

O POJAVIMA OGIBA NA SJENAMA PREDMETA U IZRAVNOJ SUNČANOJ SVJETLOSTI

Napisali Marin Katalinić (Skopje) i Branimir Marković (Zagreb).

(Sa 6 tabla i 3 slike u tekstu)

1. Pregled

Pojedinosti, o kojima se ovdje radi, leže dijelom u sjeni, koju bacaju predmeti u slobodnoj sunčanoj svjetlosti, a dijelom oko nje; kod toga razumijemo na ovom mjestu pod sjenom pravu sjenu zajedno sa polusjenom. O ovoj se skupini pojava nalazi u naučnoj literaturi razmjerno malo podataka. Pretežni dio opažanja odnosi se na svijetli obrub izvan polusjene. Najstarije je jedno slučajno opažanje iz g. 1783. od strane jednog ne-stručnjaka, koji ga je napola anonimno („H.”) publicirao iste godine u jednom malo dostupnom njemačkom časopisu. *Winterfeld* je to opažanje doslovno prenio u svoju radnju, koja je prvi put izašla g. 1795., a koju je gotovo 10 godina kasnije ponovno objavio *Gilbert*¹⁾ u vezi s prevodima dviju *Jordanovih* radnja o ogibu (difrakciji) svjetlosti²⁾.

Već od ovih prvih početaka različiti se pisci ne slažu ni u samom prikazivanju ovog pojava. Spomenuti anonimni opažatelj izvješćuje, da je vozeći se rano ujutro jednog vedrog proljetnog jutra kočijom kroz polja opažao oko sjene svoje glave svijetao vijenac, koji se najbolje vidio, ako je sjena padala na polja obrasla mladim žitom, a iščezavao je, ako je sjena padala na neobraslo tlo. Taj je vijenac opažao samo oko sjene svoje glave, a nije ga bilo oko sjena konja i kočije. *Winterfeld* u svojoj kritici ovog izvješća anonimnog motritelja ističe, da se taj svijetli vijenac oko sjene vlastite glave najbolje vidi na rosnoj travi kod malene visine sunca, ali ga se kod malene visine sunca opaža i na suhoj, t. j. neorošenoj travi, pa i na uzoranom, golom tlu i općenito na hrapavim površinama, dok posve iščezava na sasvim ravnom tlu. *Lommel*³⁾ se u prikazivanju pojava uglavnom slaže s *Winterfeldom*. On poimence kao uslove vidljivi-

¹⁾ M. A. Winterfeld, *Gilb. Ann.* 18, 57, 1804.

²⁾ G. W. Jordan, *ibid.* 18, 1, 27, 1804.

³⁾ E. Lommel, *Pogg. Ann., Jubelband*, 10, 1874.

vosti svijetlog vijenca navodi malenu visinu sunca i hrapavost tla, na koje pada sjena; ali on razlikuje dvije vrsti pojava: vijenac oko sjene glave na hrapavom tlu i mnogo svijetliji vijenac oko sjene glave na rosnoj travi.

Prema *Pernteru i Exneru*⁴⁾, *Garthe* je bio prvi, koji je dao sustavan prikaz pojava (1830.); ali je njegova radnja izašla na nedostupnom mjestu. Svakako je najdostupniji vrlo opširni i sustavni prikaz od samog *Perntera*⁵⁾. On kao i *Lommel* razlikuje dvije vrsti pojava. Među njima je razlika samo u tome, što *Lommel* ističe, da se svijetli vijenac oko sjene glave može opažati na kratkoj travi i pri većim visinama sunca. *Lommel* drži, da na rosnoj travi obje vrsti vijenca nastaju istodobno i dopunjuju se. Međutim se svi pisci slažu u tome, da vijenca nema, ako sjena pada na posve glatku površinu, te da ga motritelj vidi samo oko sjene svoje glave. Istom mnogo kasnije prvi je naglasio *Obermayer*⁶⁾, da je svijetli obrub vidljiv ne samo uz navedene okolnosti, nego da ga se jasno opaža kod svake visine sunca, pa i uz rub sjene bačene na posve glatku površinu, n. pr. na papir. On je ustanovio i to, da je taj svijetli obrub uvijek praćen jednim tamnim obrubom, koji leži između prave sjene i polusjene⁷⁾. Konačno *Obermayer* ističe, da se ova dva obruba, svijetli i tamni, opažaju pored ruba svake sjene, a ne samo oko sjene glave motritelja. Naprotiv *Pernter i Exner* napominju, da ovaj *Obermayerov* svijetli obrub uz sjenu na glatkim površinama nema ništa zajedničkog sa svijetlim vijencem oko sjene glave na rosnoj travi⁸⁾.

Obermayer je eksperimentalno odijelio taj svijetli vijenac oko sjene glave od svijetlog i tamnog obruba⁹⁾. Zapravo je cijela nesuglasnica upravo i nastala odatle, što su u opažanjima pomiješana dva posve različita pojava, a motritelji često nijesu znali razlikovati jedan pojav od drugoga. Sjajni pojav na orošenoj travi, koji ćemo mi zvati svijetlim vijencem, zaista je u svojoj suštini nešto posve drugoga nego li svijetli obrub, koji se vidi pored svake sjene bilo na neorošenoj travi ili na hrapavoj ili na posve glatkoj površini. U tom su pogledu ispravni i stanovište *Perntera i Exnera* i stanovište *Obermayera*. Međutim

⁴⁾ J. M. Pernter u. F. M. Exner, *Meteorologische Optik* (2. izd., 1922.), str. 465.

⁵⁾ Pernter u. Exner, *ibid.*, str. 464—470, 522—526.

⁶⁾ A. Obermayer, *Boltzmann-Festschrift*, Leipzig 1904, str. 299.

⁷⁾ Obermayer, l. c., str. 300. — *Obermayer* je na ovom mjestu pogrešno označio položaj tamnog obruba (*»in Begleitung eines dunklen Saumes am inneren Schattenrande«*; kurziv je od nas); ali se vidi iz njegova daljeg prikaza, da taj tamni obrub u stvari leži između prave sjene i polusjene. Bit će da se radi o neopaženju tiskarskoj pogrešci, te da riječ *»Schatten-«* stoji mjesto riječi *»Halbschatten-«*.

⁸⁾ Pernter u. Exner, l. c., str. 465.

⁹⁾ Obermayer, l. c., str. 301.

se svijetli obrub na neorošenoj travi ili na hrapavoj površini posve podudara sa svijetlim obrubom na glatkoj cesti ili na listu papira. Konačno on je isti kod malene visine sunca kao kod velike visine.

Ova se nesuglasnica u opažanjima odrazila i u nazivima. *Winterfeld* naziva ono, što je on opažao, općenitim nazivom *Schein*; rjeđe ga zove *Glanz* ili *Glorie*. On kod toga ne pravi razlike, da li se radi o sjeni glave na rosnoj travi ili na bilo kojoj hrapavoj površini. U svojoj kratkoj kritici *Winterfeldova* tumačenja *Brandes* upotrebljava za vijenac opisni naziv („den weissen oder glänzenden Rand um den Schatten“)¹⁰), a u svom kasnijem pregledu naziva ga *heller Schein* ili *heller Hof*¹¹). Povodeći se po svoj prilici za jednim slikovitim opisom *Winterfeldovim*¹²), *Garthe* je prvi uveo naziv *Heiligenschein*¹³). U francuskom prevodu *Kämtzovih* predavanja o meteorologiji dolazi naziv *aureole*¹⁴). *Lommel* (l. c.) spominje naziv *Heiligenschein* u navodnim znacima, ali za pojav sustavno upotrebljava riječ *Lichtschein*. *Pernter* i *Exner* (l. c.) redovito upotrebljavaju naziv *Heiligenschein*, i to jednako za svijetli vijenac na rosnoj travi kao i za svijetli obrub na hrapavim površinama. *Obermayer* (l. c.) govori o svijetlom i o tamnom obrubu (*Saum*), a taj su naziv poprimili također *Pernter* i *Exner* za spomenuti svijetli obrub na glatkim površinama, koji oni isključuju iz razmatranja, jer da nema veze sa *Heiligenschein*-om. Referent o pojavu svijetlog vijenca (t. j. *Heiligenschein*-a u najužoj skupini pojava), koji su opažali Japanci *Fuchino* i *Izu* u rižinim poljima, upotrebljava za nj nazive *luminous halo* ili samo *halo*¹⁵).

Mi ćemo svijetli obrub, koji prati vanjski rub polusjene kod svake sjene u svjetlosti sunca, zvati glorijom. Kod toga ne pravimo razlike između svijetlog obruba na posve glatkoj površini, na koju pada sjena, i onoga na hrapavoj površini, n. pr. neorošenoj travi, jer su prema našim opažanjima pojavi u oba slučaja istovrsni. Uporedo s njim vidi se na prelazu sjene u polusjenu *Obermayerov* tamni obrub. Oba se pojava opažaju kod svake visine sunca; lakše ih zapažamo hodajući. Taj naziv *glorija* upotrebljavao je sporadički već *Winterfeld*, a *Gilbert*, kao stručnjak, sustavno ga je upotrebio u svojoj drugoj napomeni uz *Winterfeld*-ovu radnju¹⁶), po svoj prilici iz teorijskih razloga.

¹⁰) H. W. Brandes, *Gilb. Ann.* 19, 363, 1806, str. 366.

¹¹) Brandes (»B.«), *Gehlers Physik. Wörterbuch*, V/1, »Hof«, str. 438—439.

¹²) *Winterfeld*, l. c., str. 59: »Schein oder Glanz, welcher der Glorie gleicht, womit man die Köpfe der Heiligen zu zieren pflegt«.

¹³) *Pernter* u. *Exner*, l. c., str. 465.

¹⁴) L. F. *Kämtz*, *Cours complet de météorologie*, Paris 1843, str. 426.

¹⁵) *Nature* 90, 419, 1912.

¹⁶) *Winterfeld*, l. c., napomena na str. 65—66.

Kao što su prikazi samog svijetlog vijenca ili obruba bili raznoliki, tako su bila raznolika i tumačenja. Veći broj tumačenja odnosi se na svijetli obrub na hrapavoj površini ili na vijenac na orošenoj travi, t.j. na *Heiligenschein* u *Pernterovoj* terminologiji. *Winterfeld* je dao jedno posve geometrijski-optičko tumačenje. Svijetli vijenac oko sjene glave motritelja nastaje po njemu na taj način, što vlati trave uz rub sjene glave najjače reflektiraju svjetlost u pravcu motriteljeva oka. Svjetlost reflektirana od vlati iz drugih pravaca sve je slabija, što je pravac dalji od ruba sjene; a osim toga, oko tada vidi sve više vlati, koje su zasjenjene rasvjetljenim vlatima ispred njih. Ovo je tumačenje prihvatio *Brandes*¹⁷⁾, premda mu je s početka prigovarao¹⁸⁾; samo mu je još pridodao djelovanje sitnih kapljica rose na orošenoj travi. S *Winterfeldovim* tumačenjem složio se za neorošenu travu i općenito za hrapave površine mnogo poslije *Brandesa* i *Lommel* (l. c.), koji je pojedine točke još i pobliže obrazložio s geometrijski-optičkog gledišta. Opet mnogo kasnije *Richarz*¹⁹⁾ je izveo ovaj *Winterfeldov* princip — ne spominjući njegova imena — primjenom svog tumačenja o postanku svijetlog vijenca i obojenih kolutova oko glave tzv. brockenske sablasti²⁰⁾ (*Ulloain* ili *Bouguerov* pojav). Povod su mu za to dala prigodna opažanja, koja su u to doba učinili različiti motritelji, a napose *Stuchtey*²¹⁾, koji su opažali takve svijetle vijence oko sjena svojih aerostata, kad su ovi lebdjeli u osrednjim visinama nad tlom obraslim travom ili šumom. Već *Kämtz* (l. c.), a za njim *Lommel* (l. c.) objašnjavali su pomoću *Winterfeldova* tumačenja činjenicu, da je svijetli vijenac oko sjene glave na travi često produžen iznad gornjeg ruba sjene glave. *Richarz* je iz svog tumačenja izveo dalji zaključak, da će svijetli vijenac pokazivati maksimum intenziteta iz pravaca, koji leže u ravnini položenoj kroz pravac upadanja svjetlosti i zajednički pravac vlati trave, pa je tim načinom objašnjavao jednostrano produženje svijetlog vijenca, kakvo se vidi na jednoj od *Stuchteyevih* snimaka. *Stuchtey* je laboratorijskim pokusima potvrdio, da ovakvo jednostrano produženje zaista može nastati uslijed djelovanja, koje je istaknuo *Richarz*.

Drugu skupinu čine tumačenja, koja uzimaju u obzir kapi rose. Po spomenutom *Brandesovu* dodatku¹⁷⁾ na *Winterfeldovo* tumačenje, sitne kapi rose na rosnoj travi samo doprinose intenzitetu svijetlog vijenca oko sjene glave motritelja, i to na taj način, što u oko dolaze iz istog smjera zrake reflektirane i na prednjoj i na stražnjoj površini kapljice, dok iz drugih pravaca toga nema ili ima samo u ograničenom iznosu.

¹⁷⁾ Brandes, Gehlers Physik. Wörterbuch, l. c.

¹⁸⁾ Brandes, Gilb. Ann. 19, l. c.

¹⁹⁾ F. Richarz, Meteorol. Zeitschr. 30, 501, 1913.

²⁰⁾ Richarz, ibid., 29, 282, 1912.

²¹⁾ K. Stuchtey, ibid. 30, 565, 1913

Fraunhofer u svojoj radnji iz g. 1825. pored drugih svijetlih haloa i vijenaca u atmosferi obrađuje u nekoliko redaka²²⁾ i ovaj vijenac, pa ga tumači kao i vijenac oko sjene glave u *Bouguerovu* pojavu refleksijom na kapljicama. Možda zato *Kämtz*¹⁴⁾ svijetli vijenac na rosnoj travi jednostavno ubraja među anthelije; ali on ujedno uzima u obzir i nepravilnost, koju može izazvati cilindrički oblik vlaži trave. Otada se refleksija u kapljicama rose općenito uzima uzrokom svijetlom vijencu na rosnoj travi; tako čine *Lommel* (l. c.) i *Pernter* (l. c.). Razlike su jedino u pojedinostima u pogledu načina, kako nastaje pojačanje reflektirane svjetlosti, koja dolazi u oko motritelja. Napokon *Fuchino* i *Izu* (l. c.) tumače stvar tim, da jaka reflektirana svjetlost potječe od svjetlosti difuzno reflektirane iz sličica sunca, koje svaka kapljica rose, djelujući kao sabirna leća, stvara na zelenom listu. — Ova skupina tumačenja dobro odgovara svijetlom vijencu na orošenoj travi.

*Obermayer**) stoji osamljen sa svojim tumačenjem svijetlog obruba (glorije) i po njemu otkrivenog tamnog obruba, jer ih on objašnjava kao subjektivne pojave na osnovu jednog *Machova* fiziološkog zakona o djelovanju kontrasta**). *Pernter* i *Exner* navode²³⁾, da je već *Brandes* ovaj svijetli obrub pripisivao djelovanju kontrasta. Takvo se značenje ne može pripisati tom mjestu kod *Brandesa*, na koje se oni pozivaju²⁴⁾, to tim manje, što i *Brandes* izričito kaže, da svijetli obrub iščezava na posve ravnoj površini.

Gilbert je u svojoj prvoj napomeni uz *Winterfeldovu* radnju²⁵⁾ izrazio svoje uvjerenje, da se kod *Winterfeldova* pojava radi o ogibu svjetlosti, ali se nije upuštao u pojedinosti o tome. To je čak bilo razlogom, zbog čega je on toj radnji odredio mjesto neposredno iza svojih prevoda prve i druge *Jordanove* radnje (l. c.). *Gilbertu* bi se moglo zamjeriti samo to, da je njegovo tumačenje bilo preuranjeno za jedan premalo ispitan, kompleksan pojav. Poslije *Gilberta* je samo *Brandes* u početku naginjao takvom shvaćanju²⁶⁾. Inače je ovo *Gilbertovo* mišljenje posve palo u zaborav, pa nitko nije ni pokušavao da ovdje primijeni ogib svjetlosti. Tome je mogla pridonijeti i okolnost, što se u starijim djelima izravna sunčana svjetlost,

²²⁾ J. Fraunhofer, *Gesammelte Schriften*, izd. München 1888, str. 210. — Također u: Hellmann, *Meteorol. Optik* 1000—1836, Berlin 1902, str. 71.

*) *Obermayer*, l. c.; također: *Eder's Jahrb. f. Photogr.* 14, 143, 1900.

**) E. Mach, *Sitzungsber. Wiener Akad., math.-naturwiss. Kl.*, II. Abtg., 52, 303, 1866, str. 310.

²³⁾ *Pernter* u. *Exner*, l. c., str. 466.

²⁴⁾ *Brandesova* napomena l. c., str. 439, glasi ovako: »Von dem physiologischen Scheine, wo jedes Dunkle sich mit hell umgeben zeigt, kann nicht die Rede seyn, da diese Erscheinung sich nicht bloss um den Schatten des Kopfs zeigen könnte«. — Kurzivi su u originalu.

²⁵⁾ l. c. I), str. 57; vidi također početak napomene na str. 65.

²⁶⁾ *Brandes*, l. c. 10) str. 366.

zbog velikog prividnog promjera sunčeve ploče, prikazuje kao nepodesna za proizvođenje vidljivog ogiba na ogibnom zastoru s ravnim rubom. Tako Verdet izričito navodi, da bi u sunčanoj svjetlosti ogibne crte, mogle nastati jedino u neposrednoj blizini ogibnog zastora; ali bi onda bile tako uske, da ih se ne bi moglo opažati²⁷⁾.

Međutim su naša istraživanja uz pomoć laboratorijskih pokusa očevidno pokazala, da su i svijetli obrub (glorija) i Obermayerov tamni obrub između prave sjene i polusjene samo najvidljivije pojedinosti iz skupine ogibnih pojava, koji se protežu od vanjske granice prave sjene do znatno iza vanjskog ruba polusjene. Ovaj smo nalaz doveli u neposrednu vezu i s novijim istraživanjima o pojavama ogiba u svjetlosti iz širokog svjetlosnog izvora. To je sve u skladu s činjenicom, da se ti pojavi opažaju pri bilo kojoj visini sunca. U tom pogledu nema nikakve razlike između glatke podloge, na koju pada sjena, i hrapave podloge, n. pr. travnjaka s kratkom ili osrednjom travom u gradskim parkovima. Osnovni uvjet, da bi se sve ove pojedinosti ogiba mogle jasno opažati, jest savršena vedrina neba. Jedva vidljivi sloj oblačaka u blizini sunca ili čak samo lošija atmosferska prozirnost, koja se očituje u tome, da su brda i brežuljci u okolici lako ili osrednje zastrti, dovoljni su da izbrišu veći dio pojedinosti ili u najmanju ruku da ih oslabe. Glorija je najustrajnija. Ona se zamjećuje još i onda, kada sunce sija kroz tanak sloj altostratusa. Našli smo dokaza, da u ovom ogibu učestvuje i atmosferska iradijacija, koja nastaje Mieovim efektom raspršavanja svjetlosti u atmosferi. Kako je poznato iz istraživanja Pokrovskoga²⁸⁾ i drugih, intenzitet ove atmosferske iradijacije raste otprilike hiperbolički, ako se u području malenih otklona od pravaca sunčanih zraka primičemo izvana rubu sunca. Po našim rezultatima ovaj je utjecaj atmosferske iradijacije štetan po jasnoću ogibnih pojava. Odatle se može zaključiti, da bi ogibne pojedinosti na sjenama imale biti bolje izražene u krajevima s vedrijim nebom ili na visokim planinama, jer je tu atmosferska iradijacija slabija.

