

Redzes efekti

Ar redzi saistītas parādības, ilūzijas, iespaidi

Apkopojis Paulis Ķikusts

Rīga, 2014

Apkopoti dažādi ar redzi saistīti jautājumi, kurus autors savā laikā ar studentiem pārrunājis Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātes Datorikas nodaļas specseminārā „Attēlu sintēze un analīze”. Jautājumi nosacīti grupējami trīs kategorijās: dažas ilūzijas, acu uzbūves efekti, skaistas parādības.

Autors nemēģina konkurēt ar Internetā atrodamajiem šāda temata materiāliem, bet izklāsta atsevišķus tā vai citādi personīgi piedzīvotus ar redzi saistītus efektus, par kuriem paaugstināta interese radās jau viņa studenta laikos. Apkopotie efekti nav paša autora atklāti, bet gan laika gaitā sastapti dažādos avotos un izrādījušies personīgi pievilcīgi.

Materiāls ir sadalīts divās daļās – vispirms redzes efektu formulējumi, pēc tam otrajā daļā to komentāri, skaidrojumi un piezīmes. Komentāriem pievienotas autora sagatavotu lekciju prezentācijas par stereoattēliem, krāsu uztveri un krāsu reprodukciju. Efektu būtības redzējums pasniegts hobija līmenī, skaidrojumi galvenokārt balstīti visvienkāršākajos apsvērumos. Apkopotie efekti lielākoties novērojami pašos ikdienišķākajos apstākļos pie pavisam vienkārša eksperimentu aprīkojuma, ja vispār tāds vajadzīgs.

Priekšvārds

Šis krājums tapis pēc autora jaunākā kolēģa Kārļa Freivalda ierosinājuma. Kārlis vēlējas, lai tiktu apkopoti dažādi ar redzi saistīti jautājumi, kurus autors savā laikā ar studentiem pārrunāja Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātes Datorikas nodaļas specseminārā „Attēlu sintēze un analīze”.

Pārrunātais nosacīti grupējams trīs kategorijās un ir sekojošs.

Dažas ilūzijas

- Maha joslas
- Perpendikulārie nogriežņi
- Stieplu kubiņš

Acu uzbūves efekti

- Stereoredze
- Krāsu uztvere
- Aklais plankums
- Krēslas redze
- Asums pie spilgtākas gaismas
- Sarkanā un zilā laušana
- Adata un caurumiņš
- Fosfēns

Skaistas parādības

- Fotogrāfija ar vienu aci
- Saules staru vēdekļis
- Munka glezna
- Slotas kāts un zīmulis
- Stikla cilindrs
- Krāsainas ēnas
- Saule caur lapotni

Mūsdienās Internets ir pārpildīts arī ar šāda temata materiāliem, un autors nemēģina ar tiem konkurēt. Aplūkoti ir vien atsevišķi tā vai citādi personīgi piedzīvoti ar redzi saistīti efekti, par kuriem autoram paaugstināta interese radās jau savos studenta laikos 1960-to gadu otrajā pusē un tā arī nav zudusi līdz mūsdienām. Uzsvērsim, ka neviens efekts nav tieši autora atklāts, bet gan laika gaitā sastapts dažādos avotos un, kā teikts, izrādījies personīgi pievilcīgs.

Šeit izklāstītais materiāls ir sadalīts divās daļās – vispirms pašu redzes efektu formulējums, pēc tam otrajā daļā to komentāri, skaidrojumi un piezīmes. Komentāriem pievienotas autora sagatavotu lekciju prezentācijas par stereoattēliem, krāsu uztveri un krāsu reprodukciju.

Efektu būtības redzējums ir tāls no profesionālu redzes pētnieku skatījuma un pasniegts interesanta hobija līmenī. Skaidrojumi galvenokārt balstīti visvienkāršākajos apsvērumos. Efekti lielākoties novērojami pašos ikdienišķākajos apstākļos pie pavisam vienkārša eksperimentu aprīkojuma, ja vispār tāds vajadzīgs. Piemēram, skats caur autobusa logu uz stieņu konstrukciju ceļa malā, skats uz datora ekrānu caur caurumiņu papīra lapā, skats tālumā ar rokas pirkstu priekšplānā, acs kaktiņa paburzīšana, slotas kāta uz zīmuļa ēnu savietošana.

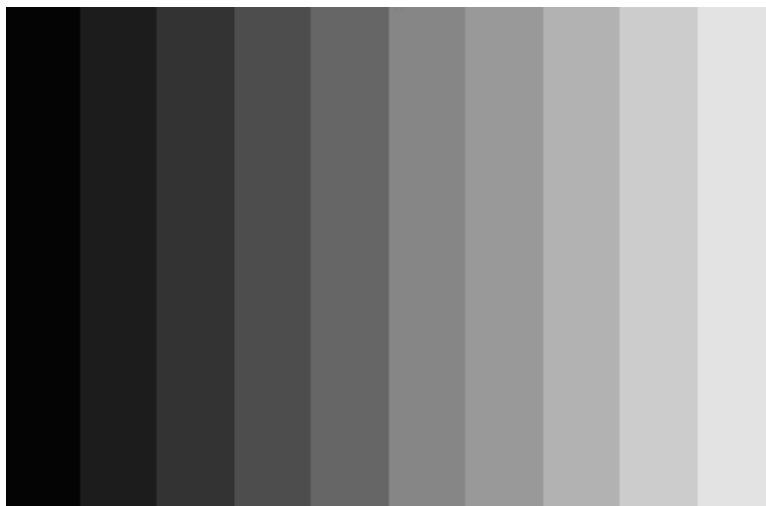
Pilnīgi noteikti jāizsaka liela pateicība ģimenes locekļiem un tuvākajiem kolēģiem, kuri visi pēc labākajām iespējām palīdzēja šī darba tapšanā.

Saturs

Maha joslas	5
Perpendikulārie nogriežņi	7
Stieplu kubiņš	8
Stereoredze	9
Krāsu uztvere	13
Aklais plankums	19
Krēslas redze	20
Asums pie spilgtākas gaismas	22
Sarkanā un zilā laušana	23
Adata un caurumiņš	26
Fosfēns	27
Fotogrāfija ar vienu aci	28
Saules staru vēdekļis	32
Munka glezna	33
Slotas kāts un zīmulis	34
Stikla cilindrs	36
Krāsainas ēnas	38
Saule caur lapotni	39
Komentāri, skaidrojumi, piezīmes	40
Maha joslas	41
Perpendikulārie nogriežņi	45
Stieplu kubiņš	46
Stereoredze	48
Krāsu uztvere	52
Aklais plankums	63
Krēslas redze	66
Asums pie spilgtākas gaismas	68
Sarkanā un zilā laušana	69
Adata un caurumiņš	73
Fosfēns	75
Fotogrāfija ar vienu aci	76
Saules staru vēdekļis	80
Munka glezna	83
Slotas kāts un zīmulis	84
Stikla cilindrs	85
Krāsainas ēnas	86
Saule caur lapotni	89
PIELIKUMS 1. Lekcija par stereoattēliem	92
PIELIKUMS 2. Lekcija par krāsu uztveri	109
PIELIKUMS 3. Lekcija par krāsu reprodukciju	131

Maha joslas

Maha joslas ir vienkārša, bet ļoti spēcīga ilūzija. Sekojošā attēlā (att. MJ1) tā novērojama klasiskajā standarta formā:



Att. MJ1. Klasiskās Maha joslas.

Attēls MJ1 sastāv no virknes blakus novietotu vertikālu taisnstūrveida apgabalu, kas katrs krāsots pilnīgi viendabīgi, bet pēc intensitātes atšķirīgi no blakus apgabaliem. Par šo krāsojumu viendabīgumu var pārliecināties vai nu ar attēlu analīzes rīkiem, vai vienkārši aizsedzot izvēlēta apgabala kaimiņu apgabalus. Tomēr divu apgabalu robežas tuvumā mēs redzam gaišākas un tumšākas joslas – Maha joslas (http://en.wikipedia.org/wiki/Mach_bands).

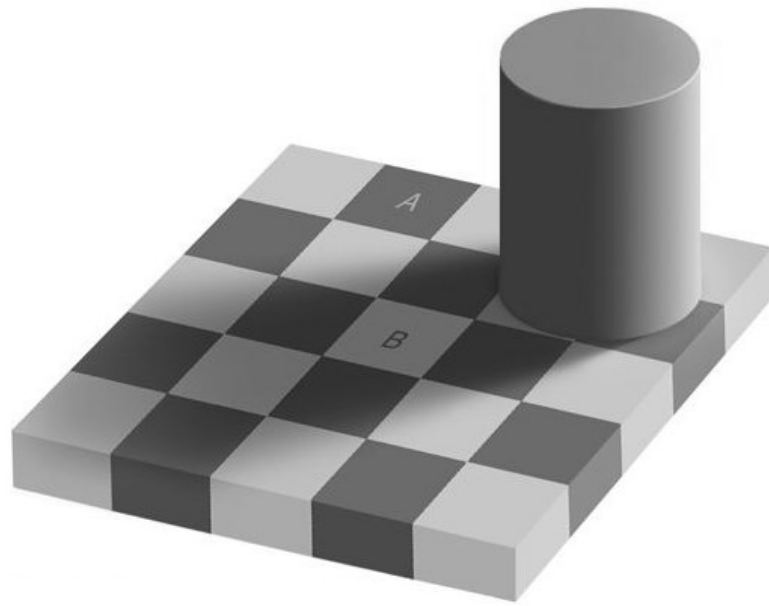
Tiek domāts, ka šīs ilūzijas pamatā ir redzes sistēmas centieni akcentēt spožuma pārejas, kas ir tipiskas vizuālu objektu robežām un kontūrām. Tieši objektu kontūras ir visinformatīvākie vizuālās informācijas elementi, tāpēc to akcentēšana ir lietderīga pie vizuālās uztveres, jeb t.s. vizuālās percepcijas.

Nākošais attēls MJ2 rāda, ka spožuma dažādības akcentēšana var izpausties ne tik tieši kā kontūru pastiprināšana. Var rasties arī tāds papildus efekts kā enerģētiski vienādi spožu vizuālu objektu iluzora dažādība, t.i. perceptīva dažādība:



Att. MJ2. Klasisko Maha joslu attēls papildināts ar vienāda enerģētiskā spožuma kvadrātiem, kuru perceptīvais spožums ir atšķirīgs.

Pēdējo fenomenu efektīvi demonstrē speciāli konstruēti attēli, piemēram, att. MJ3:

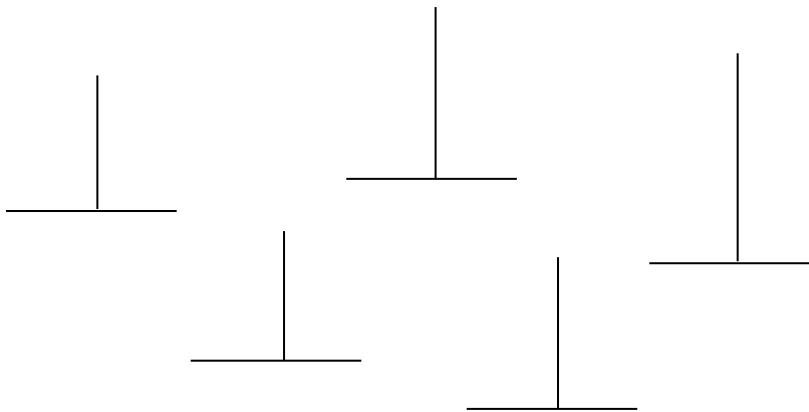


Att. MJ3. Vispārzināms attēls ar vienāda enerģētiskā spožuma apgabaliem A un B, t.i. ar A un B atzīmētām rūtiņām.

Perpendikulārie nogriežņi

Pamēģiniet ar brīvu roku novilkēt divus pēc acumēra vienāda garuma taisnes nogriežņus matemātikas perpendikularitātes zīmes \perp konfigurācijā.

Varat arī aplūkot sekojošā attēla PN1 piecus tādu savstarpēji perpendikulāru nogriežņu pārus un pēc acumēra novērtēt, kura pāra nogriežņi ir vienāda garuma:

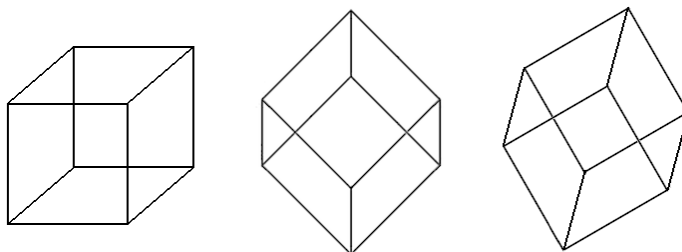


Att. PN1. Perpendikulāru nogriežņu pāri, starp kuriem pēc acumēra jānosaka vienāda garuma nogriežņu pāris.

Jautājums ir, cik lielā mērā šāda tipa konfigurācijās var paļauties uz acumēru?

Stieplu kubiņš

Visi ir redzējuši plakanu taisnes nogriežņu konfigurāciju, ko sauc par Nekera kuba (http://en.wikipedia.org/wiki/Necker_cube). Daži tādas konfigurācijas varianti parādīti arī zīmējumā att. SK1:

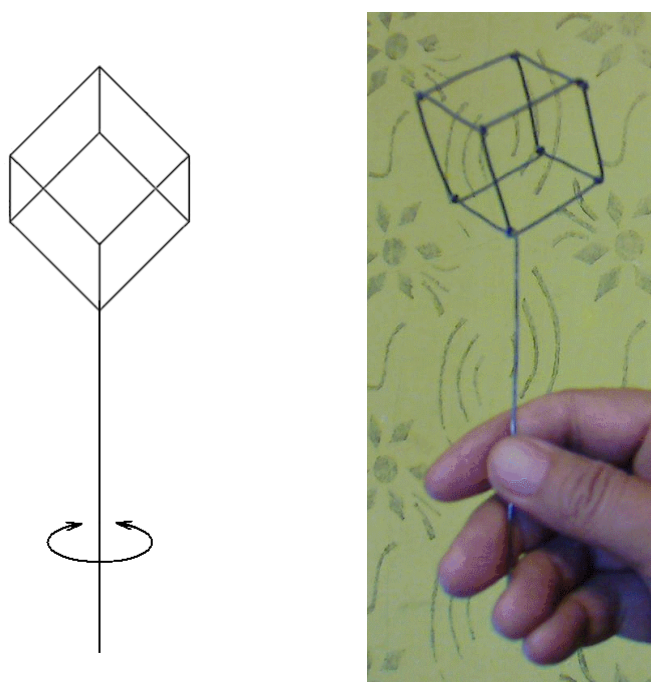


Att. SK1. Dažādi pagriezta Nekera kuba zīmējumi.

Raugoties uz šiem zīmējumiem, mums viegli rodas telpiskuma ilūzija. Turklāt ilūziju varam izjust divos veidos – kuba konfigurācijas vidējās virsotnes pārmaiņus varam iztēloties kā savstarpēji tuvākas vai tālākas no skatītāja.

Turpmākajam ir svarīgi, ka abu virsotņu savstarpējo iluzoro novietojumu pēc izvēles varam regulēt ar gribasspēku. Izmantosim šo izvēles iespējamību pavisam negaidītai uz Nekera kuba balstītai ilūzijai.

Izgatavojam reālu telpisku kuba šķautņu konfigurāciju no, piemēram, stieplēm un pie vienas virsotnes pievienojam kātiņu, kā tas redzams attēlā SK2:



Att. SK2. Stieplu kubiņš:
pa kreisi – kubiņa un tā virpināšanas shēma,
pa labi – reāls kubiņš darbībā .

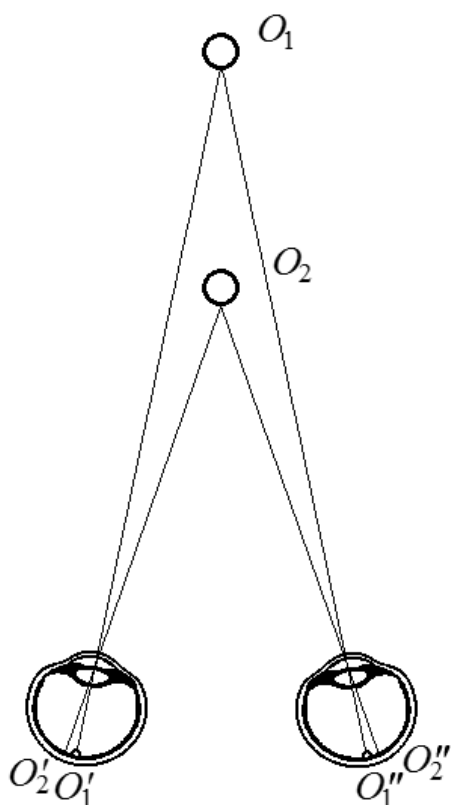
Tagad aiz kātiņa paņemam rokā mūsu kubiņu un raugāties uz to ar vienu aci pret gaišu fonu. Gaišais fons ļauj mums viegli Nekera kuba stilā iedomāties, ka faktiski tālākā virsotne ir tuvākā. Un nu, tā iedomājušies, lēnām pavirpinām kātiņu un baudām ilūziju...

Stereoredze

Dzīvo būtņu acis ir ļoti daudzveidīgas gan pēc uzbūves, gan skaita vienai būtnei. Lielai daļai būtņu ir pēc centrālās projekcijas principa darbojošos acu pāris. Tādas acis tipiski ir izvietotas divos veidos – galvas priekšpusē blakus vai galvas sānos. Pirmais veids nodrošina binokulāro stereoredzi, t.i. telpiski precīzu tuvu lietu uztveri, kas ir svarīga pie aktīvām darbībām ar satvertu objektu. Savukārt otrais veids nodrošina pamatā pasīvu vērošanu, bet ar redzeslauku, kas aptver gandrīz visu apkārtni un nodrošina savlaicīgu uzbrucēju pamanīšanu.

Cilvēka acis izvietotas pirmajā veidā. Akadēmiskajā terminu datubāzē (<http://termini.lza.lv/term.php?term=binokul%C4%81r%C4%81%20redze&list=redze&lang=LV>) binokulārā redze definēta sekojoši:

Definīcija: Cilvēka un dzīvnieku spēja aplūkojamo objektu vienlaikus uztvert ar abām acīm. No šā objekta uz labo un kreiso aci izejošie stari savā starpā veido leņķi (binokulārā paralakse), kas sniedz informāciju par aplūkojamā priekšmeta attālumu no novērotāja, tādējādi redzes uztverei piešķirot telpisku raksturu.



Acu atšķirīgais novietojums telpā ir cēlonis tam, ka apkārtējās ainas attēli uz abu acu tīklenēm ir nedaudz, bet dažādi – kreisās un labās acs tīklenes objektu attēli ir savstarpēji nobīdīti. To sauc par *binokulāro disparitāti*.

Saprotams, ka abām acīm jābūt veselām un saskaņoti funkcionējošām. Diemžēl, ir cilvēki, kam tā nav, un tad ir dažādas problēmas ar lietu telpisku uztveri, līdz pat tādas pilnīgai neesamībai.

Telpiskuma izjūta ir, protams, pats svarīgākais binokulārās redzes efekts, bet varbūt svarīgākais tās blakusefekts ir tuvāku un tālāku priekšmetu attēlu dubultošanās pie skatīšanās uz konkrētu noteiktā attālumā esošu objektu. Dubultošanās ir ļoti nopietna acu normālas funkcionēšanas pazīme. Tās cēlonis pēc būtības ir tīri ģeometrisks – aplūkojot izvēlēto objektu, acu asis krustojas kādā šī objekta punktā, un smadzenes tieši šī objekta abās acīs formētos attēlus uztver kā vienu, bet citiem objektiem tas vairs nav ģeometriski iespējams – att. SR1:

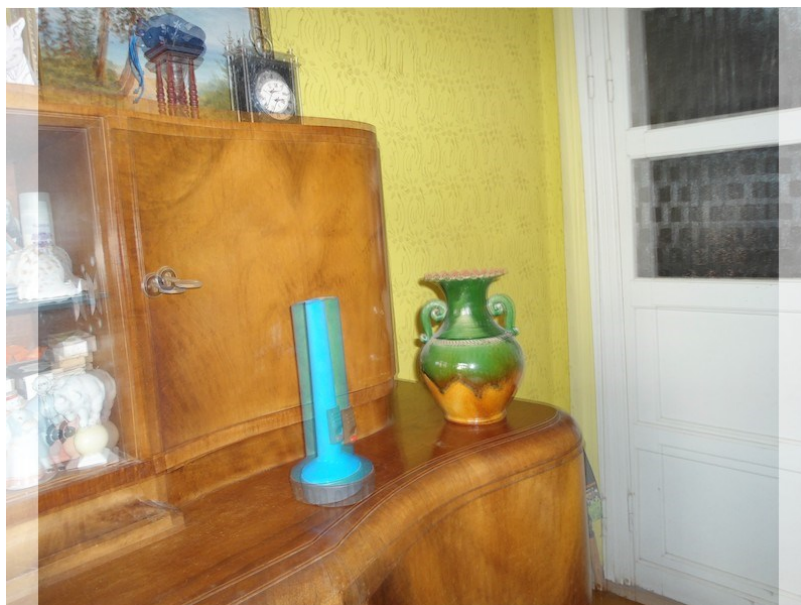
Att. SR1. Ar abām acīm tiek aplūkots objekts O_1 , bet objekts O_2 atrodas tuvāk acīm. Tāpēc objekta O_2 projekcijas O_2' un O_2'' uz tīklenēm ne tikai nesakrīt ar objekta O_1 projekcijām O_1' un O_1'' , bet pat atrodas dažādās pusēs no attiecīgās O_1 projekcijas.

Šī dubultošanās ir ļoti vienkārši novērojama. Pietiek acu priekšā novietot vienas rokas pirkstus un raudzīties tālumā. Tad pamanīsim, ka mūsu priekšā ir it kā divas daļēji caurspīdīgas rokas, kuras nav caurspīdīgas rokas abu attēlu šķēluma apgabalā, att.SR2:



Att. SR2. Acu priekšā novietotas vienas rokas pirkstu dubultošanās pie skatīšanās uz attālinātu objektu. Rokas attēli ir caurspīdīgi, izņemot abu attēlu šķēluma apgabalu.

Ja apkārtējā telpā ir daudz relatīvi tuvu objektu dažādos attālumos no skatītāja, tad minētā dubultošanās ir novērojama lielākajai daļai šo objektu, piemēram, kā to mēģināts ilustrēt att. SR3:

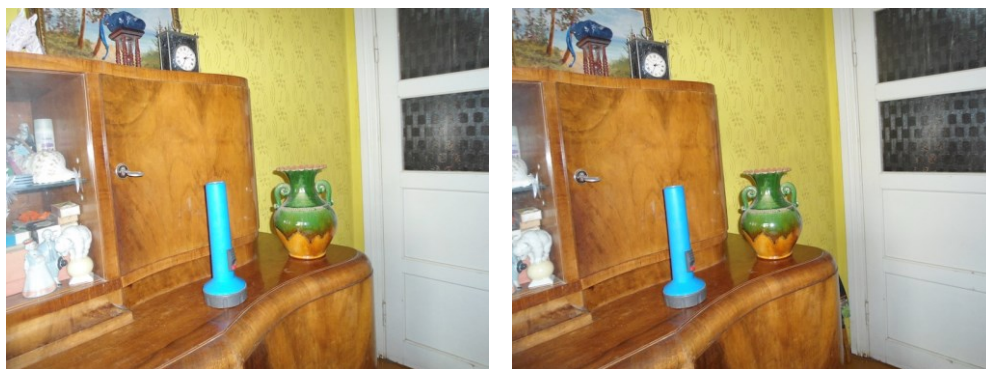


Att. SR3. No diviem punktiem uzņemtām fotogrāfijām mākslīgi sintezēts dubultošanās skats, kad abas acis raugās uz vāzi.

Reāli gan mēs neizjūtam tādu dubultošanās bagātību, jo objekts, uz kuru vērsta uzmanība, nedubultojas, bet pārējiem objektiem īpaša uzmanība netiek pievērsta. Turklāt parasti acis ir kustībā un dubultošanās aina nepārtraukti mainās.

Acu kustība faktiski ir svarīga telpiskuma izjūtas mehāniski-optiska komponente. Tā atklāj vēl vienu iespaidīgu stereoredzes efektu – telpiskuma uztvere ir ne tikai tīri vizuāla, bet tai ir raksturīgs arī fiziski izjūtam redzes sistēmas muskulatūras darbs pie acu asu savirzīšanas uz izvēlēto objektu, t.s. acu konverģence, un attēlu asuma iegūšanas, t.s. acu akomodācija.

Speciāli vērojot un cenšoties izvairīties no acu kustībām, varam pārlicināties, ka att. SR3 redzamais skats, lai gan mākslīgi sintezēts no divām fotogrāfijām, ir ģeometriski reālistisks. Attēls SR3 iegūts, savietojot istabas kakta fotogrāfijas no divām kameras pozīcijām, kas aptuveni atbilst mūsu acu novietojumam. Pats interesantākais ir tas, ka, ja mēs vienlaicīgi katrai acij parādītu tieši vienu tai atbilstošu fotogrāfiju, tad mūsu smadzenes tādā veidā redzamo skatu traktētu kā telpisku. To var izdarīt, ar speciālu skatīšanās tehniku aplūkojot abas fotogrāfijas, novietotas blakus vienu otrai, att. SR4:



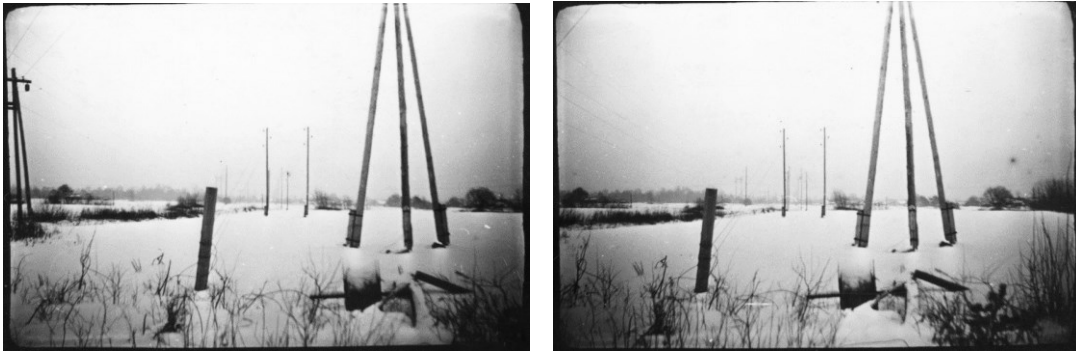
Att. SR4. Stereopāris – attēlu pāris, kurā katrs attēls sagatavots vienlaicīgi aplūkošanai ar katru aci atsevišķi.

Šādu attēlu pāri, kurā katrs attēls sagatavots vienlaicīgi aplūkošanai ar katru aci atsevišķi, sauc par *stereopāri*. Stereopāru skatīšanās tehnika tuvāk ir skaidrota šī temata komentāros. Tagad pieminēsim vienkāršāko – skatīšanos ar neapbruņotām acīm.

Stereopāru skatīšanos ar neapbruņotām acīm pieļauj tas, ka acu konverģences un akomodācijas procesi nav stingri piesaistīti faktiskajai apkārtējās vides ģeometriskajai struktūrai, bet gan ir ar lielu adaptācijas spēju. Tādējādi mēs varam iemācīties acis konverģēt vai nu uz bezgalību, vai kādu būtiski tuvu punktu, vienlaicīgi noturot acu akomodāciju atbilstoši attālumam līdz stereopārim. Tad jāskatās cauri stereopāra attēliem uz kaut ko iedomātu ļoti tālu (konverģence uz bezgalību) līdz attēlu dubultošanās rezultātā redzeslauka vidū saplūst kreisais un labais attēls. Pēc tam jāraugās tik ilgi, kamēr saplūdušie attēli kļūst skaidri un asi saskatāmi (smadzenes nodrošinās tādu acu muskulatūras stāvokli, ka akomodācija atbildīs attālumam līdz stereopārim). Svarīgi, lai attālums starp pāra attēlu centriem nebūtu lielāks, par attālumu starp skatītāja acīm.

Ja stereopāra attēlus apmaina vietām, tad acis jāvērs nevis bezgalībā, bet gan uz kādu punktu tuvāk par stereopāri, kad acu asis krustojas pirms pāra attēliem. Dažiem cilvēkiem šis veids izrādās ērtāks, vēl jo vairāk tāpēc, ka nav nosacījumu uz attālumu starp attēliem.

Uzņemot stereopārus attālumam starp kameras pozīcijām nav obligāti būt precīzi vienādam ar attālumu starp skatītāja acīm. Lielāks attālums ļauj no stereopāra izjust telpas dziļumu tālāk izvietotiem objektiem, nekā dabiski skatoties. To demonstrē, piemēram, šo rindu autora sens (1960-tie gadi) industriāla rakstura lauku ziemas ainavas stereopāris – att. SR5:



Att. SR5. Sens industriāla rakstura lauku ziemas ainavas stereopāris
(1960-tie gadi)

Imitējot skatu bezgalībā, t.i. savietojot att. SR5 vistālākos redzamos objektus – meža kontūras (att. SR6) un tuvāk izpētot tuvāko objektu disparitāti, varam novērtēt, ka attālums starp kameras pozīcijām bijis aptuveni divkārtšots lielo stabu diametrs, tātad ap 2×25 cm.



Att. SR6. Attēlā SR5 redzamo objektu disparitāte pie skata bezgalībā.

Saprotams, ka vērsot skatu uz centrālo stabu pāri, tas vairāk nedubultojas, bet tuvāko objektu dubultošanās samazinās, att. SR7



Att. SR7. Skats vērst uz centrālo stabu pāri, kas nedubultojas, bet tuvāko objektu dubultošanās ir samazinājusies, salīdzinājumā ar att. SR6.

Krāsu uztvere

Mūsu krāsu pasaule ir sevišķi bagāta un varbūt pat šķietami haotiska. Tomēr krāsu uztveri nodrošina mūsu acu strikti organizētas optiski-bioķīmiskas struktūras ar interesantiem funkcionēšanas procesiem un uztveres efektiem.

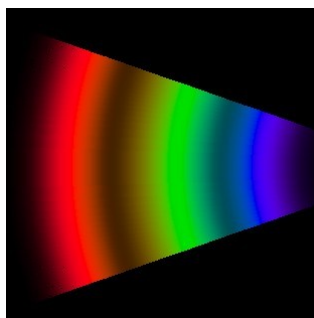
Ja salīdzinām mūsu redzi un dzirdi, tad redzam, ka dēļ optiskās un akustiskās vides fizikālajām atšķirībām gaismai ir izteikta ģeometrisku staru struktūra, pretstatā skaņai, kuras izplatība ir ģeometriski izplūdusi. Tāpēc īsti būtiska ir tikai spēja analizēt akustiskā signāla spektrālo sastāvu, ko katrā ausī veic viens skaņas uztvērējs. Protams, ar to ir par maz ģeometrisko detaļu uztverei. Savukārt, katrā acī mums ir miljoniem atsevišķu gaismas uztvērēju, kas caur acs lēcu uz tīklenes projicēto attēlu gan analizē ģeometriski, tomēr ļoti ierobežoti uztvertās gaismas spektrālo sastāvu.

Tāpēc arī pretējam procesam – sintēzei, skaņas gadījumā nepieciešama, piemēram, gara rinda klavieru taustiņu, bet krāsainas gaismas sintēzei lielā mērā pietiek tikai ar trim ”taustiņiem”. Plašas iespējas katram pašam vienkārši rīkoties ar šiem trim taustiņiem mums dod personālie datori, līdz ar to pavērusās iespējas viegli un daudzveidīgi darboties ar krāsām. Atzīmēsim tomēr, ka šīs iespējas ir gan plašas tehniski, bet pieejamo krāsu kopums ir zināmā mērā ierobežots – par to tuvāk komentārā.

Jāuzsver, ka krāsu mēs redzam *gaismas starojumam!* Priekšmetu krāsa ir no to virsmas emitētā elektromagnētiskā starojuma krāsa. Šāda starojuma cēloņi var būt ļoti daudzveidīgi – gan dabiski, gan mākslīgi, gan ar pašas virsmas enerģijas avotu, gan atstarojoši no ārienes saņemto enerģiju. Šeit aplūkosim pāris pašus vienkāršākos krāsu redzes efektus balstītus uz dažādiem gaismas starojuma enerģijas summējumiem. Akcentējam, ka runāsim galvenokārt par gaismu summējumiem. Tie iegūstami, piemēram, uz datora ekrāna, nevis veidojot krāsvielu maisījumus, teiksim, uz papīra.

Standarta līdzeklis krāsu summāro kombināciju veidošanai ir prožektoru un atstarojoši ekrāni, jo tie nodrošina katra ekrāna virsmas maza laukumiņa vēlamu spīdēšanu. Datora monitora vai televīzijas aparāta ekrāns ir sarežģītāks tehnisks risinājums, kurš tāpat nodrošina katra virsmas maza laukumiņa vēlamu spīdēšanu – kā jau teikts, mūsdienās tieši šis ir vispārpieejams instruments. Ar to te arī darbosimies un aplūkosim divus krāsu efektus – *krāsu metamerismu* un *papildkrāsu pēckrāsas*.

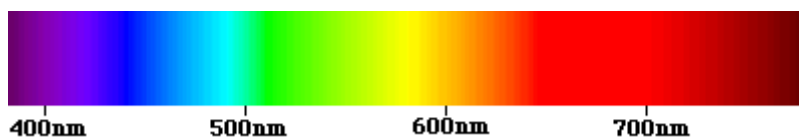
Visiem ir pazīstams baltās gaismas krāsu spektrs, kura sešas galvenās daļas mēs redzam kā violetu, zilu, zaļu, dzeltenu, oranžu un sarkanu krāsu. Dažādi starojuma avoti šīs krāsas izstaro noteiktās kombinācijās. Piemēram, saules gaisma apvieno tās visas, par ko liecina varavīksne. Līdzīga ir kamīna uguns vai elektriskās kvēlspuldzes gaisma. Savukārt datora monitors vai energoekonomiskā apgaismes spuldze staro vien daļu no pilnā gaismas spektra. Ir vērts pacensties, piemēram, kompaktdiska atspīdumā salīdzināt dienas gaismas vai kvēlspuldzes spektru ar datoru monitora vai senākas ekonomiskās spuldzes gaismu spektru. Uzmanīgi grozot disku, pamanīsim, ka pēdējiem izteikti iztrūkst dzeltenās krāsas – att. KU1:



Att. KU1. Aptuvens skats, kādu iespējams novērot datora monitora baltās gaismas atspīdumā pret kompaktdisku.

Varbūt pārsteidzoši, bet balts monitora ekrāns ir tik pat balts kā sniegs dienas gaismā, lai gan monitora ekrāns pēc konstrukcijas izstaro vien sarkanu, zaļu un zilu gaismu – tie tad būtu tie augstāk minētie krāsainas gaismas sintēzes taustiņi. Vēl vairāk, izslēdzot zilo starojumu, ekrāns kļūst dzeltens, vai citiem vārdiem, monitora ekrāns izstaro dzeltenu gaismu, ja tam vienlaicīgi liek starot sarkano un zaļo krāsu.

Raugoties uz pilno krāsu spektru (att. KU2), tas nozīmē, ka vienlaicīgus zaļā un sarkanā starojumus kopā mēs redzam, kā dzeltenu gaismu, t.i. aptuveni 550 nm un 650 nm starojumi summā dod dzeltenu – tāpat kaut ko vidēju, ap 600 nm.

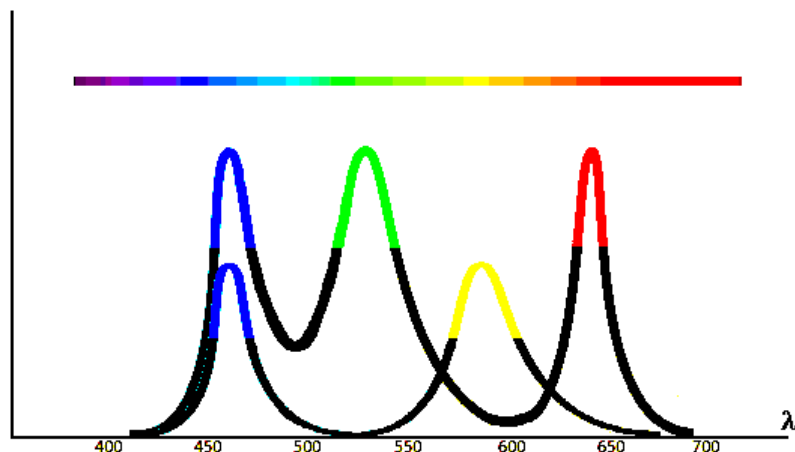


Att. KU2. Tradicionāls pilnā krāsu spektra attēlojums.

Kā būtu ar zilā un dzeltenā starojumu summu, aptuveni 400 un 580 nm? Vai te tad būtu jāiznāk vidējam ap 500 nm? Bet pārsteigums – iznāk balts, kā vispār nav spektrā! Spektrā nav arī dažādu purpura nokrāsu, kuras ir zilā un sarkanā starojumu summa!

Te lasītājs vēlreiz jābrīdina, ka runa ir par dažādām gaismas starojumu summām, nevis krāsvielu maisījumiem. Mēs atceramies, ka, sajaucot dzeltenu un zilganu akvareļu krāsas, patiešām iegūstam zaļu krāsu, bet tad par pārsteigumu gādā zaļās un sarkanās akvareļu krāsu maisījums, kura krāsa tagad pavisam nav no spektra sagaidāmā vidējā dzeltenā krāsa, bet gan ļoti tumšs brūngani violets tonis. Šīs lietas ir iztirzātas komentāram pievienotajā lekcijā par krāsu reprodukciju.

Gaismas starojumu summas matemātiski var aprakstīt precīzāk, lietojot starojuma enerģijas spektrālā blīvuma funkcijas $E(\lambda)$ jēdzienu, kur λ ir gaismas viļņa garums. Šī funkcija raksturo starojuma spektrālo sastāvu, un tās vērtības nozīmē konkrētās spektra krāsas enerģētisko intensitāti. Piemēram, t.s. vienādenērgētiskās baltās gaismas spektrālā sastāva funkcija ir konstante, datora monitora baltās gaismas spektrālā sastāva funkcija ir trīs impulsveida funkciju summa, jau minētā zilā un dzeltenā starojuma baltā summa ir atbilstošo divu impulsveida funkciju summa, sk. att. KU3.



Att. KU3. Dažu baltās gaismas starojumu enerģijas spektrālā blīvuma funkciju shematiski grafīki:
 augšējā līnija – vienādenērgētiskā baltā gaisma,
 vidējā līnija – datora monitora baltā gaisma,
 apakšējā līnija – spektra zilās un dzeltenās gaismas summārā baltā gaisma.

