

**Univerzita Hradec Králové**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra fyziky**

**Simulace a konstrukce jednoduchého dalekohledu**

**Bakalářská práce**

Autor: Antonín Kobliška

Studijní program: B1701/Fyzika

Studijní obor: Fyzikálně technické měření a výpočetní technika

Vedoucí práce: RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Hradec Králové

červenec 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, z kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne

Antonín Koblíška

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval RNDr. Janu Šlégrovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

## **Anotace**

KOBLIŠKA, Antonín. *Simulace a konstrukce jednoduchého dalekohledu*. Hradec Králové, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Cílem práce je metodami maticové optiky simulovat jednoduchý hvězdářský dalekohled, následně jej sestavit a změřit jeho základní parametry, které budou v závěru práce porovnány s výsledky simulace.

## **Klíčová slova**

dalekohled, refraktor, simulace, maticová optika

## **Annotation**

KOBLISKA, Antonin. *Simulation and construction of a simple telescope*. Hradec Kralove, 2016. Bachelor Thesis. University of Hradec Kralove, Faculty of Science. Thesis Supervisor RNDr. Jan Slegr, Ph.D.

The goal of this thesis is to simulate how a simple astronomical telescope works using the methods of matrix optics. Then a simple telescope is constructed and its basic parameters are measured. Finally, these parameters are compared with the simulation results.

## **Keywords**

telescope, simulation, matrix optics

## Obsah

1	Úvod	7
2	Lidské oko	8
2.1	Stavba lidského oka	8
2.2	Parametry vzniku obrazu na sítnici oka	9
3	Optické čočky	10
3.1	Lom světla	10
3.2	Čočka	11
3.3	Rozdělení optických čoček	12
3.4	Zobrazení tenkou čočkou	12
3.5	Vady zobrazení	13
3.5.1	Sférická aberace	13
3.5.2	Lom světla přes trojboký hranol	14
3.5.3	Chromatická aberace	15
4	Dalekohledy	16
4.1	Rozdělení dalekohledů	16
4.2	Refraktory	16
4.3	Reflektory	17
5	Maticová formulace optického zobrazování	18
5.1	Průchod paprsku optickou soustavou	18
5.1.1	Základy geometrické optiky	18
5.1.2	Základní zákony geometrické optiky	18
5.1.3	Geometrická optika sférických ploch	19
5.2	Charakteristiky paprsku	20
5.3	Šíření paprsku mezi dvěma body	20
5.3.1	Paraxiální aproximace	21
5.4	Maticová formulace šíření paprsku	21
5.5	Lom paprsku na kulovém rozhraní	22
5.6	Maticová formulace lomu paprsku	24
5.7	Dráha paprsku optickou soustavou	25
5.8	Matice optického systému	26
5.8.1	Příklad matice optického systému	27

6	Praktická část	29
6.1	Poznámka k sestavení jednoduchého dalekohledu	29
6.2	Měření základních parametrů čoček dalekohledu	29
6.2.1	Měření ohniskové vzdálenosti	29
6.2.2	Měření poloměru křivosti pomocí fotoaparátu	30
6.3	Matice objektivu	32
6.3.1	Výpočet ohniskové vzdálenosti objektivu	32
6.4	Matice okuláru	33
6.4.1	Výpočet ohniskové vzdálenosti okuláru	33
6.5	Sestavení jednoduchého Keplerova dalekohledu	34
6.6	Měření základních parametrů jednoduchého dalekohledu	34
6.6.1	Měření zvětšení pomocí fotoaparátu	34
6.6.2	Porovnání fotografií změřeného zvětšení	36
6.6.3	Fotografie čtvercové sítě	37
6.7	Matice optické soustavy Keplerova dalekohledu	38
6.7.1	Výpočet zvětšení optické soustavy	39
7	Závěr	40

# 1 Úvod

Hlavním tématem této bakalářské práce je sestavení Keplerova refraktoru a změření jeho základních parametrů. Zároveň bude simulováno šíření světelného paprsku touto optickou soustavou pomocí geometrické optiky a maticové formulace, aby bylo možné porovnat výsledky obou měření. Maticová formulace optického zobrazení bude společně se základními pojmy šíření světla optickými soustavami popsána v teoretické části práce.

V druhé kapitole bude popsáno lidské oko a podmínky pro vznik obrazu na sítnici.

Třetí kapitola se bude zabývat optickými čočkami, jejich rozdělením, lomem světla a jejich vadami.

Ve čtvrté kapitole bude zmínka o dalekohledech a o jejich rozdělení na refraktory a reflektory.

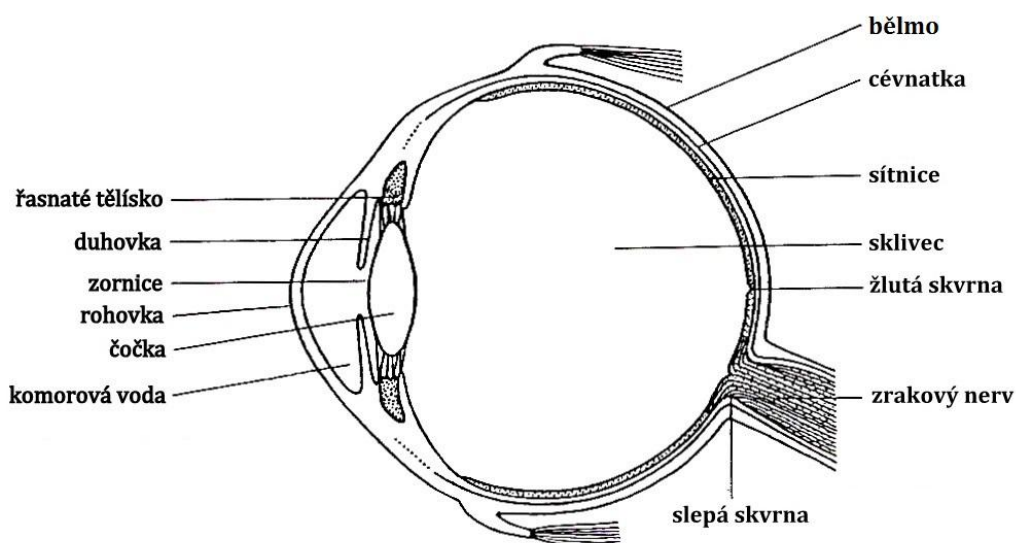
V následující páté kapitole bude rozsáhleji popsána geometrická optika, která usnadňuje simulaci průchodu paprsku optickou soustavou, budou vyjmenovány základní zákony geometrické optiky a bude popsáno maticové zpracování šíření tohoto paprsku.

V praktické části této bakalářské práce bude nejprve změřeno několik základních parametrů použitých čoček, jako je ohnisková vzdálenost a poloměr křivosti. Poté bude sepsána matice systému pro jednotlivé čočky a nakonec bude sestaven jednoduchý Keplerův dalekohled, změřeno jeho zvětšení a vytvořena matice celého systému.

## 2 Lidské oko

### 2.1 Stavba lidského oka

Lidské oko je velmi složitý orgán. Jeho struktura se přizpůsobuje zaostření paprsku světla na sítnici. Všechny části oka, přes které prochází paprsek světla, jsou průhledné, aby co nejméně zabraňovaly rozptylu dopadajícího světla. [1]



Obr. 1. Řez okem.

Husté *běльмо* chrání oko před vnějšími vlivy a udržuje kulovitý tvar oka. Pouze mírně vypouklá přední část může propouštět světlo. Tato část se nazývá *rohovka*. V *cévnatce* je soustředěno velké množství cév, které oko vyživují. Zásadní úlohu má *sítnice*, která vystýlá celý vnitřní povrch oka obrácený k rohovce. Sítnice obsahuje tělíska citlivá na světlo. Tato tělíska tvoří konce zrakových nervů, kterými se přenáší světelné vjemy z oka do mozku. V přední části oka je *čočka*, což je průzračné pružné těleso charakteristického tvaru. Před čočkou je *duhovka*, jejíž barva bývá u každého člověka jiná. Uprostřed duhovky je malý otvor nazývaný *zornice*. Prostor mezi rohovkou a čočkou je naplněn *komorovou vodou* a celá vnitřní část oka je vyplněna průhledným *sklivcem*. [1]

Pokud se díváme na nějaký předmět, světelné paprsky odražené od tohoto předmětu procházejí rohovkou, komorovou vodou, čočkou, sklivcem a dopadají na sítnici, kde se vytváří obraz předmětu. Aby byl tento obraz na sítnici ostrý, nesmí

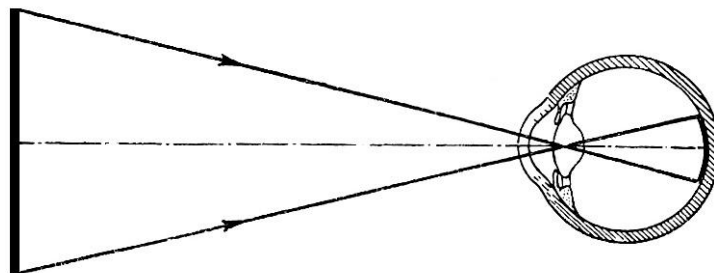


se rozptylovat, čehož by nebylo možné dosáhnout, kdyby měla čočka stále stejný tvar. V takovém případě bychom viděli ostře jenom předměty umístěné v určité vzdálenosti od oka. Obrazy předmětů ve větší či menší vzdálenosti by byly nejasné. Čočka ale může pomocí svalů měnit svůj tvar. Při pohledu na bližší předměty je čočka vypouklá, zatímco při pohledu na předměty vzdálenější se vypouklost čočky zmenší. [1]

Změna tvaru čočky se nazývá *akomodace*. Čočka může měnit svou formu jenom do jisté meze. Proto prostým okem nemůžeme pozorovat předměty umístěné blíže, než je konvenční zraková vzdálenost, neboť zde už přestává mechanismus akomodace pracovat. [1]