Kad smo za svijetli obrub izvan polusjene upotreбили specijalan naziv glorija, htjeli smo ga i tim odijeliti od svijetlog vijenca oko glave motritelja na rosnoj travi. Pernter je naveo više svojstava, kojima se oni međusobno razlikuju; ali nam se te razlike ne čine bitnima. Svijetli vijenac tako bliješti, da svojim intenzitetom posve pokriva gloriju, tako da se ona ne vidi. S druge strane, svijetli vijenac je pojav širokih ploha; u pojedinim smo slučajevima procijenili promjer rasvjetljene plohe na 8 širina sjene glave. Naprotiv, glorija je uzak svijetao obrub pored vanjskog ruba polusjene. Međutim bitna razlika

²⁷⁾ É. Verdet, Leçons d'optique physique, vol. I, Paris 1869, str. 360.

²⁸⁾ G. I. Pokrowski, Zeitschr. f. Physik 34, 49, 1925; 60, 850, 1930.

između jednog i drugog pojava leži u raspodjeli intenziteta svjetlosti po njihovoj širini. Svijetli vijenac ima najveći intenzitet uz sam rub sjene, odnosno polusjene glave, a onda mu intenzitet polako opada s udaljenošću od sjene i iščezava u općoj rasvjeti livade obasjane suncem. Tako ga opisuju *Pernter* i *Exner*²⁹⁾. A to u glavnim crtama i odgovara, ako se apstrahira od nehomogenosti travne podloge, u koliko se rosa na različitim područjima nejednako nadvatila, pa se ta mjesta i sjajem razlikuju. To se opaža i na sl. 178 u spomenutoj knjizi ovih pisaca. Naprotiv glorijske u našim slikama 1 i 4 (tabla I) završuju maksimumom na svom vanjskom rubu; to se lako opaža i direktnim opažanjem glorijske u prirodi. Taj je maksimum uvijek višemanje oštar. Osim ovakvih vizuelnih opažanja, ovu pojedinost o glorijskoj potvrđuju i mikrofotometričke registracije diapozitiva, koji su dobiveni kontaktnim postupkom iz originalnih snimaka; takva je mikrofotometrička snimka u sl. 3.

S druge strane, povećala li se udaljenost između predmeta i njegove sjene, kako je to slučaj kod malenih visina sunca, i polusjena i glorijske postaju šire, pa glorijska gubi na intenzitetu, a njezin se maksimum manje ističe prema okolnoj rasvjeti. U tom slučaju glorijsku zaista lakše raspoznavamo na travi, pogotovo ako hodamo (kako to često ističu stariji pisci), nego ako sjena kod toga pada na smeđu površinu gole oranice. Držimo, da je ova bolja vidljivost na travi poglavito posljedica okolnosti, da oko ima najveću osjetljivost u zelenome. *Winterfeldov*, odnosno *Richarzov* efekt može imati kod toga samo sporednu ulogu, ukoliko se oko sjene glave na nekim vrstama trave osim glorijske opaža i jedan poširi, ali slabo zamjetljiv i loše definiran vijenac nešto jače svjetlosti, sličan onom na rosnoj travi. Isto tako sporednu ulogu igra kod toga malena visina sunca. I glorijska i *Obermayerov* tamni obrub dosta se lako razabiru u posve drugim prilikama čak oko samog podneva; naime lako ih vidimo na sivoj asfaltnoj podlozi hodnika uzduž ravnog ruba sjene krovova u jednoj ravnoj ulici, ako hodamo u pravcu tog ruba, naročito ako daljina sjene od ruba krova ne prelazi 15 metara. Tada ih vidimo možda bolje nego na travi kod malene visine sunca, jer je atmosfera redovito prozirnija nego po izlazu ili pred zalaz sunca.

2. Eksperimentalni uređaji

1. Eksperimenti su izvođeni kroz nekoliko vrlo vedrih dana krajem veljače i krajem rujna 1943. na terasi Fizikalnog zavoda u Zagrebu u vremenu između 11 i 13 sati. Tih je dana atmosfera bila tako bistra, da su se na planini Sljeme (sjeverno od grada) jasno razabirale sve pojedinosti. Srednje visine sunca

²⁹⁾ Pernter u. Exner, l. c., str. 467.

kod opažanja u veljači iznosile su oko 35° , a u rujnu oko 44° . Istraživani su pojavi na jednostavnim sjenama (poglavlje 3) i pojavi na složenim sjenama (poglavlje 4). Opažanja su izvedena i vizuelno i fotografski.

Postupak je bio u glavnim crtama ovakav. Predmet, kojemu je istraživana sjena, pričvršćen je na određenoj daljini pred zastorom od napetog bijelog kartona, koji je bio namješten što je moguće bolje normalno prema pravcu sunčanih zraka. Traženi normalni položaj naden je pomoću malenog ogledala, položenog na plohu kartona; zastor je namješten tako, da je svjetlost reflektirana od ogledala padala na stražnju stranu predmeta. Zatim je sjena fotografski snimljena pomoću kamere, koja je bila točno fokusirana na površinu kartona. Kamera je stajala malo postrance, tako da je njezina vidna os zatvarala kut od 10° do 15° s pravcem sunčanih zraka. Posljedica ovog kosog snimanja je laka eliptičnost sjene kugle u sl. 4 (tabla I). Ekspozicije uz jako zastrti objektiv iznosile su u snimkama bez filtra 0,002 sec; za različite filtre ekspozicije su varirale između 0,2 sec i 1 sec.

Osim o vedrini neba, jasnoća pojedinosti na snimkama uvelike zavisi o vrsti fotografskih ploča. U ratno vrijeme teško je bilo s izborom ploča. Konačno smo najbolje rezultate postigli sa sitnozrnim, ortohromatičnim pločama Agfa-Mikro-Platte, koje smo razvijali vrlo sitnozrnim razvijачem³⁰⁾. Sve vrste upotrebljenih ploča bile su antihalo. Osim toga, mikrofotometrička registracija snimaka stavljala je posebne zahtjeve na vrst bijelog kartona, na koji je padala sjena, jer se od njega tražilo, da pokazuje što manju granulaciju i da nema odsjeka. Konačno smo se zaustavili na kartonu za crtanje s oznakom »Schoellers Parole«. Pod tim optimalnim uslovima snimljene su snimke, koje odgovaraju slikama. 1 do 6 [sl. 1, 4, 5 na tabli I (odnosno i mikrofotometričke registracije u sl. 2, 3 i 6) i sl. 16 i 17 na tabli VI].

2. Mikrofotometar bio je improviziran. Oštra umanjena slika usijane elektrode jedne pointolitne svjetiljke za stalnu struju padala je kroz tijesan procijep na emulziju mikrofotometričane ploče. Vrlo dobar objektiv projicirao je 5 puta povećanu sliku rasvjetljenog dijela emulzije na zastorić, za kojim se iza uske pukotine (0,3 mm) nalazila selenova fotostanica u spoju s aperiodičkim galvanometrom. Naravno, i rubovi procijepa pred emulzijom i rubovi uske pukotine bili su brižljivo počađeni. Za sporo jednoliko pomicanje mikrofotometričane ploče i jednoliko pomicanje fotografskog papira, na koji je padala registracija, služio je prenos s osovine jednog sinhronog trofaznog motora. Da bismo iz brze vrtnje motora postigli potrebnu malenu brzinu pomicanja fotografske ploče (između

³⁰⁾ Agfin atomal-razvijач.

0,02 i 0,03 mm/sec), morali smo upotrebiti redukciju u tri stepena. Od ovih je samo prvi stepen bio zupčasta transmisija (50 : 1), dok su ostala dva stepena bila kola na vretenu sa spojnicama od jakog tankog konca. Na ogranku, kojim je izvođeno pomicanje fotografskog papira, brzina pomicanja, t. j. duljina krivulje registracije, dala se jednostavno mijenjati izmjenom kola na vretenu. Konci su dakako bili stalno nategnuti protutežima preko kolotura. Posljedica nejednolikog trenja u žljebovima, kroz koje su se pomicale kaseta s fotografskom pločom i kaseta s papirom, i tim prouzročenog nejednolikog istežanja spojnih konaca bili su samo sitni skokovi, reda veličine 0,3 mm, koji se mjestimice opažaju na krivuljama registracije u sl. 2, 3 i 6, a koji inače ne smetaju³¹⁾. Amplituda krivulja, uslovljena širinom pukotine, osjetljivošću fotostanice i osjetljivošću galvanometra, dala se mijenjati u širokim granicama širinom pukotine.

3. Ovi pojavi na sjenama u sunčanoj svjetlosti uspoređivani su s pojavima ogiba u laboratorijskim eksperimentima o ogibu u svjetlosti iz točkastog izvora i u svjetlosti iz prostranog okruglog izvora. Ti su eksperimenti izvođeni noću u jednom dugom hodniku Fizikalnog zavoda u Zagrebu, gdje je slobodna dužina mlaza svjetlosti iznosila 43,9 metara. Udaljenosti (a) predmeta, na kojemu je nastajao ogib, od izvora svjetlosti (primarno: krater lučne svjetiljke u stalnoj struji) varirale su između 28,8 m i 31,4 m, dok je udaljenost između izvora svjetlosti i fotografske ploče ($a + b$) bila uvijek 40,4 m. U eksperimentima o ogibu u svjetlosti iz točkastog izvora promjer okrugle rupice iznosio je 0,8 mm. Prostran kružan izvor svjetlosti proizveli smo na umjetan način tim, što smo krater električkog luka među ugljenovima projicirali na daljinu 43,9 m, pa smo mlaz svjetlosti iz leće postepeno zaokružili pomoću tri uzastopne kružne diafragme na početni promjer 22 mm. Tim smo ga načinom ujedno pročistili od tragova difuzne svjetlosti iz kućice svjetiljke i iz objektiva. Divergencija srednjeg dijela zraka svjetlosti u mlazu određena je na daljini 30 m od izvora pomoću kugle i njezine sjene. Za krajeve promjera te kugle (47,3 mm) divergencija je iznosila prosječno 29'.

Razlike intenziteta svjetlosti među pojedinim ogibnim prugama na negativu vrlo su male i u sunčanoj svjetlosti i u svjetlosti iz umjetnog prostranog izvora. Da bismo ih dobili kako-tako zamjetljivima za reprodukciju, pozitivni su napravljeni na vrsti papira, koja radi vrlo mekano. Svi su pozitivni napravljeni kontaktnim postupkom.

³¹⁾ Po jedan poveći takav skok opažaju se na lijevoj uzlaznoj grani krivulje u sl. 2 i na desnoj uzlaznoj grani gornje krivulje u sl. 6.

3. Jednostavne sjene.

1. U sl. 1 (tabla I) prikazani su jedan iznad drugoga jedan slabije i jedan jače eksponirani pozitiv jedne te iste snimke sjene, koju je bacalo jedno drveno ravnalo u sunčanoj svjetlosti. Ravnalo je bilo postavljeno normalno prema sunčanim zrakama u daljini $b = 190$ cm od kartonskog zastora, na koji je padala sjena. Snimka je napravljena u zelenoj svjetlosti (λ oko 540 m μ ; trajanje ekspozicije uz malen otvor diafragme iznosilo je 0,2 sec). Širina ravnala iznosila je 62,8 mm. Crna pruga u sjeni je komad crnog papira, koji odgovara geometrijskoj seni širine ravnala, izračunanoj za gore navedenu daljinu b . Ta je pruga bila zalijepljena na zastoru. Visina sunca iznosila je 45°.

Slovima iznad i ispod slike naznačene su ove pojedinosti.

S je geometrijska sjena; pruga crnog papira neznatno je pomaknuta prema njoj na desno. Tamnost u sjeni opada prema njezinoj sredini.

M je spomenuti tamniji obrub između geometrijske sjene i polusjene, koji je najprije zapazio Obermayer.

O je uska i slaba svijetla pruga, koja leži između *S* i *M*. Jasno je pokazuju mikrofotometričke registracije negativa (sl. 2). U jednom diapozitivu jedne snimke, koja odgovara slici 7 (tabla I), a koji je bio učinjen na tvrdoj ploči, *O* se mjestimice razaznaje kao uzak svijetao potez. Ta je snimka bila učinjena u crvenoj svjetlosti.

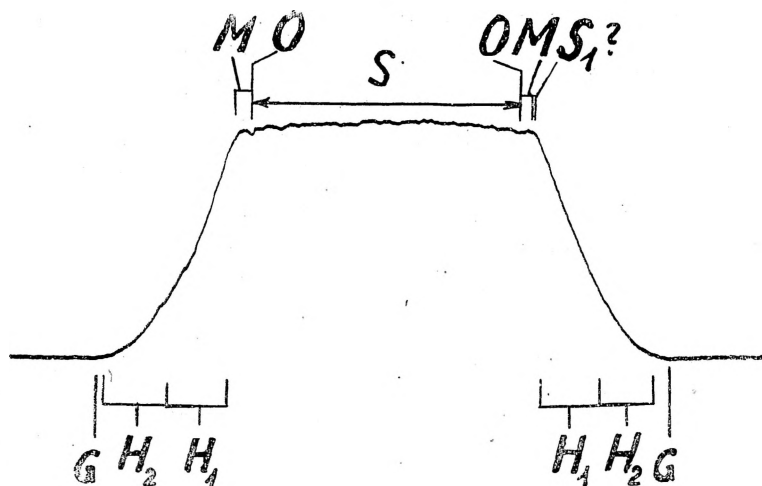
H je polusjena.

G je gloriја.

P je jedan tamniji obrub, koji dolazi neposredno uz vanjski rub gloriје; on je samo neznatno tamniji od područja slobodne rasvjete. Većinom je osrednje uzak. U snimkama ga opažamo uzduž gloriја, dok daljina predmeta od zastora ne prelazi 2,5 m. Tako ga redovito nalazimo na negativima uzduž gloriје uz sjenu fotografske kamere. Ponekada je oštro ograničen s obiju strana, a ponekada se opet postepeno gubi na vanjskoj strani u području slobodne rasvjete. Teško je opažati ga vizuelno, jer su oči zablještene sjajem bijelog zastora. Sigurnije ga se opaža vizuelno u klinastom prostoru između sjene kugle i sjene ravne zapreke u namještajima, koji odgovaraju slikama 11 i 12 (tabla III).

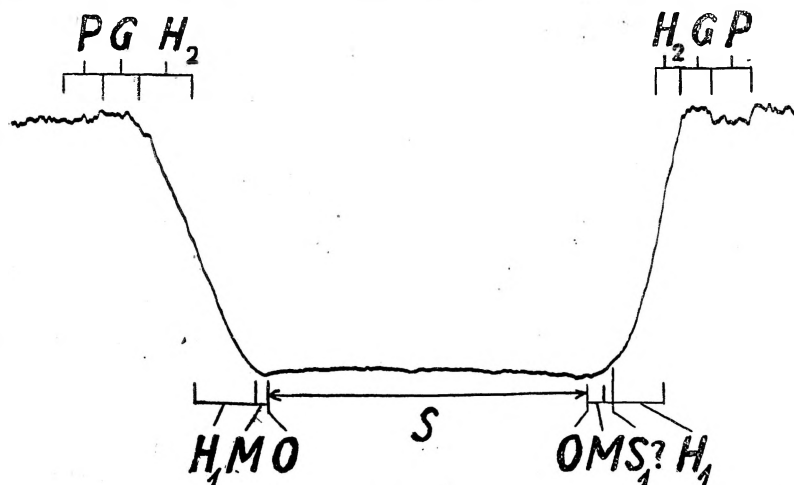
U koliko možemo ustanoviti iz literature, koja nam je dostupna, mi smo bili prvi, koji smo otkrili (1943.) svijetlu prugu *O* i tamnu prugu *P*. Našli smo ih vizuelnim opažanjem na negativima, a nalaz su potvrdile mikrofotometričke registracije. Kako se vidi iz desnog dijela sl. 3, *P* se u pozitivima mjestimice dobro ističe.

Sl. 2 je mikrofotometrička registracija negativa sjene ravnala, koja je prikazana u sl. 1, a sl. 3 je mikrofotometrička registracija diapozitiva te iste snimke. Diapozitiv je bio napravljen



Sl. 2

kontaktnim postupkom na istoj vrsti sitnozrnih ploča (Agfa-Mikro-Platte). Slaba konveksnost krivulje u sl. 2 u njezinom dijelu, koji odgovara geometrijskoj sjeni S , ne odgovara stvar-



Sl. 3

nosti, jer se već vizuelnim opažanjem zamjećuje, da tamnost u geometrijskoj sjeni opada prema sredini. Uostalom, to se donekle zamjećuje još i u reprodukcijama u sl. 1 i 4 (tabla I).

Ova konveksnost izazvana je Mieovim efektom svjetlosti raspršene iz prije spomenute umanjene slike usijane elektrode u pointolitnoj svjetiljci; ta je slika kod mikrofotometriiranja stvarana na emulziji fotografske ploče. Taj je Mieov efekt najjači upravo u prozirnim dijelovima emulzije, dakle u negativu u sjeni, a nije se dao posve ukloniti ni sužavanjem otvora, kroz koji je upadala svjetlost na emulziju. Tako je ovdje Mieov efekt prikrrio pravu stvarnost. Naprotiv, konveksnost krivulje u dijelu S u sl. 3 stvarna je, te ona prikazuje porast rasvjete prema sredini geometrijske sjene.

Sl. 4 u tabli I prikazuje jedan slabije i jedan jače eksponirani pozitiv jedne te iste snimke sjene jedne povećane kugle. To je bila velika čelična kugla za kuglične ležajeve, promjera 59,8 mm, sa sjajnom hromiranom površinom. Učvršćena je na dršku bez prethodnog omekšavanja čelika. Brušenjem je u njoj uvrtna rupa, a u ovu je utisnut željezni čep s maticom za vijak, kojim završuje vrh drška. Taj vrh drška bio je otanjen, da njegova sjena ne bi u znatnijoj mjeri izobličila sjenu kugle. Daljina kugle od zastora bila je $b = 210$ cm. I ova je snimka snimljena u zelenoj svjetlosti oko $\lambda 540$ m μ . Pruga od crnog papira preko sjene drška odgovara izračunanom promjeru geometrijske sjene kugle. Visina sunca iznosila je 43° .

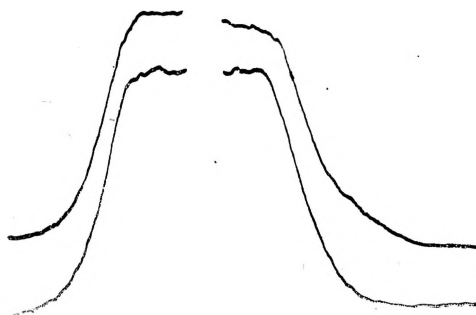
2. Polusjene na suprotnim stranama jednog predmeta općenito nijesu simetrične jedna s drugom. To se opaža već vizuelno na sjeni ravnala u sl. 1. Nejednakost polusjene na različitim mjestima opaža se i na sjenama kugle, kojoj odgovara slika 4; tu je nejednakost pokazala prilično dobro i reprodukcija u sl. 4, gdje se primjećuje, da je polusjena ispod desnog kraja horizontalnog promjera kugle nešto šira nego iznad njegova lijevog kraja.

U mikrofotometričkim registracijama negativna polusjena opažaju se dva dijela krivulje s različitim strminama: jedan strmiji dio H_1 , koji leži bliže geometrijskoj sjeni, i položitiji dio H_2 , koji se nastavlja na nj. Ovaj drugi dio ima naročito malenu strminu ispred glorijske G. Dio ove razlike svakako otpada na karakteristiku fotografske ploče; ali pretežni dio bit će realan, s jedne strane, jer tu razliku jednako pokazuju ploče s vrlo različitim karakteristikama, s druge strane, jer je nalazimo — i ako umanjenu — i na registracijama diapozitiva (sl. 3).