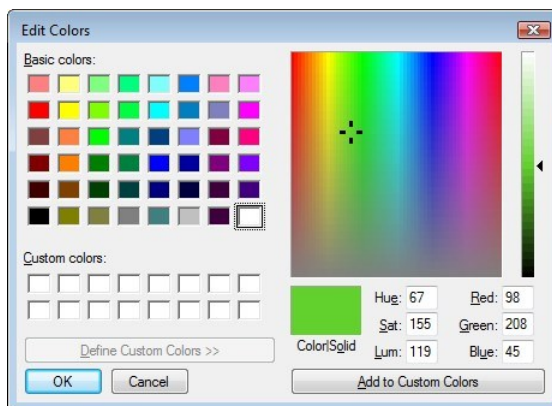
Parādību, ka tikai no starojuma krāsas vien mēs nevaram noteikt tā spektrālo sastāvu, sauc par krāsu metamerismu. Augšminētās krāsaino gaismu summārās kombinācijas dzeltens + zils, sarkans + zaļš + zils, kā arī dabiskā dienas gaisma ir baltās krāsas t.s. *metamēru* piemēri. Spektra dzeltenais un sarkans + zaļš ir dzeltenās krāsas metamēri. Vai lasītājs var nosaukt vēl kādus krāsu metamēru piemērus? Tuvāk par to komentārā un pievienotajā lekcijā par krāsu uztveri.

Tagad nedaudz pievērsīsimies mūsu trim krāsu sintezatora taustiņiem – monitora krāsu sistēmai.

Monitora gaismas starojuma spektrālā sastāva funkcija vispārīgi ir sekojoša:

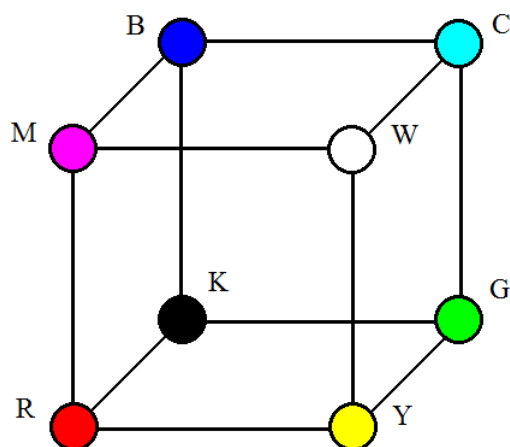
$$r \cdot R(\lambda) + g \cdot G(\lambda) + b \cdot B(\lambda),$$

kur funkcijas $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ un $B(\lambda)$ ir monitora ekrāna sarkanā, zaļā un zilā starojuma enerģijas spektrālā blīvuma funkcijas, bet koeficienti $r, g, b = 0 \dots 255$. Tā kā lietotāja rīcībā ir tikai šie koeficienti, tas nozīmē krāsu reprezentāciju ar diskrētiem punktiem no kuba ar izmēru $256 \times 256 \times 256$ – RGB-kuba. Tiek piedāvātas dažādas šo punktu 2D reprezentācijas, piemēram, MS Windows krāsu panelis – att. KU4:



Att. KU4. MS Windows krāsu panelis.

RGB-kuba virsotnēm atbilst astoņi koeficientu r, g, b galējo vērtību definēti vektori: $(0, 0, 0)$, $(255, 0, 0)$, $(0, 255, 0)$, $(0, 0, 255)$, $(255, 255, 0)$, $(255, 0, 255)$, $(0, 255, 255)$, $(255, 255, 255)$. Att. KU5 parādītas šo virsotņu krāsas:



Att. KU5. RGB-kuba virsotņu krāsojums:
W – balts, R – sarkans, G – zaļš, B – zils,
Y – dzeltens, C – ciāns, M – madženta, K – melns.

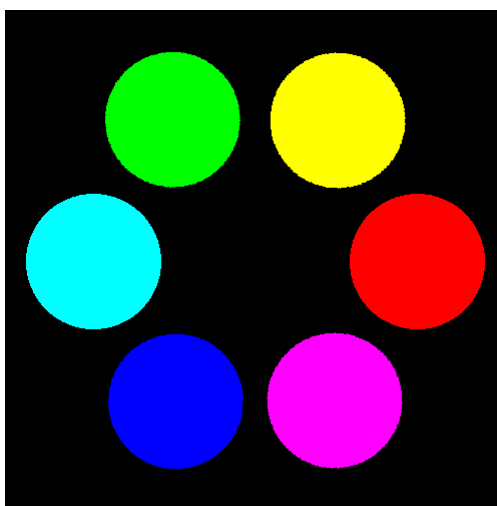
Par divu krāsu nosaukumiem Internetā ir lasāms sekojošais: *ciāns* – sadzīvē mēdz saukt arī par gaišzilu, dažkārt par zaļganzilu, *madženta* – krāsas toni ikdienā mēdz saukt par purpursarkanu, avenkrāsas vai vienkārši sarkanu.

Redzam, ka RGB-kuba garo diagonāļu vektoru summas ir $(255, 255, 255)$ – baltās krāsas vektors. Krāsu pāri, kuru starojumu summa ir balta, sauc par savstarpējām papildkrāsām. Vispārējā gadījumā ar vektoru (r, g, b) dotas RGB-kuba krāsas papildkrāsas vektors ir $(255 - r, 255 - g, 255 - b)$.

Tātad RGB-kuba virsotņu savstarpējo papildkrāsu pāri ir (R, C), (G, M), (B, Y) un (W, K). Pēdējais pāris ir īpašs ar to, ka no uztveres viedokļa tā krāsām nemaz nepiemīt īsta krāsainība. Tāpat arī to pelēkas nokrāsas starpstāvokļiem ar intensitātes vērtībām no intervāla $(0, 255)$ – šādas krāsas sauc par ahromatiskajām krāsām. Pretstatā, visas pārējās krāsas sauc par hromatiskajām krāsām.

Ievērojam, ka hromatiski krāsotās virsotnes ir cikliski sakārtojamas ap RGB-kuba W virsotni: R, Y, G, C, B, M, un visas, izņemot madžentu, ir spektra krāsas pareizā secībā. Arī šis moments ir skaidrots komentāram pievienotajā lekcijā par krāsu uztveri.

Cikliskā secība ļauj pārskaitītās hromatiskās krāsas sakārtot skaistā aplveida konfigurācijā – krāsu aplī, att. KU6:



Att. KU6. Krāsu aplis, diametrāli pretējas ir savstarpējas papildkrāsas.

Par dažāda veida krāsu apliem var skatīt http://en.wikipedia.org/wiki/Color_wheel.

Tagad esam gatavi vēl vienam pavisam viegli novērojamam krāsu uztveres efektam – tam, ko saucim par *pēckrāsām*. Konkrēti, mūsu krāsu apļa pēckrāsām.

Esam pieraduši, ka pavēršot skatu kādā virzienā, uzreiz ieraugām tur esošās krāsas. Tomēr ne vienmēr uzreiz. Ja iepriekšējais skats ir bijis pietiekoši ilgi nekustīgi fiksēts, tad uztvertā attēls ir atstājis pēdas attiecīgajās tīklenes vietās – pie cita skata virziena vai pat tikai pie izmainīta fona joprojām ir redzami šī attēla galvenie elementi, bet interesantākais, ka tie ir deformētās krāsās, kuras tad arī saucam par pēckrāsām. Internetā var meklēt jēdzienu *pēcattēls*, vai skatīt <http://en.wikipedia.org/wiki/Afterimage>.

Lai novērotu šo efektu, apmēram minūti nekustīgi raudzīsimies attēla KU6 centrā, un pēc tam paskatīsimies uz kaut ko gaišu. Tad dažas sekundes būs redzams līdzīgs krāsainu riņķīšu aplis, tomēr citādi iekrāsots. Šo rindu autoram tas izskatījās aptuveni kā parādīts att. KU7:



Att. KU7. Attēlā KU6 redzamā krāsu apļa pēckrāsu atveidojums.

Pēckrāsu aina var kaut kādā mērā mainīties atkarībā no fiksētā skata ilguma, arī dažādiem skatītājiem tā nav gluži viena un tā pati. Ļoti nopietni tā ir atkarīga no monitora ekrāna spožuma līmeņa un no sākotnējā attēla fona krāsas – lasītājs pats var pārbaudīt! Tomēr

tieši pēc attēla KU6 ilgstošas vērošanas aptauja parādīja uztveres būtisku saskaņu. Lūk, trīs novērojumu vārdiski protokoli.

Paulis:

	madženta	zils (ar violetu?)
tumšs (brūns?)		ciāns
	dzeltens	zaļš

Kārlis: “Augšā divi violeti (kreisais rozā?), tad pa labi zils, zem tā zaļš, tad oranžs un pa kreisi brūns.”

	violets (rozā?)	violets	
brūns			zils
	oranžs	zaļš	

Arnolds:

	purpurs	violets	
rozā		zaļi zils	
	oranžs	zaļš	

Kas īsti ir tas, ko mēs te novērojam, un kāpēc tieši tā? Tradicionālais skaidrojums, piemēram, <http://en.wikipedia.org/wiki/Afterimage> saka, ka krāsas sajūtu radošo tīklenes šūnu nogurums pie ilgstošas skatīšanās uz vienu un to pašu gaismas avotu izpaužas iztērētos šūnu resursos, kas vajadzīgi tieši šai starojuma krāsai. Pēc tam pie skatīšanās uz baltu fonu nogurušās šūnas spēj uztvert tikai to baltā starojuma daļu, kuras nav sākotnējā attēlā. Sākotnējā attēla daļa tiek it kā atņemta, uztverei atstājot papildkrāsas. Tātad pēckrāsa uz balta fona principā ir sākotnējās krāsas papildkrāsa. Bet, kā redzam, ne tik tieši – mums visinteresantākā liekas ciāna ļoti tumšā pēckrāsa.

Komentārā esam mēģinājuši šo novēroto pēckrāsu efektu izskaidrot ar formāla krāsu uztveres modeļa palīdzību.

Aklais plankums

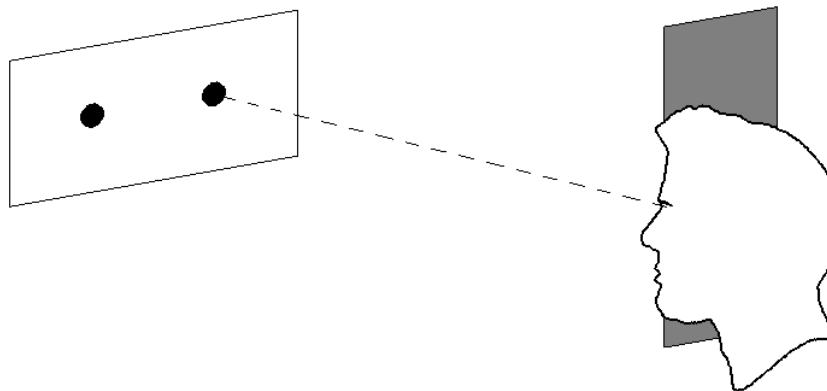
Ja tiešām lasītājam tas ir jaunums, tad uzsvērsim, ka šis ir sevišķs efekts, kurš atklāj interesantu mūsu acu anatomisku īpašību, proti, katrā acī netālu no redzeslauka centra ir neredzīga zona, t.s. *aklais plankums*. Par tāda eksistenci var pārliecināties ārkārtīgi vienkārši – pietiek ar vienu aci aplūkot testa attēlu AP1.

Jāskatās gan nedaudz rūpīgi, pirmkārt, ievērojot elementārus ģeometriskā rakstura nosacījumus – caur acu centriem ejošai taisnei jābūt aptuveni paralēlai ar aplīšu centrus savienojošu taisni, acs attālumam līdz attēlam jābūt aptuveni četrkārtotam attālumam starp melnajiem aplīšiem. Tomēr jāmēra nekas nav, jo daudz iespaidīgāk ir aci vispirms pietuvināt attēlam būtiski tuvāk un tad pakāpeniski to attālināt līdz efekta sasniegšanai. Var arī otrādi, vispirms būtiski attālināt un tad tuvināt.

Otrkārt, visā attāluma pīeregulēšanas laikā ar kreiso aci jāskatās precīzi labajā aplītī (vai ar labo aci kreisajā). Acij, ar kuru neskatāmies, obligāti jābūt aizklātai – att. AP2.



Att. AP1. Testa attēls acs aklā plankuma pamanīšanai.



Att. AP2. Kreisās acs aklā plankuma novērošana:
kreisā acs raugās labajā aplītī, labā acs aizklāta,
acu attālums līdz testa attēlam aptuveni četrkārtots attālums starp aplīšiem.

Novērojamā efekta būtība ir, ka aplītis, uz kuru nav vērsts tiešais skatiens, pie norādītā četrkārtotā attāluma pazūd.

Krēslas redze

Aplūkojot kādu krāšņi noformētu lietu, piemēram, ilustrēta žurnāla lapu, arvien vājākā apgaismojumā, pamanām, ka krāsojums kļūst neizteiksmīgāks, līdz pavisam pazūd. Tomēr pazūd tikai krāsas, bet noformējuma vispārējā struktūra joprojām ir saskatāma, lai gan bez sīkām detaļām, kas saplūdušas.

Eksperimentam der kaut vai tumša vannas istaba ar piemeklētā platumā pavērtu durvju spraugu. Bet par novērojamo objektu vislabāk piemērots, šķiet, būtu kāds krāsošanas darbu komplekts.

Att. KR1 parādīts ūdenskrāsu komplekts pilnā apgaismojumā un mēģinājums atainot skatu uz to pie pavisam vāja apgaismojuma:



Att. KR1. Augšā – ūdenskrāsu komplekts pilnā apgaismojumā.
Apakšā – mēģinājums atainot skatu uz to pie pavisam vāja apgaismojuma.

Ja mūsu krāsu uztvere nodrošinātu vairāk vai mazāk proporcionālu atkarību no apgaismojuma līmeņa, tad mēs novērotu kaut ko līdzīgu att. KR2 sniegtajam hipotētiskajam skatam, kurā atsevišķas krāsas vēl saglabājušās:



Att. KR2. Hipotētisks skats, kādu mēs novērotu, ja mūsu krāsu uztvere nodrošinātu vairāk vai mazāk proporcionālu atkarību no apgaismojuma līmeņa.

Novērojamās krāsu izžušanas cēlonis ir specifiska mūsu acs uzbūve, kura realizē divus vizuālās uztveres līmeņus – krāsu redzi un ahromatisko redzi. Šos divus līmeņus nodrošina divu veidu gaismu reģistrējošās šūnas, kas izvietotas tīklenē – t.s. vālītes un nūjiņas. Vālītes savukārt ir triju veidu, kas kopumā veic reģistrētās gaismas spektrālo analīzi un tādējādi ir krāsu sajūtas pamats. Turklāt pastāv ļoti nopietna atšķirība vālīšu un nūjiņu optiskajā jūtīgumā – vālītes spēj uztvert tikai daudz spožāku gaismu nekā nūjiņas un tāpēc pie vāja apgaismojuma vālītes vienkārši izslēdzas.

Svarīgi zināt, ka anatomiski acs tīklenes centrālajā daļā ir tikai vālītes, nūjiņu nav nemaz, savukārt tīklenes perifērijā ir otrādi. No tā seko divas būtiskas redzes aparāta īpašības:

- krāsu uztveri un redzes asumu nodrošina tikai acs tīklenes centrālā daļa,
- acs tīklenes perifērija uztver tikai vispārēju apkārtnes ahromatisku skatu.

Tādējādi kļūst skaidrs, kāpēc krāšņs priekšmets pietiekoši vājā apgaismojumā zaudē krāsas un redzei zūd asums – par abām lietām atbildīgais tīklenes centrālais apgabals pārstājis funkcionēt.

Tomēr nūjiņas turpina funkcionēt un nodrošina t.s. krēslas redzi, kuras galvenās īpašības ir:

- tā ir ahromatiska,
- tā izpaužas kā t.s. *sānu redze*.

Ar att. KR1 (apakšā) jau nodemonstrējām krēslas redzes ahromatismu. Interesanti, ka tā novērošanai nemaz nevajag vāji apgaismotu objektu. Pietiek, ka šis objekts veido attēlu redzeslauka perifērijā, lai tas zaudētu savu krāsu.

Par tādu objektu viegli noder kāds spožs krāsains punkts, piemēram, televīzijas uztvērēja elektriskā tīkla pieslēguma signāllampīņa – pieredze rāda, ka vēlams sarkana, jo tad krāsas zudums ir pamanāmāks.

Tātad, lai novērotu sarkanas signāllampīņas krāsas pazušānu, vienkārši ar vienu aci raugāmies no tās iesāņus. Tad lampīņa joprojām redzama spoža, bet vairs ne sarkana. Protams, sekojam, lai lampīņas attēls neveidotos aklā plankuma apgabalā.

Daži praktiski krēslas redzes momenti sniegti komentāru sadaļā.

Internetā var meklēt tieši "krēslas redze" vai "scotopic vision" (http://en.wikipedia.org/wiki/Scotopic_vision).

Asums pie spilgtākas gaismas

Redzes asuma jautājums šo rindu autoram kļuva aktuāls tuvojoties pensijas vecumam – kāpēc lasīt, piemēram, avīzi iespējams vien pie krietni spoža apgaismojuma, kamēr turpat blakus jaunāki ģimenes locekļi iztiek ar relatīvi pieticīgu apgaismojumu? Arī pašam agrāk pēc pastiprināta lokāla apgaismojuma vajadzības nebija.

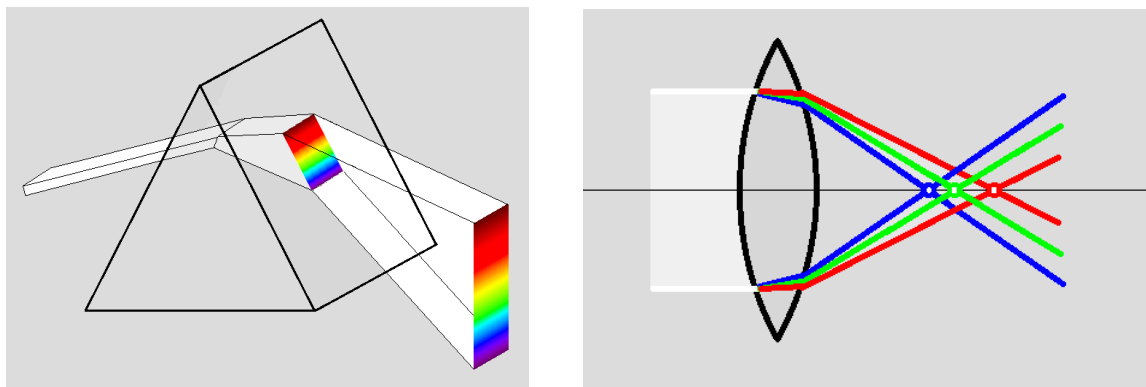
Zināms, organismam novecojot, acis kļūst tālredzīgākas, t.i. asa redze tuvākiem priekšmetiem prasa acu muskulatūras arvien lielāku sasprindzinājumu, ko panākt kļūst arvien grūtāk. Bet kā te palīdz gaisma?

Izrādās, ka atbilde ir ārkārtīgi vienkārša, lai arī ar visu zināmu redzes jautājumu pieredzi tā autoram pašam nebija ienākusi prātā – vajadzēja pavisam nejauši to izlasīt kādā tekstā, kurā tā tika sniegta lakoniski (acīmredzot pašsaprotamības dēļ) un bez komentāriem. Proti, spilgtākā gaismā mūsu acu zīlītes saraujas, tādējādi skatu diafragmējot. Asums palielinās pats no sevis bez vajadzības acis sasprindzināt.

Patiešām, komentāri lieki! Vienīgi šī krājuma struktūra tomēr prasa kādu piezīmi komentāru sadaļā...

Sarkanā un zilā laušana

Zināms, ka gaismas stari, šķērsojot robežu starp divām optiski atšķirīgām vidēm, lūst, t.i. maina virzienu. Lūšanas leņķis ir atkarīgs no staru viļņu garuma. Rezultātā baltā gaisma sadalās krāsās. Pie tam visvairāk lūst violette un zilie stari, vismazāk sarkanie. Stikla prizma šo efektu vēl pastiprina, jo liek robežu starp vidēm šķērsot divas reizes – att. SZ1 pa kreisi:

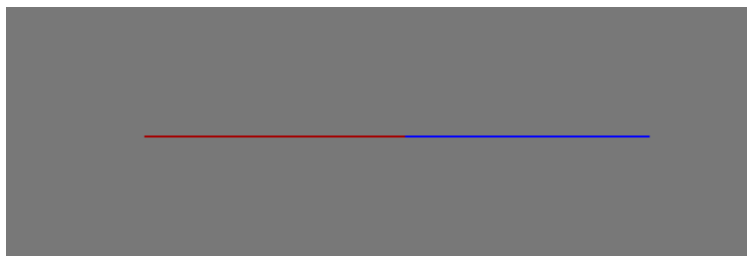


Att. SZ1. Pa kreisi: baltās gaismas sadalīšanās krāsās, ejot caur stikla prizmu. Pa labi: viena kūļa dažādu krāsu gaismas fokusēšanās dažādos punktos pēc lūšanas stikla lēcā.

Tas pats notiek arī stikla lēcā, kurā īpaša šī efekta izpausme ir viena kūļa dažādu krāsu gaismas fokusēšanās dažādos punktos – att. SZ1 pa labi. Līdz ar to vienkāršas stikla lēcas baltā gaismā formētā attēlā parādās lielāki vai mazāki krāsaini izplūdumi. Šo parādību sauc par *hromatisko aberāciju* (http://en.wikipedia.org/wiki/Chromatic_aberration).

Fototehnikā hromatisko aberāciju cenšas novērst, objektīvos lietojot īpaši aprēķinātas komplikētas lēcu sistēmas. Savukārt, lai arī cilvēka acs optiskā daļa nav tikai vienkārša lēca, tomēr acī nav izveidojušās speciālas optiskas pretaberācijas sistēmas. Dažādas relatīvi sīkas attēlu deformācijas, to skaitā krāsu apgabalu ģeometriskus defektus, smadzenes cenšas atfiltrēt augstākos redzes analizatora līmeņos. Vien nopietnos attēlu deformāciju gadījumos jālieto brilles vai kādi citi optometrisko tehnoloģiju palīgīdzekļi. Ar normālu redzi ikdienas apstākļos nekādas tīklenes attēlu deformācijas nemaz neievērojam. Tomēr pavisam vienkārši eksperimenti parāda zilu un sarkanu staru dažādību arī veselā acī.

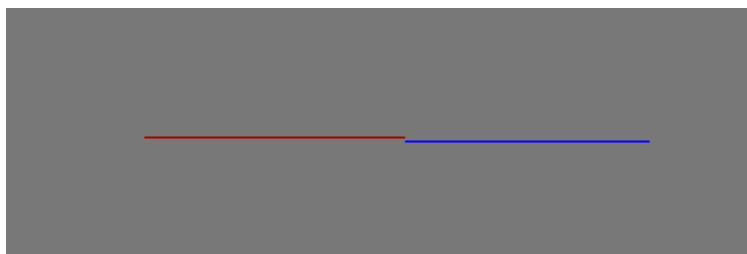
Viena kūļa dažādu krāsu gaismas fokusēšanās dažādos punktos nozīmē, ka tīri zilas un sarkanas attēla daļas nemaz nevar vienlaicīgi būt asas. Šīs asuma atšķirības gan ir individuālas. To rāda tievas sarkani-zilas taisnas līnijas aplūkošana uz pēc iespējas tumša datora ekrāna (reālā eksperimentā iesakām tumšo ekrāna daļu turēt pilnīgi melnu), att. SZ2:



Att. SZ2. Tieva sarkani-zila taisna līnija uz tumša ekrāna (reālā eksperimentā iesakām tumšo ekrāna daļu turēt pilnīgi melnu).

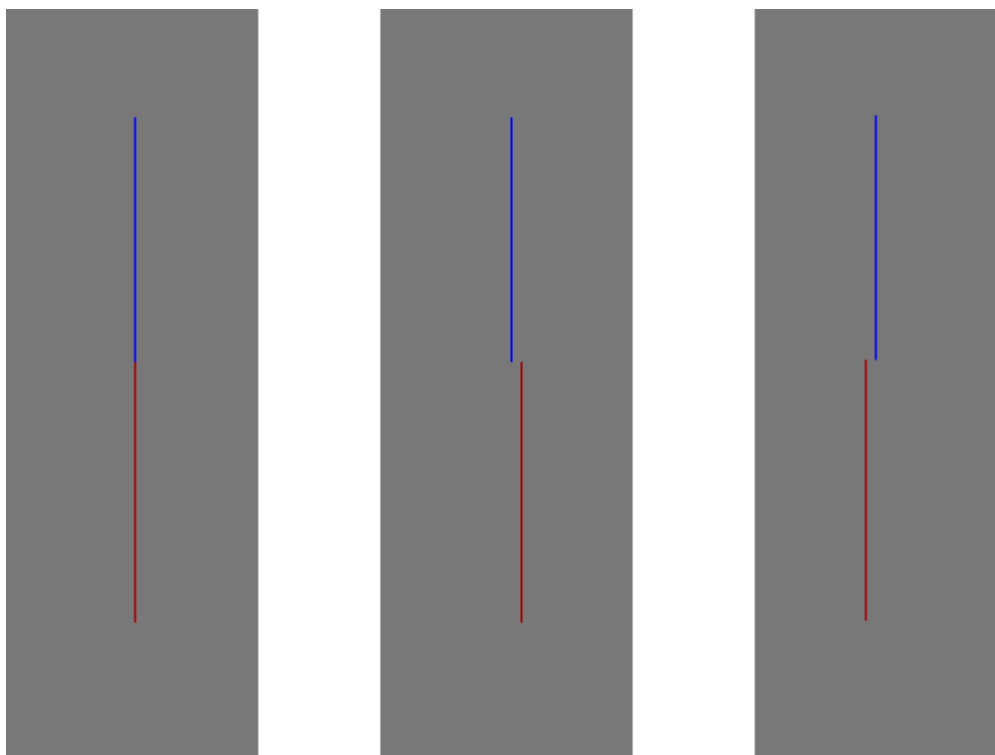
Lasītājam pašam jānovērtē, cik lielā mērā šis efekts ir raksturīgs tieši viņa acij. Ekrāna tumšo daļu tāpēc iesakām turēt pilnīgi melnu, lai līniju fona starojums nenomaskētu efekta izpausmi.

Otrs efekts, ko varam novērot, aplūkojot att. SZ2 sarkani-zilo līniju uz pēc iespējas tumša fona, ir šķietams lūzums krāsu sadures vietā. Proti, daļai aptaujāto skatītāju, ieskaitot šo rindu autoru, noturīgi izskatās, ka zilā līnijas daļa ir nedaudz zemāka par sarkano, kā shematiski parādīts att. SZ3:



Att. SZ3. Sarkani-zilas taisnas līnijas šķietams lūzums krāsu sadures vietā uz tumša ekrāna (reālā eksperimentā iesakām tumšo ekrāna daļu turēt pilnīgi melnu).

Arī trešais efekts novērojams pie tās pašas sarkani-zilās līnijas, kurai, lai netraucētu otrs efekts, labāk būt pagrieztai vertikāli, att. SZ4 pa kreisi:



Att. SZ4. Pa kreisi: vertikāla tieva sarkani-zila taisna līnija uz tumša ekrāna (reālā eksperimentā iesakām tumšo ekrāna daļu turēt pilnīgi melnu).

Vidū: skats, kas novērojams caur kustīgu caurumiņu galējā kreisajā pozīcijā.
Pa labi: skats, kas novērojams caur kustīgu caurumiņu galējā labējā pozīcijā.

Šoreiz jāskatās caur nelielu papīra lapā izdurtu caurumiņu. Nedaudz kustinot lapu pa kreisi, pa labi, ievērojam, ka līnija krāsu sadures vietā šķietami pārlauzta horizontāla virzienā.

Turklāt līdz ar caurumiņa kustēšanos, abas līnijas daļas nedaudz pārvietojas viena attiecībā pret otru – att. SZ4 vidū un pa labi.

Kā pēdējo apskatīsim efektu, ko saucim par *hromostereoefektu* (<http://en.wikipedia.org/wiki/Chromostereopsis>). Šī efekta izpausme ir šķietams tāda attēla telpiskums, kurā izvietoti savstarpēji pieguloši sarkani un zili apgabali. Skatītājam, vismaz šo rindu autoram, att. SZ5 sarkanie burti izskatās nedaudz izvirzīti priekšplānā attiecībā pret zilo fonu, bet zilie burti aizvirzīti dziļumā attiecībā pret sarkano fonu:



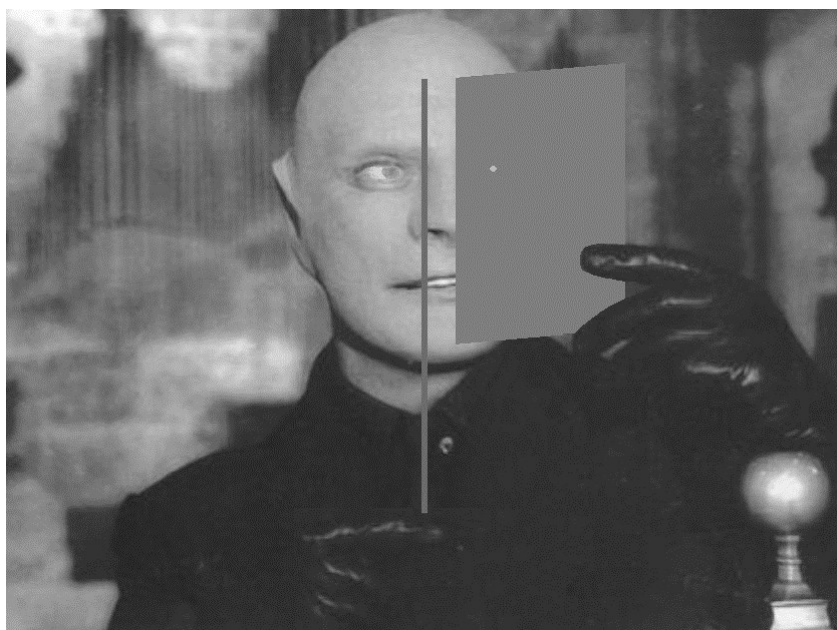
Att. SZ5. Attēls, kurš sastāv no savstarpēji piegulošiem sarkaniem un ziliem apgabaliem. Skatītājam te būtu jāizjūt šķietams telpiskums uz robežām starp dažādām krāsām.

Apskatītos efektus nav obligāti balstīt tieši uz sarkanu un zilu krāsu. Lietotajām krāsām vienkārši jābūt pietiekoši dažādām, lai izpaustos attiecīgo starojumu laušanas atšķirības, kuras sarkaniem un ziliem gaismas stariem ir maksimālas – att. SZ1.

Adata un caurumiņš

Šim eksperimentam nepieciešams pavisam vienkāršs aprīkojums – adatas vai adatas resnuma stienītis un papīra lapa ar izdurtu caurumiņu. Caurumiņa diametram nav jābūt pārāk lielam, piemērots ir tās pašas adatas diametrs.

Skatītājs raugās tālumā pret gaišu fonu, turot adatu vienu vai divus centimetrus no acs, bet papīra lapu turot kādu gabalu tālāk tā, lai caurumiņš atrastos uz skata centrālās ass, kā parādīts att. AC1:



Att. AC1. Skatītājs raugās tālumā pret gaišu fonu.

Adatas resnuma stienītis novietots acs priekšā vienu vai divus centimetrus no acs, bet papīra lapa kādu gabalu tālāk tā, ka caurumiņš atrodas uz skata centrālās ass.

Obligāti jāraugās pret gaišu fonu, tad gaišajā caurumiņā parādās tipiski novērojamais att. AC2 redzamais skats:



Att. AC2. Tipisks novērojamais skats – gaišā laukumā redzama nedaudz izplūduši tumša josliņa.

Tagad rodas divi jautājumi:

- Kas ir tā gaišajā laukumā redzamā tumšā josliņa?
- Kā izskaidrot šīs josliņas paradoksālo uzvedību pie adatas kustināšanas?

Fosfēns

Šim eksperimentam vispār nav nepieciešams nekāds aprīkojums – visas darbības ir ar pirkstu galiem nedaudz paspaidīt aizvērtu acu kaktiņus. Tad, piemēram, viegli piespiežot pirksta galu labās acs ārējam kaktiņam, redzeslauka pretējā pusē parādās ieapaļa plankuma veida figūra, kas no šo rindu autora novērojuma aptuveni ieskicēta att. F1:



Att. F1. Aptuveni ieskicēts novērotāja redzeslauks, kurā parādījusies ieapaļa plankuma veida figūra, kas radusies viegli piespiežot pirksta galu labās acs ārējam kaktiņam.

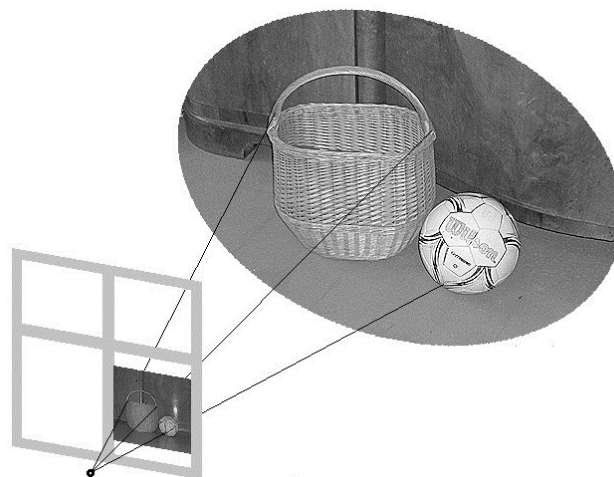
Tāda vai citāda vizuāla struktūra, kas parādās redzeslaukā kāda ārēja ne optiska kairinājuma rezultātā, tiek saukta par *fosfēnu*. Kairinājums var būt dažādas dabas, gan ķīmisks, gan elektrisks, gan, kā mūsu gadījumā, mehānisks (http://tiger.cfi.lu.lv/optometry/ievads_2.pdf, <http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphene>).

Šoreiz mūs interesē tikai viens jautājums – kāpēc aplūkotais plankums ir parādījies pa kreisi, t.i. kairinātajam acs kaktiņam pretējā pusē?

Fotogrāfija ar vienu aci

Vai lasītājs ir kādreiz mēģinājis parastu fotogrāfiju aplūkot ar vienu aci? Protams, var jautāt pretī – kāpēc tas būtu jādara? Atbilde ir – pamēģināt kaut vai tāpēc, ka pati fotogrāfijas dabiskā izcelsme ir no “skatīšanās ar vienu aci”!

Fotogrāfija ir apkārtējās pasaules izvēlētas ainas centrālā projekcija uz attēla plaknes. Izlaižot specifiskas foto procesa tehniskas detaļas, rezultējošo fotogrāfiju kā centrālo projekciju varam ilustrēt loga rūs veidā, att. FA1:



Att. FA1. Fotogrāfija kā ainas centrālā projekcija uz loga rūs.
Ovālā attēlots apkārtējās pasaules ainas izvēlēts fragments, kura objekti tiek projicēti.
Parādīts projekcijas centrs un projicējošie stari,
kas iziet no trim raksturīgiem ainas objektu punktiem.

Protams, kamēr mēs skatāmies ar abām acīm, skats caur loga rūti un skats uz fotogrāfiju rūs vietā ir dažādas lietas. Tomēr, skatoties tikai ar vienu aci, pie tam no punkta, kurš ģeometriski atbilst fotokameras objektīva atrašanās vietai, precīzāk, no projekcijas centra, atšķirības vairs nav. Tas ir tāpēc, ka, attiecībā pret šo centru gaismas stari, kas nāk no fotogrāfijas punktiem un atbilstošajiem ainas punktiem ir identiski (sk. att. FA1).

Konkrētai fotogrāfijai mēs varam iztēloties fotografēšanas apstākļiem atbilstošu fotokameras un rūs telpisko konfigurāciju, novērtēt projekcijas centra vietu attiecībā pret fotogrāfiju un tad no šī centra skatīties tieši ar vienu aci. Rezultāts ir pārsteidzošs – skats kļūst telpisks.

Jāsaprot, ka parasti projekcijas centra attālums līdz fotogrāfijai ir samērā mazs – salīdzināms ar fotogrāfijas izmēru, kas atbilst fotokameras kadra izmēra un fokusa attāluma attiecībai. Tāpēc var rasties grūtības ar skatīšanās asumu, bet veselai acij te palīdz zināms treniņš.

Telpiskuma efekta stiprums vispār ir atkarīgs no redzamajiem objektiem. Šo rindu autoram visspēcīgākais iespaids parasti ir no mēbelētu iekštelpu fotogrāfijām, kurām tipiski ir izteikti t.s. perspektīvie kropļojumi, t.i., lietu tālāko malu būtisks samazinājums attiecībā pret tuvākajām. Skatā ar vienu aci šie kropļojumi praktiski izzūd.

Sekojošie daži no Interneta ņemtie attēli ļaus lasītājam pašam izvērtēt aplūkotā efekta izpausmi:







Aprakstītajā veidā vienmēr ir vērts aplūkot katru lasītāja paša rīcībā esošu fotogrāfiju.

Un pavisam interesanti ir ar vienu aci pavērot dažādus video materiālus, kuru sižeti saistīti ar kustībām un dažāda dziļuma plāniem.

Saules staru vēdekļis

Visiem kādreiz ir gadījies novērot cauri mākoņu spraugām spīdošas saules staru vēdekli, piemēram, kā attēlā SV1:



Att. SV1. Cauri mākoņu spraugām spīdošas saules staru vēdekļis.

Skats ir tik pašsaprotams, ka parasti nemaz neaizdomājamies, ko mēs īsti tur redzam. Tomēr pāris jautājumu ir vietā:

- Kas ir šie stari un kāds ir to izvietojums telpā?
- Vai mēs varam iztēloties un raksturot skatu uz tiem no kādas neparastākas pozīcijas, piemēram, no lidmašīnas virs mākoņiem?

Munka glezna

Norvēģu gleznotājs Edvards Munks (http://en.wikipedia.org/wiki/Edvard_Munch) ir radījis darbu *Girls On The Pier* (att. MG1) kurš skatītājus mulšina ar it kā nepilnīgu mēness ainas attēlojumu. Proti, gleznas kreisajā pusē zemu pie debesīm redzams mēness, bet tā atspulga ūdenī nav, kamēr citu apkārtnējo objektu atspulgi parādīti.

Tāpēc ir jautājums, vai te vainojama gleznotāja aizmāršība, vai, tieši pretēji, apzināts paņēmiens emocionālas noskaņas radīšanai, vai kas cits?



Att. MG1. Edvarda Munka glezna *Girls On The Pier*, kurā nav attēlots mēness atspulgs ūdenī (attēls ņemts no Interneta meklētāja rezultātiem un šeit ievietots pazeminātā kvalitātē bez materiāla guvuma nolūka).

Slotas kāts un zīmulis

Veiksim sekojošu eksperimentu, kuram nepieciešams gaišs vertikāls ekrāns, divi garenī cilindriski priekšmeti – viens tievs, otrs resnāks, un saule.

