-da $\delta = (2m+1)\frac{\pi}{2}$ bolsa (m=1,2,3,...), onda sin $\delta = \pm 1$, cos δ = 0 bolar. Bu ýagdaýda (6.12) ellipsiň deňlemesi kanoniki görnüşe (6.7) eýe bolar. Netijeleýji tolkunyň $\vec{E}$ we $\vec{H}$ wektorlaryň aýlanýan ugry δ burça baglydyr. Eger $0<\delta<\pi$ bolsa, onda aýlanma sagat diliniň hereketiniň ugruna bolýar. Eger $\pi < \delta < 2\pi$ bolsa, onda aýlanma sagat diliniň hereketiniň tersine bolýar. 6.5-nji çyzgyda ellips görnüşli polýarlanmanyň dürli ýagdaýlary şekillendirilen.

Eger $E_{01} = E_{02}$ we $\delta = \frac{\pi}{2}$ ýa-da $\delta = (2m+1)\frac{\pi}{2}$ bolsa, onda ellips töwerege öwrülýär. Eger $\delta \neq \frac{\pi}{2}$ ýa-da $\delta \neq (2m+1)\frac{\pi}{2}$ hem-de $E_{01} = E_{02}$ bolan ýagdaýynda-da traýektoriýanyň ellips görnüşine eýe bolmagy aýratyn üns bermeli ýagdaýdyr.

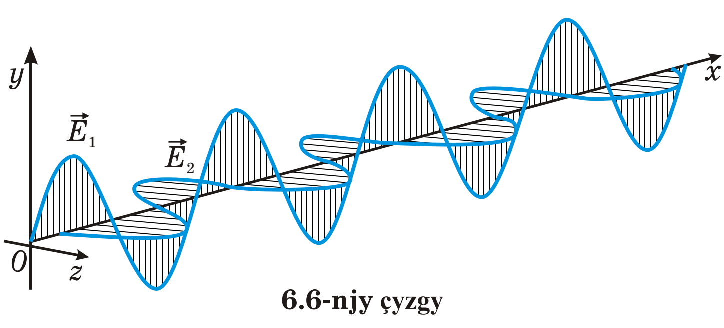


6.5-nji çyzgy

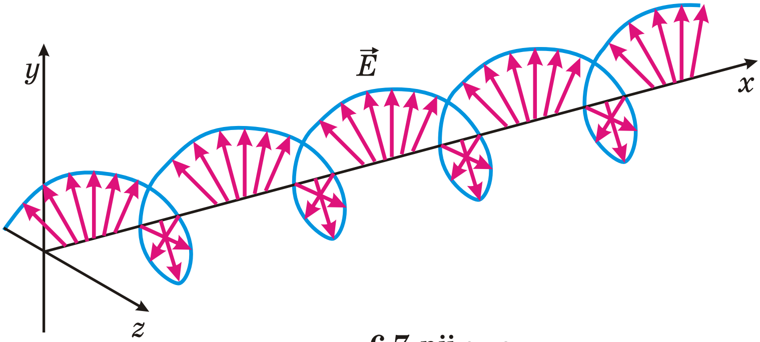
Haçan-da $\delta=0$ ýa-da $\delta=m\pi$, sin $\delta=0$ bolsa, onda traýektoriýa

$$\frac{E_1}{E_{01}} \pm \frac{E_2}{E_{02}} = 0 \tag{6.13}$$

görnüşdäki deňleme bilen kesgitlenilýän gönüçyzyga öwrülýär. Bu ýagdaýda netijeleýji ýagtylyk tolkuny çyzykly polýarlanan bolýar.



6.6-njy çyzgy



6.7-nji çyzgy

Iki sany bir ugra ýaýraýan we özara perpendikulýar tekizliklerde polýarlanan we biri-birinden fazasy boýunça $\frac{\pi}{2}$ ululyga tapawutlanýan elektromagnit tolkunlaryň grafigi 6.6-njy çyzgyda şekillendirilen.

Bu iki tolkun, şöhläniň daşynda aýlanýan töwerek ýa-da ellips görnüşli polýarlanan bir sany tolkuna ekwiwalentdir. Bu iki tolkunyň netijeleýji elektrik meýdanynyň güýjenme wektorynyň giňişlikde üýtgeýşi 6.7-nji çyzgyda şekillendirilen.

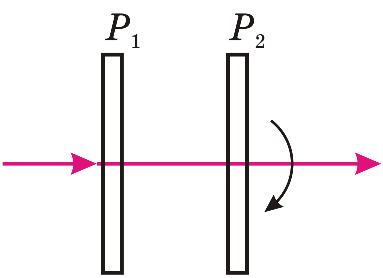
Netijeleýji tolkunyň $\vec{E}$ wektoryň uçlarynyň egiji çyzyklary şöhläniň ýaýraýyş okunuň daşyndaky hyr görnüşli egrini emele getirýär.

Käbir ugurda ýagtylyk yrgyldylary köpräk bolan ýagdaýa kem-käs polýarlanan ýagtylyk diýilýär. Kem-käs polýarlanan ýagtylygy polýarlaýjy maddanyň ýuka gatlagyndan geçirip, polýarlaýjy madda şöhläniň daşyndan aýlandyrylanda polýarlaýjydan geçýän ýagtylygyň depgini (intensiwligi) käbir iň uly $I_{\text{iň uly}}$ ululygyndan käbir iň kiçi $I_{\text{iň kiçi}}$ ululygyna çenli üýtgeýär. Ýagtylygyň depgininiň beýle üýtgemesi polýarlaýjyny 90^0 burça aýlamak bilen ýüze çykarylýar.

$$P = \frac{I_{\text{iň uly}} - I_{\text{iň kiçi}}}{I_{\text{iň uly}} + I_{\text{iň kiçi}}} \qquad (6.1)$$

gatnaşyk arkaly kesgitlenilýän ululyga ýagtylygyň polýarlanma derejesi diýilýär. Tekiz polýarlanan ýagtylyk üçin $I_{\text{iň kiçi}} = 0$ bolýar, bu ýagdaýda ýagtylygyň polýarlanma derejesi P=1 bolýar. Tebigy ýagtylyk üçin $I_{\text{iň uly}} = I_{\text{iň kiçi}}$ bolýar, bu ýagdaýda ýagtylygyň polýarlanma derejesi P=0 bolýar.

6.2. Polýarlaýjylar we seljerijiler. Malýusyň kanuny



6.8-nji çyzgy

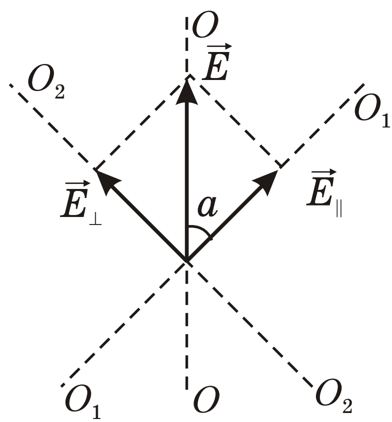
Polýarlanan ýagtylygy almak üçin kristallardan peýdalanylýar. Kristallarda optiki ok diýlip atlandyrylýan käbir ugurlar bolýar. Käbir kristallar (mysal üçin, turmalin), tebigy ýagtylygyň elektrik wektory optiki okuna parallel bolan bölegini geçirýär, elektrik wektory optiki okuna perpendikulýar bölegini (siňdirýär) geçirmeýär. Beýle kristaldan geçen ýagtylyk doly polýarlanýar. Şeýle kristaldan, optiki okuna parallel kesilip alnan ýuka gatlak ýagtylygy polýarlaýjy bolup hyzmat edýär. Polýarlaýjydan geçen ýagtylygyň polýarlanmasyny kesgitlemek üçin tebigy ýagtylyk, özara parallel ýerleşen iki sany polýarlaýjydan geçirilýär *(6.8-nji çyzgy)*. Eger ikinji (P_2) polýarlaýjy şöhläniň daşynda aýlandyrylanda ondan geçýän ýagtylygyň depgininiň üýtgemesi ýüze çykýan bolsa, onda birinji (P_1) polýarlaýjydan geçen ýagtylyk polýarlanan hasap edilýär.

Ýagtylygyň depgininiň üýtgemesi ikinji polýarlaýjynyň (P_2) şöhläniň daşyndan 90^0 burça aýlanmasynda bolup geçýär. Ikinji polýarlaýjynyň (P_2) käbir ýagdaýynda ondan ýagtylyk geçmeýär.

Bu bolsa birinji (P_1) polýarlaýjydan geçen ýagtylygyň doly polýarlanandygyny aňladýar. Şeýlelikde, ikinji polýarlaýjy (P_2) birinji polýarlaýjydan (P_1) geçen ýagtylygyň polýarlanandygyny kesgitleýär (anyklaýar, ýüze çykarýar). Şonuň üçin ikinji polýarlaýja (P_2) seljeriji diýilýär.

Eger polýarlaýjynyň we seljerijiniň optiki oklary özara parallel bolsa, onda polýarlaýjydan geçen ýagtylygyň elektrik wektorlary seljerijiniň optiki okuna parallel bolýar we seljerijiden doly geçýärler. Bu ýagdaýda seljerijiden geçýän ýagtylygyň depgini iň uly baha eýe bolýar. Eger seljeriji şöhläniň daşynda 90^0 burça aýlandyrylsa, onda polýarlaýjydan geçen ýagtylygyň elektrik wektorlary seljerijiniň optiki okuna perpendikulýar bolýar we seljerijiden geçýän ýagtylygyň depgini iň kiçi ululyga, ýagny nola deň bolýar.

Goý, polýarlaýjy we seljeriji optiki oklary özara käbir α burç emele getirýän ýagdaýynda ýerleşdirilen bolsun (*6.9-njy çyzgy*). *OO* polýarlaýjynyň optiki oky, O_1O_1 seljerijiniň optiki oky. Geçen ýagtylygyň elektrik wektorynyň amplitudasyny $\vec{E}$ özara perpendikulýar iki düzüjä (*6.9-njy çyzgydaky ýaly)* dargadylan görnüşde şekillendirmek mümkin.



6.9-njy çyzgy

Şu ýerden görnüşi ýaly, seljerijiden O_1O_1 oka parallel $\vec{E}_{II}$ amplitudasy bolan ýagtylyk geçer, emma O_1O_1 oka perpendikulýar $E_\perp$ amplitudasy bolan ýagtylyk geçmez. Onda seljerijiden geçýän ýagtylygyň amplitudasynyň ululygy

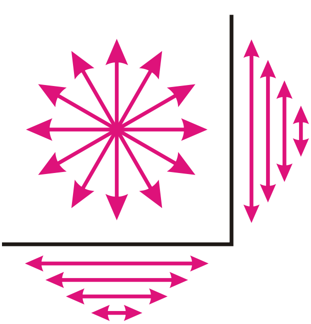
$$E_{II} = E\cos\alpha \tag{6.15}$$

bolar. Belli bolşy ýaly, ýagtylygyň depgini onuň amplitudasynyň ikinji derejesine göni baglydyr, ýagny $I \sim E_{II}^2$ we $I_0 \sim E^2$.
Onda seljerijiden geçen ýagtylygyň depgini

$$I = I_0\cos^2\alpha \tag{6.16}$$

görnüşde aňladylyp bilner.
Bu ýerde I_0 seljerijä düşýän polýarlanan ýagtylygyň depginini; I seljerijiden geçen ýagtylygyň depgini (6.16) aňlatma *Malýusyň kanuny* diýilýär.

Polýarlaýja tebigy ýagtylyk düşürilip ondan geçen şöhläniň daşynda polýarlaýjy aýlandyrylanda ýagtylygyň depgini üýtgemeýän bolsa, onda polýarlaýja düşýän ýagtylygyň polýarlanma derejesiniň nola deňdigini aňladýar. Bu ýagdaýda polýarlaýjydan geçen ýagtylygyň depgini oňa düşýän ýagtylygyň depgininiň ýaýraýşyna deň bolýar. Bu ýagdaýy aşakdaky ýaly göz öňüne getirmek bolar: tebigy ýagtylygyň elektrik wektorlaryny özara perpendikulýar iki tekizlige proýektirlenen görnüşde *(6.10-njy çyzgy)* şekillendirmek mümkin. Çyzgydan görnüşi ýaly her tekizlikdäki elektrik wektorlaryň umumy mukdary özara deň-



6.10-njy çyzgy

dir, diýmek, her tekizlige degişli ýagtylygyň depgini hem özara deňdir.

Polýarlaýjydan ýagtylygyň elektrik wektorlarynyň bir tekizlikde bolýany geçýändigine görä onuň depgini

$$I = \frac{1}{2} I_0 \qquad (6.18)$$

bolar. Bu ýerde I_0 – polýarlaýja düşýän tebigy ýagtylygyň depgini. Eger polýarlaýjydan ýagtylygyň käbir mukdary (k) siňdirilýän (ýitýän) bolsa, onda polýarlaýjydan geçen ýagtylygyň depgini

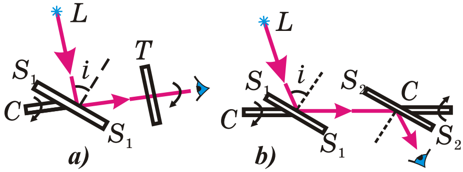
$$I = \frac{1}{2}(1-k) I_0 \qquad (6.18)$$

görnüşde aňladylýar.

Içinden geçýän ýagtylygy polýarlaýan kristallar, turmalinden başga-da köpdür. Mysal üçin, gerapatit kristallary (kükürtturşy ýod-hinin). Gerapatit kristallaryň ölçegleri kiçi bolup, *0,3mm* galyňlykdaky gatlagy tebigy ýagtylygy doly polýarlap bilýär. Üstüniň meýdany uly bolan polýarlaýjylar birmeňzeş ugra ugrukdyrylan gerapatit kristaljagazlary bilen örtülen selluloid ýorkalar görnüşinde bolýar. Beýle ýorkalar polýaroid diýilip atlandyrylýar. Polýaroid taýýarlamak ýeňil, arzan we ulanmak üçin amatlydyr.

6.3. Ýagtylygyň dielektrik üstde serpikmesinde polýarlanmasy

Ýagtylygyň polýarlanmasy ýagtylygyň kristallardan geçen ýagdaýynda ýüze çykmasy ýeke-täk ýol däldir. Tebigy ýagtylyk, dielektrikleriň (aýna, suw we ş.m.) üstünden serpigende-de polýarlanýar.



6.11-nji çyzgy

Goý, S_1S_1 aýna üste tebigy ýagtylyk düşüp, serpikgýän bolsun *(6.11-nji çyzgy)*.

Serpigen ýagtylygyň polýarlanmasy *(T)* turmalin kristaly arkaly seljerilýär. S_1S_1 aýna ýagtylyk nähili burç bilen düşse-de *(C)* sapyň kömeginde S_1S_1 aýnany aýlap serpigen şöhläni *(T)* turmalin kristalyna gönükdirmek mümkin. Eger kristal şöhläniň daşynda aýlandyrylsa, kristaldan geçen ýagtylygyň depgininiň periodiki üýtgemesi ýüze çykýar. Bu ýagdaý T kristal dynçlykda bolup, S_1S_1 aýna C sapyň kömeginde aýlandyrylanda hem ýüze çykýar. Beýle hadysa S_1S_1 aýnadan (dielektrikden) serpigen ýagtylyk belli bir derejede polýarlanan ýagdaýynda bolup bilýär. Bu tejribede S_1S_1 aýna polýarlaýjy, T turmalin kristaly seljeriji bolup hyzmat edýär. Eger T turmalin kristalynyň ornuna S_2S_2 aýna ýerleşdirilse hem ýokardaky tejribede ýüze çykarlan ýagdaý gaýtalanýar *(6.11-nji «b» çyzgy)*.

Birinji tejribede T turmalin kristalynyň optiki oky S_1S_1 aýna ýagtylygyň düşme tekizligine parallel bolsa, ikinji tejribede S_1S_1 we S_2S_2 aýna ýagtylygyň düşme tekizlikleri özara perpendikulýar bolsa, onda gözegçiniň gözüne düşýän şöhläniň depgini iň kiçi ululygyna eýe bolýar. Bu ýagdaýda dielektrikden serpigen ýagtylyk tolkunlarynyň köpüsiniň elektrik wektorlary ýagtylygyň düşme tekizligine perpendikulýar bolýar. Tejribelerde T turmalin kristaly ýa-da S_2S_2 aýna şöhläniň daşynda 90^0 burça aýlandyrylanda gözegçiniň gözüne düşýän şöhläniň depgini iň uly ululygyna eýe bolýar. Şeýlelikde, dielektrigiň üstüne islendik burç bilen düşen şöhle serpikdirilende doly polýarlanmaýar. Düşme burçunyň üýtgemesi bilen serpigen ýagtylygyň polýarlanma derejesi hem üýtgeýär. Düşme burçunyň käbir kesgitli ululygynda serpigen ýagtylyk doly polýarlanan bolýar. Bu burçuň ululygy

$$\mathrm{tg}\, i_B = n \tag{6.19}$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär.

Bu aňlatma Brýusteriň kanuny diýilýär. Bu ýerde i_B – Brýusteriň burçy; n - dielektrigiň döwme görkezijisi.

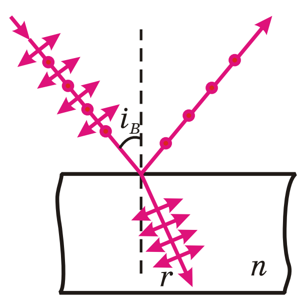
Eger ýagtylyk döwme görkezijileri, degişlilikde n_1 we n_2 bolan iki dielektrigiň tekiz araçäginden serpigen bolsa, onda Brýusteriň kanuny

$$\mathrm{tg}\, i_B = \frac{n_2}{n_1} \tag{6.20}$$

görnüşe eýe bolýar.

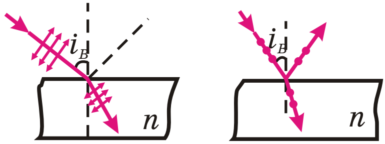
Dury dielektrigiň üstüne käbir burç bilen düşen ýagtylygyň bir bölegi döwlüp, onuň içine geçýär. Döwlen şöhle seljerijiden geçende, onuň belli bir derejede polýarlanýandygy ýüze çykýar. Tebigy ýagtylyk Brýusteriň burçy bilen dielektrige düşürilende-de, döwlen şöhle doly polýarlanmaýar, ýöne onuň polýarlanma derejesi iň uly baha eýe bolýar.

Ýokarda belläp geçişimiz ýaly, serpigen ýagtylygyň polýarlanma tekizligi ýagtylygyň düşme tekizligine perpendikulýardyr*(6.12-nji çyzgy)*.



6.12-nji çyzgy

Dielektrigiň üstüne tebigy ýagtylyk Brýusteriň burçy bilen düşende, serpigen we döwlen şöh-



6.13-nji çyzgy

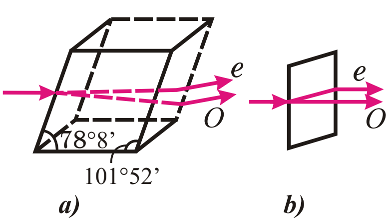
leler özara perpendikulýar bolýar. Muny subut etmek üçin ýagtylygyň döwülme kanunyndan peýdalanylýar. Ýagny $\frac{\sin i_B}{\sin r} = n$, $\mathrm{tg} i_B = n$.

Diýmek bu dielektrik üçin $\frac{\sin i_B}{\sin r} = \mathrm{tg} i_B = n = \frac{\sin i_B}{\cos i_B}$,

onda $\sin r = \cos i_B$; $i_B = 90° - r$ ýa-da $i_B + r = 90°$. Serpigen we döwlen şöhleleriň özara perpendikulýar bolmagy, dielektrigiň üstüne ýagtylygyň Brýusteriň burçy bilen düşmegininiň subudydyr. Dielektrigiň üstüne doly polýarlanan ýagtylyk düşürilse, aşakdaky ýaly ýagdaýlaryň ýüze çykmagy mümkin *(6.13-nji çyzgy)*: eger ýagtylygyň polýarlanma tekizligi düşme tekizligine parallel bolsa, onda polýarlanan ýagtylyk şöhlesi dielektrikden serpikmeýär, eger ýagtylygyň polýarlanma tekizligi düşme tekizligine perpendikulýar bolsa, onda polýarlanan ýagtylyk şöhlesi dielektrikden serpigýär, ýöne az mukdary döwlüp dielektrige geçýär.

6.4. Ikileýin şöhle döwülmede ýagtylygyň polýarlanmasy

Käbir kristallara düşen ýagtylygyň inçe dessesi kristalyň içinde ikä bölünip ýaýraýar. Bu hadysa **ikileýin şöhle döwülme** diýilýär. Island şpatynyň kristalynda ($CaCO_3$) ýagtylyk şöhlesi ikä bölünip ýaýraýar. Island şpatynyň kristal gözenegi romboedr geometrik görnüşe eýe

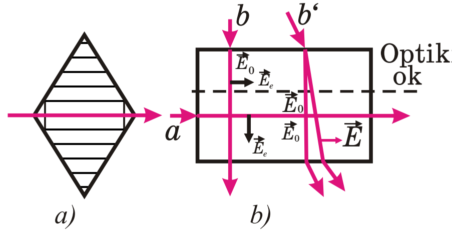


6.14-nji çyzgy

bolup, granynyň ýiti burçy 78°8′ we kütek burçy 101°52′-a deňdir *(6.14-nji «a»çyzgy)*.

Eger ýagtylyk şöhlesi bu kristalyň bir granyna perpendikulýar düşse, onda ikä bölünen şöhleleriň biri şöhläniň düşýän ugry boýunça ýaýraýar, beýlekisi gyşarýar. Düşýän şöhläniň ugry boýunça ýaýraýan şöhlä **adaty**, gyşaran şöhlä **adaty däl** ýagtylyk diýilýär. Munuň sebäbi ýagtylygyň döwülme kanuny bilen baglanyşykly. Ýagtylygyň döwülme kanunyna boýun egýän **(***i***=0,** *r***=0)** şöhlä adaty ýagtylyk diýilýär. Ýagtylygyň döwülme kanunyna boýun egmeýän şöhlä adaty däl ýagtylyk diýilýär.

Kristallarda ýagtylyk şöhlesini ikä bölýän bir ýa-da iki ugur bolýar. Bu ugra kristalyň **optiki oky** diýilýär. Diýmek, bir optiki okly we iki optiki okly kristallar bolup bilýärler. Island şpatynyň kristaly bir okly kristallara degişlidir. Bu kristalyň optiki oky onuň romboedrik görnüşli öýjügiň kütek burçlaryny birleşdirýän ugur bilen gabat gelýär *(6.15-nji «a» çyzgy)*. Şu ugra parallel bolan ähli çyzyklar kristalyň optiki oklarydyr.



6.15-nji çyzgy

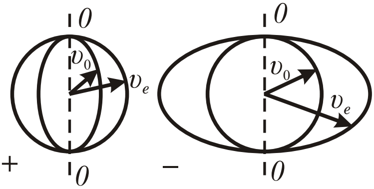
Şoňa görä, kristala şöhläniň düşme nokadynyň üstünden hemişe optiki ok geçirmek mümkin. Bu okuň we düşýän şöhläniň üstünden geçýän tekizlige şu şöhle üçin **baş tekizlik** ýa-da **baş kesik** diýilýär. Adaty we adaty däl ýagtylyklar özara perpendikulýar tekizliklerde doly polýarlanan bolýarlar. Şeýlelikde, adaty ýagtylyk baş tekizlige perpendikulýar tekizlikde, adaty däl ýagtylyk bolsa baş tekizlikde polýarlanan bolýar *(6.15-nji «b» çyzgy)*. «*a*» şöhle optiki okuň ugry bilen ýaýraýar, şonuň üçin ol ikä bölünmeýär; «b» şöhle optiki oka perpendikulýar ugur boýunça ýaýraýar, ol hem ikä bölünmeýär; *b'*-şöhle kristala erkin ugrukdyrylan ýagdaýynda ol ika bölünýär. Munuň sebäbi Freneliň nazaryýetine görä kristalyň içinde ýagtylygyň ýaýrama tizligi iki düzgünden ybarat bolýar, ýagny, adaty we adaty däl ýagtylyklaryň ýaýrama tizlikleri biri-birinden tapawutlanýarlar. Şonuň üçin hem kristala erkin ($0° < i < 90°$) ugrukdyrylanda ýagtylyk şöhlesi kristalyň içinde dürli tizlik bilen ýaýraýan iki dessä bölünýär.

Eger ýagtylyk şöhlesi kristalyň granyna perpendikulýar düşürilip, kristal şöhläniň daşynda aýlandyrylanda adaty ýagtylyk şöhlesi ugruny üýtgetmeýär.

Adaty däl ýagtylyk şöhlesi kristal bilen bilelikde adaty ýagtylyk şöhlesiniň daşyndan aýlanýar. Adaty ýa-da adaty däl ýagtylyk kristala gönükdirilse, ýene-de adaty we adaty däl ýagtylyklara bölünýär.

Käbir kristallar (mysal üçin, turmalin) adaty we adaty däl ýagtylyklary deň derejede geçirmeýär (birini güýçli siňdirýär). Bu ýagdaýa optikada *dihroizm* diýilýär.

Adaty ýagtylygyň ähli ugurlar boýunça ýaýrama tizligi deňdir. Şoňa görä onuň tolkun fronty sfera görnüşli üsti emele getirýär. Adaty däl ýagtylygyň ýaýrama tizligi dürli ugurlar boýunça deň ululyga eýe bolmaýar. Şoňa görä onuň tolkun fronty aýlanma ellipsoidi emele getirýär *(6.16-njy çyzgy)*. Optiki okuň ugry boýunça adaty we adaty däl ýagtylyklaryň ýaýrama tizlikleri özara deňdir (6.16-njy çyzgyda *OO* optiki ok) $\upsilon_o = \upsilon_e$. Eger $\upsilon_e < \upsilon_o$ bolsa, onda kristal položitel eger $\upsilon_e > \upsilon_o$ bolsa, onda kristal otrisatel hasap edilýär.



6.16-njy çyzgy

6.5. $\lambda/4$ we $\lambda/2$ galyňlykly kristallar. Tekiz polýarlanan tolkunlaryň interferensiýasy

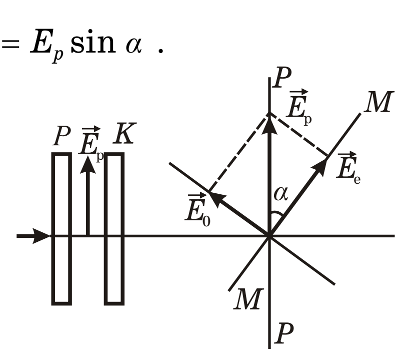
Adaty we adaty däl ýagtylyklar özara perpendikulýar tekizliklerde polýarlanan bolýarlar, ýöne olar kogerent bolmaýarlar, sebäbi adaty we adaty däl ýagtylyklar dürli suglara degişlidirler. Diňe adaty ýa-da adaty däl ýagtylygy emele getirýän suglar kogerent bolýarlar. *Sug* – bir şöhlelenme pursatynda atomyň şöhlelendirýän tolkun parçasy. Şonuň üçin kristalyň ýuka gatlagyna düşürilen polýarlanan adaty ýa-da adaty däl ýagtylyk, kristaldan geçende kogerent bolýar.

Goý, optiki okuna parallel kesilip alnan ***d*** galyňlykly kristala polýarlanan ýagtylyk normal boýunça düşýän bolsun *(6.17-nji çyzgy)*.

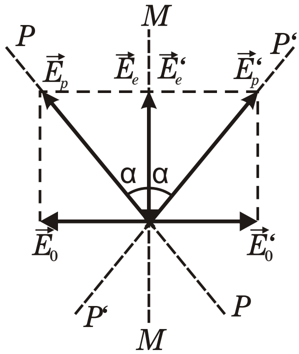
Çyzgyda *P*-polýarlaýjy; *K* – kristal; *PP* – polýarlaýjynyň optiki oky; *MM* – kristalyň optiki oky; $\vec{E}_p$ – kristala düşýän ýagtylygyň elektrik wektory; $\vec{E}_o$ we $\vec{E}_e$ – kristalyň içinde ýaýraýan adaty we adaty däl ýagtylyklaryň elektrik wektorlary; α – *PP* we *MM* oklaryň arasyndaky burç. Çyzgydan görnüşi ýaly

$$E_e = E_p \cos\alpha\,;\;\; E_o = E_p \sin\alpha\;.$$

$\alpha = 45^\circ$ bolan ýagdaýynda $E_o = E_e$ ýagny, adaty we adaty däl ýagtylyklaryň elektrik wektorlarynyň amplitudalary özara deň bolýar, diýmek, olaryň depginleri hem deňdir.