Mnogo razloga govori za to, da ovaj položitiji dio H_2 polusjene pretežno odgovara djelovanju spomenute atmosferske iradijacije od Mieova efekta iz slojeva najbližih prividnoj sunčevoj ploči. Zbog strmog hiperboličkog porasta intenziteta te iradijacije slojevi atmosfere u najbližoj blizini direktnih zraka iz rubova sunčeve ploče mogu izašiljati Mieovim efektom toliko svjetlosti, da ona djeluje na polusjenu. U prilog ovome govori napose činjenica, da su svi dijelovi sjene, a pogotovo polusjena i dijelovi izvan nje podvrgnuti vremenskim promjenama, a te su promjene prilično brze.

Ova se promjenljivost da vizuelno opažati u ovakvom uređaju. Čelična kugla za kuglične ležajeve, sa sjajnom površinom, promjera 22,6 mm, bila je učvršćena u daljini 190 cm od zastora. Njezina se geometrijska sjena iz te daljine reducirala na tamnu okruglu pločicu okruženu prstenom tamnog obruba M , a oko svega dolaze široki vijenci polusjene i glorijske. Vizuelnom motrenju uvelike smeta sjaj, kojim bliješti bijeli karton; ali se ipak opažaju ove pojedinosti. Polusjena i glorijska imaju općenito oblik nepravilnih elipsa, kojima se i eliptičnost i položaj osiju brzo mijenjaju. Istodobno i centralni dio sjene $S + M$ brzo mijenja svoj položaj u eliptičnoj polusjeni. Glorijska nema isti intenzitet u svim svojim dijelovima nego pokazuje promjenjive koncentracije svjetlosti sad ovdje sad ondje³²⁾. Prema tome, sunčeva ploča zajedno s atmosferskom iradiacijom iz najbližih slojeva djeluje kao izobličen izvor svjetlosti, kojemu se oblik brzo mijenja. Vidi o tome u dodatku.

Pokušali smo da ove pojedinosti objektivno utvrdimo. Sjenu te kugle u navedenom položaju snimili smo u zelenoj svjetlosti (λ oko 540 m μ) tri puta uzastopce u ukupnom vremenu od oko 3 minuta. Reprodukcijske pozitivne ovih snimaka prikazane



Sl. 6

su u sl. 5 (tabla I). Puni potez pod svakom sličicom prikazuje položaj veće osi polusjenine elipse, kakav je na negativu, a crtkani potez pokazuje položaj veće osi glorijske elipse, također prema negativu³³⁾.

I strmina polusjene u mikrofotometričkim registracijama također je vremenski promjenljiva. U sl. 6 prikazani su izresci,

³²⁾ Držimo, da te koncentracije svjetlosti nijesu posve subjektivan pojav izazvan tim, što su oči zablještene intenzivnim sjajem zastora. Takve koncentracije mogle bi imati udjela u svjetlijim prugama, koje je opažao Stuchtey oko sjene svog aerostata (l. c., sl. 2). Relativna veličina geometrijske sjene prema polusjeni odgovara u njegovoj sl. 2 približno našoj slici 5.

³³⁾ U reprodukcijama u sl. 5 eliptičnosti su znatno izmijenjene reprodukcijom.

koji odgovaraju lijevoj i desnoj polusjeni kugle u sl. 4 i u jednoj drugoj snimci sjene iste kugle, učinjenoj također u zelenoj svjetlosti neposredno poslije ove prve.

Samo je po sebi jasno, da je po tome i nesimetriji u raspodjeli intenziteta svjetlosti u polusjenama na suprotnim stranama mikrofotometričkih registracija u sl. 2, 3 i 6 općeniti uzrok u djelovanju atmosferske iradijacije. — Rasvjeta je nesimetrički raspodjeljena i uzduž centralnih horizontalnih presjeka kroz otvore u sredini okruglih ploča, koje vidimo u sl. 11 i 12 (tabla III).

Kod predmeta sa crnom ili tamnom površinom bez odsjeva može promjenljivi lom svjetlosti u toplim strujama uzduha, koje se dižu iz ugrijane površine, u znatnoj mjeri pridonijeti ovim nesimetrijama i njihovoj promjenljivosti. Kod navedenih čeličnih kugala taj je izvor pogrešaka bio gotovo posve eliminiran. Spomenuta ploča iz sl. 11 i 12 imala je crnu poliranu površinu.

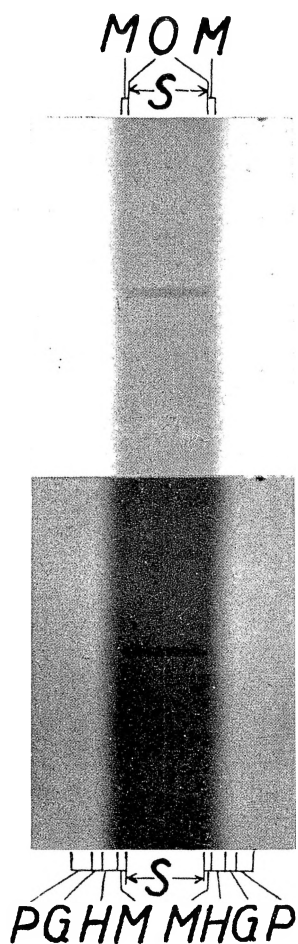
3. Umanjimo li ili uklonimo li djelovanje atmosferske iradijacije, glorijska postaje znatno intenzivnija i oštija. U prilog tome navodimo ove činjenice.

Sl. 7 (tabla I) prikazuje sjenu kvadratne željezne ploče sa crnom sjajnom površinom, koja ima u sredini okrugao otvor³⁴⁾. Ploča je bila postavljena normalno na sunčane zrake u daljini $b = 185$ cm od zastora. Snimka je učinjena na ploči s položitom karakteristikom (tzv. portretna ploča), pa se glorijske uzduž strana kvadrata slabo zamjećuju. Međutim se pojačana prstenasta glorijska u središnjem okruglom otvoru dosta jasno razabira i u reprodukciji.

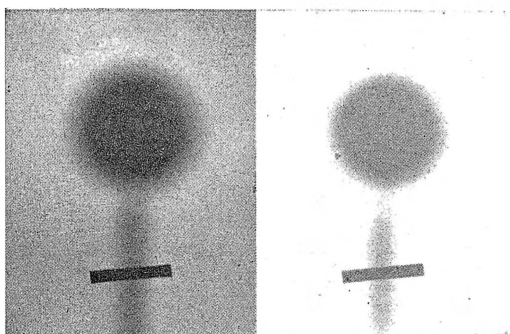
Složeni list pajasena (*Ailanthus glandulosa*) sastoji od dugog srednjeg drška, koji na svom vrhu i s obje strane nosi na vrlo kratkim peteljčkama duguljaste velike listove. Nasuprotni listovi leže gotovo u istoj ravnini ili malo vise zatvarajući međusobno vrlo tup kut. Ako sjena ovog složenog lista pada na podlogu iz zgodne daljine (2 do 3 metra), opažamo sjajne glorijske s obiju strana sjene srednjeg drška³⁵⁾. Glorijske su tako oštre i svijetle, da smo ih prvi put zapazili na sivom uličnom asfaltu. Pojav tumačimo tim, da prostrani listovi, koji se na svakoj strani redaju jedan tik drugoga, uvelike zaklanjaju djelovanje atmosferske iradijacije.

³⁴⁾ Strana kvadrata iznosila je 12,1 cm, a promjer otvora 5,1 cm. Uglovi ploče bili su tupo odrezani, da bi se izbjeglo stvaranje izbojaka u obliku ribljeg repa, kakve vidimo na vrhu šiljastog kuta »trokuta« u sl. 8 (tabla II).

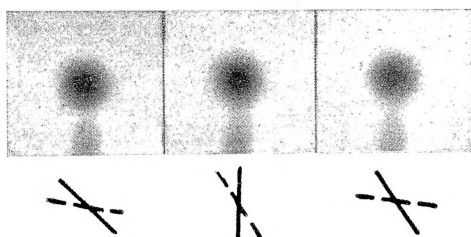
³⁵⁾ Sjena drška na navedenoj daljini sastoji se od vrlo široke polusjene i od tamnih obrubova M . U stvari su pojednost u ovoj polusjeni za daljine veće od 150 cm. vrlo zamršene. U sredini se gotovo pravilno izmjenjuju u pravcu dužine drška približno eliptički svijetli dijelovi s tamnijim dijelovima. S obje strane dolaze neprekinuti tamni rubovi M , tako da se čini, da je sjena drška podvostručena. Obje glorijske dolaze neposredno iza tamnih obrubova.



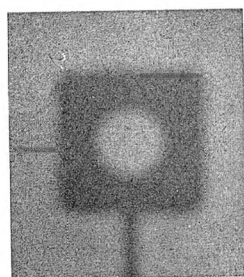
Sl. 1.



Sl. 4.



Sl. 5.



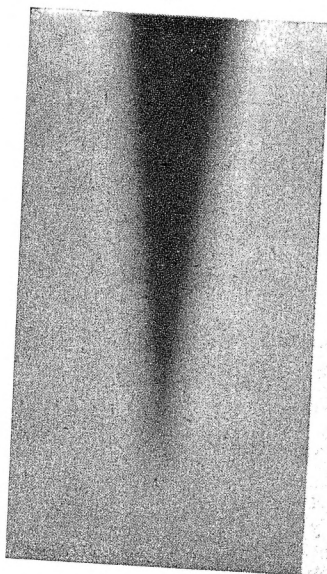
Sl. 7.

SL. 9.

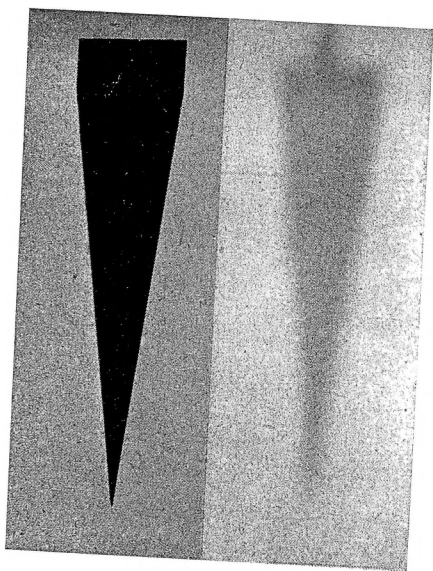
A

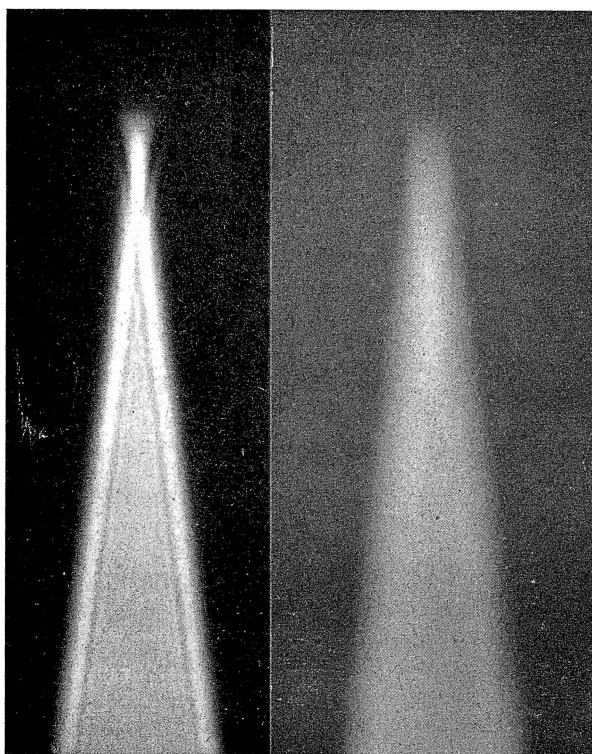


B



SL. 8.

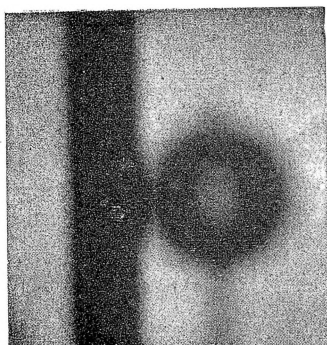




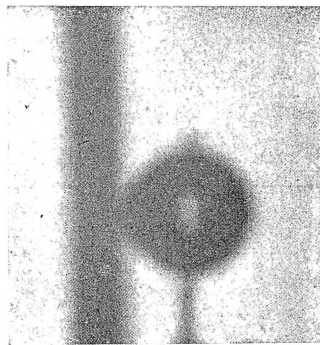
A

B

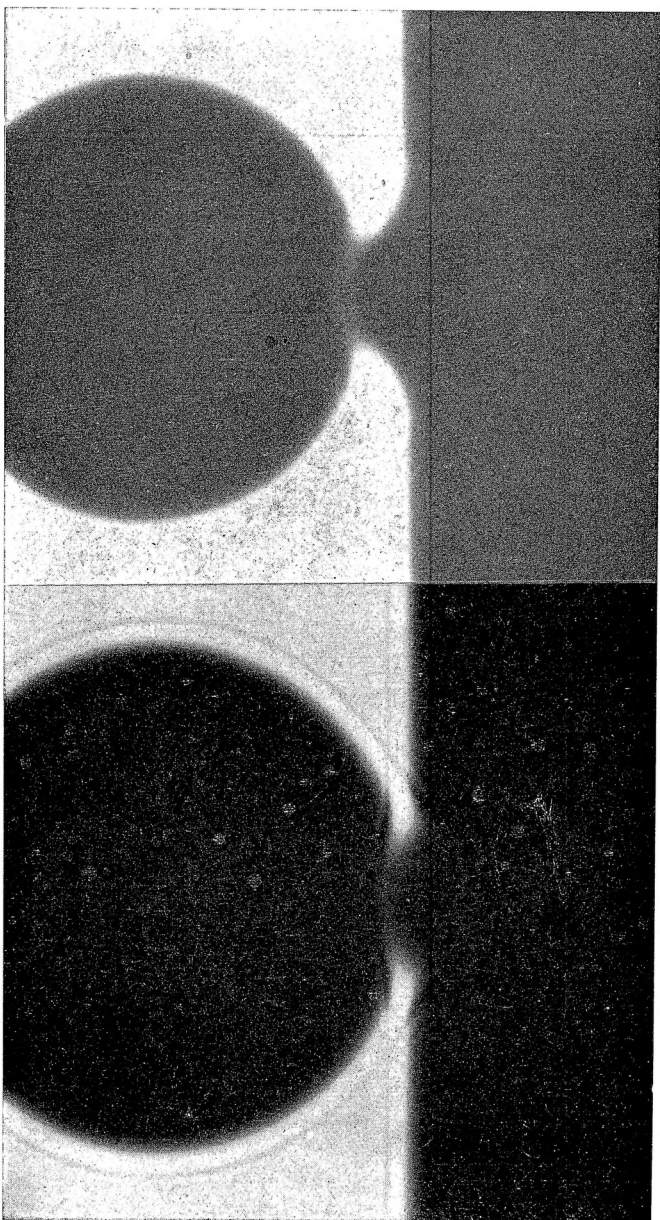
Sl. 10.

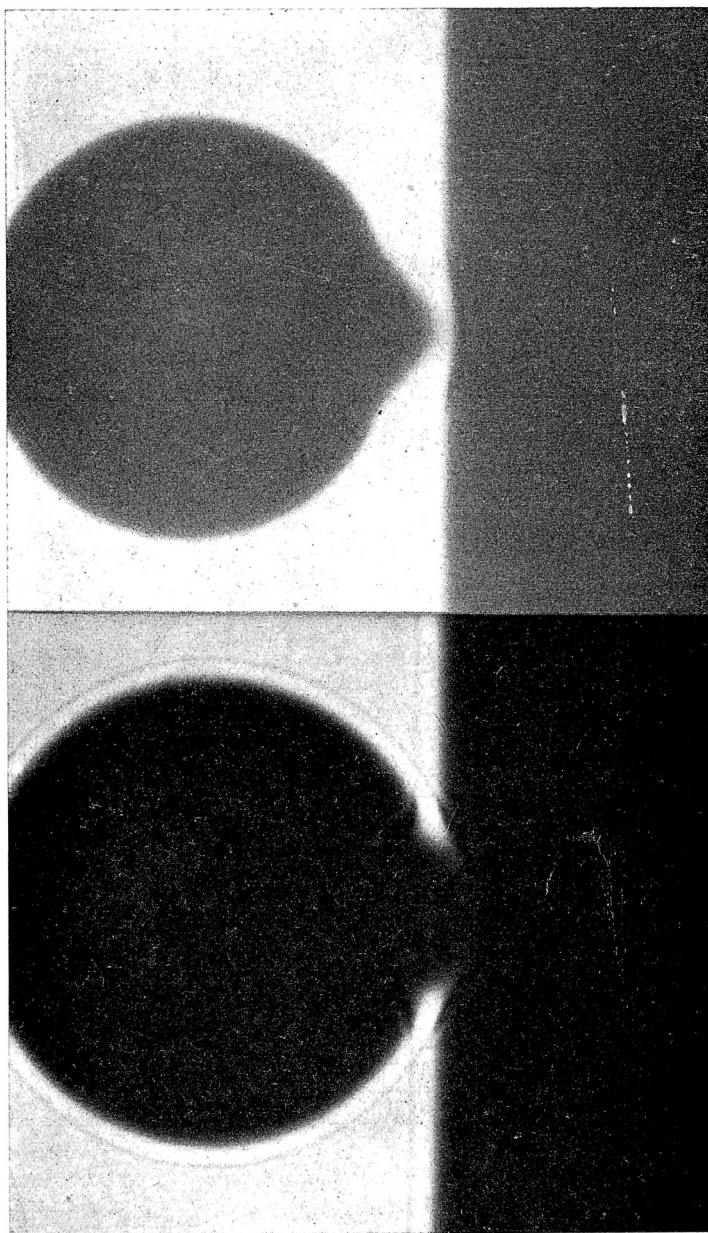


Sl. 11.

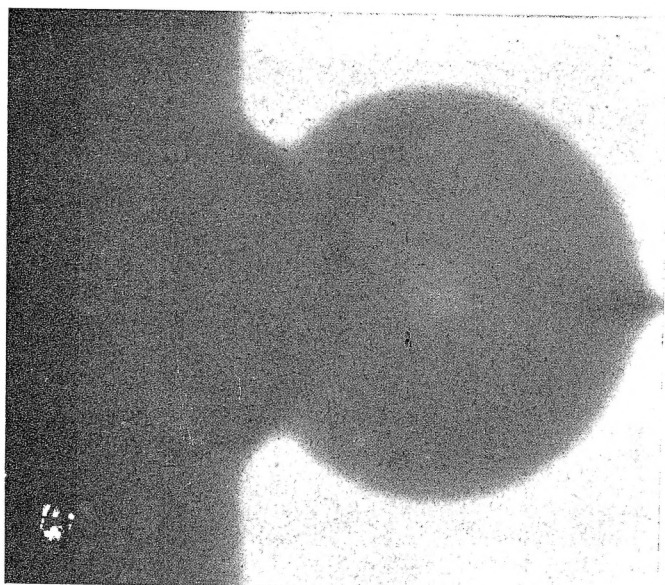


Sl. 12.

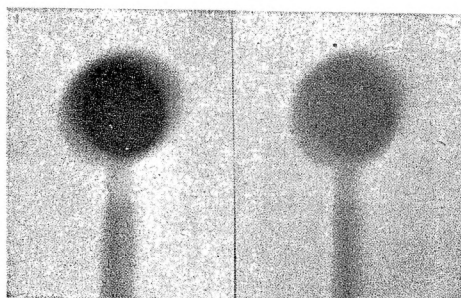




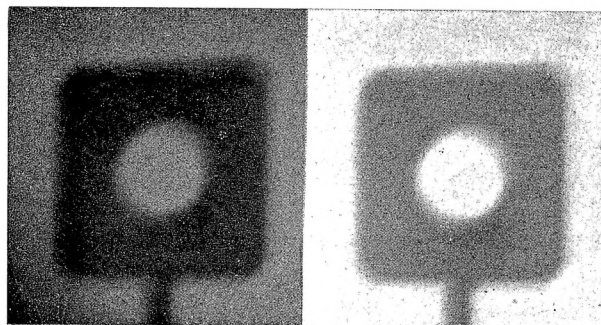
Табла VI.



