



Výfučtení: Mega giga tera, teleskopů éra

Úvod

Ve Výfučtení třetí série desátého ročníku, Mili mikro nano? Mikroskopům ano!¹ jsme se dozvěděli, jak fungují přístroje zvětšující velmi malé objekty – mikroskopy. V tomto Výfučtení se budeme zabývat něčím velice podobným, a to dalekohledy neboli teleskopy. Na rozdíl od mikroskopů jsou dalekohledy stavěny pro zvětšování pouze velmi vzdálených objektů, jako mikroskopy je tedy použít nelze. Setkat jste se s nimi mohli při pozorování noční oblohy či Slunce, v přírodě při pozorování ptactva nebo třeba u divadelního kukátka. Dnes si vysvětlíme, jak tato zařízení fungují, a ukážeme si některé typy dalekohledů i montáží, které jsou pro dynamiku pozorování nezbytné.

Historie

První dalekohled byl vynalezen na počátku 17. století v Nizozemsku optikem Hansem Lippersheyem. Známý Ital Galileo Galilei si již o rok později vyrobil vlastní exemplář, kterým začal objevovat svět dosud skrytý lidským očím. Mezi některé jeho převratné objevy patřily krátery na Měsíci, sluneční skvrny, fáze Venuše či čtyři největší měsíce planety Jupiter, dodnes známé jako Galileovy měsíce. Byť si zpočátku myslel, že jde o hvězdy, zjistil, že se jedná o tělesa obíhající kolem Jupitera, a vyvrátil tak myšlenku, že všechna tělesa obíhají kolem Země.

Od té doby se dalekohledy neustále zdokonalovaly a dodnes jsou nezbytným pomocníkem pro astronomy profesionální i amatérské. Nejenže nám dalekohledy přibližují vzdálené objekty, ale především zachycují více světla než naše oko a odkrývají nám tak krásy vesmíru do podrobností pro nás jinak neviditelných.

Optika

Asi jste se již do nějakého dalekohledu někdy koukali. Zjednodušeně řečeno se jedná o přístroj nebo optickou soupravu, která zvětšuje *úhlovou velikost* pozorovaného předmětu. Úhlovou velikostí rozumíme úhel, který pozorujeme mezi okraji objektu. U vzdálených objektů je velmi malý, proto je už nemůžeme pohodlně pozorovat pouhýma očima. Každý dalekohled má tedy určité *úhlové zvětšení*, což je poměr úhlových velikostí obrazů při pozorování dalekohledem a pouhýma očima, dále pak *zorný úhel*, což je úhlová velikost pozorovaného *pole* (tedy části oblohy, kterou vidíme v dalekohledu), a ještě další vlastnosti, které můžeme ovlivnit parametry jeho součástí.

Zobrazovací rovnice

Každý dalekohled je soustavou několika optických členů, tedy čoček, zrcadel, optických hranolů, různých korekčních desek apod. Každý typ dalekohledu používá jinou kombinaci těchto členů. Rozlišujeme dva druhy čoček: *spojky*, které lámou svazek rovnoběžných paprsků k sobě, a *rozptylky*, ty jej lámou od sebe. Podobně dělíme zrcadla na *dutá*, která odráží svazek rovnoběžných

¹https://vyfuk.org/_media/ulohy/r10/s3/vyfucteni3.pdf

paprsků k sobě, *vypuklá*, která jej odráží od sebe, a *rovinná*, taková najdete například ve vaší koupelně.

Bod, ve kterém se scházejí odražené nebo zlomené paprsky, se nazývá *ohnisko*. V případě rozptylky a vypuklého zrcadla, kde se paprsky nesbíhají, se za ohnisko považuje bod, ve kterém se protínají přímký, po kterých se šíří odražené paprsky (je to tedy bod, ze kterého paprsky zdánlivě vycházejí). Leží tedy na druhé straně optického členu, než kde bychom jeho polohu předpokládali, a proto je takové ohnisko *zdánlivé*.

Ve skutečném ohnisku se tedy soustředí všechna světelná energie (pocházející ze vzdáleného zdroje, jako je například naše Slunce), která dopadá na optický člen. Proto můžeme lupou nebo brýlemi na čtení na přímém slunci zapalovat objekty, jedná se totiž o spojky. Naopak brýlemi na dálku rozhodně nic nezapálíme, jedná se totiž o rozptylky se zdánlivým ohniskem a k soustředění světelné energie nedochází.