6.17-nji çyzgy



6.18-nji çyzgy

Kristala giren pursatynda $\vec{E}_o$ we $\vec{E}_e$ wektorlar şol bir fazada yrgyldaýarlar. Kristalyň içinde adaty we adaty däl ýagtylyklar dürli tizlik bilen ýaýraýarlar, netijede, kristaldan çykan pursatynda

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda_0} d(n_o - n_e) \qquad (6.21)$$

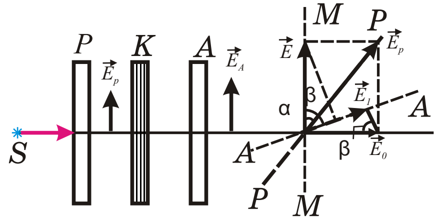
ululyga deň bolan fazalar tapawudyna eýe bolýarlar. Bu ýerde $\Delta r = d(n_o - n_e)$ adaty we adaty däl ýagtylyklaryň optiki ýollarynyň tapawudy; λ_0-ýagtylygyň wakuumdaky tolkun uzynlygy. Kristaldan geçen adaty we adaty däl ýagtylyklaryň elektrik wektorlary $\vec{E}'_o$ we $\vec{E}'_e$ hem-de olaryň geometrik jemi $\vec{E}'_p = \vec{E}'_o + \vec{E}'_e$ bolsa, onda kristalyň d galyňlygyna baglylykda aşakdaky ýagdaýlar bolup biler:

1) eger-de kristalyň galyňlygy $d(n_o - n_e) = \pm\left(m + \frac{1}{4}\right)\lambda_0$ (m=0,1,2,3,...) şerti kanagatlandyrýan bolsa, onda $\vec{E}'_o$ we $\vec{E}'_e$ wektorlaryň yrgyldylary, fazasy boýunça $\Delta\varphi = 90°$-a tapawutlanýarlar. Bu ýagdaýda, eger $\alpha \neq 45°$ bolsa, adaty we adaty däl ýagtylyklar goşulyp, elliptik polýarlanan ýagtylyk alynýar. Ýagny $\vec{E}'_p$ wektoryň ujy şöhläniň ýaýraýan ugruna perpendikulýar bolan tekizlikde ellips çyzýar. Eger $\alpha = 45°$ bolsa, onda töwerekleýin polýarlanan ýagtylyk alynýar. Beýle galyňlykdaky kristala çärýek tolkun ($\lambda/4$) galyňlykly kristal diýilýär.

2) eger-de kristalyň galyňlygy $d(n_o - n_e) = \pm\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_0$ (m=0,1,2,3,...) şerti kanagatlandyrýan bolsa, onda $\vec{E}'_o$ we $\vec{E}'_e$ wektorlaryň yrgyldylary, fazasy boýunça $\Delta\varphi$=180° tapawutlanýarlar. Bu ýagdaýda, $\vec{E}'_p$ wektoryň ujy ellips ýa-da töwerek çyzman, belli bir ýagdaýda galýar. Beýle galyňlykdaky kristala ýarym tolkun ($\lambda/2$) galyňlykly kristal diýilýär. Kristala girýän ýagtylyk tolkunynyň $\vec{E}_p$ wektory we kristaldan geçen (çykýan) ýagtylyk tolkunynyň $\vec{E}'_p$ wektory kristalyň optiki okuna simmetrik ýerleşýär *(6.18-nji çyzgy)*. $\vec{E}_p$ we $\vec{E}'_p$ wektorlaryň arasyndaky burç 2α deňdir. Çyzykly polýarlanan ýagtylyk ýarym tolkun galyňlykly kristaldan geçende ýene-de çyzykly polýarlanan bolýar.

Kristaldan geçen adaty we adaty däl ýagtylyklar, kogerent bolsalar-da goşulanda interferensiýany ýüze çykarmaýarlar. Sebäbi olar özara perpendikulýar tekizlikde polýarlanan bolýarlar, diýmek, interferensiýany ýüze çykarmagy üçin olaryň polýarlanma tekizlikleriniň parallel bolmagyny gazanmaly. Onuň üçin kristaldan çykan ýagtylygy ýene-de bir polýarlaýjydan (seljerijiden) geçirmeli *(6.19-njy çyzgy)*.

S çeşmeden çykan tebigy ýagtylyk şöhlesi P-polýarlaýjydan geçende, $\vec{E}_p$ wektory çyzyklypolýarlanan ýagtylyga öwrülýär. Soňra k-kristaldan geçende $\vec{E}_o$ we $\vec{E}_e$ wektorly iki düzüjä (adaty we adaty däl) dargap



6.19-njy çyzgy

çykýar. Bu düzüjiler seljerijiden geçende, seljerijiniň optiki okuna parallel bolan (E_1, $\vec{E}_2$) düzüjiler bolýarlar. Bu düzüjiler goşulyp interferensiýany ýüze çykarýarlar. Bu düzüjileriň goşulmagy bilen

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi \qquad (6.22)$$

depgine eýe bolan ýagtylyk alynýar. Belli bolşy ýaly $E_2 \sim I$, $E_1^2 \sim I_1$, $E_2^2 \sim I_2$. Onda

$$E^2 = \mathrm{E}_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\Delta\varphi \qquad (6.23)$$

deňligi ýazyp bileris.
6.19-njy çyzgydan görnüşi ýaly

$$E_1 = E_o\sin\beta\ ,\ E_2 = E_e\cos\beta\ , \qquad (6.24)$$

$$E_o = E_p\sin\alpha\ ,\ E_e = E_p\cos\alpha\ . \qquad (6.25)$$

Onda $E_1 = E_p\sin\alpha\sin\beta$; $E_2 = E_p\cos\alpha\cos\beta$ Bu ululyklary (6.23) aňlatmada ornuna goýup alarys:
$\mathrm{E}^2 = E_{\mathrm{p}}^{\ 2}(\sin^2\alpha\cdot\sin^2\beta + \cos^2\alpha\cdot\cos^2\beta + 2\sin\alpha\cos\alpha\sin\beta\cos\beta\cos\Delta\varphi)$.
Bu ýede $\cos\Delta\varphi$ kristalyň galyňlygyna bagly bolup, (6.21) aňlatmadan kesgitlenilýär. Soňky aňlatmadan görnüşi ýaly goşulýan adaty we adaty däl ýagtylyklaryň jemleýji tolkunynyň elektrik wektorynyň amplitudasynyň kwadraty (E^2) α we β burçlara hem-de kristalyň galyňlygyna baglydyr.

Eger kristalyň galyňlygy $d(n_o - n_e) = \dfrac{\lambda_0}{2}$ şerti kanagatlandyrýan bolsa (ýarym tolkun galyňlykly kristal), onda $\Delta\varphi = 180^\circ$; $\cos\Delta\varphi = -1$. Eger $\alpha = 45^\circ$ bolsa, onda $E^2 = 0$ bolýar. Diýmek $I = 0$ (interferensiýa zerarly jemleýji ýagtylygyň depgini iň uly gowşama eýe bolýar). Eger $\beta = 135^\circ$ bolsa, onda $PP \perp DD$, $\cos 135^\circ = -\cos 45^\circ$, $\sin 135^\circ = \sin 45^\circ$, $\mathrm{E}^2_{\mathrm{o}} = E^2_{\ p}$. Diýmek $I = I_p$ (jemleýji depginiň iň uly güýçlenmesi). Şeýlelikde, α-nyň, β-nyň we d-niň ululyklaryny üýtgedip, interferensiýanyň hasabyna ýagtylygyň depgininiň iň uly güýçlenmesini we iň uly gowşamasyny almak mümkin.

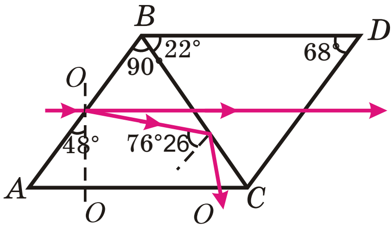
Eger kristala çyzykly polýarlanan ak ýagtylyk düşürilip, seljeriji arkaly syn edilende, kristal reňkli bolup görünýär. Şöhläniň daşynda aýlandyrylanda, kristalyň reňki üýtgeýär. Eger kristalyň galyňlygy ähli ýerinde deň bolmasa, onda onuň dürli ýerleriniň reňki hem dürli bolýar. Eger kristalyň galyňlygy hemişelik bolup, dürli ýerlerinde n_o we n_e üýtgeýän bolsa, onda ýene-de kristal dürli reňkli bolup görünýär.

6.6. Polýarlaýjy abzallar

Tebigy ýagtylygy çyzykly polýarlanan ýagtylyga öwürmek üçin polýarlaýjy abzallardan peýdalanylýar. Ýagtylygy polýarlamagyň käbir usullary bilen ýokarda tanyşdyk: ýagtylygy turmalin kristalyndan, polýaroidden geçirmek, dielektrikden ýagtylygy Brýusteriň burçy boýunça serpikdirmek we ş.m.

Käbir kristallar adaty we adaty däl ýagtylyklary deň mukdarda geçirmeýärler. Şeýle kristallaryň käbiriniň n_o we n_e döwme görkezijileri güýçli tapawutlanýanlaryny polýarlaýjy hökmünde ulanmak mümkin. Şeýle kristallaryň biri island şpatynyň kristalydyr. $\lambda = 5893^0A$ tolkun uzynlyk üçin island şpatynyň kristalynyň döwme görkezijileri n_o=1,658, n_e=1,486. Muňa garamazdan, bu kristal hem iki şöhläniň arasyny kän uzaklaşdyryp bilmeýär. Şoňa görä kristallardan taýýarlanan prizmalary utgaşdyryp polýarlaýjy abzallar ýasalýar. Şeýle abzallaryň iki görnüşi bar:

a) diňe bir sany çyzykly polýarlanan şöhläni almak üçin niýetlenen abzallar;



6.20-nji çyzgy

b) özara perpendikulýar tekizliklerde polýarlanan iki sany şöhläni almak üçin niýetlenen abzallar.

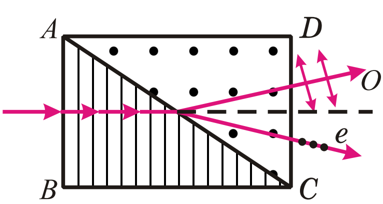
1. *Nikolyň prizmasy*. Bu abzala ýöne nikol hem diýilýär. Ol island şpatyndan iki sany gönüburçly prizma görnüşinde kesilip alnyp, kanada balzamy bilen bir-birine ýelmenip ýasalýar *(6.20-nji çyzgy)*.

Prizmalaryň ýiti burçlary 22° we 68°, ýagtylygyň düşýän *AB* grany kristalyň optiki oky (*OO*) bilen 48° burç emele getirýär. Kanada balzamynyň döwme görkezijisi n_b=1,55, ýagny n_o-dan kiçidir ($n_b < n_o$).

Adaty ýagtylyk iki prizmany sepleýän kanada balzamyna 76°26′ burç bilen düşýär. Bu burç çäk burçdan uludyr, şonuň üçin doly içki serpikmä sezewar bolup prizmadan çykýar. Adaty däl ýagtylyk bolsa nikoldan çyzykly polýarlanan görnüşde geçýär. Nikolyň prizmasy ultramelewşe şöhlelere ulanarlykly däldir, sebäbi kanada balzamy bu şöhleleri siňdirýär.

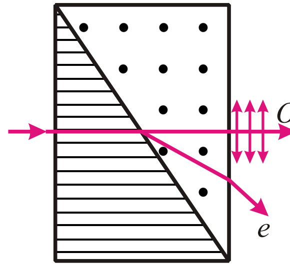
2. *Wollastonyň prizmasy*. Bu abzal hem island şpatynyň kristalyndan ýasalyp, optiki oklary özara perpendikulýar bolan iki sany prizmadan ybaratdyr *(6.21-nji çyzgy)*.

ABC prizmada optiki ok *AB* grana parallel, *ACD* prizmada optiki ok, çyzygyň tekizligine perpendikulýar. Tebigy ýagtylyk *AB* grana perpendikulýar düşýär, *ABC* prizmada emele gelýän adaty we adaty däl ýagtylyklar prizmanyň optiki okuna perpendikul-



6.21-nji çyzgy

ýar ugur boýunça dürli tizlikler bilen ýaýraýarlar. *ADC* prizmada-da adaty we adaty däl ýagtylyklar optiki oka perpendikulýar ýaýra-ýar. Prizmalaryň optiki oklary özara perpendikulýardyklaryna görä birinji (*ABC*) prizmadaky adaty ýagtylyk ikinji (*ADC*) prizmada adaty däl ýagtylyga we tersine öwrülýär. Şeýlelikde, birinji (*ABC*) prizmada adaty bolan ýagtylyk şöhleleri prizmalaryň araçäginde n_e/n_o göräli döwme görkezijisi boýunça döwülýär, birinji (*ABC*) prizmada adaty däl bolan ýagtylyk şöhlesi prizmalaryň araçäginde n_o/n_e göräli döwme görkezijisi boýunça döwülýär. Island şpaty üçin $n_o>n_e$ onda $n_e/n_o<1$ we $n_o/n_e>1$ bolýandygyna görä Wollastonyň abzalyndan çykan çyzykly polýarlanan şöhleler ilki düşen ugruna simmetrik dürli tarapa ýaýraýarlar. Şeýlelikde, adaty we adaty däl ýagtylyk şöhleleriniň arasy kanagatlanarly derejede uzaklaşýar.

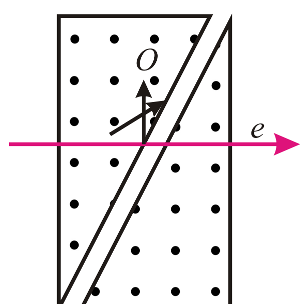


6.22-nji çyzgy

3. *Roşonyň prizmasy*. Bu abzal Wollastonyň prizmasyna meňzeş bolýar. Bu abzalda birinji prizmada şöhle optiki oka parallel ýaýraýar *(6.22-nji çyzgy)*.

Roşonyň prizmasynda adaty ýagtylyk şöhlesi tebigy ýagtylygyň düşýän ugry boýunça ýaýraýar, adaty däl şöhle döwlüp gyşarýar.

4. *Glanyň-Fukonyň prizmasy*. Bu abzalda prizmalaryň optiki oklary çyzgynyň tekizligine perpendikulýar görnüşde bolar ýaly ýerleşdirilýär *(6.23-nji çyzgy)*.



6.23-nji çyzgy

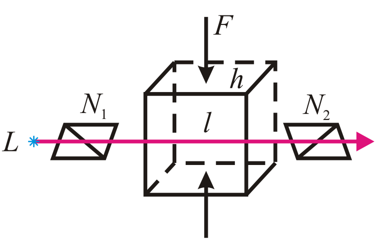
Prizmalaryň arasynda howa gatlagy galar ýaly ýerleşdirilýär. Adaty ýagtylyk çäk burçdan uly ýagdaýda howa gatlagyna düşende doly **serpigýär**. Netijede, çyzykly polýarlanan adaty däl ýagtylyk şöhlesi abzaldan geçýär.

6.7. Emeli anizotroplyk

Adaty izotrop maddalar käbir daşky täsire sezewar edilende, anizotrop häsiýetli madda öwrülýärler, ýagny içinden geçýän ýagtylygy ikä bölmek ukybyna eýe bolýarlar. Daşky täsir diýlende mehaniki (deformasiýany ýüze çykarýan) täsiri, elektrik meýdanynyň täsiri, magnit meýdanynyň täsiri göz öňünde tutulýar. Bularyň her birine aýratynlykda seredip geçmek maksadalaýykdyr.

1. Deformasiýanyň täsirinde döreýän anizotroplyk

Mehaniki deformasiýa sezewar edilen optiki izotrop maddalaryň käbiri optiki anizotrop madda öwrülýär. Mysal üçin, bir ugur bilen gysylanda (süýndürilende) käbir galyňlykly adaty aýna bir okly kristalyň häsiýetine eýe bolýar. Onuň optiki oky gysylýan (süýndürilýän) ugur bilen gabat gelýär. Mehaniki deformasiýanyň täsirindäki anizotroplyga 6.24-nji çyzgyda şekillendirilen gurnama arkaly syn etmek mümkin.



6.24-nji çyzgy

Baş tekizlikleri özara perpendikulýar bolan N_1 we N_2 nikollaryň arasynda käbir l

galyňlykly aýna ýerleşdirilýär *(6.24-nji çyzgy)*. Eger aýna deformasiýa sezewar edilmese, bu ulgamdan ýagtylyk geçmeýär, ýagny N_1 nikoldan çyzykly polýarlanyp çykan ýagtylyk N_2 nikoldan geçmeýär. Aýna deformirleýji güýç goýlanda oňa giren ýagtylyk şöhlesi adaty we adaty däl ýagtylyklara dargaýar. Netijede, N_2 nikoldan ýagtylyk geçýär. N_1 we N_2 polýarlaýjylaryň baş tekizliklerini deformasiýa sebäpli aýnada ýüze çykan «optiki ok» bilen 45° burç emele geler ýaly ýerleşdirilende has gowy netije alynýar. Anizotroplygy häsiýetlendirýän ulülyk, adaty we adaty däl ýagtylyklaryň döwülme görkezijileriniň tapawudydyr **(**n_o-n_e**)**. Bu ululyk aýna goýulýan napryýaženiýä (üst birligine düşýän güýjüň) göni baglydyr. Belli bolşy ýaly napryýaženiýe: $P_z = \frac{F}{S} = \frac{F}{lh}$ görnüşde aňladylýar. Onda $n_o - n_e = kP_z$.

Bu ýerde k – maddanyň tebigatyna bagly bolan hemişelik. Galyňlygy l-e deň bolan aýnadan geçen adaty we adaty däl ýagtylyklaryň optiki ýollarynyň tapawudy

$$\delta = l(n_0 - n_e) = kP_z l \qquad \textbf{(6.26)}$$

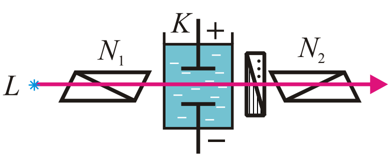
aňlatma arkaly kesgitlenilýär. Optiki ýollaryň tapawudyny ýagtylygyň tolkun uzynlygyna bölüp alarys:

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{k}{\lambda} P_z l = cP_z l. \qquad \textbf{(6.27)}$$

Bu ýerde $c = \frac{k}{\lambda}$ – maddany häsiýetlendirýän ululyk. (n_o-n_e) – ululyk položitel-de, otrisatel-de bolup bilýär.

Emeli anizotroplyga monohromatik ýagtylykda N_2 polýarlaýjy arkaly syn edilende aýnanyň kä ýeri garañky, kä ýeri ýagty bolup görünýär we aýnada naprýaženiýäniñ (P_z) paýlanyşy barada maglumat almaga mümkinçilik berýär. Eger ak ýagtylykda syn edilse, onda aýnanyñ dürli ýerleriniñ reñki dürli bolup görünýär. Emeli anizotroplyk, dury maddalarda naprýaženiýäniñ (P_z) paýlanmasyny derñemekde örän duýgur usuldyr. Tehnikada we gurluşykda naprýaženiýäniñ paýlanmasyny bilmekligiñ ähmiýeti uludyr. Şonuñ üçin dury maddalardan taýýarlanan mysaly şekillerde naprýaženiýäniñ paýlanmasy öwrenilip soñra alnan netijäni dury däl maddalara ulanmakda peýdalanýarlar.

2. Elektrik meýdanynyñ täsirindäki anizotroplyk. Kerriñ effekti



6.25-nji çyzgy

1875-nji ýylda Kerr, köp suwuklyklaryñ, elektrik meýdanynyñ täsirinde anizotrop häsiýete eýe bolýandygyny, tejribeler arkaly ýüze çykardy. Elektrik meýdanynyñ täsirinde izotrop maddalar (suwuklyklar, gazlar, gaty jisimler) bir okly kristala meñzeş häsiýete eýe bolýar. Bu maddalaryñ «optiki oky» elektrik meýdanynyñ güýjenme wektorynyñ ugry boýunça ugrukdyrylýar. Kerriñ effektini ýüze çykarýan gurnama 6.25-nji çyzgyda şekillendirilen.

Baş tekizlikleri özara perpendikulýar bolar ýaly ýerleşdirilen N_1 we N_2 nikollaryñ arasynda iki elektrodly dury gaba (K) suwuklyk guýlup ýerleşdirilýär. Eger elektrodlar elektrik çeşmesine birikdirilip zarýadlandyrylmasa ulgamdan ýagtylyk geçmeýär. Elektrodlar zarýadlandyrylyp olaryñ arasynda elektrik meýdany ýüze çykanda N_2 nikoldan ýagtylyk geçýär. Hadysanyň anyk görünmegi üçin polýarlaýjylaryň (N_1we N_2) baş tekizlikleri meýdanyň güýjenme wektory («optiki ok») bilen 45° burç emele getirer ýaly ýerleşdirilýär. 6.25-nji çyzgydaky K gaba **Kerriň öýjügi** (ýaçeýkasy) diýilýär. Kerriň öýjüginden geçen ýagtylyk elliptik polýarlanan bolýar, ol B öwezini dolduryjy (kompensator) arkaly derňelýär.

Elektrik meýdanynyň täsirinde ýüze çykýan anizotroplygyň hasabyna (n_o-n_e) tapawut döreýär. Bu tapawut kesgitli tolkun uzynlykly ýagtylyk üçin elektrik meýdanynyň güýjenme wektorynyň ($\vec{E}$) ululygynyň kwadratyna proporsional bolýar $(n_o\text{-}n_e)=kE^2$.

Ýagtylyk l galyňlykly maddadan geçende, adaty we adaty däl ýagtylyklaryň optiki ýollarynyň tapawudy:

$$\delta = l(n_o - n_e) = klE^2. \qquad (6.28)$$

Olaryň fazalarynyň tapawudyny optiki ýollarynyň tapawudy arkaly aňladyp alarys:

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{\delta}{\lambda} = 2\pi BlE^2. \qquad (6.29)$$

Bu ýerde $B = \dfrac{k}{\lambda}$ Kerriň hemişeligi. Köp suwuklyklar üçin $n_o>n_e$, ýagny $B>0$. Emma $B<0$ bolan suwuklyklar hem bolýar.

Kerriň effektiniň dowamlylygy örän gysga: τ~$10^{-12}s$. Şoňa görä Kerriň effekti örän gysga wagt dowamynda açylyp-ýapylýan gurluş (fotozatwor) hökmünde, ýagtylygyň depginini modulirleýji hökmünde we ş.m. maksatlar üçin ylymda, tehnikada giňden peýdalanylýar.

2. Magnit meýdanynyň täsirindäki anizotroplyk. Kottonyň – Mutonyň effekti

Käbir izotrop maddalar magnit meýdanynyň täsirinde anizotrop häsiýete eýe bolýarlar. Bu hadysa 1907-nji ýylda E.Kotton we H.Muton tarapyndan ýüze çykaryldy. Şoňa görä oňa Kottonyň-Mutonyň effekti hem diýilýär. Bu hadysa gözegçilik edilýän gurnama Kerriň effektini ýüze çykarýan gurnama meňzeşdir. Magnit meýdanynyň güýjenme wektory ýagtylygyň ýaýraýan ugruna perpendikulýar ugrukdyrylýar. Anizotroplyk sebäpli döreýän (n_o-n_e) tapawut magnit güýjenme wektorynyň ($\vec{H}$) ululygynyň kwadratyna göni baglydyr: $n_o - n_e = DH^2$. Onda optiki ýollaryň tapawudyny: $\delta = l(n_o - n_e) = DlH^2$, fazalar tapawudy arkaly aňladyp alarys:

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{\delta}{\lambda} = 2\pi\frac{D}{\lambda}lH^2 \qquad (6.30)$$

ýa-da $\Delta\varphi = 2\pi clH^2$.

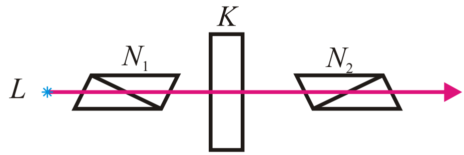
Bu ýerde $c = \dfrac{D}{\lambda}$ - maddanyň tebigy häsiýetine bagly bolan hemişelik.

Kottonyň-Mutonyň effekti suwuklyklarda, dury gaty jisimlerde, kolloidlerde ýüze çykýar, emma gazlarda anyk ýüze çykmaýar.

6.8. Ýagtylygyň polýarlanma tekizliginiň aýlanmasy

Çyzykly polýarlanan ýagtylyk kwars kristalyndan onuň optiki okunyň ugry boýunça geçirilende, ýagtylygyň polýarlanma tekizligi şöhläniň daşynda aýlanýar.

Bu hadysa 1816-njy ýylda fransuz fizikleri Arago we Frenel tarapyndan ýüze çykarylan. Hadysa syn etmek üçin niýetlenilen gurnama 6.26-njy çyzgyda şekillendirilen. Baş tekizlikleri özara perpendikulýar bolan N_1 we N_2 polýarlaýjylar (nikollar) ulgamynda ýagtylyk geçmeýär. Eger olaryň arasynda, optiki okuna perpendikulýar edip kwars kristaly ýerleşdirilse, N_2 polýarlaýjydan ýagtylyk geçýär.



6.26-njy çyzgy

Ulgamdan ýagtylygyň geçmezligini gazanmak üçin N_2 polýarlaýjyny şöhläniň daşynda käbir φ burça aýlamaly. Bu burç *k* kwars kristalynyň içinden geçýän ýagtylygyň polýarlanma tekizliginiň aýlanma burçudyr. Ýagtylygy polýarlanma tekizligini aýlamaga ukyply maddalara ***optiki işjeň*** maddalar diýilýär. Optiki işjeň maddalara ikilenen şöhledöwüji häsiýeti bolan kristallardan (island şpaty, kinowar we ş.m.) başga-da käbir optiki izotrop kristallar, dury suwuklyklar (skipidar, nikotin we ş.m.) we erginler (benzolda komforyň ergini, gandyň suwdaky ergini we ş.m.) degişlidir.

Köp optiki işjeň maddalar, ýagtylygyň polýarlanma tekizligini çepe ýa-da saga aýlaýar (ýagtylygyň polýarlanma tekizliginiň aýlanma ugry ýagtylyk şöhlesiniň ýaýraýan ugrunyň garşysyna seredilende sagat peýkamjygynyň aýlanýan ugruna aýlanýan bolsa, onda beýle işjeň maddalara saga aýlaýan ýa-da položitel işjeň maddalar diýilýär we tersine).

Optiki işjeň maddalarda ýagtylygyň polýarlanma tekizliginiň aýlanma burçy maddanyň ýagtylyk geçýän galyňlygyna baglydyr:

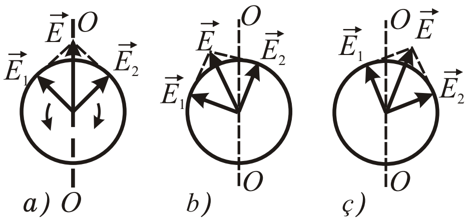
$$\varphi = \alpha l . \tag{6.31}$$

Bu ýerde α udel aýlanma burçy bolup optiki işjeň maddanyň bir birligine deň bolan galyňlygyň aýlama burçuny aňladýar. Erginler üçin:

$$\varphi = [\alpha] cl, \qquad (6.32)$$

c—optiki işjeň maddanyň göwrüm birligindäki mukdary $\frac{kg}{m^3}$; $[\alpha]$— ergininiň udel aýlama burçy $\left(\frac{gradus}{m\frac{kg}{m^3}}\right)$.

(6.32) aňlatma Bionyň kanuny hem diýilýär. Bu aňlatmanyň kömeginde ergindäki işjeň maddanyň göwrüm birligindäki mukdaryny kesgitlemek mümkin (mysal üçin, ergindäki gandyň mukdaryny). Ergindäki gandyň mukdaryny kesgitlemek üçin niýetlenen abzala polýarimetr ýa-da saharimetr diýilýär.



6.27-nji çyzgy

Tekiz polýarlanan ýagtylygyň polýarlanma tekizliginiň aýlanmasynyň sebäbini 1823-nji ýylda farnsuz fizigi Frenel düşündirýär.

Freneliň pikirine görä, optiki işjeň madda tekiz polýarlanan monahromatik ýagtylyk giren dessine, garşylykly ugra aýlanýan, töwerekleýän polýarlanan iki tolkuna dargaýar. Bu tolkunlaryň ýygylyklary düşýän tolkunyň ýygylygyna deň bolup, elektrik wektorlary

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

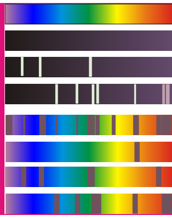
gatnaşyk bilen baglanyşýar. Bu wektoryň diagrammasy 6.27-nji çyzgyda şekillendirilen. $\vec{E}_1$ we $\vec{E}_2$ wektorlaryň amplitudalary $\vec{E}$ wektoryň amplitudasynyň ýarysyna sanma-san deňdir. Eger $\vec{E}_1$ we $\vec{E}_2$ wektorlar şol bir burç tizlikde aýlanýan bolsalar, onda Er wektor mydama OO okuň ugry boýunça ýerleşýär *(6.27-nji **a** çyzgy)*. $\vec{E}_1$ we $\vec{E}_2$ wektorlar optiki işjeň madda-da dürli burç tizlikler bilen aýlanýarlar. Şeýlelikde, eger $\upsilon_1>\upsilon_2$ bolsa, $\vec{E}$ wektor çepe aýlanýar *(6.27-nji **b** çyzgy)*, eger $\upsilon_1>\upsilon_2$ bolsa, $\vec{E}$ wektor saga aýlanýar *(6.27-nji **ç** çyzgy)*. Optiki işjeň däl maddalarda $\upsilon_1=\upsilon_2$.

Magnit meýdanynyň täsirinde optiki işjeň däl maddalaryň magnit meýdanynyň ugruna ýaýraýan ýagtylygyň polýarlanma tekizligini aýlanmaga ukyply bolýandygyny 1846-njy ýylda Faradeý ýüze çykardy. Bu hadysa Faradeýiň hadysasy (effekti) ýa-da polýarlanma tekizliginiň magnit aýlanmasy diýilýär. Polýarlanma tekizliginiň aýlanma burçy

$$\varphi = VlB \qquad (6.33)$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär. Bu ýerde l – ýagtylygyň magnit meýdanynda geçýän ýoly; B – daşky birhilli magnit meýdanynyň induksiýasy; V – Werdäniň hemişeligi. Ol maddanyň tebigatyna we ýagtylygyň tolkun uzynlygyna bagly bolup, berlen madda üçin hemişelik ululykdyr.