Sl. 15.



Sl. 16.



Sl. 17.

4. Sjena opisane kvadratne ploče snimljena je pomoću filtera u tri spektralna područja: u ultraljubičastom (oko λ 360 m μ), u zelenom (oko λ 540 m μ) i u crvenom (oko λ 660 m μ). Sve tri snimke učinjene su jedna za drugom u ukupnom vremenskom razmaku od oko 4 m; daljina ploče od zastora bila je $b = 185$ cm. Na negativima izmjereni su horizontalni razmaci među maksimumima glorijskih uz vertikalne strane kvadrata i horizontalni promjeri maksimuma prstenastih glorijskih u kružnom otvoru. Srednje izmjerene vrijednosti u milimetrima bile su ove: u ultraljubičastom 24,3, 6,1, u zelenom 24,4, 6,2, u crvenom 24,4, 6,2. Prvi broj svagdje pripada razmaku među glorijskim uz vertikalne strane, a drugi promjeru unutrašnje glorijske. Po ovome se čini, da je glorijska ahromatična³⁰).

5. Druga svojstva glorijske i tamnog obruba M nađena su i istražena na sjeni duguljastog istokračnog trokuta, kao i u svjetlosti, koja je prošla kroz trokutni izrezak, koji odgovara tom istom trokutu. Iz crnog kartona izrezan je duguljast istokračan trokut, pa je sredinom priljepljen na trokutnu drvenu dasčicu, da se ne bi savijao. Kako se uglavnom radilo o pojavama oko najoštrijeg kuta, ostala su dva kuta otupljena otprilike na prave kutove, tako da je konačni oblik bio vrlo oduljen peterokut (sl. 8 desno, tabla II). Preostali trokutni izrezak isto tako je pričvršćen na dasku. Trokut, pa trokutni izrezak namješteni su normalno na sunčane zrake u daljini $b = 317$ cm od zastora, pa su snimljene njihove sjene. Da bi se mogle usporediti dimenzije na sjenama sa dimenzijama trokuta, trokut je iza toga položen na zastor na istom mjestu, gdje je prije bila njegova sjena, pa je snimljen uz nepromijenjeni položaj kamere.

Spomenuta sl. 8 prikazuje snimku sjene trokuta, a pored nje snimku samog trokuta. Na snimci sjene opažamo, da se tamni obrubovi M , koji pripadaju krakovima trokuta, ispred vrha ukrštavaju, pa nastavljajući se iznad točke, gdje je sjena sasvim prešla u polusjenu, tvore oblik ribljeg repa. Glorijske uzduž istih strana protežu se nepromijenjeno sve do kraja ribljeg repa. Uspoređivanje lijeve i desne snimke pokazuje, da je duljina između maksimuma glorijske uz nejednaku trokutovu stranu i vrha ribljeg repa jednaka visini trokuta.

Ogibni pojavi u svjetlosti, koja je prošla kroz trokutni izrezak, pokazuju negativnu korespondenciju prema ovim ogibnim pojavama na sjeni trokuta, tako da je ovdje približno ispunjen *Babinetov* princip. Kod te korespondencije, glorijske uz krakove izreska odgovaraju tamnim obrubovima uz krakove trokuta, a tamni obrubovi uz krakove izreska odgovaraju glorijskim uz krakove trokuta. Poimence, glorijske uz krakove izreska sijeku se nedaleko vrha izreska, pa se odatle nastavljaju

³⁰) Na povećanim negativima ne postizava se veća točnost mjerenja, jer se s povećanjem gubi oštrotina maksimuma.

dalje i prave svijetao oblik ribljeg repa, dok tamni obrubovi teku nepromijenjeno dalje sve do kraja ribljeg repa. —

Pored spomenute velike ustrajnosti, koju pokazuje glorijsa pri lako naoblačenom nebu, nova su se njezina svojstva pokazala u pojavama na složenim sjenama, koja su obrađena u idućem poglavlju.

6. U laboratorijskim eksperimentima istraženi su pojavi ogiba svjetlosti na ravnoj zapreci, na kugli, na trokutu i na trokutnom izresku u svjetlosti iz točkastog izvora i u svjetlosti iz prostranog kružnog izvora. Ovdje ćemo prikazati samo rezultate o ogibu na ovim dvjema posljednjim zaprekama.

Sl. 9 (tabla II) prikazuje pojave ogiba na trokutu; dio A snimljen je u svjetlosti iz točkastog izvora, a dio B u svjetlosti iz prostranog izvora. Upotrebljen je vrh trokuta iz sl. 8. Daljine u ovim snimkama bile su: daljina predmeta od izvora svjetlosti iznosila je 30,2 m, a daljina fotografske ploče od predmeta 10,2 m. Te su iste daljine bile i u eksperimentima, kojima odgovara sl. 10 (tabla III). Široka svijetla pruga, koja izvana prati polusjenu u sl. 9 B, pokazuje isto glavno svojstvo, koje smo vidjeli kod glorijsa: njezin intenzitet postepeno raste prema njezinom vanjskom rubu, gdje završuje osrednje ostrim maksimumom. To je poznato svojstvo prve svijetle ogibne pruge kod ogiba na ravnom rubu prostrane zapreke u svjetlosti iz točkastog izvora; to vidimo u dijelu A slike 9. Na originalu pozitivu dijela B još se zamjećuje u srednjem dijelu visine slike iza opisane široke svijetle pruge prvi ogibni minimum kao znatno tamnija slaba pruga, a u negativu se u istom predjelu slabo zamjećuje drugi ogibni maksimum. Znatnija razlika pojedinosti u dijelu B prema onima u sl. 8 stoji samo u tome, da ovdje opisani prvi ogibni maksimum, koji odgovara glorijsi, okružuje u ovalno zaobljenoj krivulji i sam riblji rep; samo mu je u tom zaobljenom dijelu intenzitet mnogo manji. U tome je analogija onome, što vidimo u dijelu A. Sam oblik ribljeg repa i ovdje nastaje ukrštanjem obaju tamnih obrubova, koji leže uz svaku stranu između prave sjene i polusjene. Ovi se tamni obrubovi razlikuju od tamnog obruba M u sl. 1 i 4 samo plosnatiom raspodjelom intenziteta. Na negativu dijela B mjestimice se slabo nazire difuzna svijetlija pruga između sjene i polusjene; ona odgovara svijetlom potezu O u sl. 1 do 4.

Sl. 10 (tabla III) prikazuje ogibne pojave u svjetlosti, koja je prošla kroz vrh trokutnog izreska. I ovdje je u dijelu A prikazan ogib u svjetlosti iz točkastog izvora, a u dijelu B ogib u svjetlosti iz prostranog kružnog izvora. Uspoređivanjem dijelova A i B lako ustanovljujemo, da je riblji rep, koji tvore u B nastavci obiju graničnih svijetlih pruga, ostatak Newtonovih hiperbola iz dijela A, u koje se nastavljaju prvi ogibni svijetli obrub uz jednu i uz drugu stranu izreska iza svog sjecišta. Nešto tamnije trokutno područje, omeđeno prvim ogibnim mi-

nimumom uz jednu i uz drugu stranu izreska, a koje se jasno ističe u dijelu *A*, opaža se i u dijelu *B*, gdje ima difuzne rubove. Ali je ovo trokutno područje u dijelu *B* posve izgubilo mrežu stvorenu od ogibnih maksima i minima viših redova, kojom je ono u dijelu *A* isprutano po cijeloj svojoj površini. Ta se mreža vrlo lijepo ističe u negativima dijela *A*; a još i ovdje u reprodukciji joj se mjestimice naziru tragovi. I u reprodukciji dijela *B* opaža se po cijeloj dužini obiju strana ispred potpune sjene nešto tamniji obrub, koji odgovara tamnom obrubu *M*. U negativu ovog dijela mjestimice se sve do vrha svijetlog ribljeg repa nazire između prave sjene i ovog tamnog obruba slabašna, difuzna svijetla (odnosno u negativu: tamna) pruga, koja odgovara svijetlom potezu *O* kod sjena u sunčanoj svjetlosti.

7. Iz činjenica dobivenih ovim uporednim eksperimentima dobivamo nedvouman odgovor o gloriji, koja na sjenama predmeta u sunčanoj svjetlosti prati polusjenu izvana. Po tome je glorijska prva svijetla ogibna pruga u svjetlosti sunca kao prostranog izvora. Ogib odgovara svjetlosti iz uprav nezastrtog ruba sunčane ploče. Pred nekoliko je godina *Wolfers*³⁷⁾ proširio *Fresnelovu* teoriju ogiba od točkastog na prostrane izvore svjetlosti za zapreku beskonačno protegnutu na jednoj strani, a omeđenu na konačnoj strani ravnim rubom. On izračunava rasvjetu na različitim točkama zastora od geometrijske sjene do izvan polusjene služeći se grafičkom integracijom. U pogledu prve ogibne svijetle pruge *Wolfers* nalazi, da ona postoji kod svake širine izvora svjetlosti³⁸⁾, a uvijek prati vanjski rub polusjene. Držeći se tako vanjskog ruba polusjene, ona se sve većma udaljuje od ruba geometrijske sjene, što je izvor svjetlosti širi. Razlika između glorijske i ove prve ogibne svijetle pruge u *Wolfersovim* grafikovima stoji samo u raspodjeli intenziteta. Kod *Wolfersa* dolazi plosnat maksimum intenziteta oko same sredine svijetle pruge, dok glorijska, u skladu s eksperimentalnim rezultatima o ogibu u svjetlosti iz prostranog izvora, ima oštar maksimum na svom vanjskom kraju.

Tamna pruga *P*, koju nalazimo u sl. 1 do 4 s vanjske strane glorijske, očito odgovara prvom ogibnom minimumu u svjetlosti iz točkastog izvora; ona postoji i kod ogiba u svjetlosti iz prostranog izvora. Nalazimo je i u *Wolfersovim* diagramima i u njegovim fotografskim snimkama. Možda bi eksperimenti izvedeni u krajevima s vedrijim nebom mogli dati odgovor na pitanje, da li ona i kod sjena u sunčanoj svjetlosti ima oštre rubove kao kod ogiba u svjetlosti iz točkastog izvora. To su djelomično pokazale naše mikrofotometričke registracije (sl. 3. desni kraj krivulje); kako je ona najjače izložena atmosferskoj iradijaciji, lako je moguće, da su njezini rubovi podvrgnuti jačim fluktuacijama.

³⁷⁾ F. Wolfers, Journ. de phys. (6) 6, 305, 1925; (7) 5, 585, 1934; (7) 8, 185, 1937.

³⁸⁾ Wolfers, I. c. (7) 8, 185, 1937, p. 192.

Tamni obrub M i susjedna slaba svijetla pruga O , koje nalazimo na sjenama u svjetlosti sunca između prave sjene i polusjene, jesu ogibni pojavi, kakvih nema kod ogiba u svjetlosti iz točkastog izvora. *Wolfers* je kod ogiba na zapreci omeđenoj ravnim rubom u svjetlosti iz prostranog izvora otkrio u području polusjene sustav svijetlih i tamnih ogibnih pruga, koje je on nazvao suplementarnim prugama³⁹⁾. Tamni obrub M može po svom položaju odgovarati *Wolfers*ovu prvom ogibnom minimumu u sustavu ovih pruga. U diagramima i shematskim slikama 2 i 8 u *Wolfers*ovoj prvoj radnji o ovim prugama nacrtan je ispred M jedan slab maksimum s oznakom O , koji leži točno na granici između geometrijske sjene i polusjene. U nekim reprodukcijama njegovih fotografskih snimaka nalazimo isto slovo⁴⁰⁾; ali na mjestima, koja su tako označena, ne razabiramo nikakve vidljive pojedinosti. Samo se na jednoj njegovoj mikrofotometričkoj registraciji⁴¹⁾ na jednom tako označenom mjestu vidi jedan slab maksimum. U *Wolfers*ovim radnjama nema o ovoj pruzi O gotovo nikakvih pojedinosti, osim ako bi se na nju odnosilo ovo: «on a ainsi l'impression d'une ligne nette marquant le bord de l'ombre»⁴²⁾. Slaba svijetla pruga O , koju smo ustanovili na našim snimkama i na našim mikrofotometričkim registracijama, odgovara po svojem položaju ovom *Wolfers*ovu maksimumu. — Za postanak suplementarnih pruga nema do sada pravog tumačenja.

Što se tiče ostalih maksima i minima suplementarnih pruga, na našim snimkama sjena u svjetlosti sunca nijesmo mogli pronaći ni na negativima ni na diapozitivima ništa sigurna; odnosno, tragovi pojedinosti, koje bi mogle pripadati ovamo, prekriveni su tragovima granulacije kartona, na koji je padala sjena. Možda bi mogla pripadati ovamo jedna sitna nepravilnost, koja se opaža na nekojim mikrofotometričkim registracijama u polusjeni odmah iza tamnog obruba M (sl. 2 i 3 na desnim krakovima; sl. 6 na lijevim krakovima), pa bi ona odgovarala prvom maksimumu ovog sustava pruga. Taj je maksimum kod *Wolfers*a označen sa S_1 . Ostale sitne nepravilnosti u području polusjene, koje se zamjećuju na tim registracijama, treba pripisati dijelom granulaciji kartona, dijelom granulaciji fotografske emulzije.

U jednoj *Volkmann*ovoj radnji⁴³⁾ pred nekoliko je godina publicirana jedna snimka, koja posve slični našoj sl. 1, a bila je dobivena pomoću laboratorijskog prostranog izvora svjetlosti. Eksperimentalni uređaj odgovara *Wolfers*ovom. Na toj se slici jasno vide tamni obrub M i tamna pruga P , svijetli

³⁹⁾ F. Wolfers, Journ. de phys. (6) 6, 354, 1925; (7) 5, 585, 1934. — Vidi također: Wolfers, ibid. (6) 9, 170, 1928.

⁴⁰⁾ Wolfers, l. c. (6) 6, 354, 1925, sl. 3; (7), 5, 585, 1934, na tabli nasuprot str. 595.

⁴¹⁾ Wolfers, na istoj tabli l. c. 40), sl. 4.

⁴²⁾ Wolfers, l. c. 40), prva radnja, str. 355.

⁴³⁾ W. Volkmann, Ztschr. f. Unterr. 49, 1, 1936, str. 4, sl. 6.

obrub G , a mjestimice se zapaža i svjetli potez O . Čini nam se, da zamjećujemo i porast rasvjete prema srednjem dijelu geometrijske sjene. U vanjskim dijelovima jedne i druge polusjene ima sve do maksimuma svijetle pruge G tamnih i svijetlih pruga. Držimo, da mjestimice zamjećujemo također više tamnih svijetlih pruga u desnoj polusjeni pokraj njezinog unutrašnjeg ruba. Poput *Obermayera*, i pisac prikazuje pruge O , M , G , P kao subjektivan pojav po *Machovu* zakonu o djelovanju kontrasta. Protiv takvog tumačenja govori činjenica, da je pojedina od tih pruga vidljiva i onda, kad zastremo dijelove slike s jedne i druge strane od nje.

4. *Pojavi ogiba na pukotini, kojoj bridovi ne leže normalno na zrakama svjetlosti.*

Početak i povod cijelom ovom istraživanju bila su nekoja kvalitativna opažanja, koja je prvi od nas izveo pred više od deset godina, a pripadaju upravo ovoj drugoj skupini pojava. Radi se o nepravilnoj izbočini, koja izbija iz sjene jednog predmeta u sunčanoj svjetlosti kroz njegovu polusjenu, ako se u pravcu sunčanih zraka mimo njegova ruba nalazi u većoj daljini od podloge, na koju pada sjena, rub drugoga predmeta, te ako je tranzversalni razmak među tim dvjema rubovima, mjereno normalno na pravac zraka, dovoljno malen. To je pojav, koji možemo dnevno opažati. Ali se čini po tome, što u literaturi ne nalazimo znatnijih podataka, da ovoj skupini pojava nije, bar kroz odulje vrijeme, poklanjano dovoljna pažnja. Dosta je spomenuti, da ovamo pripadaju različite nepravilnosti, koje možemo opažati zimi na sjenama golog granja stabala, ili promjenljive izbočine, koje izbijaju iz naše sjene sad ovdje sad ondje, kad hodamo pod takvim stablima.

1. Pojav u općim crtama izgleda ovako. Ako je tranzversalni razmak među susjednim rubovima, kako smo ga gore definirali, dovoljno malen, iz sjene predmeta, koji je bliži zastoru, izbija tamna izbočina prema sjeni drugog predmeta. Ako postepenim primicanjem jednoga od tih predmeta iz veće daljine umanjujemo taj tranzversalni razmak, ustanovit ćemo, da prvi trag izbočine nastaje, kad vanjski rub polusjene predmeta, koji je udaljeniji od zastora upravo padne na susjedni rub predmeta, koji je bliži zastoru. Nastavimo li s primicanjem, izbočina raste. Koliko se da ustanoviti vizuelno, oštri maksimum glorijske, koja pripada sjeni predmeta bližeg zastoru, ostaje kod toga u nepromijenjenom položaju prema pripadnoj sjeni. To se vidi i iz snimke prikazane u sl. 11 (tabla III), gdje glorijska uz desni rub sjene ravnala (predmet bliži zastoru) čini pravac još i onda, kad je izbočina narasla do svog maksimuma. Obzirom na to stvar izgleda tako, kao da glorijska bližeg predmeta potiskuje pred sobom polusjenu daljeg predmeta, pa je ta polusjena

na tom mjestu kao odsječena. Kad je izbočina tako narasla do svog najvećeg protezanja, glorijsa plitko zasjeca i u nasuprotni tamni obrub M i u rub sjene drugog predmeta. U toj posljednjoj fazi izbočine maksimum se glorijsa još uvijek provlači između izbočine i malo uleknutog nasuprotnog tamnog obruba M . Tome stanju odgovaraju snimke u sl. 11 i 12 (tabla III). Ako jedan od predmeta još samo malo primaknemo dotle, da rub sjene daljeg predmeta pada na rub bližeg predmeta, izbočina sraste s nasuprotnom sjenom, a glorijsa na tom mjestu iščezne. Glorijsa, koja pripada sjeni daljeg predmeta, u svim fazama pojava svršava na rubu sjene bližeg predmeta; tu je ona kao odsječena.

Istodobno se opaža, da intenzitet maksimuma glorijsa uz sjenu bližeg predmeta u onom suženom području između izbočine i nasuprotne sjene raste, kad se umanjuje razmak. Kako je već napomenuto, tada se u cijelom klinastom području s jedne i s druge strane izbočine lakše razaznaje i tamna pruga P . Nema sumnje, da se i jedno i drugo ima pripisati istom uzroku kao i porast intenziteta unutrašnje prstenaste glorijsa u sl. 7 i kao pojačanje glorijsa u sjeni pajasenova lista.

Ovi su pojavi prikazani u spomenutim sl. 11 i 12 za stadij, kad su izbočine narasle do maksimuma svog razvoja. Radi se o sjeni drvenog ravnala iz sl. 1 i o sjeni jedne okrugle ploče⁴⁴⁾. U sl. 11 ravnalo je bilo bliže zastoru; njegova udaljenost (b_2) od zastora iznosila je 182 cm, a udaljenost okrugle ploče (b_1) od zastora bila je 325 cm. U sl. 12 bilo je $b_1 < b_2$; i to: $b_1 = 232$ cm, $b_2 = 350$ cm. Tako velike razlike udaljenosti bile su odabrane upravo za to, da bi prilike bolje odgovarale spomenutom pojavu kod granja stabala u zimi. U stvari se izbočina s jednakim svojstvima opaža već za $\pm (b_1 - b_2) = 2$ cm.