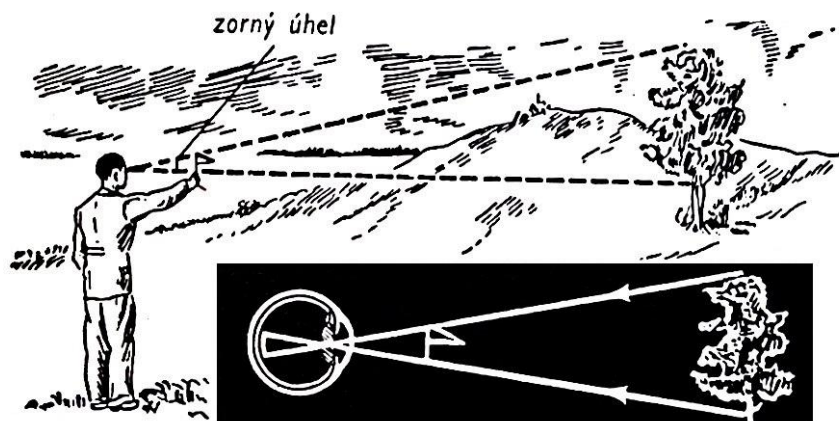
## 2.2 Parametry vzniku obrazu na sítnici oka

Ke stanovení velikosti obrazu na sítnici je třeba spojit paprsky jdoucí od okrajů předmětu k sítnici se středem čočky. Vzdálenost mezi průsečíky těchto paprsků na povrchu sítnice udává velikost obrazu. [1]



Obr. 2. Vznik obrazu na sítnici oka. Zdroj: [1]

Dva předměty různých rozměrů mohou na sítnici oka vytvořit obraz stejné velikosti, protože paprsky jdoucí od okrajů předmětů ke středu čočky mohou svírat stejný úhel. Tento úhel se nazývá *zorný úhel* a určuje velikost obrazu, který vznikne na sítnici. Čím větší zorný úhel je, tím je větší i obraz a naopak. Velikost obrazu pozorovaného předmětu závisí na jeho vzdálenosti. Zmenšením této vzdálenosti zorný úhel vzrůstá, tím se také zvětšuje obraz na sítnici a oko je schopno rozeznat více podrobností na předmětu. [1]



Obr. 3. Praporek a strom vytváří na sítnici oka obraz stejné velikosti. Zdroj: [1]

Na druhou stranu malé nebo velmi vzdálené předměty oko vnímá pod velmi malým zorným úhlem, tudíž je jejich obraz na sítnici nepatrný. [1]

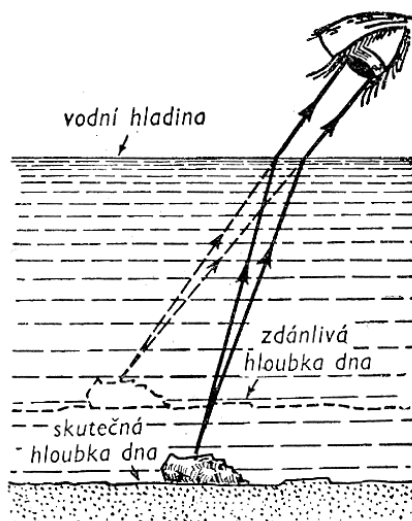
Viditelnost malých a vzdálených předmětů zlepšíme zvětšením zorného úhlu. Pokud ale postavíme malé předměty k oku blíže, než je konvenční zraková vzdálenost, jejich obrazy se na sítnici rozplývají. Ale zorný úhel lze zvětšit jiným způsobem. Tyto způsoby si popíšeme v následující kapitole. [1]

## 3 Optické čočky

### 3.1 Lom světla

Světlo se šíří přímočaře, ale na rozhraní dvou prostředí dochází k lomu paprsku, což je způsobeno různými rychlostmi šíření světla v různých prostředích. Tento jev pozorujeme například při průchodu a následném lomu světelného paprsku z vody do vzduchu. [1]

Pozorovateli se zdá, že výchozí bod svazku paprsků není na skutečném dně, ale v místě protínajících se paprsků jdoucích od povrchu vody k oku. Pozorovatel vidí dno právě v tomto místě, které se mu jeví výše, viz obr. 4. [1]

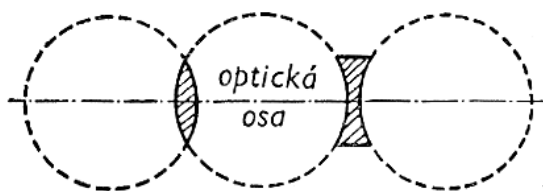


Obr. 4. Lom světla ve vodě. Zdroj: [1]

Světelný paprsek se láme vždy na rozhraní, které dělí dvě průzračné látky. Tohoto poznatku využíváme především při lomu světla ze vzduchu do skla a ze skla do vzduchu, čímž můžeme řídit chod světelných paprsků, měnit jejich tvar a měnit rozbíhající se svazek paprsků na sbíhající se. Taková skla se nazývají *optické čočky*. [1]

### 3.2 Čočka

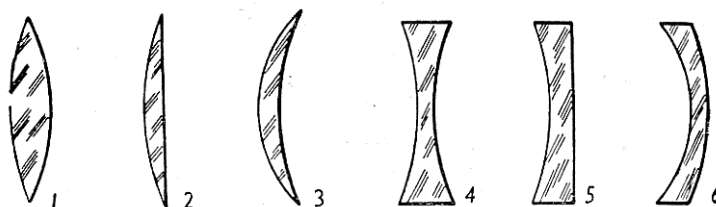
Optická čočka je kousek skla omezený kulovými povrchy, jejichž středem je vedená přímka nazývaná *optická osa*. U některých čoček bývá jeden povrch rovný. [1]



Obr. 5. Optická osa. Zdroj: [1]

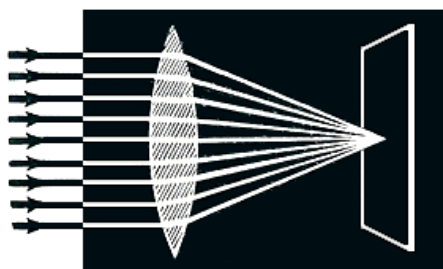
### 3.3 Rozdělení optických čoček

Obrázek níže znázorňuje šest druhů čoček. Dvojvypuklá (1), ploskovypuklá (2), dutovypuklá (3), dvojdutá (4), ploskodutá (5), vypuklodutá (6). [1]



Obr. 6. Rozdělení optických čoček. Zdroj: [1]

První tři spojují rovnoběžný svazek paprsků do jednoho bodu, proto se nazývají *spojky*. Tři zbylé čočky rozptylují rovnoběžný svazek paprsků, proto se nazývají *rozptylky*. [1]



Obr. 7. Ohnisko. Zdroj: [1]

Bod, do kterého soustředí spojka paprsky rovnoběžné s její optickou osou, se nazývá *ohnisko* čočky. Ohnisko je vždy na optické ose čočky. Vzdálenost mezi čočkou a ohniskem se nazývá *ohnisková vzdálenost*. [1]

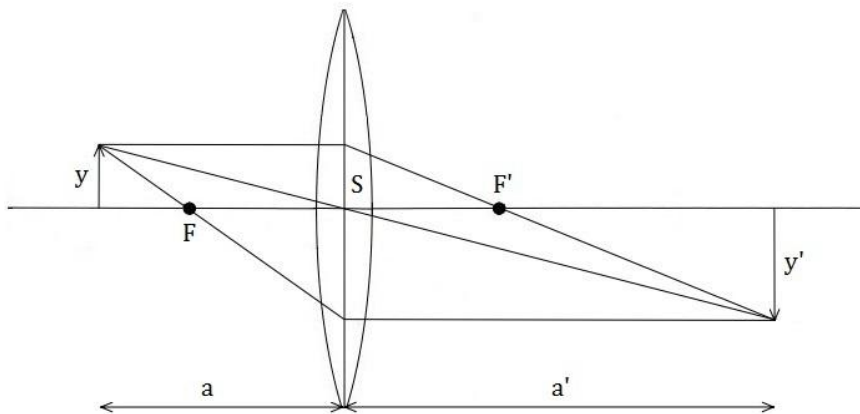
### 3.4 Zobrazení tenkou čočkou

Pod pojmem tenká čočka rozumíme takovou čočku, jejíž tloušťku můžeme zanedbat a položit rovnou nule, čímž se výrazně zjednoduší vztahy pro výpočet základních parametrů čočky, mezi které patří ohnisková vzdálenost. U tenké čočky splývá předměťový a obrazový vrchol čočky se středem této čočky. V tomto středu leží i hlavní předměťový a hlavní obrazový bod. [7]

Pro zobrazení tenkou čočkou platí zobrazovací rovnice

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} ,$$

kde  $a$  je předmětová vzdálenost,  $a'$  je obrazová vzdálenost a  $f$  je ohnisková vzdálenost. Všechny veličiny uvažujeme jako absolutní hodnoty. [7]



Obr. 8. Zobrazení předmětu tenkou spojkou.

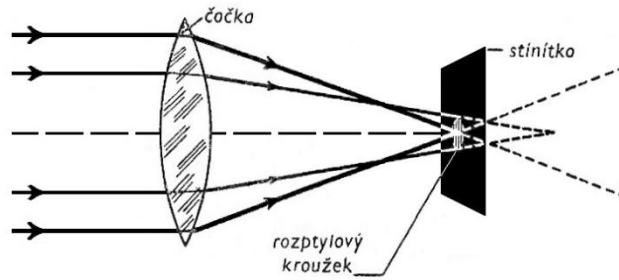
### 3.5 Vady zobrazení

Obrazy vzdálených předmětů v prvních dalekohledech nebyly příliš ostré. Ostrost se s velikostí obrazu zmenšovala. Příčinou jsou *vady čoček*. [1]

Pokud předpokládáme, že všechny paprsky svírají s optickou osou velmi malé úhly, sférické plochy dovolují realizovat dokonalé zobrazení. Ve skutečnosti je ale zobrazení porušeno mnohem více, protože nemůžeme dokonale splnit všechny podmínky *paraxiální aproximace* (viz str. 21). Zobrazení je také ovlivněno difrakcí světla. [2]

#### 3.5.1 Sférická aberace

Slunečním paprskům postavíme do cesty spojku a za ní stínítko. Na stínítku vznikne obraz Slunce v podobě bílé skvrny, jejíž okraje ale nejsou ostré. Její hranice jsou navíc obklopeny barevným pásem. [1]