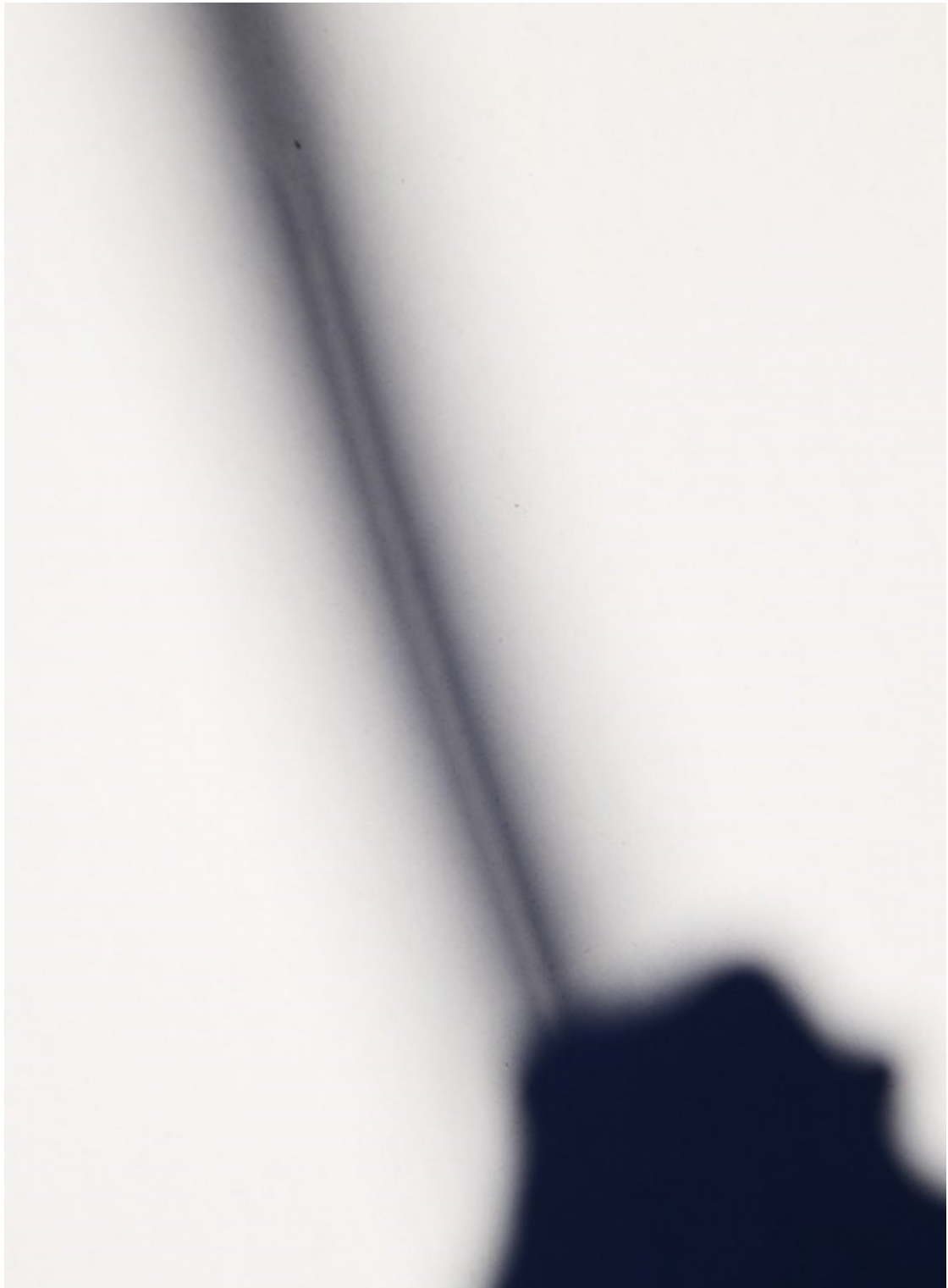
Par ekrānu der papīra lapa, par tievo cilindru – zīmulis, par resnāko cilindru – slotas vai tamlīdzīgs kāts, turpmāk saukts vienkārši par kātu.

Eksperimenta būtība ir uz ekrāna iegūt zīmuļa un kāta no saules gaismas mestās ēnas, pie tam tā, lai šīs ēnas pārklātos. Turklāt zīmulim jābūt tuvāk ekrānam, nekā kātam, un abiem aptuveni paralēli ar ekrānu, sk. attēlu KZ1:



Att. KZ1. Apņemta ekrāna, zīmuļa un kāta novietojums attiecībā pret sauli.

Eksperimenta gaitā dažādi variējam izvēlēto priekšmetu izvietošanu, visu laiku cenšoties noturēt sakrītošas ēnu garenasis. Uzmanīgi sekojot gaismas spēlei uz ekrāna, vienu brīdi pamanām, ka uz abu ēnu kopējās garenass parādās gaišāka josla (attēls KZ2). Kāpēc?!

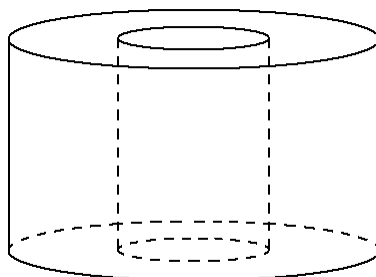


Att. KZ2. Gaišāka josla uz zīmuļa un kāta sakrītošām ēnu garenasīm.

Stikla cilindrs

Šis jautājums mums zināms no skolu fizikas olimpiādes uzdevuma – aprēķināt stikla kapilāra iekšējā kanāla redzamo izmēru pie skata virziena, kas perpendikulārs kapilāram.

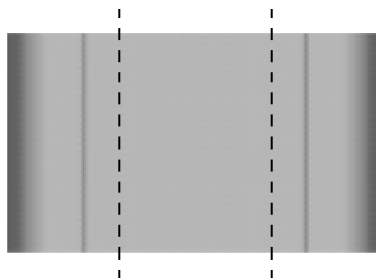
Stikla kapilārs ir stikla caurule, formāli – no stikla izgatavots taisns riņķa cilindrs ar koaksiālu taisna riņķa cilindra formas dobumu – att. SC1:



Att. SC1. No stikla izgatavots taisns riņķa cilindrs ar koaksiālu taisna riņķa cilindra formas dobumu.

Par kapilāru tiek runāts, lai vienkāršotu ģeometrisko situāciju. Proti, aplūkojam tik tievu cauruli, ka no katra tās asij perpendikulāra šķērsriezuma punktiem skatītāja acī nonākošos gaismas starus var uzskatīt par savstarpēji paralēliem. Patvaļīga diametra cilindra gadījumā tas ir līdzvērtīgi ar skatīšanos uz to no pietiekami liela attāluma. Arī mēs pieņemsim šo vienkāršojumu.

Objektu vizuālās kontūras iezīmē tie gaismas stari, kas ir virsmu pieskares. Tā kā cilindra materiāls ir caurspīdīgs, tad skatā uz cilindru parādās arī tā iekšējās virsmas redzamā kontūra. Turklāt gaismas laušana cilindra materiālā nozīmē, ka šīs kontūras pozīcija var nesakrist ar dobuma tiešo ģeometrisko projekciju – att. SC2:



Att. SC2. Iespējams skats uz izdobto cilindru, kurā parādās arī iekšējās virsmas redzamā kontūra – plēkās, nepārtrauktās līnijas. Dēļ gaismas laušanas šīs kontūras pozīcija var nesakrist ar dobuma tiešo ģeometrisko projekciju (pārtrauktās līnijas).

Att. SC3 parādīta cilindra šķērsriezuma ģeometriskā konfigurācija un laužtais gaismas stars S , kas iezīmē dobuma virsmas kontūru. Atzīmēti arī konfigurācijas parametri:

R – cilindra rādiuss,

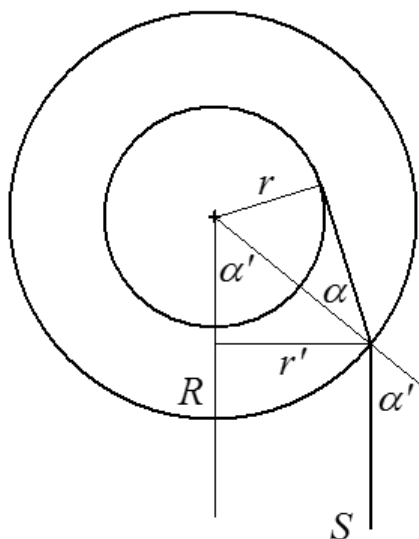
r – dobuma rādiuss,

r' – dobuma redzamais rādiuss,

α – gaismas stara S iekšējā nogriežņa krišanas leņķis attiecībā pret cilindra virsmas normāli,

α' – gaismas stara S ārējā nogriežņa leņķis attiecībā pret cilindra virsmas normāli.

Saskaņā ar pieņemto vienkāršojumu, gaismas stara S ārējais nogrieznis ir paralēls skata līnijai uz cilindra centru.



Att. SC3. Cilindra šķērs griezuma ģeometriskā konfigurācija un laužtais gaismas stars S , kas iezīmē dobuma virsmas kontūru.

Dotie lielumi ir R , r un cilindra materiāls, ko raksturo tā gaismas laušanas koeficients n , no tiem jāizsaka lielums r' .

Aprēķini izrādās negaidīti vienkārši, vispirms ieraugot tiešas sakarības

$$\sin \alpha = \frac{r}{R} \text{ un } \sin \alpha' = \frac{r'}{R}.$$

No fizikas zinām gaismas laušanas likumu

$$\frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha} = n.$$

Visas izteiksmes kopā dod meklēto rezultātu:

$$r' = r \cdot n.$$

Ko varam secināt?

Stiklam $n \approx 1.5$. No šejienes formāls secinājums – dobums izskatās palielināts.

Saprotams, ka $r < R$. Gadījumā pie $r = \frac{R}{n}$ atrodam, ka $r' = R$, t.i. dobuma kontūra

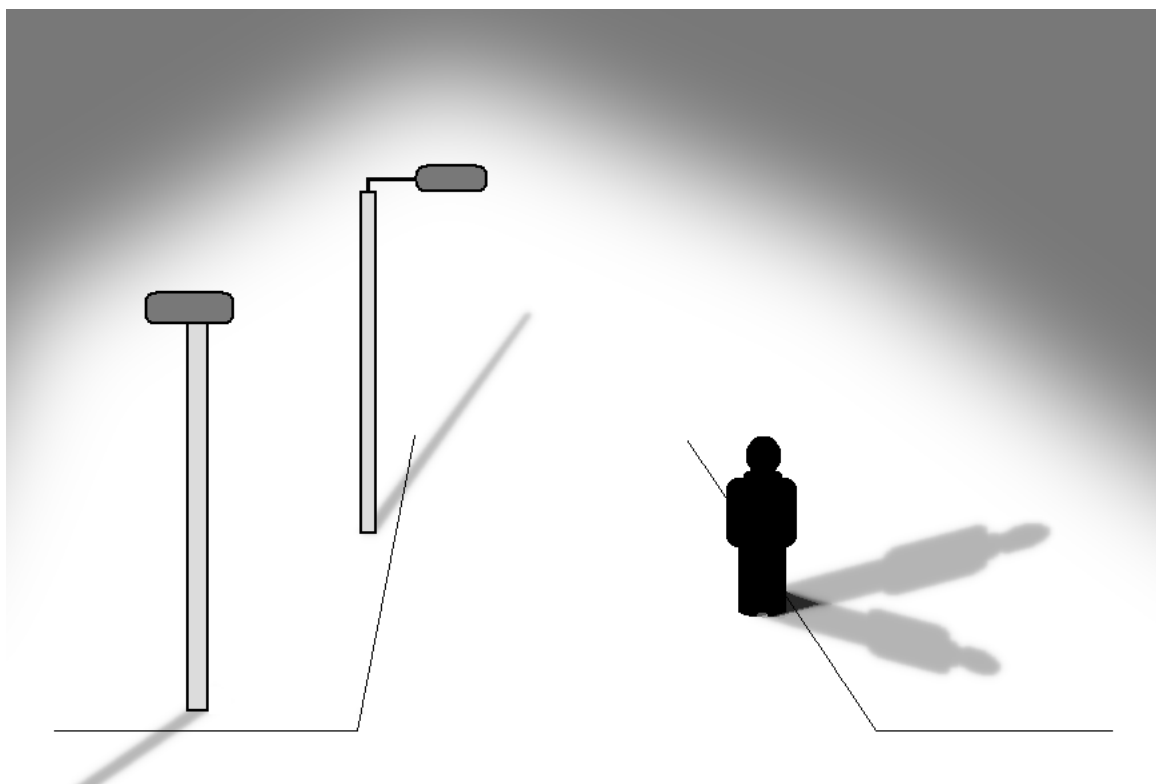
saplūst ar cilindra malu. Neliela papildus analīze rāda, ka, savukārt, pie $r > \frac{R}{n}$ dobuma kontūras gaismas stars nemaz neiznāk ārpusē – notiek t.s. totālā iekšējā atstarošānās.

Galvenais secinājums – pie $r \geq \frac{R}{n}$ cilindra dobums no malas nav redzams.

Stikla gadījumā tas būtu pie $r \geq \frac{2}{3}R$, kas nozīmē, ka tādiem priekšmetiem kā glāzes vai pudeles to iekšējā sieniņa, skatoties no malas, nemaz nav ieraugāma!

Krāsainas ēnas

Visticamāk katram ziemas vakarā ir gadījies būt vietā, kuru apspīd dažādu krāsu ielu laternas, tipiski iedzeltena un iezilgana. Parasti tas varētu būt ielu krustojuma tuvumā, kad vienas ielas apgaismojumam lietotas nātrija spuldzes, bet otrai dzīvsudraba spuldzes. Uzreiz var pamanīt, ka gājējs met vismaz divas ēnas, sk. att. KE1:



Att. KE1. Shematisks zīmējums: no divām laternām gājējs met divas ēnas. Ziemas vakarā, ja laternu spuldzes ir dažādās krāsās, redzams, ka arī ēnas ir dažādās krāsās. Kāpēc? Kādās?

Uzmanīgāk ieskatoties, pamanām ļoti vienkāršu, bet tomēr skaistu efektu – ēnas ir dažādās krāsās!

Tad nu jautājumi:

- Kāpēc ēnas ir krāsainas?
- Kāpēc ziemas vakars?
- Kas tās ir par krāsām?

Saule caur lapotni

Skaidrā laikā, vērojot saules apspīdētas koku lapotnes ēnu, bez jau sagaidāmās robotās kontūras, ēnas iekšpusē redzam arī daudzus vairāk vai mazāk izteiktus gaišus aplīšus. Piemēram, attēlā SL1, kurā lapotnes ēna radusies rudens rīta pusē uz mājas sienas:



Att. SL1. Koku lapotnes ēna uz mājas sienas.
Redzami daudzi vairāk vai mazāk izteikti gaiši aplīši.

Līdzīga aina vērojama arī tās pašas sienas stūra rajonā (att. SL2). Turklāt tālāk ap stūri redzama arī cita ēka, uz kuras sienas no daudz lielāka atstatuma ēnu met arī daudz lielāki koki. Tomēr arī tur ir parādījušies proporcionāla izmēra gaišie aplīši.



Att. SL1. Koku lapotnes ēna uz mājas sienas stūra rajonā.
Ap stūri redzama vairākstāvu ēka, uz kuras sienas lielāka atstatuma lielāku koku ēnā arī novērojami proporcionāla izmēra gaišie aplīši.

Atliek vien pajautāt – kas ir šie aplīši un kāpēc tieši aplīši?

Komentāri, skaidrojumi, piezīmes

Maha joslas

Dabisko redzes sistēmu anatomiskie un funkcionalitātes pētījumi liecina, ka šādas sistēmas sastāv no liela daudzuma specifiski saistītu neironu, kur viena no pamatstruktūrām ir tādi acs tīklenei atbilstoši neironu slāņi, kuros viena slāņa neironi saņem informāciju no zināmas grupas iepriekšēja slāņa neironu. Šo grupu sauc par dotā neirona receptīvo lauku (http://en.wikipedia.org/wiki/Receptive_field).

Faktiski tiek novērota uz acs tīklenes veidotā attēla daudzpakāpju filtrēšana, kurā viena slāņa neironi summē no saviem receptīvajiem laukiem saņemtos signālus. Pie tam, šie signāli tiek summēti ar svāriem. Pie mūsu ilūzijas interesants ir gadījums, kad receptīvā lauka centrālās daļas signāliem ir pozitīvs svāris, bet perifērijas daļas signāliem negatīvs svāris.

Šo gadījumu tad arī ņemsim par pamatu Maha joslu un ar tām saistīto augstāk minēto fenomenu vienkāršam modelim.

Mūsu modeļa galvenā daļa ir nekas cits, kā viens lineārs telpiski invariants diskreto attēlu filtrs, kuru, kā zināms, realizē attēla un filtra piekārtotas svaru maskas konvolūcija:

$$F(k, l) = \sum_{i1 \leq i \leq i2, j1 \leq j \leq j2} f(k+i, l+j) \cdot w(i, j),$$

kur $f(k, l)$ ir dotā attēla spožuma funkcija rastra punktos (k, l) , $w(i, j)$ ir filtra svaru maskas vērtību matrica, kas indeksēta savā indeksu apgabalā $[i1, i2] \times [j1, j2]$, bet $F(k, l)$ ir rezultāta attēla spožuma funkcija rastra punktos (k, l) .

Tagad nepieciešams matricu $w(i, j)$ izvēlēties tā, lai pie dotā attēla spožuma funkcijas $f(k, l)$ funkcija $F(k, l)$ nodrošinātu mūsu uztveres iluzoro spožumu. T.i., lai matricas elementi būtu pozitīvi tajās attēla vietās, kas mums šķiet gaišākas, negatīvi tajās attēla vietās, kas mums šķiet tumšākas, bet vienādi ar nulli vietās, kurās iluzorās spožuma izmaiņas nav.

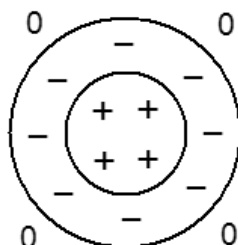
Tad dota attēla $f(k, l)$ perceptīvo spožumu modelēs vienkārša summa

$$f(k, l) + a F(k, l)$$

pie piemēroti izvēlēta koeficienta a .

Tā kā svaru maska atbilst augšminētajiem neironu receptīvo lauku svāriem, tad tās centrālos elementus ņemsim pozitīvus, bet pārējos negatīvus (dažādu apsvērumu dēļ maskas stūru rajonu elementi var būt 0, piemēram, pie apļa simetrijas). Svarīgs moments ir nodrošināt visu svaru summas vienādību ar 0, jo konstanta spožuma apgabalos mēs negribam pieļaut spožuma izmaiņas.

Shematiski tas nozīmē sekojošu maskas aizpildījumu (att. KomMJ1):



Att. KomMJ1. Ilūziju modelējošā filtra galvenās daļas svaru maskas vērtību zīmes.

Vispirms aplūkosim attēlam MJ2 radniecīgu faktiski 1D versiju, kas redzama attēlā KomMJ2. To tad arī apstrādāsim ar filtra 1D variantu:

$$w(i) = \begin{cases} 1 - 4\left(\frac{|i|}{R}\right)^2, & \text{ja } |i| \leq \frac{R}{2} \\ 16\left(\frac{|i|}{R} - \frac{1}{2}\right)\left(\frac{|i|}{R} - 1\right), & \text{pret.gad.} \end{cases},$$

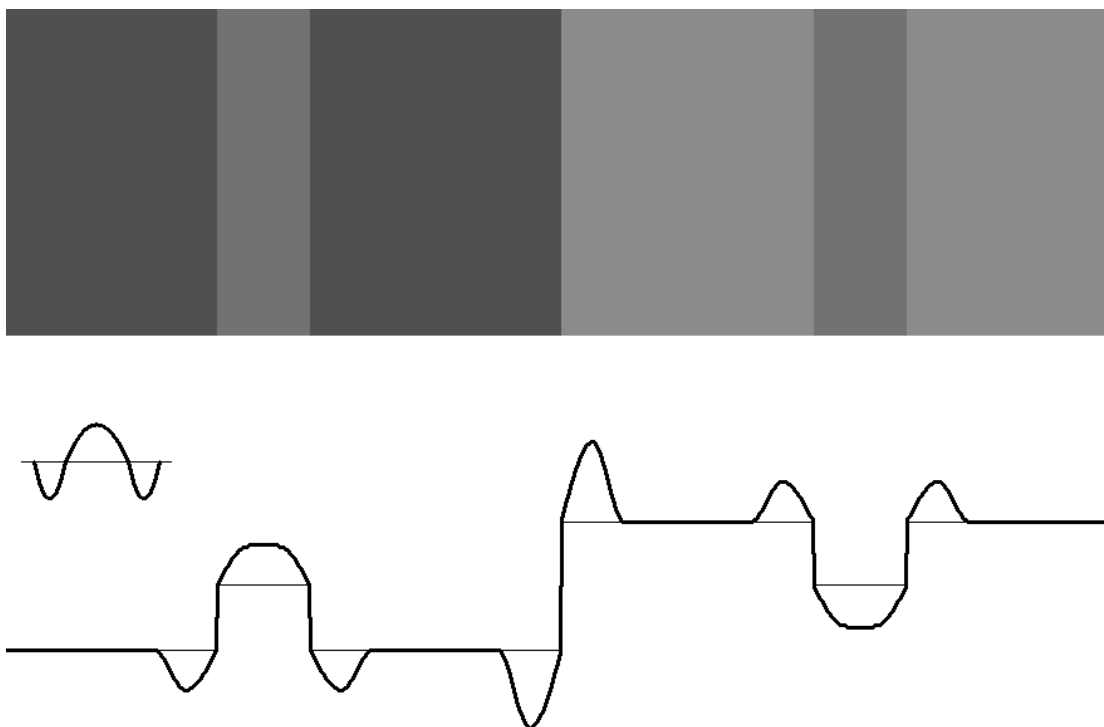
kur R ir maskas platuma parametrs, bet indeksa i vērtību diapazons ir $[-R, R]$.

Varētu ņemt arī pavisam vienkāršu masku

$$w(i) = \begin{cases} 1, & \text{ja } |i| \leq \frac{R}{2} \\ -1, & \text{pret.gad.} \end{cases},$$

tomēr nolēmām palikt pie iepriekšējās, no parabolu loku punktiem sastādītās maskas, kura, lai gan joprojām nav veidota no gludas funkcijas vērtībām, tomēr vismaz ir nepārtraukta un tādējādi reālistiskāka.

Sekojošā attēlā KomMJ2 redzams konkrēts šī filtra pielietošanas rezultāts pie $R = 50$ un $a = 0.0375$. Parametru R un a vērtības ir eksperimentāli piemeklētas, lai rezultāts būtu izteiksmīgāks, tomēr saprotams, ka principiālā aina nemainās arī pie mazāka a .



Att. KomMJ2. Klasisko Maha joslu attēls papildināts ar vienāda enerģētiskā spožuma taisnstūriem.
Apakšā: pa kreisi 1D filtra maskas grafiks, zem tā centrālās horizontāles enerģētiskā spožuma grafiks (tievā līnija), kas apvienots ar modelētā perceptīvā spožuma grafiku (treknā līnija).

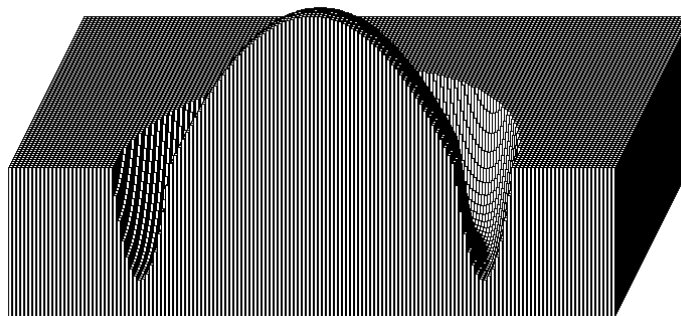
Aplūkotais 1D gadījums ir pietiekoši izteiksmīgs, tomēr eksperiments nav pilnīgs bez reāla 2D gadījuma. Tāpēc vēl aplūkosim attēlu MJ3, apstrādātu ar atbilstošu 2D filtru, kas arī būvēts no parabolām un papildus vēl ir apļa simetrisks:

$$w(i, j) = \begin{cases} 1 - \frac{2(i^2 + j^2)}{R^2}, & \text{ja } \sqrt{i^2 + j^2} \leq \frac{R}{\sqrt{2}} \\ 34.97 \left(\frac{\sqrt{i^2 + j^2}}{R} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{\sqrt{i^2 + j^2}}{R} - 1 \right), & \text{ja } \frac{R}{\sqrt{2}} < \sqrt{i^2 + j^2} \leq R, \\ 0, & \text{citādi} \end{cases}$$

kur indeksu pāra (i, j) vērtību diapazons ir $[-R, R] \times [-R, R]$.

Attēlā KomMJ3 redzams šī 2D filtra maskas $w(i, j)$ griezuma grafiks.

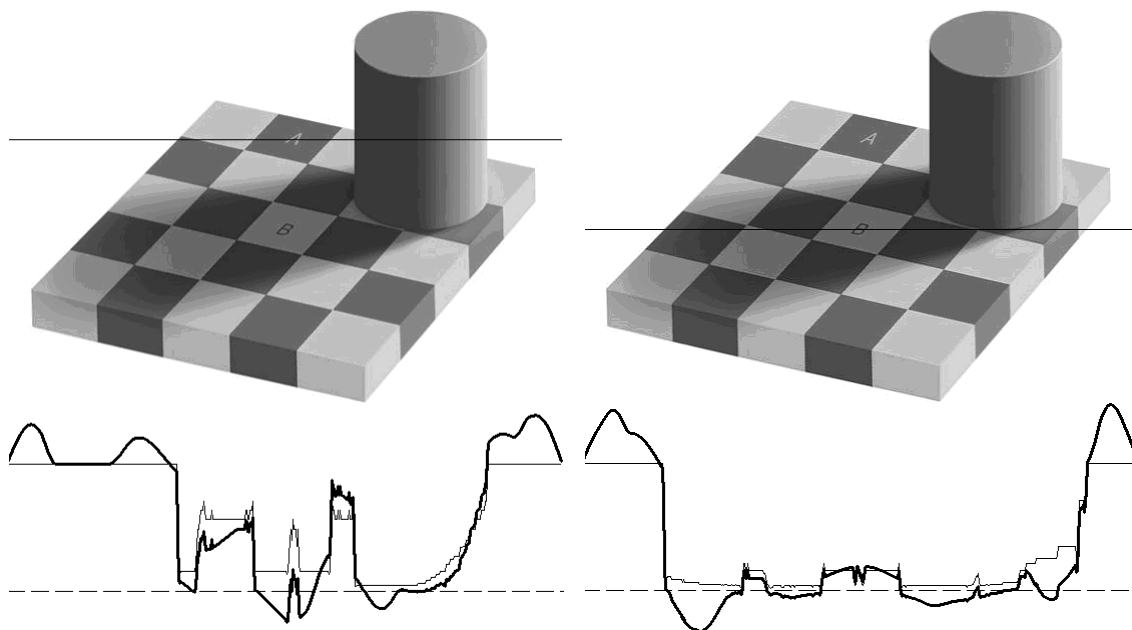
Piezīmēsim, ka mums likās pareizi tā izvēlēties abu filtru maskas, lai pozitīvo un negatīvo svaru apgabali būtu vienāda izmēra, t.i. vienādi pēc garuma (1D gadījumā) un laukuma (2D gadījumā).



Att. KomMJ3. 2D filtra maskas grafika griezums.

Savukārt, attēlā KomMJ4 redzams izvēlētā 2D filtra pielietošanas rezultāts attēlam MJ3 pie $R = 50$ un $a = 0.0006$.

Gan oriģinālā, gan perceptīvā spožuma grafiki ir parādīti uz caur apgabalu A un B centriem ejošām horizontālēm. Labi saskatāms, ka abu apgabalu oriģinālie enerģētiskie spožumi ir vienādi, savukārt apgabala A perceptīvais spožums ir būtiski samazinājies.



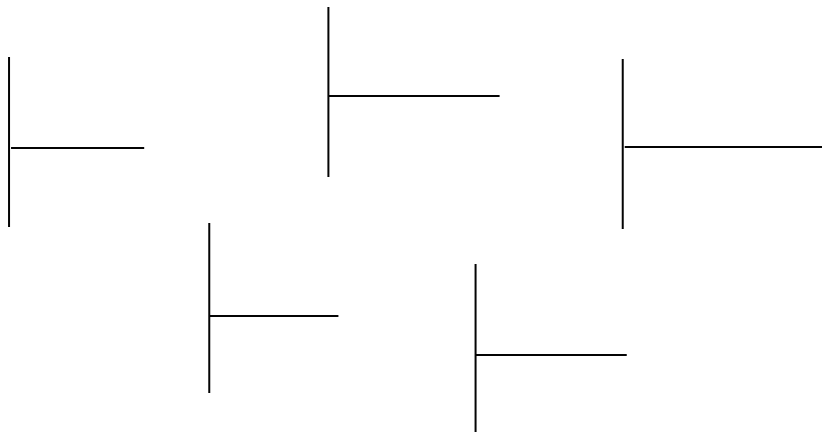
Att. KomMJ4. Vispārzināmā attēla vienādā enerģētiskā spožuma apgabalā A un B salīdzināšana.

Apakšā atzīmēto horizontālu apvienotie spožuma grafiki – enerģētiskā spožuma grafiki (tievās līnijas) un modelētā perceptīvā spožuma grafiki (treknās līnijas). Pārtrauktā līnija – enerģētiskā spožuma nulles līmenis.

Perpendikulārie nogriežņi

Šo rindu autoram nezināmu iemeslu dēļ aplūkojamā nogriežņu konfigurācija izsauc spēcīgu vertikālā nogriežņa pagarinājuma ilūziju. To pasaulē sauc par *vertical-horizontal illusion* (http://en.wikipedia.org/wiki/Vertical%E2%80%93horizontal_illusion).

Tiek teikts, ka \perp konfigurācijā šī ilūzija ir visspēcīgākā. Piemēram, pagriežot konfigurāciju par 90° , garumu dažādības ilūzija praktiski pazūd (att. KomPN1):



Att. KomPN1. Par 90° pagriezti perpendikulāro nogriežņu pāri – vienādo garumu dažādības ilūzija ir vājinājusies vai pat izzudusi.

Kolēģis Mārtiņš Opmanis izsaka domu:

"Vai perpendikula efekta viens no izskaidrojumiem nav tas, ka divas acis ir novietotas horizontālā un nevis vertikālā līnijā? Tad, kad es apšū pakausi, vienmēr atceros, ka "augstāks-zemāks" nozīmē mana redze nav perfekti organizēta."

Divu acu apsvērumi ir atrodami arī Internetā, tomēr, nez vai tas ir vietā, jo liekas, ka aplūkojamais efekts saglabājas, pat skatoties ar vienu aci.

Stieplu kubiņš

Te komentārs varētu būt īss – ja reiz kaut ko ņemam otrādi, tad otrādi arī sanāk!

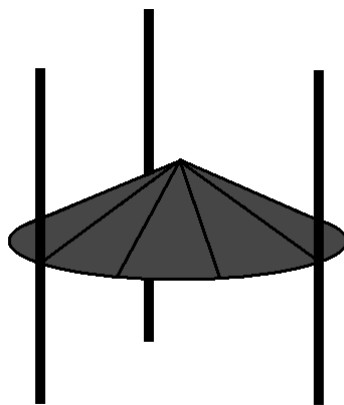
Tomēr, tā kā ne visi lasītāji paši gribēs šādu stieplu kubiņu izgatavot, tad jāpaskaidro, kas tur ir redzams – kubiņš šķietami rotē kātiņa virpināšanai pretējā virzienā.

Saprotams, ka, raugoties ar vienu aci, faktiski redzam Nekera kuba šķautņu konfigurāciju ar visu tās telpisko neviennozīmīgumu. Sevišķi, pret gaišu fonu, kad stieplu projekciju krustojumi ir praktiski nemanāmi.

Savukārt, rotācijas sakarā ir skaidrs, ka praktiski ortogonālā projekcijā bez specifiskām objekta detaļām kustības virzienu nosaka vien skatītāja iztēlotā telpiskā konfigurācija. Mūsu gadījumā rodas virpināšanai pretēja kustība, kas rada negaidītas izjūtas veicot eksperimentu pirmo reizi.

Ir arī nekustīgas konstrukcijas, kuru telpiski pretēja uztvere izsauc to kustības ilūziju pie skatītāja pārvietošanās. Spilgts piemērs tam ir iedobtas maskas ilūzija, kad sejas elementi ir nevis izvirzīti uz āru, bet gan iedobti maskas dziļumā – *hollow-face illusion* (http://en.wikipedia.org/wiki/Hollow-Face_illusion). Arī daudziem zināmais pūķis ir no šīs kategorijas (<http://www.moillusions.com/2006/03/dragon-illusion.html>).

Interesanti, ka šādas ilūzijas var novērot arī dabā. Pirms daudziem gadiem šī krājuma autors bieži brauca ar autobusu pa veco Bauskas šoseju gar Rāmavas lauksaimniecības lietu teritoriju (mūsdienās tā ir pārbūvēta un tur ir iekārtota lauksaimniecības tehnikas tirgotava). Lūk, šīs teritorijas stūrī bija ierīkota nojume ar uz trim speciāliem balstiem dažādos augstumos regulējamu jumtu – sekojošā zīmējumā att. KomSK1 parādīta šādas nojumes skice:



Att. KomSK1. Nojume ar uz trim speciāliem balstiem dažādos augstumos regulējamu jumtu.

Savukārt, nākošajā attēlā KomSK2 šī nojume redzama ievietota reālās teritorijas mūsdienu panorāmā, bet pēc atmiņas ļoti aptuveni vecajā vietā.

Un reiz autors kārtējā braucienā pievērs skatu nojumei un pārsteigumā nevar attapties vairākas sekundes – stingri zemē iebūvētā konstrukcija rotē! Domājams, ka lasītājs pats saprot, kāpēc tā notika...



Att. KomSK2. Senās regulējamā jumta nojumes skice
ievietota reālās teritorijas mūsdienu panorāmā.

Stereoredze

Telpiskās redzes pamatzudevums ir nodrošināt efektīvu ikdienas orientēšanos apkārtējā vidē un precīzas manipulācijas ar priekšmetiem. Mums telpiskuma izjūtu nodrošina binokulārā stereoredze. Savukārt redzamo objektu dubultošanās ir neizbēgams ģeometrisks blakusefekts, kura pamatā ir abās acīs projicēto attēlu dažādība. Dubultošanās redzes sistēma regulē ar kontrolētu acu konvergenci, tādējādi mehāniski pastiprinot telpiskuma izjūtu.

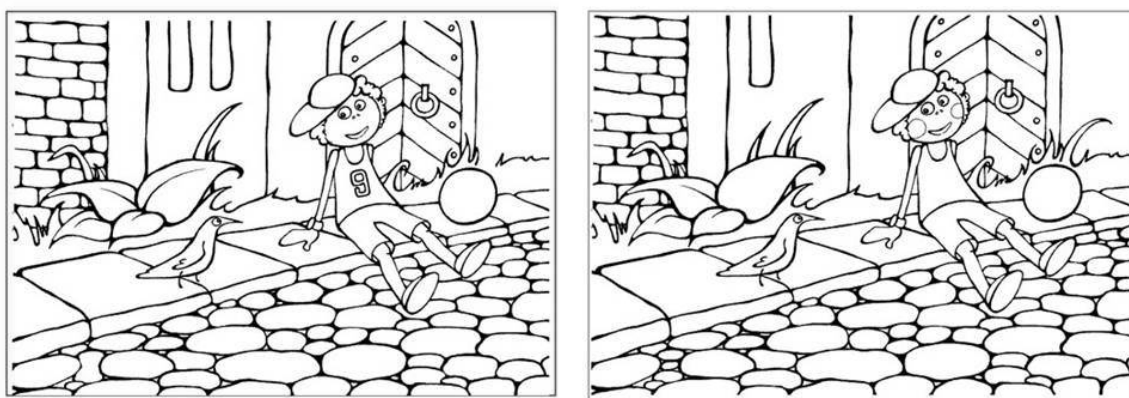
Lai telpiskuma izjūta rastos, nav svarīgs acīs projicēto attēlu reālais avots. Redzējām, ka ainas objektu dabisko projekciju vietā var ņemt jau gatavas ainas fotogrāfijas. Šīm fotogrāfijām, pirmkārt, jābūt uzņemtām no dažādiem telpas punktiem tā, lai tās atbilstu abās acīs projicētajiem atšķirīgajiem attēliem. Un, otrkārt, tās adekvāti jāprojicē uz atbilstošo acu tīklenēm.

Fotogrāfiju pāri, kas atbilst abās acīs projicētajiem attēliem sauc par stereopāri. Lai vērojot stereopāri rastos telpiskuma izjūta, jāpielieto skatīšanās tehnika, kas nodrošina stereopāra attēlu adekvātu projicēšanu uz atbilstošo acu tīklenēm. Vispār, var tikt veidoti ne tikai attēlu pāri, bet arī sarežģītāki attēlu kompleksi, ko saucam par stereoattēliem. Stereoattēlu lietas samērā detalizēti ir iztirzātas šo rindu autora lekcijā, kuru 2010. gadā organizēja Latvijas Universitātes Datorikas fakultātes Studentu padome. Lekcijas prezentācijas slaidi pievienoti Pielikumā 1.

Tā kā stereoattēli ir tehnoloģiska procesa rezultāts, tad ir saprotams, ka tiem atrodas arī lietišķi pielietojumi dažādos specifiskos tehniskos nolūkos. Piemēram, ir lasīts par banknošu viltojumu atklāšanu ar stereoskopa palīdzību, kad vienai acij rāda īstu banknoti, bet otrai varbūtēji viltotu – tad kļūdaina zīmējuma vietās parādās reljefs.

Šķiet gan, ka minētā banknošu salīdzināšanas metode tomēr mūsdienās varētu būt novecojusi no viltojumu atklāšanas viedokļa. Tomēr tās nenopietns analogs izrādās pavisam noderīgs izklaides uzdevumos par atšķirību atrašanu gandrīz vienādos zīmējumos.

Elegantu šāda uzdevuma piemēru ir izdevies piedāvāt vietnē “Kristīgā mācība” http://kristigamaciba.wordpress.com/berniem/speles/clip_image002-4/. Sekojošajā attēlā redzamajos zīmējumos ir prasīts atrast desmit atšķirības – att. KomSR1:



Att. KomSR1. Redzamajos zīmējumos atrast desmit atšķirības!

Meklējot atšķirības, varam izmantot vai nu stereopāru skatīšanās iemaņas, raugoties ar neapbruņotām acīm, vai kādu stereoskopu. Atšķirību vietās tad katrai acij parādās savs attēls. Interesanti, ka tādā gadījumā mūsu smadzenes attēlus cenšas neapvienot, bet gan pamīšus

maina uzmanību no viena uz otru, tā radot īpatnējas mirgošanas efektu. Tieši šis efekts norāda uz atšķirībām zīmējumos.

Šī komentāra beigās ir pievienots ar datoru atrasts atšķirību attēls KomSR6. Tā iegūšana nebija gluži triviāla, jo patiesībā att. KomSR1 salīdzināmo zīmējumu kopējās daļas nemaz nav absolūti identiskas.

Cits stereoattēlu lietojuma piemērs, ar ko mums iznācis saskarties, attiecas uz ainavu arhitektūru. Tā, 2006. gadā tika izstrādāts bakalaura darbs „ĢIS datu izmantošana 3d ainavas attēlošanai reālā laikā” (LU Fizikas un matemātikas fakultāte, Datorikas nodaļa, autors Raimonds Pūcis, vadītājs – šo rindu autors). Darbs ir īpaši interesants ar to, ka ainavas modeļa izejas datus darba autors ieguva paša veiktā aerofotografēšanas procesā.