VII BAP



ÝAGTYLYGYŃ DISPERSIÝASY, SIŃDIRILMESI WE PYTRAMASY

7.1. Kadaly (normal) dispersiýa. Kadaly däl (anomal) dispersiýa

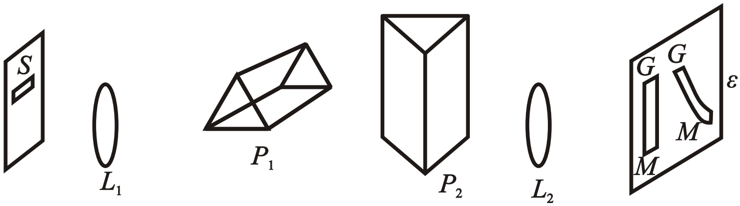
Birhilli we izotrop maddalaryň tekiz araçäginde ýagtylygyň döwülme kanuny

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} \tag{7.1}$$

görnüşde aňladylýar.

Bu aňlatma diňe monohromatik ýagtylyk üçin dogrudyr. Dürli ýygylykly ýagtylyk üçin döwülme görkeziji dürli ululyklara eýe bolýar. Başgaça aýdanymyzda maddalaryň ýagtylygy döwme görkezijisi ýygylygyň (tolkun uzynlygyň) funksiýasydyr:

$$n = f(\lambda_0)\,. \tag{7.2}$$



7.1-nji çyzgy

Bu baglanyşyk ilkinji gezek 1672-nji ýylda Nýuton tarapyndan ýüze çykarylýar. Nýutonyň tejribesiniň gurnamasy 7.1.-nji çyzgyda şekillendirilen.

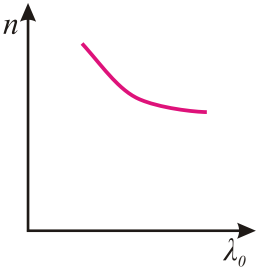
Çyzyk görnüşli yşdan *(s)* ak ýagtylyk şöhlesi ekrana *(ε)* gönükdirilýär. Eger şöhläniň ýolunda diňe bir sany prizma *(P_1)* ýerleşdirilse, onda ekranda *(ε)* dik dürli reňkli zolak *(I)* emele gelýär, onuň bir ujy gyzyl *(G)*, beýleki ujy melewşe *(M)* bolup, ol ikisiniň arasynda ak ýagtylygyň düzümindäki reňkli ýagtylyklar ýerleşýär. Bu zolaga prizma arkaly (prizmatik) alynýan spektr diýilýär.

Ak ýagtylyk difraksiýa gözeneginden geçende-de spektre dargaýar. Emma spektriň reňkleriniň ýerleşiş tertibine ters bolýar. Difraksiýa gözeneginden geçýän ýagtylykda

$$d\sin\varphi = \pm 2m\frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1,2,3,...) \qquad (7.3)$$

aňlatmadan görnüşi ýaly, sinφ ýagtylygyň tolkun uzynlygyna göni proporsional. Şol sebäpli tolkun uzynlygy uly bolan (gyzyl reňkli) ýagtylyk tolkunlary tolkun uzynlygy kiçi bolan (melewşe reňkli) ýagtylyk tolkunyndan uly burça gyşarýar.

Ak ýagtylyk prizmadan geçende döwülme görkezijä baglylykda spektre dargaýar. Şol sebäpli (kadaly dispersiýada) tolkun uzynlygy uly bolan (gyzyl reňkli) ýagtylyk tolkunlary tolkun uzynlygy kiçi bolan (melewşe reňkli) ýagtylyk tolkunlaryndan kiçi burça gyşarýar. Tolkun uzynlygynyň kiçelmegi bilen döwülme görkeziji birsydyrgyn (monoton) artýar. Absolýut döwülme görkezijiden tolkun uzynlyk boýunça alnan önüme $D = \frac{dn}{d\lambda}$ **maddanyň dispersiýasy** diýilýär. Bu



7.2-nji çyzgy

ululyk tolkun uzynlygyna baglylykda döwme görkezijiniň üýtgeýşiniň çaltlygyny görkezýär.

Nýutonyň gurnamasynda ýagtylyk şöhlesiniň ýolunda birinji prizma (P_1) golaý aralykda, oňa atanak ýagdaýda ikinji prizma (P_2) ýerleşdirilse, onda ekranda (ε) dik zolagyň ýerine gyşyk zolak *(II)* alynýar. Gyşarma spektriň gysga tolkunlaryna süýşdügiçe güýçlenýär.

Dürli maddalarda ýagtylygyň ýaýraýşyny düşündirmek boýunça Kreneliň garaýşyny ösdürip, Koşi döwme görkezijiniň tolkun uzynlygyna bagly funskiýasynyň **(7.2)** analitik aňlatmasyny

$$n = A + \frac{B}{\lambda_0^2} + \frac{C}{\lambda_0^4} \qquad \textbf{(7.4)}$$

görnüşini teklip etdi.

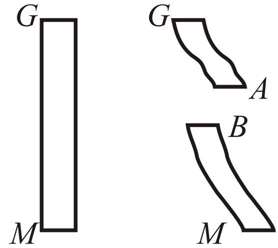
Bu ýerde A,B,C – hemişelik ululyklar, olar her bir madda üçin tejribe arkaly kesgitlenilýär. Köp halatlarda **(7.4)** aňlatmanyň birinji iki agzasy bilen kanagatlanarly netije gazanmak mümkin:

$$n = A + \frac{B}{\lambda_0^2}. \qquad \textbf{(7.5)}$$

Şu ýerden görnüşi ýaly tolkun uzynlygynyň (λ_0) kiçelmegi bilen döwme görkeziji (n) ulalýar.

Ýagtylygyň maddanyň döwme görkezijisiniň tolkun uzynlygyna (λ_0) (ýygylygyna, faza tizligine) baglylykda üýtgemesine **dispersiýa** diýilýär.

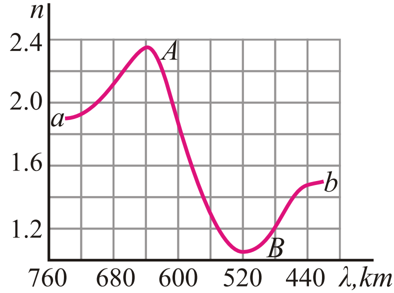
Amalyýetde giňden ulanylýan köp maddalarda (aýna, kwars, suw we ş.m.) ýagtylygyň görüş duýgusyny döredýän tolkun uzynlyklarynyň çäginde, λ_0-tolkun uzynlygynyň kiçelmegi bilen döwme görkeziji ulalýar. Muňa **kadaly (normal) dispersiýa** diýilýär *(7.2-nji çyzgy)*.



7.3-nji çyzgy

Ýoduň bugy bilen doldurylan prizmadan ak ýagtylyk şöhlesi geçende, gök şöhlelere görä gyzyl şöhleleriň güýçli gyşarýandygy 1862 ýylda fransuz fizigi Leru tarapyndan ýüze çykarylýar. Leru bu hadysa **kadaly däl (anomal) dispersiýa** diýip at berýär.

Nemes fizigi A.Kundt atanak ýerleşdirilen prizmalar usulyndan peýdalanyp, dürli maddalarda ýagtylygyň dispersiýasyny derňemek arkaly kadaly däl (anomal) dispersiýanyň ýagtylygyň madda tarapyndan siňdirilmesi bilen baglanyşygynyň kanunyny açdy. Spektriň käbir çäginde kadaly däl dispersiýany ýüze çykarýan her bir madda spektriň şol bölegini güýçli siňdirýär. Spektriň A-nokatdan B-nokada çenli aralygy üzük *(7.3-nji çyzgy)*, bu aralyga degişli spektrler madda tarapyndan siňdirilen. Sianiniň ergininde görüş duýgusyny döredýän spektrde dispersiýa derňelende 7.4-nji çyzgydaky ýaly egri alynýar. Egriniň *aA* we *Bb* böleginde λ tolkun uzynlygyň kiçelmegi bilen ***n*** döwme görkeziji ulalýar, diýmek, kadaly (normal) dispersiýa ýüze çykýar. Egriniň *AB* böleginde λ tolkun uzynlygyň



7.4-nji çyzgy

kiçelmegi bilen ***n*** döwme görkeziji hem kiçelýär, diýmek, kadaly däl (anomal) dispersiýa ýüze çykýar. Spektriň λ=600 ***nm*** tolkun uzynlygy sianininiň ergininde doly siňdirilýär, şoňa görä-de dispersiýanyň kadaly dälligi (anomallygy) ýüze çykýar.

Aýnanyň, kwarsyň we ş.m. käbir dury maddalarda görüş duýgusyny döredýän tolkunlaryň çäginde kadaly däl (anomal) dispersiýa ýüze çykmaýar. Sebäbi şeýle maddalar üçin kadaly däl dispersiýa ultramelewşe tolkunlaryň çägindedir. Şeýlelik bilen, ähli maddalar hem spektriň ol ýa-da beýleki çägindäki tolkunlary siňdirýärler we netijede olaryň hem dispersiýa egrisi görnüşi boýunça 7.4-nji çyzgydaky ýaly bolýar. Diýmek, kadaly we kadaly däl dispersiýa düşünjeleri gapma-garşylykly däl-de, özara baglanyşykly we şol bir kanuna boýun egýärler.

7.2. Dispersiýanyň nusgawy elektron nazaryýeti

Ýagtylygyň dispersiýasy elektromagnit tolkunlarynyň maddanyň düzümindäki zarýadly bölejikler bilen özara täsiriniň netijesidir. Şol sebäpden D.K.Makswelliň makroskopik elektromagnit nazaryýeti dispersiýa hadysasyny kanagatlanarly derejede düşündirmegi başarmady. Dispersiýanyň nusgawy nazaryýeti G.Lorens tarapyndan maddanyň gurluşynyň elektron nazaryýeti döredilenden soň işlenilip düzüldi.

Makswelliň elektromagnit nazaryýetine görä, maddanyň ýagtylygy absolýut döwülme görkezijisiniň onuň göräli dielektrik syzyjylygy bilen baglanyşygy

$$n = \sqrt{\varepsilon} \tag{7.6}$$

aňlatma görnüşindedir.

Göräýmäge bu aňlatma tejribede alnan netijä ters gelýän ýaly. Mysal üçin, elektrostatikadan belli bolşy ýaly, suw üçin ε=81. Şol bir wagtda göze täsir edýän elektromagnit tolkunlary üçin suwuň absolýut döwme görkezijisi 9 däl-de 1,33-e deňdir. Emma bu gapma-garşylyk Makswelliň nazaryýetiniň düýpli kemçilikleri bilen baglanyşykly bolman, eýsem dispersiýanyň hasaba alynmazlygy, ýagny (7.6) aňlatmanyň nädogry ulanylmasynyň netijesidir.

Göräli dielektrik syzyjylyk ε hem edil döwme görkeziji n ýaly üýtgeýän elektromagnt meýdanynyň ν ýygylygyna baglydyr: $\varepsilon=\varepsilon(\nu)$. Hakykatdan hem suwuň göräli dielektrik syzyjylygy durnukly elektrostatik meýdanda $\varepsilon(0)=81$ bolmagy, suwuň uly dipol momente eýe bolan molekulalaryň polýarlanmagy bilen şertlendirilýär. Üýtgeýän elektrik meýdanynda, suw molekulalarynyň noldan tapawutly inersiýa momentleri bardygy üçin, birbada kesgitli ugra ugrukdyrylmasy kyn bolýar. Üýtgeýän elektrik meýdanynyň ýygylygy kän bir uly bolmadyk, ýagny molekulalar kesgitli ugra doly ugrugyp bilmek mümkinçiligi bolýan ýygylyklarynda $\varepsilon=\varepsilon(0)=81$-e ýakyn bahalara eýe bolup bilýär. Ýeterlik ýokary ýygylykly üýtgeýän elektrik meýdanda polýar molekulaly dielektriklerde molekulalaryň kesgitli ugurda polýarlanmasy amala aşyp bilmeýär. Şoňa görä, görünýän ýagtylyk $(\nu \sim 10^{15} Gs)$ üçin maddanyň göräli dielektrik syzyjylygy diňe onuň elektronlarynyň polýarlanmasy bilen şertlendirilýär. Başgaça aýdanymyzda, maddanyň düzümindäki atomlaryň, molekulalaryň, elektronlaryň ýa-da ionlaryň ýagtylyk tolkunlarynyň üýtgeýän elektromagnit meýdanynyň täsirindäki mejbury yrgyldysy bilen polýarlanmasy arkaly şertlendirilýär. Şoňa görä-de, suw üçin

$$\varepsilon\left(v\right) < \varepsilon\left(0\right) \text{ we } n < 9$$

ýagdaý ýüze çykýar.

Dispersiýanyň elektron nazaryýetinde, birjynsly dielektrik, ýagtylyk şöhlesiniň (üýtgeýän elektromagnit meýdanynyň) täsirinde mejbury yrgyldaýan ossillýatorlaryň toplumy hökmünde seredilýär. Ýönekeý ýagdaýda atom hususy ýygylygy bolan garmoniki ossillýator diýlip kabul edilýär (7.6). Aňlatmadan görnüşi ýaly ýönekeý ýagdaýda dispersiýa dielektrik syzyjylygyň ýygylyga baglylygynyň netijesi hökmünde seretmek mümkin.

Elektrik hadysalary dersinden bilşimiz ýaly, dielektrik syzyjylyk

$$\varepsilon = 1 + \chi_e = 1 + \frac{P_e}{\varepsilon_o E}$$ (7.7) görnüşinde aňladylýar.

Bu ýerde χ_e –maddanyň dielektrik kabul edijiligi, ε_0 elektrik hemişelik, P_e – polýarlanma wektorynyň E elektrik meýdanynyň güýjenme wektorynyň ugruna proýeksiýasy.

Onda döwme görkeziji $$n^2 = 1 + \frac{P_e}{\varepsilon_0 E}. \quad (7.8)$$

Ýokarda belleýşimiz ýaly ýagtylyk tolkunlarynyň uly ýygylyga eýe bolmagyna görä, maddanyň polýarlanmasy diňe elektronlaryň süýşmesi bilen (elektron polýarlanma) şertlendirilýär. Onda birjynsly gurşaw üçin

$$P_e = N_o p_e. \quad (7.9)$$

Bu ýerde N_o - göwrüm birligindäki atomlaryň sany, P_e-bir atomyň dipol momenti. Yönekeý ýagdaýda P_e-niň ululygy atomyň daşky elektron gatlagyndaky ýadro bilen gowşak baglanyşykdaky elektronyň süýşmesi arkaly kesgitlenilýär. Bu elektronlara **optiki elektronlar** diýilýär.

Onda bir sany optiki elektronly atomlar üçin

$$p_e = -ez_o \text{ we } P_e = -N_o e z_o \tag{7.10}$$

aňlatmany alarys.

Bu ýerde e-elektronyň elektrik zarýadynyň absolýut ululygy, z_o-ýagtylyk tolkunlarynyň elektrik meýdanynyň täsirinde elektronyň süýşmesi (deňagramly ýagdaýyndan gyşarmasy), minus alamaty p_e we P_e wektorlaryň otrisatel zarýadly elektronyň z_o süýşmesine garşylykly ugrukdyrylandygyny aňladýar.

Şeýlelik bilen (7.7) we (7.8) aňlatmalarda

$$n^2 = 1 - \frac{N_o e}{\varepsilon_o} \frac{z_o}{E} \tag{7.7}$$

netije alynýar.

Görnüşi ýaly absolýut döwülme görkezijiniň ýygylyga baglylygy elektronyň z_0 süýşmesiniň E baglylygyny kesgitlemäge syrykdyrylýar.

Dury maddalar üçin ýönekeýleşdirilen ýagdaýda optiki elektrona üç sany güýç täsir edýär diýip kabul etmek mümkin.

a) Tolgundyryjy (mejbur ediji) güýç:

$$F = -eE = -eE_o \cdot exp\,(i\omega t). \tag{7.11}$$

Bu ýerde E_0 - elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň amplitudasy, $\omega=2\pi\nu$ -ýagtylyk tolkunynyň aýlaw ýygylygy.

b) optiki elektronyň atomyň beýleki bölegi bilen özara täsirinde döreýän yzyna gaýtaryjy kwazimaýyşgak güýç

$$F_{y.g} = -kz.$$

Bu ýerde $k=m\omega^2_o$ - kwazimaýyşgak güýjüň koeffisiýenti, ω_0 - elektronyň hususy yrgyldysynyň aýlaw ýygylygy. Onda

$$F_{y.g} = m\omega_0^2 z. \tag{7.12}$$

ç) Ýagtylygyň täsirinde maddanyň atomlarynyň ikilenji elektromagnit tolkunlarynyň şöhlelendirmesi, atomlaryň çaknyşmasy arkaly şöhlelenmeleri we beýleki sebäplere görä energiýanyň ýitgilerini hasaba alyp, umumylaşdyryp, elektronyň tizligine proporsional garşylyk güýji täsir edýär diýip kabul etmek mümkin. Onda:

$$F_{g.g} = -r\frac{dz}{dt}. \tag{7.13}$$

Şeýlelikde maddanyň optiki elektronlarynyň mejbury yrgyldyly hereketiniň differensial deňlemesi

$$m\,\frac{d^2 z}{dt^2} = -r\frac{dz}{dt} - m\omega_0^2\, zeE_0 \exp(i\omega t). \tag{7.14}$$

Ýa-da

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2\beta\,\frac{dz}{dt} + \omega^2 z = -\frac{e}{m}E_0 \exp(i\omega t) \tag{7.15}$$

görnüşde ýazylyp bilner.

Bu ýerde $\beta = \dfrac{r}{2m}$.

(7.15) differensial deňlemäniň çözülişini

$$z = z_0 E_0 \exp(i\omega t) \tag{7.16}$$

görnüşde almak mümkin.

(7.16) aňlatmany (7.15) aňlatmada ulanyp:

$$z_0 = \frac{\frac{e}{m}E}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2\beta\omega} \tag{7.17}$$

aňlatma alarys.

Bu alnan netijäni dielektrik syzyjylyk we maddanyň absolýut döwme görkezijisi üçin aňlatmalarda goýup

$$\varepsilon = 1 + \frac{N_0 e^2}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2) - i2\beta\omega}, \tag{7.18}$$

$$n^2 = 1 + \frac{N_0 e^2}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2) - i2\beta\omega} \tag{7.19}$$

aňlatmalary alarys. Aňlatmalardan görnüşi ýaly maddanyň elektrik syzyjylygy we döwme görkezijisi ýagtylygyň ýygylygyna *(ω)* baglydyr.

Maddanyň polýarlanmasyny

$$P = NP = N\alpha E_0 \tag{7.20}$$

görnüşde hem ýazmak mümkin, bu ýerde α-atomyň polýarlanmasyny aňladýar.

Onda $\alpha E_0 = ez_0$ bolýanlygy üçin

$$\alpha = \frac{ez_0}{E_0} = \frac{e^2}{m}\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\beta\omega}. \tag{7.21}$$

(7.18) we **(7.21)** aňlatmalardan görnüşi ýaly, maddanyň polýarlanmasy hem-de döwme görkezijisi kompleks ululykdyr.

Bu bolsa berlen maddada ýaýraýan tekiz tolkunyň, onuň fazasynyň şeýle-de amplitudasynyň üýtgeýändigini aňladýar. Tekiz tolkun maddada ýaýranda fazasynyň üýtgemesi onuň faza tizliginiň üýtgemesine getirýär. Bu bolsa öz gezeginde döwme görkezijini üýtgedýär, amplitudanyň üýtgemesi bolsa ýagtylygyň depginini üýtgedýär, ýagny ýagtylygyň maddada siňdirilmesini ýüze çykarýar.

Kompleks we hakyky döwme görkezijiler aşakdaky aňlatmanyň üsti bilen baglanyşandyrlar:

$$\tilde{n} = n - i\chi \ . \qquad (7.22)$$

Bu ýerde n we χ-hakyky ululykdyr. Şuňa meňzeşlikde kompleks tolkun sany:

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{c}\tilde{n}$$

girizip, maddada käbir y ugur boýunça ýaýraýan tolkuny aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - \tilde{k}y)] = E_0 \exp[i\omega(t - \frac{\tilde{n}}{c}y]] = E_0 \exp(-\frac{\omega\chi}{c}y) \cdot \exp[i\omega(t - \frac{n}{c}y)]$$

$$\text{ýa-da} \quad E = A(z) \exp\,[i\omega(t - \frac{n}{c}y)]. \qquad (7.23)$$

Bu alnan netije sönýän tekiz tolkunyň deňlemesidir.

Bu ýerde

$$A(x) = E_0 \exp(-\frac{\omega\chi}{c} \cdot y) \ . \qquad (7.24)$$

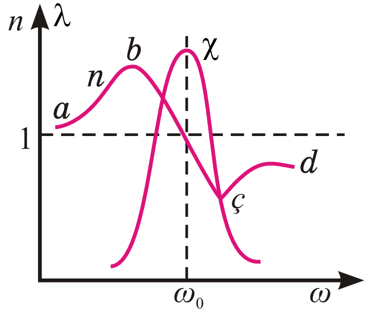
Sönýän tekiz tolkunyň amplitudasydyr. Amplitudadan depgine geçsek, onda deňleme

$$I = I_0 \exp(-2\frac{\omega\chi}{c}y) \qquad (7.25)$$

görnüşe eýe bolar. Bu yerde χ-ýagtylygyň siňdirilmesi bolup, oňa **ekstinksiýa** koeffisiýeti diýilýär.

$\omega = 2\pi\nu = 2\pi\dfrac{c}{\lambda}$ bahany (7.25) aňlatmada ýerine

ýerine goýup, $I = I_0 \exp\left(-4\pi \frac{\chi}{\lambda} y\right)$ aňlatmany alarys.



7.5-nji çyzgy

Eger $k = 4\pi \frac{\chi}{\lambda}$ diýip bellesek, onda sönýän tolkunyň depgini aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$I = I_0 \exp(-ky). \tag{7.26}$$

Bu ýerde k - maddanyň ýagtylygy siňdirme koeffisiýenti. (7.26) aňlatma **Bugeriň - Lambertiň kanuny** diýilýär.

Gazlar üçin ($n \approx 1$). (7.15) differensial deňlemäniň çözülişinden gazlaryň döwme görkezijisi we ekstinksiýa koeffisiýenti üçin

$$n = 1 + \frac{N_0 e^2}{2m\varepsilon_0} \cdot \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta\omega^2} \tag{7.27}$$

we

$$\chi = \frac{N_0 e^2}{m} \frac{2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2} \tag{7.28}$$

aňlatmalaryň alynýandygyny görkezmek bolar.

Döwme görkezijiniň *(n)* we ekstinksiýa koeffisiýentiniň *(χ)*, ýagtylygyň ýygylygy bilen baglanyşygynyň egrisi 7.5-nji çyzgyda şekillendirilen görnüşde bolýar.

Grafikden görnüşi ýaly *«ab»* we *«çd»* çäklerde ω-nyň artmagy bilen n artýar (kadaly dispersiýa), *bç* çäkde ω-nyň artmagy bilen n örän çalt kemelýär (kadaly däl dispersiýa). Kadaly däl dispersiýanyň çägi *(bç)* siňdirme zolagy bilen gabat gelýär. Siňdirme zolagyň örküji maddanyň optiki elektronlarynyň hususy yrgyldy ýygylygyna (ω_0) gabat gelýär. $\omega_0>>\omega$ we $\omega_0<<\omega$ şertlerde yrgyldynyň sönmesini häsiyetlendirýän $\beta\to 0$ $(4\beta^2\omega^2<<(\omega^2{}_0-\omega^2)^2)$ netijede $n\to 0$, $\chi\to 0$ ýagdaý ýüze çykýar. Diýmek, maddada ýaýraýan ýagtylygyň ýygylygy (ω) maddanyň optiki elektronlarynyň hususy yrgyldysynyň ýygylygyndan (ω_0) has köp tapawutlanýan bolsa, onda ýagtylyk madda tarapyndan siňdirilmeýär. Hakykatdan hem aýna, kwars, suw, gazlar ýaly maddalaryň dury bolmagynyň sebäbi bu maddalaryň optiki elektronlarynyň hususy yrgyldy ýygylyklarynyň, göze täsir edýän elektromagnit tolkunlarynyň ýygylyklarynyň çäginden daşda (ultramelewşe çäkde) ýerleşýänligi üçindir. Metallarda walent elektronlaryň köp bolýandygy sebäpli, islendik ýygylykly ýagtylyk bu elektronlaryň hususy yrgyldysyny oýandyryp bilýär. Şoňa görä-de, metallarda ähli ýygylyklara degişli ýagtylyklar hem siňdirilýärler.

Biz ýokarda atomlaryň (molekulalaryň) bir sany optiki elektrony bar ýagdaýyna seretdik. Hakykatda beýle ýagdaý örän seýrekdir. Atomlar we molekulalar dürli hususy ýygylyklarda yrgyldamaklyga ukyply birnäçe elektrony özünde saklaýarlar. Onda döwme görkezijiniň aňlatmasynda bu ýagdaý hasaba alynmalydyr.

Eger göwrüm birliginde N_0 sany atomy (molekulasy) bolan maddanyň her bir atomyndaky optiki elektronlarynyň emele getirýän ossillýatorlarynyň sany deň diýsek, onda maddanyň göwrüm birliginde ω_{oj} rezonans ýygylykly we β_j sönme koeffisiýentli ossilýatorlaryň sany $N_{oj}=N_0 f_j$ bolar.

Ähli ossillýatorlaryň täsirini hasaba almak üçin (7.19), (7.27), (7.28) aňlatmalarda N_0, ω_0 we β_j ululyklaryň ornuna N_{0j}, ω_{0j} we β_j ululyklary goýup, j-niň hemme bahalary boýunça-ähli ossillýatorlar boýunça jemleme geçirilmeli.

Onda

$$n^2 = 1 + \frac{N_0 e^2}{m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{oj}^2 - \omega^2 + 4\beta j\omega}, \tag{7.29}$$

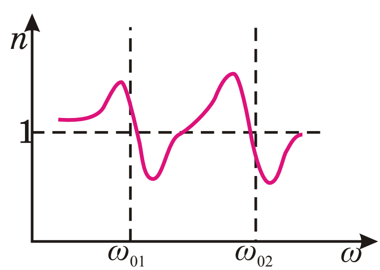
$$n = 1 + \frac{N_0 e^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_i(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_{0j}^2 - \omega^2)^2 - 4\beta_j^2 \cdot \omega^2}, \tag{7.30}$$

$$x = \frac{N_0 e^2}{m} \sum_j \frac{f_i 2\beta_j \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}. \tag{7.31}$$

aňlatmalary alarys.

Bu ýerde f_j- ululyk «ossillýatoryň güýji» diýlip atlandyrylýar. Bu ululyk elektronyň berlen yrgyldyly herekete gatnaşygynyň derejesini häsiýetlendirýär. Birnäçe hususy ýygylykly elektronlary bolan maddalar üçin dispersiýanyň egrisi 7.6-njy çyzgyda şekillendirilen.

Ossillýatoryň güýji diýilýän düşünjäniň fiziki manysyny dispersiýanyň nusgawy nazaryýeti düşündirip bilmeýär. Ony dispersiýanyň kwant nazaryýeti düşündirýär. Kwant nazaryýetinde hususy yrgyldy ýygylyklara eýe bolan atom ossillýatorlaryna, energiýanyň kesgitli ülüşlerine (diskret) eýe bolup bilýän ulgamlar görnüşinde seredilýär. Hususy ýygylyklaryň (ω_{oj})



7.6-njy çyzgy

ornuna, atomyň E_j energetik haldan E_i energetik hala geçiş ýygylygy ulanylýar, ýagny

$$\omega_{ji} = 2\pi \frac{E_j - E_i}{n}.$$

f_j -ossillýatoryň güýjüniň ýerine j energetik haldan i energetik hala geciş ähtimallygyna proporsional bolan f_{ji} täzeçe ossillýatoryň güýji düşünjesi girizilýär. Adatça ossillýatoryň güýji tejribe usulynda kesgitlenilýär.

1909-njy ýylda rus fizigi D.S.Roždestwenskiý ýagtylygyň dispersiýasyny mukdar taýdan öwrenmegiň täze usulyny işläp düzdi. Bu usulda derňemeler interferometr we spektrograf bilen birbada geçirilip, döwülme görkezijiniň ýagtylygyň tolkun uzynlygyna baglylykda üýtgeýşi diňe siňdirme zolagynyň golaýynda däl-de, eýsem ol zolagyň içindäki ýagdaýy öwrenmäge mümkinçilik berýär. Bu usula **«gaňyrçak usuly»** diýilýär.

7.3. Ýagtylyk tolkunlarynyň faza we topar tizlikleri

Faza we topar tizlik düşünjesini girizmezden ýagtylygyň ýaýrama tizligi barada anyk zat aýtmak kyn.

$$n_{21.} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$$

kanun boýunça kesgitlenýän döwme görkeziji iki gurşawda ýagtylygyň faza tizlikleriniň gatnaşygyna deňdir. Faza tizlik düşünjesi takyk monohromatiklige eýe bolan tolkunlar üçin ulanarlyklydyr. Adaty ýagtylyk çeşmeleri takyk monohromatiklige eýe bolan tolkunlary şöhlelendirmeýärler.