Od polohy ohniska se pak odvíjí charakteristika každého členu. Vzdálenost mezi ohniskem a optickým členem se nazývá *ohnisková vzdálenost*, značíme ji f . Pokud je ohnisko zdánlivé, pak f nabývá záporných hodnot. Chceme-li zjistit, kde se vytváří obraz zobrazovaného předmětu, použijeme zobrazovací rovnici:

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

přičemž a a a' jsou vzdálenosti předmětu a obrazu od optického členu. Pokud je hodnota a' záporná, pak je obraz neskutečný a vzniká před čočkou, případně za zrcadlem. Z toho vyplývá, že pokud pozorujeme velmi vzdálený předmět skrz samostatný optický člen, říkáme mu *objektiv*, pak a nabývá velkých hodnot a $1/a$ se blíží nule. Bude tedy platit $a' = f$. Jelikož se paprsky ze vzdáleného zdroje dají považovat za rovnoběžné, dostáváme výsledek, o kterém jsme mluvili na začátku. Tedy že se původně rovnoběžné paprsky sbíhají v ohnisku.

Abychom však mohli obraz pozorovat, musíme takto zakřivené paprsky protínající se v ohnisku opět „narovnat“ do rovnoběžného svazku, čehož docílíme dalším optickým členem, jenž nazýváme *okulár*. Za nutnost rovnoběžnosti paprsků může naše oko, konkrétně jeho čočka, která už si rovnoběžné paprsky opět zobrazí na sítnici tak, že na obraz ani nemusí zaostřovat. Aby okulár paprsky správně „narovnal“, musí být ve vhodné vzdálenosti od objektivu, čehož docílíme *ostřením*.

Pokud pozorujeme vesmírné nebo velmi vzdálené objekty, tak nám postačí zaostřit pouze jednou, jelikož paprsky ze všech těchto objektů jsou prakticky rovnoběžné a sbíhají se tedy na stejném místě.

Zajímavé je, že pokud snímáme obraz z dalekohledu digitálně na čip kamery nebo analogově na film, není okulár zapotřebí. Objektiv dalekohledu totiž poslouží zároveň jako objektiv těla fotoaparátu či kamery.

Zvětšení

Asi nejdůležitější vlastností, která nás zajímá u všech typů dalekohledů, je tzv. úhlové zvětšení. V optice se setkáte ještě s klasickým zvětšením, jež vypočítáme jako:

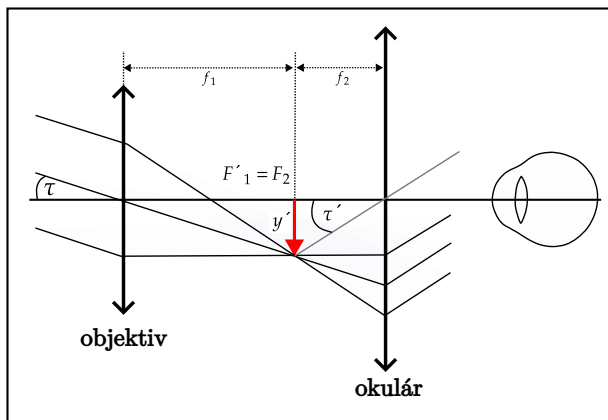
$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a},$$

kde y a y' jsou výšky předmětu a obrazu. Záporná hodnota zvětšení znamená, že obraz bude převrácený. U dalekohledů se však tímto zvětšením příliš nezabýváme, jelikož by dosahovalo

extrémně malých hodnot. Prakticky jej využijeme pouze u výpočtů týkajících se snímání, nikoliv u vizuálního pozorování. Proto, pokud se v astronomii mluví o „zvětšení“ dalekohledu, pak se myslí spíše *úhlové zvětšení*, pro něž si můžeme odvodit vztah z obrázku 1:

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau} \doteq \frac{\operatorname{tg} \tau'}{\operatorname{tg} \tau} = \frac{y'}{f_2} \cdot \frac{f_1}{y'} = \frac{f_1}{f_2},$$

kde τ je úhlová velikost objektu, s funkcí $\operatorname{tg} x$ si zatím nemusíte lámat hlavu. Pokud tedy použijeme např. objektiv o ohniskové vzdálenosti 1 m a okulár o $f = 25$ mm, potom se nám pozorované objekty budou jevit 40krát větší.



Obr. 1: Schéma průchodu rovnoběžného svazku paprsků skrz dvě spojky neboli Keplerův dalekohled. Objektiv a okulár vždy sdílejí jedno společné ohnisko.