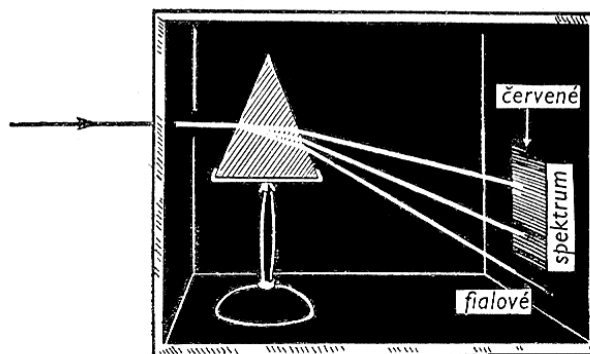


Obr. 9. Sférická aberace. Zdroj: [1]

Příčina barevného okraje a rozostření obrazu je způsobeno čočkou. Ve skutečnosti není zcela přesné tvrzení, že paprsky dopadající na čočku rovnoběžně s její optickou osou se spojují v jejím ohnisku, protože paprsky, které dopadají na čočku u jejích okrajů, se protínají blíže k čočce než paprsky procházející její střední částí. Z tohoto důvodu se nespojují všechny paprsky za čočkou v jeden bod. Vytvářejí tzv. *rozptylový kroužek*, a proto se hranice předmětu rozplývají. Tento jev se nazývá *sférická aberace*. Sférická aberace je nedokonalost obrazu způsobená kulovým tvarem čočky. [1]

### 3.5.2 Lom světla přes trojboký hranol

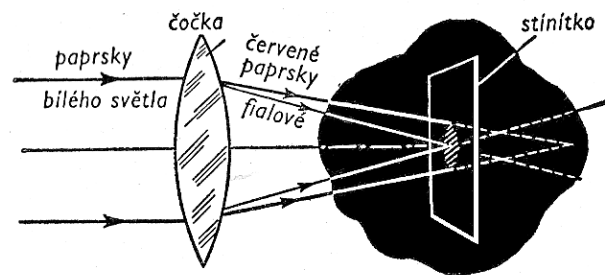
Bílé světlo je tvořeno různými barvami, o čemž se přesvědčíme pomocí trojbokého hranolu. Za trojbokým hranolem vzniká barevný pás nazývaný *spektrém*. Tento barevný pás vzniká na stínítku při průchodu bílého světla trojbokým hranolem, protože paprsky různých barev se nelámou stejně. Nejvíce se lámou fialové paprsky a nejméně červené. Totéž nastává i při průchodu bílého světla čočkou. [1]



Obr. 10. Lom světla přes hranol. Zdroj: [1]

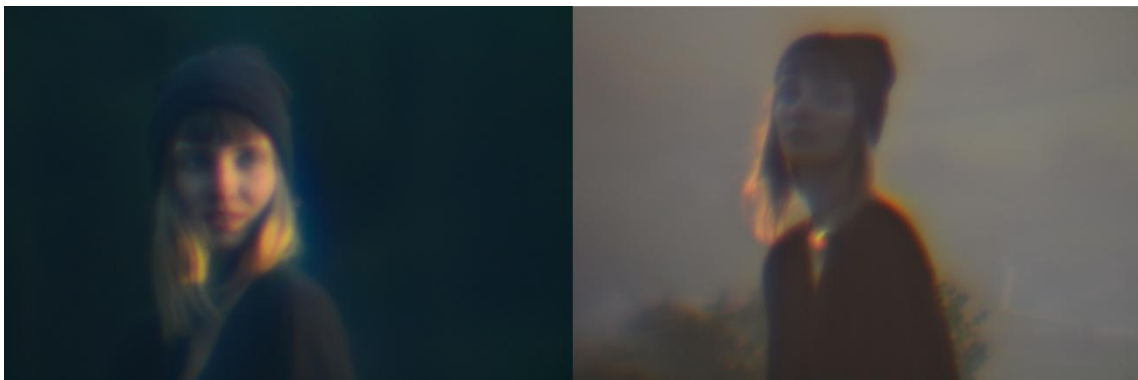
### 3.5.3 Chromatická aberace

Další základní vadou čoček je tzv. *chromatická aberace*. Ta způsobuje zbarvení obrazu předmětu na jeho okrajích, protože uprostřed obrazu se barvy navzájem překrývají, tudíž je oko vnímá jako bílou barvu, zatímco na hraně se barvy nepřekrývají, a proto se vytváří barevná obruba. To je způsobeno tím, že poloha ohniskových vzdáleností čočky je různá pro odlišné vlnové délky světla. [1][2]



Obr. 11. Chromatická aberace. Zdroj: [1]

Chromatickou aberaci lze minimalizovat v okolí určité vlnové délky použitím dvou čoček (například spojky a rozptylky), které jsou umístěné těsně vedle sebe (achromatický dublet). Každá čočka je navíc vyrobená z jiného materiálu. Chromatická vada se eliminuje u optických přístrojů, v nichž se k zobrazení používá zrcadel (reflektory). [2]



Obr. 12. Ukázka sférické a chromatické aberace. Foto autor.

## 4 Dalekohledy

### 4.1 Rozdělení dalekohledů

Dalekohledy slouží k optickému přiblížení a zvětšení pozorovaného předmětu pomocí soustav čoček nebo zrcadel. [3] Optické dalekohledy dělíme podle konstrukce objektivu:

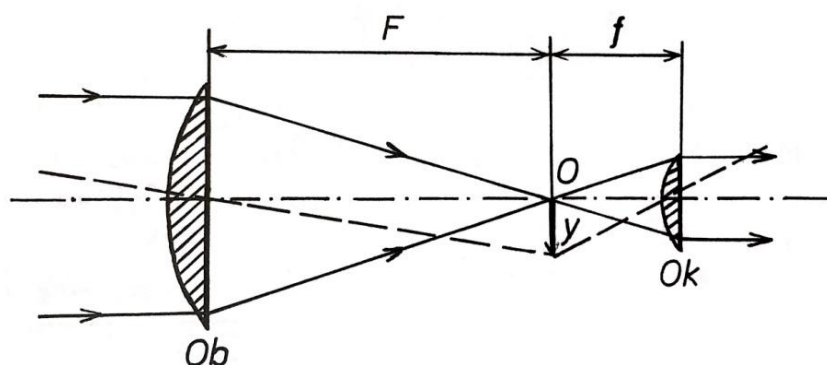
- refraktory
- reflektory

Rozdílem je složení objektivu. Objektiv refraktoru je tvořen čočkou nebo soustavou čoček, zatímco objektiv reflektoru je tvořen zrcadlem. [4]

### 4.2 Refraktory

První astronomický refraktor složený ze spojky a rozptylky vytvořil Galileo Galilei roku 1609, díky čemuž se mu podařilo učinit řadu objevů. Tento dalekohled dále zdokonalil roku 1611 Johannes Kepler za použití dvou spojek, čímž získal ostřejší, ale převrácený obraz. [3]

*Keplerův refraktor* (dalekohled) vytváří skutečný a převrácený obraz pozorovaného předmětu v ohniskové rovině objektivu. [4]



Obr. 13. Keplerův dalekohled. Zdroj: [4]



Obraz pozorujeme okulárem  $Ok$  a pro zvětšení dalekohledu platí vztah

$$z = \frac{f}{f_0},$$

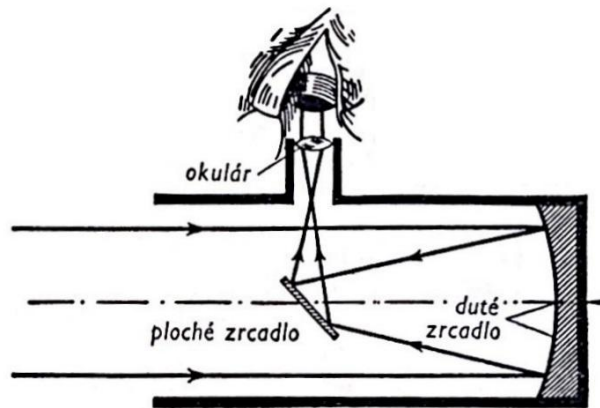
kde  $f$  je ohnisková vzdálenost objektivu a  $f_0$  je ohnisková vzdálenost okuláru. [4]

Jednoduchá spojná čočka má řadu vad, proto se konstruuje objektiv složený z více čoček, aby se tyto vady odstranily. [4]

### 4.3 Reflektory

Objektiv reflektoru je tvořen primárním dutým parabolickým, kulovým nebo hyperbolickým zrcadlem. Obraz předmětu se poté odráží sekundárním zrcadlem a nakonec se pozoruje okulárem. [4]

Duté zrcadlo spojuje rovnoběžné paprsky pozorovaného předmětu a soustřeďuje je do jednoho bodu, čímž vytváří skutečný obraz. Tento obraz je ale ve směru dopadajících paprsků. Pozorovatel by přímým pozorováním obrazu stínil dopadající světlo, proto se do cesty spojujících se paprsků umísťuje ploché zrcadlo, které vede paprsky přímo do okuláru a umožňuje pozorování. [1]



Obr. 14. Schéma zrcadlového dalekohledu. Zdroj: [1]

Výhodou reflektorů je nepřítomnost barevných vad. Zrcadlový dalekohled totiž nemá chromatickou aberaci, což je zapříčiněno tím, že odraz nerozkládá bílé světlo na jednotlivé barevné paprsky. Odstraněním chromatické aberace je dosaženo ostřejšího obrazu pozorovaného předmětu. [1]

Druhou předností reflektorů je snadnější výroba skla pro zhotovení zrcadla, než skla pro zhotovení čočky. To je dáno tím, že sklo používané k výrobě zrcadla nemusí být stejnorodé, neboť jím světlo neprochází. Je pouze podkladem, na který se nanáší vrstva reflektujícího kovu. [1]

Další výhodou je uspořádání tubusu, který je oproti refraktorům menší, protože se v něm světlo odráží a těžké zrcadlo je umístěné na straně pozorovatele, zatímco objektiv refraktoru je na vnějším konci tubusu. [4]

## **5 Maticová formulace optického zobrazování**

### **5.1 Průchod paprsku optickou soustavou**

Světlo se chová jako elektromagnetické vlnění, proto bychom pro jeho přesný popis museli využít vlnové optiky. Avšak za pomoci tzv. geometrické optiky si můžeme popis šíření světla značně zjednodušit, protože při analýze neuvažujeme jevy způsobené difrakcí. [5]

#### **5.1.1 Základy geometrické optiky**

Geometrická optika definuje základní rovnice pro určení chodu světla v homogenním prostředí a zabývá se především chováním světla na rozhraní opticky různých prostředí. Geometrická optika dále určuje vztahy pro chod světla optickými přístroji a je základem pro konstrukci těchto přístrojů. [6]