Viegli saprast, ka, ja aerofotokamera lidojuma laikā nemaina augstumu un orientāciju attiecībā pret zemi, tad, pietiekoši bieži fotografējot, faktiski katrs pēc kārtas ņemtu fotouzņēmumu pāris ir stereopāris. Uz to pamata tika radīts zemes reljefa digitālais augstuma modelis, saistot to ar atsevišķu objektu reāliem augstuma datiem. Sekojošais att. KomSR2 sniedz viena šāda stereopāra piemēru, kas izveidots t.s. anaglifu tehnikā, kad kreisās acs attēls ir sarkans, labās acs attēls zaļi zils, un abi attēli savietoti vienā. Telpiskuma iegūšanai jāskatās caur brillēm ar attiecīgo krāsu stikliem (sk. lekciju Pielikumā 1, vai, piemēram, http://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D).



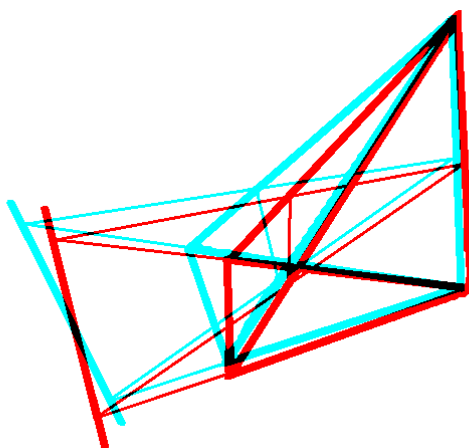
Att. KomSR2. Anaglifu stereoattēls, kas uz aerofoto pamata radīts pie golfa laukuma projektēšanas. Par anaglifu tehniku skatīt lekciju Pielikumā 1, vai, piemēram, http://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D.

Šķiet, pirmo reizi ar anaglifu stereopāriem šo rindu autors iepazinās 1960-to gadu sākumā, kad ģeometrijas stundas laikā bija izdevība izpētīt veselu stereometrijas uzdevumu krājumu ar ilustrācijām anaglifu tehnikā. Stereometrijas sakarā vēl saskare bija bakalaura

darba recenzēšana 2010. gadā – Aleksandrs Zavaļņijs, "Datortehnoloģiju izmantošana anaglifisku attēlu veidošanā mācību programmatūras izgatavošanai", LU, Rīga, 2010.

Bakalaura darba autors bija izstrādājis gan attiecīgu datorprogrammu, gan pacenties kaut kādā mērā apzināt skolu sabiedrības attieksmi pret šo specifisko jautājumu. Sabiedrības attieksme bijusi skeptiska, kas mūsaprāt ir pilnīgi saprotams, jo anaglifu stereoattēlu vērošana kā tāda nemaz nav īsti vienkārša, nemaz nerunājot, ka pats stereometrijas priekšmets, visticamāk, neizsauc publikas entuziasmu. Arī mēs sliecamies pievienoties skepsei, gan ne tehnisku un intereses iemeslu dēļ – daudz vērtīgākas mums šķiet abstraktas telpiskas iztēles iemaņas pretstatā mēģinājumiem izpratni balstīt uz tehnoloģiskām ilustrācijām.

Interesanti, ka Internetā neizdevās atrast nevienu stereometrijas didaktikas nolūkiem paredzētu šāda rakstura ilustrāciju. Tāpēc vienu tādas ilustrācijas piemēru izgatavojām paši, att. KomSR3:



Att. KomSR3. Anaglifu tehnikā veidota 3D ilustrācija stereometrijas uzdevumam par piramīdas šķēlumu ar plakni.

Cilvēka redze, tāpat kā citas maņas, joprojām kalpo arī kā lielā mērā nepārspēts instruments nolūkos, kas ir ārpus ikdienišķās skatīšanās. Turklāt ar ierīcēm, kas redzes iespējas pastiprina – lupas, teleskopi, mikroskopi, periskopi. Var pastiprināt arī telpiskuma izjūtu, piemēram, to panāk prizmatiskais binoklis (<http://en.wikipedia.org/wiki/Binoculars>), kura objektīvu savstarpējais attālums ir konstruēts lielāks par attālumu starp okulāriem (skatītāja acīm), att. KomSR4:



Att. KomSR4. Prizmatiskais binoklis, kura objektīvu savstarpējais attālums konstruktīvi ir lielāks par attālumu starp okulāriem, tādējādi pastiprinot skatītāja telpiskuma izjūtu.

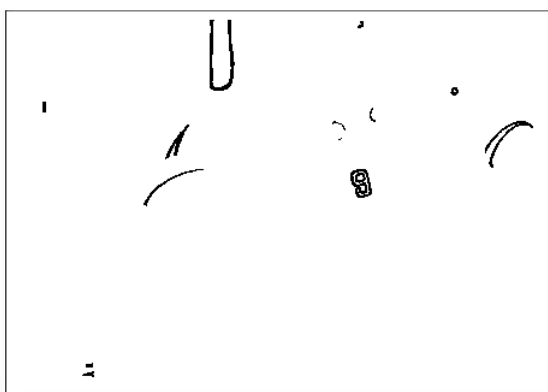
Ļoti interesants ir prizmatiskā binokļa un periskopa apvienojums, kurš galvenokārt tiek lietots militārām vajadzībām (<http://en.wikipedia.org/wiki/Periscope>) un nodrošina gan telpiskuma izjūtas pastiprinājumu, gan skatīšanos no aizsega, att. KomSR5 (pa kreisi).

Lai gan mikroskopi pēc savas būtības ir monokulāri instrumenti, tomēr tos izgatavo arī binokulāros variantos (http://en.wikipedia.org/wiki/Stereo_microscope). Viens iemesls ir dot iespēju vienādi noslogot abas skatītāja acis. Tomēr līdz zināmam palielinājumam ir iespējams katrai acij rādīt attēlus no dažādām mikropozīcijām, tā nodrošinot arī stereoredzi, att. KomSR5 (pa labi).



Att. KomSR5. Binokulārais periskops (pa kreisi), binokulārais (stereo) mikroskops (pa labi).

Un nobeigumā augstāk solītais atšķirību attēls KomSR1 redzamajos zīmējumos. Cik būtisku atšķirību tad ir – desmit vai vienpadsmit?



Att. KomSR6. Ar datoru atrastās atšķirības att. KomSR1 redzamajos zīmējumos.

Krāsu uztvere

Pamatnodaļā tika izcelti sekojoši momenti.

- Dažu spektra krāsu starojumu summa atrodas spektrā starp šīm krāsām, bet dažu spektra krāsu starojumu summa nemaz neatrodas spektrā. Piemēram, spektra zaļā un sarkanā starojumu summa ir dzeltena un spektrā atrodas starp sarkano un zaļo starojumu. Savukārt, zilā un dzeltenā starojumu summa ir balta, kas nav spektrā. Tāpat spektrā nav arī zilā un sarkanā starojumu summas.
- Īpaši uzsvērts, ka runa ir par gaismas starojumu aditīviem kombinējumiem, nevis krāsvielu maisījumiem.
- Hromatiski krāsotās RGB-kuba virsotnes ir cikliski sakārtojamas ap RGB-kuba W virsotni secībā R, Y, G, C, B, M, kas, izņemot madžentu, atbilst spektra krāsu secībai.
- Lasītājs tika aicināts uzrādīt vēl citus krāsu metamēru piemērus.
- Novērotā pēckrāsu efekta izskaidrojums ar formāla krāsu uztveres modeļa palīdzību.

Pārskaitītie momenti, izņemot pēckrāsu efektu, ir detalizēti iztirzāti pievienotajās lekcijās par krāsu uztveri (Pielikums 2) un krāsu reprodukciju (Pielikums 3). Tāpēc te apskatīsim pašas fundamentālākās lietas, kas tieši attiecas uz šiem momentiem.

Krāsu starojumi

Tradicionālais gaismas spektra krāsu lineārais zīmējums ir adekvāts tam, ka, abstrahējoties no konkrētā starojuma intensitātes, elektromagnētisko starojumu primāri raksturo tieši viens tā parametrs – izplatīšanās viļņu garums. Tas ir fizikāli nozīmīgs, jo atkarībā no tā mainās starojuma ietekme uz matērijas pamatstrukturām – elementārdaļiņām, atomiem, molekulām.

Tomēr pašu krāsu kopuma struktūra ir daudz sarežģītāka. Krāsas sajūta rodas skatītāja acī, kad speciālas tīklenes šūnas – vāļītes absorbē uz tām projicētā starojuma enerģiju, producējot atbilstošas intensitātes nervu impulsu virkni, kura pa nervu šķiedrām tiek nosūtīta uz tālākiem smadzeņu apgabaliem.

Nervu impulsu intensitāte, skalārs lielums, ko apzīmēsim ar α , ir atkarīga no starojuma enerģijas spektrālā blīvuma (īpašas funkcijas $E(\lambda)$, kas raksturo starojuma enerģiju dažādos spektra apgabalos) un no vāļītes *spektrālā jūtīguma* (īpašas funkcijas $S(\lambda)$, kas savukārt raksturo vāļītes spēju uztvert enerģiju dažādos spektra apgabalos): $\alpha = \alpha(E, S)$.

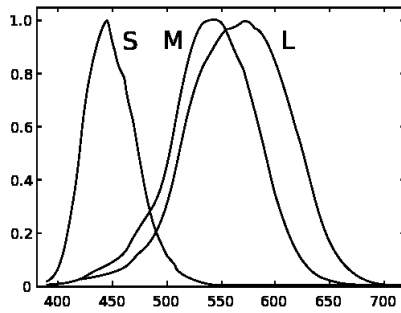
Vāļītes producētā signāla intensitāte ir izsakāma ar integrāli

$$\alpha(E, S) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} E(\lambda)S(\lambda)d\lambda,$$

kur λ_{\min} un λ_{\max} ir elektromagnētiskā starojuma gaismas diapazona robežu viļņu garumi.

Tieši spektra apgabalā (λ_{\min} , λ_{\max}) visu vāļīšu funkcijas $S(\lambda)$ ir atšķirīgas no nulles.

Pavisam ir trīs veidu vāļītes (http://en.wikipedia.org/wiki/Cone_cell), un tās savstarpēji atšķiras ar dažādām spektrālā jūtīguma funkcijām. Galvenās atšķirības ir jūtīguma maksimumu vietās (S, M un L tipa vāļītes), sk. att. KomKU1:



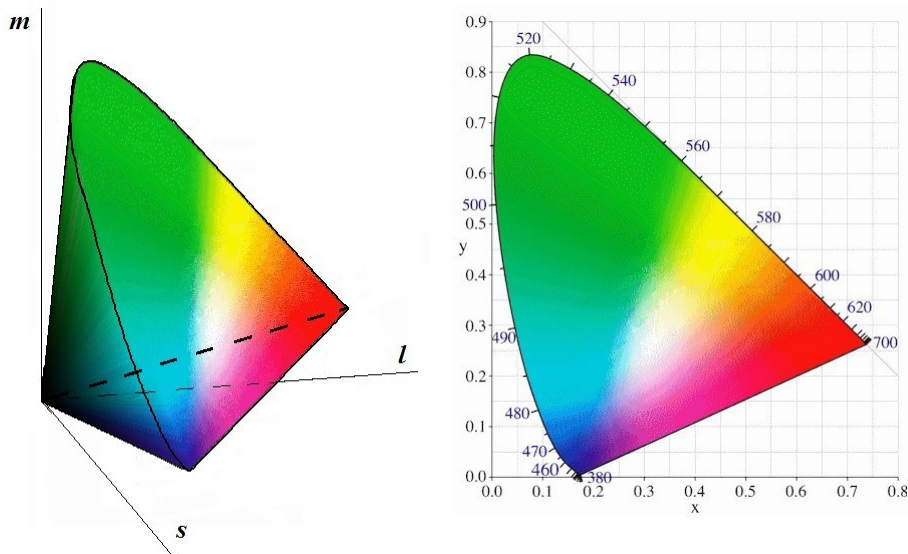
Att. KomKU1. Trīs veidu vālišu spektrālā jūtīguma normalizētu funkciju grafiki (no http://en.wikipedia.org/wiki/Cone_cell).

Konkrētas krāsas sajūtu smadzenes izstrādā nelieliem tīklenes apgabaliem. Tajos jāatrodas visu trīs tipu vālitēm. Tādējādi krāsas sajūtu raksturo visu triju tipu vālišu signālu kopums – formāli 3D punkts

$$\alpha(E) = (\alpha(E, S_S), \alpha(E, S_M), \alpha(E, S_L)),$$

kur S_S, S_M, S_L apzīmē attiecīgo tipu vālišu spektrālā jūtīguma funkcijas.

Visu iespējamo punktu $\alpha(E)$ kopums nav ne taisna līnija (kā krāsu spektrs), ne plakana struktūra, bet gan ir neregulāras formas 3D konuss vālišu tipiem atbilstošo mainīgo s, m, l telpā, att. KomKU2 pa kreisi. Te gan uzreiz jāpiezīmē, ka konusa krāsojums attēlā ir ilustratīvi nosacīts, jo datoru krāsu sintēzes RGB-tehnoloģija ļauj atveidot vien ierobežotu krāsu kopumu (Pielikums 3).



Att. KomKU2. Pa kreisi: nošķelts krāsu konuss vālišu tipiem atbilstošo mainīgo s, m, l telpā. Pa labi: hromatiskuma diagramma – šī konusa normalizēts šķēlums ar plakni $s + m + l = \text{const}$.

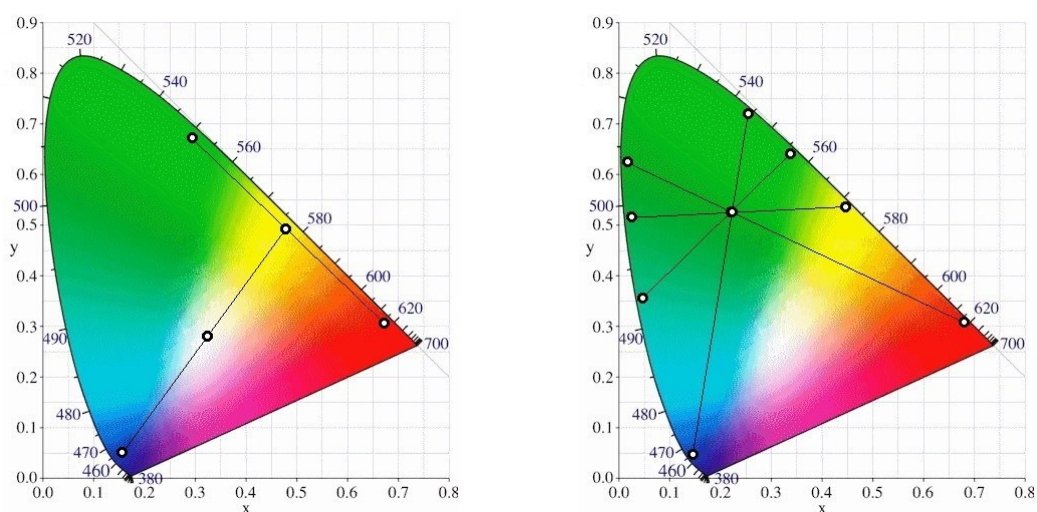
Lai normalizētu vālišu signālu intensitāti, krāsu konusu šķeļ ar plakni, kuras vienādojums ir $s + m + l = \text{const}$, tā iegūstot visu krāsu diagrammu ar precizitāti līdz to spožumam. Šo diagrammu sauc par hromatiskuma diagrammu – att. KomKU2 pa labi. Hromatiskuma diagramma ir spektra krāsu zīmējuma ģeometriskais analogs – spektra krāsas atrodas uz tās kontūras, bet tikai uz liektās daļas. Violetās un sarkanās krāsas starojumu summas atrodas uz precīza taisnes nogriežņa, kas kopā ar spektra krāsu liekto līniju noslēdz diagrammas kontūru.

Šī kontūras īpašība izskaidro to, ka hromatiski krāsotās RGB-kuba virsotnes ir cikliski sakārtojamas ap RGB-kuba W virsotni secībā R, Y, G, C, B, M , kas, izņemot madžentu, atbilst spektra krāsu secībai (Pielikums 2). Turpinot piezīmi par RGB-tehnoloģijas ierobežotību, precizēsim, ka hromatiskuma diagrammā RGB-krāsas aizņem aptuveni pusi tās laukuma un samērā tālu no tās kontūras (Pielikums 3).

Piekārtojot krāsu punktiem to rādusvektorus $\vec{\alpha}(E)$, redzam, ka piekārtojums $\vec{\alpha}(E)$ ir lineārs:

$$\vec{\alpha}(aE_1 + bE_2) = a\vec{\alpha}(E_1) + b\vec{\alpha}(E_2).$$

Tātad vienkārši summējot divus starojumus, to summas krāsas vektors atrodas pa vidu starp summēto starojumu krāsu vektoriem, un pa vidu starp abiem starojumu krāsas punktiem hromatiskuma diagrammā atrodas arī starojumu summas punkts. Attēlā KomKU3 pa kreisi parādīti zaļā un sarkanā, kā arī zilā un dzeltenā starojumu un to summu krāsu punkti:



Att. KomKU3. Pa kreisi: zaļā un sarkanā, kā arī zilā un dzeltenā starojumu un to summu krāsu punkti.

Pa labi: piemērs kā viens un tas pats zaļas krāsas tonis iegūstams summējot spektra krāsas no dažādiem pāriem.

Tādējādi izskaidrots, kāpēc, pretstatā spektra zaļā un sarkanā starojuma dzeltenās krāsas summai, kas spektrā ir starp sarkano un zaļo, zilā un dzeltenā starojuma summa ne tikai nav starp šīm krāsām, bet ir balta, kas vispār nav spektrā. Turklāt viegli redzēt, ka zili sarkano krāsu punkti patiešām nepieder spektra krāsu līnijai.

Krāsu metamerismu var mēģināt formāli skaidrot ar to, ka piekārtojums $\alpha(E)$ var starojumiem ar dažādām enerģijas spektrālā blīvuma funkcijām $E(\lambda)$ piekārtojot vienu un to pašu krāsas punktu – kaut vai tāpēc, ka visu funkciju kopa ir plašāka par visu reālo skaitļu kopu. Tomēr, aplūkojot hromatiskuma diagrammu, tas kļūst saturīgi saprotams. Attēlā KomKU3 pa labi parādīts, kā viens un tas pats zaļas krāsas tonis iegūstams summējot spektra krāsas no dažādiem pāriem – visu šo pāru starojumiem ir savstarpēji atšķirīgi enerģijas spektrālie blīvumi. Šādus vienkāršus metamēru piemērus var konstruēt neierobežotā vairumā.

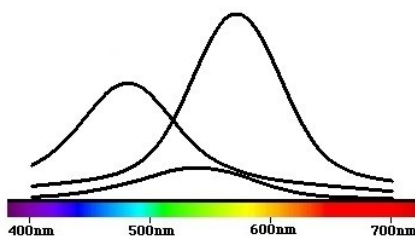
No hromatiskuma diagrammas varam novērtēt arī citu krāsu gaismu kombināciju summas, piemēram, violets + sarkans ir purpurs, zils + zaļš ir ciāns. Diagrammas zaļā zona ir samērā plaša, tāpēc kāda zaļā starojuma summa ar sarkano arī iznāk balta. Tāpat arī trīs monitora krāsas kopā dod baltu.

Krāsvielu maisījumi

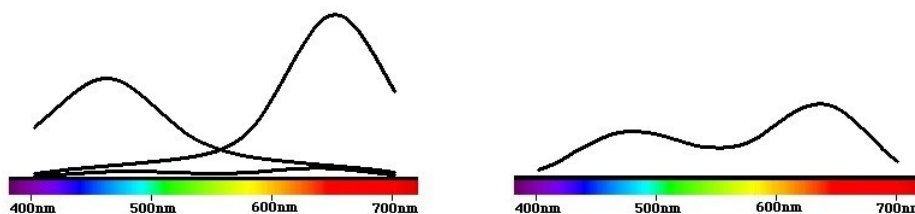
Īsi pieskarsimies arī krāsvielu maisījumiem. Krāsvielu daļiņām, ko sauc par *pigmentiem*, ir īpašība atstarot vai laist cauri tikai noteiktu spektra daļu. Proti, pigmentu raksturo tā spektrālās caurlaidības funkcija $Q(\lambda)$ ar vērtību apgabalu $[0, 1]$, un izejot caur pigmentu, starojums ar enerģijas spektrālo blīvumu $E(\lambda)$ tiek modificēts uz spektrālo blīvumu $E(\lambda) \cdot Q(\lambda)$.

Ejot caur diviem pigmentiem ar to spektrālās caurlaidības funkcijām $Q_1(\lambda)$ un $Q_2(\lambda)$, starojuma sākotnējais spektrālais blīvums tiek atkārtoti modificēts – $E(\lambda) \cdot Q_1(\lambda) \cdot Q_2(\lambda)$.

Normāli pigmentus aplūko baltā gaismā. Ideālā gadījumā vienādenerģētiskā gaismā ar enerģijas spektrālā blīvuma funkciju $W(\lambda) = \text{const}$. Tad pigmenta modificētais starojums ir proporcionāls pigmenta spektrālās caurlaidības funkcijai $Q(\lambda)$. Attēlā KomKU4 parādītas akvareļu ciāna un dzeltenas krāsas pigmentu shematiskas spektrālās caurlaidības funkcijas un to reizinājums. Savukārt attēlā KomKU5 tas pats redzams attiecībā uz zilu un sarkanu akvareļu krāsu.



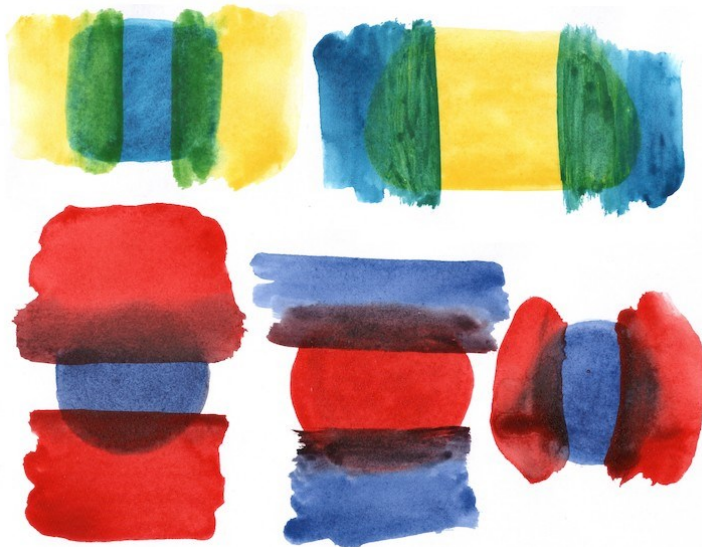
Att. KomKU4. Akvareļu ciāna un dzeltenas krāsas pigmentu shematiskas spektrālās caurlaidības funkcijas (augšējās līknes) un to reizinājums (apakšējā līkne).



Att. KomKU5. Akvareļu zilas un sarkanas krāsas pigmentu shematiskas spektrālās caurlaidības funkcijas un to reizinājums. Pa labi reizinājums palielināts desmitkārtīgi.

Konstruējot šīs shematiskās spektrālās caurlaidības funkcijas, esam mēģinājuši to vērtībās atspoguļot reālu pigmentu krāsu spožumu samēru, ko var nolasīt no ieskenēta attēla KomKU6.

Attēlā KomKU4 redzams, ka pie šādām pigmentu spektrālās caurlaidības funkcijām to reizinājums atbilst zaļam starojumam. Savukārt att. KomKU5 ilustrē, ka attiecīgo spektrālās caurlaidības funkciju reizinājums ir līdzīgs zila un sarkana starojumu vājas intensitātes summai, kas var izskatīties pēc reālā akvareļu krāsu komplektā novērotā tumša brūngani violeta toņa. Abas krāsu kombinācijas uz papīra redzamas ieskenētajā attēlā KomKU6:

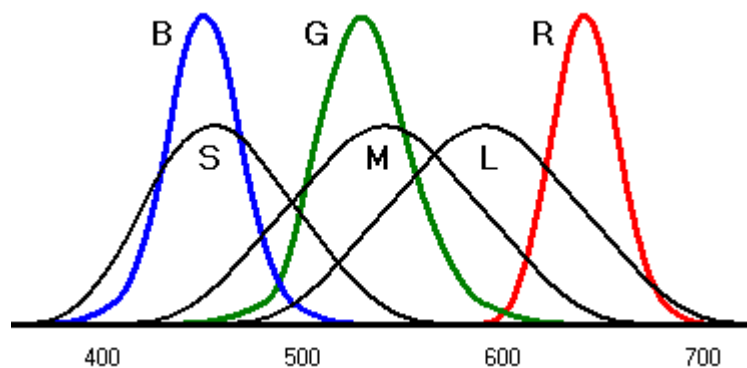


Att. KomKU6. Ciāna + dzeltenas un zilas + sarkanas akvareļu krāsu dažāda biezuma un kvalitātes klājumu kombinācijas uz papīra – ieskenēts attēls.

Pēckrāsu efekta modelis

Sadaļas noslēgumā piedāvājam novērotā pēckrāsu efekta skaidrojumu ar formāla krāsu uztveres matemātiska modeļa palīdzību. Eksperimentu modelēsim ar datora monitora krāsām, tomēr apzinoties, ka mums nav zināmas iesaistīto kvantitatīvo parametru reālās vērtības, bet cerot uz rezultātu pieņemamu kvalitatīvo atbilstību.

Vispirms ar skaitlisku kodu modelējam datora krāsu starojuma enerģijas spektrālā blīvuma funkcijas un acs tīklenes vāļišu spektrālā jūtīguma funkcijas. Attēlā KomKU7 parādīti to grafiki;



Att. KomKU7. Modelētās datora krāsu starojuma enerģijas spektrālā blīvuma funkcijas un skatītāja tīklenes vāļišu spektrālā jūtīguma funkcijas.

Apstākļos, kad mums ir maz zināms par šo funkciju reālo formu, izvēlējamies R , G , B funkciju un S , M , L funkciju grupu ietvaros ņemt vienādas to maksimālās vērtības.

Mērķis ir formalizēt vispārīgo atzinumu – krāsas sajūtu radošo tīklenes šūnu nogurums pie ilgstošas skatīšanās uz vienu un to pašu gaismas avotu izpaužas iztērētos šūnu resursos, kas vajadzīgi tieši šai starojuma krāsai. Pēc tam pie skatīšanās uz baltu fonu nogurušās šūnas spēj uztvert tikai to baltā starojuma daļu, kuras nav sākotnējā attēlā.

Modeļa būtība ir matemātisks apraksts starojuma un vāļītes mijiedarbībai pie skata ilgstošas turēšanas nekustīgi. Vāļīšu noguršana notiek procesā, kad, kā jau teikts, vāļītes absorbē uz tām projicētā starojuma enerģiju, producējot atbilstošas intensitātes nervu impulsu virkni. Šī producēšana ir gaismas enerģijas transformēšana nervu impulsos, un tai jātērē vāļītes bioķīmiski resursi, kuri noteiktā veidā tiek atjaunoti. Uzdevums tad ir formāli iztēloties šos procesus un kā tie varētu noritēt.

Tālāk rīkosimies sekojoši:

- vispirms formulēsīm konkrētus vispārējus apsvērumus,
- tad no tiem atvasināsim precīzas modeļa aksiomas,
- uz pēdējo pamata izstrādāsim modeļa skaitlisko risinājumu
- un ar to veiksīm reālus eksperimentus.

Vispārēji apsvērumi par starojuma un vāļītes mijiedarbību

VA0. Mūs interesē konkrētas vāļītes reālais jūtīgums, kas izveidojies pēc noteikta skatīšanās ilguma, kad tika producēts signāls no dota starojuma. Signāla producēšanas process tērē vāļītes resursus paralēli ar šo resursu atjaunošanu. Procesā parametri:

t – skatīšanās ilgums,

$E(\lambda)$ – skatītā starojuma enerģijas spektrālā blīvuma funkcija,

$S(\lambda)$ – sākotnējā spektrālā jūtīguma funkcija,

$\bar{S}(\lambda)$ – beigu spektrālā jūtīguma funkcija.

VA1. Izvairoties no modeļa komplicētības, pieņemam, ka vāļītes nogurums vienādi skar tās jūtīgumu visā viļņu garumu diapazonā un ir atkarīgs gan no producētā signāla intensitātes $\alpha(E, S)$, gan skatīšanās laika. Tādējādi nogurdinātas vāļītes spektrālā jūtīguma funkcija samazinās proporcionāli vienādi pie visiem viļņu garumiem: $\bar{S}(\lambda) = S(\lambda) \cdot q$. No λ neatkarīgo reizinātāju q sauksim par *produkcijas koeficientu*.

VA2. Jo stiprāks producētais signāls $\alpha(E, S)$, jo vairāk resursu tiek iztērēts un attiecīgi samazināts vāļītes spektrālais jūtīgums. No otras puses, jo vairāk vāļītei sākotnējo resursu, jo relatīvi mazāk resursu vajadzīgs dotas intensitātes signāla producēšanai, t.i., jo vāļītei vairāk resursu, jo tās produkcijas koeficients ir mazāk ietekmējams. Vāļītes resursu sākotnējais daudzums ir mērāms ar vāļītes producēto signālu pie spektrāli vienmērīga starojuma, proti, ar vāļītes reakciju uz vienības intensitātes vienādenerģētisko balto gaismu – $\alpha(1, S)$.

VA3. Pie fiksēta skatīšanās laika vāļītes produkcijas koeficients ir dažādās atkarībās no producētā signāla intensitātes $\alpha(E, S)$ un no vāļītes sākotnējā resursu daudzuma $\alpha(1, S)$ – viens lielums šo koeficientu samazina, otrs palielina. Tālāk vienkāršojot modeli, papildus pieņemam, ka produkcijas koeficients funkcionāli ir atkarīgs tieši no lielumu $\alpha(E, S)$ un $\alpha(1, S)$ attiecības, ko sauksim par vāļītes *signāla kvocientu*. Ar to mēs izsakām ideju par dažādu tipu vāļīšu funkcionēšanas viendabīgumu.

VA4. Pēckrāsu efekta pastāvēšana liek domāt, ka vāļītes resursu apjoms dinamiski mainās. Vāļītes resursu atjaunošanas mehānisms ieslēdzas ne uzreiz, bet gan resursu daudzumam tuvojoties noteiktam kritiskam minimuma līmenim, un tālāk darbojas paralēli ar resursu tērēšanu, esot līdzsvarā ar patēriņu, un vāļītes jūtīgums vairāk nemazinās. Tādējādi pie fiksēta skatīšanās ilguma produkcijas koeficients atkarībā no vāļītes producētā signāla ir monotoni dilstošs – no pamatvērtības 1, nenokrītot zem kāda minimuma.

VA5. Skatīšanās ilgums ir otrs faktors, no kura atkarīgs vāļītes resursu tēriņš. Pie maza ilguma resursus netiek paspēts būtiski patērēt, tāpēc produkcijas koeficients paliek liels.

Skatīšanās ilgumam pieaugot, produkcijas koeficients samazinās un arī nenokrīt zem kāda minimuma.

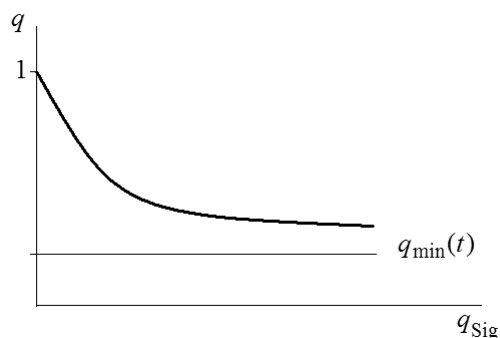
Starojuma un vāļītes mijiedarbības modeļa aksiomas

MA1. Saskaņā ar vispārējo apsvērumu VA1, skatīšanās perioda beigās vāļītes reālais jūtīgums ir $\bar{S}(\lambda) = S(\lambda) \cdot q(S, E, t)$, kur produkcijas koeficients $q(S, E, t)$ ir atkarīgs no vāļītes un starojuma parametriem un skatīšanās ilguma.

MA2. Saskaņā ar vispārējiem apsvērumiem VA2 un VA3, produkcijas koeficients ir atkarīgs no lielumu $\alpha(E, S)$ un $\alpha(1, S)$ attiecības – signāla kvocienta $q_{\text{Sig}}(E, S) = \frac{\alpha(E, S)}{\alpha(1, S)}$. Tas ļauj precizēt produkcijas koeficienta argumentus:

$$q(S, E, t) = q(q_{\text{Sig}}(E, S), t) = q(q_{\text{Sig}}, t).$$

MA3. Saskaņā ar vispārējo apsvērumu VA4, pie fiksēta skatīšanās ilguma t produkcijas koeficients q monotoni dilst atkarībā no vāļītes producētā signāla kvocienta q_{Sig} – no pamatvērtības 1, nenokrītot zem minimālās vērtības $q_{\text{min}}(t)$, kas ir atkarīga no skatīšanās ilguma, att. KomKU8:



Att. KomKU8. Vāļītes produkcijas koeficienta q atkarība no vāļītes signāla kvocienta q_{Sig} .

MA4. Saskaņā ar vispārējo apsvērumu VA5, produkcijas koeficients q monotoni dilst atkarībā no skatīšanās laika t , nenokrītot zem kāda minimuma $q_{\text{min}}(q_{\text{Sig}})$.

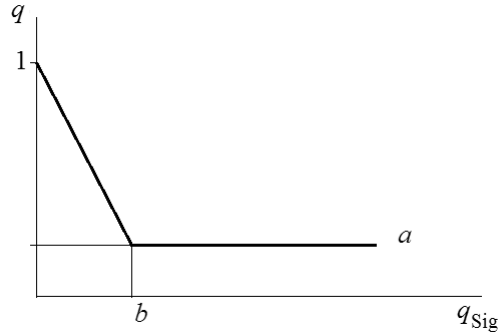
Starojuma un vāļītes mijiedarbības modeļa skaitliskais risinājums

Tā kā modeļa aksiomas MA3 un MA4 nosaka tikai produkcijas koeficienta funkcionālās atkarības vispārējo formu, būtiskais vēl nedefinētais moments ir produkcijas koeficienta konkrētā funkcija no abiem diviem argumentiem.

Par galveno uzskatām produkcijas koeficienta atkarību no pirmā argumenta – signāla kvocienta $q = q(q_{\text{Sig}})$, kad arguments t ir ar kādu fiksētu vērtību.

Att. KomKU8 redzamas divas funkcijas q zonas – kritums un stabilizācija. Ņemsim šo zonu visvienkāršākās realizācijas – lineāras aproksimācijas:

$$q(q_{\text{Sig}}) = \begin{cases} 1 - \frac{1-a}{b} \cdot q_{\text{Sig}}, & \text{ja } q_{\text{Sig}} \leq b \\ a, & \text{pret.gad.} \end{cases} \quad (\text{att. KomKU9):$$



Att. KomKU9. Vāļītes produkcijas koeficienta q konkretizētā atkarība no vāļītes signāla kvocienta q_{Sig} .

Par produkcijas koeficienta q otro argumentu faktiski varam ņemt stabilizācijas zonas parametru a – īsākam skatīšanās ilgumam tad atbilstu lielāka parametra a vērtība, un otrādi.

Līdz ar to tagad viss ir sagatavots izvēlēta starojuma pēckrāsas aprēķinam.

Ņemsim izvēlētu starojumu ar tā enerģijas spektrālā blīvuma funkciju $E(\lambda)$ un baltu pēckrāsas fona gaismas starojumu ar enerģijas spektrālā blīvuma funkciju $W(\lambda)$, un visu triju tipu vāļītēm ar to spektrālā jūtīguma funkcijām $S_S(\lambda)$, $S_M(\lambda)$, $S_L(\lambda)$ pakāpeniski aprēķināsim sekojošus lielumus:

- 1) $q_{\text{Sig } S} = \frac{\alpha(E, S_S)}{\alpha(1, S_S)}$, $q_{\text{Sig } M} = \frac{\alpha(E, S_M)}{\alpha(1, S_M)}$, $q_{\text{Sig } L} = \frac{\alpha(E, S_L)}{\alpha(1, S_L)}$,
- 2) $\bar{S}_S = S_S \cdot q(q_{\text{Sig } S})$, $\bar{S}_M = S_M \cdot q(q_{\text{Sig } M})$, $\bar{S}_L = S_L \cdot q(q_{\text{Sig } L})$,
- 3) izvēlētajam starojumam atbilstošo pēckrāsas punktu (s, m, l) krāsu konusa telpā:
 $s = \alpha(W, \bar{S}_S)$, $m = \alpha(W, \bar{S}_M)$, $l = \alpha(W, \bar{S}_L)$,
- 4) pēckrāsas RGB-punktu (r, g, b) .

Viegli redzēt, ka nogurušu vāļīšu signālu formēti krāsu punkti atbilst reālām krāsām, proti, pieder krāsu konusam.

Tiešām, nogurdinātas vāļītes producētais signāls raugoties uz baltu gaismu ir

$$\begin{aligned} \alpha(W, \bar{S}) &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} W(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} W(\lambda) \cdot (S(\lambda) \cdot q) d\lambda = \\ &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (W(\lambda) \cdot q) \cdot S(\lambda) d\lambda = \alpha(Wq, S). \end{aligned}$$

Tātad šis signāls ir tāds pat kā nenogurušai vāļītei pie attiecīgi modificēta uztveramā starojuma. Tas nozīmē, ka smadzenes var pat nezināt, ka signālus tām sūta nogurušas vāļītes, nevis vienkārši tiek skatīts cits starojums.

Lai vizualizētu modelētā pēckrāsu efekta rezultātu, aprēķināsim šim modificētajam starojumam (vāļīšu producētajam signālu vektoram (s, m, l)) atbilstošo RGB-punktu. Tas ļaus rezultātu salīdzināt ar reāli novēroto.