Zorné pole

Dalším parametrem dalekohledů je zorné pole neboli *skutečné zorné pole* (FOV), tedy úhlová velikost výřezu oblohy, který v dalekohledu uvidíme. FOV samozřejmě chceme co největší, zároveň však klesá s rostoucím zvětšením. Nejrychlejší způsob jak jej změřit je vzít stopky, namířit dalekohled na nebeský rovník (asi 40° nad jižním obzorem) a změřit čas, za který přejde objekt z jednoho okraje pole na druhý. Potom platí:

$$\text{FOV} = \Delta t \cdot \omega = \Delta t \cdot \frac{360^\circ}{23 \text{ h } 56 \text{ min}},$$

kde Δt je naměřený čas, výsledek je v úhlových stupních. Značení 23 h 56 min vyjadřuje dobu, za kterou se Země otočí okolo své osy vůči hvězdám. Tato doba je tedy odlišná od tzv. slunečního dne, který všichni dobře známe. Je to proto, že kromě otáčení kolem osy Země obíhá kolem Slunce.

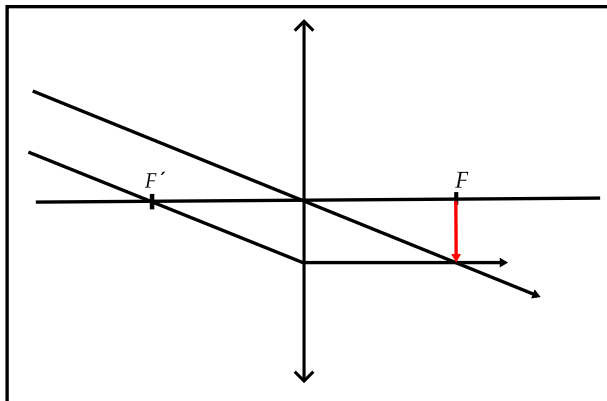
Nicméně, pokud se nám nechce nic měřit, stačí se podívat na tzv. *zorný úhel okuláru* (fov), protože platí:

$$\text{FOV} = \frac{\text{fov}}{\gamma} = \text{fov} \frac{f_2}{f_1}.$$

Toto je jeden z mnoha důvodů, proč velké zvětšení není vždy výhodou. Zorné pole kamery či fotoaparátu je pak určeno rozměry čipu a ohniskovou vzdáleností objektivu v následujícím vztahu, kde předpokládáme, že se předmět nachází velmi daleko a zobrazí se tedy do ohniska jako na obrázku 2:

$$\text{FOV} = 2 \arctg \frac{x}{2f} \doteq \frac{x}{f} \cdot \frac{180^\circ}{\pi},$$

kde x je šířka, případně výška čipu.



Obr. 2: Dva paprsky vycházející z jednoho velmi vzdáleného zdroje se nám jeví jako rovnoběžné, proto se obraz vytvoří v ohnisku, kam musíme umístit čip.

Ostatní kvality a vady dalekohledů

Parametrů, podle kterých můžeme určit kvalitu obrazu, existuje ještě mnoho. Jedním z nich je tzv. *rozlišovací schopnost*. Tu popisujeme nejmenší možnou úhlovou vzdáleností Θ mezi dvěma body tak, aby bylo oba body ještě možné rozlišit. Při menších úhlových vzdálenostech se již světlo kvůli zákonům vlnové optiky slévá dohromady a body pak pozorujeme jako jediný zdroj světla. Proto ani naše oči nevidí dokonale ostře. Rozlišovací schopnost závisí na pozorované vlnové délce λ (středem viditelného světla je zhruba 550 nm), jelikož se každá vlnová délka „ohýbá“ jinak, a průměru objektivu D , ať už se jedná o zrcadlo či čočku, jelikož ovlivňuje množství světla které dalekohled „zachytí“. Platí:

$$\Theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}.$$

Schválně si můžeme dosadit průměr zornice našeho oka, tedy ve tmě asi $D_{\text{pup}} = 6$ mm. Mělo by nám vyjít $\Theta_{\text{pup}} \doteq 23''$ na světle se však zornice zmenšuje a rozlišovací schopnost je tedy horší. Rozlišovací schopnost u digitálních čipů je ještě navíc určena velikostí jednotlivých pixelů. Pokud na jeden pixel dopadá větší část obrazu než úhel Θ , pak je na snímcích rozhodující rozlišovací schopnost čipu. Pokud naopak na jeden úhel Θ připadá více takových pixelů, pak rozhoduje rozlišovací schopnost dalekohledu. Někdy se tedy již nevyplatí kupovat kameru s menšími pixely, protože obraz stejně nebude ostřejší kvůli vlastnostem dalekohledu.