Goý, hyýaly ýagdaýda takyk monohromatiklige eýe bolan tolkun bar bolsun we onuň deňlemesi

$$y = A\sin\omega(t - \frac{x}{v}) \tag{7.33}$$

görnüşde aňladylýan bolsun. Bu deňleme x-okunyň ugry boýunça v tizlik bilen ýaýraýan tekiz tolkunyň deňlemesidir. $\omega(t-\frac{x}{v})$ ululyga tolkunyň fazasy diýilýär.

Goý, tolkunyň fazasy hemişelik bolsun:

$$\omega(t - \frac{x}{v}) = hemişelik\ . \tag{7.34}$$

Bu deňligi differensirläp, alarys:

$$dt - \frac{1}{v}dx = 0.$$

Bu ýerde

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{7.35}$$

tolkunyň fazasynyň wagta görä süýşmesini aňladýar, şonuň üçin oňa **tolkunyň faza tizligi** diýilýär.

Tekiz monohromatik tolkunyň deňlemesini

$$y = A\sin(\omega t - kx) \tag{7.36}$$

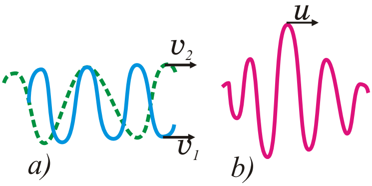
görnüşde hem aňlatmak mümkin. Bu ýerde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ bolup, oňa **tolkun sany** diýilýär.

Onda fazany hemişelik hasap edip:

$$\omega t - kx = hemişelik$$

we ony wagta görä differensirläp alarys:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k}. \tag{7.37}$$



7.7-nji çyzgy

Onda (7.35) we (7.37) deňlemelerden tolkunyň faza tizligi üçin

$$v = \frac{\omega}{k} \tag{7.38}$$

aňlatmany alarys.

Belli bolşy yaly ýagtylyk tolkunlary üznüksiz däldir, olar kesgitli uzynlyga eýe bolan impulslar (suglar, tolkun parçasy) görnüşinde şöhlelendirilýärler. Takyk monohromatiklige eýe bolan ýagtylyk tolkunlarynyň ýok diýilmesiniň sebäbi hem şudyr. Tolkunlaryň goşulma (superpozisiýa) düzgünine we Furýeniň hataryna dargatma esaslanyp, islendik tolkuny sinusoidal tolkunlaryň ulgamy görnüşinde seretmek mümkin. Beýle tolkunlaryň ulgamyna tolkunlaryň bukjasy ýa-da tolkunlaryň topary diýilýär. Başgaça aýdanymyzda ýygylygy boýunça biri-birinden az tapawutlanýan, her bir wagt pursatynda giňişligiň çäkli bölegini eýeleýän tolkunlaryň goşulmagyna (superpozisiýasyna) **tolkunlaryň topary** (bukjasy) diýilýär. Şeýlelikde ýagtylyk impulsynyň tizligine Releý **topar tizlik** diýip at berýär. Topar tizlik hereket edýän impuls arkaly amplitudanyň süýüşme tizligi bolup, ol hem öz gezeginde energiýanyň geçiş tizligini aňladýar. Eger ýagtylygyň ýaýraýan maddasy dispersiýany ýüze çykarýan bolsa, onda toparyň düzümine girýän tolkunlaryň faza tizlikleri biri-birinden we topar tizlik hem ol tizliklerden tapawutly bolýar.

Ýagtylygyň topar tizligini kesitlemek üçin aşakdaky ýaly sadalaşdyrmadan peýdalanmak amatlydyr.

Goý, ýagtylyk impulsy (topary), ýygylyklary boýunça biri-birinden az tapawutlanýan, birden, amplitudaly iki sany tolkundan ybarat bolsun:

$$y_1 = A_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x) \quad \text{we} \quad y_2 = A_2 \sin(\omega_2 t - k_2 x).$$

Bu ýerde $A_1=A_2$; we $\omega_1=\omega_0+\Delta\omega$; $\omega_2=\omega_0-\Delta\omega$; $k_1=k_0+\Delta k$; $k_2= k_0-\Delta k$; $\Delta\omega$ we Δk kiçi ululyklardyr.

Onda tolkunlaryň impulsy y, y_1 we y_2 tolkunlaryň jemine deň bolar:

$$y= y_1 + y_2 = A_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x) + A_1 \sin(\omega_2 t - k_2 x) =$$

$$= 2\cos\left[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t - \frac{1}{2}(k_1 - k_2)x\right]\cdot \sin\left[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t - \frac{1}{2}(k_1 + k_2)x\right].$$

Bu ýerde ω_1, ω_2, k_1, k_2 ululyklaryň ýokarda girizilen bahalaryny ornuna goýup, alarys:

$$y= 2A_1 \cos(\Delta\omega \cdot t - \Delta k \cdot x)\sin(\omega_0 t - k_0 x).$$

Bu ýerde

$$A= 2A_1 \cos(\Delta\omega t - \Delta k x) \text{ diýip,}$$

tolkun impulsy üçin

$$y = A \sin(\omega_0 t - k_0 x)$$

aňlatmany alarys. Soňky aňlatmadaky tolkunyň impulsynyň A amplitudasy wagt we giňişlik boýunça üýtgeýän ululykdyr. Şeýlelikde tolkunyň impulsyny amplitudasy haýal üýtgeýän sinusoida diýip hasap etmek bolýar. 7.7-nji çyzgyda goşulýan tolkunlaryň *(a)* we emele gelen tolkun toparynyň *(b)* grafigi şekillendirlen.

Toparyň käbir nokadynyň, mysal üçin amplitudasynyň iň uly nokadyny saýlap alyp, onuň *(u)* süýşme tizligini kesgitlesek, onda ol topar tizligi aňladar. Şeýlelikde tolkunyň topar tizligi amplitudasynyň süýşme we hereketlenýän tolkun impulsynyň geçirýän energiýasynyň tizligidir. Toparyň amplitudasynyň iň uly ýagdaýy üýtgemeýär diýsek, ýagny

$$\Delta\omega t - \Delta k \cdot x = \textit{hemişelik}$$

we ony wagta görä differensirläp alarys:

$$\Delta\omega dt - \Delta k dx = 0$$

$$\text{ýa-da } u = \frac{dx}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk}.$$

(7.38) aňlatmadan peýdalanyp ýagtylygyň υ faza tizligi bilen u topar tizliginiň arasyndaky baglanyşygy tapmak bolar:

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(\upsilon k)}{dk} = \upsilon + k\frac{d\upsilon}{dk}. \qquad (7.39)$$

$k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ aňlatmany diferensirläp: $dk = -\dfrac{2\pi}{\lambda^2} d\lambda$ we

$k\dfrac{d\upsilon}{dk} = \dfrac{2\pi}{\lambda}(-\dfrac{\lambda^2}{2\pi}\dfrac{d\upsilon}{d\lambda}) = -\lambda\dfrac{d\upsilon}{d\lambda}$ bolýandygyny hasaba alyp

hem-de bu netijäni (7.39) aňlatmada ornuna goýup alarys:

$$u = \upsilon - \lambda\frac{d\upsilon}{d\lambda}. \qquad (7.40)$$

Bu alnan aňlatma Releýiň deňlemesi diýilýär. Eger

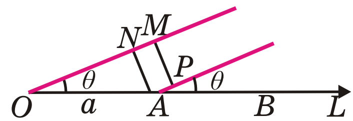
$\dfrac{d\upsilon}{d\lambda} > 0$ (kadaly dispersiýa) bolsa, onda $u<\upsilon$, eger-de $\dfrac{d\upsilon}{d\lambda} < 0$, (kadaly däl dispersiýa) bolsa, onda $u>\upsilon$.

Dispersiýa ýüze çykmaýan maddada $\dfrac{d\upsilon}{d\lambda} = 0$, onda $u = \upsilon$

Ýagtylygyň tizligini ölçemek boýunça geçirilýän tejribelerde topar tizlik ölçenilýär. Görälik nazaryýetinde subut edilişine görä, tolkunyň topar tizligi ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizliginden uly bolup bilmeýär ($u \leq c$).

7.4. Wawilowyň-Çerenkowyň effekti

1934-nji ýylda rus fizigi A.P.Çerenkow redioaktiw şöhleleriň täsirinde erginleriň lýuminessensiýasyny derňeýän mahaly, gamma (γ) we (β) şöhleleriň dury suwuklyklarda görünýän gowşak şöhlelenme döredýändigini ýüze çykarýar. Bu şöhlelenmäni seljermek arkaly, onuň lýuminessensiýa bilen hiç hili baglanyşygynyň ýoklugy anyklanyldy. Bu hadysa ähli arassa suwuklyklarda ýüze çykyp suwuklygyň himiki düzümine, temperaturasyna, suwuklykdaky garyndynyň mukdaryna bagly bolman onuň depgini şol bir ululygyny saklaýar. Bu bolsa onuň lýuminessensiýa bilen baglanyşykly däldigini subut edýär. Wawilow beýle ýagtylanmanyň sebäbi suwuklykdaky erkin elektronlaryň hereketi bilen baglanyşykly diýen pikiri teklip edýär. Emma bu hadysany elektronlaryň haýallanmasynyň (tormozlanmasynyň) esasynda ýüze çykýandyr diýlen çaklama nädogry bolup çykdy. Wawilowyň-Çerkenkowyň effekti diýlip atlandyrylan şöhlelenmäniň täze görnüşiniň tebigaty 1934-nji ýylda rus fizikleri I.Ýe.Tamm we I.M.Frank tarapyndan dogry düşündirildi.



7.8-nji çyzgy

Görälik nazaryýeti islendik zarýadly bölejigiň wakuumda ýagtylygyň ýaýrama tizliginden kiçi tizlik bilen hereket etjekdigini esaslandyrýar. Şoňa görä wakuumda deňölçegli gönüçyzykly hereket edýän zarýadly bölejik elektromagnit tolkunlaryny şöhlelendirmeýär. Dury maddada görünýän ýagtylygyň (v) faza tizligi onuň wakuumda ýaýrama tizliginden *(c)* kiçidir. Ol $\upsilon = \dfrac{c}{n}$ ýaly kesgitlenilýär, $n>1$, maddanyň absolýut döwme görkezijisi. Şeýlelikde maddada zarýadly bölejik ýagtylygyň ýaýrama tizliginden uly tizlik bilen hereket edip biler $\left(c > \upsilon_e > \dfrac{c}{n}\right)$. Tamm we Frank maddada ýagtylygyň ýaýrama tizliginden uly bolan tizlik bilen hereket edýän zarýadly bölejigiň elektromagnit tolkunlary şöhlelendirýändigini görkezip Wawilowyň-Çerenkowyň effektiniň tebigatyny doly esaslandyrdylar.

Maddanyň içinde hereketlenýän zarýad (elektron) hereketiniň ugrunda ýerleşen atomlar we molekulalar bilen täsirleşip, gysga wagtlyk olaryň polýarlanmasyny ýüze çykarýar. Netijede ol atomlar we molekulalar gysga wagt pursatynda elementar tolkunlary şöhlelendirýän kogerent çeşmelere öwrülýärler. Bu tolkunlar biri-biriniň üstüne düşende interferensiýa emele gelýär. Çerenkowyň tejribede ýüze çykaran ýagtylygy hem goşulyp biri-birini güýçlendirýän şol tolkunlardyr. Wawilowyň-Çerenkowyňl şöhlelenmesiniň diňe käbir ugur boýunça ýüze çykmagy onuň özboluşly aýratynlygydyr. Oňa düşünmek üçin aşakdaky ýagdaýa seredeliň.

Goý, elektron döwme görkezijisi *n* bolan dury maddada (suwuklykda) $\upsilon_e > \dfrac{c}{n}$ tizlik bilen *OL* ugur boýunça hereketlenýän bolsun *(7.8-nji çyzgy)*. Elektron *OL* gönüniň üstünde biri-birinden *a* aralykda ýerleşen *O,A,B,...* nokatlaryň deňinden geçende, ýokarda belleýşimize görä, olar yzygider tertipde gysga wagtlyk ýagtylyk çeşmesine öwrülerler.

Şeýlelikde, A nokadyň şöhle goýbermesi O nokada görä $\tau = \dfrac{a}{v_e}$ wagtdan soň, B nokadyň şöhle goýbermesi hem A nokada görä edil şol wagtdan soň bolar. Ýagtylygyň şöhlelenýän ugry elektronyň hereket ugry bilen θ burç emele getirýän bolsun. Görkezilen ($O,A,B,...$) nokatlardan şöhlelenýän tolkunlaryň goşulyp, interferensiýa zerarly bir-birini güýçlendirmegi üçin A aralygyň islendik bahasynda tolkunlaryň faza tapawutlary nola deň bolmaly. 7.8-nji çyzgydaky NA çyzyk - elektron A nokadyň deňinden geçen pursatynda O nokatdan şöhlelendirilen tolkun frontudyr. Diýmek elektron $OA=a$ aralygy geçýänçä, O nokatdan şöhlelenýän tolkun $ON = a\cos\theta$ aralygy geçipdir. Onda O we A nokatdan şöhlelendirilýän tolkunlaryň faza tapawudynyň nola deň bolmagy üçin, ýokarda agzalan wagtlaryň tapawudy hem nola deň bolmaly, ýagny:

$$\frac{a\cos\theta}{\frac{c}{n}} - \frac{a}{v_e} = 0.$$

Bu ýerden:
$$\cos\theta = -\frac{c}{n\cdot v_e}. \tag{7.41}$$

Şeýlelikde, şöhlelenmäňiň iň uly depgini θ burçuň (7.41) şerti kanagatlandyrýan bahasynda emele gelýär. Hakykatdan hem diňe $v_e > \dfrac{c}{n}$ bolanda (7.41) şert boýunça θ burçuň kesgitli bahasy bolup bilýär.

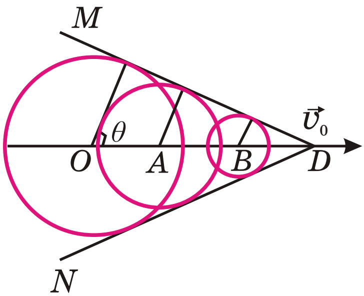
Eger $\upsilon_e < \frac{c}{n}$ bolsa, onda ähli ugur boýunça-da tolkunlaryň biri-birini söndürmesi bolup geçýär, ýagny Wawilowyň-Çerenkowyň effekti ýüze çykmaýar. Oňa düşünmek üçin aşakdaky ýagdaýa seredeliň. Goý, elektronyň hereket edýän (OL) traýektoriýasyndaky O we A nokatlardan şöhlelenýän tolkunlaryň geçen ýollarynyň tapawudy $\frac{\lambda}{2}$ bolsun.

$\upsilon_e < \frac{c}{n}$ bolan ýagdaýda, A nokatdan tolkun şöhlelenen pursatynda, O nokatdan ýaýraýan tolkunlaryň fronty MP bolsun. NA bolsa şol pursatda A nokatdan ýaýran tolkunyň fronty bolar. Onda O we A nokatlardan ýaýraýan tolkunlaryň geçen ýollarynyň tapawudy *(7.8-nji çyzgy)*

$$\Delta = NM = AP = OM - ON = \frac{c}{n}\tau - a\cos\theta \quad \text{ýa-da}$$

$$\Delta = \frac{c}{n}\cdot\frac{a}{\upsilon_e} - a\cos\theta = a\left(\frac{c}{n\upsilon_e} - \cos\theta\right).$$

Goýan şertimize görä tolkunlaryň interferensiýa zerarly biri-birini gowşatmagy üçin



7.9-njy çyzgy

$$a\left(\frac{c}{n\upsilon_e} - \cos\theta\right) = \frac{\lambda}{2}$$

bolmaly. Bu şertiň ýerine ýetirmegi üçin

$$a = \frac{\lambda}{2\left(\frac{c}{n\upsilon_e} - \cos\theta\right)}$$

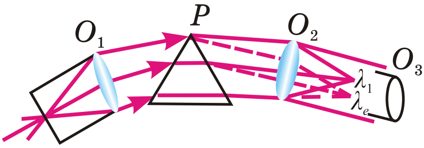
bolmaly.

Maddada, ýagtylygyň faza tizliginden, uly tizlik bilen hereket edýän zarýadly bölejigiň D nokatda bolan pursatynda Wawilowyň-Çerenkowyň şöhlelenmesiniň tolkun üstüni tapmak üçin Gýuýgens tarapyndan teklip edilen, gurmak *(7.9-njy çyzgy)* usulyndan peýdalanmak amatlydyr. Bu üst MDN aýlaw konus görnüşdedir. Konusyň depesi (D) zarýadly bölejik bilen, onuň oky (DO) bolsa zarýadly bölejigiň traýektoriýasy bilen gabat gelýär. Polýarlanan ýagtylygyň elektrik wektory ($\vec{E}$) konusyň üstüne perpendikulýar, magnit wektory ($\vec{H}$) bolsa oňa galtaşma boýunça ugrukdyrylýar.

Wawilowyň-Çerenkowyň effekti ýadro fizikasynda we elementar bölejikleriň fizikasynda giňden ulanylýar. Bu effektiň esasynda zarýadly bölejikleri hasaba alýan «Çerenkowyň sanaýjysy» diýlip atlandyrylýan abzal döredilen. Bu abzalyň kömegi bilen zarýadly bölejikler hasaba alnyp, olaryň ululyklary, hereketiniň ugry, energiýasy we beýleki häsiýetnamalary kesgitlenilýär.

7.5. Şöhlelenme we siňdirme spektrleri. Spektrometrler. Spektr boýunça seljerme

Ýagtylyk çeşmeleriniň hiç biri takyk monohromatiklige eýe bolmaýar, ýagny belli tolkun uzynlykly ýagtylygy şöhlelendirmeýär. Onuň şeýledigini prizmanyň kömegil bilen ýagtylygy spektre dargatmak, şeýle hem interferensiýa we difraksiýa hadysalary arkaly göz ýetirmek mümkin. Spektrleri takyk ýüze çykarmak üçin ýagtylyk dessesini çäklenen yşdan we prizmadan geçirmek ýaly ýönekeýje enjamlar ýeterlik däldir. Aýdyň spektrleri saýhallaýan abzallar, ýagny dürli uzynlykly tolkunlary gowy bölüşdirýän we



7.10-njy çyzgy

spektrleriň biri-biriniň üstüni ýapmaýan (ýa-da ýapmaýar diýen ýaly) abzallar zerurdyr. Şeýle abzallara spektral abzallar diýilýär. Köplenç spektral abzallaryň esasy bölegi bolup prizma ýa-da difraksiýa gözenegi hyzmat edýär.

Iň ýönekeý spektral abzal bolan prizmaly spektroskopyň gurluşyna seredeliň *(7.10-njy çyzgy)*. Ol iki sany turbadan we olaryň arasynda ýerleşdirilen üçgranly prizmadan ybaratdyr.

Turbalaryň biriniň bir ujuna inçe yş we beýleki ujuna linza (obýektiw) ýerleşdirilýär. Yş linzanyň fokal tekizliginde ýerleşdirilýär, şonuň üçin linzadan geçen ýagtylyk parallel şöhleler bolup prizmanyň granyna düşýär. Bu turba kollimator diýilýär. Turbalaryň beýlekisine görüş turbasy diýilýär. Prizmada ýagtylyk spektre dargap, obýektiwiň fokal tekizliginde bir-birinden käbir aralykda ýerleşen ýagty çyzyklar emele gelýär (yşyň şekili). Şeýlelikde, spektre dargan ýagtylygyň düzuminde näçe sany dürli tolkun uzynlykly ýagtylyk bar bolsa, yşyň şonça şekili emele gelýär. Yş örän insiz (millimetriň ülüşlerinde) bolmagyna görä yşyň her bir şekili inçe ýagty çyzyk görnüşinde bolýar. Bu çyzyklara spektr çyzyklar diýilýär. Spektroskopda spektr çyzyklara okulýaryň (O_3) üsti bilen gözegçilik edilýär. Şeýlelikde, spektroskop örän ýönekeý görnüşli spektr ýüze çykýan abzaldyr.

Spektroskopyň saýgaryjylyk (çözüjilik) ukyby uly bolmaýar, bu babatda stiloskop we stilometr diýlip atlandyrylýan abzallar bir az gowrak bolýar. Bularda birnäçe prizmalary ulanmak bilen, saýgaryjylyk ýokarlandyrylýar. Stilometrler fotometr bilen üpjün edilýär we spektr çyzyklaryň göräli depginini hem ölçemek bolýar. Bu abzallaryň kömegi bilen käbir seljermeleri çalt geçirmek mümkin.

Görüş (wizual) spektr abzallaryň mümkinçiligi uly däldir, olary ýagtylygyň görünýän çäginde ulanmak amatlydyr.

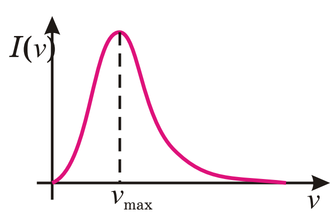
Spektrograf diýlip atlandyrylýan abzal spektrleriň şekilini fotosurata ýa-da fotoplastina geçirýär. Spektrograflaryň saýgaryjylyk ukyby, köpsanly prizmalar ýa-da ýokary saýgaryjylyk ukyby bolan difraksiýa gözenegini ulanmak bilen, ýokarlandyrylýar.

Maddalaryň şöhlelenmesiniň spektr düzümi dürlüdir. Muňa garamazdan, tejribäniň görkezişi ýaly, spektrleri üç görnüşe bölmek mümkin.

1. Üznüksiz spektrler

Günün, duga çyralarynyň, has ýokary temperatura çenli gyzdyrylan metallaryň şöhlelendirýän spektri üznüksizdir. Bu bolsa spektrde dürli tolkun uzynlykly tolkunlaryň bardygyny aňladýar.
Beýle spektriň üzük ýeri bolmaýar, spektrogarfda alnan şekil dürli reňkli tutuş zolak görnüşinde bolýar (I reňkli çyzgyda, 1).

Energiýanyň ýygylyklar (tolkun uzynlyklar) boýunça paýlanyşy, ýagny şöhlelenmäniň depgininiň spektr dykyzlygy dürli jisimler üçin dürlüdir. Meselem, absolýut gara jisim ähli ýygylykly elektromagnit tolkunlaryny şöhlelendirýär, emma şöhlelenmäniň depgininiň spektr dykyzlygynyň ýygylyga baglylyk egrisi-



7.11-nji çyzgy

niň kesgitli $\nu_{iň,uly}$ ýygylykda iň uly bahasy bolýar. Örän kiçi ($\nu \to 0$) we örän uly ($\nu \to \infty$) ýygylyklara düşýän şöhlelenme energiýasy ujypsyzdyr. Tejribeleriň görkezişi ýaly üznüksiz (tutuş) spektrleri dykyz maddalar, ýagny gaty ýa-da suwuk haldaky jisimler hem-de juda dykyz gazlar berýärler. Üznüksiz spektri almak üçin jisimler ýeterlik ýokary temperatura çenli gyzdyrylmalydyr.

Üznüksiz (tutuş) spektriň häsiýeti diňe şöhlelenýän aýry-aýry atomlaryň häsiyetleri bilen kesgitlenmän, eýsem olaryň biri-biri bilen özara täsirleşmesine-de güýçli derejede baglydyr.

Ýokary temperaturaly plazma hem üznüksiz spektr berýär. Plazma elektromagnit tolkunlaryny esasan elektronlar bilen ionlaryň çäknyşmagynyň netijesinde şöhlelendirýärler.

2. Çyzykly spektrler. Adaty nahar duzunyň ergini siňdirilen asbest bölegi ýanýan gazyň öçügsi ýalnyna tutulyp, spektroskop arkaly seredilende ýalnyň zordan görünýän üznüksiz spektriniň fonunda açyk sary çyzyk görünýär (I reňkli çyzgy, 2). Bu sary çyzygy ýalynda nahar duzunyň molekulalary bölünende emele gelýän natriýniň buglary berýär. Reňkli çyzgyda wodorodyň we geliýniň spektrleri hem görkezilendir. Olaryň her biri inli garaňky zolaklar bilen bölünen dürli ýagtylykly reňkli çyzyklardyr. Şeýle spektrlere **çyzykly spektr** diýilýär. Çyzykly spektriň bolmagy her bir maddanyň diňe kesgitli tolkun uzynlykly ýagtylygy şöhelendirýändigini aňladýar.

Atomlar we gaz halyndaky ähli maddalar çyzykly spektri berýärler. Ýalňyz (izolirlenen) atomlar belli bir uzynlykly tolkunlary şöhlelendirýärler.

Atomar (bir atomly) gazyň dykyzlygy ulalanda aýry-aýry spektral çyzyklar giňelýarler we gazyň dykyzlygy juda ulalyp, atomlaryň özara täsiri güýçlenende bu çyzyklar biri-birine ýakynlaşyp, üznüksiz spektri döredýärler.

3. Zolakly spektrler. Zolakly spektr garaňky aralyklar bilen bölünen aýry-aýry zolaklardan ybaratdyr. Saýgaryjylyk ukyby ýokary bolan spektral abzalyň kömegi bilen her bir zolagyň örän jebis ýerleşen çyzyklaryň toplumyndan ybaratdygyny ýüze çykarmak mümkin. Çyzykly spektrden tapawutlylykda zolakly spektri biri-biri bilen gowşak baglanyşykda bolan molekulalar döredýärler. Molekulýar spektrlere gözegçilik etmek üçin hem adatça ýalynda buglaryň şöhlelenmesi ýa-da gaz zarýadsyzlanmasynyň şöhlelenmesini peýdalanýarlar.

Siňdirme spektrleri. Atomlary oýandyrylan halda bolan ähli maddalar tolkun uzynlyklary boýunça belli bir tertipde paýlanan ýagtylyk tolkunlaryny şöhlelendirýärler. Maddanyň ýagtylygy siňdirmesi hem tolkun uzynlygyna bagly bolýar. Meselem, gyzyl aýna gyzyl ýagtylyga degişli ($\lambda \approx 0,76 mkm$) tolkunlary geçirýär we galanlarynyň ählisini siňdirýär.

Eger ak ýagtylyk sowuk şöhlelenýän gazyň içinden geçirilse, onda çeşmäniň üznüksiz spektriniň fonunda gara çyzyklar ýüze çykýar (I reňkli çyzgy, 5÷8).

Gaz ýeterlik ýokary temperatura çenli gyzdyrylanda goýberýän ýagtylygy ýaly tolkun uzunlykly ýagtylygy güýçli siňdirýär. Üznüksiz spektriň fonundaky gara çyzyklar siňdirme çyzyklary bolup, olaryň toplumy siňdirme spektrlerini emele getirýär. Üznüksiz, çyzykly we zolakly şöhlelenme spektrler bolup, edil şonça-da siňdirme spektrleri bardyr.

Spektr boýunça seljerme. Maddalaryň şöhlelendirýän ýa-da siňdirýän spektrleriniň esasynda geçirilýän derňewlere **spektr boýunça seljerme** diýilýär. Şöhlelenme spektri boýunça geçirilýän seljermä **emissiýaly seljerme** diýilýär. Siňdirme spektri boýunça geçirilýan seljermä **absorbsiýaly seljerme** diýilýär.

Çyzykly spektrler atomyň gurluşy bilen göni baglanyşykly bolýandygy üçin olar aýratyn ähmiýete eýedir. Bu spektrlere gözegçilik etmek arkaly atomyň içine «seretmäge» mümkinçilik döredi.

Haýsyda bolsa bir maddanyň çyzykly spektriniň tolkun uzynlyklarynyň (ýygylyklarynyň) şol maddanyň diňe atomlarynyň häsiýetine bagly bolup, atomlaryň ýagtylanmasynyň oýandyrylyş usulyna düýpden bagly däldigi çyzykly spektrleriň esasy häsiýetidir.

Her bir adamyň barmaklarynyň hamynyň ýüzündäki nagyşjagazlarynyň başga hiç bir adamyňka gabat gelmeýänligi köplenç jenaýatçyny tapmaga kömek edýär. Edil şonuň ýaly-da spektrleriň özboluşlylygy maddanyň himiki düzümini kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Çylşyrymly maddanyň düzümindäki $\mathbf{10^{-10}g}$ massaly elementi hem spektr seljerme arkaly ýüze çykarmak mümkin.

Spektr boýunça seljermäniň kömegi bilen himiki elementleriň periodiki sistemasyna girýan täze elementler (rubidiý, seziý we başgalar) açyldy. Günüň we ýyldyzlaryň düzümi anyklanyldy.

Ýönekeýligi we uniwersallygy bilen tapawutlanýan spektr boýunça seljerme usuly metallurgiýada, maşyn gurluşygynda, atom industriýasynda maddanyň düzümini barlamagyň esasy usulydyr. Spektr boýunça seljerme arkaly magdanlaryň we minerallaryň himiki düzümi kesgitlenilýär. Günüň we ýyldyzlaryň siňdirme spektrleriniň kömegi bilen olaryň himiki düzümi derňelýär. Günüň güýçli ýagtylanýan üstüne fotosfera diýilýär. Ol üznüksiz spektr berýär.

Günüň fotosferasy ýagtylygy saýlap siňdirýär, bu bolsa fotosferanyň üznüksiz spektriniň fonunda siňdirme çyzyklarynyň ýüze çykmagyna getirýär. Gün tutulanda spektr çyzyklaryň «öwrülmesi» ýüze çykýar. Günüň spektrinde siňdirme çyzyklara derek şohlelenme spektrleri görünýär. Astrofizikada spektr seljerme arkaly asman jisimleriniň temperaturasy, basyşy, hereket tizligi, magnit häsiýetnamalary we ş.m. kesgitlenilýär.