#### **5.1.2 Základní zákony geometrické optiky**

Geometrická optika je založená na čtyřech základních zákonech:

- Zákon o přímočarém šíření světla
- Zákon o odrazu a lomu
- Zákon o vzájemné nezávislosti světelných paprsků
- Zákon o záměně chodu světelných paprsků

**Zákon o přímočarém šíření světla** říká, že se světlo šíří v homogenním prostředí přímočaře. Pokud je zdroj světla umístěný v tomto homogenním prostředí, světlo se šíří stejně všemi směry ve vlnoplochách popsanými Huygensovým principem. Světelné paprsky jsou poté přímkami kolnými na jednotlivé vlnoplochy. Tento zákon zanedbává vlnovou povahu světla, a tudíž neplatí ve vlnové optice. [7]

Homogenní prostředí je takové prostředí, které má v každém bodě stejné optické vlastnosti. [7]

**Zákon odrazu a lomu** říká, pod jakým úhlem se paprsek odráží, nebo se naopak láme. Dopadající paprsek se na rozhraní dvou optických prostředí rozdělí na dva paprsky, které dále postupují změněnými směry. První paprsek se nazývá odražený. Tento paprsek zůstává v původním prostředí. Druhý paprsek postupuje do jiného prostředí a nazývá se lomený. Bod, kam dopadá paprsek na rozhraní dvou optických prostředí, se nazývá bod dopadu. Příмка, která prochází bodem dopadu a je kolná na rozhraní, je kolmice dopadu. Rovina, ve které leží dopadající paprsek a kolmice dopadu, se nazývá rovina dopadu. <sup>6</sup> Poměr úhlu dopadu  $\alpha_1$  a úhlu lomu  $\alpha_2$  se nazývá relativním úhlem lomu  $n_{12}$ . Tento vztah se nazývá Snellův zákon neboli zákon lomu. [6]

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n_{12}$$

**Zákon nezávislosti světelných paprsků** říká, že daným bodem v homogenním prostředí může procházet libovolné množství paprsků, které se vzájemně neovlivňují. Ve vlnové optice takový zákon neplatí, protože světlo je elektromagnetické vlnění, a pokud se dvě vlnění setkají, vzájemně interferují. [6]

**Zákon o záměně chodu světelných paprsků** říká, že při šíření paprsku z jednoho bodu do druhého bude při šíření v opačném směru trajektorie stejná. [6]

### 5.1.3 Geometrická optika sférických ploch

Geometrická optika se zabývá průchodem světelných paprsků optickou soustavou čoček nebo zrcadel. Ze základních zákonů fyziky si ve většině případů vystačíme se znalostí zákona lomu. Při šíření světla soustavou necháme z jednotlivých bodů předmětu vystupovat myšlené paprsky pod různými úhly a necháme je lámat na

jednotlivých optických rozhraních. K výpočtům nám pomáhají současné počítače, které dovolují vyšetřit velké množství paprsků. [2]

V této práci se omezíme na případ zobrazení, ke kterému dochází při lomu světla na kulových rozhraních mezi prostředími s různými indexy lomu. [2]

## 5.2 Charakteristiky paprsku

Abychom byli schopni popsat dráhu paprsku, musíme si zavést souřadnicovou soustavu  $x, y$ . Osa  $x$  bude mít směr průchodu světla soustavou a bude totožná s optickou osou soustavy kulových ploch. Počátek osy  $x$  bude ležet v průsečíku osy s první lámanou plochou. V bodě  $P(x, y)$  bude paprsek charakterizovat souřadnice  $y$  bodu  $P$  a úhel  $\alpha$ , který svírá paprsek s kladným směrem osy  $x$ . Úhel  $\alpha$  měříme kladně ve směru proti chodu hodinových ručiček. Veličiny  $y$  a  $\alpha$  budeme nazývat parametry paprsku. [5]

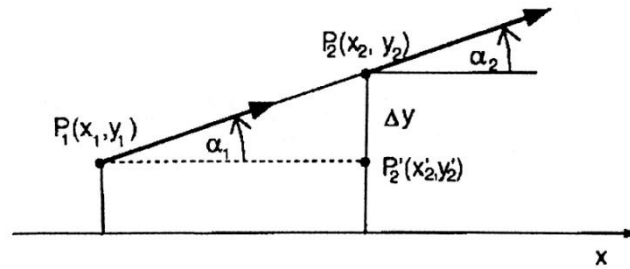
## 5.3 Šíření paprsku mezi dvěma body

Představme si, že máme bod  $P_1(x_1, y_1)$  s parametry  $y_1$  a  $\alpha_1$  a zajímá nás, jaké bude mít parametry v bodě  $P_2(x_2, y_2)$ . [5]

Protože se paprsek šíří v homogenním prostředí, nemění se jeho úhel s osou  $x$ , tzn.  $\alpha_1 = \alpha_2$ , ale změní se jeho parametr  $y_2$ , pro jehož hodnotu dostáváme  $y_2 = y_1 + \Delta y$ . Ze znalosti pravoúhlého trojúhelníka si můžeme vyjádřit  $\Delta y = (x_2 - x_1) \tan \alpha_1$ . Po dosazení do předcházející rovnice dostaneme pro parametr  $y_2$  rovnici

$$y_2 = y_1 + (x_2 - x_1) \tan \alpha_1,$$

kde vystupují pouze parametry paprsku v bodě  $P_1$  a souřadnice  $x$  bodu  $P_2$ . [5]



Obr. 15. Šíření paprsku z bodu  $P_1$  do bodu  $P_2$  po přímce. Zdroj: [5]

Jelikož se zabýváme nejjednodušším případem šíření světla osově symetrickou optickou soustavou, kdy paprsky svírají s osou soustavy velmi malé úhly, platí, že hodnota  $\sin \alpha$  je přibližně rovna úhlu  $\alpha$  vyjádřenému v radiánech. Toto zjednodušení se nazývá *paraxiální aproximace*. [2][5]

Po následném zjednodušení uvážením paraxiální aproximace dostaneme nové parametry  $y_2$  a  $\alpha_2$ , které jsou dány rovnicemi

$$y_2 = y_1 + (x_2 - x_1)\alpha_1$$

$$\alpha_2 = 0 + \alpha_1. [5]$$

### 5.3.1 Paraxiální aproximace

Paraxiální aproximace neboli paraxiální přiblížení značně zjednodušuje výpočty nahrazením hodnot goniometrických funkcí  $\sin \alpha$  a  $\tan \alpha$  samotným úhlem  $\alpha$  v radiánech. Platí, že čím menší je hodnota úhlu  $\alpha$ , tím je menší i výsledná chyba měření. [5]

### 5.4 Maticová formulace šíření paprsku

Předcházející vztahy si můžeme přepsat do maticového tvaru

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & (x_2 - x_1) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \alpha_1 \end{pmatrix},$$

čímž dostaneme tzv. *translační (přenosovou) matici T*

$$T_{12} = \begin{pmatrix} 1 & (x_2 - x_1) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

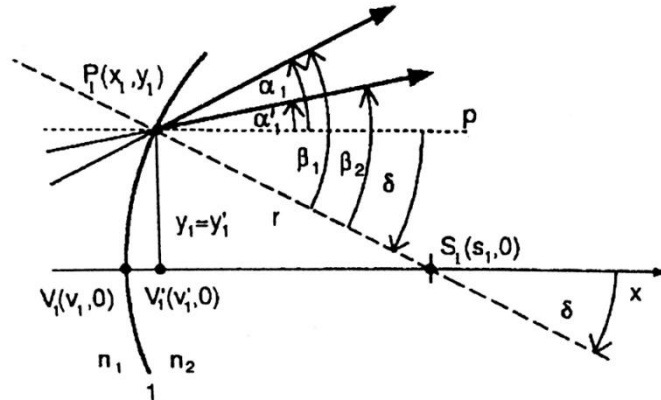
Matice  $Y$

$$Y = \begin{pmatrix} y \\ \alpha \end{pmatrix}$$

je tzv. *paprsková matice* obsahující parametry  $y$  a  $\alpha$  vždy v tomto pořadí s přihlédnutím k příslušným indexům. V maticovém označení má poté rovnice tvar  $Y_2 = T_{12}Y_1$ . [2][5]

## 5.5 Lom paprsku na kulovém rozhraní

Uvažujme kulové rozhraní oddělující prostředí s indexem lomu  $n_1$  a prostředí s indexem lomu  $n_2$ . Střed křivosti  $S_1(s_1, 0)$  leží na ose  $x$ , kterou toto kulové rozhraní protíná v bodě  $V_1(v_1, 0)$ . V bodě  $P_1$ , uvažujeme bod na vnější straně tohoto rozhraní, v prostředí s indexem lomu  $n_1$ , je paprsek charakterizován veličinami  $y_1$  a  $\alpha_1$ . Ve stejném bodě ale na druhé straně kulového rozhraní, v prostředí s indexem lomu  $n_2$ , je bod charakterizován veličinami  $y'_1$  a  $\alpha'_1$ . [5]



Obr. 16. Lom paprsku na kulovém rozhraní. Kolmice na kulovou plochu prochází bodem  $P_1$  a středem  $S_1$  a s osou  $x$  svírá úhel  $\delta$ . Přímka  $p$  je rovnoběžná s osou  $x$ .

