Pozorování, popis a charakterizace exoplanet pomocí 2m Perkova dalekohledu na hvězdárně v Ondřejově
(učební text)

Martin Blažek[1,2], Daniel Dupkala[1,3], Magdalena Špoková[2], Ján Šubjak[1,3] a Petr Kabáth[1]

[1]Astronomický ústav Akademie věd ČR, Fričova 298, 251 65 Ondřejov, Česká republika
[2]Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Masarykova univerzita, Kotlářská 267/2, 611 37 Brno, Česká republika
[3]Astronomický ústav Univerzity Karlovy, Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 747/2, 180 00 Praha 8, Česká repubika

Abstrakt

V tomto textu budou žáci seznámeni s fyzikální podstatou světla — vlna/částice. Také se dozví, jaký je princip fungování dalekohledu, jak dalekohledem světlo prochází. Definujeme, čemu říkáme hvězda, jak v ní vzniká světlo a také jaký je rozdíl mezi hvězdou, (exo)planetou a měsícem. Žáci budou poučeni o zákrytech hvězd planetami a o tom, jak se tato událost projeví, budeme-li ji sledovat dalekohledem a zaznamenávat čipem kamery. K tomu si vysvětlíme, jak takový (CCD) čip funguje. Následně se žáci dozví, co můžeme z tohoto záznamu vyčíst o samotné exoplanetě. Text obsahuje vše potřebné k přípravě na praktickou část.

Klíčová slova: hvězda, (exo)planeta, dalekohled, fotometrie, světlo.

1. Úvod

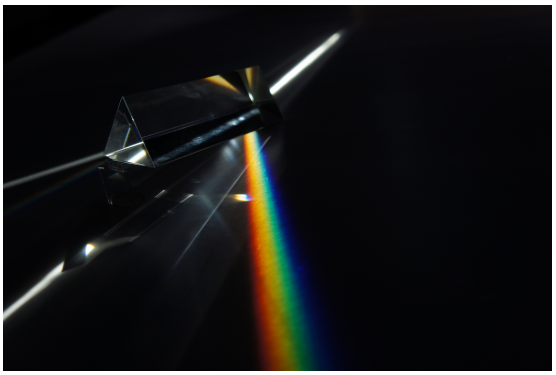
Exoplanety jsou moderním výzkumným směrem astrofyziky, který byl nyní oceněn polovinou Nobelovy ceny pro M. Mayora a D. Queloze za první objevenou exoplanetu okolo hvězdy podobné Slunci (51 Peg b). Proč jsou exoplanety tak zajímavé? Protože chceme znát odpovědi na následující otázky:
1. Kolik je exoplanet? — statistické rozložení exoplanet ve vesmíru.
2. Jak se vyvíjí exoplanety a jak lze jejich vývoj srovnat s vývojem sluneční soustavy?
3. Jak vypadají a jaké mají atmosféry (pokud vůbec nějaké mají)?
4. Existuje život ve vesmíru?

2. Co je to světlo?

V naší T-exkurzi se budeme zabývat světlem, které k nám přichází od vzdálených hvězd, a tím, co všechno nám toto světlo přináší za zajímavé informace. Než si o tom všem řekneme, je třeba si objasnit některé pojmy, například co vlastně myslíme, když říkáme „světlo“.

Určitý druh světla dobře známe z našeho každodenního života. Přes den je díky slunci světlo, v noci svítí hvězdy, lampy, svítí obrazovky, a tak bychom mohli pokračovat dále. Obecně, když říkáme, že něco svítí, myslíme tím, že to vyzařuje viditelné elektromagnetické záření.* Co to znamená? Svítící objekt k nám vysílá vlny, které naše oko dokáže zpracovat na obraz. Konkrétně jsou to vlny o délce 380–740 nanometrů, kde různé vlnové délky odpovídají různým barvám. Můžeme se i přesvědčit o tom, že je viditelné světlo z těchto barev složeno. Dá se totiž rozložit pomocí optického hranolu na jednotlivé vlnové délky — na duhu (Obrázek 1). To se děje i v přírodě, kde se viditelné světlo rozkládá na duhu pomocí dešťových kapek.