Meklēto RGB-punktu (r, g, b) atrodam standarta veidā no attiecīgas trīs lineāru vienādojumu sistēmas. Proti, zinot, ka vienas vāļītes producētais signāls pie šim punktam atbilstoša starojuma ir

$$\alpha(rR + gG + bB, S) = r\alpha(R, S) + g\alpha(G, S) + b\alpha(B, S),$$

kur R, G, B ir RGB-krāsu starojuma enerģijas spektrālā blīvuma funkcijas, varam rakstīt, ka aprēķinātajiem trim vāļīšu signāliem s, m, l ir spēkā sakarības, kas definē risināmo sistēmu:

$$\begin{cases} r\alpha(R, S_S) + g\alpha(G, S_S) + b\alpha(B, S_S) = s \\ r\alpha(R, S_M) + g\alpha(G, S_M) + b\alpha(B, S_M) = m \\ r\alpha(R, S_L) + g\alpha(G, S_L) + b\alpha(B, S_L) = l \end{cases}$$

Sistēmas matricas elementi ir mūsu modeļa konstantes, kas atbilst att. KomKU7 parādītajām funkcijām. Pie izvēlētajām funkciju vērtībām konkrētā sistēmas matrica ir sekojoša:

$$\begin{pmatrix} 0.0 & 6.3 & 20.7 \\ 2.0 & 25.1 & 4.2 \\ 11.8 & 13.6 & 0.1 \end{pmatrix}.$$

Eksperimenti ar starojuma un vāļītes mijiedarbības modeļa skaitlisko risinājumu

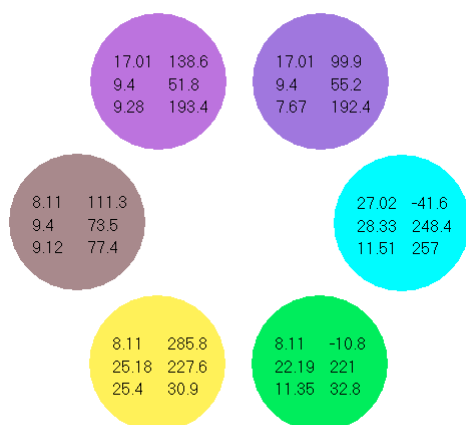
Lai izvēlētos vāļīšu produkcijas koeficienta funkcijas parametra b vērtību, pirmā ideja ir ņemt to visu signāla kvocienta q_{Sig} vērtību diapazona centra apgabalā. Pie mūsu att. KomKU7 attēlotajām spektrālajām funkcijām mūsu izvēlētajā krāsu apļa starojumu krāsām (RGB-kuba virsotņu hromatiskās krāsas, att. KU6) ir sekojošas signāla kvocienta vērtības:

	R	R+G	G	G+B	B	R+B
S	0.000	0.106	0.106	0.456	0.350	0.350
M	0.027	0.362	0.334	0.390	0.056	0.083
L	0.157	0.339	0.182	0.184	0.002	0.159

Redzam, ka šo krāsu starojumu signāla kvocienta vērtību diapazons ir 0.00 .. 0.456. Tāpēc par pamatu ņemam $b = 0.2$.

Savukārt parametra a sakarā mums nav nekāda īsta kvantitatīva kritērija. Vien novērojums, ka pēckrāsu efekts ir tik iespaidīgs, ka vāļīšu resursiem būtu jātiek tērētiem pietiekoši nopietni, vismaz vairāk par pusi. Tas liek minēt vērtību $a = 0.3$.

Jāatzīst, ka šīs a un b vērtības izrādās neticami veiksmīgas. Attēlā KomKU10 pa kreisi parādītais modeļa ietvaros aprēķinātās pēckrāsas, bet pa labi šo rindu autora novēroto pēckrāsu atveidojums:



Att. KomKU10. Pa kreisi: modeļa ietvaros aprēķinātās krāsu apļa (att. KU6) pēckrāsas. Pa labi: šo rindu autora novēroto pēckrāsu atveidojums. Modeļa krāsām kolonās doti arī to (s, m, l) un (r, g, b) lielumi (pēdējie bez gamma korekcijas).

Tomēr, pirmais ko pamanām no modeļa vienādojumu sistēmas iegūto pēckrāsu RGB koordinātām, ir tas, ka R, R+B un B pēckrāsu punkti atrodas ārpus RGB-kuba (lai gan, kā augstāk parādīts, tie ir reāli krāsu konusa punkti). R+B punkts atrodas nedaudz ārpus, bet R un B vairāk – redzamas gan negatīvas RGB-vektora R komponentes, gan par 255 lielākas R un B komponentes, kuras pie vizualizācijas tiek vienkārši aizstātas ar 0 vai 255.

Tas nozīmē, ka modelētā R pēckrāsa ir vairāk piesātināta ciāna virzienā, R+B pēckrāsa zaļā virzienā, bet B pēckrāsa patiesībā ir vairāk sarkanīga. Jādomā, ka tas būtiski nemazina modeļa doto pēckrāsu atbilstību novērotajām. Turklāt, īpaši precīzi te nevaram spriest, jo aprēķini tiek veikti ar modelētām spektrālajām funkcijām, kas visticamāk nav gluži tādas pašas kā attēlus veidojošās reālās funkcijas. Varam vēl tik piebilst, ka R pēckrāsa tiešām dažkārt ir izskatījies intensīvāka, nekā atveidots att. KomKU10 pa labi.

Mēģināsim arī izdibināt ciāna tumšās pēckrāsas cēloni. Raugoties uz mūsu spektrālo funkciju grafiku savstarpējo pārklāšanos (att. KomKU7), var saprast, ka no RGB pamatstarojumiem vāļītes visvairāk nogurdina G – zaļais. Savukārt no kombinētajiem G+B – ciāns. Visu sešu starojumu pēckrāsu summārie vāļīšu producētie signāli $s + m + l$ doti sekojošā tabulā:

R	R+G	G	G+B	B	R+B
66.86	34.08	35.69	26.62	58.69	41.64

Tabulas dati skaidri apliecina, ka visvājākais summārais signāls tiek producēts tieši ciāna pēckrāsai.

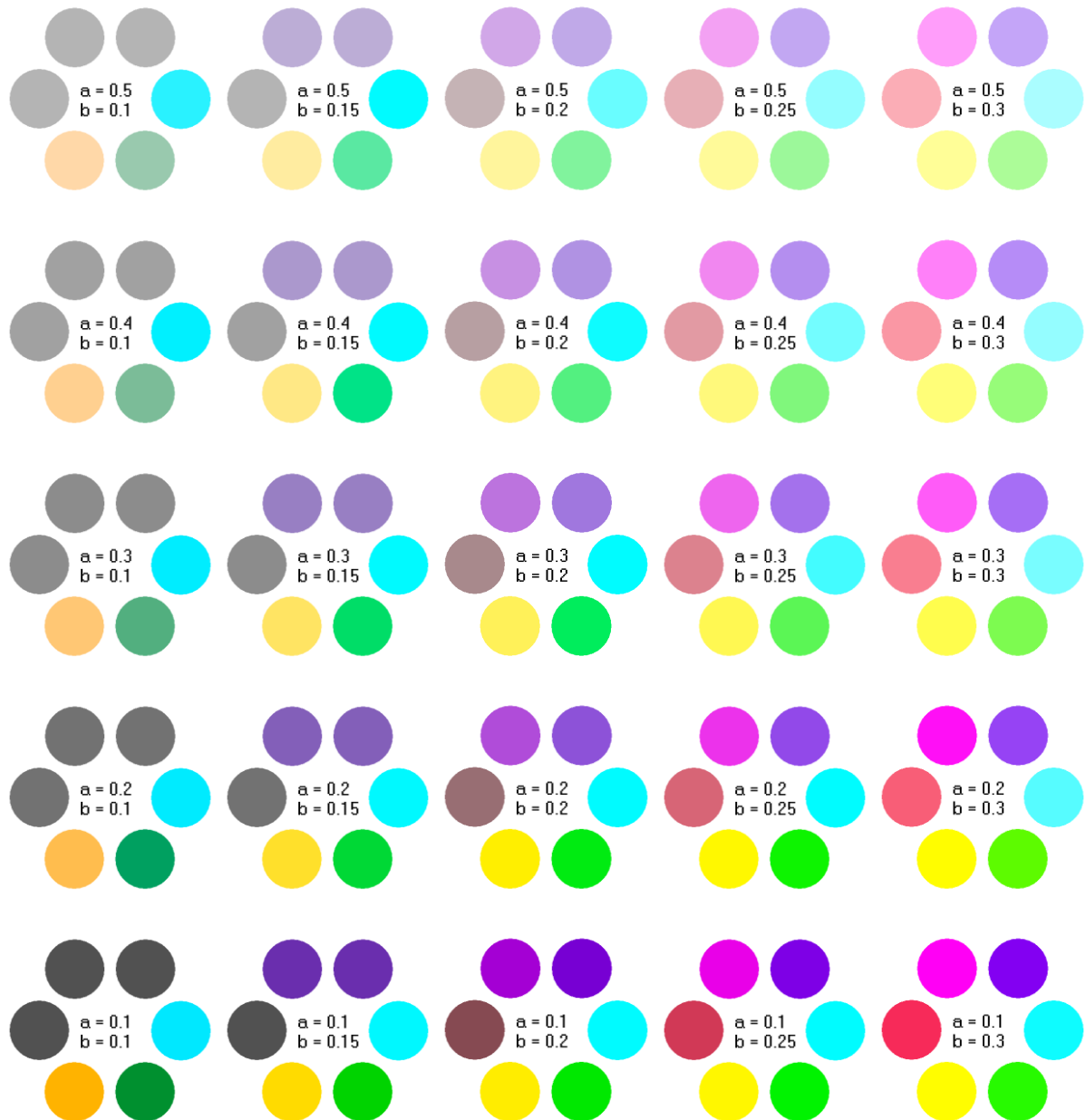
Varētu teikt, ka ciāna pēckrāsas tumšuma cēlonis ir G un B starojumu savstarpējais tuvums spektrā, salīdzinot ar starojuma R relatīvo atstatumu gan no pirmajiem diviem starojumiem, gan arī, kā redzams att. KomKU7, no vāļīšu jūtīguma līknēm.

Atgādinām, ka augšminētie atzinumi izteikti vērojot modeļa rezultātus pie vāļīšu produkcijas koeficienta funkcijas parametriem $a = 0.3$ un $b = 0.2$. Attēlā KomKU11 sniedzam sistemātisku aprēķināto pēckrāsu ilustrāciju kopumu šī parametru pāra apkārtnē.

Redzam kā mainās pēckrāsu spilgtums atkarībā no parametra a , par kuru tika teikts, ka tas var tikt uzlūkots kā zināms skatīšanās ilguma apgriezts mērs. Tikpat labi ar parametra a mainīšanu var modelēt arī pēckrāsas izbalēšanu.

Attēlā KomKU11 lasītājs varētu ieraudzīt sev atbilstošu pēckrāsu kombināciju pie citām parametru vērtībām, var novērtēt, cik veiksmīgs ir piedāvātais modelis.

Pavisam ieinteresēts lasītājs var vērtēt, cik lielā mērā pēckrāsa ir skatīto krāsu papildkrāsa, kāda ir citādas fona krāsas ietekme, kā arī daudz ko citu.



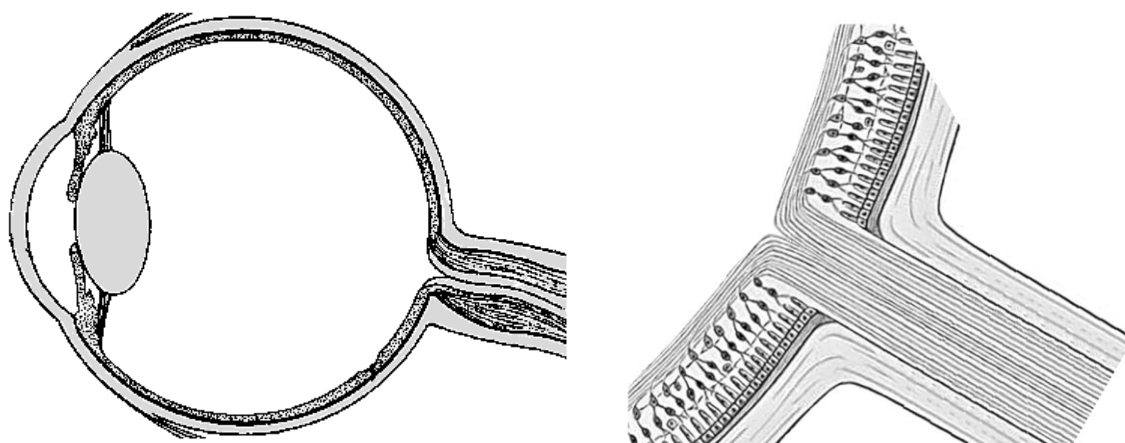
Att. KomKU11. Sistemātisks modeļa ietvaros aprēķināto pēckrāsu ilustrāciju kopums parametru pāra $a = 0.3$ un $b = 0.2$ apkārtņē.

Aklais plankums

Interesanta ir tieši mūsu acu anatomiskā īpašība, kuras dēļ vispār pastāv aklais plankums. Šī īpašība ir redzes nerva savienojumā ar acs tīkleni.

Cilvēka (un vispār mugurkaulnieku) acs tīklenē esošo redzes informāciju apstrādājošo neironu un to savienojumu slānis ir izvietots acs ābola iekšpusē dziļāk attiecībā pret gaismu uztverošo šūnu slāni. Apstrādātā redzes informācija tiek koncentrēta redzes nervā, caur kuru šī informācija nonāk tālākos smadzeņu redzes centros.

Tātad redzes nervam jābūt savienotam ar tīklenes neironiem, tiekot cauri gaismu uztverošo šūnu slānim. Daba šo savienojumu ir realizējusi vienkārši, izveidojot nelielu atveri acs ābola ārējā virsmā un gaismu uztverošo šūnu slānī, att. KomAP1:



Att. KomAP1. Redzes nerva savienojums ar aci.

Pa kreisi – vispārējs shematisks acs ābola un redzes nerva attēlojums.

Pa labi – palielināts shematisks skats uz redzes nerva savienojumu ar tīkleni.

Saprotams, ka šajā atverē gaismu uztverošajām šūnām nav vietas, līdz ar to aklā plankuma rašanās ir neizbēgama.

Tomēr ikdienā mēs šo mūsu redzes īpatnību nemaz nepamanām. Pirmkārt tāpēc, ka abu acu redzeslauki pārklājas un viens parasti kompensē otra iztrūkstošās daļas. Otrkārt, smadzenes pat cenšas šo redzes sistēmas trūkumu novērst, tukšo redzeslauka apgabalu aizpildot ar apkārtnes vizuālu interpolāciju.

Pēdējo varam novērot, piemēram, att. KomAP2, kurā vertikālā līnija paliek šķietami nepārtraukta pat pēc kreisā aplīša pazušanas:



Att. KomAP2. Testa attēls, kurā novērojams redzeslauka tukšā apgabala aizpildījums ar apkārtnes vizuālo interpolāciju – vertikālā līnija paliek šķietami nepārtraukta pat pēc kreisā aplīša pazušanas.

Sevišķi interesanti ir, ka, piemēram, astoņkājim, kura acs ir lielā mērā līdzīgi būvēta, tomēr tīklenes neironu slānis nav priekšā gaismu uztverošo šūnu slānim, bet gan tuvāk acs ābola ārējai virsmai. Līdz ar to savienojums ar redzes nervu neprasa atveri gaismu uztverošo šūnu slānī un nekāda aklā zona nerodas.

Tas dažiem autoriem ir ļāvis izteikt minējumu, ka mugurkaulnieku gadījumā daba redzes sistēmas veidošanā ir pieļāvusi tehnisku kļūmi. Šo rindu autors sliecas tam piekrist.

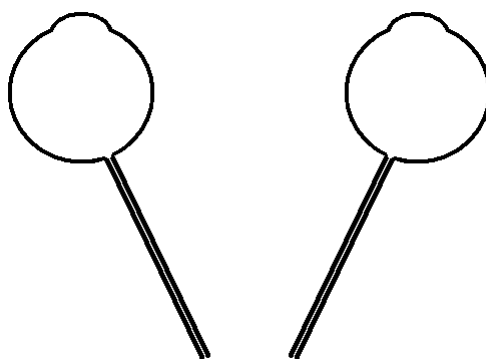
Aklā plankuma fenomens ir ļoti plaši skatīts. Interneta pārlūkos var meklēt pēc atslēgas vārdiem "blind spot" un "aklais plankums", t.sk. http://en.wikipedia.org/wiki/Blind_spot_%28vision%29.

Ar aklo plankumu saistīti arī amizanti nostāsti. Tā, zināms, ka bijis karalis, kas mēdzis valdības sēdēs sev kavēt laiku, ar vienu aci aplūkojot savus ministrus ar aklo plankumu pret izvēlēta ministra galvu. Laikam tāds skats rosināja pārdomas par iespējamu valdības sastāva radikālu maiņu.

Nostāsta ietekmēts, šo rindu autors ir aicinājis studentus līdzīgi kavēt laiku garlaicīgās lekcijās, attiecīgi novērojot docētāju. Personīgā pieredze rāda, ka tas izdodas.

Un burtiski pēdējās dienās žurnālā „Mājas viesis” (6. – 19.12.2013) atstāstīta epizode no hokejista Sanda Ozoliņa bērnības, kad viņš uzzīmējis cilvēku bez galvas un skaidrojis, ka tas cilvēks tik tālu aizgājis, ka galvu vairs nevar redzēt. Būtu viņš zinājis par aklo plankumu, skaidrojums būtu sanācis nesalīdzināmi iespaidīgāks.

Arī aklā plankuma gadījumā ir jāuzdod redzes efektiem diezgan tradicionāls jautājums, kas skar vēl vienu acs anatomisku momentu. Raugoties uz abu acu un to redzes nervu izvietojumu no augšas, redzams att. KomAP3 ieskicētais skats:



Att. KomAP3. Abu acu un to redzes nervu izvietojums shematiskā skatā no augšas.

Tātad, piemēram, kreisajai acij redzes nervs pievienojas pa labi no acs centrālās ass, un tādējādi aklais plankums atrodas tīklenes labajā pusē. Tomēr raugoties ar kreiso aci, testa attēlā pazūd kreisais aplītis – t.i. aklā zona atrodas redzeslauka kreisajā pusē. Kā tā var būt?!

Krēslas redze

Par krēslas redzes ikdienišķumu liecina klasiskā atziņa – tumsā visi kaži pelēki. Tomēr ir situācijas, kurās krēslas redze sagādā arī kādu neliela pārsteiguma momentu.

Tā, reiz vēlā vakarā atgriežoties mājās, šo rindu autors negaidīti ieraudzīja, ka gar pagalma celiņu augošajiem ceriņiem ir sulīgi melnas lapas. Izbrīns gan ilga vien dažas sekundes, tomēr spilgti palicis atmiņā. Līdzīgs efekts bija citā reizē, kad nācās pabrīnīties par vāzē uz galda esošajām tulpēm, kuru ziedi, pretēji ierastajam, pēkšņi izrādījās vienā krāsā ar lapām.

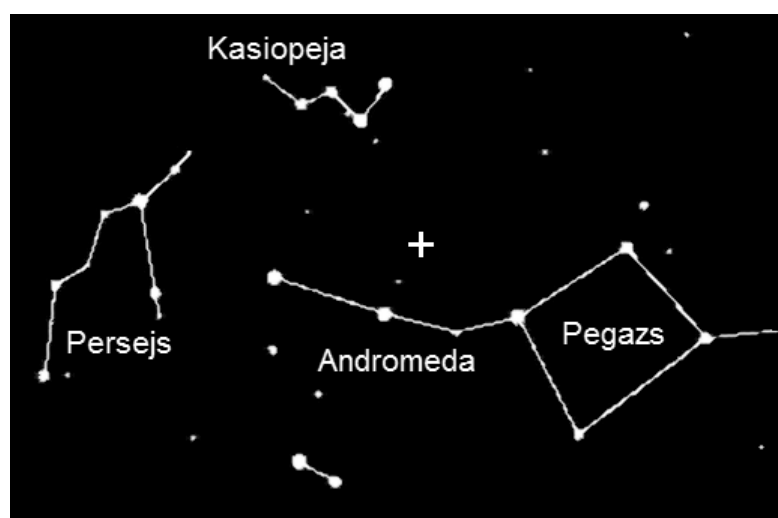
Dzirdēta diezgan amizanta žēlošanās par ne sevišķi veiksmīgu zaglīgu gājienu svešu ķiršu lasīšanā, kad izrādījies, ka izvēlētajā diennakts stundā ogas nemaz nav bijušas ieraugāmas.

Vāja apgaismojuma apstākļos krēslas redze ir vienīgais dabiskas vizuālās informācijas iegūšanas veids. Šādos apstākļos jāievēro, ka tiešs skats uz interesējošiem vai meklējamiem objektiem var nederēt, jo acu tīklenes centrālās daļas gaismas jūtīgās šūnas nedarbojas, un tāpēc jāievēro krēslas redzes sāniskums. Sānu redze prasa uzmanības koncentrēšanu uz redzeslauka perifērijas objektiem pie skata virziena, kas apzināti fiksēts iesāņus no objekta.

Šajā sakarā ir lasīts par profesionālu mednieku iemaņām vāju gaismas avotu ieraudzīšanā. Jādomā, ka arī plašāka profila dabas pētniekiem apzināta krēslas sānu redze var būt nepieciešama, piemēram, jāņtārpiņu meklējumos. Varbūt lasītājam ir cita pieredze, taču šo rindu autoram grūti iedomāties, ka jāņtārpiņš būtu ieraugāms no attāluma tieši skatoties uz tā atrašanās vietu zālē.

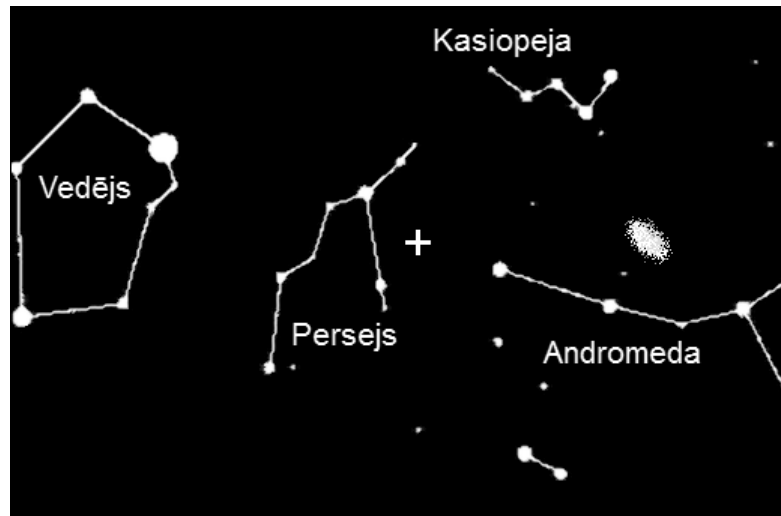
Vēl kāds autora personīgās pieredzes moments ir astronomiska rakstura, kad laiku pa laikam gribējies pavērot Andromedas miglāju – bieži daudzināto mūsu tuvāko lielāko galaktiku.

Zinot Andromedas miglāja atrašanās vietu pēc apkārtējo zvaigžņu konfigurācijas un skatoties tieši uz to, miglāju praktiski neredzam (Rīgā faktiski nekad) – att. KomKR1:



Att. KomKR1. Ar krustiņu atzīmēta Andromedas miglāja atrašanās vieta, kurā neko neredzam, skatoties tieši uz to.

Taču pietiek pavērst skatienu kādu gabalu sāpus, lai zināmajā vietā Andromedas miglājs iezīmētos kā paliels izplūdis plankums – att. KomKR2:



Att. KomKR2. Ar krustiņu atzīmēta vieta iesāņus no Andromedas miglāja. Skatoties aptuveni šajā virzienā, Andromedas miglājs iezīmējas kā izplūdis plankums.

Saprotams, šis paņēmiens noder arī komētu ieraudzīšanai, pat ja zināma vien to aptuvena atrašanās vieta pie naksnīgām debesīm.

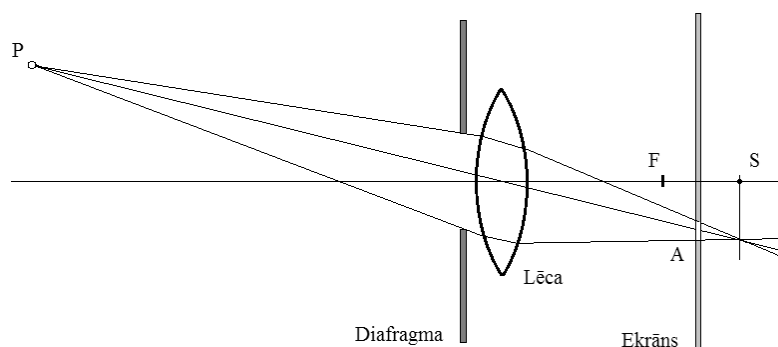
Asums pie spilgtākas gaismas

Protams, gaisma redzei ir nepieciešama pati par sevi, tomēr redzes asums ir atkarīgs arī no citām attēlu veidojošās optiskās sistēmas īpašībām. Acs optiskās sistēmas galvenā sastāvdaļa ir acs lēca. Diafragma lēcas sistēmā ir gaismu necaurlaidīga plāksne ar regulējama izmēra atveri. Vienas lēcas sistēmā diafragmu parasti novieto tieši pirms lēcas (att. KomAS1). Anatomiski tā ir novietota arī acs diafragma, kuras atveri sauc par acs zīlīti (<http://lv.wikipedia.org/wiki/Acs>, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pupil>).

Aplūkosim diafragmas lomu pie attēla asuma lēcas optiskajā sistēmā.

Attēlā KomAS1 papildus parādīts arī gaismas ceļš no spoža punkta P caur diafragmu un lēcu līdz ekrānam, uz kura veidojas apgaismots apgabals A. Ja ekrāns atrastos punkta S norādītajā attālumā no lēcas, tad apgabals A būtu punktveida un punkta P attēls būtu ass. Vispārējā gadījumā attēla asums ir atkarīgs no apgabala A izmēra. Saprotams, ka pie fiksētiem punkta P, lēcas fokusa un ekrāna, A izmēru tieši nosaka diafragmas atveres lielums – jo mazāka šī atvere, jo asāks attēls veidojas.

Varam piezīmēt, ka, ja ekrāna īpašības pieļauj par asu uzskatīt attēlu, kuru veido nenulles izmēra apgabals A, tad pie fiksētiem lēcas fokusa, ekrāna stāvokļa un diafragmas atveres var atrast veselu punkta P novietojumu diapazonu, kuriem atbildīs pieļaujama asums – šī diapazona robežas fotogrāfijā sauc par asuma dziļumu.



Att. KomAS1. Lēcas optiskā sistēma ar diafragmu.

Parādīts arī gaismas ceļš no spoža punkta P caur diafragmu un lēcu līdz ekrānam.

Ar F atzīmēts viens no lēcas fokusiem, punkts S norāda punkta P attēla plakni, ar A atzīmēts punkta P apgaismotais apgabals ekrāna plaknē.

Tagad ir skaidrs, kāpēc redzes asums pieaug pie spožākas gaismas – normāla zīlītes reakcija uz spožu gaismu ir saraušanās, tā funkcionē mūsu acs dabas tālredzīgi izveidotā diafragma.

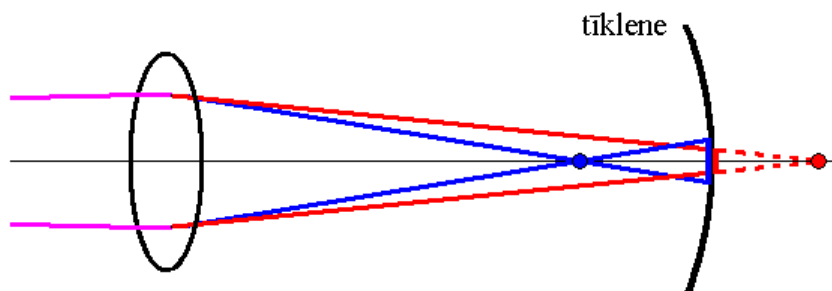
Dažkārt asuma paaugstināšanai mēs lietojam kādas ārējas diafragmas, piemēram, vienkārši samiedzot acu plakstiņus. Vēl labāk ir skatīties caur tumšu lapu ar nelielu caurumiņu acs priekšā.

Izrādījās, ka normāli funkcionējošai acij novērot caurumiņa efektu nebija tik vienkārši – acs jau tāpat nodrošina redzes asumu un lapa ar caurumiņu tās priekšā tikai pasliktina apgaismojumu. Tāpēc redzes asums uz izvēlētu priekšmetu tika mākslīgi samazināts, apzināti un noturīgi raugoties tālumā, bet daļu uzmanības pievēršot arī šī priekšmeta attēlam. Tad gan varēja pamanīt izvēlētā priekšmeta skata asuma pieaugšanu caurumiņa ierobežotajā redzeslauka daļā.

Sarkanā un zilā laušana

Internetā atrodami dažādi skaidrojumi un viedokļi par aplūkoto efektu būtību. Mēs par šiem efektiem izteiksim zināmus ģeometriskās staru optikas apsvērumus.

Sarkani-zilās līnijas vienkrāsaino daļu asuma atšķirības sakarā atsauksimies uz atzinumu, ka normāla acs fokusējas tā, ka tīklenes centrālā daļa sakrīt ar vidēju viļņu garumu asuma plakni, t.i., tīklene atrodas starp sarkani-zilās līnijas zilās un sarkanās daļas optiskajiem attēliem – att. KomSZ1:



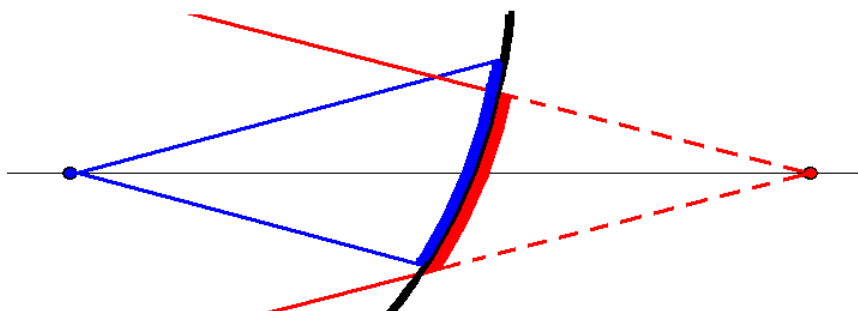
Att. KomSZ1. Horizontālas sarkani-zilās līnijas izplūduša attēla veidošanās uz tīklenes. Zilais aplītis – zilo staru formētā optiskā attēla vieta, sarkanais aplītis – sarkano staru formētā optiskā attēla vieta.

Tādējādi uz tīklenes nokļūst vesels kūlis gan zilo, gan sarkano staru. Līdz ar to, atkarībā no kūļu platuma uz tīklenes, tīklene uztver vairāk vai mazāk izplūdušus līniju vienkrāsaino daļu attēlus.

Savukārt par horizontālas sarkani-zilas līnijas šķietamo lūzumu krāsu sadures vietā nav izdevies atrast nekādus publicētus atzinumus. Izteiksim savu hipotētisku minējumu, aplūkojot tuvāk to tīklenes vietu uz kuras krīt zilo un sarkano staru kūļi – att. KomSZ2 (att. KomSZ1 palielināts fragments).

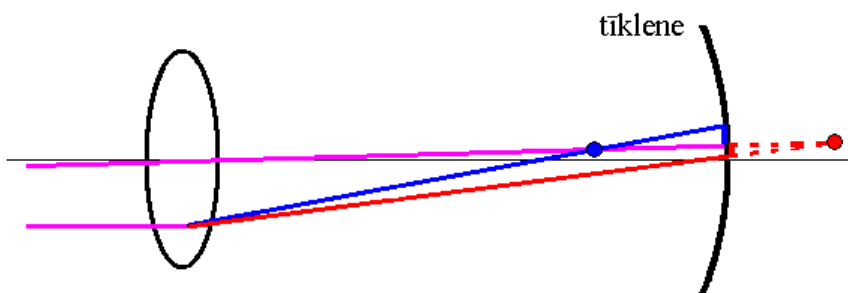
Kad mēs skatāmies tieši uz līnijas krāsu saduri, tad šī vieta projicējas acs vizuālajā centrā, kas atrodas tīklenes augstākās izšķiršanas spējas apgabalā, ko sauc par *foveju* (*fovea centralis* http://en.wikipedia.org/wiki/Fovea_centralis). Šim apgabalam ir bedrītes forma attiecībā pret pārējo tīkleni, un tādējādi varam izteikt minējumu, ka tīklenes virsma šajā vietā varētu nebūt precīzi perpendikulāra asij, uz kuras atrodas zilo un sarkano staru formētie optiskie attēli, kuri att. KomSZ1, KomSZ2 reprezentēti ar mazajiem aplīšiem. Atkāpe no perpendikulārums varētu pat nebūt tieši saistīta ar fovejas formu, bet vienkārši konkrētā indivīda konkrēta tīklenes īpatnība, jo, kā jau teikts, redzes sistēma nepavisam nav evolucionējusi uz augstu optisko elementu precizitāti.

Tādējādi, kā redzams att. KomSZ2, pie tīklenes slīpuma zilo un sarkano staru kūļi uz tās izrādās nedaudz vertikāli nobīdīti attiecībā viens pret otru:



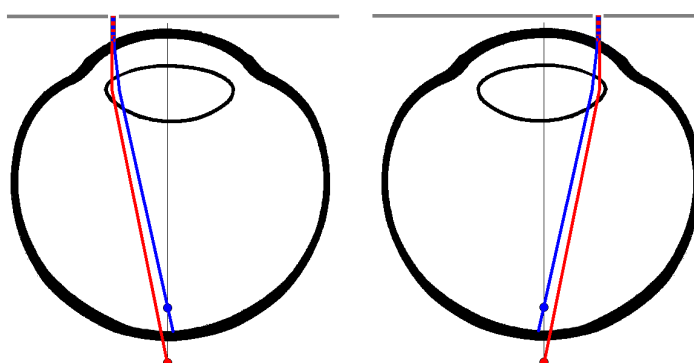
Att. KomSZ2. Zilo un sarkano staru kūļu vertikāla nobīde attiecībā vienam pret otru pie slīpas tīklenes.

Vēl viens šī efekta skaidrojums būtu tāds, ka jau minētās acs optiskās sistēmas nepilnības varētu izpausties arī kā tādu acs optisko elementu kā radzene un lēca ģeometriskā nesaskaņotībā. Pēdējās sekas būtu skatāmās līnijas optisko attēlu vertikāla novirzīšanās no optiskās ass, kas ir t.s. laterālās hromatiskās aberācijas cēlonis. Arī tad zilo un sarkano staru kūļi uz tīklenes izrādās nedaudz vertikāli nobīdīti attiecībā viens pret otru, att. KomSZ3:



Att. KomSZ3. Zilo un sarkano staru kūļu vertikāla nobīde attiecībā vienam pret otru pie skatāmās līnijas optisko attēlu vertikālas novirzīšanās no optiskās ass.

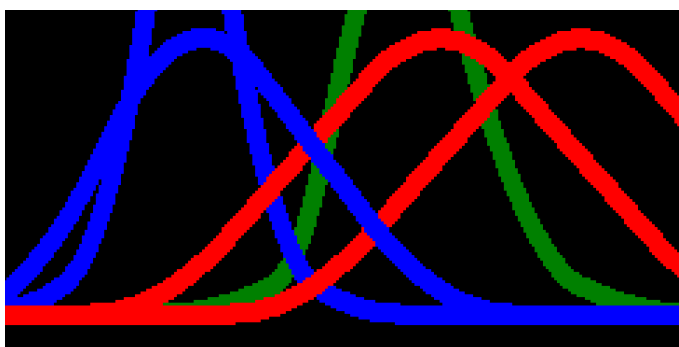
Trešais efekts ir vertikālās sarkani-zilās līnijas kustīgais laužums pie skatīšanās caur nelielu papīra lapā izdurtu caurumiņu. Tā kā mazs caurumiņš ļauj līdz tīklei nokļūt tikai šauram staru kūlim, tad šī kūļa krāsaino staru un tīklenes krustpunkti ir atkarīgi no caurumiņa pozīcijas kā redzams att. KomSZ4:



Att. KomSZ4. Mazam caurumiņam atbilstošā šaurā staru kūļa krāsaino staru un tīklenes krustpunkti pie galējām caurumiņa pozīcijām pa kreisi un pa labi.

Abi krāsainie stari tīkleni krusto dažādos punktos. Dēļ caurumiņa galējo pozīciju simetrijas pret acs optisko asi, staru krustpunktu pāri pie šīm galējām pozīcijām arī ir savstarpēji simetriski, t.i., apmainās vietām. Šo mainīšanos vietām mēs redzam kā līnijas krāsaino daļu savstarpējo kustību.

Hromostereoefektu šo rindu autors pirmo reizi novēroja 1990-to gadu sākumā, kad radās iespēja darboties ar personālo datoru ar krāsainu monitora ekrānu. Zīmīgi, ka tika pērti krāsu uztveri raksturojošo funkciju grafiki. Grafiki bija krāsaini, to līnijas savstarpēji krustojās, un krustošanās vietās tika novērots spilgts stereoefekts. Par to toreiz bija milzīgs izbrīns, bet nebija nekāda priekšstata par efekta cēloņiem. Tagad šķiet svarīgi, ka tika strādāts ar ļoti zemas izšķiršanas spējas monitoru (320×200), kas līnijas atainoja ļoti platas ar labi saskatāmiem krustojumu pikseļiem. Laika gaitā ekrānu izšķiršanas spēja paaugstinājās, līniju platums samazinājās un hromostereoefekts kļuva aizvien neuzkrītošāks. Turklāt arī acu skaidrums gāja mazumā un novērojums piemirsās. Bet nu, apkopojot redzes efektus, tas atausis atmiņā. Grafiki bija līdzīgi sekojošiem – att. KomSZ5:



Att. KomSZ5. Krāsainas līnijas, kuru krustošanās vietās var tikt novērots hromostereoefekts.

Internetā domas dalās, vai te primāri ir staru optikas momenti, dažādu krāsu atšķirīga laušana, acs vizuālās un optiskās ass nesakrīšana horizontālā plaknē (te Internetā var meklēt pēc *visual axis of human eye*), vai tomēr augstāku redzes analizatora līmeņu darbība, kas izsauc attiecīgu ilūziju.

Atceroties seno novērojumu, šo rindu autors sliecas domāt, ka hromostereoefekts nav vienkārši ilūzija, bet tiešām reāls vizuāls efekts, ko izsauc faktiska sarkanās un zilās krāsas laukumu robežas disparitāte, t.i., šīs robežas ģeometriskās pozīcijas uz abu acu tīklenēm ir savstarpēji nedaudz nobīdītas. Katrā ziņā, paskatoties uz šiem attēliem ar vienu aci, telpiskuma izjūta, šķiet, vājinās.

Mēs nevēlamies lasītāju, kuram pat varbūt šis efekts neparādās, te vairāk apgrūtināt ar attiecīgiem staru gaitas rasējumiem un to precīziem skaidrojumiem – tas viss atrodams Internetā, meklējot pēc jēdziena *chromostereopsis*.

Vēl tik pievērsīsim uzmanību tam, ka att. SZ5 vērojamas arī globālāka telpas dziļuma ilūzijas iezīmes. Proti, nedaudz īsākais vārds "SUNS" ir šķietami tālāk nekā vārds "ZIRGS", kas atbilst perspektīvās projekcijas īpašībai samazināt tālākus objektus. Tas varētu attiekties arī uz mazākiem attēlu elementiem un daļai skatītāju nomākt hromostereoefektu. To, ka šādi skaidrotai dziļuma ilūzijai nav nepieciešamas krāsas, parāda att. SZ5 ahromatiskais variants att. KomSZ6:



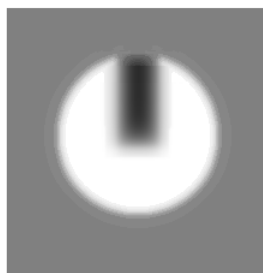
Att. KomSZ6. Attēla SZ5 ahromatiskais variants, kurā arī saskatāma telpas dziļuma ilūzija.

Iesakām lasītājam pašam paeksperimentēt ar attēlu SZ5, gan mainot tā krāsu sastāvu, gan variējot tā daļu savstarpējo izvietojumu – tas varētu pastiprināt vai pavājināt individuālo telpiskuma izjūtu.

Adata un caurumiņš

Atbilde uz otro jautājumu nekavējoties seko no atbildes uz pirmo – kas ir tā gaišajā laukumiņā redzamā tumšā joslīņa?