Zdroj: [5]

Při přechodu paprsku takovým rozhraním dochází k lomu, který je podle Snellova zákona

$$n_2 \sin \beta_2 = n_1 \sin \beta_1,$$

kde  $\beta_1$  a  $\beta_2$  jsou úhly, které svírají paprsky s kolmicí ke kulové ploše v bodě  $P_1$ .  
Podle obrázku pro tyto úhly platí

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \alpha_1 - \delta \\ \beta_2 &= \alpha'_1 - \delta,\end{aligned}$$

kde  $\delta$  je úhel, který svírá kolmice s osou  $x$ . Po dosazení těchto vztahů do Snellova zákona a při omezení na paraxiální přiblížení, dostaneme

$$\alpha'_1 - \delta = N_{12}(\alpha_1 - \delta),$$

odkud si vyjádříme úhel  $\alpha'_1$

$$\alpha'_1 = (1 - N_{12}) \cdot \delta + N_{12} \cdot \alpha_1.$$

Veličina  $N_{12}$  je relativní index lomu a je dán poměrem  $n_1$  a  $n_2$ . Dále z pravoúhlého trojúhelníka  $\Delta S_1 P_1 V'_1$  pro úhel  $\delta$  platí

$$\tan \delta = -\frac{y'_1}{s_1 - v'_1}.$$

Při omezení se na paraxiální přiblížení body  $V_1$  a  $V'_1$  téměř splývají, z čehož vyplývá pro úhel  $\delta$  jednoduchý vztah

$$\delta = -\frac{y_1}{s_1 - v_1}.$$

Rozdíl  $(s_1 - v_1)$  je reálné číslo, které může být kladné i záporné. Jeho absolutní hodnota  $|s_1 - v_1|$  je rovna poloměru lámavé plochy, který ale nebudeme používat. Pokud dosadíme toto vyjádření úhlu  $\delta$  do předcházejícího vztahu, dostaneme rovnice pro nové hodnoty parametrů paprsku po lomu

$$\begin{aligned}y'_1 &= y_1 + 0 \\ \alpha'_1 &= \frac{N_{12} - 1}{s_1 - v_1} \cdot y_1 + N_{12} \alpha_1,\end{aligned}$$

u čehož stále zachováváme stejné uspořádání rovnic pro snazší maticové vyjádření. [5]

Tyto rovnice umožňují vypočítat parametry paprsku po lomu, pokud známe jeho vstupní parametry. Tímto způsobem jsme popsali šíření paprsku a jeho lomu. Nyní jsme schopni sestavit celou dráhu průchodu paprsku optickým systémem. [5]

## 5.6 Maticová formulace lomu paprsku

Předcházející vztahy si opět přepíšeme do maticového tvaru

$$\begin{pmatrix} y'_1 \\ \alpha'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N_{12}-1}{s_1-v_1} & N_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \alpha_1 \end{pmatrix},$$

čímž dostaneme tzv. *refrakční matici*  $R$

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{N_{12}-1}{s_1-v_1} & N_{12} \end{pmatrix},$$

jejíž index označuje, že se tato matice týká lámavé plochy číslo 1 oddělující prostředí s indexem lomu  $n_1$  od prostředí s indexem lomu  $n_2$ , tj.

$$N_{12} = \frac{n_1}{n_2}.$$

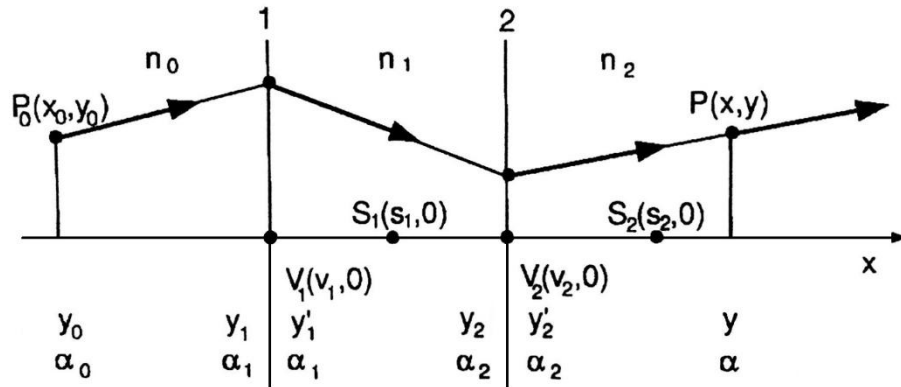
V maticovém označení má poté rovnice tvar

$$Y'_1 = R_1 Y_1. [5]$$



## 5.7 Dráha paprsku optickou soustavou

Na obrázku níže máme optickou soustavu, která se skládá ze dvou lámavých ploch. Před první lámavou plochou v bodě  $P_0(x_0, y_0)$  má paprsek parametry  $y_0$  a  $\alpha_0$  a my zjišťujeme, jaké parametry má paprsek v bodě  $P(x, y)$ . [5]



Obr. 17. Průchod paprsku optickou soustavou. Zdroj: [5]

Počátek osy  $x$  umístíme do průsečíku osy s první lámavou plochou, na kterou paprsek světla narazí, tzn. že  $v_1 = 0$ . Dále předpokládáme, že známe indexy lomu  $n_0$ ,  $n_1$  a  $n_2$  a souřadnice na ose  $x$ , mezi které patří  $x_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  a  $x$ . Tímto způsobem je zadán celý optický systém. [5]

Je důležité vhodné označení parametrů paprsku na lámavých plochách, což nám následně umožní zapsání přehledných rovnic. Zvolené parametry jsou znázorněné na obrázku. Výpočet začínáme od konce. Do bodu  $P$  se dostane paprsek průchodem lámavé plochy číslo 2, na jejímž výstupu má parametry  $y'_2$  a  $\alpha'_2$ , což zapíšeme rovnicemi

$$y = y'_2 + (x - v_2) \cdot \alpha'_2$$

$$\alpha = 0 + \alpha'_2.$$

Parametry na výstupu plochy číslo 2 vypočteme podle rovnic s použitím parametrů na vstupní straně této plochy a dostaneme

$$y'_2 = y_2 + 0$$

$$\alpha'_2 = \frac{N_{12} - 1}{s_2 - v_2} \cdot y_2 + N_{12} \alpha_2.$$

Parametry paprsku na vstupní straně plochy číslo 2 vyjádříme pomocí parametrů na výstupu plochy číslo 1 a dostaneme

$$\begin{aligned} y_2 &= y'_1 + (v_2 - v_1) \cdot \alpha'_1 \\ \alpha_2 &= 0 + \alpha'_1. \end{aligned}$$

Nyní znovu parametry na výstupu plochy číslo 1 vyjádříme pomocí parametrů paprsku na vstupní straně plochy číslo 1 užitím rovnic

$$\begin{aligned} y'_1 &= y_1 + 0 \\ \alpha'_1 &= \frac{N_{01} - 1}{s_1 - v_1} \cdot y_1 + N_{01} \alpha_1. \end{aligned}$$

Abychom vypočetli zbývající parametry paprsku na vstupní straně plochy číslo 1, musíme naposledy vyjádřit tyto parametry pomocí známých veličin v bodě  $P_0$ . Získáme rovnice

$$\begin{aligned} y_1 &= y_0 + (v_1 - x_0) \cdot \alpha_0 \\ \alpha_1 &= 0 + \alpha_0. \end{aligned}$$

V tento okamžik by mělo následovat postupné dosazování posledních rovnic do těch předcházejících. Tento postup bychom museli opakovat, dokud bychom si nevyjádřili veškeré neznámé parametry. Na levé straně bychom měli hledané parametry, ale na pravé straně bychom dostali velmi nepřehledné a složité výrazy. Pomocí matic si celý postup výrazně zjednodušíme. [5]

## 5.8 Matice optického systému

V předcházejících kapitolách už byly zmíněné translační, paprsková a refrakční matice. Nyní si pomocí těchto matic přepíšeme předcházející vztahy průchodu paprsku optickou soustavou. Dostaneme

$$\begin{aligned} Y &= T_2 Y'_2 \\ Y'_2 &= R_2 Y_2 \\ Y_2 &= T_{12} Y'_1 \\ Y'_1 &= R_1 Y_1 \\ Y_1 &= T_{02} Y_0. \end{aligned}$$

V takovém tvaru je dosazování za paprskové matice velmi jednoduché. Při tomto dosazování nesmíme zaměnit pořadí při násobení matic. Po dosazení dostaneme

$$Y = T_2 R_2 T_{12} R_1 T_{01} Y_0,$$

čímž jsme všechny neznámé parametry vyjádřili pomocí známých parametrů na jeho vstupu a pomocí parametrů systému, kterými jsou indexy lomu, souřadnice vrcholů kulových lámavých ploch a souřadnice jejich středů křivosti. [5]

V dalším kroku můžeme tuto poněkud dlouhou rovnici upravit do kratšího tvaru

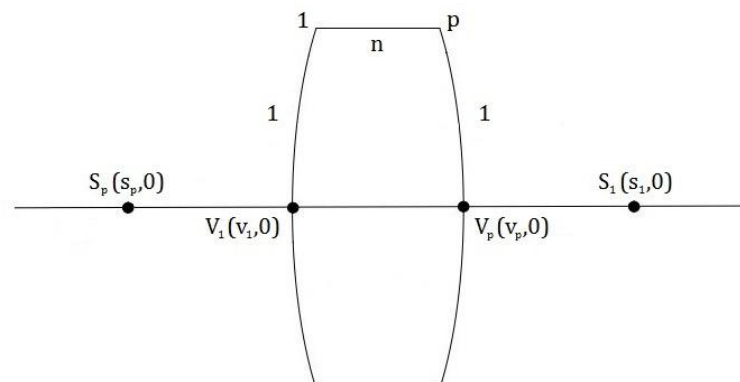
$$Y = T_2 S T_{01} Y_0,$$

kde matice  $S = R_2 T_{12} R_1$  představuje *matici optického systému*. Takový optický systém je ohraničený kulovými lámavými plochami, přičemž může jít o jednu čočku, nebo o celou soustavu čoček. [5]

Matice optické soustavy je tvořena součinem refrakčních a translačních matic v opačném pořadí součinitelů, než v jakém prochází světlo tímto systémem. Toto je důležitá podmínka pro správný výpočet matice  $S$ . Počet refrakčních a translačních matic je dán počtem lámavých ploch. Matice systému je vždy typu (2,2). [5]

### 5.8.1 Příklad matice optického systému

V tomto příkladu si ukážeme vytvoření matice optické soustavy, která je tvořena tlustou spojnou čočkou. Veličiny týkající se poslední lámavé plochy systému budeme označovat s indexem  $p$ . [5]



Obr. 18. Tlustá spojná čočka, kterou ohraničují dvě kulové lámavé plochy. Počátek osy  $x$  je v bodě  $V_1$ . Zdroj: [5]

Matice systému je  $S = R_p T_1 R_1$ . Tuto matici si přepíšeme do tvaru

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{S_p - V_p} & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & V_p - V_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{S_1 - V_1} & \frac{1}{n} \end{pmatrix},$$

kde  $n$  je index lomu skla,  $S_1$  a  $S_p$  jsou poloměry křivosti lámavých ploch a  $V_1$  a  $V_p$  jsou souřadnice bodů, kde čočka protíná optickou osu, přičemž počátek souřadného systému umístujeme vždy do bodu  $V_1$ . Indexem  $p$  značíme poslední lámavé plochy. [5]

## 6 Praktická část

### 6.1 Poznámka k sestavení jednoduchého dalekohledu

Pro sestavení jednoduchého Keplerova dalekohledu složeného ze dvou spojných čoček je důležité nejprve změřit ohniskové vzdálenosti těchto čoček pro správnou délku tubusu. Délka dalekohledu a tudíž délka tubusu pro vytvoření dalekohledu je rovna ohniskové vzdálenosti objektivu  $F$  plus ohnisková vzdálenost okuláru  $f$ .