Za $b_1 = b_2$, t. j. ako se radi o običnoj pukotini u sunčanoj svjetlosti, omanje izbočine izlaze iz oba nasuprotna ruba polusjena; nepravilnost pukotine, kako je imamo u slučaju ploče i ravnala, ne igra kod toga bitnu ulogu. Obje glorijsa se ukrštavaju, te kod neke zgodne širine pukotine maksimum svake glorijsa pravi plitku ulekninu u rubu nasuprotne sjene.

2. Opsežnijih istraživanja iz ovog područja ogiba svjetlosti nalazimo samo u starijoj literaturi. Brougham⁴⁵⁾ je u više radnja objavio svoja istraživanja o ogibu svjetlosti iz točkastog izvora na rubovima dviju zapreka s ravnim rubom, koje dolaze jedna za drugom. On dolazi do zaključka, da se zrake, ognute na prednjoj zapreci, po drugi put teže ogibaju na jednoj strani nego drugoj, pa drži, da se njegovi rezultati ne mogu protumačiti

⁴⁴⁾ Ploča s pukotinom za optičke eksperimente. Njezin promjer iznosi 67 cm. Pukotina u središtu ploče bila je sasvim otvorena. Malena izraslina na vrhu sjene ploče odgovara glavi vijka, kojim se mijenja širina pukotine.

⁴⁵⁾ H. Brougham, Phil. Trans. 140, 235, 1850. — Phil. Mag. (3) 36, 466, 1850. — C. R. 30, 43, 1850; 34, 127, 1852; 36, 691, 1853.

interferencijom, odnosno *Fresnelovom* teorijom. *Arago* se nije s tim složio⁴⁶⁾). U vezi s ovim *Broughamovim* radnjama *Quet*⁴⁷⁾ je istražio eksperimentalno i teorijski ogib svjetlosti iz točkastog izvora na ravnom rubu zapreke, koja prodire u sjenu druge takve zapreke, koja je ispred nje. On nalazi, da su pojavi analogni s običnim ogibom na ravnom rubu samo jedne zapreke s ravnim rubom. *Verdet*⁴⁸⁾ je ukratko obradio elementarnim postupkom ogib na pukotini s paralelnim ravnim bridovima, kojima ravnina nije normalna na pravcu zraka svjetlosti. *Quincke*⁴⁹⁾ je na jednom mjestu ovaj slučaj samo dodirnuo, pa navodi, da se radi o zamršenim pojavima. U novije je vrijeme *S. Ray*⁵⁰⁾ objavio neke snimke o deformacijama u sjenama jedne žičane mreže i jednog štapa, koji se nalazi između mreže i izvora svjetlosti. I ti *Rayevi* pojavi pripadaju ovoj skupini ogibnih pojava.

Zbog toga smo smatrali potrebnim, da ovu skupinu pojava na složenim sjenama u sunčanoj svjetlosti usporedimo u laboratorijskim eksperimentima ne samo s ogibnim pojavima na složenim sjenama u svjetlosti iz kružnog prostranog izvora nego i s ogibnim pojavima u svjetlosti iz točkastog izvora, jer su ti pojavi malo poznati. Uredaj je bio isti, kako je opisan u trećem odsječku drugog poglavlja. Daljine između oba ogibna predmeta u pravcu zraka svjetlosti bile su nešto veće nego u eksperimentima sa sunčanom svjetlošću. I ovdje su kao i u prethodnom poglavlju sjene padale izravno na fotografsku ploču. Kugla, kojoj sjenu vidimo na sl. 13, 14 i 15, bila je od drva, s crnom poliranom površinom; promjer joj je iznosio 47,3 mm.

U sl. 13 (tabla IV) prikazani su ogibni pojavi u sjenama ove kugle i ravnog ruba jedne prostrane zapreke i u prostoru među njima za slučaj, gdje je kugla ležala bliže izvoru svjetlosti, t. j. gdje je prostrana zapreka bila bliže fotografskoj ploči. Prema tome, ovu sliku treba usporediti sa sl. 11 u sunčanoj svjetlosti. Gornja snimka izvedena je u svjetlosti iz točkastog izvora, a donja u svjetlosti iz prostranog kružnog izvora. Udaljenosti od izvora svjetlosti bile su ove: udaljenost kugle $a_1 = 28,8$ m, udaljenost prostrane zapreke s ravnim rubom $a_2 = 31,4$ m, a udaljenost fotografske ploče $a_2 + b_2 = 40,4$ m.

Sl. 14 (tabla V) prikazuje takve ogibne pojave za slučaj, gdje je zapreka s ravnim rubom bila bliže izvoru svjetlosti, pa ovu sliku treba usporediti sa sl. 12. I ovdje gornja snimka prikazuje pojav u svjetlosti iz točkastog, a donja u svjetlosti iz prostranog izvora. Daljine od izvora svjetlosti bile su ove: uda-

⁴⁶⁾ Arago, C. R. 30, 47, 1850.

⁴⁷⁾ J. A. Quet, Ann. de chim. & phys. (3) 46, 413, 1856.

⁴⁸⁾ Verdet, l. c., I, str. 389.

⁴⁹⁾ G. Quincke, Pogg. Ann. 142, 177, 1871, str. 181.

⁵⁰⁾ S. Ray, Phys. Rev. (2) 25, 208, 1925.

Ijenost prostrane zapreke s ravnim rubom $a_2 = 28,8$ m, udaljenost kugle $a_1 = 31,4$ m, udaljenost fotografske ploče $a_1 + b_1 = 40,4$ m. U objema slikama 13 i 14 tranzversalni razmak bio je odabran tako, da je rub sjene predmeta bližeg izvoru upravo dodirivao rub daljeg predmeta. Sve su snímke učinjene bez filtra. U donjim dijelovima obiju slika ne vide se izvan srednjeg područja ni polusjena ni ogibne pruge, naročito prvi ogibni maksimum, jer smo išli za tim, da bismo što bolje dobili pojedinosti unutar samih sjena, pa smo u tu svrhu produljili ekspozicije i trajanje razvijanja negativa. Na taj način ti su vanjski dijelovi pojava preeksponirani, pa se nijesu pojavili na pozitivima.

U svjetlosti iz točkastog izvora ogibne se pruge, koje pripadaju jednoj i drugoj zapreci, u prostoru među njima ukrštavaju. Ogibne pruge, koje pripadaju predmetu bližem izvoru svjetlosti, prodiru u sjenu daljeg predmeta do malene dubine, a onda iščezavaju⁵¹). Naprotiv, ogibne pruge koje pripadaju predmetu udaljenijem od izvora, prolaze ispred izbočine naskroz kroz nasuprotnu sjenu. Tako smo na negativu gornje polovine slike 13 u sjeni kugle ispred izbočine iz ravnog ruba nabrojili ogibne pruge sve do šestog maksimuma.

Verdet je u diskusiji ogiba svjetlosti iz točkastog izvora na pukotini, kojoj je ravnina nagnuta prema zrakama svjetlosti, zaključio⁵²), da su ogibni pojavi simetrični prema jednoj centralnoj ogibnoj pruzi, koja je iz svog prvobitnog simetričnog položaja pomaknuta prema onom bridu pukotine, koji leži dalje od izvora svjetlosti. Taj je zaključak, bar za ove velike nagibe, u očitoj suprotnosti s rezultatom eksperimenata prikazanim u sl. 13 i 14. Ovaj nesklad naročito dobro pokazuje gornji dio sl. 13, gdje se jasno vidi, da je cijeli sustav ogibnih pruga potisnut izbočinom iz ruba ravne zapreke prema središtu kugle, koja je bila bliže izvoru svjetlosti. I elementarna teorija ogiba na pukotini ispravno daje pomak centralne pruge prema strani brida, koji je bliži izvoru svjetlosti. Jer projiciramo li nagnutu pukotinu na ravninu položenu normalno na zrake svjetlosti kroz brid, koji je bliži izvoru, imamo pukotinu pomaknutu prema tom bridu, na kojem počinje ogib. Tim je i centralna ogibna pruga pomaknuta prema tome bridu. Donji dio sl. 14 pokazuje, da to vrijedi i za ogib u svjetlosti iz prostranog izvora. Još i u reprodukciji primjećuje se nasuprot izbočini iz kugle iza plitke ulektine u sjeni ravnog ruba tamna pruga zakrivljena u luk, i dalje iza nje vrlo slaba svijetla pruga. U pozitivu i u negativu ove

⁵¹) U negativu gornje polovine slike 14 nalazimo u sjeni kugle slabu difuznu prugu, koja omeđuje izbočinu s ove strane u luk. Ali po svemu se čini, da ta pruga nije nastavak savijenog prvog ogibnog maksimuma, koji pripada rubu ravne zapreke, koja je bliža izvoru svjetlosti.

⁵²) *Verdet*, l. c. I, str. 389—390.

slike opazaju se ovdje dvije tamne i dvije svijetle pruge zakrivljene na lijevo, t. j. prema bridu pukotine, koji je bliži izvoru svjetlosti.

U negativima snimaka prikazanih u gornjim polovinama sl. 13 i 14 (svjetlost iz točkastog izvora) opaža se u izbočinama zamjetljivo veće crnilo; t. j. ove su izbočine nešto svjetlije od susjednih sjena. Ta se pojedinost zapaža i u objema reprodukcijama.

Ovi eksperimenti o ogibu na složenim sjenama u svjetlosti iz umjetnog izvora pokazuju potpun sklad u pogledu smjera, kojim raste izbočina, sa smjerom izbočine kod složenih sjena u sunčanoj svjetlosti. Izbočina uvijek izlazi iz ruba sjene predmeta, koji je dalje od izvora svjetlosti, odnosno koji je bliži zastoru, na koji pada sjena. Jedan je nesklad bio u tome, što se u običnim prilikama u sunčanoj svjetlosti ne opazaju nikakve ogibne pruge na rubu sjene predmeta bližeg izvoru svjetlosti, kakve se vide, kako je upravo spomenuto, u donjem dijelu slike 14 nasuprot izbočini iz sjene kugle. Tragovi se takvih pruga primjećuju i u donjem dijelu sl. 13 nasuprot izbočini. Na negativima sl. 11 i 12 nije im bilo traga ni na mikrofotometričkim registracijama.

Taj je nesklad uklonjen, jer smo ih našli vizuelno, kad smo udaljenost predmeta bližeg zastoru reducirali na nekih 40 cm, tako da je polusjena na rubu predmeta bila vrlo uska; $\pm (b_1 - b_2)$ b'lo je kod toga oko 150 cm. Ako u takvim prilikama tranzversalni razmak među nasuprotnim rubovima predmeta dotle umanjimo, da maksimum glorijske pruge upravo još prolazi između izbočine i uleknuto~~o~~ ruba nasuprotne sjene, pojavi se na tom rubu sjene niz jako oštarih finih ogibnih pruga. Te pruge teku uvijek paralelno sa glorijskom; to znači: one su paralelni pravci, ako je predmet s ravnim rubom bliže zastoru, jer je onda i glorijska ravna, a koncentrični su lukovi, ako je kugla bliže zastoru. Kod toga je glorijska prvi ogibni maksimum, a tamna pruga P je prvi ogibni minimum. Računajući tako ogibne pruge od G , mogli smo posve sigurno pratiti drugi ogibni minimum u cijeloj njegovoj dužini. Treći maksimum dao se ustanoviti s osrednjom sigurnošću samo blizu mjesta, gdje je on ulazio u sjenu i gdje je iz nje izlazio.

Preostaje još samo jedna sporedna pojedinost, kojom se ovi eksperimenti o ogibu na složenim sjenama u svjetlosti iz laboratorijskog prostranog izvora razlikuju od ogiba na složenim sjenama u sunčanoj svjetlosti. Kada se kod pokusa u sunčanoj svjetlosti tranzversalni razmak dotle umanjí, da glorijska ispred izbočine iščezne, izbočina tako sraste s nasuprotnom sjenom, da se oba dijela ne razlikuju svojom tamnošću. U svjetlosti iz umjetnog prostranog izvora iščeznu spomenute ogibne pruge ispred izbočine, kada predmet dalji od izvora svjetlosti zakloni nešto više od ruba sjene, koju baca predmet bliži

izvoru. Ali izbočina raste i dalje, ako iz tog položaja jedan od predmeta nastavimo primicati, tako da predmet dalji od izvora svjetlosti zaklanja sve veći dio sjene predmeta bližeg izvora. Izbočina prodire sve dublje u sjenu, a odijeljena je od nje poširim pojasom slabe svjetlosti, koji je na strani prema izbočini oštro omeđen, a na vanjskoj se strani postepeno gubi u području sjene. Izbočina se ističe prema sjeni i znatno većom tamnošću. Tako je u sl. 15 (tabla VI) prikazana takva povećana izbočina za slučaj, kad je kugla bliža izvoru svjetlosti. Visina kružnog segmenta, koji je odgovarao dijelu sjene kugle zaklonjenom od zapreke s ravnim rubom, iznosila je otprilike $0,2 r$ polumjera kugline sjene. Vrh trokutaste izbočine dopirao je gotovo do središta kugline sjene⁵³). Ako nastavimo s međusobnim primicanjem predmeta normalno na pravac zraka svjetlosti, tako da predmet bliži zastoru zaklanja sve veći dio sjene prvog predmeta, svijetli pojas oko izbočine ubrzo se gubi i izbočina se stopi sa sjenom.

Kod analognog pojava u slučaju, gdje je kugla bila dalje od izvora svjetlosti, povećana izbočina, koja je iz njezine sjene prodirala u nasuprotnu sjenu, isticala se svojom većom tamnošću nad objema sjenama, tako da ona u snimkama ima oblik romba ili deltoida.

5. Zaključci

1. Na sjenama predmeta u izravnoj sunčanoj svjetlosti nađene su jedna nova svijetla pruga između geometrijske sjene i polusjene, te jedna nova tamna pruga izvan svijetlog obruba (glorije), koji s vanjske strane prati polusjenu. Usporedbom s laboratorijskim pokusima o ogibu svjetlosti dokazano je, da su svijetle i tamne pruge, koje se opažaju na sjenama u sunčanoj svjetlosti od ruba geometrijske sjene do iza glorije, pojavi ogiba u svjetlosti sunca kao prostranog izvora svjetlosti. Ogibne pruge pripadaju dvjema skupinama ogibnih pojava. Tzv. glorija i tamna pruga pored nje jesu redoviti prvi ogibni maksimum i prvi ogibni minimum *Fresnel*ova ogiba u svjetlosti iz prostranog izvora, te odgovaraju analognim prugama kod ogiba u svjetlosti iz točkastog izvora. Prema izvedenim mjerenjima u različitim spektralnim područjima, glorija je ahromatična. Novo otkrivena svijetla pruga i tamna pruga pored nje, koje

⁵³) Pošira bijela mrlja, koja se vidi oko središta kugline sjene u ovoj slici, jest realna obrnuta slika kratera u gornjem ugljenu lučne svjetiljke. Slika je stvorena ogibom na kugli, a odgovara svijetloj točki u središtu kugline sjene u poznatom osnovnom pokusu po *Delisleu*, odnosno po *Fresnelu* i *Poissonu* o ogibu svjetlosti iz točkastog izvora. Za taj pojav kod prostranog izvora svjetlosti vidi: *M. E. Hufford*, *Phys. Rev.* (2) 3, 241, 1914.

se nalaze u pojasu između geometrijske sjene i polusjene, pripadaju tzv. suplementarnim ogibnim prugama, koje nastaju kod ogiba u svjetlosti iz prostranog izvora.

2. Polusjena i sve ove ogibne pojedinosti, a donekle i sama geometrijska sjena, podvrgnute su vremenskim promjenama. Ove zahvaćaju njihov oblik i raspodjelu intenziteta, a potječu odatle, što u stvaranju sjene sudjeluje i snažna iradijacija iz atmosferskih slojeva najbližih pravcu sunčanih zraka, koja je izazvana Mieovim efektom raspršavanja svjetlosti u atmosferi.

3. Ako je polusjena jednog predmeta djelomično ili posve zaklonjena drugim predmetom, koji leži na suprotnoj strani, iz sjene ovog drugog predmeta izbija tamna izbočina prema sjeni prvog predmeta. Izbočina seže maksimalno do gloriije, koja pripada tom drugom predmetu. Pojavi pripadaju ogibu na pukotini, kojoj je ravnina jako nagnuta prema zrakama svjetlosti. U skladu s pojavama takvog ogiba u laboratorijskoj svjetlosti iz prostranog izvora, pojave se i u sunčanoj svjetlosti u posve određenim prilikama uz rub sjene prvog predmeta, osim gloriije, još i ogibne pruge viših redova.

6. Ogibni pojavi u svjetlosti iz deformiranog prostranog izvora.

(Dodatak g. 1947.)

Parcijalna pomrčina sunca od 9. VII. 1945., koja je u Zagrebu bila dobro vidljiva, pružila nam je priliku, da istražimo pojave prikazane u 3. poglavlju na sjenama sunca kao izobličeneog prostranog izvora svjetlosti. Tom prilikom dobivene snimke, koje su bile izvedene s najboljim sredstvima, koja smo naveli u 2. poglavlju, omogućile su da bolje utvrdimo neke od zaključaka. Sve su snimke učinjene u bijeloj svjetlosti.

Atmosferske prilike bile su izvanredno povoljne za opažanje. Za cijelog trajanja pomrčine nebo je u okolici Sunca bilo posve vedro, a atmosfera je bila vrlo prozirna. Početak pomrčine dio je u 14h 19m, maksimum u 15h 28m, a svršetak u 16h 32m. U času maksimuma bilo je zastrto 1,18 polumjera sunčeve ploče.

Donosimo rezultate o sjenama samo dvaju predmeta, kojima je sjena ovdje već bila obrađena. To su: a) sjena čelične kugle iz sl. 4, b) sjena kvadratne ploče s okruglim otvorom iz sl. 7.

U sl. 16 (tabla VI) prikazani su jedan jače i jedan slabije eksponirani pozitiv sjene čelične kugle. Udaljenost kugle od zastora bila je približno jednaka onoj u sl. 4, a tako i daljina kamere od zastora. Snimka je učinjena u času maksimuma

pomrčine. Shematska crtnja s desne strane prikazuje položaj i iznos zastrtog dijela sunčeve ploče⁵⁴⁾.

Sl. 17 (tabla VI) prikazuje jedan jače i jedan slabije eksponirani pozitiv sjene kvadratne ploče sa shemom zastrtog dijela sunčeve ploče. Snimka je učinjena u 15^h 18^m, kad je bilo zastrto 1,08 polumjera sunčeve ploče. Kvadratna ploča stajala je normalno na sunčane zrake u nešto manjoj daljini od zastora nego u sl. 7, a bila je i snimljena iz manje daljine.

Kod sjene kugle u sl. 16 glavne karakteristike pojava jesu osebusni oblik polusjene i približno eliptički oblik prstena tamnog obruba *M* sa obuhvaćenom geometrijskom sjenom. Koliko je oblik polusjene osjetljiv na oblik sunčeve ploče, vidi se po tome, što smo prve tragove ovakve deformacije jasno opazili već, kad je bilo zastrto 0,1 do 0,125 polumjera sunčeve ploče. Tim je direktno potvrđena naša slutnja, koju smo iznijeli u 3. poglavlju o atmosferskoj iradijaciji kao uzroku nepravilnim promjenama u polusjeni i glorioji. U sjenama čelične kugle iz sl. 5, koja je i ovog puta bila snimljena otprilike uz iste uslove kao u toj slici, taj je karakteristični oblik polusjene još bolje istaknut: polusjena je jako raširena u pravcu normalnom na spojnicu, koja spaja projekcije središta sunčeve i mjesečeve ploče, a na kraju, koji leži diametralno nasuprot projekciji mjesečeve ploče, polusjene gotovo nema. S jako izduženim oblikom sjene i tamnog obruba *M* sve dobiva neki oblik, koji smo za vrijeme opažanja uspoređivali s oblikom neke gljive. Uspoređivanjem sl. 16 sa sl. 4 nalazimo, da je taj osebusni oblik polusjene nastao tim, što se ona skratila u pravcu spomenute spojnice projekcija središta sunčeve i mjesečeve ploče, dok je njezina dimenzija u pravcu normalnom na tu spojnicu ostala otprilike nepromijenjena. S druge strane, geometrijska sjena zajedno s tamnim obrubom *M* istodobno se deformirala tako, da je nešto porasla u pravcu spomenute spojnice, a jako se suzila u pravcu normalnom na spojnicu. Ipak je njezin oblik samo otprilike eliptičan. To se bolje opaža u deformiranoj sjeni spomenute manje kugle iz sl. 5; geometrijska sjena s obrubom *M* sužena je na svom kraju bližem projekciji mjesečeve ploče, dok je na suprotnom kraju jače zatubasta, tako da dobiva nekako jajolik oblik.