7.6. Jisimleriň reňki

Jisimleriň reňki adamyň gözüniň häsiýetine we jisimlerden serpigip göze düşýän ýagtylygyň ýygylygyna bagly.

Görüş duýgusyny oýandyryp bilýän ýagtylygyň dürli ýygylygyny adam gözi dürli reňkde kabul edýär. Gözi käbir reňki saýgarmaýan adamlar hem bolýar. Emma kadaly gözler hem şol bir jisimi birdeň, reňkde görmezligi mümkin. Ýagtylanýan jisimiň reňki onuň şöhlelendirýän ýagtylygynyň spektr düzümine bagly bolýar. Özi ýagtylanmaýan jisimiň reňki onuň serpikdiren ýa-da içinden geçiren ýagtylygynyň spektral düzümine bagly bolýar. Üstüne düşýän ak ýagtylygyň ähli ýygylyklarynyň köp mukdaryny deňräk derejede serpikdirýän jisim ak reňklidir, az mukdaryny serpikdirýän jisim gara reňklidir. Üstüne düşýän ak ýagtylygyň gyzyl şöhlelerini köp serpikdirýän jisim gyzyl reňklidir. Eger bu jisime başga islendik (gyzyldan başga) reňkli monohromatik ýagtylykda seredilse, ol gara reňkli bolup görünýar. Eger üstüne düşýän ak ýagtylygyň ähli ýygylyklaryny az mukdarda siňdirip, köp mukdaryny içinden geçirýän bolsa, onda ol reňksiz dury jisimdir.

Ak ýagtylygyň dürli ýygylyklaryny dürli mukdarda içinden geçirýän jisim dury we reňkli bolup görünýär. Beýle jisimleri ýagtylyk süzgüç (swetofiltr) hökmünde peýdalanmak amatlydyr. Käbir jisimleriň reňki interferensiýanyň hasabyna emele gelýär. Mysal üçin, sabyn köpürjiginiň reňki, käbir kebelekleriň ýelkenganatlarynyň reňki we ş.m.

7.7. Çyzykly däl optikanyň elementleri

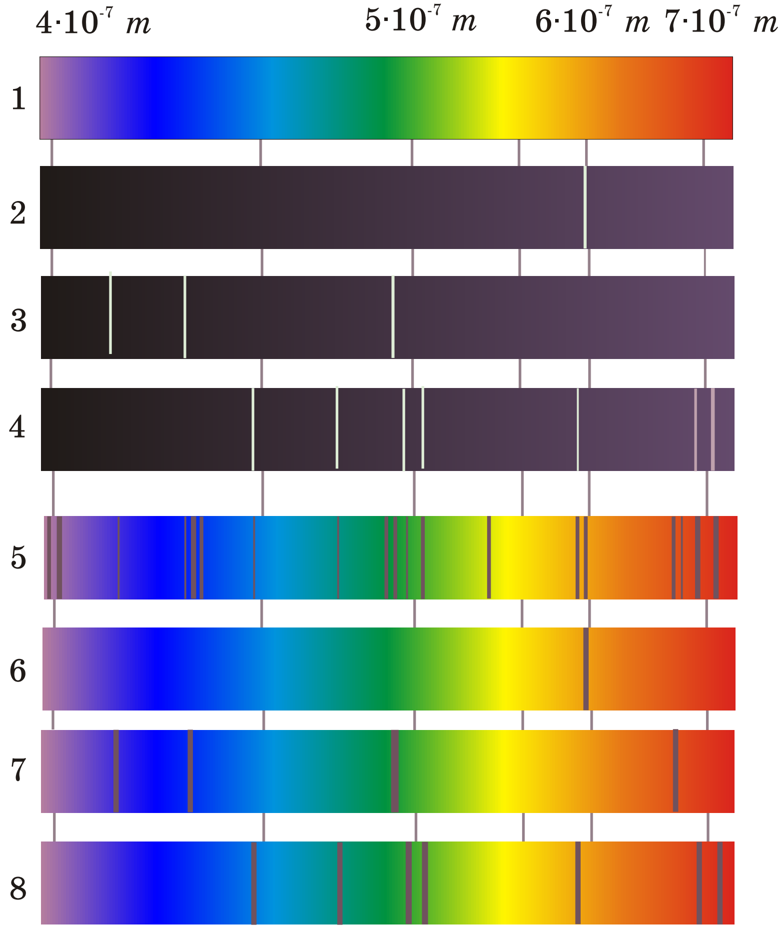
XX asyryň 60-njy ýyllarynda lazer fizikasynyň pajarlap ösmegi çyzykly däl optikanyň hem ösmegine sebäp boldy. Lazerler ýagtylygyň örän kuwwatly impulsyny almaga mümkinçilik döretdi. Kuwwatly ýagtylyk maddada ýaýranda, adaty goşulma düzgüni (superpozisiýa prinsipi) bozulyp, çyzykly däl hadysalaryň güýçli depginde ýüze çykmagyna getirýär. Şunuň bilen birlikde çyzykly däl hadysalary güýçli ýüze çykarýan kristallar döredildi. Şeýlelikde çyzykly däl optika diýlip atlandyrylýan optikanyň täze ugry peýda boldy. Adaty kogerent däl, emma örän kuwwatly ýagtylyk maddada ýaýranda polýarlanma, ýagny, maddada indusirlenýän dipol momentleri ýagtylyk tolkunynyň elektrik wektory bilen çyzykly baglanyşykda bolýar:

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}. \tag{7.42}$$

α-maddanyň molekulasynyň polýarlanma koeffisiýenti bolup, dielektrik syzyjylyk bilen aşakdaky ýaly baglanyşykdadyr:

$$\varepsilon = 1 + 4\pi N\alpha. \tag{7.43}$$

Bu ýerde N-maddanyň 1 sm^3 göwrümindäki molekulalaryň sany.



I reňkli surat

1-tutuş. 2-natriýniň, 3-wodorodyň, 4-geiýniň şöhlelendirýän spektrleri, 5-gü-nüň, 6-natriýniň, 7-wodorodyň, 8-geliýniň siňdirme spektrleri

Ýokarda belleýşimiz ýaly maddanyň ýagtylygy döwme görkezijisi onuň dielektrik syzyjylygy bilen $\varepsilon=n^2$ görnüşde baglanyşandyr. Eger ýagtylygyň ýaýra-ýan gurşawynda çyzykly däl hadysalar (effektler) ýüze çyksa, ýagtylygyň ýygylygyny üýtgedýän örän çylşyrymly hadysalar bolup geçýär. Eger-de maddanyň molekulasynyň polýarlanma koeffisýenti

$$\alpha=\alpha_0+\alpha' E$$

görnüşde ýüze çykýar diýip kabul edilse, onda dipol momenti aşakdaky ýaly aňladylar:

$$P=\alpha E=\alpha_0 E+\alpha' E^2. \qquad (7.44)$$

Goý, şeýle gurşawda 2 sany tolkun ýaýraýan bolsun:

$$E_1=E_{01}\sin\omega_1 t,$$
$$E_2=E_{02}\sin\omega_2 t.$$

Onda gurşawda döreýän doly dipol momenti üçin aşakdaky aňlatmany ýazmak bolar:

$$P=\alpha_0 E+\alpha' E^2=\alpha_0 E_{01}\sin\omega_1 t+\alpha_0 E_{02}\sin\omega_2 t+\alpha' E_{01}^2\sin^2\omega_1 t+$$
$$+\alpha' E_{02}^2\sin^2\omega_2 t+2\alpha' E_{01}E_{02}\sin\omega_1 t\sin\omega_2 t.$$

Käbir matematiki özgertmelerden peýdalanalyň:

$$\sin^2\omega_1 t=\frac{1}{2}-\frac{1}{2}\cos 2\omega_1 t,$$
$$\sin^2\omega_2 t=\frac{1}{2}-\frac{1}{2}\cos 2\omega_2 t,$$

$$2\alpha' E_{01}E_{02}\sin\omega_1 t\sin\omega_2 t=$$
$$=\alpha' E_{01}E_{02}\cos(\omega_1-\omega_2)t-\alpha' E_{01}E_{02}\cos(\omega_1+\omega_2)t.$$

Onda dipol moment üçin alarys:

$$P=\alpha_0 E_{01}\sin\omega_1 t+\alpha_0 E_{02}\sin\omega_2 t+\frac{\alpha'}{2}(E_{01}^2+E_{02}^2)\frac{\alpha'}{2}(E_{01}^2\cos 2\omega_1 t+$$
$$+E_{02}^2\cos 2\omega_2 t)+\alpha' E_{01}E_{02}\cos(\omega_1-\omega_2)t-\alpha\ E_{01}E_{02}\cos(\omega_1+\omega_2)t.$$

Aňlatmadan görnüşi ýaly çyzykly däl hadysalary ýüze çykarýan gurşawa düşen ýagtylyk ω_1 we ω_2 ýygylykly tolkunlardan başga-da iki esse uly ýygylykly ($2\omega_1$ we $2\omega_2$) tolkunlary (garmonikalar) hem-de (ω_1-ω_2) we (ω_1+ω_2) ýygylykly tolkunlary-da döreýär. Beýle effekt ýokary takyklykdaky kogerentlige eýe bolan ýagtylyklarda has aýdyň ýüze çykýar.

Alan netijämiz bir molekulanyň dipol momenti hasaba alnan ýagdaý üçindir. Eger gurşawyň göwrüm birligindäki ähli (N) molekulalarynyň dipol momentini $\mathscr{P}$ diýip belgilesek, onda (7.42)

$$\mathscr{P}=\alpha NE \qquad \text{ýa- da} \qquad \mathscr{P}=\chi E$$

görnüşe eýe bolar.

Şeýlelik-de, (7.44) aňlatmany hem

$$\mathscr{P}=\chi E+\chi' E^2$$

görnüşde ýazmak bolýar.

Derňewleriň görkezişine görä, mundan has ýokary tertipli garmonikalar hem oýandyrylýar:

$$\mathscr{P}=\chi^0 E+\chi' E^2+\chi'' E^3+\ldots+.$$

Bu ýerde χ', χ', χ'' - ululyklar birinji, ikinji we üçünji derejeli polýarlanma koeffisiýentler.

1. Optiki detektirleme we garmonikalary öndürmek

Goý, ýagtylyk tolkunlarynyň ýaýraýan gurşawynyň polýarlanmasynda dipol momenti

$$\mathscr{P}=\chi E+\chi' E^2 \qquad (7.45)$$

görnüşde aňladylyp bilinýän bolsun. Beýle gurşawda güýçli elektrik meýdanly ýagtylyk ýaýranda statik polýarlanmany ýüze çykarýar we tolkunyň sinhronlyk şerti ýerine ýetende şöhlelenmäniň ikinji garmonikasy döreýär.

Goý, gurşawa düşýän ýagtylyk tolkunynyň deňlemesi

$$E = E_0 \sin(\omega t - kz) \tag{7.46}$$

görnüşde berlen bolsun.

Bu ýerde $k = \frac{\omega}{\upsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$ - tolkun sany, υ-ýagtylygyň faza tizligi.

(7.46)-ny (7.47) ornuna goýsak, onda:

$$\mathscr{P} = \chi E_0 \sin(\omega t - kz) + \frac{\chi' E_0^2}{2} - \frac{\chi' E_0^2}{2} \cos(2\omega t - k'z).$$

Bu ýerde $k' \approx 2k\,(\sin^2\alpha = 1 - \cos^2\alpha)$.

Şeýlelikde gurşawyň polýarlanmasynyň üç agzadan ybaratdygy alyndy.

Birinji agzasy gurşawa düşýän ýagtylyk ýygylygynyň polýarlanmasy, ikinji agzasy statik polýarlanma. Statik polýarlanmanyň ýüze çykmasyna **optiki detektirleme** diýilýär. Optiki detektirleme ýörite abzallar arkaly hasaba alnyp χ'-i we E_0-y kesgitlemek üçin peýdalanylýar. Üçünji agzasy iki esse uly ýygylykly polýarlanma bolmagy üçin ω ýygylykly ýagtylyk tolkunynyň (υ') faza tizligine deň bolmalydyr. Eger $\upsilon \neq \upsilon'$ bolsa $k' \approx 2k$ bolýar. Şol sebäpli ω ýygylykly ýagtylyk tolkuny bilen 2ω ýygylykly ýagtylyk tolkuny Δz ýoly geçende olaryň arasynda $\Delta\varphi = \Delta z(k' - 2k)$ faza tapawudy ýüze çykýar. Bu bolsa tolkun sinhronlygyny bozýar.

Δz-iň ulalmagy bilen ω ýygylykly düşýän ýagtylygyň energiýasynyň 2ω ýygylykly ikinji garmonika geçmegini azaldýar. $\Delta\varphi = 2\pi$ bolanda energiýa geçme düýbünden kesilýär. Bu ýagdaýda tolkunlar

$\Delta z \geq \dfrac{2\pi}{k' - 2k}$ ýoly geçýärler. Şu şert ýerine ýetende tolkunyň sinhronlyk şerti bozulyp, ikinji garmonika öndürilmeýär (genirirlenmeýär). Hasaplamalaryň netijelerinde, düşýän ýagtylyk tolkunynyň ikinji garmonika berýän kuwwaty

$$P' \approx \frac{k^2 \chi'^2 P^2 \Delta z^2}{4} \frac{\sin^2\left(\dfrac{k' - 2k}{2}\Delta z\right)}{\left(\dfrac{k' - 2k}{2}\Delta z\right)}$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär. Bu yerde P düşýän ýagtylyk tolkunynyň kuwwaty. Ikinji garmonikanyň iň uly öndürilmesi $k' = 2k$ we

$$v' = v \tag{7.47}$$

şertde ýüze çykýar.

Bu ýagdaýda $\Delta z \to \infty$ tolkun sinhronlygy örän uly aralykda emele gelýär.

Onda iň uly berilýän kuwwat $P' = \dfrac{\kappa^2 x'^2 p^2 \Delta z^2}{4}$ görnüşde aňladylar.

(7.47) şertiň ýerine ýetmegi üçin çyzykly dal hadysalary ýüze çykarýan madda hökmünde kaliýniň digidrofosfatyndan (KH_2PO_4) ýasalan kristal peýdalanylýar.

2. Ýagtylygyň öz-özüne fokuslanmasy

Polýarlanma ululygynda üçinji derejeli agzanyň ýüze çykarýan çyzykly däl optiki hadysasyna seredeliň. Goý, seredilýän ýagdaýda tolkun sinhronlygynyň şerti ýerine ýetýän we garmonikalar oýandyrylýan bolsun. Onda maddada diňe düşýän ýagtylyk tolkunlarynyň ýygylygyndaky tolkunlar ýaýrarlar. Üçinji derejeli agzanyň şertlendirýän polýarlanmasy

$$\mathscr{P}_3 = x''E_0^3\sin^3(\omega t - kz) = \frac{3}{4}\chi''E_0^3\sin^3(\omega t - kz) - \frac{1}{4}\chi''E_0^3\sin^3(\omega t - kz)\,. \quad (7.48)$$

Bilşimiz ýaly $D = \varepsilon E = E + 4\pi\ \mathscr{P}.$

Bu ýagdaýda $\mathscr{P} = \mathscr{P}_1 + \mathscr{P}_3 = \chi\ E + \mathscr{P}_3.$

Onda elektrik induksiýasy

$$D = E + 4\pi\chi E + 3\pi\chi''E_0^2 E = (1 + 4\pi\chi + 3\pi\chi''E_0^2)E\,. \quad (7.49)$$

Bu ýerde

$$E = E_0\sin(\omega t - kz)\,.$$

(7.49) aňlatmada ýaýyn içindäki

$$\varepsilon = n^2 = 1 + 4\pi\chi + 3\pi\chi''E_0^2,$$

$$\varepsilon_0 = 1 + 4\pi\chi = n_0^2.$$

Bu ýerde n_0 maddanyň adaty ýagtylygy döwme görkezijisi:

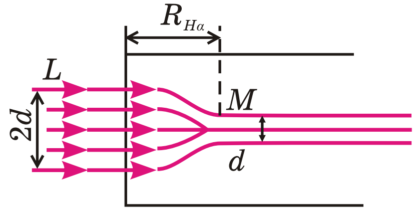
$$\text{Onda } n^2 = n_0^2(1 + \frac{2n_2}{n_0^2}E_0^2) \quad (7.50)$$

$$\text{Bu ýerde } \quad n_2 = \frac{3\pi\chi''}{2} \text{ we } \frac{2n_2}{n_0^2}E_0^2 << 1$$

bolany üçin ony hasaba almazlyk mümkin. Onda bu ýerden alarys:

$$n = n_0 + n_2E_0^2\,. \quad (7.51)$$

Seýlelik bilen, maddanyň ýagtylygy döwme görkezijisiniň ýagtylyk tolkunynyň amplitudasynyň kwadratyna baglydygy gelip çykýar. Çäklenen ýagtylyk dessesiniň okunda (dessäniň ortasynda) ýagtylygyň depgini has uly bolýar. Şoňa görä (7.51) aňlatma laýyklykda dessäniň okunda ýag-tylygyň döwme görkezijisi uly bolup, dessäniň okundan gyra gitdigiçe kiçelýär. Şol sebäpli, dessäniň gyrasynda tolkunyň tizligi uly bolup, oka golaýlaşdygyça kiçelýär. Bu bolsa ýagtylyk dessesiniň gyralarynyň orta gyşarmasyna getirýär, ýagny ýagtylyk dessesi maddanyň içinde ýygnanýar (fokuslanýar). 7.12-nji çyzgyda kuwwatly ýagtylyk dessesiniň ýygnanmasy şekillendirilen. Çyzgydan görnüşi ýaly desse maddanyň içinde M nokadynyň golaýynda inçelýär. $R_{H\alpha}$ aralyga öz-özüne ýygnanmanyň effektiw uzynlygy diýilýär we



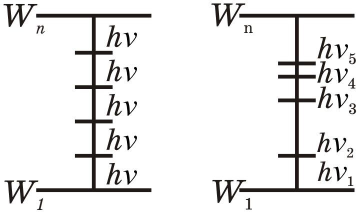
7.12-nji çyzgy

$$R_{H\alpha} = \frac{d}{2}\sqrt{\frac{n_0}{n_2 E_0^2}}$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär. M nokatdan başlap ýagtylyk d diametrli inçe desse görnüşinde ýaýraýar. Bu ýagtylyk dessesi hiç hili difraktisiýa hadysasyny ýüze çykarmaýar. Ýagtylygyň öz-özüne fokuslanma hadysasy ýagtylyk dessesiniň kuwwatynyň mundan beýläkde köpelmegine we netijede maddada çyzykly däl optiki hadysalarynyň güýçli ýüze çykarmagyna getirýär.

3. Köpfotonly siňdirme we köpfotonly ionlaşma

Maddanyň üstüne düşýän ýagtylyk kwantynyň energiýasy $\varepsilon = h\nu$. Eger ol maddanyň atomlarynyň energetik derejeleriniň energiýalarynyň tapawudyna geň bolsa, onda ol foton madda tarapyndan siňdirilýär. Ýagtylygyň siňdirilmesiniň kwant nazaryýeti bu ýagdaýy esaslandyrýar, ýagny



7.13-nji çyzgy

$$h\nu = E_n - E_1$$

Bu ýerde E_1 we E_n degişlilikde maddanyň atomynyň esasy we oýandyrylan energetiki derejeleri. Adaty ýagtylyk bilen maddanyň her bir elementar täsirleşmesinde diňe bir foton siňdirilýär. Şonuň üçin bu hadysa ýeke fotonly siňdirme diýilýär. Eger madda lazer çeşmeleriniň kuwwatly ýagtylygy düşürilse, onda ýagtylyk bilen maddanyň bir elementar täsirleşmesinde birnäçe fotonyň siňdirilmegi mümkin, ýagny

$$Nh\nu = E_n - E_1 .$$

Bu hadysa **köpfotonly siňdirme** diýilýär.

Köpfotonly siňdirme hadysasynda birmeňzeş energiýaly fotonlar siňdirilýär. Mysal üçin, ikifotonly siňdirme

$$h\nu_1 + h\nu_2 = E_n - E_1$$

şertiň ýerine ýetirilmegi bilen amala aşýar.

7.13-nji çyzgyda birmeňzeş fotonlaryň we dürli energiýaly köpfotonly siňdirme şekillendirilen.

Eger maddanyň atomynyň ionlaşma energiýasyny E_i diýip hasap etsek, onda $E_n = E_i$ şert ýerine ýetse we E_n maddanyň atomynyň iň ýokary energetiki derejesine gabat gelýän bolsa, $Nh\nu > E_i$ ýagdaýda atomyň ionlaşmasy ýüze çykýar. Beýle ionlaşma köpfotonly ionlaşma diýilýär.

7.8. Atmosferada optiki hadysalar

Ýeriň üstüniň howa örtügine atmosfera diýilýär. Atmosferada ýagtylygyň döwülmesi, difraksiýasy, polýarlanmasy, pytramasy we ş.m. hadysalar aýdyň ýüze çykýarlar.

Atmosferada ýüze çykýan özboluşly optiki hadysalar örän köp bolup, olar ýörite ugur hökmünde giňden öwrenilýär. Bu hadysalaryň ählisi diýen ýaly atmosferadaky birhillidälllikleriň ýagny, atmosferanyň düzüminde suw damjalarynyň, tozan bölejikleriniň, tüssäniň bolmagy bilen baglanyşyklydyr. Biz optika dersiniň çäginde atmosferada ýagtylyk bilen baglanyşykly ýüze çykýan we ýygy-ýygydan gabat gelýän birnäçe hadysalara serederis.

1. Atmosfera refraksiýasy

Ýeriň atmosferasy beýiklik boýunça dykyzlygy üýtgeýän gurşawy emele getirýär. Atmosferanyň dykyzlygynyň beýle üýtgemesi onuň ýagtylygy döwülme görkezijisiniň birsydyrgyn, endigan üýtgemesine sebäp bolýar. Ýagtylygyň döwülme görkezijisi bilen onuň ýaýraýan gurşawynyň dykyzlygy aşakdaky aňlatma arkaly baglanyşandyr:

$$n - 1 = c\rho \,. \tag{7.52}$$

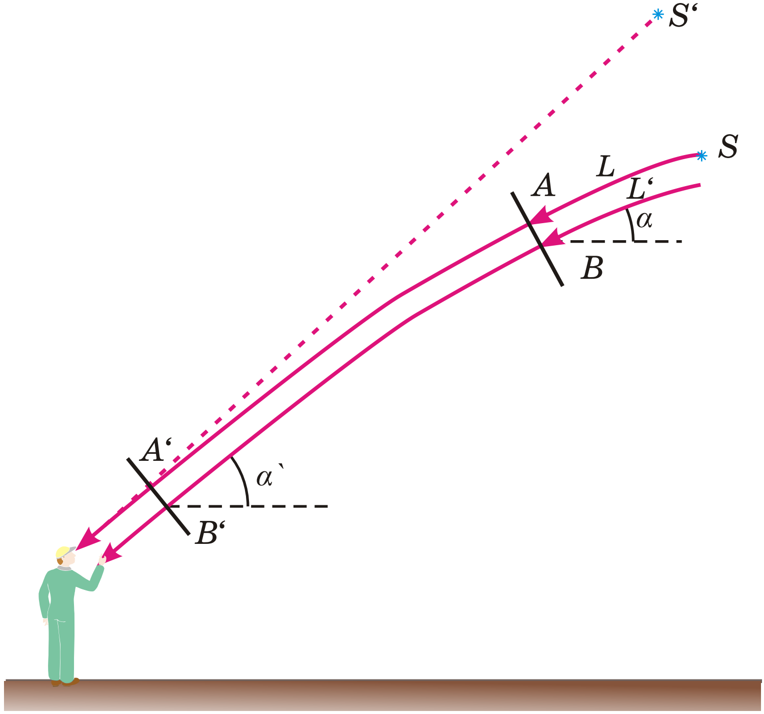
Bu ýerde c – hemişelik ululyk, ρ - atmosferanyň dykyzlygy.

Atmosferanyň dykyzlygynyň beýiklik boýunça üýtgemesi barometrik aňlatma arkaly kesgitlenilýär:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right). \tag{7.53}$$

Bu ýerde ρ_0 we ρ degişlilikde Ýeriň üstüne golaý ýerleşen we h beýiklikdäki atmosferanyň dykyzlygy; μ - howanyň molekulýar massasy; R – uniwersal gaz hemişeligi; T – termodinamiki temperatura; g – agyrlyk güýjüniň tizlenmesi.

Onda atmosferanyň döwme görkezijisi üçin



7.14-nji çyzgy

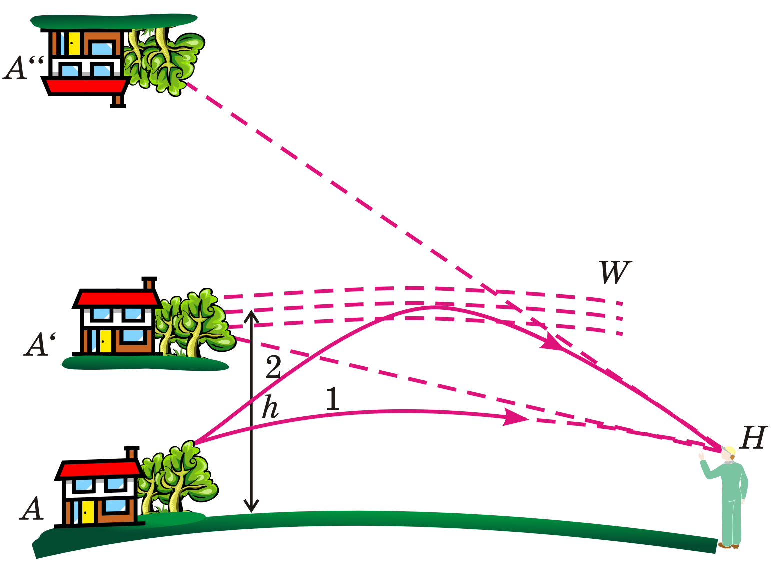
$$n - 1 = c' \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right) \qquad \textbf{(7.54)}$$

aňlatmany alarys. Bu ýerde $c' = c\rho_0$ hemişelik ululyk.

(7.54) aňlatmadan görnüşi ýaly h beýikligiň üýtgemegi bilen n döwülme görkeziji endigan üýtgeýär. Bu bolsa normal çyzyga burç bilen gönükdirlen şöhläniň ugrunyň birsydyrgyn üýtgemesine getirýär. 7.14-nji çyzgyda S ýagtylgyçdan α burç (α<90^0) boýunça düşýän şöhläniň L we L' çyzyklary şekillendirlen. L şöhle L' şöhleden ýokarda ýerleşip, uly tizlik bilen ýaýraýar. Şonuň netijesinde AB ýagtylyk tolkunynyň fronty kem-kemden çepe gyşarýar we normal çyzyga ýakyn bolan ugry eýeleýär. Netijede gözegçi S ýagtylgyjy α burç bilen däl-de α' burç boýunça kesgitlenýän ugurda görýär. Şol sebäpli Gün we Aý gorizonta ýakyn ýerleşende (doganda-ýaşanda) normal ugur boýunça süýndirlen ýaly bolup görünýär. Bu hadysa ***atmosfera refraksiýasy*** diýilýär. Atmosfera refraksiýasy dykyzlygynyň beýiklik boýunça paýlanmasy (7.53) aňlatma doly boýun egen ýagdaýynda ýüze çykýar.

2. Salgymlar

Eger atmosferanyň temperaturasy beýiklige baglylykda çürt-kesik üýtgeýän bolsa. Mysal üçin Ýeriň üstüne golaý gatlagyň temperaturasy has pes bolup, käbir beýiklikde adaty bolmadyk derejede ýokary bolsa, onda atmosferanyň refraksiýasynyň adaty bolmadyk ýagdaýy, ýagny salgym ýüze çykýar.



7.15-nji çyzgy

Käbir şertlerde Ýerden ýokary galyndygyça atmosferanyň temperaturasy ýokarlanýar, dykyzlyk we ýagtlygy döwülme görkezijisi kiçelýär. Netijede Ýeriň üstünden käbir beýiklikde ýagtylygyň ýaýrama tizligi uly bolup şöhleler Ýeriň üstüne tarap gyşarýar *(7.15-nji çyzgyda 1-nji şöhle)*. Şol sebäpli gözegçi Ýeriň üstündäki duran zatlary (A) Ýeriň üstünde ýokarda (A') görýär.

Käbir ýagdaýlarda Ýerden h beýiklikde temperaturanyň has ýokarlanmagy bilen şöhle 2 bu gatlakdan serpikmesi zadyň (A'') ikilenji şekilini berýär.

Ol şekil zadyň tersine öwrülen görnüşinde bolýar. Bu hadysa **ýokarky salgym** diýilýär. Mundan tapawutlylykda **aşaky salgym** hem bolýar. Aşaky salgym çöllüklerde Ýeriň üstünden seredilende suwy görkezýär. Aşaky salgymdan ýokarky salgyma geçende ýa-da tersine dürli howaýy (fantastiki) şekiller ýüze çykýar. Bu hadysa Morganyň-fatasy (fata-morgana) diýilýär.