Posledním hlavním parametrem je *světelnost dalekohledu*, což je, jak název vypovídá, analogie k intenzitě záření obrazu. Platí pro ni jednoduchý vztah:

$$S = \frac{D}{f},$$

kde D a f jsou průměr a ohnisková vzdálenost objektivu. Má-li tedy nějaký dalekohled extrémní zvětšení, je zapotřebí dosáhnout větších rozměrů i v jeho průměru. Víceméně je průměr dalekohledu nejdůležitějším fyzickým parametrem ze všech, jelikož zvětšení lze upravovat pomocí okulárů.

Jak to však v praxi bývá, nic není dokonalé. U dalekohledů se vyskytuje celá škála charakteristických vad (chcete-li *aberací*), způsobených použitými optickými členy, které musíme případně korigovat dalšími korekčními optickými přístroji. Asi nejnámější optickou vadou je tzv. *chromatická aberace*, tedy barevná vada, při které dochází k rozdílnému úhlu lomu paprsků s různou vlnovou délkou a především na okrajích pole můžeme vidět rozklad světla na barvy duhy. Vzniká při lomu světla skrz čočky, nejsilnější je tedy u refraktorů, naopak u reflektorů je minimální. Další výraznou vadou je tzv. *sférická aberace* neboli kulová vada, kdy se paprsky neprotínají v jednom bodě, ale tvoří kruhovou plošku, a proto nemůžeme obraz zcela zaostřit. Tento problém nastává u všech typů dalekohledů. Dále si ještě uvedeme hlavní problém reflektorů, tím je tzv. *koma*, kdy se body ležící na okrajích pole promítají jako komplikované obrazce připomínající komety, což je způsobeno nepřesnou konstrukcí zrcadla či čočky. S rostoucí vzdáleností od středu pole roste i závažnost komy, proto se projevuje především na velkém zorném poli. Existují samozřejmě i další vady jako například astigmatismus, zklenutí a zkreslení pole, vinětače atd.

Typy dalekohledů

Podle optických členů rozlišujeme několik typů teleskopů – primárně je dělíme na dalekohledy čočkové (refrakторы) a zrcadlové (reflektory).

Čočkové dalekohledy (refrakторы)

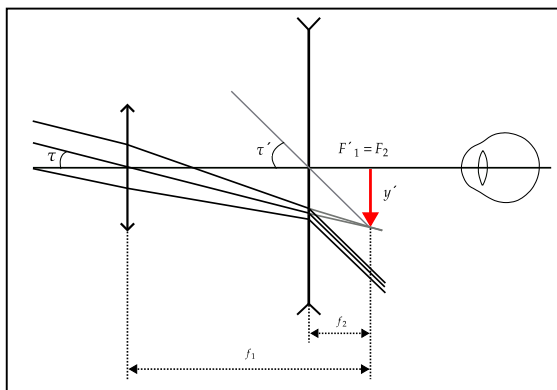
Objektivem čočkových dalekohledů je čočka, případně soustava čoček. Vůbec prvním sestaveným refraktorem byl dalekohled *Galileův*, který je tvořen objektivem ze spojky a okulárem z rozptylky. Tento dalekohled se dnes využívá například jako divadelní kukátko, ovšem dříve přispěl i k velmi významným průlomům v astronomii.

Dalekohled zkonstruovaný ze dvou spojných čoček, které mají společnou optickou osu, se dnes nazývá *Keplerův* dalekohled. To, že je jeho obraz převrácený, je pro astronomická pozorování nepodstatné. Jeho modifikovaná podoba je využívána jako třiedr – v tom však najdete zrcátka nebo hranoly, které obraz převrací nazpět.

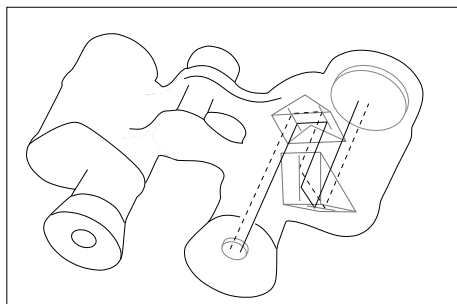
Při rostoucí potřebě o zachycení co nejvíce světla, tedy zvětšení průměru vstupní čočky (objektivu), se začaly objevovat nevýhody refraktorů. Jedná se především o různé vady čoček. Navíc je výroba velkých čoček velmi náročná.