Uzreiz varam atbildēt uz parasto minējumu, ka tā esot adatas attēls. Nē, vismaz normālas redzes kontekstā tā nav. Ja tā būtu, tad taču nebūtu redzamās tumšās joslīņas paradoksālo kustību pretēju adatas kustībai. Vēl vairāk, ja pamanāties adatu novietot tā, ka pret caurumiņa centru atrodas adatas augšējais gals, tad gaišajā laukumiņā parādās tumšās joslīņas apakšējais gals, sk. att. KomAC1:

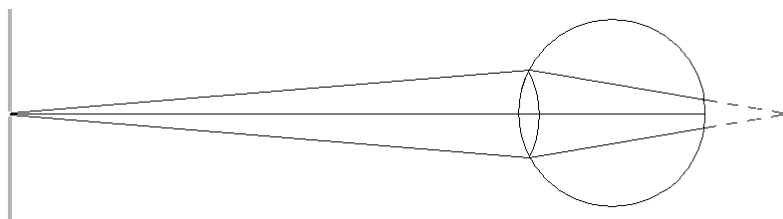


Att. KomAC1. Adata novietota tā,
ka pret caurumiņa centru atrodas adatas augšējais gals.
Tad gaišajā laukumiņā parādās tumšās joslīņas apakšējais gals.

Viegli saprast, ka dominējošais adatas apgaismojuma avots ir caurumiņš, kas paver ceļu fona gaismai. Tomēr daļa šī apgaismojuma nenonāk acī, jo adata to aizsedz. Tātad var teikt, ka tas, kas no adatas nonāk acī, ir adatas ēna!

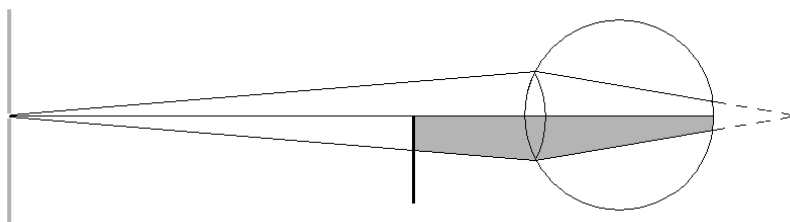
Izsekosim adatas ēnas ģeometrisko ceļu līdz acs tīklinei. Protams, tas nozīmē izsekot neaizsegtās gaismas starus, kas nāk no caurumiņa.

Vienkāršākais, bet praktiski izsmelošs gadījums ir, kad vērotāja skats vērsts tālumā un caurumiņš ir praktiski punktveida. Pie tālumā vērsta skata acs tīklene no acs lēcas atrodas acs fokusa attālumā. Bez adatas uz tīklenes tad veidojas gaišs apaļš laukums, jo caurumiņa punktveida attēls formējas aiz tīklenes, bet uz tīklenes krītošie stari vēl nav līdz galam satuvinājušies – sk. att. KomAC2:



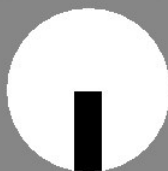
Att. KomAC2. Adatas nav, vērotāja skats vērsts tālumā, caurumiņš punktveida. Uz tīklenes veidojas gaišs apaļš laukums, jo caurumiņa punktveida attēls formējas aiz tīklenes, bet uz tīklenes krītošie stari vēl nav līdz galam satuvinājušies

Ja starp caurumiņu un aci novietota adata tā, ka tās augšējais gals ir tieši uz acs centrālās skata līnijas, tad tiek aizsegti no caurumiņa nākošie apakšējie gaismas stari un līdz ar to arī tīklenes gaišā laukuma apakšējā daļa – sk. att. KomAC3:



Att. KomAC3. Starp caurumiņu un aci novietota adata tā, ka tās augšējais gals ir tieši uz acs centrālās skata līnijas. Tiek aizsegti no caurumiņa nākošie apakšējie gaismas stari un līdz ar to arī tīklenes gaišā laukuma apakšējā daļa

Tātad šajā gadījumā pilna tīklenes apgaismojuma konfigurācija ir sekojoša, att. KomAC4:



Att. KomAC4. Tīklenes apgaismojuma konfigurācija, kad starp caurumiņu un aci novietota adata tā, ka tās augšējais gals ir tieši uz acs centrālās skata līnijas.

Tā kā normālie lēcu veidotie attēli ir pret ārējo pasauli pagriezti par 180° , tad tīklenes apakšējās daļas apēnojumu skatītāja smadzenes uztver kā objektu redzes lauka augšpusē. No tā arī seko apēnojuma paradoksālās kustības attiecībā pret paša skatītāja turēto un kustināto adatu.

Ja tomēr caurumiņš nav ideāls punkts un skats nav vērsts tālumā, tad principiāli nekas nemainās, vienīgi robežas starp dažāda apgaismojuma tīklenes apgabaliem kļūst vairāk vai mazāk izplūdušas.

Piezīmēsim, ka Internetā ir daži materiāli par šo jautājumu – var meklēt pēc vārdiem *retinal shadow experiment*.

Fosfēns

Uzdots tika vienkāršs jautājums – kāpēc aplūkotais plankums ir parādījies pa kreisi, t.i. kairinātajam acs kaktiņam pretējā pusē?

Lai atbildētu uz šo jautājumu, vienkārši jāatceras, ka apkārtējās vides ģeometriskās struktūras uz acs tīklenes projicējas pagrieztas par 180° . Tā kā tīklenes sūtītos signālus mūsu smadzenes traktē kā nākošus no apkārtējās vides, tad līdz ar to kairinājuma šķietamais vizuālais avots ģeometriski ir pagriezts par 180° attiecībā pret faktisko acs kairinājuma vietu.

Fotogrāfija ar vienu aci

Šajā komentārā mēs vēlamies tuvāk salīdzināt un arī pretnostatīt fotogrāfijas aplūkošanu ar vienu un abām acīm.

Ievedot loga rūs modeli, parādās vēl divi pretēji momenti – skatīšanās caur neaizklātu rūti un skatīšanās caur ar fotogrāfiju aizklātu rūti. Līdz ar to varam aplūkot pavisam četras situācijas:

- (r1) skatīšanās ar vienu aci caur neaizklātu rūti,
- (r2) skatīšanās ar abām acīm caur neaizklātu rūti,
- (f1) skatīšanās ar vienu aci caur ar fotogrāfiju aizklātu rūti,
- (f2) skatīšanās ar abām acīm caur ar fotogrāfiju aizklātu rūti,

Situācijas (r1) un (r2) nozīmē vienkāršu skatīšanos caur logu, tiesa, ar kaut kāda iemesla dēļ aizvērtu vienu aci gadījumā (r1), bet (r2) gadījums ir normāla skatīšanās.

Situācija (f1) pie acs atrašanās projekcijas centrā ir mūsu īpašais fotogrāfijas aplūkošanas gadījums, savukārt situācija (f2) ir normālā fotogrāfijas aplūkošana.

Jāsaprot, ka ar vienu aci novērojamais telpiskums (situācija (f1)) nav ģeometriski pilnvērtīgs, jo nav informācijas par to, ko aizsedz redzami objekti. Pavisam citāda ir normālā binokulārā redze (situācija (r2)), kura ir tā, kas nodrošina īstu ģeometriskā telpiskuma uztveri. Pēdējās pamatā ir t.s. binokulārā disparitāte – kreisās un labās acs tīklenes attēlu savstarpēja nobīde, kuru rada acu atšķirīgais novietojums, un līdz ar to katra acs saskata kaut ko no tā, ko kāds redzamais objekts aizsedz otrai acij.

Aplūkojot fotogrāfiju ar abām acīm (situācija (f2)), reāli mēs izjūtam pašas fotogrāfijas telpisko stāvokli attiecībā pret citiem apkārtējiem priekšmetiem, jo aplūkojamā fotogrāfija starp tiem ir viens no binokulārās disparitātes elementiem. Savukārt fotogrāfijā uzņemtie objekti normālā skatam perpendikulārā fotogrāfijas stāvoklī nemaina savu savstarpējo stāvokli uz skatītāja acu tīklenēm. Tāpēc fotogrāfijā redzamais skats principā nevar tikt uztverts ģeometriski telpisks. Saskatāmais telpiskums ir ļoti nosacīts un to izsauc smadzeņu darbība, apstrādājot cita rakstura informāciju no fotogrāfijas, piemēram, objektu aizklāšanos, ēnas, asumu u.c. Protams, šī informācija kalpo pat skatoties tikai ar vienu aci, un ne tikai uz fotogrāfiju (situācija (f1)), bet gan arī uz visu apkārtējo ainu (situācija (r1)).

Raugoties ar abām acīm (situācija (f2)), mēs redzam visas fotogrāfiskā attēla ģeometriskās īpašības. Tieši attēla, nevis attēlotās ainas ģeometriskās īpašības. Perspektīvie kropļojumi attēlā izpaužas kā vienādu lietu dažādi izmēri vai regularitāšu deformācijas. Piemēram, taisnstūra galda virsma attēlā kļūst par vairāk vai mazāk neregulāru četrstūri. Savukārt, vērojot šo galdu dabā, mēs pat neizjūtam faktiskos perspektīvos kropļojumus uz acu tīklenēm, redzes sistēma tos uztver kā ainas dabiski dotu īpašību turklāt ar dabisku disparitāti. Savukārt fotogrāfijā reģistrētie kropļojumi nav tādā nozīmē dabiski, bet gan ir tehnoloģiski fiksēti un bieži pat negribēti akcentēti. Turklāt, kā augstāk atzīmēts, fotogrāfiskā attēla objektiem nav disparitātes, tātad nav svarīgākās reālā ģeometriskā telpiskuma norādes. Fotogrāfija ir tikai starpnieks – sastindzis skats uz loga rūs.

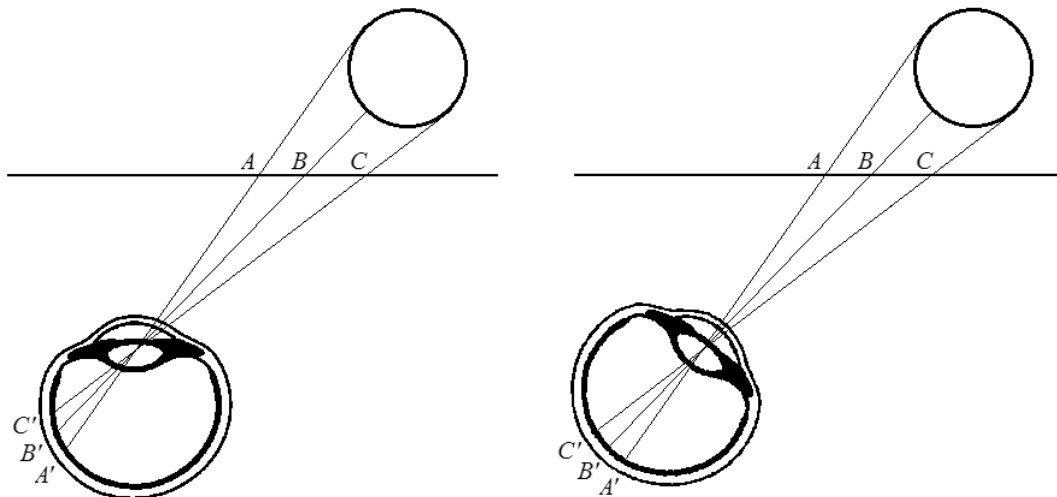
Tātad, mēģinot fotogrāfiju aplūkot tikai ar vienu aci (situācija (f1)), tiek novērsts, mūsaprāt, galvenais situācijas (f2) trūkums, proti, fotogrāfiskajā attēlā fiksēto perspektīvo kropļojumu nedabiskā izpaušme, kas pazūd pie acs atrašanās projekcijas centrā. Un, otrkārt, fotogrāfija aizņem praktiski visu redzes lauku un netiek uztverta kā tikai viens no apkārtējās ainas objektiem.

Interesanti, ka dēļ acs tīklenes virsmas ieliekuma perspektīvie kropļojumi uz tīklenes var būt pat mazāki, nekā fotogrāfijā, kura ir plakana. Piemēram, nefrontāli novietotas sfēras

projekcija uz plaknes ir elipse, jo ir taisna riņķa konusa šķēlums ar slīpu plakni (att. KomFA1), kamēr šī paša konusa šķēlums ar ieliektu virsmu var izrādīties gandrīz riņķa līnija (att. KomFA2). Tas ir svarīgs ģeometrisks apstāklis, kas samazina fotogrāfijas perspektīvos kropļojumus pie tās aplūkošanas ar pareizi novietotu vienu aci.



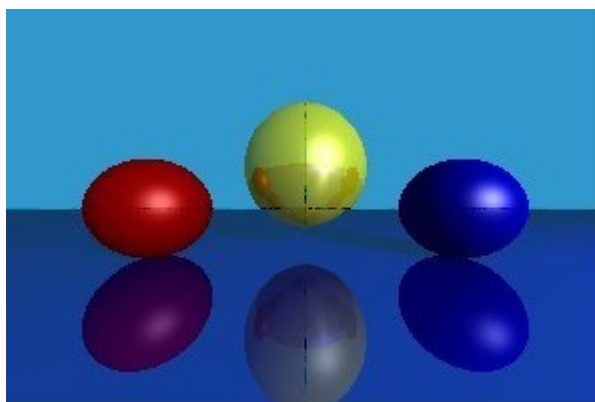
Att. KomFA1. Fotografācija ar galda tenisa bumbiņu. Bumbiņa novietota aptuveni 40° ieslīpi attiecībā pret objektīva asi. Bumbiņas attēla forma ir elipse ar pusasu attiecību aptuveni 1.1.



Att. KomFA2. Shematisks skats no augšas uz sfēras centrālās projekcijas elementiem plaknē un uz acs tīklenes (punkti A, B, C un tiem atbilstošie A', B', C'). Plakanajā projekcijā sfēras ģeometriskajam centram atbilstošais punkts B neatrodas tieši vidū starp sfēras galējiem kontūras punktiem A un C . Savukārt uz tīklenes atkarībā no acs skata virziena šī deformācija ir mazāka vai tās nav nemaz, jo projekcijas punkts B' atbilstošo apgabalu $A'C'$ sadala praktiski vienādās daļās.

Jāatzīmē, ka sfēru atainošana ar elipsēm ir bieži vērojama datoru grafikas vingrinājumos, kad tiek sintezēts platleņķa perspektīvas skats (piemēram, att. KomFA3). Tā

kā sfēra ir ļoti vienkārši apstrādājams ģeometrisks objekts, tad no tām viegli veidot kopumā pietiekoši komplicētas ainas. Arī šo rindu autoram sfēra bija starp pirmajām virsmām, kuru attēli tika sintezēti. Lai gan lieta faktiski ir triviāla, tomēr, pirmo reizi ieraugot sfēras attēlu kā elipsi, bija doma – kur gan programmā ir kļūda!



Att. KomFA3. Sintētisks sfēru attēls
(autors: students Uldis Bojārs, šķiet, 1990-tie gadi).

Saprotams, ka arī datoru sintezētus korektus perspektīvās projekcijas attēlus vērts aplūkot ar vienu aci.

Vēl vairāk, viss teiktais novērojams arī ar vienu aci skatoties televizoru. Turklāt, video materiālos redzamās kustības un dažāda dziļuma plāni telpiskuma efektu būtiski pastiprina ar papildus informāciju par telpiskumu. Tā, piemēram, hokeja spēles televīzijas translācija, vērojot ar vienu aci, šo rindu autoram izskatās pēc dzīvu alvas zaldātiņu rotaļas uz neliela galda.

Patiesībā dinamisku ainu perspektīvās projekcijas skatā ar abām acīm (situācijas (f2) dinamiskais gadījums) ir nekas cits kā kino. Tomēr būtiska atšķirība no statiskā gadījuma ir perspektīvās projekcijas centra stāvokļa neprognozējamās izmaiņas un neatbilstība skatītāja vietai kinozālē, kas neļauj, kā vērojot sporta spēles TV translāciju, puslīdz stabili turēt aci nepieciešamajā punktā. Tad nu, ja tiešām ir vajadzīgs demonstrēt un uztvert īstu telpiskumu uz perspektīvo projekciju pamata, tad katrai acij nepieciešams savs ekrāns (situācijas (f1) dubulta sistēma), ko nodrošina ar speciāliem tehniskiem līdzekļiem (Pielikums 1).

Jāatzīst, ka attēla aplūkošana ar vienu aci galvenokārt tomēr ir izklaide. Lai arī tā skatoties izjūtam gandrīz īstu telpiskumu, lielākoties īstais telpiskums fotogrāfijās nemaz nav būtisks, jo gan ir vērojama cita rakstura informācija par telpiskumu, gan fotoattēla saturā patiesībā ir nozīmīgāki elementi, tie, kuru dēļ attēls vispār ir tapis. Turklāt, ja arī reālais telpiskums ir būtisks, tas ne vienmēr ir sasniedzams pat skatoties tieši, jo binokulārā redze ir efektīva vien relatīvā tuvumā. Lielos attālumos, piemēram, pilsētas panorāma pāri platai upei, abas acis praktiski redz vienu un to pašu, un augstāk definētās situācijas (r1) un (r2) faktiski sakrīt. Redzamās ainas patiesa izpratne tad lielā mērā ir atkarīga no zināšanām par pašiem ainas objektiem vai vismaz par analogiskām struktūrām. Lūk, piemēram, Mēness – lai cik būtiskas ir zināšanas par tā telpisko formu, mums nav redzams nekas daudz vairāk par gaišu disku pie debesīm, savukārt sfēriskas virsmas zīmējuma specifiskā struktūra augstākas izšķiršanas spējas attēlā izsauc telpiskuma izjūtu, sevišķi, skatoties ar vienu aci, att. KomFA4:



Att. KomFA4. Divas Mēness fotogrāfijas.

Pa kreisi – mums pierastais diska veida skats bez smalkām detaļām.

Pa labi – augstākas izšķiršanas spējas attēls, kura detaļas izsauc telpiskuma izjūtu, sevišķi, skatoties ar vienu aci.

Nobeigumā vēlreiz uzsvērsim, ka redzamās ainas patiesa izpratne lielā mērā ir atkarīga no zināšanām par pašiem ainas objektiem. Atšķirībā no fotoaparāta, kas tehnoloģiski realizē ģeometriski precīzu projekciju, cilvēks, radot attēlu, tajā ataino satura idejisko ieceru. Tāpēc, piemēram, gleznas nav fotogrāfijas. Lai arī ir mākslinieki, kas cenšas precīzi attēlot perspektīvo projekciju, tomēr normālam binokulāram skatam šāda attēla precizitāte nemaz nav adekvāta. Binokulārā skatīšanās kā tāda nav pašmērķis, vienīgi līdzeklis dziļākai apkārtnes uztverei. Turklāt apkārtņi pa īstam uztveram tajā grozoties, ne tik daudz skatoties no malas. Tas viss, lielākā vai mazākā mērā, vairāk vai mazāk nosacītiem līdzekļiem ir gleznās. Precīza ģeometriskā projekcija var tikt pat absolūti ignorēta, piemēram, senajos ēģiptiešu zīmējumos, att. KomFA5:

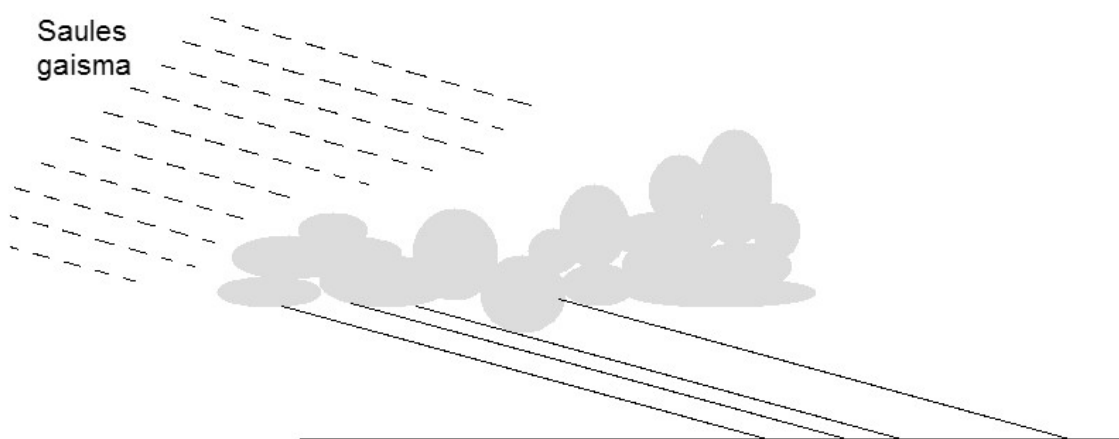


Att. KomFA5. Precīzas ģeometriskas projekcijas ignorēšanas piemērs – kāds no senajiem ēģiptiešu zīmējumiem.

Saules staru vēdekļis

Vispirms noskaidrosim, kas ir šie redzamie stari. Patiesībā tie nemaz nav īsti gaismas stari, bet gan taisnas tumšākas un gaišākas joslas gaisā, no kurām gaišās ir caur mākoņu spraugām saules apspīdētu ūdens pilienu zonas. Šo parādību sauc par krepuskulārajiem stariem (http://en.wikipedia.org/wiki/Crepuscular_rays). Līdzīgas taisnas starveidīgas zonas ir novērojamas arī, piemēram, vecos tumšos bēniņos, kad saule iespīd vien caur šaurām sienu spraugām un apgaismo saceltos putekļus.

Interesantākais ir tas, ka šie mākoņu spraugu izsauktie stari, kaut vizuāli reizēm pat savstarpēji perpendikulāri, patiesībā telpā ir cits citam gandrīz pilnīgi paralēli, jo tos radošā gaisma nāk no praktiski bezgalīgi tāla avota (att. KomSV1):



Att. KomSV1. Mākoņu spraugu izsaukto gaišo joslu – krepuskulāro staru, ģeometriskā shēma.

To, ka praktiski paralēlas līnijas var izskatīties izejošas no viena punkta, mēs visi zinām – kaut vai dzelzceļa sliežu piemērs. Tomēr saule un mākoņi ir cita mēroga objekti, kurus parastā ikdienā vērojam vien attālināti un tāpēc neizjūtam to reālās ģeometriskās īpašības.

Attālinātu skatu uz liela mēroga objektiem var modelēt ar raudzīšanos uz ikdienišķiem priekšmetiem no neparastāka rakursa, protams, ievērojot atbilstošas ģeometriskas proporcijas.

Mūsu gadījumam noder tāds ar atmosfēras optiskajām īpašībām pilnīgi nesaistīts priekšmets kā drēbju skapja sienas panelis, kas piemēroti novietots (att. KomSV2):



Att. KomSV2. Slīpi novietots drēbju skapja sienas panelis.

Novietojot aci pret paneļa garenasi tā zemākā gala augstumā un aptuveni paneļa garuma puses attālumā no šī gala, ieraugām sekojošu skatu (att. KomSV3):



Att. KomSV3. Skats uz slīpi novietotu drēbju skapja sienas paneli no punkta pret paneļa garenasi tā zemākā gala augstumā un aptuveni paneļa garuma puses attālumā no šī gala.

Labi redzams, ka attēlā paneļa sānu malu konfigurācija ir ģeometriski analogiska krepuskulāro staru ainai. Tātad nav jābūt izbrīnītiem, ka staru gadījumā mēs patiesībā skatām kaut ko līdzīgu, tikai būtiski lielākos mērogos.

Pie mūsu paneļa izmēriem aptuveni $2\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ un tā galu augstumu starpības aptuveni 0.3 m , 3000 reižu lielākas konstrukcijas atbilstošie izmēri būtu 6 km , 1.5 km un 0.9 km . Pēdējie lielumi tad atbilst reālistiskam gadījumam pie mākoņu augstuma 900 m un pie mākoņu spraugu attāluma līdz skatītājam 6 km .

Negaidīts un, kā stāsta aculiecinieki, iespaidīgs, ir skats uz krepuskulārajiem stariem no lidmašīnas. Proti, pretēji ierastajam skatam uz vēdekli, kura centrā ir saule, šoreiz stari nevis izklīst attālinoties no tās, bet gan tuvinās cits citam. Šo parādību sauc par

antikrepuskulārajiem stariem (http://en.wikipedia.org/wiki/Crepuscular_rays, http://en.wikipedia.org/wiki/Anticrepuscular_rays).

Mūsu slīpais skapja panelis ļauj modelēt arī šo situāciju (att. KomSV4):



Att. KomSV4. Skats uz slīpi novietoto drēbju skapja sienas paneli no augstāka punkta pretēji att. KomSV3 skata virzienam.

Radniecīgs efekts ir dzelzceļa sliežu vizuālā satuvināšanās gan raugoties vienā virzienā, gan apgriežoties pretējā.

Cits ikdienišķu objektu neparastāka rakursa piemērs ir skats uz kokiem no gaisa balona, ko novērojis un piefiksējis autora kolēģis Kārlis Freivalds (att. KomSV5):

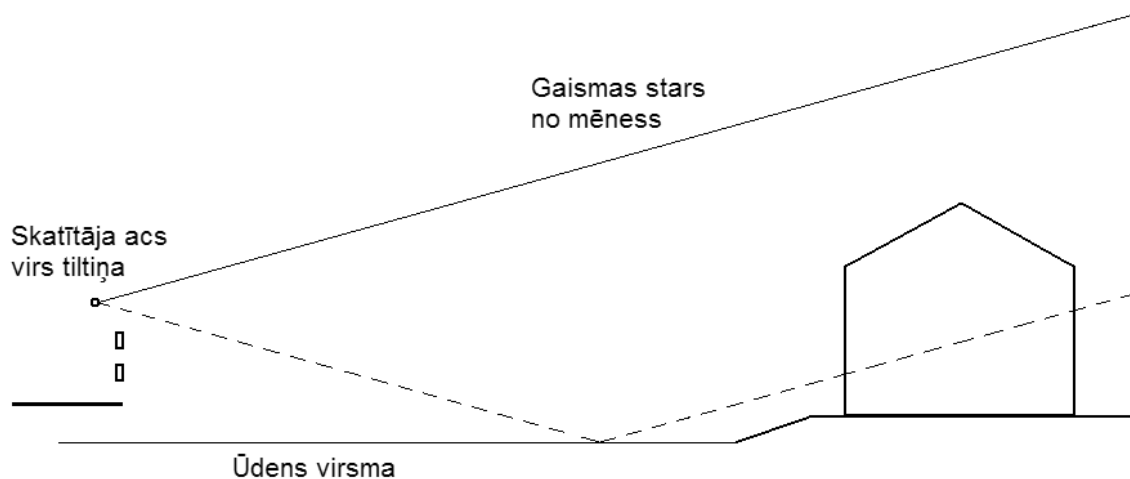


Att. KomSV5. Skats uz kokiem no gaisa balona, fotografējis autora kolēģis Kārlis Freivalds.

Munka glezna

Gleznā demonstrē tās autora cieņu pret redzamās ainās attēlošanas fizikālo korektumu.

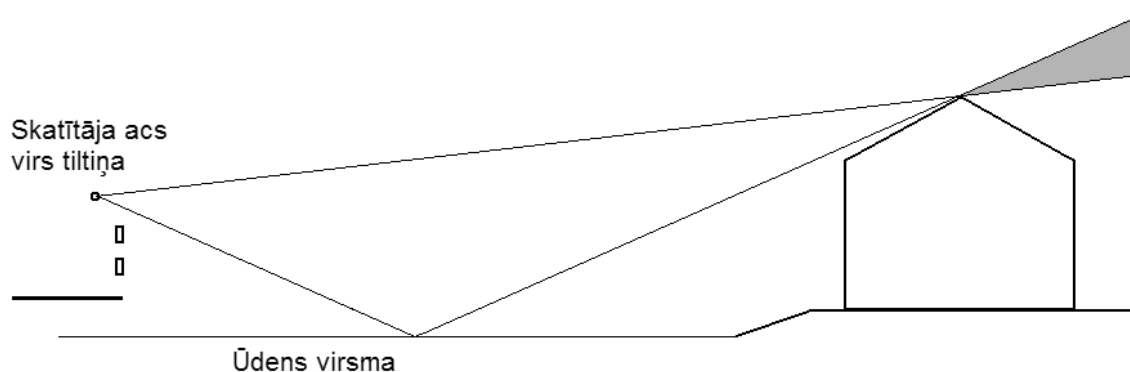
Aplūkosim shematisku šīs ainās šķēlumu ar vertikālu plakni, kas iet caur mēnesi un ainās skatītāja aci (att. KomMG1):



Att. KomMG1. Shematisks gleznā attēlotās ainās šķēlums ar vertikālu plakni, kas iet caur mēnesi un ainās skatītāja aci.

Ar pārtrauktu līniju shematiskajā šķēlumā ir attēlots tas no mēness nākošās gaismas stars, kas atstarojoties no ūdens virsmas arī nonāktu skatītāja acī – nonāktu, ja vien tā ceļu neaizšķērsotu gleznā redzamā ēka.

Ēka nav šķērslis tikai bezgalīgi tālā mēness atspulga redzamībai. Elementāra ģeometriskā konstrukcija (att. KomMG2) parāda to šķēluma plaknes zonu, kurā esošie objekti ir redzami tieši, bet nav redzami atspulgā:

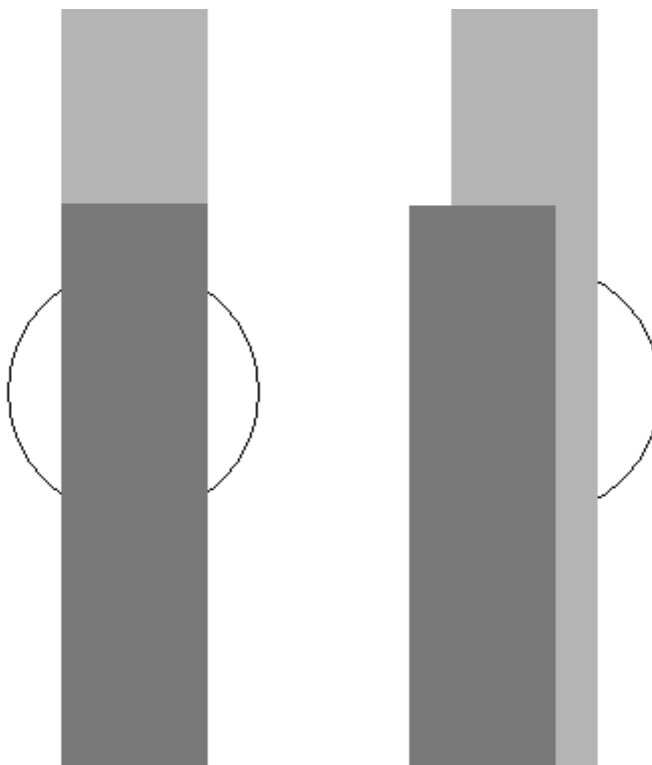


Att. KomMG2. Šķēluma plaknes zona (pelēkā krāsā), kurā esošie objekti ir redzami tieši, bet nav redzami atspulgā.

Slotas kāts un zīmulis

Lai gan pirmajā brīdī nāk prātā domas par gaismas apliekšanos ap šķēršļiem, tomēr parādības pamatā ir diezgan elementāra staru ģeometriskā optika.

Iedomāsimies skatītāja aci kādā ekrāna punktā zīmuļa un kāta ēnu sakrītošu garenasu tuvumā un aplūkosim ainu, kādu viņš redz saules virzienā (attēls KomKZ1):



Att. KomKZ1. Skati saules virzienā no diviem ekrāna punktiem zīmuļa un kāta ēnu sakrītošu garenasu tuvumā.

Pa kreisi – skats no sakrītošo garenasu punkta.

Pa labi – skats no sakrītošajām asīm nedaudz pa labi esoša punkta.

Konkrēta ēnu konfigurācija ir atkarīga gan no iesaistīto objektu izmēriem, gan novietojuma telpā. Mūsu gadījumā svarīgi ir zīmuļa un kāta diametri – attiecīgi 0.8 un 2.4 cm, kā arī to attālums no ekrāna – attiecīgi aptuveni 1.2 un 3.5 m.

Zinot, ka saules diametra leņķiskais izmērs ir 0.5° , ne zīmulis, ne kāts sauli pilnībā neaizsedz, pie tam zīmuļa un kāta redzami leņķiskie platumi praktiski sakrīt.

Attēlā KomKZ1 pa kreisi ieskicēts skats no kāda sakrītošo garenasu punkta, bet pa labi no nedaudz uz labo pusi esoša punkta. Pirmajā gadījumā abi priekšmeti aizsedz vienu un to pašu saules diska apgabalu. Otrajā gadījumā abi priekšmeti nedaudz vizuāli pavirzījušies pa kreisi, pie tam zīmulis vairāk, nekā kāts, jo atrodas trīs reizes tuvāk skatītājam.

Rezultātā, otrajā gadījumā saules disks ir vairāk aizsegts, nekā pirmajā. Līdz ar to otrajā punktā nonāk mazāk gaismas nekā pirmajā un tādējādi ēnu sakrītošo garenasu punkti ir gaišāki par blakus esošajiem punktiem.

Stikla cilindrs

Lai pārlicinātos par aprēķinu un secinājumu pareizību, varam veikt vienkāršu eksperimentu – nevajag meklēt nekādas stikla caurulītes vai speciāli izdrotus cilindrus. Pietiek ar stikla burku ūdens un nelielu stikla glāzīti, ko iegremdējam līdz pusei ūdenī, kā tas redzams att. KomSC1 (ātrai lietas novērtēšanai pat nav vajadzīgs vāciņš, jo glāzīti var arī pieturēt ar roku):



Att. KomSC1. Neliela stikla glāzīte, iegremdēta burkā ar ūdeni.

Ūdens ap glāzīti imitē izdrotu stikla cilindru. Neliela atšķirība ir tikai gaismas laušanas koeficientā – ūdenim tas ir 1.33, atšķirībā no stikla 1.5.

Attēlā var nolasīt glāzītes robežas tieši pie ūdens virsmas. Robežas ārpus ūdens ir 81..180 pikseli, bet ūdenī 67..198 pikseli. Tātad glāzītes šķietamā un faktiskā diametru attiecība ir $132 : 100$, kas dod ūdens gaismas laušanas koeficienta novērtējumu 1.32. Pārsteidzoši precīzi!

Vēl var ievērot, ka ārpus ūdens ne glāzītei, ne burkai attēlā nav saskatāmas iekšējo virsmu robežas. Protams, var likties, ka tam traucē attēla zemā kvalitāte. Tāpēc ieinteresēts lasītājs tiek aicināts pats savām acīm aplūkot kādu savu stikla trauku.

Krāsainas ēnas

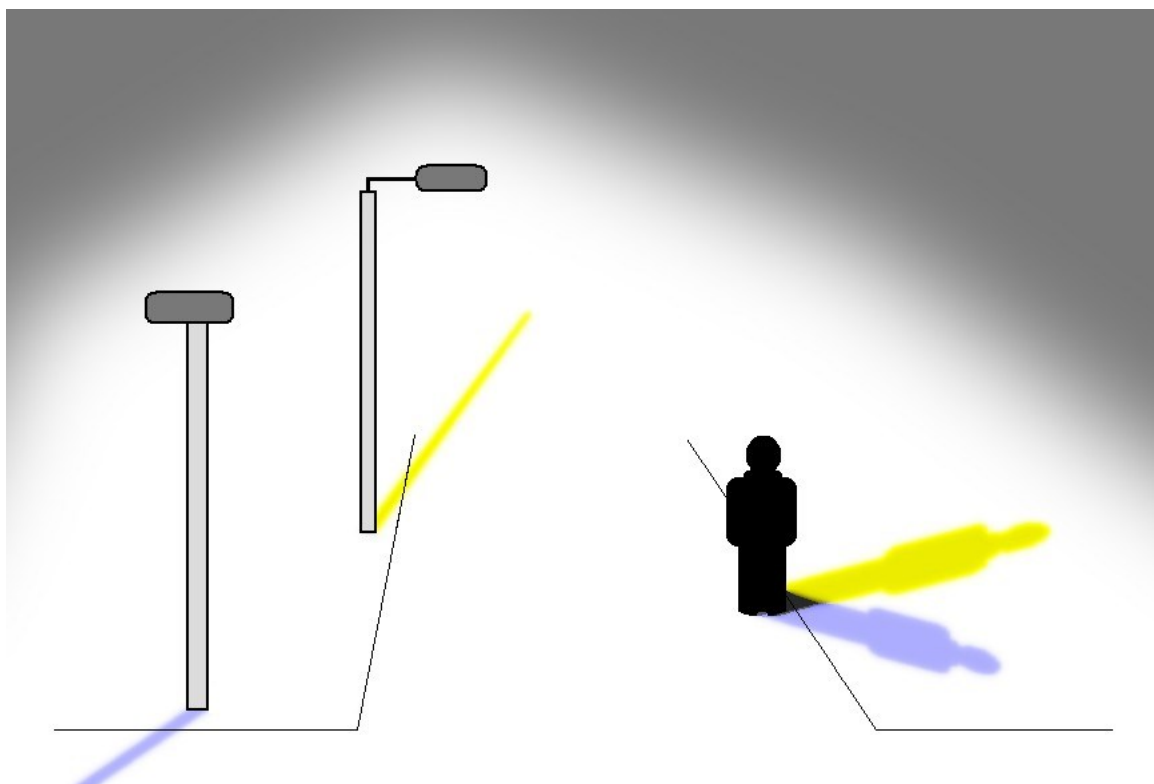
Atbildēsim uz mūsu jautājumiem to pretējā secībā.

1) Kas tās ir par krāsām? Protams, pieņemot, ka nav citu gaismas avotu, laternu apkārtni un tās objektus apgaismo laternu spuldzes. Tātad krāsas nosaka dzeltenīgā un zilganā starojuma mijiedarbība gan savstarpēji, gan ar objektu virsmām.

2) Kāpēc ziemas vakars? Zināms, ka starojumu krāsu lieki nesagrozītā veidā var novērot uz baltas virsmas. Tātad tieši ziemas vakars mums parasti nodrošina baltu sniega virsmu, uz kuras tad arī novērojam ēnas. Turklāt ziemas vakaros jau ir tumšs un laternas ir praktiski vienīgie stabilie apgaismojuma avoti.

3) Kāpēc ēnas ir krāsainas? Tas ir mūsu galvenais, bet arī ļoti vienkāršais jautājums. Ēna ir virsmas apgabals, kurā nenonāk tiešie stari no gaismas avota. Ja šis avots būtu vienīgais, tad ēna būtu praktiski melna, kā tas lielākoties arī ir. Tomēr, ja ir vēl otrs gaismas avots, tad tā starojums var apgaismot pirmā avota ēnas zonu un otrādi. Tātad katrs avots met savu starojumu otra avota ēnā, to attiecīgi iekrāsojot. Protams, ēnas ir redzamas uz kopējā apkārtējās virsmas fona, kuru abas laternas iekrāso vienlaicīgi ar savu starojumu summu, tātad krāsā, kas atšķiras no ēnu krāsām. Vēl var piezīmēt, ka ēnu metošā objekta tuvumā ir neliela zona, kurā nenonāk nevienas laternas gaisma – šī zona gan ir melna.

Att. KomKE1 shematiski parādīts iespējams un dabā novērojams ēnu krāsojums pie dzeltenīgas un zilgas laternu gaismas. Ļausim lasītājam pašam izsecināt, kura laterna dod kādu krāsu.