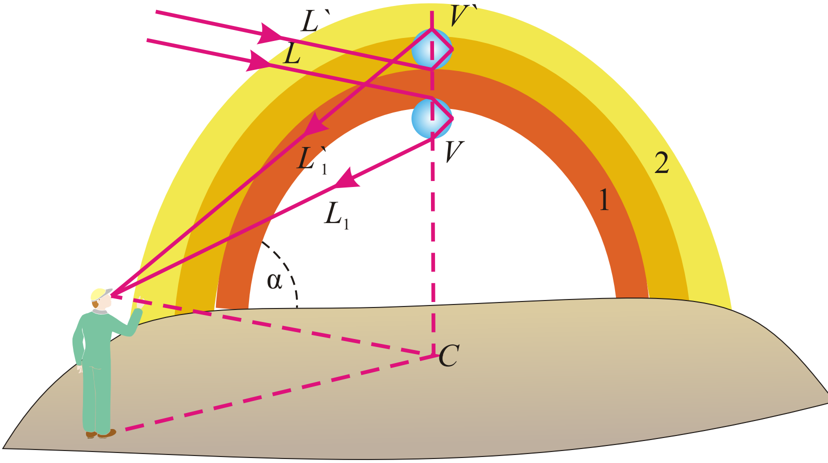
3. Älemgoşar

Bu hadysa ýagtylygyň dispersiýasy bilen baglanyşyklydyr. Asmanda älemgoşaryň görünmegi üçin iki şert ýerine ýetmeli.

1) Gözegçi Gün bilen ýagýan ýagyşyň arasynda bolmaly.

2) Günüň gorizontdan belentligi 42^0 çemesi bolmaly.

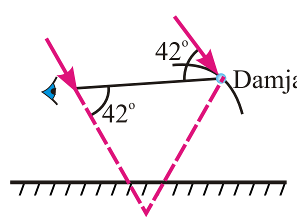
Älemgoşar – radius burçy 42^0 çemesi bolan töweregiň dürli reňkli dugasydyr, onuň merkezi Gün bilen gözegçiniň gözüni birleşdirýän gönüniň üstünde ýerleşýär.



7.16-njy çyzgy

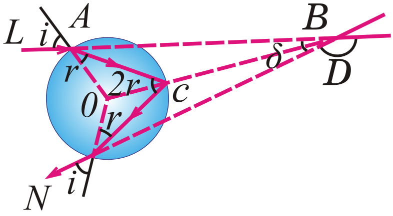
(7.16-njy çyzgy), duganyň daşky gyrasy gyzyl, içki tarapy melewşe reňkli bolýar. Käwagt reňkleriň tertibi tersine bolan ikilenji älemgoşar hem ýüze çykýar. Adaty (tebigy) gabat gelýän älemgoşar ýagyş damjasynyň içinde ýagtylygyň iki gezek döwülmegi we bir gezek serpikmegi hem-de köp sanly damjalaryň döredýän difraksiýa hadysasynyň netijesinde emele gelýär.

Goý, togalak ýagyş damjasynyň üstüne Gün şöhlesi düşýän bolsun *(7.18-nji çyzgy)*. i ýagtylygyň düşme burçy r döwülme burçy. Bu şöhläniň bir bölegi damjada doly döwülip, BN ugur boýunça ýaýrap, gözegçiniň gözüne düşmegi mümkin. Bu ýagdaýda käbir BN ugurda şöhleleriň jemlenmegi bolup biler (bu ugur döwme görkezijä, ýagny tolkun uzynlyga bagly bolýar). 7.18-nji çyzgydan peýdalanyp şöhläniň ugrunyň üýtgemesini kesgitläp bileris:



7.17-nji çyzgy

$$D = \pi - \delta \, . \qquad (7.55)$$



7.18-nji çyzgy

ACB üçburçlukdan

$$\frac{\delta}{2}+(i-r)+(\pi-r)=\pi \,,$$

onda

$$\frac{\delta}{2}+i-2r=0\,.$$

Bu ýerden

$$\delta=2(2r-i)\,.$$

Bu netijäni **(7.55)** aňlatmada ornuna goýup, alarys:

$$D=\pi+2i-4r\,.$$

D burç bilen i düşme burçunyň baglanyşygyny (ahyrky deňligi) düşme burçy boýunça differensirläp, nola deňlesek

$$\frac{dD}{di}=2-4\frac{dr}{di}=0$$

bolar. Diýmek $$\frac{di}{dr}=2\,.$$

Ýagtylygyň döwülme kanuny boýunça

$$\sin i=n\sin r\,. \tag{7.56}$$

Bu aňlatmany i we r boýunça differensirlesek:

$$\cos i di=n\cos r dr\,.$$

Bu ýerden $$\frac{di}{dr}=2=\frac{n\cos r}{\cos i}\,.$$

Bu deňligi kwadrata göterip we döwülme kanunyň esasynda $\cos r$ -i çalşyp, alarys:

$$n^2 = 1 + 3\cos^2 i$$

aňlatmany alarys. Bu ýerden

$$\cos\ i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}\ .$$

Arassa suwuň döwme görkezijisi *n=1,333*. Şonuň üçin

$$i = 59^0\ 20'$$

bolýar. (7.56) kanuna görä $r = 40^0 12'$, onda $D = 137^0 52'$. Şeýlelikde

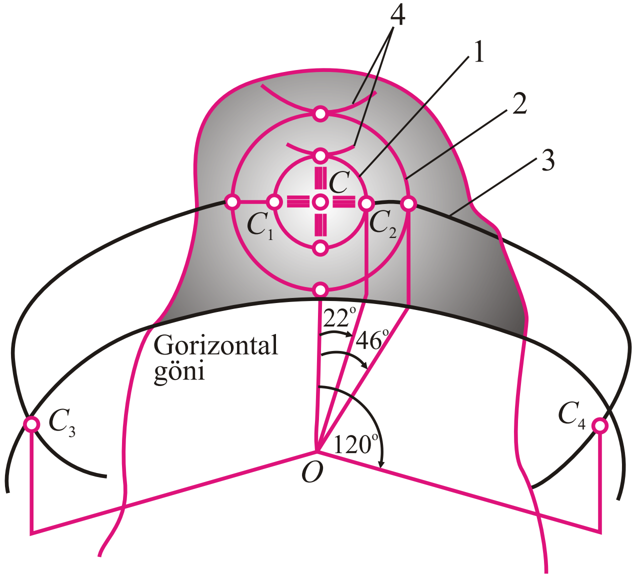
$$\delta = 180 - 137^0\ 52' = 42^0\ 08'\ .$$

δ burçuň şu ululygynda *BN* ugurda şöhläniň jemlenmesi (konsentrirlenmesi) bolýar. Bu alnan netije spektriň orta bölegi üçin dogrudyr. Gyzyl ýagtylygyň döwülme görkezijisi $n_g = 1{,}331$, onda $\delta_g = 42^0 22'$, melewşe ýagtylygyň döwülme görkezijisi $n_m = 1{,}344$, onda melewşe ýagtylyk üçin δ_m=$40^0 63'$.

Alnan netijelerden görnüşi ýaly, dürli ýygylykly ýagtylyklaryň dugasynyň radius burçy dürlidir. Şonuň üçin ýagtylyk ýagyş damjalarynda spektre dargaýar we duga reňkli bolup görünýär.

4. Agyllama. Täç

Agyllama Günuň ýa-da Aýyň daşynda ýelek şekilli bulutlaryň buz kristaljyklarynda gün şöhlesiniň döwülmegi we serpikmegi netijesinde ýüze çykýar. Edebiýatlarda bu hadysa galo diýlip atlandyrylýar. («*Galo – halos – töwerek*» – diýen grek sözünden gelip çykyp, türkmençe «agyllama» diýilýär). Agyllamanyň emele gelşi 7.19-njy çyzgyda görkezilýär.



7.19-njy çyzgy

Çyzgyda gözegçi gorizont çyzygy bilen çäklenen tekiz töweregiň merkezinde *O* nokatda dur diýeliň. Güni (Aýy) we agyllamanyň hemme elementlerini gözegçi asman gümmezinde görer. Ýagtyltgyç (Gün) çyzgyda *C* bilen belgilenen. Günüň daşynda iki sany ýagtylanýan halka görünýär. 1-nji halka burç radiusy 22^0 (oňa kiçi agyllama diýilýär) we 2-nji halka burç radiusy 46^0 (uly agyllama diýilýär) burç bilen görünýär. Şeýle hem gorizontal ýagtylanýan pareliki tegelek diýlip atlandyrylýan tegelek 3 ýüze çykýar. Ony doly görmek üçin gözegçi 360^0 burça öwrülmeli bolýar. C_1 we C_2 bilen ýüze çykýan hyýaly Günler belgilenendir. Hakyky Günden 120^0 tapawutlanýan, yza galýan hyýaly görünýän Günler C_3 we C_4 bilen belgilenendir (olary paranteliýalar diýip atlandyrýarlar).

Agyllamanyň dürli bölekleri buz kristaljyklary bilen ýagtylygyň özara täsiriniň dürli hadysalary arkaly şertlenendir. Agyllamanyň dürli elementlerini iki topara bölmek mümkin: reňksiz (ak) we reňk öwüşginli. Pareliki töwerek ak bolup, kiçi we uly agyllama reňk öwüşginlerine eýe bolýar. Olaryň içki gyrasy gyzyl öwüşginli, daşky gyrasy gök-melewşe öwüşgine eýe bolýar. Bu öwüşginler kiçijik buz kristaljyklarynda ýagtylygyň döwülmegi netijesinde ýüze çykýar.

Günüň we Aýyň (ýa-da başga güýçli ýagtylyk çeşmeleriniň) töwereginde bir ýa-da birnäçe reňklenen älemgoşar halkalary döräp, täçleri emele getirýärler. Bu halkalaryň merkezi ýagtyltgyç bilen gabat gelýär. Täçleriň diametri 2^0 töweregi bolup, dürli ýagdaýlarda üýtgäp durýar. Täçler haçanda Gün ýa-da Aý ýukajyk bulut perdesi bilen ýapylyp, ondan ýagtyltgyjyň görünýän wagtynda gözegçilik edilýär. Ýagtyltgyç we töweregindäki älemgoşar halkalarynyň aralygynda agymtyl ýa-da sarymtyl meýdan - oreol görünýär.

Täçler asman gümmezini dury bulutlar ýapanda ondaky suw damjajyklarynda ýagtylygyň difraksiýasy bilen düşündirilýär. Suw damjajyklaryndaky difraksiýa şol diametrdäki dury däl päsgelçilikdäki difraksiýa meňzeş bolýar. Eger damjanyň diametri D bolsa onda difraksiýa zerarly ýagtylygyň depgininiň birinji tertipli iň kiçi gowşamasy $\theta = 1{,}22\dfrac{\lambda}{D}$ şert bilen kesgitlenýär. Hakykatda gözegçilik edilýän burçlar örän kiçi: $\theta \approx 2^0$ bolýar. Eger $\theta = \dfrac{1}{30}\, rad, \lambda = 0{,}5\, mkm = 0{,}005\, mm$ bolsa, onda damjanyň diametri $D = 18 mkm = 0{,}0018 mm$ bolýar. Ýuka galyňlykly bulutlarda hakyky gözegçilik edilýän suw damjalarynyň diametri $14 \div 20$ mkm bolýar.

Duman damjajyklarynyň diametri ortaça 10 *mkm* bolýar. Agyllamadan tapawutlylykda täçlerde reňkleriň ýerleşişi ters tertibe eýe bolýar.

5. Gyrpyldama

Gyrpyldama optiki hadysalaryň giň toparyny öz içine alyp, uzakdaky ýagtylyk çeşmeleriniň ýa-da ýeriň üstündäki predmetleriň atmosferadaky turbulent akym bilen baglanyşykly hadysalaryň netijesinde kä görünýändigini käte-de görünmeýändigini aňladýar.

Ýyldyzlaryň gyrpyldamasy olaryň ýagtylanyşynyň we reňkiniň örän çalt üýtgemeginiň netijesidir. Atmosferada döreýän ýerli tolgunmalar onuň dykyzlygynyň fluktuasiýasyna (tötänleýin üýtgemelerine) getirýär hem-de döwme görkezijisi üýtgeýär. Bu bolsa gözegçiniň gözüne düşýän şöhläniň tötänleýin refraksiýasynyň döremegine getirýär we käbir pursatlarda gözegçä gelýän ugrundan gyşarýar, netijede ýyldyzyň ýagtylygy üýtgäp-yrgyldap durýar. Ýyldyzyň ýagtylygynyň çalt üýtgemegi bilen bir hatarda onuň titremegine hem gözegçilik edilýär. Ýagny ýyldyzyň ýerleşýän, görünýän ýagdaýynyň çalt üýtgemegi ýüze çykýar. Bu hadysalar hem gyrpyldamada ýyldyzyň ýagtylanyşynyň we reňkiniň yrgyldylary bilen häsiýetlendirilýär. Ýerüsti ýagtylyk çeşmeleri hem uly aralyklarda edil ýyldyzlardaky ýaly gyrpyldamany ýüze çykarýarlar. Ýerüsti ýagtylyk çeşmeleriniň we ýyldyzlaryň gyrpyldamasy adamyň amaly döredijiliginde ýaramaz täsirini ýetirýär, ylmy-barlag işlerde, tehniki meseleleri optiki usullaryň kömegi bilen çözmekde kynçylyklar döredýär.

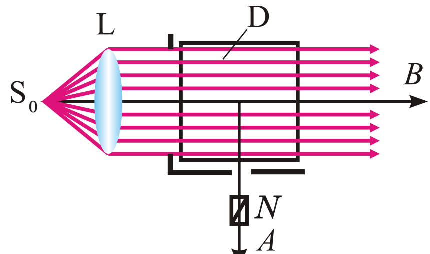
Optiki aragatnaşyk serişdeleriniň ulanylyşynda gyrpyldama örän güýçli «goh» döredip, habarlaryň optiki geçirijiligini ýaramazlaşdyrýar.

7.9. Ýagtylygyň pytradylma hadysasy

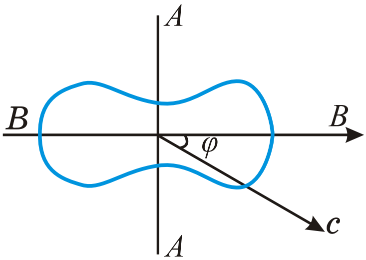
1. Releýiň kanuny. Pytradylan ýagtylygyň polýarlanmasy. Asmanyň reňki

Nusgawy garaýyşda ýagtylygyň pytradylmasy maddadan geçýän ýagtylygyň maddanyň atomlaryndaky elektronlaryny tolgundyryp yrgyldatmasy arkaly düşündirilýär. Maddanyň atomlaryndaky yrgyldaýan elektronlar ähli ugurlar boýunça ýaýraýan ikilenji tolkun çeşmelerine öwrülýärler. Ýagtylygyň pytradylmasy islendik şertde ýüze çykmaýar. Sebäbi birjynsly madda ikilenji tolkunlar, ýaýraýan ýagtylyk tolkunlary bilen kogerentdirler, netijede maddada islendik ugur boýunça ýaýraýan ýagtylygyň depgini bu ugur boýunça interferensiýanyň netijesine baglydyr. Hasaplamalaryň görkezişine görä, birjynsly (birhilli) maddada ilkinji tolkunyň ýaýraýan ugrundan başga islendik ugurda interferensiýa sebäpli ýagtylygyň depgininiň iň kiçi gowşamasy ýüze çykýar. Diýmek, gapdala ýagtylyk ýaýramaýar we pytrama ýüze çykmaýar.

Eger ýagtylygyň ýaýraýan gurşawy birjynsly bolmasa, ikilenji tolkunlar düşýän tolkunlar bilen kogerent bolmaýar we interferensiýa ýüze çykmaýar. Şeýle gurşawda ýaýraýan ýagtylyk tolkuny difraksiýa sezewar bolup, ähli ugurlar boýunça ýagtylygyň depgininiň deňölçegli



7.20-nji çyzgy



7.21-nji çyzgy

paýlanmasyny häsiýetlendirýän difraksiýa görnüşi ýüze çykarýar. Gurşawyň (maddanyň) birjynsly bolmazlygy bilen baglanyşykly ýüze çykan difraksiýa hadysasyna ýagtylygyň pytramasy diýilýär.

Ýagtylyk üçin birjynsly bolmadyk maddalara bulançak (mutnaýa) maddalar diýilýär. Optiki taýdan birjynsly bolmazlyga gazlarda örän ownuk gaty bölejikleriň bolmagy (tüsse), suwuklyklarda gaty bölejikleriň bolmagy (suspenziýa), atmosferada suw buglarynyň bolmagy (duman), suwda ýag bölejikleriniň bolmagy (süýt) we ş.m-ler sebäp bolýar.

Bulançak gurşawlarda ýagtylygyň ýaýraýşy 1869-njy ýylda iňlis fizigi J. Tindal tarapyndan öwrenilip, ýagtylygyň pytrama hadysasy ýüze çykarylan. Şonuň üçin ýagtylygyň maddalarda pytrama hadysasyna Tindal effekti (hadysasy) hem diýilýär. Ýagtylygyň pytramasyna syn etmek üçin niýetlenen gurnama 7.20-nji çyzgyda şekillendirilen. Bu gurnamada *S* - ýagtylyk çeşmesi, *L* - linza *D* - bulançak suwuklykly gap, *B* - ýagtylygyň başlangyç ýaýraýan ugry, *A* - ýagtylygyň 90^0 burça pytran ugry, *N* - nikolyň prizmasy.

Tindal içinde ölçegleri ýagtylygyň tolkun uzynlygyndan kiçi $\left[(0,1 \div 0,2)\lambda\right]$ birhilli dällikler (bölejikler) bolan bulançak maddada ak ýagtylygyň pytramasyny öwrenmek bilen aşakdaky kanunalaýyklyklary açdy.

1) Ýagtylygyň ilkibaşdaky ýaýraýan ugrundan gapdala pytradylan ýagtylygyň gögümtil-mawy reňki bolýar, ilkibaşdaky ýaýraýan ugrunda ýagtylygyň reňki gyzlymtyl bolýar. Başgaça aýdanymyzda bulançak gurşawda gysga tolkunlar köpräk, uzyn tolkunlar gowşak pytradylýar.

2) Ýagtylygyň ilkibaşdaky ugruna perpendikulýar (φ=90^0) ugur boýunça ýaýraýan ýagtylyk çyzykly polýarlanýar. Pytradylan ýagtylygyň elektrik wektorynyň ($\vec{E}$) ugry ýagtylygyň ilkibaşdaky ugry bilen syn edilýän ugruň üstünden geçýän tekizlige perpendikulýar ugrukdyrylýar.

3) Dürli ugurlar boýunça pytradylan ýagtylygyň depgini ýagtylygyň başlangyç dessesiniň okuna we oňa perpendikulýar çyzyga görä simmetrikdir *(7.21-nji çyzgy)* we onuň depgini

$$I_\varphi = I_{\frac{\pi}{2}}(1+\cos^2\varphi) \qquad (7.57)$$

aňlatma arkaly kesgitlenip biliner.

Bu ýerde I_φ we $I_{\frac{\pi}{2}}$ degişlilikde φ we $\frac{\pi}{2}$ burça pytradylan ýagtylygyň depgini. Bu aňlatma (7.57) bulançak gurşawa tebigy (polýarlanmadyk) ýagtylyk düşürilen ýagdaý üçin adalatlydyr.

1871-nji ýylda iňlis fizigi Jon Releý ölçegleri ýagtylygyň tolkun uzynlygyndan kiçi bolan sfera görnüşli bölejiklerde pytradylan ýagtylygyň depgini üçin aşakdaky aňlatmany teklip etdi:

$$I_\varphi = I_0 \frac{9\pi^2\varepsilon_0^2 NV^2}{2\lambda^4 L^2}\left(\frac{\varepsilon-\varepsilon_1}{\varepsilon+\varepsilon_1}\right)^2\left(1+\cos^2\varphi\right). \qquad (7.58)$$

Bu ýerde I_0 we I_φ degişlilikde düşýän we pytradylan ýagtylygyň depgini, V – pytradyjy bölejigiň göwrümi, N - pytradyjy göwrümdäki bölejikleriň sany, ε - bölejigiň dielektrik syzyjylygy, ε_1 - pytradyjy maddanyň dielektrik syzyjylygy, φ - pytrama burçy, L pytradyjydan syn edilýän nokada çenli aralyk.

(7.58) aňlatmadan görnüşi ýaly, $\varepsilon=\varepsilon_1$ bolanda pytradylan ýagtylygyň depgini $I_\varphi = 0$ bolýar.

Başgaça aýdanymyzda maddanyň dielektrik syzyjylygy onuň içindäki bölejikleriň dielektrik syzyjylygyna deň bolanda ýagtylyk pytradylmaýar. Bu aňlatmadan alynýan ýene-de bir wajyp netije, ol hem pytradylan ýagtylygyň depgininiň ýagtylygyň tolkun uzynlygynyň dördünji derejesine ters proporsionallygydyr:

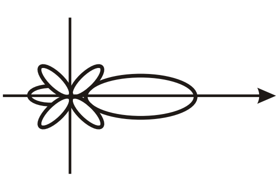
$$I \sim \frac{1}{\lambda^4} \; . \tag{7.59}$$

Bu aňlatma ýagtylygyň pytradylmasy üçin Releýiň kanuny diýilýär.

Bu kanunyň esasynda asmanyň reňkiniň mawy bolşy, Aýyň, Günüň gorizonta ýakyn ýerleşen pursatlarynda gyzylymtyl reňkde bolşy düşündirilýär.

Hakykatdan-da, asmanyň mawy reňki-atmosferada pytradylan gök we mawy şöhlelerdir. Atmosfera bolmasa asman absolýut gara bolup görnerdi. Aý, Gün we ýyldyzlar gorizonta golaý ýerleşende, şöhleler atmosferanyň dykyz ýerinden geçýär we güýçli pytradylma zerarly ýagtylygyň düzüminde gök, mawy şöhleler azalýar, şonuň üçin geçen ýagtylyk gyzlymtyl bolýar.

Nazary taýdan we tejribeleriň esasynda geçirilen derňewler bu hadysanyň atmosferada ýagtylygyň molekulýar pytradylmasy zerarly ýüze çykýandygyny subut etdi. Ýagtylygyň molekulýar pytradylma nazaryýetine görä bu hadysa molekulalaryň ýylylyk hereketi sebäpli atmosferanyň dykyzlygynyň



7.22-nji çyzgy

fluktuasiýasy bilen baglanyşyklydyr. Şeýlelikde atmosferanyň dürli belentliklerinde ýagtylygyň döwülme görkezijisi dürli bolup, olarda şöhläniň ugry üýtgeýär, ýagny ýagtylyk pytradylýar. Temperaturanyň ýokarlanmagy fluktuasiýany artdyrýar, bu bolsa ýagtylygyň pytradylmasyny güýçlendirýär.

Bulançak maddadaky bölejikleriň ölçegleri (d) ulaldygyça, Tindalyň we Releýiň kanunlary bozulyp başlaýar. $d>\lambda$ bolanda I_φ-niň φ burça baglylygy çylşyrymly görnüşe eýe bolýar, onda-da ýagtylygyň öňe pytradylmasy yza pytradylmasyna garanda güýçlenýär *(7.22-nji çyzgy)*.
Pytradylan ýagtylygyň depgini tolkun uzynlyga az bagly bolýar. Bu hadysa **Miniň effekti** diýilýär (nemes fizigi MiGustaw Adolfyň hormatyna). $\varphi = \dfrac{\pi}{2}$ burça pytradylan ýagtylyk kem-käs polýarlanýar. Maddadaky bölejikleriň ölçegleri ($d>>\lambda$) ýagtylygyň tolkun uzynlygyndan has uly bolsa pytradylan ýagtylygyň spektr düzümi madda düşýän ýagtylygyňka deň bolýar. Buludyň, dumanyň reňkiniň ak bolmagy Miniň effektiniň esasynda düşündirilýär.

2. Ýagtylygyň utgaşykly pytradylmasy

Bulançak gurşawda ýagtylyk pytradylanda pytradylan ýagtylygyň ýygylygy düşýän ýagtylygyňka deň bolýar. Beýle pytradylma Releý pytradylmasy diýilýär. Şpektriň görünýän we ultramelewşe çäklerinde ýygylygyň üýtgemesi bilen bolýan pytradylma hem duş gelinýär. Muňa utgaşykly pytradylma diýilýär.

Bu hadysa 1928-nji ýylda rus fizikleri Mandelştam we Landsberg hem-de olara baglanyşyksyzlykda hindistanly fizik Raman tarapyndan açyldy.

Eger madda ν_0 ýygylykly monohromatik ýagtylyk düşse, onda pytradylan ýagtylykda ν_0 ýygylykdan başga-da gowşak depginli $\nu_1=\nu_0-\nu$ we $\nu_2=\nu_0+\nu$ ýygylykly şöhleler peýda bolýar. Bu hadysa ýagtylygyň kwant nazaryýetiniň esasynda düşündirilýär. Belli bolşy ýaly, islendik maddanyň molekulalary ýylylyk yrgyldyly hereketde birnäçe hususy ýygylykly yrgyldylara we şunyň bilen baglanyşykly energiýa derejelere eýe bolýar. Eger madda ýagtylyk düşürilse, onda ýagtylyk fotonlar bilen maddanyň molekulalary kesgitli şertde özara täsire girýärler.

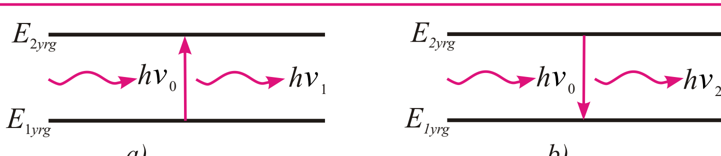
Goý, E_{1yrg} energetiki derejede bolan maddanyň molekulasy ν_0 ýygylykly foton (kwanty) bilen özara täsirleşýän bolsun. Täsirleşmede molekulanyň energetik derejesini saklamagy mümkin (maýyşgak çaknyşma). Bu ýagdaýda pytradylan fotonyň energiýasy $h\nu_0$ we ýygylygy ν_0 üýtgemeýär.

Eger-de täsirleşmede molekula E_{2yrg} energetiki derejä ($E_{2yrg}>E_{1yrg}$) geçse, onda molekula täsirleşýän fotonyny

$$\Delta E = E_{2\,yrg} - E_{1yrg} = h\nu_{\,0}$$

şertde özüne siňdirip, onuň ornuna kiçi ýygylykly we $h\nu_1=h\nu_0-\Delta E$ energiýaly fotony şöhlelendirýär *(7.23-nji **a** çyzgy)*.
Netijede, pytradylan ýagtylykda

$$\nu_1 = \nu_0 - \frac{\Delta E}{h}$$



7.23-nji çyzgy

ýygylyk ýüze çykýar. Spektrde ν_1 ýygylykly ýagtylygyň çyzygy ν_0 ýygylykly ýagtylykdan kiçi ýygylykly bolup, gyzyl tarapda ýerleşýär. Şonuň üçin oňa «gyzyl» hemra diýilýär.

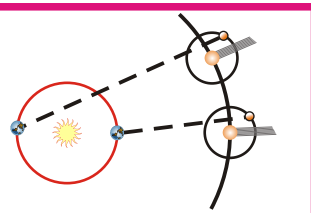
Eger foton bilen täsirleşmede molekula ýokary energetik derejeden aşaky energetiki derejä geçse, onda molekula bu fotony siňdirip

$$h\nu_2 = h\nu_0 + \Delta E,$$

$$\nu_2 = \nu_0 + \frac{\Delta E}{h}$$

ýygylykly fotony şöhlelendirýär. *(7.23-nji b çyzgy)*. Şeýlelikde spektrler ν_2 ýygylyk «melewşe» hemra ýüze çykýar. «Melewşe» hemranyň depgini «gyzyl» hemranyňkydan gowşakdyr.

VIII BAP



OPTIKADA RELÝATIWISTIK HADYSALAR

8.1. Ýagtylygyň ýaýrama tizligi we ony ölçemek (kesgitlemek) boýunça nusgawy tejribeler

Ýagtylygyň elektromagnit nazaryýetine görä, onuň maddada ýaýrama tizligi

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär.

Bu ýerde ε we μ degişlilikde maddanyň dielektrik we magnit syzyjylygy, c - ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi.

Maddanyň absolýut döwme görkezijisi

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu} .$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär.

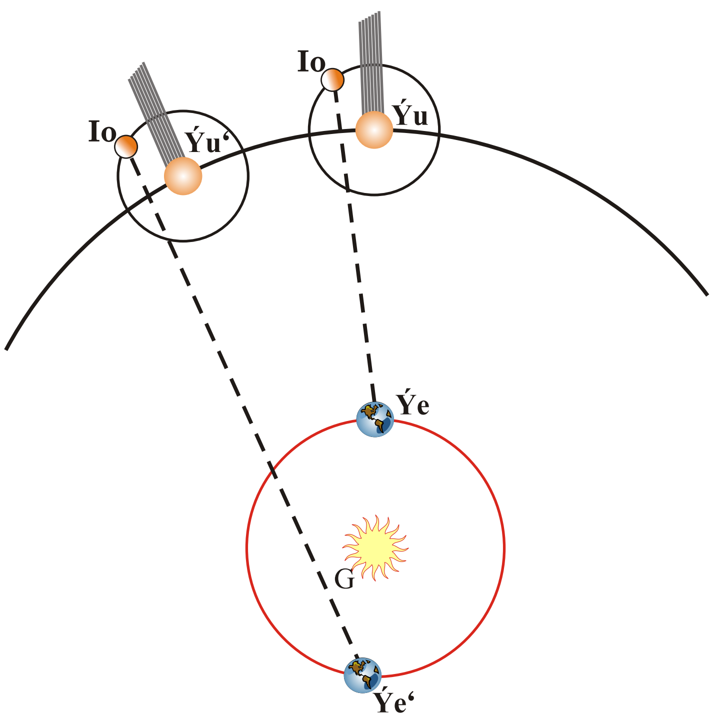
Ýagtylygyň wakuumda şeýle-de maddalarda ýaýrama tizligi örän uludyr. Şoňa görä, ilki diňe astronomiýanyň usullary peýdalanylyp, kanagatlanarly netijeler alnypdyr. Olaryň käbirine seredip geçmek ýerliklidir.