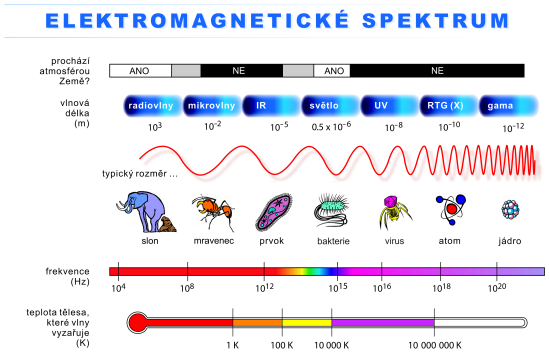
Ze zkušeností ale také víme, že k nám přichází i jiný, neviditelný druh záření (Obrázek 2). V létě, když jedete k moři, se zdůrazňuje potřeba mazat se různými opalovacími krémy, které nás mají chránit před škodlivým ultrafialovým zářením. Víme, že existují sledovací zařízení, která využívají toho,



Obrázek 1: Rozklad bílého světla pomocí optického hranolu. Viditelné světlo, které k nám přichází například od slunce, můžeme označit jako bílé (obsahuje všechny vlnové délky). Rozložit jej hranolem můžeme díky tomu, že každá z barev (vlnových délek) se na hranolu láme jinak.

že člověk vydává infračervené** záření (teplo), takzvané infrahledy. A to není vše. Mezi elektromagnetické záření patří ještě rentgenové paprsky, gama záření, mikrovlnné záření a rádiové vlny (je obvyklejší používat pojem rádiové vlny než rádiové záření, oba výrazy jsou ovšem správně).

Nejspíše jste slyšeli, že není moc zdravé vystavovat se kromě ultrafialového záření rentgenovým nebo gama paprskům. Na druhé straně rádiové vlny, infračervené záření, nebo právě viditelné záření není označováno jako nebezpečné. Čím to je? Je to tím, že čím má záření kratší vlnovou délku, tím více energie má. Lépe si to možná představíte, když začneme používat pojem foton. Na světlo se dá totiž pohlížet jednak jako na vlnění, jednak jako na proud částic***. Takže si můžeme představit, že k nám proudí mnoho fotonů z různých světelných zdrojů. Tyto fotony jsou velmi malé částice, které mohou interagovat s atomy. Pokud například foton s velkou energií narazí do atomu, může z něj vyrazit elektron. Takto vyražený elektron může dále interagovat s dalšími atomy. Tímto způsobem může dojít například k poškození tkání. Foton s malou energií nemá na takovouto interakci s atomem dostatek energie.



Obrázek 2: Na obrázku můžeme vidět celé elektromagnetické spektrum. Od nejdelších rádiových vln, s délkou jedné vlny v řádech 100 a více metrů, až po krátké vlny odpovídající záření gama. Viditelné záření odpovídá oblasti v 740–380 nanometrů, kdy na délce zhruba 740 nm začíná červená barva a na délce zhruba 380 nm přechází fialová v ultrafialovou (zdroj: www.aldebaran.cz).

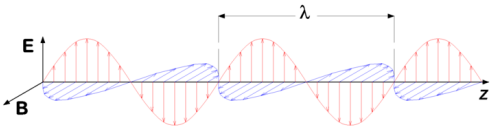
V běžné řeči tedy pod pojmem světlo myslíme viditelné světlo. V astronomii, když říkáme, že hvězda svítí, myslíme tím, že k nám vysílá různé druhy elektromagnetického záření (různě energetické fotony). Hvězdy totiž vyzařují na všech vlnových délkách, jenom různého záření vysílají různé množství, podle toho, jak jsou horké****. Naše nejbližší hvězda, Slunce, září nejintenzivněji právě v oblasti viditelného světla.

---

* Elektromagnetické záření je příčné postupné vlnění elektrického a magnetického pole (Obrázek 3).

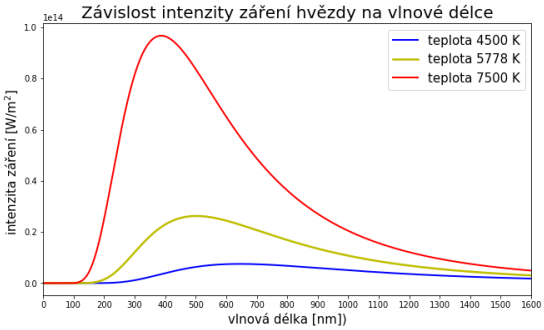
** Německý astronom William Herschel (1738–1822) si všiml, že když rozloží světlo hranolem, jakési neviditelné záření před červenou barvou zahřívá teploměr. Nazval tedy toto záření infračervené (dá se přeložit jako záření „pod červenou“). Podobně se objevilo i takzvané ultrafialové záření (záření „za fialovou“), to ale díky svým oxidačním účinkům.

*** Vlnově částicový dualismus, tedy koncept, že chování opravdu malých částic jde popsat stejně jako chování vln, je jedna z věcí, na kterou přišel Albert Einstein (1879–1955).



Obrázek 3: Graf ukazuje elektromagnetické vlnění. Vidíme sinusový průběh elektrického a magnetického pole. Toto vlnění se šíří ve směru osy z. Lambda (λ) znázorňuje délku jedné vlny.