Zrcadlové dalekohledy (reflektory)

Ukázalo se, že pro větší průměry objektivu jsou vhodnější dalekohledy zrcadlové. Prvním takovým zkonstruovaným reflektorem byl *Newtonův* dalekohled, jehož objektivem je *primární* duté



Obr. 3: Schéma Galileova dalekohledu



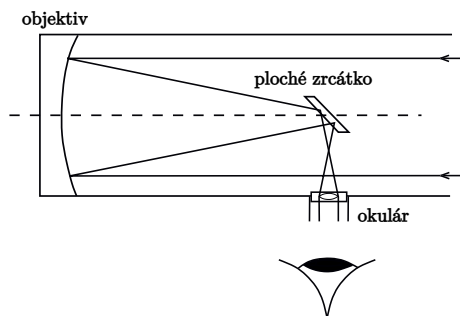
Obr. 4: Průřez triedrem

zrcadlo parabolického tvaru. Z toho se pak světlo odráží na malé *sekundární* rovinné zrcadlo, uchycené přibližně v ohnisku primáru tzv. pavoukem (který vytváří známé čtyři paprsky u jasnějších hvězd). Sekundár odráží světlo přímo do okuláru. Výsledkem je převrácený obraz s velkou světelností a téměř žádnou chromatickou aberací. Současně s Newtonovým vznikl i podobný typ dalekohledu – *Cassegrainův*. Zatímco Newton má okulárový výtah po straně tubusu, do Cassegrainu se díváme klasicky zezadu.

Nicméně ani tyto systémy nebyly dokonalé a stále byly velmi náchylné aberacím. Kvůli tomu vznikly tzv. kombinované a modifikované systémy, které tyto chyby řeší velmi elegantně kombinováním obou typů dalekohledů, přičemž využívají různých korekčních členů apod.

Montáže

Stejná pozornost jako výrobě optických soustav se věnuje montážím dalekohledů – jejich upevnění k zemi. Dalekohledy by nám totiž nebyly k ničemu platné, pokud by nebyly ve stabilní poloze. Každé zachvění dalekohledu by vedlo k naprostému znehodnocení pozorování. Jenže naše planeta Země se otáčí kolem své osy a obloha se nám tak zdánlivě pohybuje, proto ukot-



Obr. 5: Schéma Newtonova dalekohledu

vení dalekohledu nemůže být ani příliš pevné. Musíme být schopni udržet krok s „utíkájící“ oblohou, jinak by nám zmizely i objekty, které pozorujeme. Proto používáme dva základní typy montáží – azimutální a ekvatoriální (paralaktickou).

Azimutální montáž je založena na dvou vzájemně kolmých osách, kolem kterých lze dalekohled otáčet. V jedné ose je nastaven azimut (horizontální úhel mezi směrem k severnímu pólu a směrem k objektu promítnutému na obzor – ten samý úhel ukazuje klasický kompas) a v druhé výška nad obzorem. Tato montáž je velmi jednoduchá na výrobu i na používání, má však řadu nevýhod. Tou nejvýznamnější je, že pokud chceme, aby pozorovaný objekt zůstal v zorném poli, musí být azimutální montáž vybavena elektronikou, která podle nastavených parametrů dokáže hýbat dalekohledem v obou osách.

Složitější na nastavení, ale výhodnější při potřebě sledování oblohy např. pro focení objektů, je montáž ekvatoriální. Jedna z os je nasměrována rovnoběžně se zemskou osou a okolo ní se otáčí přístroj dalekohledu v hodinovém úhlu (podél světového rovníku). Pohyb hvězd stačí sledovat v jedné ose a navíc rovnoměrně, přičemž otáčení je nejčastěji zajištěno tzv. hodinovým strojem.

Závěr

Přiblížili jsme si fascinující a rozmanitý svět dalekohledů – přístrojů, které jsou všude kolem nás. Společně jsme nahlédli za oponu principů optiky a ukázali si, jak a proč takový dalekohled funguje. Nutno zmínit, že v dnešní době se pro astronomická pozorování používají i jiné než optické dalekohledy, například radioteleskopy. To je však už nad rámec tohoto Výfučtení.

Tomáš Patsch
patscht@vyfuk.mff.cuni.cz

Vladimíra Jiříčková
vladi@vyfuk.mff.cuni.cz

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.