1. Rýomeriň usuly

Daniýaly astronom Olaf Rýomer 1676-njy ýylda Ýupiter planetasynyň *Io* diýlip atlandyrylýan tebigy hemrasyna gözegçilik edip, onuň ýylyň dowamynda tutulma periodynyň üýtgeýändigini ýüze çykarýar.

Bu ýagdaýyň sebäbini Rýomer, ýagtylygyň ýaýrama tizliginiň çäklidigi bilen baglanyşdyrýar we ony ýagtylygyň ýaýrama tizligini ölçemek üçin peýdalanýar.

Ýupiteriň *Io* hemrasynyň aýlanma periody T_0=42,47 sagada deň. Emma Ýerden gözegçilik edilende onuň yzygiderli iki gezek tutulmasynyň T_i wagty, Ýeriň orbita boýunça hereketiniň netijesinde üýtgeýär. Ýer bilen Ýupiteriň aralygy iň ýakyn bolanda *(8.1-nji çyzgyda Ýe we Ýu)* T_i=T_0 bolýar. Ýer Ýupiterden uzaklaşdygyça ilki T_i artýar we soňra kemelýär



8.1-nji cyzgy

hem-de Ýer bilen Ýupiteriň aralygy has uzak bolanda (çyzgyda *Ýe* we *Ýu*) ýene-de T_i=T_0 bolýar. T_0 wagtda Ýer Ýupiterden käbir aralyga uzaklaşýar, bu aralygy geçmek üçin ýagtylyga T_i–T_0 goşmaça wagt gerek bolýar. T_i–T_0– wagt tapawudynyň iň uly bahasy 15 sekuntdan geçmeýär, ýöne Ýer *Ýe* - den *Ýe′*-ýagdaýa geçýänçe (ýarym ýylda) I*onyň* yzygiderli iki gezek tutulmasynyň arasyndaky wagtlaryň tapawudynyň jemi:

$\Delta T = \sum_{i=1}^{N} \left(T_i - T_0\right)$ bolýar.

Şeýlelikde, Ýupiterden Ýere çenli aralygyň ulalmasy Ýeriň Günüň daşyndan aýlanýan orbitasynyň diametrine (D=2,99·10^{11} m) deň bolmagyna görä, ýagtylygyň ýaýrama tizligi

$$c = \frac{D}{\Delta T}$$

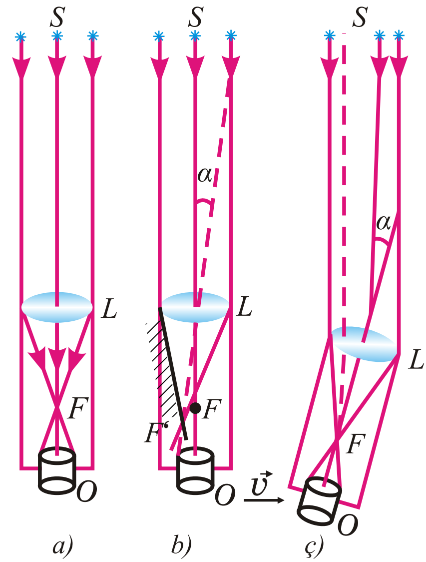
aňlatma arkaly kesgitlenip bilner.

Rýomeriň döwründe ΔT wagty ýokary takyklykda kesgitlemek mümkin bolmanlygy zerarly, ol ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi üçin $c = 2{,}15 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ san bahany alypdyr. Häzirki wagtda $\Delta T = 16{,}5$ minut we ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi üçin

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ alynýar.

2. Bradleýiň usuly

Iňlis astronomy Bradleý ýyldyzlara gözegçilik edip, olaryň ýagdaýynyň ýylyň dowamynda üýtgeýändigini ýüze çykarýar (1718-nji ýyl). Ýylyň dowamynda ähli ýyldyzlar asman giňişliginde elliptik traýektoriýa boýunça hereket edýärler. Ekliptikanyň tekizliginde (Ýeriň orbital tekizliginde) ýerleşen ýyldyzlar göni çyzyk boýunça yrgyldaýarlar, zenitde ýerleşen ýyldyzlar bolsa töwerek boýunça hereket edýärler.



8.2-nji çyzgy

Ýerden gözegçilik edilende ähli ýyldyzlar üçin ellipsiň uly okunyň (töweregiň diametriniň) burç ölçegi özara deňdir we 40,9″ ululyga eýedir. Bu hadysa ýagtylygyň **ýyllyk aberrasiýasy** diýilýär. Ol ýagtylygyň ýaýrama tizliginiň çäklidigi sebäpli ýüze çykýar. Bradleý bu hadysany ýagtylygyň ýaýrama tizligini kesgitlemek üçin peýdalanýar.

Goý, ýyldyza teleskop arkaly gözegçilik edilýän bolsun *(8.2-nji a,b,ç çyzgylar)*. *S* ýyldyzdan şöhlelenýän ýagtylygyň parallel şöhle dessesi teleskopa düşüp, onuň fokal tekizliginde (*F* nokatda) ýyldyzyň şekilini emele getirýär. Bu şekil okulýarda görülýär.

Eger Ýer hereketlenmeýän bolsa, onda şekil teleskopyň okunda *F* nokatda emele gelmeli *(8.2-nji a çyzgy)*. Hakykatda Ýer Günüň daşyndan v tizlik bilen aýlanýandygyna görä ýagtylyk teleskopyň *L* obýektiwinden fokal tekizligine ýetýänçe teleskop Ýeriň hereketiniň ugruna käbir aralyga süýşýär, netijede ýyldyzyň şekili F' nokatda emele gelýär *(8.2-nji b çyzgy)*. Ýyldyzyň şekiliniň teleskopyň okunyň üstünde alynmagy üçin teleskopy hereketiň ugruna käbir α burça gyşartmaly *(8.2-nji ç çyzgy)*. Çyzgydan görnüşi ýaly

$$\mathrm{tg}\ \alpha = \frac{F \cdot F'}{f}. \qquad (8.1)$$

Bu ýerde f - teleskopyň L obýektiwiniň fokus aralygy. Ýer orbitanyň garşylykly tarapyna geçende onuň hereketiniň tizliginiň ugry üýtgeýär ýagny, υ tizlik $(-\upsilon)$ bilen α burç $(-\alpha)$ bilen çalşylýar. Netijede, ýyldyzyň şekiliniň yrgyldysynyň burç ölçegi 2α=40,9″ bolýar. Ýagtylyk teleskopyň L obýektiwinden F nokada gelýänçä ýyldyzyň şekili FF' aralyga süýşýär. Onda

$$\Delta t = \frac{f}{c} \qquad \text{we} \qquad \Delta t = \frac{FF'}{\upsilon}.$$

Netijede ýagtylygyň ýaýrama tizligi üçin

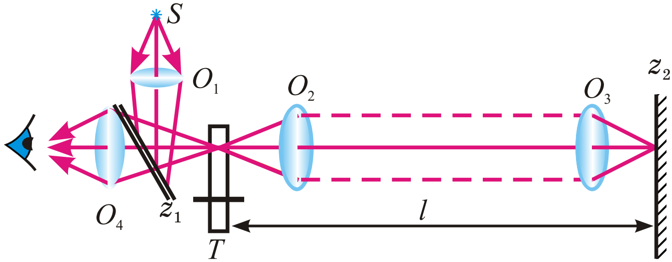
$$c = \frac{\upsilon}{\mathrm{tg}\ \alpha} \qquad (8.2)$$

aňlatmany alarys.

Bradleýiň hasaplamalaryna görä ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi $c = 3{,}03 \cdot 10^8 \ \frac{m}{s}$ bolýar. Bu usul boýunça has takyk ölçemeler $c = 299640 \ \frac{m}{s}$ netijäni berýär.

3. Fizonyň usuly (1849-njy ý.)

Fransuz fizigi Fizo ýagtylygyň ýaýrama tizligini 8.3-nji çyzgyda şekillendirilen gurnamanyň kömeginde ilkinji bolup Ýerde kesgitledi.

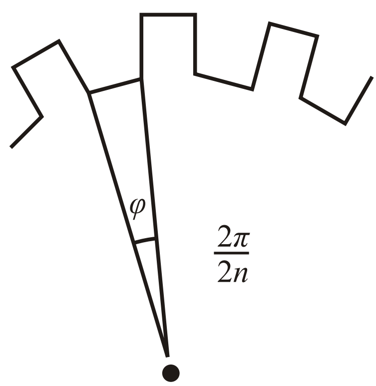


8.3-nji çyzgy

S çeşmeden ýaýraýan ýagtylyk şöhlesi O_1 linza we z_1 ýarymdury aýna arkaly çalt aýlanýan dişli tigre (T) ugrukdyrylýar. Netijede üznükli (modulirlenen) ýagtylyk akymy O_2 we O_3 linzalardan geçip, z_2 aýna düşýär. z_2 aýnadan serpigen şöhle O_3 we O_2 linzalardan geçip, T dişli tigre düşýär. Eger dişli tigirden sag ugra geçen şöhle z_2 aýnadan serpigip çep ugra gaýdyp dişli tigre gelýänçe tigiriň aýlanmagy bilen kesigiň ornuna diş geçse, onda O_4 linza arkaly seredilende garaňky görüş meýdany görünýär. Tersine, eger-de tigirden sag ugra geçen şöhle z_2 aýnadan serpigip ýene-de T tigre gelýänçe ýagtylygyň geçen kesiginiň ornuna başga kesik gelip ýetişse, onda O_4-den seredilende ýagty görüş meýdany görünýär.

Dişli tigriň aýlaw ýygylygyny yzygiderli artdyrmak bilen görüş meýdanynyň ilkinji garaňkyramasy-nyň wagt aralygyny kesgitlemek mümkin:

$$\Delta t = \frac{2\ell}{c}.$$



8.4-nji çyzgy

Bu wagt aralygynda dişli tigir

$$\varphi = \frac{2\pi}{2N}$$

burça aýlanýar. Bu ýerde N tigriň dişleriniň sany. Onda tigriň burç tizligi

$$\omega = \frac{\varphi}{\Delta t} = \frac{\pi c}{2N\ell} \tag{8.4}$$

aňlatma arkaly kesgitlenip bilner.

Bu ýerden ýagtylygyň ýaýrama tizligi üçin aňlatmany alarys:

$$c = \frac{2N\ell\omega}{\pi}.$$

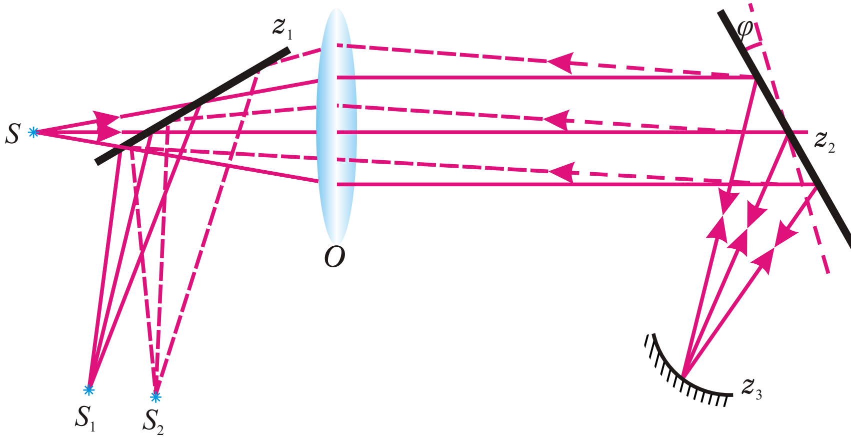
Bu aňlatmany $\omega = 2\pi\nu$ bahany ornuna goýup

$$c = 4N\ell\nu \tag{8.5}$$

görnüşde ýazyp bileris.

Dişli tigriň aýlaw ýygylygy 2 esse artdyrylsa, görüş meýdany ýagtylanýar, 3 esse artdyrylsa, ýene-de garaňkyraýar we ş.m. Fizonyň tejribesinde T dişli tigirden z_2 aýna çenli aralyk $\ell = 8{,}63\ km$, tigrň dişleri-niň sany $N = 720$ bolupdyr. Şeýlelikde, ol ýagtylygyň ýaýrama tizligi üçin $c = 315000\ \frac{km}{s}$ ululygy alypdyr. 1902-nji ýylda tejribäni $\ell = 46km$ ululykda geçirip, Perrožen ýagtylygyň ýaýrama tizligi üçin $c = (299870 \pm 50)\ \frac{km}{s}$ bahany alypdyr.

4. Fukonyň usuly (1868 ý.)



8.5-nji cyzgy

Fransuz fizigi Fuko ilkinji bolup ýagtylygyň ýaýrama tizligini tejribehana şertinde kesgitledi. Fukonyň usulynda ýagtylygyň ýaýrama tizligini döwme görkezijisi birden uly ($n>1$) bolan maddalarda hem ölçemek mümkin. Fukonyň tejribesiniň gurnamasynyň görnüşi 8.5-nji çyzgyda şekillendirilen.

S ýagtylyk çeşmesinden ýaýraýan şöhleler z_1 ýarymdury aýnadan we O linzadan geçip aýlanýan z_2 aýna düşýär. Ondan serpigip, z_3 aýna düşýär. z_3 aýnadan serpigip, ilkibaşky ugry boýunça ýene-de z_2 aýna düşýär. Ýagtylyk z_2 aýnadan z_3 aýna çenli ýoly we tersine geçýänçe zerur bolan wagtyň dowamynda z_2 aýna käbir φ burça öwrülýär. Şeýlelikde, ondan serpigen şöhle garşylykly ýaýraýan şöhlä görä 2 φ burça öwrülýär. Eger z_2 aýna hereketsiz bolsa ýa-da haýal aýlanýan bolsa, onda serpigen şöhle düşýän ugry boýunça yzyna dolanýar we z_1 ýarymdury aýnadan serpigip, çeşmäniň S_1 şekilini emele getirýär. Eger-de z_2 aýna çalt aýlansa, onda çeşmäniň S_1 şekili S_2 nokada süýşýär. Eger z_2 aýnadan z_3 aýna çenli aralyk L we S_1 nokatdan S_2 nokada çenli aralyk hem ΔS bolsa we O linzada S_1 we S_2 çenli aralyk ℓ diýsek, onda

$$\Delta S = 2\varphi \ell \tag{8.6}$$

aňlatmany ýazyp bileris.

Eger z_2 aýnanyň burç tizligi ω bolsa, onda ýagtylygyň $2L$ ýoly geçýänçe sarp edilen

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \tag{8.7}$$

wagtda z_2 aýna (φ) burça öwrülýär. Onda

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t = \omega \frac{2L}{c} \; . \tag{8.8}$$

Soňky aňlatmalardan ýagtylygyň ýaýrama tizligi üçin aşakdaky aňlatmany alarys :

$$c = \frac{4\omega L\ell}{\Delta S} = \frac{8\pi\nu L\ell}{\Delta S}. \tag{8.9}$$

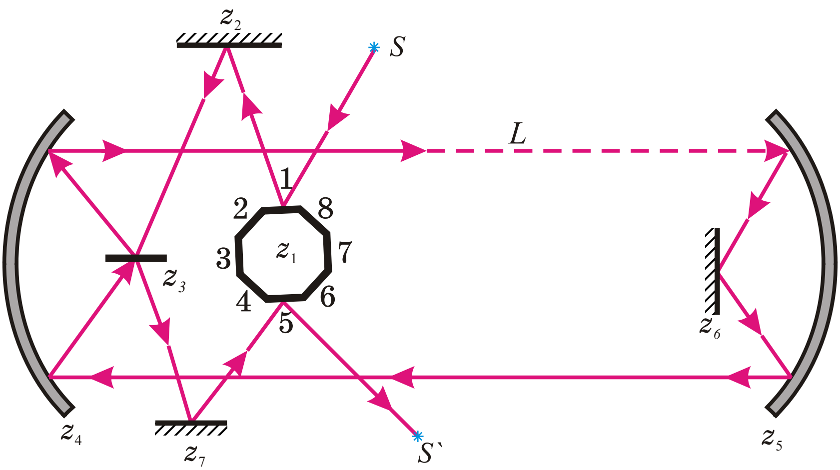
Fukonyň tejribesinde $L = 4m$, $\nu = 800 \frac{a\acute{y}l}{s}$ bolanda

ýagtylygyň ýaýrama tizligi $c = (298000 \pm 500) \frac{km}{s}$

bolýar. Bu tejribe 1891-nji ýylda täzeden geçirilende

$c = (299810 \pm 50) \frac{km}{s}$ netije alnypdyr.

5. Maýkelsonyň usuly



8.6-njy cyzgy

Maýkelsonyň tejribesiniň gurnamasy 8.6-njy çyzgyda şekillendirilen. S ýagtylyk çeşmesinden ýaýraýan şöhle aýlanýan 8 granly z_1 aýnanyň granlarynyň birine (1) düşýär.

Şöhle 8 granly aýnanyň 1-nji granyndan serpigip, z_2 we z_3 aýnalara düşýär. z_3 aýnadan serpikme sebäpli şöhle z_4 sferik aýna düşýär. z_4 sferik aýnadan serpigen şöhle L ýoly geçip, z_5 sferik aýna düşýär. z_5 sferik aýnadan serpigen şöhle z_6 aýnadan serpigip ýene-de z_5 sferik aýna düşýär. Soňra ol şöhle z_5 siferik aýnadan serpigip, L ýol geçip, z_4 sferik aýna düşýär. Soňra şöhle yzygider z_4, z_3, z_7 aýnalardan serpigip, z_1 8 granly aýnanyň bir granyna (5-nji granyna) düşýär. Ondan hem serpigip S' nokatda S ýagtylyk şöhlesiniň şekilini emele getirýär. z_1 sekiz granly aýnanyň 1-nji granyndan serpigen şöhle L_2 ýoly geçip, 5-nji granyna düşýänçe 5-nji granyň ýerine, 6-njy gran geler ýaly, aýlaw ýygylygy (ω) saýlap almak mümkin. Bu ýagdaýda S ýagtylyk çeşmesiniň S' şekiliniň orny üýtgemeýär.

Onda $\Delta t = \dfrac{2L}{c}$ wagtyň dowamynda z_1 sekiz granly aýna

$$\varphi = \frac{2\pi}{8}$$

burça öwrüler.

Bu aňlatmalardan ýagtylygyň ýaýrama tizligi üçin

$$c = \frac{8\omega L}{\pi} = 16\nu L \tag{7.10}$$

aňlatmany alarys.

Maýkelsonyň tejribesinde $L = 35{,}4\ km$ bolup ýagtylygyň ýaýrama tizliginiň

$$c = (299796 \pm 4)\,\frac{km}{s}\ \text{deňligi alynýar.}$$

8.2. Göräligiň ýörite nazaryýetiniň tejribe esaslary

Hereketli gurşawlarda ýagtylygyň ýaýraýşy boýunça tejribeler

Ýagtylygyň tolkun tebigaty esaslandyrylan döwründen başlap, ýagtylyk — älemi dolduryp duran aýratyn gurşawda (maddada) ýaýraýar diýen düşünje mäkäm ornaşdy. Bu gurşawy (maddany) efir diýip atlandyrdylar.

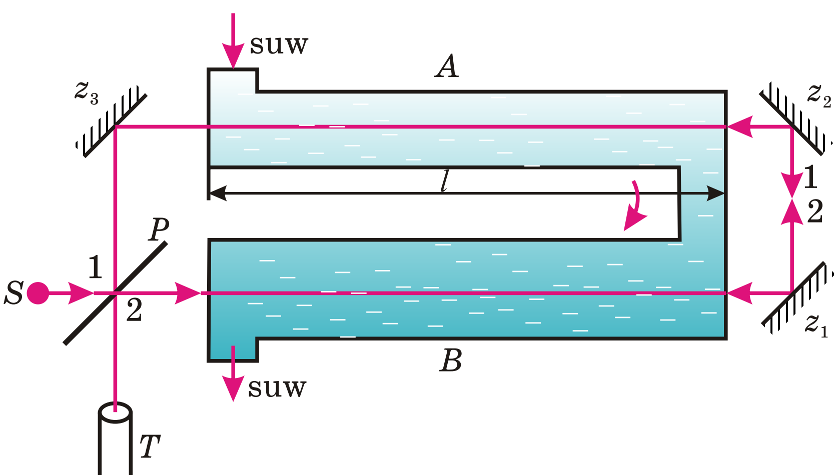
Ýagtylygyň elektromagnit nazaryýeti döredilenden soň efir-elektromagnit tolkunlarynyň, hususy halda, ýagtylygyň ýaýraýan gurşawydyr diýip kabul edildi.

Dürli maddalarda ýagtylygyň ýaýraýşy öwrenilende: maddanyň hereketlenmegi bu maddada ýaýraýan ýagtylygyň tizligine täsir edermi diýen soragy ýüze çykardy. Bu soraga jogap bermek ýagtylygyň ýaýraýan maddasynyň hereketiniň efire täsirini bilmäge syrykdyrylýar.

Bu barada dürli garaýyşlar bar. Frenel hereketlenýän jisim efiri kemkäsleýin äkidýär diýip hasap edýär. G. Gersiň pikiriçe, hereketlenýän jisim efiri doly äkidýär. Lorens elektron nazaryýete esaslanyp, efir absolýut hereketsizdir diýen netijä gelýär. Bu garaýyşlaryň haýsysynyň hakykatdygyny diňe tejribe arkaly tassyklamak mümkindi. Şu babatda ilkinji tejribe 1851-nji ýylda Fizo tarapyndan geçirildi.

1. Fizonyň tejribesi

Bu tejribäniň gurnamasy 8.7-nji çyzgyda şekillendirilen. S ýagtylyk çeşmesinden ýaýraýan şöhle ýarymdury P aýna gatlagynyň kömegi bilen ikä bölünip, z_1



8.7-nji cyzgy

we z_3 aýnalara tarap ugrukdyrylýar. Şöhle 1 yzygiderlikde z_3, z_2, z_1 aýnalardan we P ýarymdury aýna gatlagyndan serpigip, T görüş turba düşýär. Şöhle 2 hem z_1, z_2, z_3 aýnalardan serpigip, P ýarymdury aýna gatlagyndan geçip, T görüş turbasyna düşýär. Bu ýerde şöhle 1 we şöhle 2 goşulyp interferensiýany ýüze çykarýarlar. Şöhleler A we B turbalaryň içinden geçýär. Turbalardan görkezilen ugur boýunça suw akdyrylýar. Çyzgydan görnüşi ýaly şöhle 1 akymyň ugruna, şöhle 2 akymy garşysyna ýaýraýar. Tejribede suwuň hereket etmeýän we akdyrylýan ýagdaýlarynda ýüze çykýan interferensiýa syn edilip, netijede, suwuň akymynyň interferensiýa zolaklaryny süýşürýändigi ýüze çykarylan. Bu bolsa ýagtylygyň ýaýraýyş tizligine suwuň akymynyň täsir edýändigini aňladýar.

Hereketlenýän maddalaryň efiri kem-käs äkidýänligi baradaky Freneliň çaklamasy Fizonyň tejribesiniň esasynda kanagatlanarly derejede düşündirilýär. Şonuň üçin hasaplamany şu çaklamanyň esasynda geçirmek ýerliklidir. Eger suwuň döwülme görkezijisini n-e deň diýip kabul etsek, onda hereketsiz suwda ýagtylygyň ýaýrama tizligi

$$c_1 = \frac{c}{n}$$

bolar. Freneliň pikiri boýunça maddanyň ýagtylygy döwülme görkezijisi bilen onuň içindäki efiriň dykyzlygy

$$n = \frac{c}{c_1} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho}} \tag{8.11}$$

aňlatma görnüşinde baglanyşyklydyr.

Bu ýerde ρ we ρ_1 degişlilikde efiriň wakuumdaky we maddadaky dykyzlygy. Efiriň maddadaky dykyzlygy wakuumdakydan ($\rho_1 > \rho$) uludyr, ýöne efiriň maýyşgaklygy üýtgemeýär. Eger madda υ tizlik bilen hereketlenýän bolsa, onda onuň içinde efir υ_1 tizlik ($\upsilon_1 < \upsilon$) bilen hereket eder. Efiriň akymy üçin üznüksizlik şerti

$$\rho_1 \upsilon_1 = \rho \upsilon \tag{8.12}$$

$\rho \upsilon$ kese-kesiginiň meýdany 1 sm^2 bolan silindr görnüşli maddanyň içine girýän efiriň massasy.

$\rho_1 \upsilon_1$ - silindriň içindäki efiriň massasy.

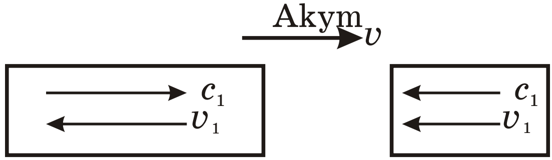
(8.11) we (8.17) aňlatmalardan

$$\upsilon_1 = \upsilon \frac{\rho}{\rho_1} = \frac{\upsilon}{n^2}$$

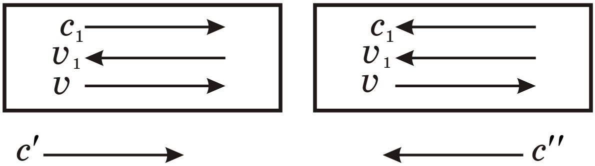
aňlatmany alarys. Diýmek efir suwuň akymynyň ugruna, hereketlenýän suwda υ_1 tizlik bilen hereketlener. Şeýlelikde, ýagtylyk suwuň akymynyň ugruna ýaýraýan bolsa, onuň suwa görä tizligi $c_1 - \upsilon_1$, akymyň garşysyna ýaýraýan bolsa, $c_1 + \upsilon_1$ bolar *(8.8-nji çyzgy)*. Suwuň turba görä tizligi υ bolanlygy üçin akymyň ugruna ýaýraýan ýagtylygyň turba görä tizligi

$$c' = c_1 - \upsilon_1 + \upsilon = c_1 + \upsilon\left(1 - \frac{1}{n^2}\right). \tag{8.13}$$

bolar, akymyň garşysyna ýaýraýan ýagtylygyň turba görä tizligi



8.8-nji cyzgy



8.9-njy cyzgy

$$c'' = c_1 + v_1 - v = c_1 - v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right). \qquad (8.14)$$

deň bolar *(8.9-njy çyzgy)*.

(8.13) we (8.14) aňlatmalardan görnüşi ýaly, efir hereketlenýän madda tarapyndan kem-käs äkidilýän ýaly bolýar:

$$b = 1 - \frac{1}{n^2}. \qquad (8.15)$$

Bu ululyga efiriň äkidilme koeffisiýenti diýilýär. Onda ℓ uzynlykly turbalardan akymyň ugruna we garşysyna ýaýraýan ýagtylyk şöhleleriniň 2ℓ ýoly geçmek wagtlarynyň tapawudy

$$\Delta t = \frac{2\ell}{c'} - \frac{2\ell}{c''} = \frac{2\ell}{c_1 - vb} - \frac{2\ell}{c_1 + v\,b} = \frac{4\ell v\,b}{c_1^2 - v^2 b^2} \approx \frac{4\ell v\,b}{c_1}$$

bolar.

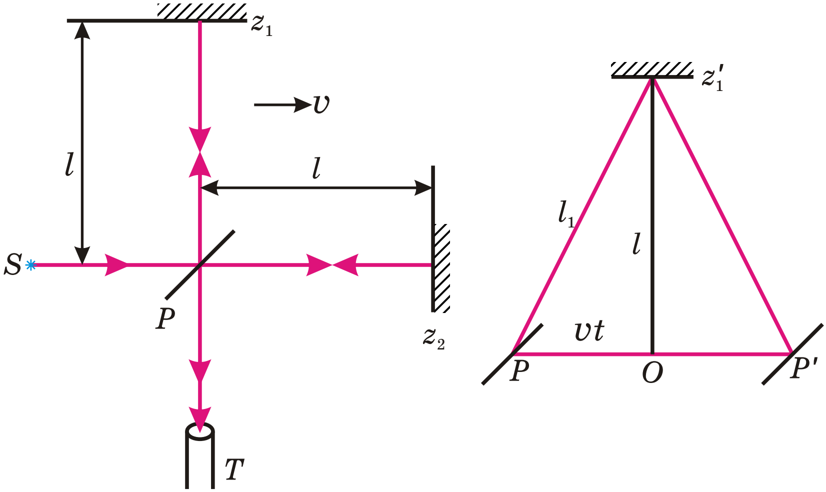
Onda şöhleleriň geçen ýollarynyň tapawudy :

$$\Delta S = c \cdot \Delta t = \frac{4\ell vb}{c_1^2} \cdot c = 4\ell \frac{v}{c} bn^2$$

bolar.

Fizonyň tejribesinde $\ell = 1{,}5m$, $v = 7\frac{m}{s}$ bolupdyr

we ΔS üçin alnan netijä (8.16) doly gabat gelipdir.