Ove deformacije u obliku polusjene i geometrijske sjene lakše se daju približno objasniti sa stanovišta geometrijske optike. Široki luk polusjene izvan spojnice projekcija središta sunčeve i mjesečeve ploče nastaje parcijalnom rasvjetom iz slobodnog srpa sunčeve ploče, koji je završen lukom, kojemu za-

⁵⁴⁾ M. Katalinić i B. Marković, Glasnik hrv. priro. društva, odio matem.-fizik. i astr. (2) 1, 126, 1946. U toj smo radnji donijeli prvi djelomični prikaz ovih pojava. Međutim u tamošnjoj sl. 3, koja odgovara sadašnjoj slici 16, sve su ove pojedinosti — zbog loše reprodukcije — otpale; sredina sjene u toj sl. 3 pogrešno pokazuje čak veće crnilo.

krivljenost ima smjer suprotan zakrivljenosti nasuprotnog ruba kugle. Naprotiv, kratka polusjena uz suprotni rub kugline sjene u produženju te spojnice nastaje parcijalnom rasvjetom iz onog dijela sunčeve ploče, koji zbog mjesečeve ploče završuje lukom istog smjera zakrivljenosti kao odnosni rub kugle. Skraćivanje sunčeve ploče (uslijed njezina zastiranja mjesecom) izaziva produživanje geometrijske sjene u pravcu navedene spojnice, dok pojačano djelovanje vanjskih dijelova sunčeve ploče oko normale na tu spojnicu izaziva sužavanje sjene u pravcu normale.

Ova djelovanja deformacije sunčeve ploče značajno su se odrazila na vanjskim konturama sjene kvadratne ploče (sl. 17) u deformaciji njezinih pravih kutova: pravi kut, koji je najbliži projekciji mjesečeve ploče, pretvoren je u tupi kut, a oba susjedna prava kuta s vrhovima na normali spojnice projekcija sunčeva i mjesečeve središta pretvorena su u oštre kutove; samo četvrti pravi kut ne pokazuje vidljive deformacije. Te deformacije zahvaćaju samu sjenu; prema tome, deformacija sunčeve ploče ovdje djeluje drukčije nego kod kugle. — Polusjena je široka uz strane tupog kuta, najšira je uz otupljene vrhove dvaju oštarih kutova, a vrlo je kratka kod krakova preostalog pravog kuta i uz njegov otupljeni vrh. To u glavnim crtama odgovara njezinu vladanju u sjeni kugle.

Glorija kod sjene kugle ima također približno eliptički oblik; veća elipsina os, kao i kod polusjene, leži na normali spojnice projekcija središta sunčeve i mjesečeve ploče. Međutim intenziteti su joj vrlo različiti; najjača je i najoštija uz uski luk polusjene oko spomenute spojnice, pa se tu još zamjećuje i u reprodukciji. Prateći dalje polusjenu, ona se postepeno širi i ujedno slabi; ali se na negativu opaža još i nešto iza onog mjesta, gdje je polusjena u svom zavoju nadolje nadesno iščezla. Iza kratkog razmaka, gdje se više ni ona ne opaža, glorijska se ponovno pojavljuje kratkim lukom uz donji desni rub kugline sjene naslanjajući se na usku polusjenu pored jakog tamnog obruba *M*; ali ona ovdje ima inverzni položaj intenziteta, jer joj — prema negativu — maksimum leži bliže polusjeni. Na sjeni spomenute manje kugle ovaj se inverzni maksimum skupio u jaku svijetlu mrlju, koja se opaža i na pozitivima.

Oko sjene kvadratne ploče u sl. 17 glorijska je najjača uz krakove deformacijom otupljenog pravog kuta. Uz ove se krakove opaža i na pozitivima izvan glorijske tamne pruga *P*. Glorijska je slaba uz krakove preostalog pravog kuta, gdje je polusjena uska, vrlo je slaba uz kratke poteze, kojima su otupljeni vrhovi oštarih kutova, gdje je polusjena najšira, a javlja se jakim intenzitetom uz kratak potez, kojim je otupljen pravi kut. Prema tome, i ona pokazuje analogno vladanje kao kod sjene kugle u sl. 16.

Babinetov princip negativne korespondencije, koji se već pojavio kod sjene trokuta i u svjetlosti, koja je prošla kroz

trokutni izrezak, još je bolje ispunjen kod sjene kugle u sl. 16 i u svjetlosti, koja je prošla kroz okrugli otvor ploče u sl. 17. Korespondencija je ovdje tako dobra u pojedinostima, da ove dvije slike čine jedna prema drugoj utisak pozitivna i negativna. Kao kod trokuta i trokutnog izreška, i ovdje tamni obrub M odgovara glorioji, i obrnuto. Luk tamnog obruba M kod kugle je najjači i najoštiji uz spomenuti donji desni kraj sjene, gdje je polusjena vrlo kratka; u otvoru kvadratne ploče tu je najjači i najoštiji luk glorioje. Raširenoj i difuznoj polusjeni uz gornju polovinu luka sjene kugle odgovara u otvoru ploče širok difuzan pojas polusvjetlosti, koji ima isti oblik kao polusjena. Čak i glorioji izvan tog luka polusjene u sjeni kugle odgovara u otvoru ploče luk unutrašnjeg obruba M s analognom raspodjelom intenziteta odnosno tamnosti. — Nažalost se ove pojedinosti u reprodukciji slabo razaznavaju.

U pogledu svijetle pruge O u ovim deformiranim sjenama vrijedi ovo jednostavno pravilo: ta je pruga svagdje jasno izražena, gdje je tamni obrub M jasno izražen. To su uvijek ona mjesta, gdje je polusjena kratka. Tako se u sl. 17 O jasno razabira na negativima unutar obiju krakova ne deformiranog pravokuta, gdje se tamni obrub M opaža i na reprodukciji, kao i uzduž spomenutog donjeg desnog luka u sjeni kugle, gdje je tamni obrub M najjači. I ova činjenica upućuje na to, da M i O pripadaju istoj skupini ogibnih pojava.

Ovi su ogibni pojavi također oponašani u laboratorijskim eksperimentima na istom dugačkom razmaku od 43,9 m u svjetlosti iz deformiranog okruglog prostranog izvora. Deformacija je izvedena tako, da je u slabo divergentni mlaz svjetlosti u opisanom uređaju na izvjesnom razmaku iza posljednje okrugle diafragme, koja je mlaz ograničavala na promjer od 22 mm. umetnuta okrugla pločica od crnog kartona, koja je zastirala oko $4/3$ polumjera mlaza. Na daljini 30 m odatle dolazio je ogibni predmet: kugla ili kvadrat od kartona s okruglim otvorom. U jednom prilično uskom području divergencije mlaza svjetlosti⁵⁵⁾ dobivene su snimke, koje pokazuju sve karakteristike snimaka u svjetlosti parcijalno pomrčalog sunca. Dvije takve snimke bile su publicirane na drugom mjestu⁵⁶⁾.

Skopje, Fizikalni institut,
25-IX 1947.

⁵⁵⁾ Divergencija mlaza nešto se mijenja izgaranjem gornjeg ugljena u lučnoj svjetlosti.

⁵⁶⁾ M. Katalinić i B. Marković, l. c., sl. 6 i 7.

Резюме

О ДИФФРАКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЯХ В ТЕНИ ПРЕДМЕТОВ
В ПРЯМОМ СОЛНЕЧНОМ СВЕТЕМарин КАТАЛИНИЧ (Скопје)
Бранимир МАРКОВИЧ (Загреб)

Выводы

1. Авторы исследывают явления дифракции на тенях предметов в прямом солнечном свете. Первая известная деталь это светлый ореол, находящийся около полутени, на ее внешней границе в всех тенях солнечного света. В более старой литературе 1, 3, 10, 11, 19, 21¹ встречаются смешанные наблюдения о светлом ореоле, который замечает наблюдатель при невысоком солнце около тени своей головы на росистой траве и наблюдения светлой каймы, окружающей тени на траве и вообще на шершавых поверхностях. Это было поводом для больших недоразумений. Тогда Обермайер (Obermayer) (6) обратил внимание на то что светлая кайма у тени видима на всякой поверхности как на гладкой так и на шершавой и при любой высоте солнца. Кроме того, он нашел и темную кайму между тенью и полутенью (6), и обе каймы объяснял как суб'ективное явление. Авторы считают, что светлая кайма на траве без росы или на шершавых поверхностях тождественна светлой кайме на гладких поверхностях. Авторы ее называют глорией, помня старое название Гильберта (Gilbert) (1, 16). Прежние объяснения явления светлого ореола вокруг головы наблюдателя и явления светлой каймы около полутени на траве без росы основываются на геометрической оптике. Для первого явления такое объяснение исчерпано. Что касается светлой каймы около тени на гладких поверхностях, если бы только они принимались во внимание, и темной каймы Обермайера — не было до сих пор настоящего объяснения. Гильберт в самом начале (1, 25) — правда при еще недифференцированных наблюдениях — считал, что необходимо принять во внимание дифракцию света.

Авторы в 1943-м году открыли еще одну темную полосу, сопровождающую глорию с ее внешней стороны, и одну светлую, находящуюся между темной каймой Обермайера и геометрической тенью. Сравнением фотограмм заснятых явлений на тенях предметов в солнечном свете с явлениями дифракции в лабораторных опытах как при точечном источнике и при широком круглом, авторы доказывают, что все эти детали — явления дифракции в свете солнца, как широкого источника света.

Во второй части труда (4-ая глава) авторы разрабатывают другую группу явлений в сложных тенях предметов в солнечном свете как явления дифракции тонкого разреза, у которого плоскость проходящая через края сильно нагнута по отношению к лучам света. В конце авторы дополняют изыскания явлениями в тенях света частичного затмения солнца (6 ая глава). и эти изыскания были под контролем лабораторных опытов в свете получаемом из искаженно-круглого широкого источника.

2. Рис. 1 фиг. 1 (табл. 1) представляет два позитива различно экспонированных с одного и того же негатива заснятой тени деревянной линейки при высоте солнца в 45°. Над и под фиг. буквами обозначены детали, наблюдаемые в такой тени. Это: S — геометрическая тень; ее вычисленная ширина обозначена черной линией, поперек тени.

M — немного более темная кайма Обермайера между геометрической тенью и полутенью.

¹ Числа в скобках, приведенные в тексте, обозначают данные литературы в оригинале работы.

- О — слабая и узкая светлая полоса между S и M.
- H — полутень.
- G — более светлая кайма у внешнего края полутени, выше названная глорией.
- Р — немного более темная кайма между внешним краем глории и области свободного освещения. О и Р открыли авторы.

G и M легче всего заметить. На негативах даже визуально замечается, что сила освещения в геометрической тени увеличивается по мере приближения к середине тени. Это подтверждается и микрофотометрическими регистрациями диапозитивов².

На фиг. 2-ой и 3-ей (табл. I) представлены микрофотометрические регистрации негатива и диапозитива тени палки, показанной на фиг. 1. Обозначение деталей то же; только полутень разделена на части H_1 и H_2 , из которых H_1 отвеснее.

Фиг. 4 (табл. I) представляет два различно экспонированных позитива одного и того же снимка тени большого стального шара шарикового подшипника. И здесь геометрическая тень обозначена черной линией.

В образовании тени и полутени участвует кроме прямого света солнечного диска и сильный свет атмосферической иррадиации от рассеивания света слоев наиболее близких прямого лучам солнечного диска. Оттуда — меньшая отвесность интенсивности света в части H_2 полутени. На свет, проходящий через круглое отверстие ($2r=5,1$ см) атмосферная иррадиация оказывает меньшее влияние; поэтому глория у края этого круглого отверстия усилена (фиг. 7, табл. I). Подобное явление встречаем у тени сложного листа *Ailanthus glandulosa* у которой глории с обеих сторон среднего листового ребра особенно выделяются, так как боковые листья уменьшают действие атмосферной иррадиации.

Последствие действия атмосферной иррадиации проявляет себя еще в том что отвесность распределения интенсивности освещения во внешней части H_2 полутени переменна (фиг. 6), а также и в том, что и форма полутени и форма глории изменчивы. Это легко замечается на тени шара, который помещаем на таком расстоянии от экрана, что ядро тени становится очень маленьким диском. На фиг. 5, (табл. I) сплошные и прерывистые линии под отдельными рисунками обозначают положения главной оси полутени и главной оси глории на трех отдельных снимках одного и того же шарика шарикового подшипника, который находился в положении, уже описанном выше.

Тень пластины на фиг. 7 заснята в трех спектральных областях от $\lambda 350$ мμ до $\lambda 680$ мμ. На этих снимках измерены расстояния между глориями. Сообразно этим измерениям глория, в границах ошибок измерения, ахроматична.

Небольшой рисунок (снимок) на фиг. 8 (табл. 2) представляет тень треугольника в солнечном свете, а другой — сам треугольник на том же месте где была тень. Вогнутость в тени, имеющая форму рыбьего хвоста на конце острого угла треугольника образуется темными каймами M, принадлежащими сторонам угла; соответственные глории проходят параллельно со сторонами до конца рыбьего хвоста. Остальных два острых угла сделаны тупыми до формы прямых, чтобы меньше мешали. Расстояние от максимума глории по третьей стороне до вершины рыбьего хвоста равно высоте треугольника. В солнечном свете, пропущенном через вырез треугольника, виден светлый рыбий хвост который образуют глории, а темные каймы M проходят параллельно сторонам до конца этого рыбьего хвоста.

² Выпуклость в кривой регистрации геометрической тени S на фиг. 2. не отвечает действительности; она названа эффектом Ми (Mie) рассеивания света на прозрачной части фотопластинки. На фиг. 3. выпуклость кривой корректно изображает положение вещей.

Эти явления были сравнены с лабораторными опытами диффракции света на том же равностороннем треугольнике с применением света из точечного источника и из большого источника с круглым вырезом. Опыты производились на больших расстояниях.

Явления показаны на фиг. 9 и 10 (табл. II и III); части А показывают явления в свете из точечного источника, части В явления из широкого источника содержат все детали, которые находим и в тенях солнечного света.

Из вышесказанного можно заключить, что явления на тенях суть явления диффракции солнечного света из широкого источника круглой формы. Глория G и темная кайма P являются первым максимумом и первым минимумом у Френелевской диффракции света из широкого источника. Это находится в качественном согласии с теорией Вольферса (Wolfer's) (37, 38). Темная кайма M и светлая линия O принадлежат системе так называемых супплементарных полос в свете из широкого источника; M — первый минимум, а O отвечает максимуму, который на некоторых диаграммах Вольферса обозначен перед этим минимумом (39).

3. В другой части работы изложены явления в сложных тенях на солнечном свете между двумя предметами, находящимися на различных расстояниях от экрана, тогда как края их находятся на небольших взаимных трансверсальных расстояниях. Если часть по ту сторону предмета более удаленного от экрана падает на ближайший предмет, глория последнего вытесняет перед собой полутень удаленного предмета, а из полутени ближайшего предмета вырастает темная выпуклость, которая максимально доходит до глории. Явление начинается, когда край полутени дальнего предмета падет на край олижающего. Фиг. 11 и 12 (табл. 3) изображают это явление с круглой металлической пластиной³ и с деревянной линейкой; на фиг. 11. линейка была ближе к экрану, а на фиг. 12. ближе находилась пластина. Явление находится в конечной фазе когда край настоящей тени дальнего предмета падет на край ближнего; тогда глория между выпуклостью и противоположной тенью исчезает и выпуклость сливается с тенью.

И это явление исследовано в лабораториях при тех же условиях как и явления в первой части. Фотограммы на фиг. 13 и 14 изображают часть этих лабораторных результатов. В каждом из этих изображений верхняя фотограмма показывает явления диффракции в свете из точечного источника, нижняя часть — в свете из широкого круглого источника. На фиг. 13. (табл. 4) шар находился ближе к источнику света, а на фиг. 14. (табл. 5) ближе было ровное препятствие. Явления в общем те же что и в солнечном свете, и соответствуют диффракции света из широкого источника на щели, чья плоскость, проходящая через края, сильно нагнута по отношению к источникам света. Диффракция света из широкого источника на щели, чья плоскость, проходящая через края, сильно нагнута по отношению к источникам света. Диффракционные полосы, видимые в нижних частях фиг. 13 и 14 на границе тени противоположные выпуклости, заметны и у этого явления в солнечном свете, если расстояние между ближайшим предметом и блендой уменьшится на каких нибудь 40 см, а трансверсальное расстояние между противоположащими краями предметов уменьшить до тех пор, пока глория только еще сможет пройти между выпуклостью и противоположной тенью.

В лабораторных опытах разница с явлениями в солнечном свете заключается в том, что в первых — выпуклость не сливается с противоположащей тенью, когда настоящая тень первого предмета падет на границу другого, а остается отделенной от нее и увеличивается если и дальше приближать предметы. На фиг. 15. (табл. 6) тень ровного препятствия покрывала приблизительно 0,2г радиуса шара⁴.

³ Пластина имела в середине прямого, круглого отверстие

⁴ Диффузное светлое пятно вокруг центра шара соответствует центральной светлой точке в опыте Делалия (Delisle, resp. Френеля (Frenel) и Пуассона (Poisson); это — реальное обратное изображение кратера угля вольтовой дуги а вызвано дифракцией света на шаре.

4. Явления в тенях частичного солнечного затмения соответствуют явлениям диффракции в свете искаженного широкого круглого источника. Фиг. 16. (табл. 6.) изображает тень того же шара как и в фиг. 4., а фиг. 17. (табл. 6.) тень пластины из фиг. 7. Схематические рисунки рядом с этими двумя изображениями выражают величину и положение покрытой части солнечного диска в момент съемки. Что касается явлений в круглом вырезе пластины и тени шара, то для них применим принцип Бабинета (Babinet) так как их взаимное отношение почти такое же как у позитива и негатива. Диффракционные полосы О и М показывают и здесь взаимную связь тем, что О всегда можно легко опознать там где М сильно выражена.

(Excerpt)

ON THE DIFFRACTION PHENOMENA AROUND THE SHADOWS PROJECTED BY OBJECTS IN DIRECT SUNLIGHT.

By Marin Katalinić and Branimir Marković.

The earliest known particular in shadows of objects in direct sunlight is the bright border lying beyond the penumbra. There is no fixed denomination for it in the physical literature. *Pernter* uses for the luminous halo encircling the head of the observer in his own shadow projected onto dewy grass the term *Heiligenschein*, proposed first by *Garthe* seemingly without the restriction on the bedewed state of the grass (4 and 13*). In this regard the term *glory* for the light border is older¹⁾. There has been a considerable divergence in the accounts upon the phenomenon in question. A low altitude of the sun and the raggedness of the ground, upon which the shadow is falling, are pointed out by *Winterfeld*¹⁾ and by the majority of the authors after him as the fundamental conditions for observing the phenomenon. *Lommel* (3) and *Pernter* (4, 5) distinguished two separate phenomena: a light border seen around the shadows on a ragged, for instance, grassy ground, and a much brighter halo seen on a dewy grass by an observer around the shadow of his own head only. A long while before them *Garthe* (4) considered the first named light border as a supplement to the latter and *Winterfeld* regarded the two phenomena as identical. *Lommel* also meant, that on dewy grass both phenomena occur simultaneously. According to *Winterfeld*, *Brandes* (11) and *Lommel* the light border should vanish, if the shadow falls onto smooth surfaces. *Obermayer* (6) has first pointed out, that a light border exists around the shadows falling onto entirely smooth surfaces and at any altitude of the sun. He discovered a dark border also in the shadow²⁾. But

*) The parenthesized numbers denote the foot-notes in the original text; (str. = p.).