### 6.2 Měření základních parametrů čoček dalekohledu

#### 6.2.1 Měření ohniskové vzdálenosti

Ohnisková vzdálenost čoček byla změřena přímou metodou na optické lavici, přičemž bylo jako předmět použito průhledné měřítko osvětlené světelným zdrojem. Tento předmět byl posouváním čočky zaostřován na stínítko na druhém konci optické lavice, přičemž byly měřeny vzdálenosti mezi předmětem a čočkou (předmětová vzdálenost  $a$ ) a mezi čočkou a stínítkem (obrazová vzdálenost  $a'$ ). Pro každou čočku bylo provedeno 10 měření. Hodnoty jsou zaznamenané v tabulce, která obsahuje i výpočet výsledné ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček s relativní chybou měření.

$n$	$a [m]$	$a' [m]$	$f [cm]$	$\Delta f [cm]$	$\Delta^2 f [cm^2]$
1	0,385	1,685	31,339	0,0327	0,0011
2	0,386	1,690	31,423	-0,0509	0,0026
3	0,385	1,689	31,353	0,0188	0,0004
4	0,387	1,695	31,506	-0,1345	0,0181
5	0,386	1,687	31,413	-0,0405	0,0016
6	0,384	1,685	31,273	0,0989	0,0098
7	0,385	1,686	31,343	0,0292	0,0009
8	0,385	1,690	31,357	0,0154	0,0002
9	0,386	1,691	31,426	-0,0544	0,0030
10	0,384	1,689	31,287	0,0852	0,0073
	$\bar{a}$	$\bar{a}'$	$\bar{f}$	$\sum \Delta f$	$\sum \Delta^2 f$
	0,385	1,689	31,372	0,0000	0,0448

Tab. 1. Změřené hodnoty předmětových a obrazových vzdáleností a výsledná hodnota ohniskové vzdálenosti s relativní chybou pro spojnou čočku (objektiv).

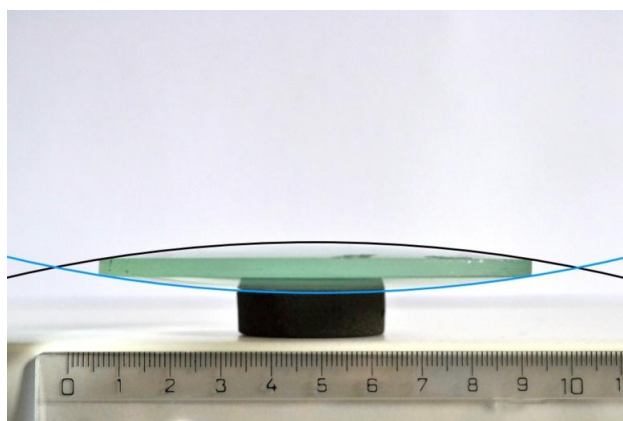
$n$	$a [cm]$	$a' [cm]$	$f [cm]$	$\Delta f [cm]$	$\Delta^2 f [cm^2]$
1	4,5	8,0	2,880	-0,1501	0,0225
2	4,2	7,9	2,742	-0,0123	0,0002
3	3,6	8,2	2,502	0,2282	0,0521
4	4,4	7,8	2,813	-0,0833	0,0069
5	4,2	8,1	2,766	-0,0360	0,0013
6	4,3	7,9	2,784	-0,0546	0,0030
7	4,5	8,1	2,893	-0,1630	0,0266
8	3,9	7,9	2,611	0,1188	0,0141
9	3,8	8,2	2,597	0,1332	0,0177
10	4,1	8,0	2,711	0,0191	0,0004
			$\bar{f}$	$\sum \Delta f$	$\sum \Delta^2 f$
			2,730	0,0000	0,1448

Tab. 2. Změřené hodnoty předmětových a obrazových vzdáleností a výsledná hodnota ohniskové vzdálenosti s relativní chybou pro spojnou čočku (okulár).

## 6.2.2 Měření poloměru křivosti pomocí fotoaparátu

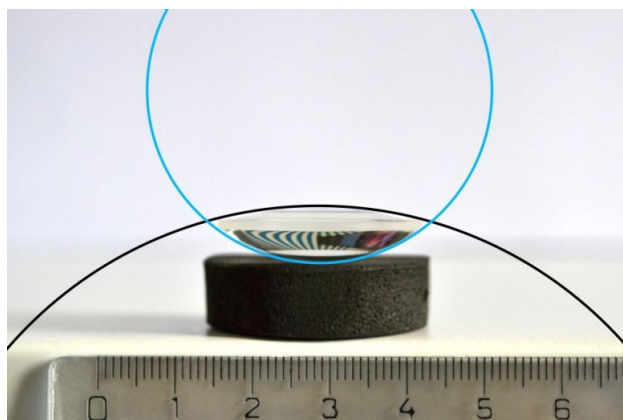
Měření křivosti kulových ploch se obvykle provádí sférometrem, ale v tomto případě byla zvolena jednodušší metoda měření z fotografie, kterou lze použít v případě, kdy nemáme sférometr k dispozici.

Jednotlivé čočky jsou na snímcích zachycené společně s měřidlem, aby bylo možné určit poloměr kulových ploch. V grafickém editoru byly vytvořené kružnice odpovídající jednotlivým kulovým plochám. Taková kružnice má hodnotu průměru zadanou v počtu pixelů. Na vyfocené pravítku bylo v použitém grafickém editoru možné změřit počet pixelů v jednom centimetru, což je důležité pro převod počtu pixelů poloměru kulové plochy na centimetry, čehož bylo dosaženo jednoduchým vydělením.



*Obr. 19. Fotografie spojky (objektiv) se znázorněnými kulovými plochami a měřidlem.*

*Foto autor.*

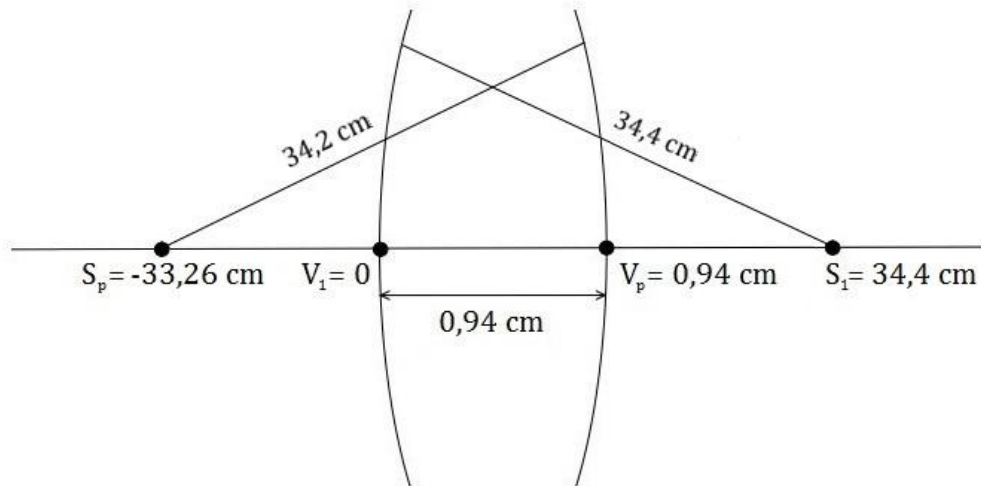


*Obr. 20. Fotografie spojky (okulár) se znázorněnými kulovými plochami a měřidlem.*

*Foto autor.*

Tímto způsobem jsou vypočítány poloměry křivosti objektivu a okuláru. V následující kapitole jsou tyto rozměry graficky znázorněny a použity jako hlavní členy v maticích optického systému.

### 6.3 Matice objektivu



Obr. 21. Znárodnění změřených rozměrů spojky (objektivu).

Výpočet:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{S_p - V_p} & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & V_p - V_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{S_1 - V_1} - 1 & \frac{1}{n} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{0,5}{34,2} & 1,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0,94 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{34,4} - 1 & \frac{1}{1,5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9909 & 0,6267 \\ -0,0290 & 0,9908 \end{pmatrix}$$

#### 6.3.1 Výpočet ohniskové vzdálenosti objektivu

Obrazové ohnisko:

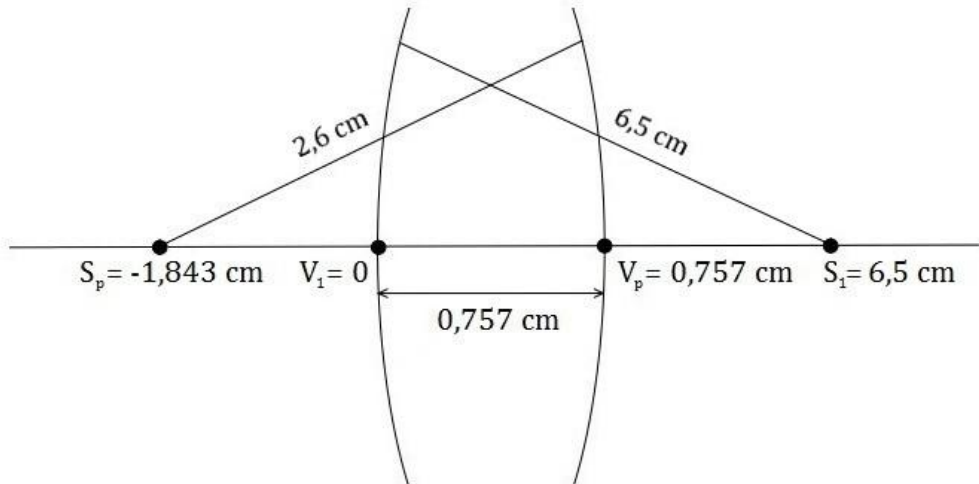
$$f = V_p - \frac{s_{11}}{s_{21}} = 0,94 - \frac{0,9909}{-0,0290} = 35,1 \text{ cm}$$

Ohnisková vzdálenost:

$$F = -\frac{1}{s_{21}} = \frac{1}{0,0290} = 34,5 \text{ cm}$$



## 6.4 Matice okuláru



Obr. 22. Znáznornění změřených rozměrů spojky (okuláru).