Att. KomKE1. Shematisks zīmējums: no divām dažādu krāsu laternu gaismām ziemas vakarā gājējs met divas dažādi iekrāsotas ēnas. Lasītājam pats var izsecināt, kura laterna dod kādu krāsu.

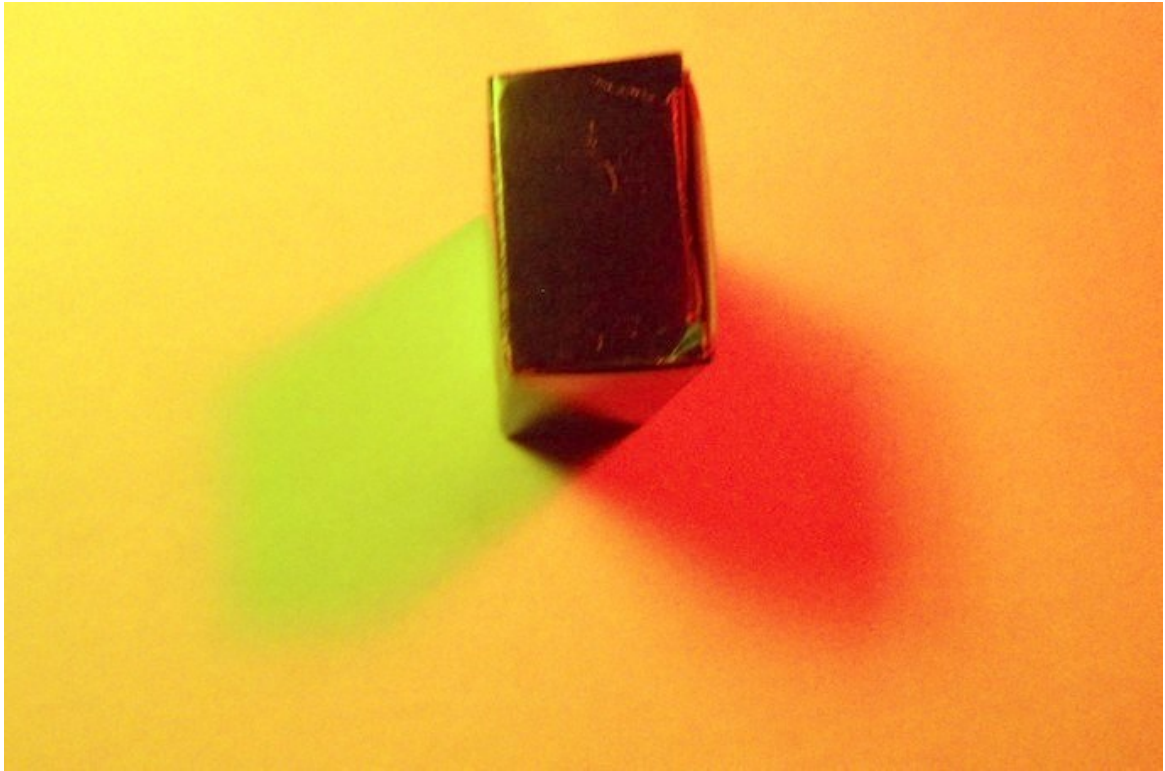
Tomēr aprakstītā efekta novērošanai nepavisam nav jāgaida sniegti ziemas vakari piemērotā ielu krustojumā. To pašu var panākt ar pavisam ikdienišķām istabas lietām, kas gadījušās pa rokai – divas galda lampas, ietītas dažādu krāsu iepirkumu maisiņos, un neliela uz balta kartona vertikāli novietojama kastīte, piemēram, vadu stiprinājumu iepakojums uz jauna krekla kartona ieliktņa. Istaba pat var nebūt speciāli iekārtota, kā tas redzams att. KomKE2, kur lietas sablīvētas vienā kaktā logu maiņas gaidās:



Att. KomKE2. Improvizēts laboratorijas iekārtojums krāsaino ēnu novērošanai. Lietotas ikdienišķas istabas lietas, kas gadījušās pa rokai – divas galda lampas, ietītas dažādu krāsu iepirkumu maisiņos, un neliela uz jauna krekla kartona ieliktņa vertikāli novietota vadu stiprinājumu kastīte.

Att. KomKE3 parādīts nofotografēts skats, kāds novērojams uz baltā kartona, kad naktī iedegtas vien abas ievīstītās galda lampas.

Labi redzamas abas krāsainās ēnas, šoreiz zaļa un sarkana. Tāpat saprotama ir fona dzeltenā krāsa, ko dod zaļās un sarkanās gaismas starojumu summa.



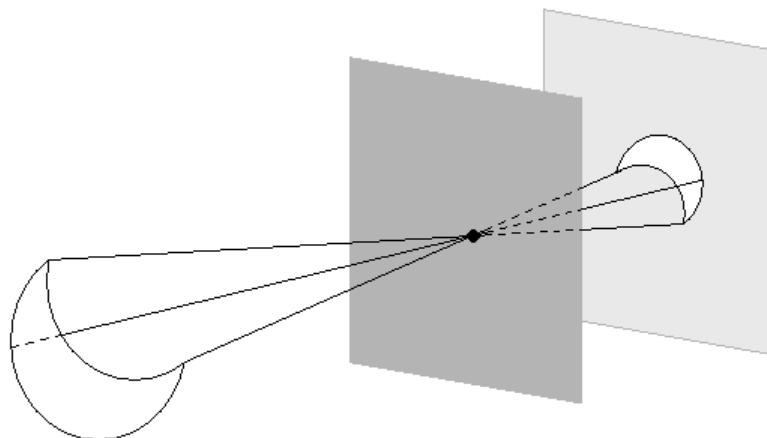
Att. KomKE3. Nofotografēts skats, kāds novērojams improvizētajā laboratorijā uz baltā kartona, kad naktī iedegtas vien abas ievīstītās galdā lampas. Redzamas abas krāsainās ēnas – zaļa un sarkana, kā arī dzeltenais fons, ko iekrāso zaļās un sarkanās gaismas starojumu summa.

Aplūkotā parādība pieminēta arī Internetā – var meklēt pēc vārdiem *colored shadows*.

Saule caur lapotni

Bija jautājums – kas ir šie aplīši un kāpēc tieši aplīši?

Lai atbildētu, atceramies tādu ierīci kā *camera obscura* (http://en.wikipedia.org/wiki/Camera_obscura), kas ir noslēgta kaste, kuras vienā sīnā izdurts neliels caurumiņš. Daļa gaismas staru no gaiša objekta, izejot caur caurumiņu, rada šī objekta attēlu uz kastes pretējā sīna iekšējās virsmas – attēls KomSL1:



Att. KomSL1. *Camera obscura* uzbūves un darbības shēma. Noslēgta kaste, kuras vienā sīnā izdurts neliels caurumiņš, un daļa gaismas staru no gaiša objekta, izejot caur caurumiņu, rada šī objekta attēlu uz kastes pretējā sīna iekšējās virsmas.

Ja kastes sīnā būtu izveidoti vairāki caurumiņi tad vienlaicīgi rastos vairāki objekta attēli, kas varētu arī savstarpēji pārklāties. Turklāt nav obligāti caurumiņu sīna virsmai būt precīzi plakanai – tā var sastāvēt arī no vairākiem nesaistītiem slāņiem, un caurumiņi tad veidojas kā starpslāņu spraugas. Protams, šīm spraugām jābūt nelielām un arī atbilstošajiem slāņiem ne pārāk tāliem vienam no otra. Visas šādas atkāpes no ideāla caurumiņa kropļo attēlus, galvenokārt padarot tos neasus.

Mūsu gadījumā lapotne un virsma, uz kuras novērojam lapotnes ēnu, veido savdabīgu *camera obscura* variantu, kurā spraugas starp lapām darbojas kā daudzi caurumiņi, bet attēlu radošais gaišais objekts ir saule.

Tieši saules diska apaļā forma tad ir lapotnes ēnā redzamo gaišo aplīšu cēlonis, un lapotnes spraugu neregulārā struktūra šos aplīšus dara vairāk vai mazāk izplūdušus, vai pat lielāko daļu no tiem sapludina kopā.

Ieinteresēts vērotājs skaidrā saulainā laikā šādus aplīšus zem koku lapotnēm (patiesībā pie jebkurām analogiskām telpiskām struktūrām, kaut vai pie cieši nesakļautiem roku pirkstiem) var ieraudzīt vienkārši zem kājām uz ietvēm. Ja laika apstākļi tam nav piemēroti, tad var „pabraukāt” pa *Google Street View* maršrutiem, ieraugot, piemēram, attēlā KomSL2 redzamo skatu.



Att. KomSL2. Saules aplīši uz Laimdotas ielas Rīgā *Google Street View* redzējumā.

Mūsu jautājuma otrā daļa vaicā – kāpēc tieši aplīši? Pamatā jautājums ir atbildēts – tāpēc, ka saules redzamais disks ir apaļš. Tomēr, tā nav vienmēr. Reizēm sauli daļēji aizsedz mākoņi, kas arī ir pamanāms aplīšos. Taču viens no iespaidīgākajiem saules redzamās formas izmaiņas gadījumiem ir saules aptumsums, kad biežāk novērojamā saules redzamā forma ir sirpis.

No izklāstītā seko, ka šāda daļēja saules aptumsuma laikā aplīšu vietā lapotnes ēnā jāparādās sirpīšiem. Patiešām, tā arī ir – attēls KomSL3 to uzskatāmi demonstrē!

Attēlu KomSL3 1999. gada vasarā uzņēmis šī krājuma autors sadarbībā ar meitu Benitu. Attēls tika iesniegts 1999. g. “Zvaigžņotā debess” un Latvijas Astronomijas biedrības Saules aptumsuma novērojumu konkursā “Interesants fotoattēls”, kurā tam tika piešķirta otrā vieta (jādomā, ka tikai otrā vieta tāpēc, ka nav fotografēta pati saule) – sk. “Zvaigžņotā debess”, 1999/2000. gada ZIEMA (166).



Att. KomSL3. Koku lapotnes ēna daļēja saules aptumsuma laikā.
Gaišo aplīšu vietā redzami daudzi sirpīši.

PIELIKUMS 1

Lekcija par stereoattēliem

Šo rindu autora lekcija, kuru 2010. gada pavasarī organizēja Latvijas Universitātes Datorikas fakultātes Studentu padome.

Seko lekcijas prezentācijas slaidi.

Stereoattēli

1

Pamatnostādnes

- Mūs interesē attēli kā krāsu plankumi uz vairāk vai mazāk plakanas virsmas.
- Precīzāk, ar attēlu saprotam plakānu virsmu, kuras katrs punkts emitē elektromagnētisko starojumu.
- Svarīga starojuma īpašība ir enerģijas sadalījums telpā.
- Ja katram attēla punktam tas skatītāja pusē ir *vienmērīgs*, tad teiksim, ka attēls ir *perfekts*.
- Neperfekti attēli dažādiem skatītājiem var vienlaicīgi izskatīties dažādi.

2

- Būtiska lieta ir attēla informatīvais saturs.
- Svarīgs šī satura aspekts ir vizuālais reālisms.
- Viens reālisma moments ir lietu attēlošana uz ekrāna virsmas tā, lai radītu telpiskas ainas iespaidu.
- Liela nozīme ir ekrāna tehniskajam risinājumam.
- Klasiski varianti ir alus siena, papīra lapa, audekls, kinoekrāns, datora monitors.
- Telpiskumu nodrošina, speciāli organizējot attēla struktūru.

3

- Divas galējības – mono attēls, piemēram, glezna, kurā autors ar vizuālās izteiksmes līdzekļiem cenšas panākt iecerēto iespaidu – t.sk. telpiskuma izjūtu, faktiski ilūziju.
- No telpiskuma viedokļa ideāls variants ir hologrāfisks ekrāns – optisks aparāts, kas rada ainai atbilstošu fizikāli korektu viļņu fronti.
- Abos gadījumos attēli skatāmi bez palīgierīcēm.
- No mūsu definīcijas viedokļa pirmais gadījums ir perfekts attēls, otrs – tieši pretējs.

4

- Reālai telpiskuma izjūtai nepieciešams katrai skatītāja acij likt redzēt savu attēlu, kuri atbilst dažādiem skata punktiem.
- Hologrāfija to nodrošina automātiski.
- Citos gadījumos nepieciešamas speciālas konstrukcijas.
- Minimums ir divi attēli – kreisais un labais.
- Skatītājam tos var pasniegt savietotus, kā vienu komplicētu attēlu, vai atklāti divus attēlus.

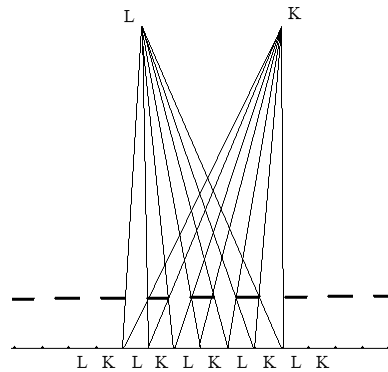
5

Savietotie attēli

- Ir vairāki attēlu savietošanas veidi un tiem atbilstošas attēlu skatīšanās palīgierīces.
- Skatīšanās palīgierīces var būt gan pie attēlu virsmas, gan pie skatītāja acīm.
- Idejiski vienkāršākā tehnika ir joslu maskas lietošana.

6

- Joslu maskas tehnika prasa ekrānu sadalīt vienāda platuma vertikālās joslās, kurās pamīšus izvietoti kreisais un labais attēli.



- Ekrāna priekšā novietots necaurspīdīgu joslu režģis.
- Pareizi aprēķināts, režģis ļauj katrai acij redzēt vienīgi tai paredzēto attēlu.

7

- Joslu maskas tehnika lietojama gan kino, gan atklātnēs, principā, pat datoru monitoros.
- Reāli necaurspīdīgo joslu režģa vietā izmanto garenu cilindrisku stikla vai plastmasas lēcu režģi.
- Svarīgi, ka šī tehnika neprasa nekādas individuālas skatīšanās palīgierīces.
- Tomēr būtiski ir acis noturēt nemainīgā pozīcijā, kas ļoti nogurdina.

8

- Savietošana var tikt realizēta arī secīgos laika sprīžos periodiski mainot attēlus.
- Tad vienlaicīgi viss ekrāns atvēlēts veselam attēlam.
- Skatītājam nepieciešams aizsegt attēlam neatbilstošo aci.
- Tas jā dara ar individuālu skatīšanās palīgierīci, kas attēlu maiņas ritmā aizsedz un atsedz attiecīgo aci.
- Tāda ierīce ir pietiekoši komplicēta, tomēr tā atbrīvo no nepieciešamības fiksēt acu stāvokli.

9

- Atbrīvošanās no nepieciešamības fiksēt acu stāvokli ir varbūt pat galvenais ieguvums no individuālajām skatīšanās palīgierīcēm arī pie citām attēlu demonstrēšanas tehnikām.
- Vēl individuālu skatīšanās palīgierīču lietojums ļauj pilnīgāk izmantot ekrānu tehnoloģijas.
- Piemēram, vienlaicīgi uz ekrāna var būt arī pilni abi attēli, bet to atšķiršana tad jāveic uz gaismas īpašību pamata.
- Polarizētas gaismas izmantošana te ir moderns risinājums.

10

- Iepriekš minētie paņēmieni tomēr nav vienkārši lietojami amatieru līmenī.
- Elementāri ir savietotos attēlus iegūt, pielietojot krāsu dalīšanu.
- Standarts ir sarkans kreisais attēls, gaiši zils (cyan) labais attēls.
- Šādus stereoattēlus sauc par anaglifu stereoattēliem (anaglyph images).
- Skatīšanās palīgierīce ir divu krāsu brilles, kas katras acs priekšā tur attiecīgos gaismas filtrus.

11

- Anaglifu stereoattēls:

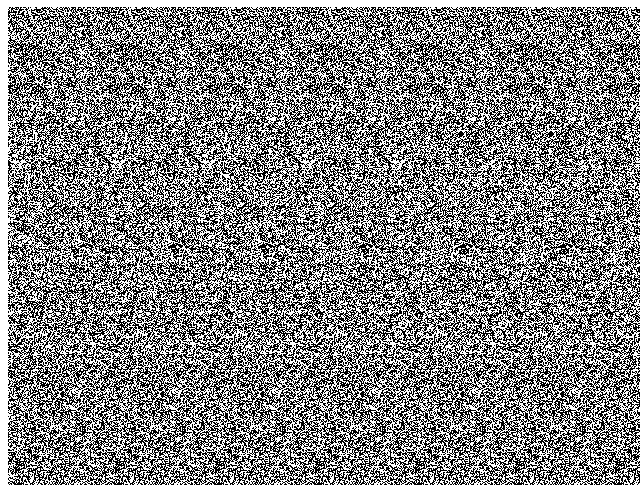


12

- Interesants savietoto attēlu variants ir t.s. autostereogrammas, jeb “maģiskā acs” (autostereogram, Magic eye).
- Faktiski, šajā tehnikā īstu objektu attēlu nemaz nav, bet telpiskā dziļuma informācija ir iekodēta attēla struktūrā.
- Pamatā ir vertikālu joslu periodisks režģis, kura regulāras deformācijas skatītāja acis un smadzenes interpretē kā signālu par attālumu.
- Nav vajadzīgas nekādas palīgierīces, bet attēli jāskatās īpašā veidā, kas prasa lielāku vai mazāku acu treniņu.

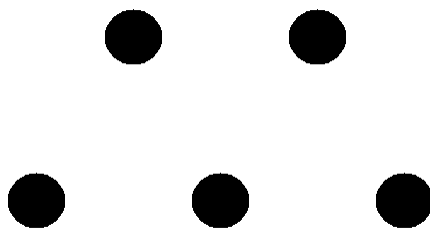
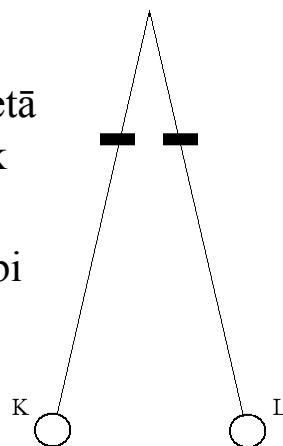
13

- Maģiskās acs attēla piemērs:



14

- Treņiņa attēls – skatoties uz diviem augšējiem apļiem, to vietā jāierauga trīs apļi, līdzīgi zemāk attēlotajai trīs apļu virknei.
- Acu skata līnijām jāveido pa labi redzamā konfigurācija.



- Apļi atbilst maģiskās acs attēla periodiskajām joslām.

15

- Maģiskās acs attēlu sintēzes algoritms principā ir vienkāršs – sevišķi, ja ņem talkā Internetu.
- Internetā atrodams arī milzīgs klāsts gatavu dažāda krāšņuma attēlu:



16

Stereopāri

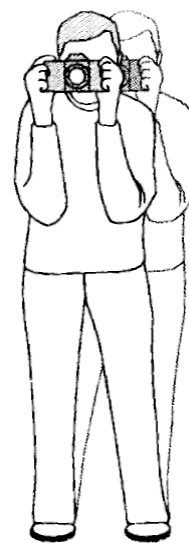
- Jau pats termins (stereo pair) nozīmē, ka tiek veidoti divi nesavietoti attēli.
- No iegūšanas viedokļa tas ir elementārākais telpisku attēlu veids.
- Piemēram, vienkārši divas fotogrāfijas, vienlaicīgi uzņemtas no dažādiem skata punktiem.
- Uzņemšanas rakursiem jābūt saskaņotiem un jāatbilst novērotāja acīm.

17

- Vienlaicīgumu nodrošina divas vienā korpusā ievietotas fotokameras ar kopēju slēdzi.
- Amatiera praksē var izlīdzēties ar divām pēc kārtas uzņemtām fotogrāfijām, nedaudz mainot to horizontālo stāvokli.
- Mēreni tuvu ainu uzņemšanai pietiek mainīt fotogrāfa uzsvaru uz kājām, kas izvērstas plecu platumā.
- Fotokameru var arī vienkārši pārbīdīt pa horizontālu virsmu.

18

- Tālāk redzami melnbaltie un viens krāsu stereopāri ir šī materiāla autora uzņemti pagājušā gadsimta 60–70-tajos gados ar pirmo paņēmienu – shēma pa labi.
- Savukārt otrais krāsu stereopāris autora vadībā uzņemts ar palodzi pārbīdītu mūsdienu digitālo kameru:



19



20



21

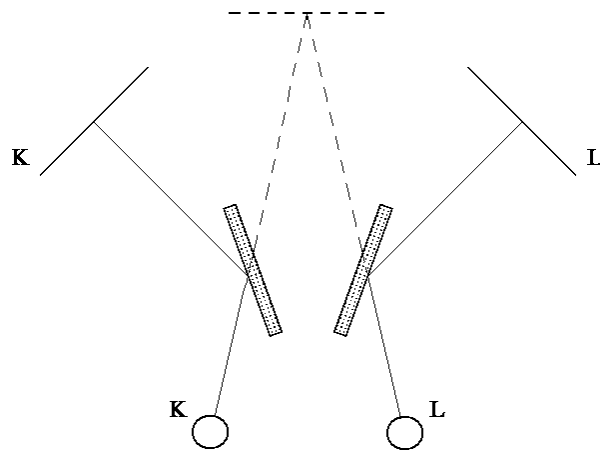


22

- Kā jāskatās stereopāri?
- Visērtāk ir izmantot nopērkamu vienkāršu speciālu ierīci – stereoskopu (stereoscope).
- Stereoskopa uzdevums ir novirzīt no attēliem nākošo gaismu tā, lai katra acs redzētu tai paredzēto attēlu.
- Divi vienkāršākie stereoskopu uzbūves principi ir
 - spoguļu stereoskops,
 - prizmu stereoskops.

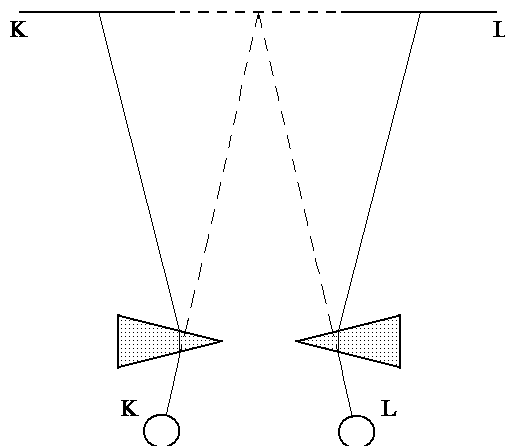
23

- Spoguļu stereoskopa uzbūve:



24

- Prizmu stereoskopa uzbūve:



25

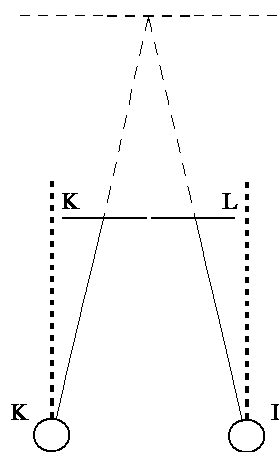
- Prizmu stereoskopi ir visizplatītākie, jo tie ir kompakti un neliela izmēra.
- Svarīgi atzīmēt, ka stereoskops ļauj attēlus skatīt bez acu piepūles un, atkarībā no konstrukcijas, pie dažādiem attēlu izmēriem.
- Ja tomēr stereoskopa nav, stereopārus var skatīties arī ar neapbruņotām acīm, bet pie zināmām iemaņām un ierobežojumiem.

26

- Lai stereopārus skatītos ar neapbruņotām acīm, jāapgūst iemaņas, kas līdzīgas maģiskās acs skatīšanās prasmei.
- Proti, nav jāskatās tieši uz attēlu plakni, bet gan tālāk vai tuvāk par to, panākot attēlu dubultošanos, kreisā un labā attēlu saplūšanu un, pēc kāda laika, asuma iestāšanos.
- Lai gan standarts ir skatīšanās **tālāk** par attēlu plakni, tomēr Internetā atrodami daudzi pretēji sakārtoti stereopāri.
- Tieši pēdējiem nepieciešama skatīšanās **tuvāk** par attēlu plakni.

27

- Skatīšanās tālāk par attēlu plakni neprasa īpašu acu piepūli, tā pat atpūtina acis.
- Tomēr attālums starp attēlu centriem nedrīkst pārsniegt attālumu starp skatītāja acīm (apm. 7 cm), jo cilvēka acu muskulatūra neļauj acis izvērst uz ārpusi.

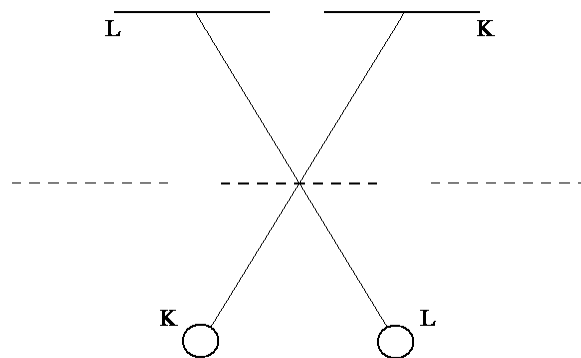


28

- Savukārt, skatīšanās tuvāk par attēlu plakni prasa acis vairāk vai mazāk sasprindzināt.
- Tomēr šim skatīšanās veidam ir pāris priekšrocību:
 - ir cilvēki, kas nevar, neprot vai negrib iemācīties standarta skatīšanos tālumā, tomēr šis paņēmiens viņiem izdodas,
 - nav principiālu ierobežojumu uz attēlu izmēriem un attālumiem starp attēlu centriem.

29

- Acu skata līniju konfigurācija pie skatīšanās tuvāk par attēlu plakni:



30

- Tuvāk par attēlu plakni skatāms stereopāris:



L



K

31

Lekcija par krāsu uztveri

Šo rindu autora lekcija Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas un Datorikas fakultātes kursiem „Datoru grafika” un „Datoru grafikas un attēlu apstrādes pamati”. Kursi pasniegti kopā ar kolēģiem Kārli Freivaldu un Rūdolfu Opmani.

Lekcijas materiāls sākts izstrādāt 1990-to gadu sākumā. Sekojošie lekcijas prezentācijas slaidi izstrādāti 2012. gadā.

Temats 6

Krāsu uztveres matemātiskās teorijas pamati

Pasniedzēji: *Kārlis Freivalds*
Paulis Ķikusts
Rūdolfs Opmanis

1

Ievads

- Mūsu galvenie jautājumi ir – kas ir krāsa, kāda ir visu krāsu kopuma struktūra?
- Svarīgs ir arī jautājums, vai krāsa ir objektīva novērojamo lietu īpašība, vai subjektīvs novērotāja priekšstats par šīm lietām?
- Pēdējā sakarā uzreiz sāksim ar atzinumu, ka krāsu fenomenam ir divi pamati:
 - objektīvās, no skatītāja neatkarīgas fizikālās elektromagnētiskā starojuma īpašības,
 - subjektīvās, skatītāja bioloģiskās uzbūves īpašības.

2

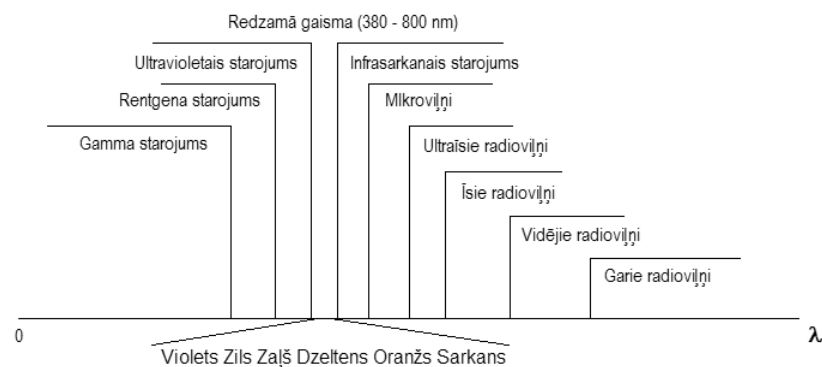
Krāsu fenomena fizikālais pamats

Elektromagnētiskais starojums un tā diapazoni

- Krāsu izjūtu izsauc novērotāja acī nokļuvušais elektromagnētiskais starojums.
- Elektromagnētiskā starojuma ietekme uz dažādām gan fizikālām, gan bioloģiskām struktūrām ir atkarīga no šī starojuma viļņu garuma.
- Sekojošā diagrammā īsi uzskaitīti viļņu garuma diapazoni, kuru ietvaros elektromagnētiskais starojums izpaužas vairāk vai mazāk vienādi.

3

- Elektromagnētiskā starojuma viļņu garuma diapazoni



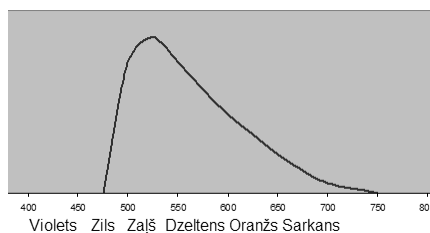
4

Elektromagnētiskā starojuma intensitātes blīvuma funkcija

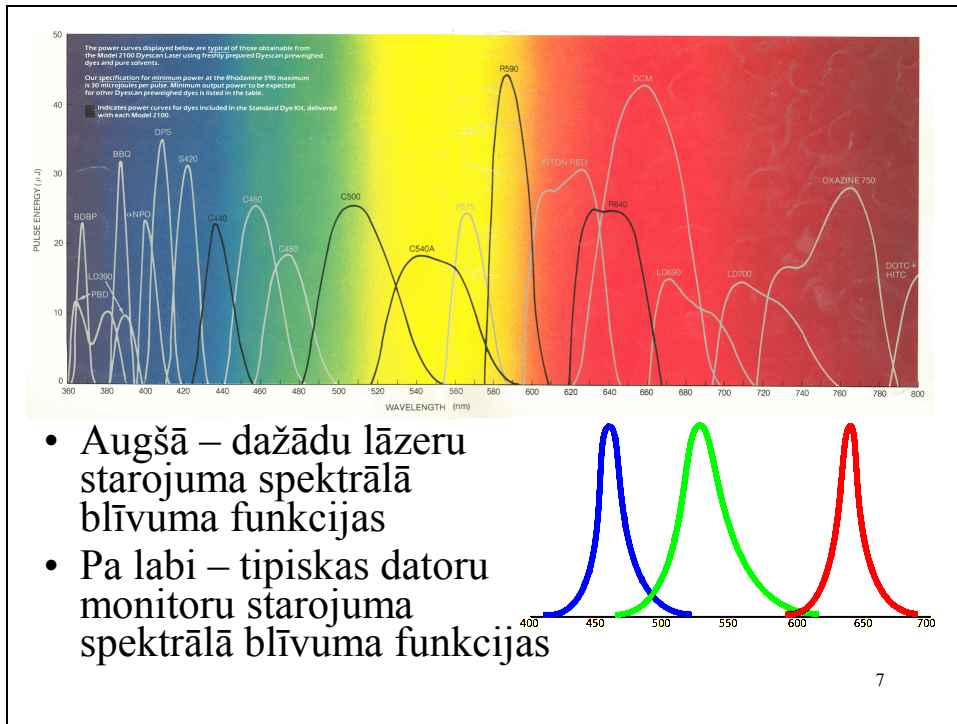
- Svarīgākais elektromagnētiskās enerģijas starojuma konkrēta avota raksturotājs ir tā intensitātes spektrālais sadalījums.
- Matemātiski to apraksta intensitātes *spektrālā blīvuma funkcija* $E(\lambda)$.
- Tās galvenā īpašība ir, ka starojuma intensitāti fiksētā viļņu garumu intervālā (λ_1, λ_2) izsaka izteiksme
$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda.$$

5

- No funkcijas $E(\lambda)$ var redzēt tādus svarīgus starojuma parametrus, kā lielākās intensitātes viļņu garumu diapazoni, maksimālo un minimālo intensitāšu viļņu garumi, un tml.
- Piemēram, sekojošais grafiks rāda, ka avots izstaro galvenokārt zaļo gaismu:



6



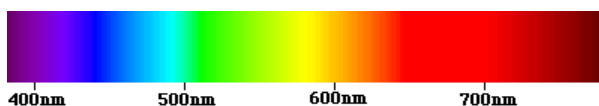
7



8

Elektromagnētiskā starojuma redzamais diapazons

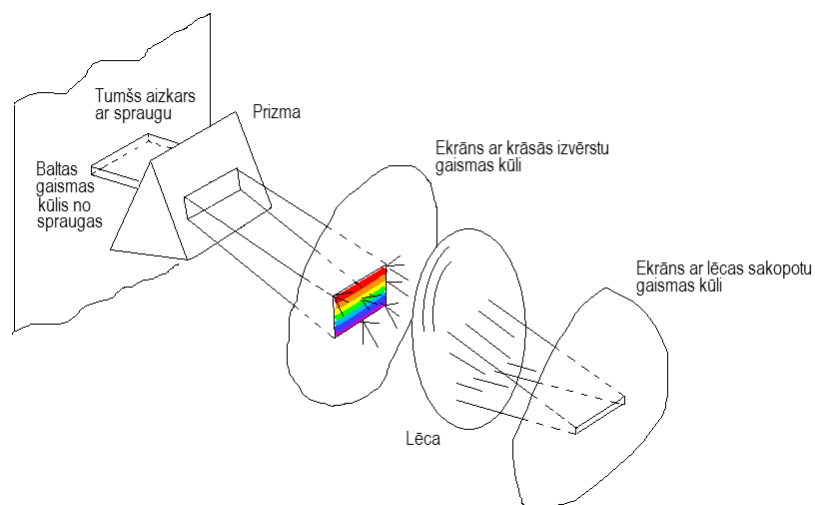
- Redzamā diapazona gaismu mūsu acs redz daudzkrāsainu:



- Ikdienā par to liecina gan varavīksne, gan gaismas lūšana dažādos stikla priekšmetos.
- Sistemātiskus gaismas krāsainības pētījumus aizsāka jau Ņūtons.

9

- Ņūtona eksperimenta shēma:

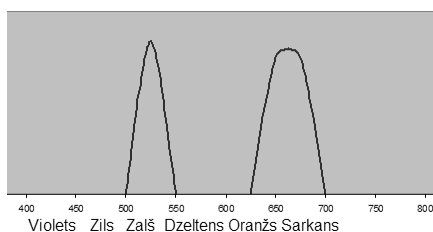


10

- Sevišķi interesanta ir Ņūtona eksperimenta shēmas otrā daļa, kad lēca sakopo krāsās izvērsto gaismas kūli.
- Eksperimentu var attīstīt tālāk, liekot lēcai sakopot atsevišķas krāsainās gaismas joslas, kad pārējās joslas ir aizsegtas ar kādu necaurspīdīgu materiālu.
- Piemēram, ļaujot caur lēcu iet tikai zaļajai un sarkanajai gaismai, atklājam, ka to sakopojums ir dzeltenā krāsā.

11

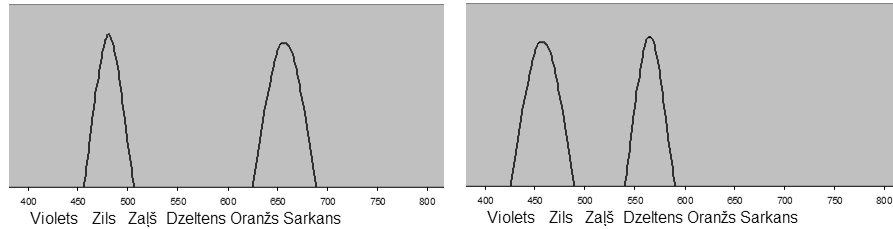
- Iepriekš teiktais nozīmē, ka tiek summēti elektromagnētiskie starojumi ar apzināti izvēlētu intensitātes sadalījumu.
- Konkrētajam divu krāsu piemēram apvienotais intensitātes sadalījums ir aptuveni sekojošs:



- Saprotams, ka apvienotā sadalījuma funkcija ir abu krāsu starojumu sadalījumu summa
- $$E_{\text{apvienotais}}(\lambda) = E_{\text{zaļš}}(\lambda) + E_{\text{sarkans}}(\lambda).$$

12

- Interesanti, ka arī balto gaismu var iegūt sajaucot vien divu krāsu starojumus.
- Divi piemēri:



- Tas tālāk tiks izskaidrots, pakāpeniski iedziļinoties krāsu fenomena būtībā.

13

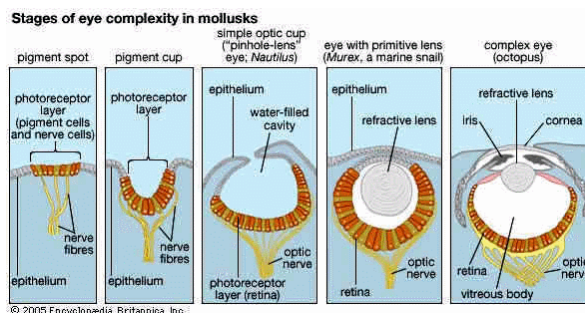
Krāsu fenomena bioloģiskais pamats

Acs uzbūve

- Gan mūsu acs, tāpat arī fotokameras vispārējs vienkāršots modelis ir t.s. *camera obscura*.
- Tā ir tumša noslēgta telpa, kuras viena siena ir plakana un kurai pretējā sienā izveidots neliels caurumiņš.
- Apkārtējās gaismas stari caur caurumiņu nokļūst uz plakanās sienas un izgaismo tur ārējo objektu attēlus, realizējot objektu *centrālo projekciju*.

14

- Pastāv atzinums, ka acs evolūcijas ceļā ir attīstījusies no vienkārša dobuma līdz camera obscura un līdz pilnvērtīgai acij ar lēcu un pārējiem acs orgāniem.
- Lūk, iespaidīga iespējamās attīstības ilustrācija:



15

Gaismas jūtīgās šūnas

- Atšķirībā no primitīvās camera obscura, acij nepietiek tikai ar attēla izveidošanu – attēls ir jānovada uz tālākiem apstrādes līmeņiem.
- Šim nolūkam kalpo speciālas gaismas jūtīgas šūnas, kas izvietotas pa visu acs ābola iekšējās virsmas aizmuguri, t.s. *tīkleni*.
- Gaisma tādā šūnā ierosina īpašas vielas, *rodopsīna*, ķīmisku reakciju, kuras rezultāts ir elektroķīmisku impulsu virkne, kas pa no šūnas izejošu nervu šķiedru ceļo uz citām šūnām.
- Arī klasiskajā fotogrāfijā izmanto vielu, parasti sudraba halogēnu, spēju reaģēt uz gaismu.