**** Tuto skutečnost popisuje Planckův vyzařovací zákon. Ten říká, že horké hvězdy září intenzivněji než chladné, a zároveň, že horké hvězdy vyzařují tím víc, čím je vlnová délka kratší. Tento fakt je znázorněn na Obrázku 4. Zajímavé je podívat se na žlutou křivku, teplota 5778 K je teplota udávaná pro Slunce. Můžeme si všimnout, že nejvíce opravdu vyzařuje ve viditelné oblasti.



Obrázek 4: Planckův vyzařovací zákon. Každá křivka má svůj vrchol intenzity záření, který pro danou teplotu hvězdy odpovídá určité vlnové délce. Pro Slunce je to žlutá křivka a teplota 5778 K.

3. Hvězdy, planety, exoplanety

V minulé kapitole jsme si řekli, že naše slunce k nám vysílá fotony (nebo můžeme říct záření). Kde se toto tyto částice ve Slunci berou?

Odpověď na tuto otázku je jednoduchá. Slunce,

stejně jako ostatní hvězdy, má ve svém centru velký zdroj energie. V nitru každé hvězdy totiž probíhají termonukleární reakce. Nejsou to ale reakce, jaké můžeme najít v jaderných elektrárnách, kde probíhá štěpení jader. Ve hvězdách probíhá jaderná syntéza, tedy slučování jader. Hvězdy jsou totiž složeny převážně z vodíku, helia a malého množství dalších prvků těžších než jsou tyto dva. Slunce je například tvořeno ze 73 % vodíku, 25 % helia a zbylá 2 % tvoří ostatní prvky. V jádru Slunce probíhá syntéza jader vodíku na jádra hélia. Při této reakci se uvolňuje energie ve formě fotonů. Tyto fotony pak projdou zbytkem hvězdy k jejímu povrchu a dále putují vesmírem. Právě tlak těchto fotonů zajišťuje, že se hvězda nezhroutí do sebe.

Co se stane, až hvězda spálí při reakcích v centru svůj vodík? Záleží na tom, jak je daná hvězda hmotná. Ty nejhmotnější hvězdy budou provádět syntézu jader až do okamžiku, kdy spálí všechno své palivo na železo. Poté už nemohou dále provádět syntézu a začnou se hroutit, protože jim v tom nic nebrání. Ty nejhmotnější se zhroutí a stane se z nich černá díra, z o něco méně hmotnějších hvězd se stanou neutronové hvězdy, z jiných bílí trpaslíci. Naše Slunce by mělo skončit svůj život jako bílý trpaslík. Takovýto bílý trpaslík bude postupně mnoho miliónů let chladnout, bude stále vysílat fotony, ale teď už jenom díky své vysoké teplotě, až se z něj jednou stane trpaslík černý s teplotou okolního vesmíru.

Co se ale dělo předtím a kde se hvězda vzala? Fáze, kdy hvězda spaluje vodík, je nejstabilnější částí jejího života. Vznikla zhroucením velkého molekulového mračna. Na začátku byl velký zhustek, který díky své gravitaci shromažďoval okolní materiál. Jeho vnitřek se díky tomu zahříval a zahříval a v okamžiku, kdy byl zhustek kulatý a dost hmotný, tak se v nitru zažehly jaderné reakce. A to je právě hlavní rozdíl mezi obřími plynnými planetami a hvězdami! Planeta také vznikala jako zhustek v molekulovém mračnu, ale byla mnohem menší než zárodek hvězdy. Začala kolem hvězdného zárodku obíhat, ale neshromáždila tolik materiálu jako hvězda a nikdy v ní tím pádem ani na chvíli nehořely jaderné reakce. /Máme ovšem i hvězdné objekty, které využívají energii spalování vodíku jen zčásti — takovým hvězdám pak říkáme „hnědý trpaslík“./

Předpokládáme, a nyní i pozorujeme, že každá hvězda má nějakou svou planetu. Bavíme-li se o planetách cizích hvězd, tak aby se to nepletlo, říkáme takové planetě „exoplaneta“ (ze slova extrasolární, tedy obíhající hvězdu jinou než Slunce).

Protože tématem naší T-exkurze je pozorování exoplanety, řekněme si o nich něco více.

Oficiální, poněkud vyčerpávající, definice (exo)planety říká, že (exo)planeta je kulatý objekt držící pohromadě svou vlastní gravitací, ve kterém se nikdy nezapálily jaderné reakce a který obíhá hvězdu nebo její pozůstatek. Zároveň definice říká, že musí „vyčistit“ své okolí od ostatních malých objektů.