¹⁾ M. A. *Winterfeld*, *Gilb. Ann.* 18, 57, 1804, the foot-notes on p. 65—66 (*Gilbert*).

²⁾ The site of this dark border is erroneously described by *Obermayer* (l. c., p. 300: »in Begleitung eines dunklen Saumes am inneren Schattenrande«). But from his subsequent exposition results, that the dark border in question should really lie between the umbra and the penumbra. It is probably an erratum in the passage quoted where *Schatten* stands instead of *Halbschatten*.

Pernter and *Exner* (l. c.) emphasised, that the light border of *Obermayer* differs primarily from the light halo seen on a bedewed grass or on a ragged ground. — In the present paper the term *glory* for the light border of *Obermayer* is adopted.

In fact, these discrepancies owe their origin to the circumstance, that the authors observed often without distinction two very different phenomena, the bright halo around the shadow of the observer's head on a bedewed grass differing primarily from the light border (the glory) bordering any shadow beyond its penumbra. But, in connection therewith the opinions as to the origin of the luminous phenomenon were likewise divergent.

Gilbert in his remarks to the paper of *Winterfeld*³⁾ expressed his conviction, that the light border is undoubtedly due to the diffraction of light and surmised its affinity with some experiments of *Newton*⁴⁾ and of *Jordan*⁵⁾ concerning the diffraction. After him only *Brandes* (10) inclined initially to this opinion. Otherwise *Gilbert*'s point of view fell afterwards completely into oblivion. At any rate, this view was premature owing to the defective investigation of the phenomenon. But to this fact may have contributed the circumstance, that in the elder papers discussing the dependence of the visibility of the diffraction fringes upon the apparent diameter of the light source, the direct sunlight was declared as practically unable to produce visible diffraction by an infinite obstacle limited on one of its sides by a straight edge [e. g.: (27)].

The first explanation given for the phenomenon by *Winterfeld*, and based purely upon geometrical optics, was subsequently accepted by *Brandes* (11) and afterwards revived by *Lommel* (l. c.) and by *Richarz* (19). The explanations given by *Fraunhofer* (22), *Lommel* (l. c.), *Pernter* and *Exner* (l. c.), *Fuchino* and *Izu* (15) for the bright halo on bedewed grass are, apart from particulars, fully valid.

Obermayer (l. c.) found no difference between the light border seen around the shadows on a ragged or grassy ground and that seen on a smooth surface. But, according to the same author both this light border (the glory) and the dark border discovered by him are entirely subjective effects, explained by him by means of a physiological law due to *Mach*. As far as we know, no another explanation for the glory was given.

The investigations by the present authors show very clearly, that the glory is only a detail of the diffraction effects observed around and in the shadows cast by the objects in the direct sunlight at all altitudes of the sun. In this regard really no difference exists between the ragged and the smooth surfaces. The fundamental condition for observing all these diffraction particulars distinctly is a perfectly clear sky. A scarcely visible layer of fine clouds or hazy atmosphere perceptible by a defective visibility of the hills in the neighbourhood suffice to efface the majority of the particulars or at least to weaken them. The glory is more persistent, being still observable, when the sun shines through a thin layer of the altostratus. On the strength of the facts expounded in the sequel, there is reason to believe, that these diffraction particulars should be better perceptible in the regions having a clearer sky and on high mountains, where the irradiation of the sky from the immediate neighbourhood of the sun's disk is weaker. As it is well known, this irradiation exhibits a nearly hyperbolic increase of its intensity in the proximity of the sun's disk.

By adopting the term *glory* for the light border accompanying any shadow beyond its penumbra, we intend also to emphasize its distinction from the bright halo mentioned above as seen by an observer on a dewy

³⁾ *Gilbert*, l. c. 1), in the note on p. 57; see also the note on p. 65.

⁴⁾ *I. Newton*, Opticks, III, Obs. 5, 6, 7.

⁵⁾ *G. W. Jordan*, The Observations of *Newton* Concerning the Inflections of Light; London 1799. — See also the excerpt by *Gilbert*, *Gilb. Ann.* 18, 1, 1804.

grass around the shadow of his own head only. *Pernter* stated numerous distinctions between the two phenomena. The very large difference of their intensities is, indeed, very evident and distinctive; but it is not a sufficiently essential feature. The luminous halo in question is a very extensive phenomenon comprising a large area around the observer's head, its mean cross-section extending often to several times the breadth of head shadow, whereas the glory consists of a comparatively narrow, faint border. But the main difference between the two phenomena consists in the disposition of the light intensity across them. The bright halo exhibits its maximal light intensity close by the outer margin of the penumbra of the observer's head and vanishes — apart from local discontinuities — slowly outwards in the general illumination of the meadow (see e. g. Fig. 178 in the quoted book of *Pernter* and *Exner*). On the contrary, the glories in Fig. 1 and 4 (Plate I) of the present paper exhibit their intensity maxima on their outer ends somewhat distant from the outer margin of the penumbra. This particular is shown by the microphotometric records also of the diapositive pictures (Fig. 3).

By increasing the distance between the object and its shadow, as it is the case in the observations at low altitudes of the sun, the glory, just as the penumbra, becomes broader, less intense and its maximum is diffuse. In such cases it is really better visible on a grassy ground, especially if one walks transversely to the sun's rays, than in the case of a shadow falling upon a brownish soil. But its better visibility in this case is preponderantly due to the maximum of the sensibility of the eye in the green region of the spectrum. The effect assumed by *Winterfeld* and by *Richarz* may have here only a subordinate part, an additive, but deficiently defined, faint halo around the shadow of the observer's head being sometimes discernible on some kinds of grass. The glory and the dark border of *Obermayer* are well enough discernible — perhaps better than on a grassy ground — along the straight margin of the shadow of the brinks of roofs, cast about noon at distances of 10 to 15 metres upon grey sidewalks, by a pedestrian walking in the direction of this margin.

The present investigations were performed about noon on some very bright days about the end of February and of September, 1943. The altitudes of the sun were about 35° and about 44° respectively. The shadow was cast upon a screen of smooth white cardboard, set exactly at right angles to the sun's rays by aid of a mirror. The shadow was then photographed, the camera being strictly focussed upon the screen. The camera was inclined by 10° to 15° against the sun's rays; hence originates a slight deformation of the shadows, as it is seen for instance by the ellipticity of the shadow of a ball in Fig. 4 (Plate I)). Antihalo plates were exclusively used. Besides the above mentioned atmospheric conditions, the clearness of the particulars in the obtained pictures depends largely upon the quality of the sensitive plates used and upon the developer. In war time great difficulties were encountered both in the choice of the plates and in the possibility of procuring the available materials. In the microphotometric records considerable disturbances were caused by the granulation of the screen receiving the shadows. The best results were obtained in the definitive photographs, to which correspond Fig. 1 to 6., by using fine grain emulsions⁶⁾ and by developing them in an extra fine-grain developer⁷⁾. A special drawing-paper⁸⁾ was used as screen.

These observations were compared with the diffraction phenomena in and around the shadows of objects in the light emerging from a point source and in the light beam emerging from a broad source having a circular cross-section. These experiments were performed by

⁶⁾ Agfa micro-plate.

⁷⁾ Agfa Atomal.

⁸⁾ Schoellers Parole.

night in a long corridor of the Institute of Physics in Zagreb. The free length of the light beam was 43,9 m. The distances (a) from the light source (primarily the crater of an arc lamp in direct current) to the diffracting obstacle varied from 28,8 m. to 31,4 m.; the distance from the light source to the sensitive plate ($a+b$) was held constantly at 40,4 m. The diameter of the pin-hole in the experiment with a point source was 0,8 mm. In the second experimental group a broad light source was obtained by projecting the crater of the arc lamp at a distance of 43,9 m. The emergent light beam was limited in steps near the projecting lens by circular diaphragms to 22 mm. in diameter. The divergence of the light rays going through the opposite points of a diameter of the ball, whose shadow is seen in the lower halves of Fig. 13 and 14, amounted on an average to $29'$. — The shadows were projected directly onto the photographic plate.

The particulars in the negative pictures, excepting those in the light from a point source in the laboratory experiments, are mostly very faint. They were obtained moderately discernible in the positive pictures by using a very softly working sensitive paper.

I. The Shadows of Simple Obstacles.

1. Fig. 1 in Plate I exhibits a weakly exposed and a strongly exposed positive picture of one and the same photograph of the shadow cast in the sunlight by a wooden ruler, 62,8 mm. broad, set up at right angles to the sun's rays in a distance $b=190$ cm. from the screen. The photograph was made in the green light (λ about 546 m μ .; the exposure with a very narrow diaphragm aperture was 0,2s). The transverse black strip in the shadow is a strip of black paper corresponding to the geometrical shadow of the width of the ruler, computed for the above distance b ; it was pasted onto the screen.

On these positives the following particulars are discerned:

S is the geometrical shadow;

M is a dark border lying between the geometrical shadow and the penumbra. It was observed for the first time by *Obermayer*.

O is a weak light fringe lying between S and M . It is clearly registered in the microphotometric records, particularly in those of the negative pictures (Fig. 2). In the positive slides of the photograph recorded in Fig. 7, made on a hard working sensitive plate, O is sporadically seen as a narrow light line;

H is the penumbra;

G is the glory;

P is a slightly darker border following immediately beyond the glory, between it and the fully illuminated region. It is mostly moderately narrow. In the photographs it is observed around the shadows of objects placed up to 2,5 metres from the screen; we find it regularly along the shadow of the photographic camera. It may be on its both sides sharply limited, or it may on its outside gradually vanish into the fully illuminated region. Its direct viewing is uncertain, the eyes being dazzled by the great brilliancy of the screen; it is better directly seen in the cuneiform interspaces between both shadows in the arrangements corresponding to Fig. 11 and 12.

The presence of the light fringe O and of the dark border P was ascertained for the first time — as far as we know — by the present authors. These were noticed in the negative pictures of the shadows by visual observation and then were verified by microphotometric records.

By Fig. 2 a microphotometric record of the negative picture of the shadow of the ruler shown in Fig. 1, and by Fig. 3 a microphotometric record of its positive picture are exhibited. The flat convexity in the region corresponding to the umbra S in Fig. 2 is spurious and is due to a *Mie* effect in the transparent part of the negative. This effect could not

be completely eliminated by a reduction of the spot illuminated by the microphotometric lamp. On the contrary, Fig. 3 shows truly, by the flat convexity in the same region, a steady diminishing of the darkness in the geometrical shadow from O beginning towards its middle.

In Fig. 4 (Plate I) are exhibited a strongly exposed and a weakly exposed positive picture of one and the same photograph of the shadow belonging to a steel ball of ball-bearings having a brilliant chromed surface. The diameter of the ball is 59,8 mm.; its centric distance from the screen was $b = 210$ cm. The holder of the ball was reduced at its upper end to 3,6 mm. in order to diminish a disturbance of the shadow by it. This photograph was also made in the green light about $\lambda 540$ m μ . The black strip over the holder corresponds to the computed diameter of the geometrical shadow of the ball.

2. The penumbrae on the left and on the right margin of the shadows are generally asymmetrical with each other. Moreover, on the microphotometric records two parts exhibiting different steepnesses are discernible in the penumbrae: a steeper one H_1 lying nearer to the umbra, and an outer one H_2 exhibiting a lesser steepness. The steepness of the part H_2 is particularly small in the negative pictures in its region adjoining the glory G . A portion of this difference may be due, it is true, to the characteristic of the sensitive plate; but a preponderant amount of it must be real, the lesser steep part H_2 being found on the photographs made on plates having very different characteristics and on the diapositive pictures (Fig. 3).

Several reasons support the assumption, that this part H_2 of the penumbra is preponderantly due to the fact, that in the generating of the shadow and of the penumbra plays also a part the very intense irradiation from the regions of the earth's atmosphere lying in the directions nearest to the direct rays from the sun's disk. This assumption is particularly supported by the fact, that all the particulars of the shadow, especially those outside the umbra, are subjected to moderately quick variations. This variability can be visually observed in the following arrangement. A steel ball of ball-bearings, 22,6 mm. in diameter, was fastened at a distance $b = 190$ cm. from the screen, so that its shadow was reduced to a small dark disk S surrounded by a darker ring M , by the penumbra and by a widened glory. By visual observation the following further particulars were observed. The penumbra and the glory have generally shapes of irregular ellipses, whose ellipticity and the direction of the axes are swiftly variable. At the same time the position also of the shadow $S + M$ varies within the elliptical penumbra, corresponding to the casual variations in the shape of the light source. All parts of the glory do not have equal intensities, the light showing variable concentrations here and there.

Three photographs of the same ball in the described position were made one after another in a time interval of nearly 3 minutes (green light $\lambda \sim 540$ m μ). The positive pictures of these photographs are shown in Fig. 5 (Plate I). The changes in the position of the kernel of the shadow are here hardly observable, but the changes in the ellipticities of the penumbra and of the glory are more easily visible. The full lines and the dotted lines beneath the single figures show the directions of the major axes of the penumbrae and of the glories respectively.

The steepness of the penumbra in the microphotometric records is likewise variable. Fig. 6 exhibits two microphotometric records of the left and of the right penumbrae in the negative of the shadow of the ball exhibited by Fig. 4 and in the negative of another photograph of the shadow of the same ball, which was made immediately after the former.

Finally an essential part of the asymmetry of the left and of the right penumbrae to each other in Fig. 2, 3 and 6 ought to be attributed

precisely to the cooperation of the mentioned atmospheric irradiation, an equality of the latter from the diametrically opposite regions neighbouring the sun's disk being very little probable. Of course, in the case of objects having a black surface the striae caused by the air currents rising from the warmed surface can contribute to these asymmetries. In the present case this source of errors was almost completely eliminated by the highly reflecting surface of the steel ball.

The illumination is also asymmetrically distributed along the central horizontal section of the aperture seen in the middle of the round disk in Fig. 11 and 12 (Plate II).

3. By diminishing or eliminating the efficiency of the atmospheric irradiation, the glory becomes considerably more intensive and sharper. This fact is shown by Fig. 7 (Plate I) exhibiting the shadow of a square metal plate, blackened and having in its middle a circular aperture⁹⁾; the distance of the plate from the screen was $b = 185$ cm. Though the glory along the outer edges of the plate is hardly observable in the positive picture, that in the circular aperture is sharp and is clearly visible.

An imparipinnate compound leaf of the tree *ailanthus glandulosa* consists of a long midrib, to which at its tip and bilaterally separate oblong leaflets lying nearly in a plane are attached by very short petioles (or both halves of the leaf hang slightly, inclined by a very obtuse angle to each other). The shadow of this compound leaf, cast at a suitable distance (2 to 3 metres), exhibits a conspicuously light glory at both sides of the midrib, the large leaflets sheltering abundantly the light from the atmospheric irradiation¹⁰⁾.

4. The shadow of the same square metal plate was photographed in filtered light also, and precisely in the ultraviolet ($\lambda \sim 350$ m μ .), in the green ($\lambda \sim 540$ m μ .) and in the red ($\lambda \sim 660$ m μ .). The three photographs were made one after another in a total time interval of nearly 4^m ($b = 185$ cm.). The horizontal distances between the maxima of the glories adjacent to the vertical edges of the shadow and the horizontal diametres between the maxima of the glory inside the circular aperture were measured on all three negatives. These measurements gave the following values (mm.): in the ultraviolet: 24,3 6,1; in the green: 24,4 6,2; in the red: 24,4 6,2. Hence the glory seems to be achromatic¹¹⁾.

5. Further properties of the glory and of the dark border M were observed in the shadows of a full isosceles triangle and of a triangular isosceles segment corresponding to it. A nearly isosceles triangle was cut from black cardboard and, in order to prevent its bending, it was fixed to a triangular wooden plank. The remaining triangular segment too was arranged in the same manner. They one after another were set at right angles to the incident rays of the sun ($b = 317$ cm.) and their shadows were photographed. Then, for the purpose of a comparison of the sizes, the same triangle was placed upon the screen at the place, where previously its shadow was cast, and it was photographed by holding the position of the camera unaltered. Fig. 8 (Plate II) exhibits the photograph of the shadow of the triangle and to it adjacent the

⁹⁾ A side of the square was 12,1 cm., the diameter of the circular aperture 5,1 cm. The corners were cut obtuse, in order to prevent the fish-tail like excrescences seen in Fig. 8 (Plate II).

¹⁰⁾ As a matter of fact, the particulars in the uncommonly widened penumbra of the midrib at the distances b exceeding 150 cm. are very complicated. The shadow shows in alternate succession darker and nearly elliptical lighter parts at approximately regular intervals along its length, the whole framed on both sides by a straight uninterrupted slightly darker border so that the shadow appears as to be double. The two glories come immediately beyond these dark borders.

¹¹⁾ Measurements on enlarged negatives cannot give a greater accuracy, the maxima becoming with the enlargement more diffuse.

photograph of the triangle itself¹²⁾. The first photograph shows, that the dark borders M belonging to both equal sides of the triangle are continued beyond the point, where the umbra S is turned entirely into the penumbra; they form there a fish-tail like figure. The glories along the same triangle sides go up to the end of the fish-tail. The interval between the maximum of the glory belonging to the third triangle side and the tip of the fish-tail is equal to the triangle altitude. On the contrary, in the photographs of the light transmitted through the triangular segment the glories belonging to the two equal triangle sides intersect one another not far from the tip of the segment and form a light fish-tail shaped figure, whilst the dark borders M are continued up to the tip of the fish-tail.

Other properties of the glory, showing a great tenacity of it, came up in the investigations contained in the second part of this paper.

6. These phenomena in the shadows of the triangle and of the triangular segment were compared with the diffraction phenomena caused in laboratory experiments by the same triangle and by the same triangular segment, and precisely by their parts contiguous to their tips. The experiments were made in the light emerging from a point source and in the light emerging from a broad circular source by means of the laboratory arrangement described above. Fig. 9 (Plate II) exhibits the diffraction figure for the triangle in the light emerging from a point source (part A) and in that from a broad source (part B). The distances in these experiments as also in those belonging to Fig. 10 were: that of the object from the light source $a = 30,2$ m., that of the sensitive plate from the object $b = 10,2$ m. The broad light border accompanying the outer margin of the penumbra in the photograph B exhibit the same principal property of the glory: a steady increase of its intensity towards its outer margin, where it ends in a sharp maximum. It is the same well known property of the first bright diffraction border in the light issuing from a point source, as it is seen in the part A of the same Fig. 9. In the middle region of the part B a slightly darker fringe belonging to the first diffraction minimum is yet perceptible; in the negative picture of this photograph the second diffraction maximum is also scantily visible in the same region. This diffraction figure B differs from that shown by the shadow in Fig. 8 only by the particular, that here the first light border runs around the fish-tail in an oval curve as in the case of the photograph A, but with a scarcely perceptible intensity. The fish-tail like figure in the part B is here also generated by the overlapping of both dark borders, each lying between the umbra and the penumbra. These dark borders differ from those in Fig. 1 by a flatter intensity curve only. To the light fringe O coming in Fig. 1—4 between M and the umbra, corresponds here (part B) a sporadically discernible diffuse light band.