Výpočet:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{S_p - V_p} & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & V_p - V_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{S_1 - V_1} - 1 & \frac{1}{n} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{0,5}{2,6} & 1,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0,757 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{6,5} - 1 & \frac{1}{1,5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9612 & 0,5047 \\ -0,2618 & 0,9029 \end{pmatrix}$$

### 6.4.1 Výpočet ohniskové vzdálenosti okuláru

Obrazové ohnisko:

$$f = V_p - \frac{s_{11}}{s_{21}} = 0,757 - \frac{0,9612}{-0,2618} = 4,43 \text{ cm}$$

Ohnisková vzdálenost:

$$F = -\frac{1}{s_{21}} = \frac{1}{0,2618} = 3,82 \text{ cm}$$

## 6.5 Sestavení jednoduchého Keplerova dalekohledu

K sestavení jednoduchého Keplerova dalekohledu lze použít obyčejný kartonový tubus. Tubus byl v tomto případě zkrácen na délku 38 cm a na konce tubusu byly umístěny čočky, které se vhodným způsobem uchytily. Sestavení takového dalekohledu je velmi snadné.

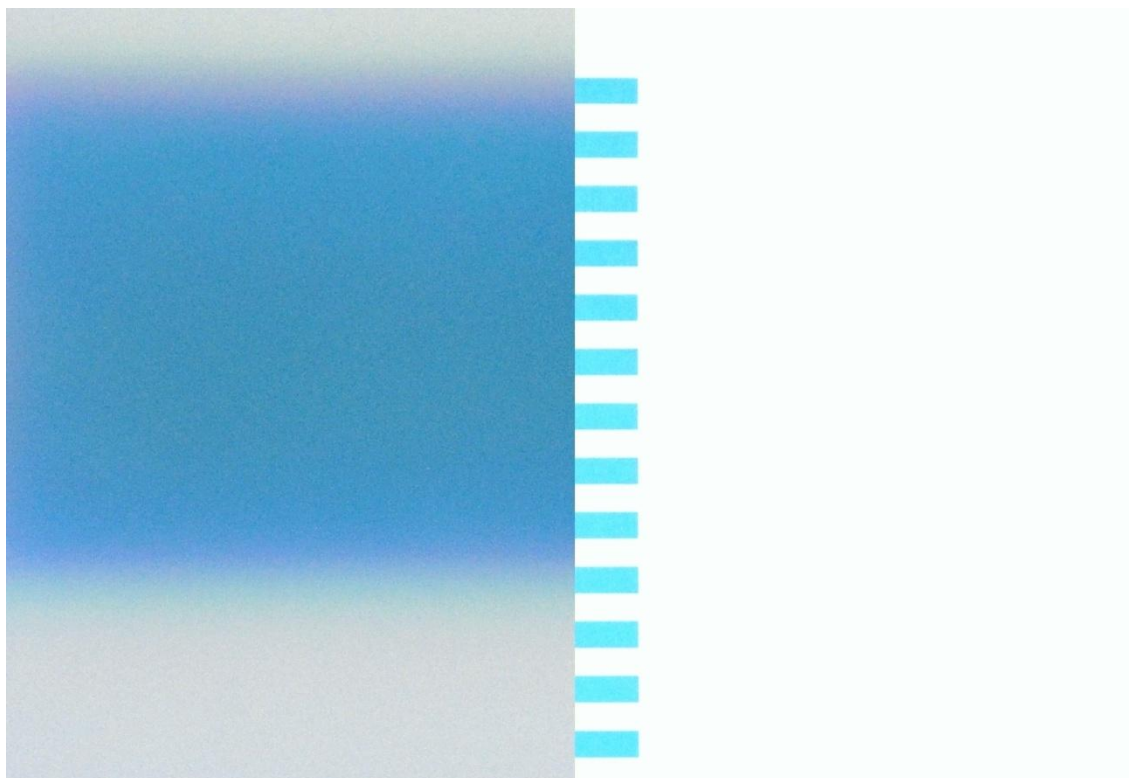


*Obr. 23. Fotografie hvězdné oblohy. Vlevo je fotografie bez použití dalekohledu. Vpravo je fotografie zvětšená pomocí Keplerova dalekohledu. Foto autor.*

## 6.6 Měření základních parametrů jednoduchého dalekohledu

### 6.6.1 Měření zvětšení pomocí fotoaparátu

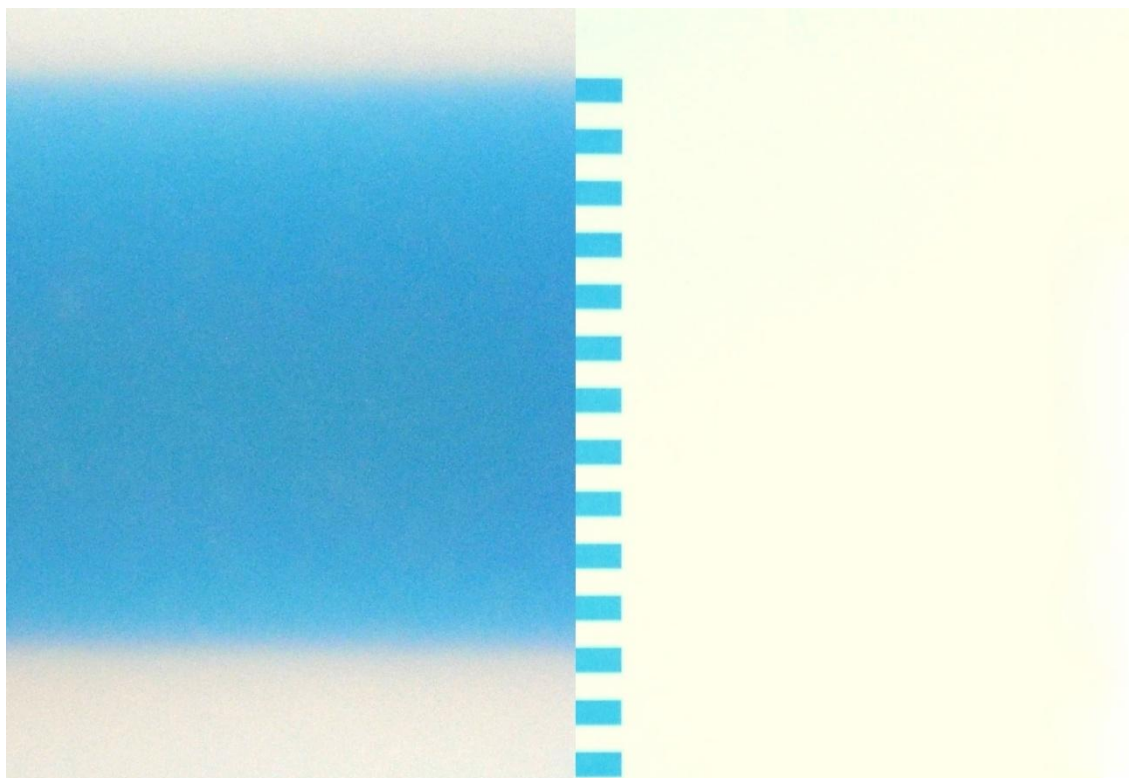
Zvětšení sestaveného dalekohledu bylo opět změřeno pomocí fotoaparátu a měřítka obsahující modré a bílé díly stejných velikostí, přičemž bylo postupováno podle zdroje [8], který uvádí, že při určení zvětšení optické soustavy nezáleží na velikosti dílů měřítka. Všechny díly ale musí mít stejnou výšku. V takovém případě je zvětšení rovno počtu nezvětšených dílů, které odpovídají právě jednomu zvětšenému dílu.



*Obr. 24. Levá část fotografie obsahuje jeden modrý díl měřítka zvětšený pomocí dalekohledu. Pravá část je nezvětšené měřítko vyfocené ze stejné vzdálenosti bez použití dalekohledu. Foto autor.*

Z obrázku lze vyčíst zvětšení dalekohledu, které odpovídá hodnotě 9. Je zřejmé, že zaostření dalekohledu není dokonalé, proto se těžko určují hrany modrého dílu při porovnání s nezvětšeným měřítkem. Měření tedy obsahuje systematickou chybu.

Pro srovnání bylo zvětšení změřeno i při záměně okuláru (spojné čočky) za okulár s ohniskovou vzdáleností 25 mm typu Plössl (dva achromatické dublety) z profesionálního dalekohledu.



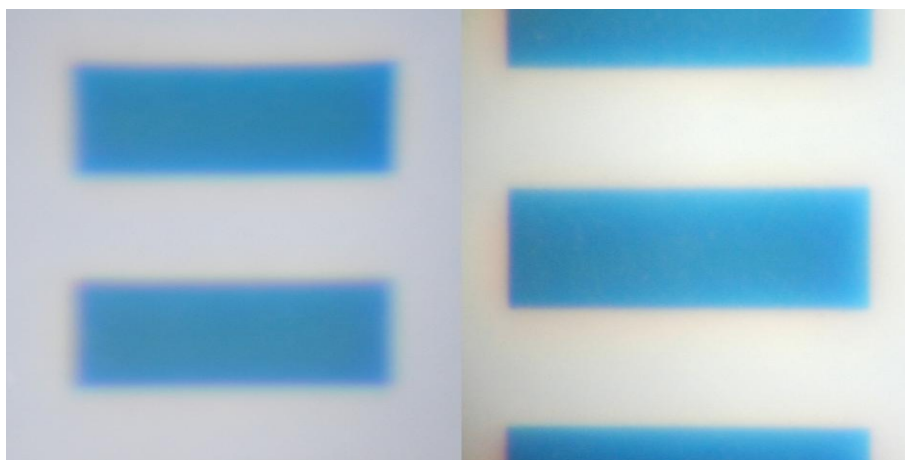
*Obr. 25. Levá část fotografie obsahuje jeden modrý díl měřítka zvětšený pomocí dalekohledu s okulárem z profesionálního dalekohledu. Pravá část znázorňuje nezvětšené měřítko vyfocené ze stejné vzdálenosti bez použití dalekohledu. Foto autor.*

Při použití okuláru z profesionálního dalekohledu, který je tvořen soustavou několika čoček, čímž dochází k potlačení vad, jsou na obrázku vidět znatelně ostřejší hrany modrého dílu, proto se i zvětšení určuje mnohem lépe. S touto optickou soustavou je hodnota zvětšení 11.