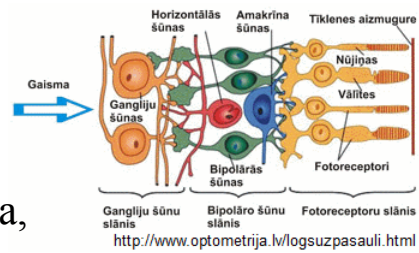
16

- Gaismas jūtīgās šūnas reakcija uz starojumu ir atkarīga gan no starojuma intensitātes spektrālā sadalījuma $E(\lambda)$, gan no pašas šūnas individuālā jūtīguma uz starojumu dažādās spektra zonās.
- Šo jūtīgumu apraksta speciāla *spektrālā jūtīguma funkcija* $S(\lambda)$, kas ir atšķirīga no nulles tikai redzamās gaismas diapazona robežās $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$.
- Savukārt šūnas un konkrēta starojuma savstarpējās sadarbības stiprumu matemātiski izsaka izteiksme

$$\alpha(E(\lambda)) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} E(\lambda)S(\lambda)d\lambda.$$

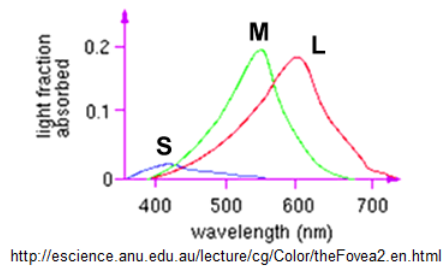
17

- Izrādās, ka primātu acs tīklenē ir pavisam četri tipi gaismas jūtīgo šūnu, kuras pēc būtības atšķiras tikai ar spektrālā jūtīguma funkcijām.
- Principiāli atšķirīgs gan ir arī šo šūnu anatomiskais izvietojums tīklenē, un atšķirīga to forma, kura ir divu tipu, t.s. *nūjiņas* un *vālītes*:



18

- Nūjiņas galvenokārt ir izvietotas acs tīklenes perifērijā un ar sānu skatu ļauj pelēkos toņos redzēt ļoti vājā apgaismojumā.
- Vālītes nodrošina krāsu redzi un ir izvietotas tīklenes centrālajā daļā.
- Vālīšu spektrālā jūtīguma funkcijām ir trīs veidi – S, M un L, kuru būtiskā atšķirība ir maksimumu izvietojumā:



19

Krāsu fenomena matemātiskais modelis

Vektoriālais integrāloperators

- Krāsas izjūtu smadzenes rada nevis par atsevišķām vālītēm, bet gan par nelieliem tīklenes laukumiņiem, kuros izvietots apmēram vienāds daudzums visu trīs tipu vālīšu un uz kurām iedarbojas aptuveni vienāda spektrālā sastāva elektromagnētiskais starojums.
- Šādam laukumiņam tiek piekārtota informācija par katra tipa vālīšu reakcijām:

$$\alpha_1(E), \alpha_2(E), \alpha_3(E).$$

20

- Tādējādi krāsas izjūtu matemātiski var modelēt ar trīs reālu skaitļu kortežu, kurš savukārt interpretējams kā 3D punkts ar attiecīgo rādiusvektoru

$$\vec{\alpha}(E) = (\alpha_1(E), \alpha_2(E), \alpha_3(E)).$$

- Izvēršot šī vektora komponentes kā attiecīgo vāļišu reakcijas izsakošos integrāļus, arī vāļišu spektrālā jūtīguma funkciju kortežu

$$(S_1(\lambda), S_1(\lambda), S_1(\lambda))$$

var kompakti pierakstīt kā *vektorfunkciju*

$$\vec{S}(\lambda) = (S_1(\lambda), S_1(\lambda), S_1(\lambda)).$$

21

- Līdz ar to krāsas izjūtas piekārtošana konkrētam elektromagnētiskajam starojumam $E(\lambda)$, kurš projicējies nelielā tīklenes laukumiņā, matemātiski izsakāma ar vektoriālu integrāloperatoru

$$\vec{\alpha}(E(\lambda)) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} E(\lambda) \vec{S}(\lambda) d\lambda.$$

- Šo piekārtojumu var uzrakstīt arī abstrakti

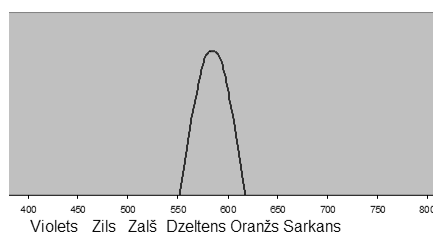
$$E(\lambda) \rightarrow \vec{\alpha}(E(\lambda)).$$

22

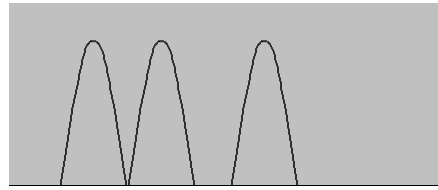
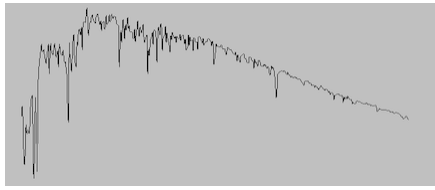
- Abstraktais piekārtojums, lai arī vienkāršas formas, norāda uz ļoti svarīgu krāsu redzes īpašību – *krāsu metamerismu*.
- Krāsu metamerisms ir parādība, kad pilnīgi dažādi starojumi, t.i. starojumi ar pilnīgi dažādām intensitātes spektrālā blīvuma funkcijām, izsauc vienu un to pašu krāsas izjūtu.
- Abstrakti raugoties, tas ir viegli saprotams, jo reālu funkciju kopa ir plašāka par 3D punktu kopu.

23

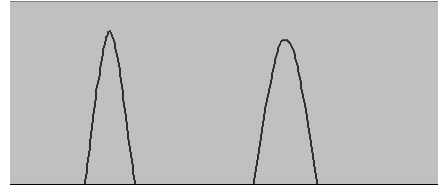
- Savukārt viens konkrēts ikdienišķs krāsu metamerisma piemērs ir dzeltenā gaisma.
- Atceramies, ka zaļā un sarkanā starojuma summai, kad redzam dzeltenu krāsu, starojuma intensitātes blīvuma funkcija ir ar **diviem** krasi izteiktiem maksimumiem.
- Bet zinot, ka dzeltenā krāsa ir varavīksnē, skaidrs, ka to dod arī attiecīgais dzeltenais starojums ar **vienu** blīvuma funkcijas maksimumu:



24



- Arī baltās gaismas metamērus mēs jau iepriekš esam aplūkojuši:
 - saules gaisma,
 - datoru monitora baltais starojums,
 - divu varavīksnes krāsu sajaukums divos veidos.



25

Krāsu ķermeņa ģeometriskā forma

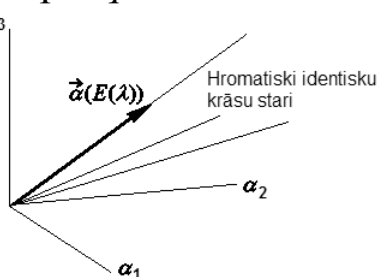
- Telpu, kurā izvietojas visi krāsu 3D punkti $\vec{\alpha}(E(\lambda))$ saucim par α -telpu.
- Kādu ģeometrisku struktūru veido visu šo punktu kopums, kuru sauc par *krāsu ķermeni*?
- Uzreiz skaidrs, ka dēļ $E(\lambda)$ un $S_i(\lambda)$ nenegatīvuma visi krāsu punkti atrodas tikai α -telpas pirmajā oktantā.

26

- Pavisam vienkārši redzēt, ka krāsu ķermenis ir kaut kāds konuss, kuru veido no α -telpas 0-punkta izejoši stari.
- Tiešām, līdz ar patvaļīgu krāsu punktu $\vec{\alpha}(E(\lambda))$ krāsu ķermenim pieder arī jebkurš punkts ar rādiusvektoru $\alpha(qE(\lambda))$, kur $q \geq 0$.
- Tā kā $\vec{\alpha}(qE(\lambda)) = q\vec{\alpha}(E(\lambda))$, tad skaidrs, ka krāsu ķermenim pieder viss vektora $\vec{\alpha}(E(\lambda))$ definētais stars, kas pozitīvajā virzienā iziet no 0-punkta.

27

- Iepriekšējā spriedumā svarīgs moments bija starojuma avota intensitātes regulējamība, kuru izsaka izteiksme $qE(\lambda)$ ($q \geq 0$).
- Tā regulēta starojuma avota krāsa nemainās, bet izstarotā gaisma vienīgi kļūst spožāka vai tumšāka līdz pilnīgi melnai pie $q = 0$.
- Saka, ka šādas krāsas ir *hromatiski identiskas*.
- Un visi hromatiski identisku krāsu punkti atrodas uz viena stara:



28

- Vēl svarīgāks moments ir divu starojuma intensitātes summas regulējamība, kuru izsaka izteiksme

$$q_1 E_1(\lambda) + q_2 E_2(\lambda) \quad (q_1 \geq 0, q_2 \geq 0).$$

- Apskatīsim speciālu regulēšanas gadījumu

$$q E_1(\lambda) + (1-q) E_2(\lambda) \quad (0 \leq q \leq 1).$$

- Tā kā

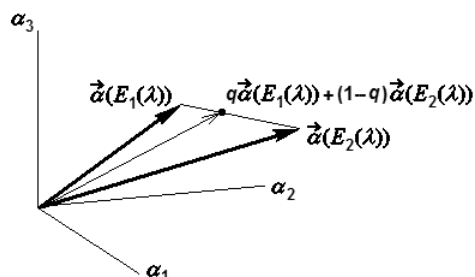
$$\vec{\alpha}(q E_1(\lambda) + (1-q) E_2(\lambda)) = q \vec{\alpha}(E_1(\lambda)) + (1-q) \vec{\alpha}(E_2(\lambda)),$$

tad šoreiz krāsu ķermenim pieder viss taisnes nogrieznis ar galapunktiem

$$\vec{\alpha}(E_1(\lambda)) \text{ un } \vec{\alpha}(E_2(\lambda)).$$

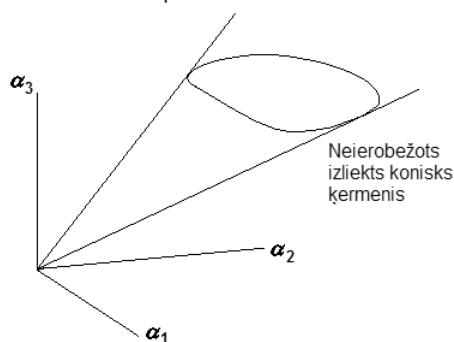
29

- Pa labi – divus krāsu punktus savienošais taisnes nogrieznis:



- Līdz ar to redzam, ka koniskais krāsu ķermenis ir arī izliekts.

- Citādu klasisku formas regularitāšu gan tam nav:



30

Tīro spektra krāsu izvietojums krāsu ķermenī

- Tā kā krāsu ķermeņa punkti atbilst krāsām, tad dabiski būtu tos attiecīgi iekrāsot.
- Atbildēsim uz jautājumu, vai šādā krāsojumā ir kāda sistēma?
- Pirmais sistēmas elements ir jau aplūkotās hromatiski identiskās krāsas.
- Tagad noskaidrosim, kāds ir hromatiski identisko krāsu staru savstarpējais izvietojums.
- Sāksim ar t.s. *tīrajām spektra krāsām*.

31

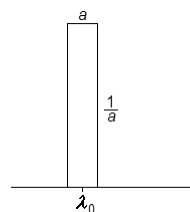
- Tīrā spektra krāsa ir tāds gaismas starojums, kura enerģija ir koncentrēta ļoti šaurā diapazonā.
- Idealizēta šāda starojuma intensitātes spektrālā blīvuma funkcija ir, piemēram,

$$\delta_{a, \lambda_0}(\lambda) = \begin{cases} \frac{1}{a}, & \text{ja } \lambda_0 - \frac{a}{2} \leq \lambda \leq \lambda_0 + \frac{a}{2}. \\ 0, & \text{pret. gad.} \end{cases}$$

- Tā ir fizikā lietotās Dīraka δ -funkcijas variants.

32

- Parametrs a norāda starojuma tīrības pakāpi, bet λ_0 – starojuma viļņa garumu.



- Savukārt funkcijas nenulles vērtība izvēlēta tā, ka starojuma pilnā intensitāte ir konstanti 1, neatkarīgi no tīrības parametra a lieluma:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta_{a, \lambda_0}(\lambda) d\lambda = 1.$$

33

- Tagad aprēķināsim tīrās spektra krāsas punktu α -telpā:

$$\begin{aligned} \vec{\alpha}(\delta_{a, \lambda_0}(\lambda)) &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \delta_{a, \lambda_0}(\lambda) \vec{S}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_0 - \frac{a}{2}}^{\lambda_0 + \frac{a}{2}} \delta_{a, \lambda_0}(\lambda) \vec{S}(\lambda) d\lambda = \\ &= \int_{\lambda_0 - \frac{a}{2}}^{\lambda_0 + \frac{a}{2}} \frac{1}{a} \vec{S}(\lambda) d\lambda \approx \frac{1}{a} \vec{S}(\lambda_0) \int_{\lambda_0 - \frac{a}{2}}^{\lambda_0 + \frac{a}{2}} d\lambda = \vec{S}(\lambda_0). \end{aligned}$$

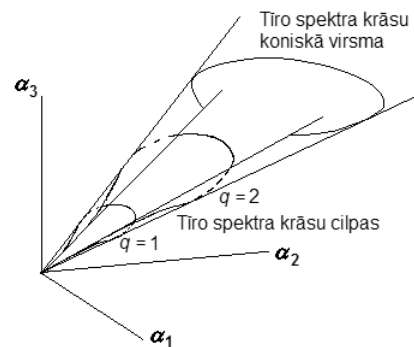
- Redzam, ka pietiekoši šaurā spektra diapazonā, tīrās krāsas punkta koordinātas ir vāļišu spektrālā jūtīguma vektorfunkcijas vērtības pie izvēlētajā viļņu garuma λ_0 .

34

- Tādējādi izrādās, ka no parametra λ atkarīgā vektorfunkcija $\vec{S}(\lambda)$ apraksta arī tīro spektra krāsu punktu ģeometrisko vietu, kas ir kaut kāda līkne α -telpā.
- Visi šīs līknes punkti atbilst starojumiem ar vienu un to pašu intensitāti, ko esam izvēlējušies par vienības lielumu.
- Ja starojumu intensitāti proporcionāli izmaina ar kaut kādu koeficientu q , iegūst jaunu līkni $q\vec{S}(\lambda)$.

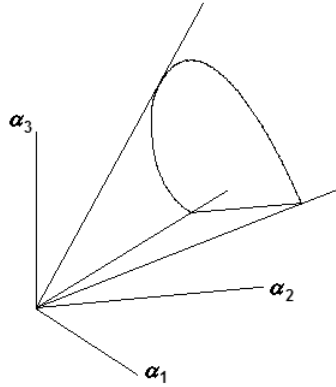
35

- Mūs interesējošajā λ intervālā ($\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$) visas līknes $q\vec{S}(\lambda)$ sākas un beidzas koordinātu sākuma punktā, t.i. *fiksētas intensitātes tīro spektra krāsu līkne ir cilpa*.
- Visas dažādiem $q \geq 0$ atbilstošās cilpas veido savdabīgu nenoslēgtu konisku virsmu, kuras vadule ir līkne $\vec{S}(\lambda)$, bet veidules – no koordinātu sākuma punkta izejošie stari:



36

- Iedziļinoties vektoriālā integrāloperatora īpašībās, var tālāk secināt, ka tīro spektra krāsu virsma ir daļa no visu krāsu koniskā ķermeņa virsmas.
- Dēļ izliektības, tā krāsu ķermeņa virsmas daļa, ko neveido tīro spektra krāsu virsma, ir plakana.
- Tādējādi pilna krāsu ķermeņa precīzāks izskats ir šāds:

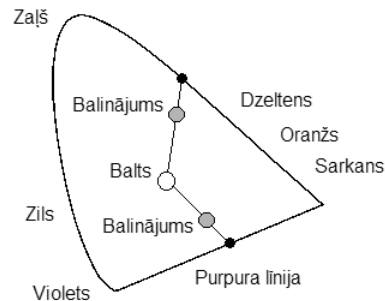


37

- Ar precizitāti līdz hromatiskajam identiskumam, t.i., ar precizitāti līdz intensitātei, krāsu konusa krāsojumu parāda tā šķēlums ar piemērotu plakni.
- Tāds šķēlums ir pakava veida figūra, kuras kontūras liektā daļa sastāv no tīro spektra krāsu punktiem, bet taisnes nogrieznis no violetas un sarkanas krāsas dažādiem sajaukumiem, kurus sauc par *purpuru*.
- Figūras vidusdaļā ir baltas krāsas punktu laukums.

38

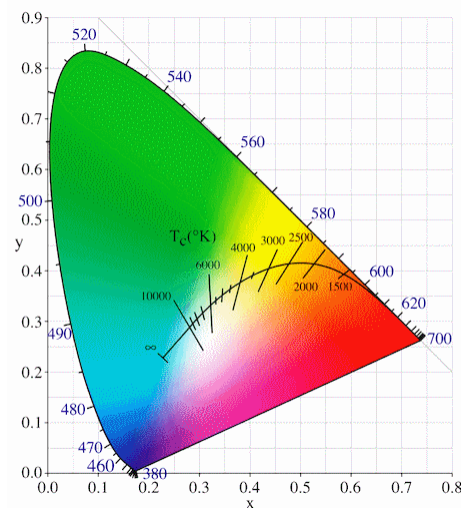
- Šķēluma figūras iekšpusē bez baltās krāsas ir arī tīro spektra krāsu un purpura *balinājumi*.
- Stars, kas baltu punktu savieno ar konkrētu krāsas punktu, krusto arī šķēluma figūras kontūru.
- Šis krustpunkts nosaka attiecīgo tīro spektra krāsu vai purpuru.



39

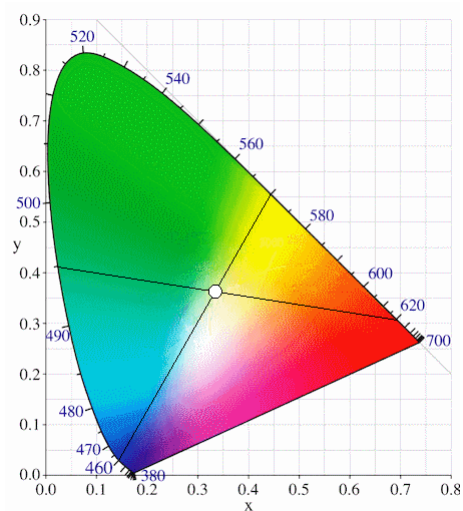
Hromatiskuma diagramma

- Rūpīgi krāsu uztveres mērījumi jau 1931. gadā ļāva standartizēt krāsu konusa šķēlumu t.s. *hromatiskuma diagrammas* veidā.
- Tajā ir precīzi attēlojami svarīgi krāsu punkti, piemēram, absolūti melna ķermeņa krāsa atkarībā no temperatūras:



40

- Velkot caur izvēlētu krāsas punktu taisnes nogriežņus, kas savieno tīro spektra krāsu punktus, varam konstruēt pēc patikas daudz krāsu metamerisma piemēru:



Lekcija par krāsu reprodukciju

Šo rindu autora lekcija Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas un Datorikas fakultātes kursiem „Datoru grafika” un „Datoru grafikas un attēlu apstrādes pamati”. Kursi pasniegti kopā ar kolēģiem Kārli Freivaldu un Rūdolfu Opmani.

Lekcijas materiāls sākts izstrādāt 1990-to gadu sākumā. Sekojošie lekcijas prezentācijas slaidi izstrādāti 2012. gadā.

Temats 6

Krāsu reprodukcijas principi, krāsu koordinātas

Pasniedzēji: *Kārlis Freivalds*
Paulis Ķikusts
Rūdolfs Opmanis

1

Krāsu reprodukcija

- Reproducēt izvēlētu krāsu C nozīmē sintezēt tādu starojuma avotu $E(\lambda)$, lai tā krāsa sakristu ar izvēlēto:

$$\vec{\alpha}_C = \vec{\alpha}(E(\lambda)).$$

- Svarīgi, ka tiek prasīta tikai krāsu punktu sakrišana – krāsas C avota starojuma intensitātes blīvums var palikt nezināms.
- Tādējādi krāsa tiek reproducēta ar precizitāti līdz metamerismam.

2

- Ir divas nepieciešamā starojuma un līdz ar to arī izvēlētās krāsas sintēzes principiālas tehnikas: *aditīvā* un *subtraktīvā*.
- Aditīvā krāsu sintēze ir visa pamats un tās būtība ir jau zināmās divu starojumu summēšanas vispārinājums

$$\sum_{k=1}^n q_k E_k(\lambda).$$

- Reizēm šo summēšanu sauc arī par starojumu/krāsu jaukšanu.

3

Aditīvā krāsu sintēze

- Tiek ņemts zināms skaits n t.s. *primāro gaismas avotu* ar starojuma intensitātes blīvumiem attiecīgi

$$P_1(\lambda), P_2(\lambda), \dots, P_n(\lambda).$$

- Visus šos starojumus summē, pielietojot dažādus regulējošos koeficientus:

$$\sum_{k=1}^n \beta_k P_k(\lambda), \quad \beta_k \geq 0.$$

4

- Lai izvēlētajā krāsa C būtu sintezēta, jāatrod tāds koeficientu β_k komplekts, pie kura

$$\vec{\alpha}_C = \vec{\alpha} \left(\sum_{k=1}^n \beta_k P_k(\lambda) \right).$$

- Tas nozīmē attiecībā pret nezināmajiem β_k risināt trīs vienādojumu sistēmu

$$\begin{cases} \alpha_i \left(\sum_{k=1}^n \beta_k P_k(\lambda) \right) = \alpha_{C,i} \\ i = 1, 2, 3 \end{cases}.$$

5

- Atceroties, ka

$$\alpha_i(E(\lambda)) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} E(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda,$$

sistēmas vienādojumu kreisās puses viegli pārveidojamas:

$$\begin{aligned} \alpha_i \left(\sum_{k=1}^n \beta_k P_k(\lambda) \right) &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sum_{k=1}^n \beta_k P_k(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda = \\ &= \sum_{k=1}^n \beta_k \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_k(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda = \sum_{k=1}^n \beta_k \alpha_i(P_k(\lambda)), \end{aligned}$$

kas nozīmē, ka mūsu sistēma ir lineāra trīs vienādojumu sistēma ar n nezināmajiem.

6

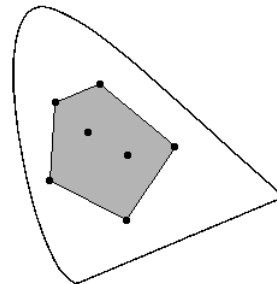
- Vienādojumu sistēma matricu formā:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1(P_1(\lambda)) & \alpha_1(P_2(\lambda)) & \dots & \alpha_1(P_n(\lambda)) \\ \alpha_2(P_1(\lambda)) & \alpha_2(P_2(\lambda)) & \dots & \alpha_2(P_n(\lambda)) \\ \alpha_3(P_1(\lambda)) & \alpha_3(P_2(\lambda)) & \dots & \alpha_3(P_n(\lambda)) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{C,1} \\ \alpha_{C,2} \\ \dots \\ \alpha_{C,3} \end{pmatrix}.$$

- Ja sistēmai eksistē atrisinājums, tad, neatkarīgi no to zīmes, koeficientus β_k sauc par krāsas C nenormētajām koordinātām primāro gaismas avotu sistēmā.
- Protams, lai krāsa varētu tikt reāli sintezēta, koeficientiem β_k jābūt nenegatīviem.

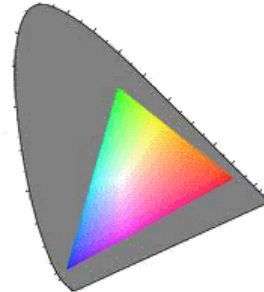
7

- No vienādojumu sistēmas atrisinājumu īpašībām seko to kopuma vienkārša ģeometriskā interpretācija.
- Atzīmēsim hromatiskuma diagrammā doto primāro gaismas avotu krāsu punktus.
- Izrādās, ka krāsu punkti, kas atbilst summārajiem starojumiem, kurus dod atrisinājumi ar nenegatīviem β_k , pieder primāro gaismas avotu krāsu punktu izliektajai čaulai, t.i., ap šiem punktiem apvilktam minimālajam izliektam daudzstūrim:



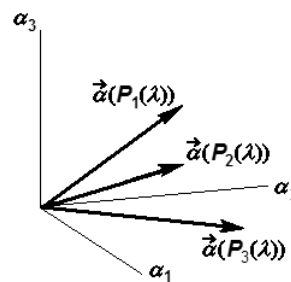
8

- Dažādu apsvērumu dēļ – gan starojuma avotu komplicētība, gan vienādojumu sistēmas atrisinājumu viennozīmība, aditīvā krāsu sintēze mūsdienu tehnikā tiek realizēta pie $n = 3$.
- Saprotams, ka tādā gadījumā reāli sintezējamas ir tikai tās krāsas, kuru punkti hromatiskuma diagrammā pieder kaut kādam trijstūrim:
- Pārējās krāsas pie izvēlētajiem primārajiem gaismas avotiem *nav sintezējamas principā*.



9

- Iepriekšējie apsvērumi lielā mērā ignorēja reālā tehniskā sistēmā ierobežoto krāsu spožumu.
- Šo ierobežotību var izteikt, prasot $0 \leq \beta_k \leq 1$, kur katra koeficienta maksimālā vērtība atbilst attiecīgā gaismas avota spožuma maksimumam.
- Maksimālā spožuma krāsu punktiem svarīgs ir to telpiskais izvietojums.
- Pie $n = 3$ tie ir trīs rādiusvektori α -telpā:

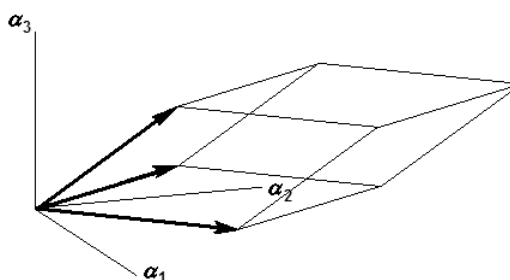


10

- Pilnu sintezējamo krāsu kopumu definē primāro gaismas avotu krāsu punktu rādiusvektoru lineārā kombinācija

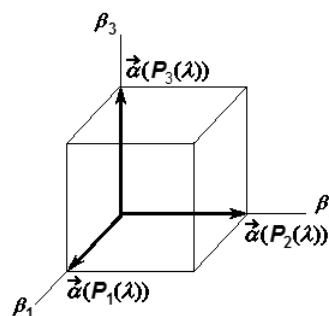
$$\sum_{k=1}^n \beta_k \vec{\alpha}(P_k(\lambda)), \quad 0 \leq \beta_k \leq 1.$$

- Viegli redzēt, ka pie $n = 3$ pilnā krāsu kopuma punkti veido paralēlskaldni:



11

- Krāsu punktus var aplūkot arī β -telpā, t.i., koordinātu sistēmā, kurā primāro gaismas avotu krāsu punktu rādiusvektori ir šīs sistēmas asu vienības vektori.
- Pie $n = 3$ visērtāk ir konstruēt ģeometriski ekvivalentu Dekarta koordinātu sistēmu, kurā visu sintezējamo krāsu punktu kopums tad veido vienības kubu:



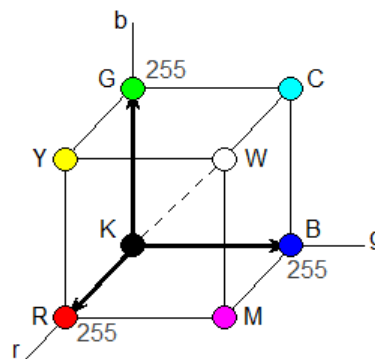
12

- Izplatītākais β -telpas variants ir RGB krāsu sistēma, kurā primārie gaismas avoti ir sarkanā, zaļā un zilā krāsā.
- Svarīgs moments ir tāds primāro gaismas avotu maksimālo intensitāšu iestādījums, ka to summa ir baltā krāsā.
- Līdz ar to RGB vienības kuba virsotņu krāsas ir sekojošas:

$(0, 0, 0)$ – melna (K)	$(1, 1, 1)$ – balta (W)
$(1, 0, 0)$ – sarkana (R)	$(1, 1, 0)$ – dzeltena (Y)
$(0, 1, 0)$ – zaļa (G)	$(1, 0, 1)$ – fuksīna (M)
$(0, 0, 1)$ – zila (B)	$(0, 1, 1)$ – ciānzila (C)

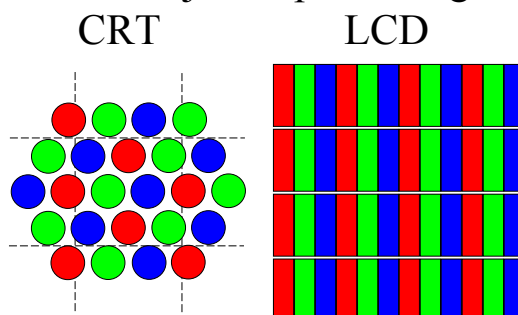
13

- Datoros RGB kuba izmērus parasti izsaka 256 vienībās: 0..255.
- Tādējādi shematiski šī kuba izskats ir sekojošs:
- Uz RGB kuba galvenās diagonāles atrodas baltai krāsai hromatiski identisku krāsu punkti, t.s. *ahromatiskās* krāsas: melns, pelēks, balts.
- Ahromatisko krāsu visas trīs RGB koordinātas ir vienādas: $r = g = b$.



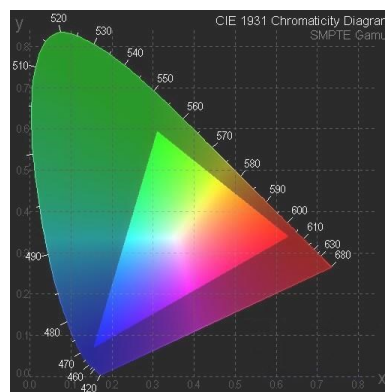
14

- Kā zināms, TV ekrānos, datoru monitoros un līdzīgās krāsu attēlu ierīcēs RGB krāsu sintēze tiek realizēta, attēla virsmu sadalot vēl sīkākos apgabalos nekā pikseļi.
- Šie apgabali darbojas kā primārie gaismas avoti:



15

- Svarīgi apzināties, ka šo trīs primāro gaismas avotu izvēli nosaka dažādi tehniski apstākļi – gan avotu materiāla inertums, gan sintezējamo krāsu daudzveidība, gan krāsu telpas pārklājums.
- Tipisks rezultējošais risinājums hromatiskuma diagrammā atainojams kā raksturīgs viena pikseļa sintezējamo krāsu trijstūris:



16

HSI krāsu koordinātas

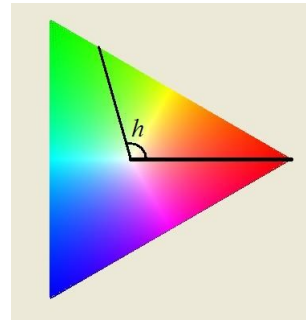
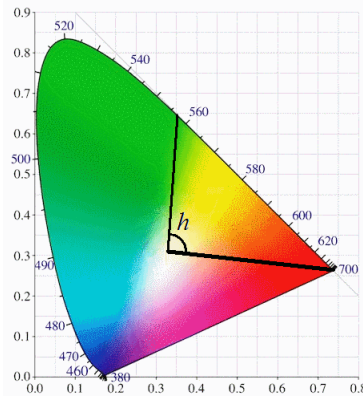
- Jāatzīst, ka RGB krāsu reprezentācija ir vairāk tehnoloģiska un mazāk intuitīva.
- Tomēr krāsu sistēmā ir struktūras, kas izmantojamas orientācijai uz cilvēka uztveri.
- Hromatiskuma diagrammā balto krāsu saturoša apgabala katrs iekšējs punkts ir kādas apgabala robežas punktam atbilstošas krāsas balinājums.
- Tādējādi tieši robežas punkti ir galvenie krāsainības raksturotāji, kurus var piekārtot katrai apgabala krāsai.

17

- Vienkāršas formas apgabalam šis krāsainības raksturotājs var būt kaut kāda vienkārša ģeometriskā īpašība – tradicionāli, leņķis polārā koordinātu sistēmā.
- Gan visa hromatiskuma diagramma, gan RGB trijstūris ir šādi vienkārši apgabali.
- Dabisks polārās koordinātu sistēmas pols ir baltās krāsas punkts.

18

- Par galveno asi ņem staru, kas no baltās krāsas punkta iet caur sarkanās krāsas punktu.
- RGB trijstūri parasti transformē par regulāru.



19

- Leņķis h nosaka krāsas *toni* (angliski *hue*), un tiek mērīts grādos ($0^\circ \dots 360^\circ$).
- Pie viena un tā paša toņa h , krāsa var būt vairāk vai mazāk piesātināta (tālāka no baltās krāsas) – mēra ar parametru s (*saturation*), kas norāda attiecīgā nogriežņa daļu sākot no baltās krāsas punkta ($0 \dots 1$).
- Pie vieniem un tiem pašiem toņa h un piesātinājuma s starojums var būt vairāk vai mazāk intensīvs – mēra trešais parametrs i (*intensity*), kas norāda faktiskās intensitātes daļu no maksimālās iespējamās ($0 \dots 1$).

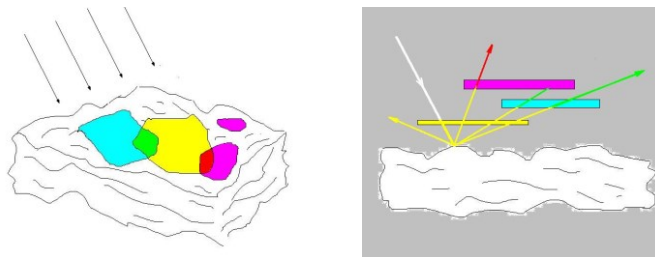
20

Subtraktīvā krāsu sintēze

- Subtraktīvās krāsu sintēzes pamatā ir specifiskā veidā regulējami *sekundārie gaismas avoti*.
- Atšķirībā no primārajiem, sekundāro gaismas avotu būtība ir nevis izstarot elektromagnētisko enerģiju no sava neatkarīga enerģijas avota, bet gan *atstarot apkārtējās vides apgaismojumu*.

21

- Attēla krāsu nodrošina difūzi atstarojošas baltas virsmas pārklājums ar caurspīdīgām *pigmentu daļiņām* – tintes, akvareļu krāsas.
- Pigmentu daļiņas darbojas kā *gaismas filtri* un maina caur tām ejošā starojuma spektrālo sastāvu:



22

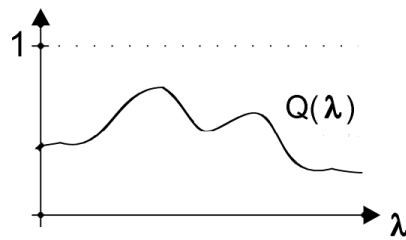
- Gaismas filtra darbību apraksta izteiksme

$$E(\lambda) = A(\lambda) \cdot Q(\lambda),$$

kur E ir rezultējošā starojuma intensitātes spektrālais blīvums,

A – apgaismojuma intensitātes spektrālais blīvums,

Q – īpaša funkcija, kas raksturo filtru – filtra *spektrālās caurlaidības funkcija*:



23

- Reizinājums ar spektrālās caurlaidības funkciju Q no apgaismojuma starojuma noņem to spektra daļu, kurā Q vērtības ir mazas.
- Šādā nozīmē tiek lietots vārds *subtraktīvs*.
- Gaismai ejot caur vairākiem filtriem, to spektrālās caurlaidības funkcijas jāreizinā:

$$E(\lambda) = A(\lambda) \cdot Q_1(\lambda) \cdot Q_2(\lambda) \cdot \dots$$

- Rezultātā no sākotnējās gaismas tiek atņemts vēl vairāk.

24

- Par filtra krāsu sauc tā starojuma F krāsu, kurš caur filtru redzams, skatoties uz t.s. *vienādenērgētisko* balto gaismu:

$$F(\lambda) = W_{\text{const}}(\lambda) \cdot Q(\lambda),$$

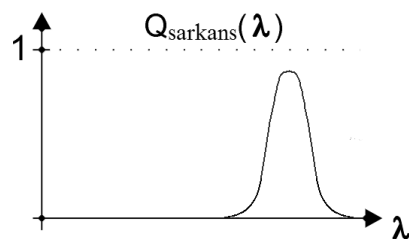
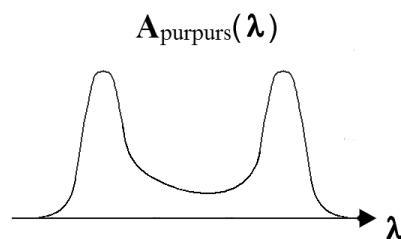
kur

$$W_{\text{const}}(\lambda) = \text{const}, \text{ ja } \lambda_{\text{min}} \leq \lambda \leq \lambda_{\text{max}}.$$

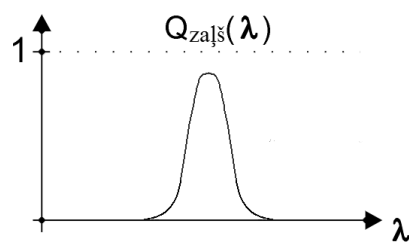
- Ja vienādenērgētiskās gaismas vietā ir cita gaisma, tad rezultējošā krāsa var izrādīties ļoti dažāda, līdz pat melnai.

25

- “Subtrakcijas” piemēri:

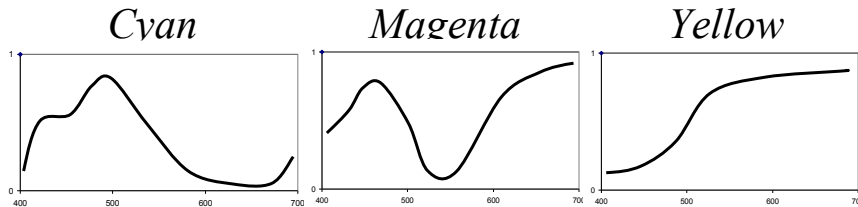


- purpura gaisma caur sarkanu filtru \Rightarrow sarkans,
- katra gaisma caur zaļu un sarkanu filtru \Rightarrow tuvs melnam.



26

- Tipiskas krāsu attēlu pigmentu-filtru spektrālās caurlaidības funkcijas ir aptuveni sekojošas:



- Uzdārtās krāsas redzamas vienādenērgētiskā baltā apgaismojumā.

27

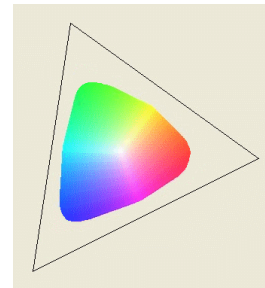
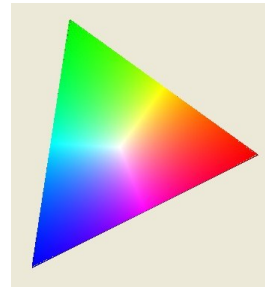
- Tiešās CMY filtru kombinācijas pa divi dod RGB pamatkrāsas:

$$M + Y \Rightarrow R, C + Y \Rightarrow G, C + M \Rightarrow B.$$

- Visi trīs filtri kopā ir praktiski necaurspīdīgi.
- Uzklājot pigmentus retināti uz baltas virsmas, attiecīgā krāsa tiek balināta.
- Uzklājot dažādus pigmentus ar dažādiem retinājumiem, iegūstamas dažādas starpkrāsas.
- Krāsu drukas ierīces pigmentus klāj regulāros rastros, lai nodrošinātu vienmērīgumu, pie tam, izvairoties no muarē efekta.

28

- Tā kā reālu pigmentu spektrālās caurlaidības funkcijās nav ideāli krāsu spektrālo diapazonu robežu, tad pigmentu salikumos parādās balinājuma efekts.
- Līdz ar to sintezējamo krāsu apgabals ir šaurāks par RGB trijstūri:



29