Fig. 10 (Plate III) shows the diffraction phenomena in the triangular segment by the light issuing from a point source (part A) and by the light issuing from a broad source (part B). The fish-tail shaped figure in the photograph B, formed by both first light borders, is evidently a residue of Newton's hyperbolas belonging to both first light borders in the photograph A after their intersection by the two first diffraction minima fringes. The darker triangular region seen in the photograph A, limited by the two first diffraction minima, is visible in the photograph B also, having here moderately sharp limits; but here it has lost entirely the net formed by the higher diffraction maxima and minima, which is scantily discernible in Fig. 10. A, but is very well visible in the negative pictures of the part A. A slightly darker border corresponding to M and a diffuse light fringe lying between the umbra

¹²⁾ The corners belonging to both equal angles of the triangle were cut to nearly right angles for the reason mentioned in the note 9.

and the penumbra, and corresponding to O , can be discerned in the negative picture of the part B up to the fish-tail.

7. From all these experimental facts a solution ensues upon the nature of the glory adjacent to the outer margin of the penumbræ in the shadows cast by the direct sunlight: it is the first diffraction maximum, the diffraction being due to a margin of the sun's disk not covered by the diffracting obstacle. This conclusion agrees with the theory put forward by *Wolfers* (37) concerning the diffraction by a broad opaque screen bounded by a straight edge and illuminated by the light from a broad source, whose width is at right angles to the straight edge of the opaque screen. According to this theory of *Wolfers*, the first diffraction maximum should exist with any width of the light source (38) and it is always adjacent to the outer boundary of the penumbra. A disagreement with the theory of *Wolfers* consists only in the fact, that the glory is limited at its outer margin by a sharp intensity maximum (Fig. 1, 3). But this maximum is, as it was stated above, an experimental feature of the first light border in the diffraction experiments performed with a broad light source.

The external slightly darker border P in Fig. 1 and 3 corresponds evidently to the first diffraction minimum in the light from a point source and in that from a broad source. It occurs in the theory and in the photographs of *Wolfers* also. Observations made in regions having a clearer sky could show, whether it here also maintains its property of having sharp margins as in the case of light issuing from a point source, and which is showed partly in the shadow of the ruler in sunlight (see Fig. 3, on the right).

The dark border M and the faint lighter fringe O , both lying between the umbra and the penumbra, do not have their analogies in the diffraction effects with a point source. With regard to its position relative to the umbra, M can correspond to the first minimum M in the system of the so-called supplementary fringes discovered by *Wolfers* (39) in the region of the penumbra cast by the straight edge of a broad opaque screen illuminated by a broad light source. In the two schematic figures 2 and 8 of the first named paper of the same author a flat maximum denoted by O and lying exactly at the limit between the geometrical shadow and the penumbra is indicated. The same denotation is found also in his photographs, but no details are visible in the so denoted places¹³⁾ excepting a microphotometric record¹⁴⁾. In both papers little is found concerning this maximum O , excepting the case, that the following passage should regard it: »on a ainsi l'impression d'une ligne nette marquant le bord de l'ombre«¹⁵⁾. The fringe O in our photographs and microphotometric records corresponds by its position to this maximum of *Wolfers*. On the other side, our photographs of the shadows cast by objects in the sunlight do not exhibit any more supplementary fringes explicitly. An irregularity shown by some microphotometric records at the beginning of the penumbra immediately beyond the dark border M (Fig. 2, 3, 6) can perhaps be ascribed to the first maximum of these fringes, marked by *Wolfers* with S_1 . The tiny excrescences visible in the same microphotometric records in the penumbra $H_1 + H_2$ are mostly due to the granulation of the screen upon which shadows were projected.

We find in a paper of *Volkman* (43) a photograph very similar to Fig. 1 of the present paper. The picture has been obtained by using an artificial broad light source in an experimental arrangement (l. c., Fig. 5) corresponding to that of *Wolfers* and shows clearly the dark border M ,

¹³⁾ *Wolfers*, l. c. (6) 6, 354, 1925, Fig. 3; (7) 5, 585, 1934, plate facing p. 595.

¹⁴⁾ In the last quoted paper, cliché 4 in the same plate.

¹⁵⁾ *Wolfers*, in the first quoted paper, p. 355.

the dark fringe *P*, the light border *G* and sporadically the light fringe *O*. An increase of the light intensity towards the middle of the umbra seems to be perceptible. Moreover, several light and dark fringes exist in the outer parts of the two penumbrae up till the maxima of *G*. We believe also to see sporadically several fine light and dark fringes in the right penumbra near its inner margin. The author explains the details, *O*, *M*, *P*, *G*, as *Obermayer* did, as bands of *Mach*. But as a matter of fact, we discern them by covering also the neighbouring parts of the figure.

II. The Diffraction Phenomena at a Gap, whose Edges Do not Lie in a Plane at Right Angles to the Light Rays.

Several qualitative observations by the first of the present authors made in this group of phenomena some years ago were a starting point for this whole investigation. The matter in question is mainly constituted by the alterations occurring in the opposite margins of the penumbrae and of the umbrae belonging to two objects situated at different distances from a screen, upon which their shadows are falling, provided that the transverse interval between the opposite edges of the two objects, measured at right angles to the light rays, becomes suitably small. Such phenomena are of common occurrence; it seems, however, that hitherto they have not been noticed sufficiently. Here belong some irregularities shown in winter by the shadows of the leafless branches of trees, or alterations in the shadow of a walker walking under such trees.

1. The general feature of the phenomenon is as follows. If the transverse interval defined above becomes small enough, the shadow of the object placed nearer to the screen exhibits an excrescence issuing from it towards the shadow of the more distant object. The excrescence begins to be formed, when the penumbra belonging to the edge of the more distant object is just touching the opposite edge of the nearer object. The excrescence increases more and more as the transverse interval between the two opposite edges diminishes. At the same time the position of the sharp maximum of the glory belonging to the shadow of the nearer object remains apparently unaltered, the excrescence extending maximally up to this maximum. On the other hand, this glory maximum, becoming simultaneously more intense, pushes away the penumbra of the more distant object so, that the penumbra is here sharply delimited; in the umbra also of the remote object a small indentation is observed close to the nearest part of the glory, when the phenomenon reaches the stage of the maximum growth of the excrescence, i. e. before its coalescing with the opposite umbra. On the contrary, the glory belonging to the more distant object being intercepted by the nearer one terminates at the limits of its shadow. Finally, the excrescence coalesces with the umbra of the more remote object, when the margin of its umbra is just touching the opposite edge of the nearer object. — The fact, that the glory belonging to the nearer object exhibits in the cuneiform interspace an evidently greater intensity, has undoubtedly to be attributed to the same cause as the increase of its intensity in the experiment shown by Fig. 7 or in the case of a leaf of *ailanthus glandulosa*.

The described phenomenon is shown by Fig. 11 and by Fig. 12 (Plate III) for the compound shadow of a circular metal disk¹⁰⁾ and of the above named wooden ruler. The stages were so chosen; that the maximum of the glory belonging to the nearer object was just only

¹⁰⁾ A circular metal disk bearing in its middle a variable slit for optical experiments. Its diameter was 12 cm. The slit was wholly open.

passing between the excrescence and the flat indenture of the opposite shadow. The experimental data were as follows: in Fig. 11 the distance of the circular disk from the screen was $b_1 = 325$ cm., that of the ruler from the screen was $b_2 = 182$ cm. In Fig. 12 was $b_1 < b_2$ and precisely: $b_1 = 232$ cm., $b_2 = 350$ cm. Such large differences $\pm (b_1 - b_2)$ were chosen for the purpose of a closer similarity with the mentioned observations in the shadows of leafless branches. But a one-sided excrescence, having entirely like properties, is observed already for $\pm (b_1 - b_2) = 2$ cm.

For $b_1 = b_2$, i. e. the opposite edges of the circular disk and of the ruler forming an ordinary but irregular slit, small excrescences issue from both opposite margins of the shadows. The glories are overlapped and at a suitable width of the slit glories belonging to the two margins reject the opposite umbrae forming in their margins flat indentures.

2. The diffraction of the light by the straight edges of two subsequent bodies, or by a slit, whose edges are not equidistant from the light source, seems to be very little treated in the physical literature. *Brougham* (45, 46) investigated the former case, and *Quet* (47) investigated the diffraction by the straight edge of an obstacle penetrating into the shadow of an anteceding obstacle. The diffraction by a slit, whose edges are not equidistant from the light source, is treated by *Verdet* (48). *Quinke* (49) in this connexion mentions only complicated phenomena. To this group of phenomena belong the deformations observed by *S. Ray* (50) in the shadow of a wire grating crossed by the shadow of a rod held between the wire grating and the light source.

That was why we compared these phenomena in the compound shadows projected in the sunlight with the compound diffraction phenomena in similar experimental arrangements using artificial light sources. The experiments were made here also in the light from a point source as well as in that from a broad circular source. The ball, whose shadow is seen in the following figures, was a wooden ball, 47,3 mm. in diameter, with a burnished black surface.

Fig. 13 (Plate IV) shows the compound diffraction phenomena around and in the shadows of this ball and of the straight edge of a broad obstacle for the case of the ball lying nearer to the light source than the straight-edged obstacle. The upper photograph was made in the light emerging from a point source, the lower one in that emerging from a broad circular source. The distances from the light source were as follows: that of the ball $a_1 = 28,8$ m., that of the straight-edged obstacle: $a_2 = 31,4$ m., and that of the sensitive plate from the light source: $a_2 + b_0 = 40,4$ m.

In the same manner by Fig. 14 (Plate V) are shown the compound diffraction phenomena for the case, where the straight-edged obstacle was nearer to the light source, the upper photograph belonging here also to the diffraction in the light emerging from a point source, the lower one in that emerging from a broad source. The distances were: $a_2 = 28,8$ m., $a_1 = 31,4$ m., $a_1 + b_1 = 40,4$ m. In the two Figures 13 and 14 the transverse intervals were chosen so that the umbra cast by the obstacle nearer to the light source was just touching the edge of the more distant obstacle. The photographs were made in unfiltered light by using orthochromatic sensitive plates.

Thus the compound diffraction figures in the light emerging from a point source in their parts outside the shadows consist in both cases of crossed diffraction fringes belonging to both obstacles. The diffraction fringes belonging to the obstacle nearer to the light source penetrate into the shadow of the more remote obstacle to a small extent and then

vanish.¹⁷⁾ On the contrary, the diffraction fringes belonging to the obstacle more remote from the light source go thoroughly through the shadow of the nearer obstacle. For example, the negative picture of the upper half of Fig. 13 shows these fringes in the shadow of the nearer obstacle, i. e. the ball, up to 6th diffraction maximum.

The deviation of the diffraction fringes in the equatorial zone, directed towards the obstacle lying nearer to the light source, as it is clearly shown by Fig. 13, where the straight-edged obstacle was more remote from the light source, is contrary — at least for a very oblique position of a slit — to that inferred by Verdet¹⁸⁾ in his discussion of the diffraction by a slit, whose edges are not equidistant from the light source; namely, that the central diffraction fringe in such a case should be deviated towards the edge more remote from the light source. In fact, the observed direction of this deviation coincides with that given by an elementary diffraction theory.

The excrescence issued from the shadow of the more remote object exhibits in the negative pictures of the upper halves of Fig. 13 and of Fig. 14 a slightly greater blackness, i. e. a greater light intensity, than that in both neighbouring shadows. This particular is perceptible in the two Figures also.

Hence it is evident, that these diffraction phenomena are in accordance regarding the direction of the excrescences with those observed in the compound shadows cast in the sunlight: the excrescence always emerges from the edge of the shadow cast by the object more remote from the light source, i. e. lying nearer to the screen receiving the shadow.

Our endeavours to find in the compound shadows in the sunlight diffraction fringes analogous to those visible in the lower photographs of Fig. 13 and 14 in the shadow of the object lying nearer to the light source close to its margin opposite to the excrescence, were initially unsuccessful¹⁹⁾. They could be detected in the negatives belonging to Fig. 11, and Fig. 12 not even by microphotometric means. But they were found by visual observation in a very limited range of the transverse intervals, when the distance from the screen of the obstacle lying nearer to it was reduced to approximately 40 cm. so that its penumbra was very narrow; $\pm (b_1 - b_2)$ was at the same time nearly 150 cm. When the transverse interval between the two opposite edges was brought to so small an extent that the glory maximum was just passing between the excrescence and the flatly driven back opposite shadow, several moderately sharp fine fringes appeared in a shallow layer of this shadow adjacent to its margin. The fringes were parallel to the glory, i. e. they were parallel straight lines, when the ruler was nearer to the screen, and were concentric arcs, when the circular disk was nearer to the screen. By counting G as the first diffraction maximum and P as the first diffraction minimum, we were able to discern with certainty the second maximum and the second minimum in their whole extent; the third maximum could be ascertained with a moderate certainty only near to its entrances into the shadow.

The compound diffraction phenomena performed by means of such an artificial broad light source differ from those in the sunlight mainly

¹⁷⁾ The negative picture of the upper half of Fig. 14 exhibits in the shadow of the ball a scarcely visible foggy band delimiting the excrescence at its inner side. It seems, however, that this band does not correspond to a bent continuation of the first diffraction maximum belonging to the straight-edged obstacle.

¹⁸⁾ The first light border corresponding to the glory is not visible in these positive pictures, the exposures and the developing of the negatives having been prolonged in order to obtain discernibly the particulars inside the shadows.

by the fact, that the excrescence here continues to increase and penetrates into the opposite shadow, when the transverse interval between the neighbouring edges of both obstacles becomes negative, i. e. if the obstacle more remote from the light source is transversely moved further so as to intercept a measurable part of the shadow cast by the obstacle lying nearer to the light source. At the same time the above diffraction fringes lying in the shadow in front of the excrescence disappear, but the part of the excrescence protruded into the shadow is separated from it by a sharply defined weak light zone, which at its outside vanishes diffusely in the shadow. Fig. 15 (Plate VI) exhibits such an excrescence protruded from the shadow of the straight-edged obstacle ($a_2 > a_1$) into the ball shadow. The altitude of the segment of the ball shadow intercepted by the straight-edged obstacle was nearly $0,2 r$, r being the radius of the ball. The protuberance differs from the surrounding shadow by a conspicuously greater darkness¹⁹⁾. In the case $a_2 < a_1$ the excrescence protruded from the ball shadow prevailed by its darkness over the shadows of both obstacles so that it had a deltoidal shape.

CONCLUSIONS.

1. The particulars observed in the shadows of various objects in direct sunlight beyond the penumbra as well as those between it and the umbra are due to the diffraction. The particulars lying beyond the penumbra, namely the so-called glory and a slightly darker border lying farther beyond it, correspond to the first maximum, and to the first minimum respectively of the habitual diffraction fringes in the light emerging from a point source and in that emerging from a broad source. According to the measurements executed, the glory is achromatic. The dark border at the inner margin of the penumbra and a narrow and faint light fringe between the same dark border and the umbra correspond by their position to the first minimum of the so-called supplementary fringes, discovered by *Wolfers* in the penumbræ of shadows in the light issuing from a broad source, and to a flat maximum preceding this minimum in the schematic figures of the same author. The umbra exhibits a minimum of its darkness in its middle. All these particulars undergo fluctuations caused by the atmospheric irradiation.

2. If the penumbra of the shadow cast by an obstacle in the sunlight is partly intercepted by another obstacle, the shadow of the latter exhibits a protuberance towards the former shadow. In a determinate narrow range of the transverse intervals between the opposite edges of the two obstacles lying at not too large distances from the screen, additional moderately sharp diffraction fringes appear in the margin of the shadow of the obstacle more remote from the screen. Both phenomena correspond to the diffraction by a slit, whose edges are not equidistant from the light source.

Added in 1946. The solar eclipse of July 9th, 1945, which was in Zagreb partial, gave to the authors an occasion of studying the phenomena treated in the first part of this paper on the shadows cast by objects in the light of the deformed sun's disk. The conditions for the observing were propitious during the whole duration of the eclipse, the sky in the neighbourhood of the sun's disk being very clear and the atmosphere perfectly transparent. At the eclipse maximum (15^h 28^m)

¹⁹⁾ The diffuse light spot around the centre of the umbra of the ball in Fig. 15 is a real inverse image, formed by the diffraction by the ball, of the crater of the arc lamp. It corresponds to the central light spot in the well known diffraction experiment of *Delisle*, or of *Fresnel* and *Poisson*. See: *M. E. Huford*, *Phys. Rev.* (2) 3, 241, 1914.

the part $\rho = 1,18 R$ of the apparent solar radius R was covered. The photographs were made in unfiltered sunlight; the exposure about the eclipse maximum was 0,02 sec.

Fig. 16 (Plate VI) represents a strongly exposed and a weakly exposed positive picture of one and the same photograph of the shadow of the same ball of ball-bearings as that in Fig. 4 (Plate I). The centric distance of the ball from the screen was also nearly the same as that for Fig. 4. The photograph was made at the time of the eclipse maximum.

In Fig. 17 (Plate VI) are exhibited a strongly and a weakly exposed positive picture of one and the same photograph of the shadow of the same square metal plate as that in Fig. 7; but the distance of the plate from the screen was smaller than there. The photograph was made, when $\rho = 1,08 R$ was covered. The lateral schematic drawings in Fig. 16 and 17 exhibit the position and the amount of the eclipsed part of the sun's disk at the instant when the photographs were made.

A comparison of both corresponding Figures 4 and 16 exhibits the following main features. The penumbra has undergone a shortening in the direction of the straight line connecting the projections of the centres of the sun's disk and of the moon's disk, while its diameter is approximately unaltered in the direction at right angles to that line. The nearly elliptical form of the umbra jointly with the contiguous dark border M is due to a considerable shortening of their diameters at right angles to the straight line defined above and to a slight lengthening of them in the direction of this line.

Unlike shifts are effective in the outlines of the square plate in Fig. 17, where they produce striking deformations of three of the right angles, whilst the fourth right angle, lying opposite to the moon's disk, is unaltered.

The glory around the shadow of the ball in Fig. 16 is also approximately elliptical, the major axis of the ellipse lying at right angles to the straight line defined above. The glory accompanies the penumbra almost everywhere, except beyond both extreme slowly vanishing elliptical wings of the latter, where it runs with a very faint intensity still for a short tract and then gradually vanishes. In the extreme tract of the ball shadow lying diametrically opposite to the moon's disk the glory exhibits a discontinuity, reappearing beyond a very short penumbra almost close to a very sharp and strong arc of the dark border M ; but it exhibits there an inverse position of its intensity maximum, this maximum being nearer to its inner side.

As to the intensity, the regular arc of the glory is here most intensive in its tract lying nearest to the moon disk, where the penumbra is short, but intensive. This behaviour differs at first sight considerably from that along the external outlines of the shadow of the square plate in Fig. 17, where the glory is most intensive along the two edges forming the sides of the angle rendered obtuse by the deformation and where the penumbra is wide. Along the same edges the first minimum P also beyond the glory is on the negative and on the positive pictures weakly perceptible. But here also the glory, after its weakening along the sides of the non deformed right angle, reappears with a remarkable intensity along the short edge cutting off the vertex of this angle.

The phenomena inside the circular aperture of the square plate in Fig. 17 exhibit in their behaviour so striking a resemblance to those in and around the ball shadow in Fig. 16, that they make an impression of being negative pictures of one another. Thus, the principle of *Babinet* is here fulfilled. In this comparison the asymmetrical glory inside the aperture corresponds to the likewise asymmetrical dark border M of the ball shadow; to the penumbra of the ball shadow corresponds a »half-light« zone inside the aperture; to the glory of the ball shadow corresponds the dark border M of the margin of the circular aperture.

As to the light fringe O , its conditions of visibility can be stated in the following manner: this fringe is clearly visible wherever the dark border M is sharply defined. These regions are also characterized by a short penumbra. E. g., O is clearly visible along the two sides of the unaltered right angle in Fig. 17, or along the sharp arc of the border M in the lower part of the ball shadow in Fig. 16. This association of their visibility constitutes a further evidence of the pertaining of M and O to one and the same class of diffraction phenomena.

These phenomena also were obtained pretty well in laboratory experiments by covering a part of the broad circular light beam, illuminating the objects, by a circular obstacle.