### **6.6.2 Porovnání fotografií změřeného zvětšení**

Při bližším porovnání snímků zvětšeného měřítka můžeme pozorovat výrazné rozdíly, což je zapříčiněno použitím odlišných okulárů. Pro zvětšení prvního snímku byly použity pouze dvě spojné čočky. Na fotografii je viditelný projev kulové vady čočky, tedy především u horního modrého dílku, který se také vyskytoval výše od středu čočky. Je zde znatelná deformace pravidelného tvaru obdélníku. Fotografie je také méně zaostřená oproti druhému snímku pořízeného

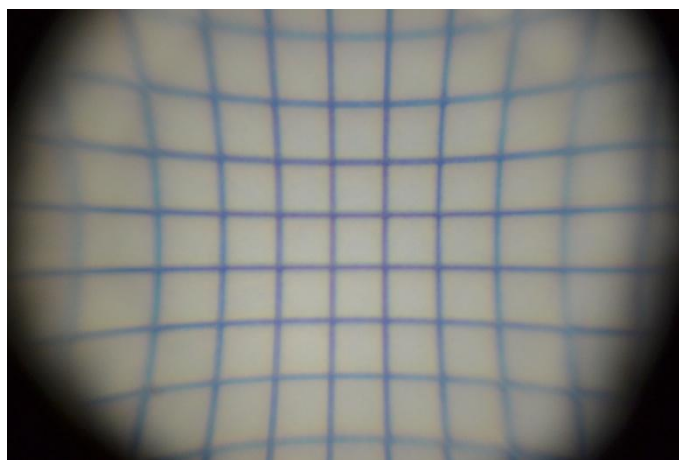
s použitím dalekohledu s okulárem z profesionálního dalekohledu. Zde je i při větším zvětšení snímek ostřejší a stěny obdélníku jsou pravidelné.



*Obr. 26. Srovnání fotografií zvětšeného měřítka. Na levém snímku je fotografie zvětšená pomocí jednoduchého refraktoru obsahujícího dvě spojně čočky, zatímco na pravém snímku je fotografie zvětšená pomocí dalekohledu s okulárem z profesionálního dalekohledu. Foto autor.*

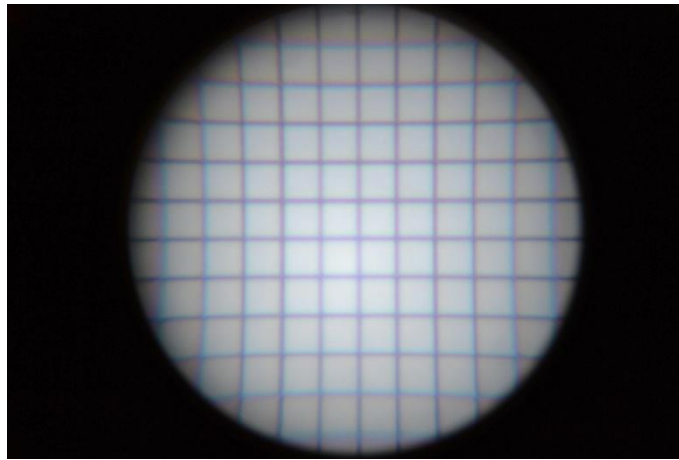
### **6.6.3 Fotografie čtvercové sítě**

V předcházejícím měření lze pozorovat kulovou vadu čočky. Abychom tuto vadu mohli pozorovat ještě lépe, byla vyfocena čtvercová síť, z které je možné snadněji určit typ zkreslení. V tomto případě jde o poduškové zkreslení obrazu.



*Obr. 27. Poduškové zkreslení obrazu. Foto autor.*

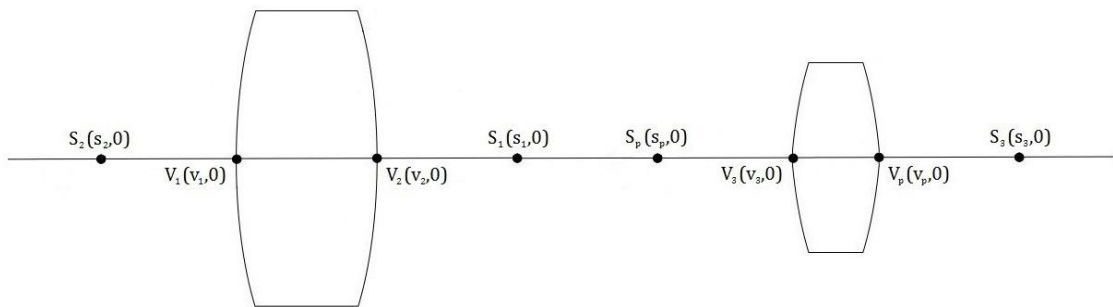
Pro srovnání byl pořízen i snímek čtvercové sítě zvětšené pomocí dalekohledu s okulárem z profesionálního dalekohledu.



*Obr. 28. Fotografie čtvercové sítě zvětšené pomocí optické soustavy s okulárem z profesionálního dalekohledu. Foto autor.*

Na fotografii je sice také pozorovatelné poduškové zkreslení, ale v tomto případě není tolik výrazné, což neplatí u předcházejícího snímku. Na tomto zkreslení se samozřejmě podílí i spojná čočka objektivu.

## 6.7 Matice optické soustavy Keplerova dalekohledu



*Obr. 29. Grafické znázornění optické soustavy Keplerova dalekohledu. Vlevo je objektiv a vpravo okulár.*

Matice soustavy:

$$Y = T_4 R_4 T_{34} R_3 T_{23} R_2 T_{12} R_1 T_{01} Y_0$$

$$Y = T_4 \begin{pmatrix} 0,9612 & 0,5047 \\ -0,2618 & 0,9029 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,9909 & 0,6267 \\ -0,0290 & 0,9908 \end{pmatrix} T_{01} Y_0$$

OKULÁR      VZDUCH      OBJEKTIV

$$S = \begin{pmatrix} 0,9612 & 0,5047 \\ -0,2618 & 0,9029 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 39,2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,9909 & 0,6267 \\ -0,0290 & 0,9908 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -9,3808 & 36,1376 \\ 0,0103 & -0,1465 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix}$$

### 6.7.1 Výpočet zvětšení optické soustavy

Příčné zvětšení optické soustavy:

$$\beta = \frac{y}{y_0} = s_{11} + ds_{21} =$$

$$= -9,3808 + 39,2 \cdot 0,0103 = -8,9751$$

Hodnota zvětšení je záporné číslo, protože Keplerův dalekohled vytváří převrácený obraz.

Výsledek porovnáme s hodnotou zvětšení vypočítanou pomocí jednoduchého vztahu

$$z = \frac{f}{f_0} = \frac{34,5}{3,82} = 9,03.$$

## 7 Závěr

V úvodu praktické části této práce byla změřena ohnisková vzdálenost čoček přímou metodou na optické lavici. Přímá metoda je ale méně přesná, proto jsou výsledky tohoto měření spíše orientační, ale dostačující pro určení délky tubusu při sestavení dalekohledu. Přesnější metoda pro měření ohniskové vzdálenosti čoček je Besselova metoda, kterou lze dosáhnout přesnějších výsledků.

V následujícím měření byly určeny poloměry křivosti kulových ploch bez použití sférometru. K měření byl použit fotoaparát, jímž byly vyfoceny čočky společně s pravítkem, a poté byly v grafickém editoru vytvořeny kružnice o známém poloměru odpovídající kulovým plochám čoček. Výsledky jsou použity v maticích, v nichž bylo možné nahradit neznámé členy vypočtenými hodnotami. Výsledné ohniskové vzdálenosti odpovídají hodnotám změřenými přímou metodou. Odchylky jsou způsobené právě použitím méně přesné přímé metody měření ohniskové vzdálenosti, či nepřesností měření poloměrů křivosti a nesprávné určení polohy středů kulových ploch.

Dále byl sestaven dalekohled a bylo změřeno jeho zvětšení, k čemuž byl opět použit fotoaparát. Sestavený dalekohled zvětšuje  $9\times$ . Při určení zvětšení bylo pozorováno výrazné zkreslení obrazu, které bylo porovnáno s obrazem optické soustavy při záměně okuláru. Zkreslení této nové soustavy bylo minimální, čehož bylo dosaženo použitím okuláru z profesionálního dalekohledu. Je tedy zřejmé, že na zkreslení se nejvíce podílí právě čočka okuláru. Okulár profesionálního dalekohledu obsahuje více čoček, čímž je zamezeno vadám zobrazení. Keplerův dalekohled má také výraznou barevnou vadu, kterou lze pozorovat na všech přiložených fotografiích v průběhu celé práce.

Nakonec byla sestavena matice optické soustavy Keplerova dalekohledu, z níž bylo vypočítáno zvětšení této soustavy. Toto zvětšení odpovídá hodnotě naměřené z fotografie. Hodnota ale vyšla záporná, což je způsobeno tím, že Keplerův dalekohled vytváří převrácený obraz, což při měření z fotografie neuvažujeme.

Výsledky maticové simulace tedy odpovídají hodnotám, které jsme změřili přímo.



## Seznam použité literatury

- [1] SUCHORUKICH, V. S. *Mikroskop a dalekohled*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1952. Universita vojáka.
- [2] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 978-80-246-2246-0.
- [3] BAJER, Jiří. *Optika 1*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015. Učebnice. ISBN 978-80-244-4532-8.
- [4] ŠIROKÝ, Jaromír. *Astronomie a astrofyzika*. 3. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 1983.
- [5] KUBĚNA, Josef. *Základy optického zobrazování v době počítačů*. 1. vyd. Hradec Králové: MAFY, 1997. ISBN 80-86148-03-3.
- [6] KRPATA, František. *Aplikovaná optika 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01595-5.
- [7] JEXOVÁ, Soňa. *Geometrická optika*. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2010. ISBN 978-80-7013-521-1.
- [8] BARNES, Joshua E. *A Simple Telescope: Measuring Magnification* [online]. Last modified: September 22, 2005 [cit. 2016-07-12]. Dostupné z: [http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ASTR110L\\_F05/simplescopehelp.html](http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ASTR110L_F05/simplescopehelp.html).