8.10-njy çyzgy

Lorens, äkidilme koeffisiýentiniň tebigatyny ýaýraýan ýagtylygyň elektrik meýdanynyň maddada elektrik dipollaryny döredýänligi arkaly düşündirýär. Onda (8.15) we (8.16) aňlatmalardaky b koeffisiýent suwda v tizlik bilen süýşýän dipollardyr. Dipollaryň süýşmegi efiriň kem-käs äkidilmegi ýaly effekt döredýär. Diýmek, eger efir bar bolsa, onda ol absolýut hereketsiz bolmalydyr. Bu bolsa efire absolýut koordinat ulgamy hökmünde seretmäge esas döredýär. Şonuň esasynda ýagtylyk şöhlesinden peýdalanyp, hereketsiz efire görä Ýeriň absolýut tizligini kesgitlemek mümkin. Şeýle tejribe ilkinji gezek 1881-nji ýylda Maýkelson tarapyndan geçirildi.

2. Maýkelsonyň tejribesi

Maýkelson özüniň döreden interferometriniň kömegi bilen özara perpendikulýar iki ugur boýunça ýagtylygyň ýaýrama tizligini ölçemek arkaly, efirde Ýeriň absolýut hereketini bilmeklige synanyşdy. Maýkelsonyň tejribesiniň gurnamasy 8.10-njy çyzgyda şekillendirilen.

Ýer bilen birlikde v tizlikde hereketlenýän interferometre S ýagtylyk çeşmesinden şöhle düşýär. Şöhle ýarymdury P gatlakda ikä bölünip z_1 we z_2 aýnalara ugrukýar we olardan serpigip, T görüş turbasyna düşüp interferensiýany ýüze çykarýarlar.

Ýagtylyk şöhlesiniň $Pz_2'P$ we Pz'_1P' ýollary geçmek wagtyny kesgitläliň. Goý, dynçlykdaky efire görä ýagtylygyň ýaýrama tizligi $\boldsymbol{c}$ bolsun. Onda z_2 aýna tarap ýaýraýan ýagtylygyň göräli tizligi $c - v$ bolar. Onda şöhläniň Pz_2P aralygy geçmek üçin wagty

$$t_2 = \frac{\ell}{c-v} + \frac{\ell}{c+v} = \frac{2\ell}{c} \cdot \frac{1}{1-\beta^2} \tag{8.17}$$

ýa-da

$$t_2 = \frac{2\ell}{c \cdot \eta^2} \tag{8.18}$$

bolar. Bu ýerde

$$\eta^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2} = 1 - \beta^2 \ .$$

Pz'_1P' ýol boýunça ýaýraýan şöhle üçin aşakdaky aňlatmany ýazyp bileris:

$$\ell^2 = c^2t^2 - v^2t^2.$$

Bu ýerde t şöhläniň Pz'_1 ýa-da z'_1P' aralygy geçýän wagty. Onda

$$t_1 = 2t = \frac{2\ell}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2\ell}{c} \cdot \frac{1}{\eta} \ . \tag{8.19}$$

Bu ýerde t_1 şöhläniň Pz'_1P' ýoly geçýän wagty.

Onda

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2\ell}{c}\left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta^2}\right). \qquad (8.20)$$

Eger interferometri çyzgynyň tekizliginde (dik okuň daşynda) 90° burça öwürseň, onda şöhleleriň orny çalyşýar: yza galýan şöhle öňe geçýär. Onda

$$\Delta t' = t_2 - t_1 = \frac{2\ell}{c}\left(\frac{1}{\eta^2} - \frac{1}{\eta}\right). \qquad (8.21)$$

(8.20) we (8.21) aňlatmalardan wagtlaryň tapawudy üçin aşakdaky aňlatmany alarys :

$$\delta t = \Delta t' - \Delta t = \frac{4\ell}{c}\left(\frac{1}{\eta^2} - \frac{1}{\eta}\right). \qquad (8.22)$$

Eger η-ny β^2-yň derejeleri boýunça hatara dargadyp we β^2 dargan hataryň birinji agzasy bilen çäklensek

$$\left(\frac{1}{\eta^2} - \frac{1}{\eta}\right) = \left(1-\beta^2\right)^{-1} - \left(1-\beta^2\right)^{-\frac{1}{2}} = 1+\beta^2 - \left(1+\frac{1}{2}\beta^2\right) = \frac{1}{2}\beta^2 = \frac{1}{2}\frac{\upsilon^2}{c^2}$$

aňlatmany alarys. Onda

$$\delta t = \frac{2\ell}{c}\cdot\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2.$$

Bu wagtda geçilýän ýol $\delta S = c \cdot \delta t = 2\ell \cdot \left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2$ bolar.

Şeýlelikde, interferensiýa zolaklaryň süýşmesi

$$N = \frac{\delta S}{\lambda} = \frac{2\ell}{\lambda}\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2$$

ýaly kesgitlenilýär.

Tejribede $\ell = 12\ m$ bolup Ýeriň orbita boýunça tizligi

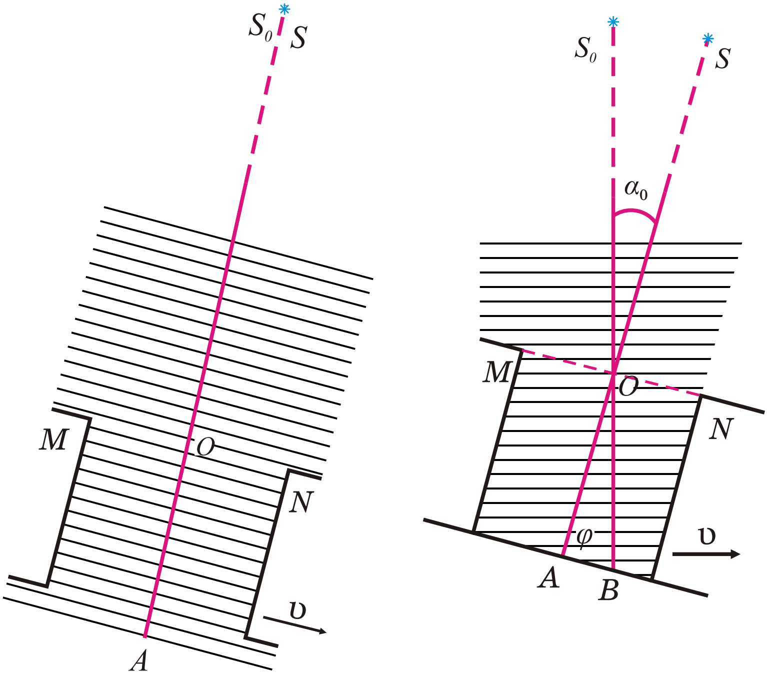
$v = 30\dfrac{km}{s}$ we $N = 0{,}4$ bolupdyr. Emma Maýkelson interferensiýa zolaklaryň hiç hili süýşmesini ýüze çykaryp bilmändir. Soňky has takyk geçirilen köp sanly tejribelerde hem interferensiýa zolaklaryň süýşmesi ýüze çykarylyp bilinmändir.

Maýkelsonyň tejribesiniň otrisatel netijesini irland fizikleri J. Fitsjerald we H. Lorens ýeňil düşündirýär. Bu alymlaryň teklip eden çaklamasyna görä, tizligiň ugry bilen hereketlenýän ähli jisimleriň çyzykly ölçegi $\sqrt{1-\beta^2}$ gatnaşykda gysgalmalydyr. Hakykatdan-da, interferometriň eginlerini şöhleleriň geçmek wagtlarynyň gatnaşygy şu ululyga deňdir. Hereketiň ugruna parallel bolan egniň $\sqrt{1-\beta^2}$ gatnaşykda gysgalmasy (8.18) aňlatma arkaly kesgitlenýän t_2 wagtyň hem şeýle azalmagyna getirer we $t_2=t_1$ bolup (8.20) aňlatmadaky $\Delta t=0$ bolar. Maýkelsonyň tejribesinde hem şeýle netije alynýar.

8.3. Ýagtylygyň aberrasiýasy

Hereketlenýän jisimleriň efire täsiri baradaky sorag, Bradleýiň tejribesinde seredilen, ýagtylygyň aberrasiýasyny düşündirmekde-de ýüze çykýar.

Bu ýagdaýda hadysa ýagtylygyň tolkun tebigaty esasynda seretmek amatly. 8.11-nji we 8.12-nji çyzgylarda teleskopyň ornuna nyşan gurnamasy ýerleşdirilip şekillendirilen. Eger Ýer efiri özi bilen birlikde äkidýän bolsa, turbanyň içine giren ýagtylyk tolkun-



8.11-nji çyzgy

lary hereketlenýän efir bilen süýşer, netijede turba hereketsiz bolandaky ýyldyza tarap S_0 ugur, turba hereketde bolandaky S ugur bilen gabat geler. *8.11-nji a) çyzgyda* şu ýagdaý şekillendirilen. Başgaça aýdanymyzda tolkun fronty turba MN ýagdaýda girip, turba bilen birlikde hereketlenip, onuň tizligine baglanyşyksyzlykda, turbanyň OA okunyň ugry boýunça ýaýraýar.

Eger-de efir hereketlenmeýär diýlip hasap edilse, onda ýagtylyk tolkunlary öňe süýşen turbadan yza galýar *(8.11-nji b) çyzgy)*. Ýyldyzy turbanyň okunda saklamak üçin gerek bolan ýapgytlanma turbanyň $\vec{\upsilon}$ tizligine we φ öwrülme burçuna bagly. Onda aberrasiýa burçy

$$\alpha_0 = \frac{AB}{OA} = \frac{v}{c}\sin\varphi \qquad \text{bolar.}$$

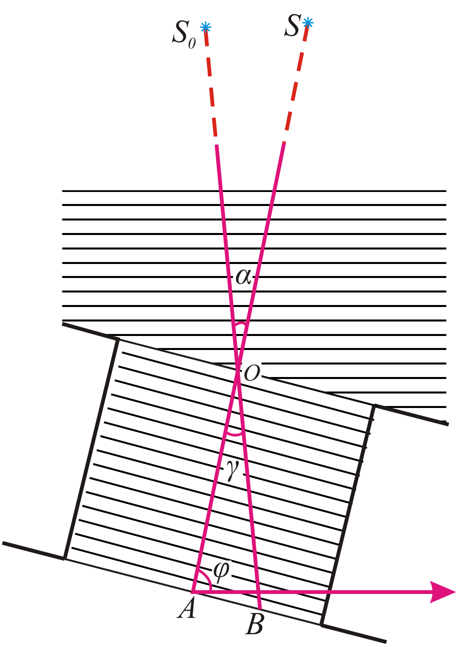
Eger $\varphi=90^0$ bolsa $\alpha_0 = \frac{v}{c} = (20{,}45)''$ bolýar. Bradleýiň tejribesinde hem şeýle netije alynýar. Emma bu hakykata ters gelýär.

Goý turbanyň içi dury madda bilen (suw, aýna we ş.m.) doldurlan bolsun. Bilşimiz ýaly maddada ýagtylygyň ýaýrama tizligi

$$c_1 = \frac{c}{n}$$

ýaly kesgitlenilýär.

Turbanyň okunyň S ýyldyz tarapa ugry aberrasiýa burçy α bilen kesgitlenilýär. *(8.12-nji çyzgy)*. Bu burçuň ululygy aşakdaky ýaly pikir ýöretme arkaly kesgitlenip bilner. Ýagtylyk şöhlesi maddanyň üstüne α burç bilen düşüp, tekiz araçäginde döwlüp, $\gamma = \frac{\alpha}{n}$ burç bilen maddanyň içine girýär.



8.12-nji çyzgy

Efir dynçlykda bolan ýagdaýynda ýagtylyk tolkunlarynyň yza galmasy turbanyň okuny γ burça ýapgytlamagy talap edýär. Bu burçuň ululygy :

$$\gamma = \frac{AB}{OA} = \frac{v}{c_1}\sin\varphi = n\frac{v}{c}\sin\varphi \approx n\alpha_0 \qquad (8.23)$$

aňlatma arkaly kesgitlenilýär. Bu ýerdäki

$\alpha_0 = \frac{v}{c} \sin\varphi$ boş turba üçin kesgitlenen aberrasiýa burçy.

Onda $\alpha = n\gamma = n^2\alpha_0$ bolýar.

1871-nji ýylda Eri bu tejribäni geçirip

$$\alpha = \alpha_0$$

bolýandygyny ýüze çykardy. Bu ýagdaýy hem efiriň kem-käs äkidilmesiniň esasynda düşündirmek mümkin. Suwdan doldurlan turba ýagtylyk tolkunlaryny öz hereketiniň ugruna

$$v \cdot b = v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

tizlik bilen äkidýär. Şeýlelikde, ýagtylyk tolkunlary turbada $c_1 = \frac{c}{n}$ tizlik bilen hereket edip $c_1 \cdot \tau$ ýoly geçýänçe, ýagtylyk tolkunlary äkidilme ýok mahalyndaky $v \sin\varphi \cdot \tau$ ululyga yza galman,

$\left[v - v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)\right] \sin\varphi\tau = \frac{v\sin\varphi}{n^2} \cdot \tau$ ululyga yza galýar.

Onda

$$\gamma = \frac{\frac{v\sin\varphi \cdot \tau}{n^2}}{c_1\tau} = \frac{v\sin\varphi}{c_1 n^2}.$$

Bu ýerden aberrasiýa burçy

$$\alpha = n\gamma = \frac{v\sin\varphi}{c_1 n} = \frac{v\sin\alpha}{c} = \alpha_0.$$

Eriniň tejribesinde hem şeýle netije alynýar. Ýokarda seredip geçen tejribelerimizde efir barada dürli netijeler alynýar.

Ýagny: Fizonyň tejribesinde efir kem-käs äkidilýär; Maýkelsonyň tejribesinde efir doly äkidilýär; Bradleýiň tejribesinde efir absolýut dynçlykda; Eriniň tejribesinde efir kem-käs äkidilýär. Dürli ýagdaýlarda dürli häsiýete eýe bolýan efir düşünjesi kän ynam döretmeýär. Hereketli gurşawlaryň optikasy bilen baglanyşykly ähli hadysalary jikme-jik seljermek arkaly, Lorens elektrodinamikanyň deňlemelerini we koordinat özgertmelerini täzeçe beýan etdi. 1905-nji ýylda Albert Eýnşteýn tejribelerde alnan netijeleri jemlemek we Lorensiň özgertmelerini peýdalanmak arkaly göräligiň ýörite nazaryýetini döretdi. Bu nazaryýet iki sany postulata esaslanýar:

1. Biri-birine görä gönüçyzykly we deňölçegli hereket edýän koordinata ulgamlarynda (inersiýa hasaplama ulgamlarynda) ähli fiziki hadysalar birmeňzeş bolup geçýärler, şonuň üçin haýsy-da bolsa bir koordinatyň «absolýut ulgamyny saýlap almak mümkin däl».

2. Ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi çeşmäniň we kabul edijiniň hereket tizligine bagly däldir we ol uniwersal hemişelikdir.

Eýnşteýniň birinji postulaty efiri absolýut hasaplama ulgamy hökmünde seredýän nazaryýet bilen ylalaşmaýar. Şeýlelikde, görälik nazaryýeti efiri doly inkär edýär.

Ikinji postulat uly tizlikleri goşmagyň düzgünini şertlendirýär. Eger v we u bir ugurdaky tizlikler bolsa, onda bu tizlikleriň jemi

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$ aňlatma arkaly tapylýar.

Eger $u \approx v \approx c$ bolsa, onda $u' = c$ bolar. Bu ýerde örän wajyp netije alynýar. Ýagny ähli inersial hasaplama ulgamlarynda ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi mümkin bolan iň uly tizlikdir.

8.4. Optikada Dopleriň effekti

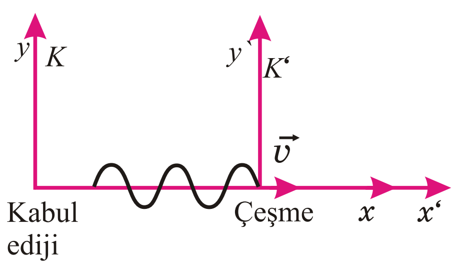
Kesgitli ω ýygylyga (tolkun uzynlyga) eýe bolan monohromatik tolkun «hereketsiz» koordinata ulgamynda ýaýraýan bolsa, şol tolkun «hereketlenýän» koordinata ulgamynda başga ω' ýygylyga eýe bolýar.

Bir hasaplama ulgamdan başga bir hasaplama ulgamyna geçilende ýygylygyň üýtgemesine Dopleriň effekti diýilýär.

Relýatiwistik nazaryýetde ýygylygyň üýtgemesini tolkunyň fazasynyň iki hasaplama ulgamda hem deň bolmak şertinden peýdalanyp kesgitlemek amatlydyr.

Goý, ýagtylygy kabul ediji K koordinata ulgamynyň başlangyjynda, ýagtylyk çeşmesi bolsa K' koordinata ulgamyň başlangyjynda ýerleşen bolsun. K we K' koordinata ulgamlary biri-birine gabat gelende hasaplama wagtlary $t = t' = 0$ bolsun *(8.13-nji çyzgy)* K' ulgam (çeşme) K ulgama (kabul ediji) görä v tizlik bilen hereketlenýän bolsun:

x we x' oklar bolsa $\vec{v}$ tizlik wektorynyň ugry boýunça ugrukdyrlan bolsun. Çeşmeden kabul edijä tarap goýberilen tekiz ýagtylyk tolkunyň deňlemesi K' ulgamda



8.13-nji çyzgy

$$E\left(x',t'\right)=A'\cos\left[\omega'\left(t'+\frac{x'}{c}\right)\right] \qquad (8.24)$$

görnüşe eýedir.

Eger tolkunyň başlangyç fazasy nola deň hasap edilse, onda K ulgamda tolkun

$$E\,(x,t)=A\cos\left[\omega\left(t+\frac{x}{c}\right)\right] \qquad (7.25)$$

görnüşe eýe bolýar. Dürli hasaplama ulgamlarynda tolkunyň fazasynyň birmeňzeş bolýandygyny hasaba alyp,

$$\omega\left(t+\frac{x}{c}\right)=\omega'\left(t'+\frac{x'}{c}\right)$$

aňlatmany ýazyp bileris. Lorensiň özgertmelerinden peýdalanyp

x'-i we t' x-yň we t-niň üsti bilen aňlatsak, onda

$$\omega\left(t+\frac{x}{c}\right)=\omega'\left(\frac{t-\dfrac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}+\frac{x-v\,t}{c\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}\right)$$

ýa-da

$$\omega\left(t+\frac{x}{c}\right)=\omega'\cdot\left[\frac{1-\dfrac{v}{c}}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}+\left(t+\frac{x}{c}\right)\right].$$

Bu ýerden

$$\omega = \omega' \cdot \frac{1-\dfrac{v}{c}}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = \omega' \sqrt{\frac{1-\dfrac{v}{c}}{1+\dfrac{v}{c}}}. \tag{8.26}$$

$\omega=2\pi\nu$ peýdalanyp çyzyk ýygylygyna geçsek we $\nu' = \nu_0$, $\beta = \dfrac{v}{c}$ belleme geçirsek, onda

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}. \tag{8.27}$$

Aňlatmadan görnüşi ýaly $\nu<\nu_0$ ýagny çeşme kabul edijiden daşlaşanda kabul edilýän ýagtylygyň, ýygylygy azalýar. Çeşme kabul edijä ýakynlaşsa $v=-v$ bolýar we (8.27) aňlatma

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \tag{8.28}$$

görnüşe geçer.

Bu ýagdaýda $\nu>\nu_0$ bolýar. Muňa Dopleriň boý effekti diýilýär.

Eger $v<<c$ bolsa β-nyň derejesi boýunça hatara dargadyp we β-nyň birinji derejesi bilen çäklensek, onda (8.27), (8.28) aňlatmalar aşakdaky görnüşe geçer.

$$\nu = \nu_0 (1+\beta), \tag{8.29}$$

$$\nu = \nu_0 (1-\beta). \tag{8.30}$$

Bu ýerde ýygylygyň göräli üýtgemesini tapsak:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = -\frac{\upsilon}{c}, \qquad (8.31)$$

$$\frac{d\nu}{\nu} = \frac{d\lambda}{\lambda} \quad \text{onda} \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\upsilon}{c} \qquad (8.32)$$

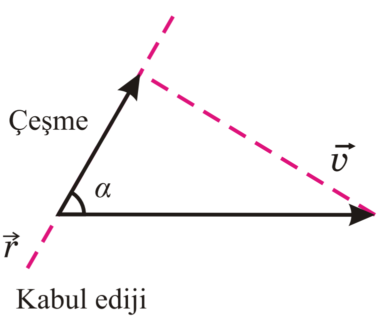
görnüşde ýazyp bileris. Çeşme bilen kabul edijiniň göräli hereketi bir göniniň ugry boýunça bolmadyk ýagdaýynda *(8.14-nji çyzgy)* (8.27) aňlatma

$$\nu = \nu_0 \frac{1 - \beta \cos\alpha}{\sqrt{1 - \beta^2}} \qquad (8.33)$$

görnüşde aňladylýar. Eger $\alpha = 90^0$ bolsa, onda

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \qquad (8.34)$$

aňlatma öwrülýär. Muňa Dopleriň kese effekti diýilýär. Dopleriň optiki effekti atomlary, molekulalary we beýleki elementar bölejikleri hem-de kosmiki jisimleri derňemekde giňden peýdalanylýar. Spektr çyzyklaryň süýşmesi ýa-da giňelmesi görnüşinde ýüze çykýan, şöhlelenýän jisimleriň ýagtylygynyň ýygylygynyň üýtgemesi boýunça bölejikleriň we jisimleriň hereketiniň häsiýetini kesgitlemek mümkin. Ýagtylanýan gazlaryň molekulalarynyň ýylylyk hereke-



8.14-nji çyzgy

ti, dopler effekti sebäpli spektr çyzyklarynyň giňelmesine getirýär. Ýylylyk hereketi bitertipdir (haotik) we molekulalaryň gözegçä görä tizlikleriniň ähli ugurlar boýunça paýlanşygynyň ähtimallygy birmeňzeşdir. Şonuň üçin ýörite abzallarda gözegçilik edilip hasaba alynýan şöhlelenmäniň düzüminde $\nu_0\left(1-\frac{v}{c}\right)$-den $\nu_0\left(1+\frac{v}{c}\right)$ çäkdäki ähli ýygylyklar bardyr.

Bu ýerde ν_0 molekulanyň şöhlelendirýän ýagtylygynyň ýygylygy; v - molekulanyň ýylylyk hereketiniň tizligi. Şeýlelikde, spektr çyzyklaryň hasaba alynýan giňligi $2\nu_0\frac{v}{c}$ bolýar.

$\delta\nu_D=\nu_0\frac{v}{c}$ aňlatma arkaly kesgitlenýän ululyga spektr çyzygynyň dopler giňelmesi diýilýär.

Spektr çyzyklaryň dopler giňelmesi boýunça molekulalaryň ýylylyk hereketiniň tizligi barada, diýmek, ýagtylanýan gazyň temperaturasy barada maglumat almak mümkin.

Dopler effekti radiofizikada, esasan-da hereketlenýän jisimler (uçarlaryň, raketalaryň) çenli aralygy radiolokasiýa arkaly ölçemekde uly ähmiýete eýedir.

8.5. Ýagtylygyň ýaýrama tizligini kesgitlemegiň häzirki zaman usullary

Ýagtylygyň ýaýrama tizliginiň takyklygyny ýokarlandyrmak maksady bilen ony kesgitlemegiň täze usullaryndan peýdalanmak dowam etdirilýär. Tejribehana şertinde ýagtylygyň ýaýrama tizligini kesgitlemegiň usullarynyň biri-de Kerriň öýjügini (ýaçeýkasyny) ulanyp, ýagtylygyň depginini ýokary ýygylykly modulirlemekdir. Aýlanýan dişli tigriň (Fizonyň usuly) ýa-da aýlanýan aýna prizmanyň (Maýkelsonyň usuly) ornuna ýagtylygy bölmek üçin Kerriň öýjügini *(6.25-nji çyzgy)* ulanmak mümkin.

Bu ýagdaýda Kerriň öýjügine ýokary ýygylykly üýtgeýän naprýaženiýe berilýär. Ýagtylyk dessesiniň öýjükden öňe we yza geçýän ýoluny hem-de goýulýan naprýaženiýäniň ýygylygyny bilip ýagtylygyň ýaýrama tizligini kesgitlemek mümkin. Şeýle ölçemeler 1928-nji ýylda Karolýus we Mintelştadt tarapyndan ýerine ýetirildi. Olar baza aralygyny (L) 15 m çenli gysgaltmaklygy we ýagtylygyň ýaýrama tizligi üçin

$c = (299780 \pm 20)\ \dfrac{km}{s}$ uluygy almagy başardylar.

1937-nji ýylda Anderson baza aralygy L=3 m çenli gysgaltmagy başardy. Ýagtylygyň modulirleýji hökmünde Kerriň öýjügi peýdalanylýan gurnama häzirki wagtda ýokary kämillige ýetirildi.

Häzirki döwürde ýagtylygyň ýaýrama tizligini $\nu \cdot \lambda = c$ gatnaşyk arkaly kesgitlemegiň täze usuly peýdalanylýar. Bu usulda elektromagnit tolkunlarynyň ýygylygy (ν) we tolkun uzynlygy biri-birine baglanyşyksyzlykda ölçenilýär. 1972-nji ýylda geçirilen ölçemelerde ýagtylyk çeşmesi hökmünde 3,39 mkm tolkun uzynlykly şöhle goýberýän geliý-neon lazerden peýdalanylan.

Bu usulda tolkun uzynlyk nusgalyk (etalon) tolkun uzynlyk bilen deňeşdirilip, interferometriň kömegi bilen ölçenilýär. Nusgalyk tolkun uzynlyk hökmünde kripton-86 izotopynyň mämişi çyzygynyň wakuumdaky tolkun uzynlygy kabul edilen. Lazer şöhlesiniň ýygylygy, ýygylygyň atom standarty, ýagny nolunjy magnit meýdanynda Seziý-133 izotopynyň iki sany aşa inçe kwant derejeleriň arasyndaky ge- çiş ýygylygy bilen deňeşdirmek arkaly ölçenilýär. Şeýlelikde, ýagtylygyň wakuumda ýaýrama tizligi üçin $c = (299792458 \pm 1{,}2)\ \dfrac{m}{s}$ ululyk alynýar.

PEÝDALANYLAN EDEBIÝATLAR

1. *Матвеев А. Н.* Механика и теория относительности. М-1986. Молекулярная физика. М-1987. Электричество и магнетизм. М-1983. Оптика. М-1985. Атомная физика. М-1989.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики.Т.1. Механика. Молекулярная физика. М-1989. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М-1982.Т.3 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М-1989.
3. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т.1.Механика. М-2002. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М-2002.Т.3. Электричество. М-2002.Т.4. Оптика. М-2002.Т.5. Атомная и ядерная физика. М-2002.
4. Берклеевский курс физики. Т. 4 Ф. Крауфорд. Волны. М-1972 и последующие издания.
5. *Баратов Я. Авлиякулиев Ж.* Оптика курсына дегишли окув материалларыны өвренмек боюнча методики гөркезмелер. Ашгабат. I. 1991.II. 1992.III. 1993.
6. *Ландсберг Г. С.* Оптика. М-1976
7. *Годжаев Н. М.* Оптика. М-1977.
8. *Бутиков Е. И.* Оптика. М-1986.
9. *Королев Ф. К.* Оптика, атомная и ядерная физика. М-1974.
10. *Яворский Б. М., Детлаф А.А.* Курс физики Т. III Волновые процессы, оптика, атомная и ядерная физика. М-1972.
11. *Трофимова Т. И.* Курс физики. М-1985.
12. *Рымкевич П. А.* - Курс физики. М-1975.
13. *Чертов А. Г.* Единицы физических величин. М-1997.
14. *Кузьмичев В. Е.* Законы и формулы физики. Справочник. Киев, 1989.

MAZMUNY

IV BAP
ÝAGTYLYGYŇ DIFRAKSIÝASY

V BAP
GEOMETRIK OPTIKA 130

VI BAP
ÝAGTYLYGYŇ POLÝARLANMASY

VII BAP
ÝAGTYLYGYŇ DISPERSIÝASY, SIŇDIRILMESI WE PYTRAMASY

VIII BAP
OPTIKADA RELÝATIWISTIK HADYSALAR

Jora Awliýakuliýew, Ýaňybaý Baratow,
Gurbanmuhammet Ataýew, Abdurahman Çaryýew

OPTIKA

Ýokary okuw mekdepleri üçin synag okuw kitaby

Redaktor	*O. Abdurahmanowa*
Surat redaktory	*G. Orazmyradow*
Teh. redaktory	*O. Nurýagdyýewa*
Suratçy	*Ý. Peskowa*
Neşir üçin jogapkär	*R. Jumagulyýew*

Ýygnamaga berildi 14.05.2009. Çap etmäge rugsat edildi 23.09.2009. Möçberi 60x90 1/16. Ofset kagyzy. Mekdep garniturasy. Ofset çap ediliş usuly. Şertli çap listi 19,0. Şertli reňkli ottiski 66,29. Hasap-neşir listi 11,94. Çap listi 19,0. Sargyt 1392. Sany 500.

Türkmen döwlet neşirýat gullugy.
744004. Aşgabat, 1995-nji köçe, 20.

Türkmen döwlet neşirýat gullugynyň Lebap welaýat çaphanasy.
746100. Türkmenabat ş., Bitarap Türkmenistan köçesi, 105.