Někteří lidé spekulovali už na začátku novověku, že by mohly i ostatní hvězdy mít své vlastní planety, stejně jako Slunce. Ale vzhledem k tomu, že až do druhé poloviny 20. století nebyla k dispozici dostatečně vyspělá technika, neměli možnost to dokázat nebo vyvrátit. Rozkvět objevů exoplanet nastal až v 90. letech. Předpokládalo se, že budeme objevovat planetární systémy podobné tomu našemu. Tedy že nejblíže ke hvězdě budou kamenné planety a dále budou plynní obři. K překvapení vědců se ukázalo, že to tak není. Ukázalo se, že kolem spousty hvězd obíhají plynné planety, i větší než je Jupiter, velmi blízko, dokonce tak blízko, že jejich oběh kolem mateřské hvězdy trvá jenom pár dní. /Merkur oběhne Slunce jednou za 88 dní/. Nejčastěji zatím objevujeme velké plynné planety. Je to hlavně proto, že velké planety je snadnější objevit než ty malé. Pokud ještě tyto planety obíhají svou hvězdu rychle, je taky snadné je pozorovat vícekrát, což potřebujeme, chceme-li o nich něco zjistit nebo chceme-li vyloučit, že se jedná o nějakou chybu v měření nebo nějaký jiný jev. S tím, jak se technika neustále zlepšuje, přibývá i kamenných planet, planet s delší oběžnou dobou a dokonce jsou hlášeny i pozorování exokomet (stejně jako s exoplanetami i tady „exo“ říká, že se jedná o kometu obíhající cizí hvězdu).

Zajímalo by vás, kolik exoplanet lidé zatím objevili? Ke dni 19. 9. 2020 je 4337 potvrzených exoplanet a mnoho dalších čeká na potvrzení.

4. Exoplanetární tranzity a světelná křivka

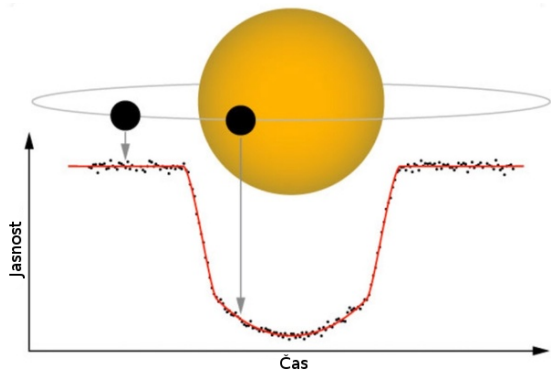
Metoda tranzitů je jedna z nejpoužívanějších metod pro detekci a charakterizaci exoplanet. Na jejím principu také fungují vesmírné dalekohledy, které mají za úkol objevovat nové exoplanety. Jedním z vesmírných dalekohledů byla například sonda mise Kepler, která objevila více než polovinu současně známých exoplanet (2347 z 4126, únor 2020). Ze současných je velmi významná vesmírná mise TESS, která svým působením již teď předčila všechna očekávání. Dalekohled nepře-tržitě zásobuje daty observatoře po celém světě, jakož i observatoř v Ondřejově.

Jak už víme, exoplanety jsou planety obíhající okolo jiných hvězd, než je naše Slunce. Ve sluneční soustavě máme osm planet. Za její hranicí jich však známe více než 4000. A stále je co objevovat. Současné představy jsou takové, že téměř každá hvězda na obloze má ve svém okolí planetu, anebo dokonce víceplanetární systém, podobný sluneční soustavě. Navzdory tomu, že několik víceplanetárních systémů už bylo objevených, ani jeden se nepodobá tomu našemu. Například systém TrAPPiST-1 má sedm planet extrémně blízko své hvězdy. Pro představu, všechny by se nacházely uvnitř dráhy Merkuru, od nejbližší s periodou jen 1,5 dne, po nejvzdálenější s periodou 19 dní. To však neznamená, že systémy podobné sluneční soustavě neexistují. Už za chvíli si vysvětlíme, proč většina objevených planet má krátké periody, řádově několik dní, a systém s periodami na úrovni sluneční soustavy (Země — 1 rok, Jupiter — 12 roků, Neptun — 165 roků) není jednoduché objevit.

Co je to ten tranzit? Představme si, že máme tzv. světelnou křivku, která popisuje průběh jasu hvězdy v čase. To znamená, že méně jasná hvězda bude dosahovat na světelné křivce menší hodnoty než hvězda jasnější. Uvažujme teď, že pozorovaná světelná křivka hvězdy je konstantní. To znamená, že se jas hvězdy s časem nemění. V reálném případě může jas mírně kolísat například vlivem aktivity hvězdy, ale to teď neuvažujeme. V takovém případě nás nic neupozorňuje na přítomnost planety. Co když ale v systému planeta je? Jak se může její přítomnost projevit? Velmi jednoduše. Pokud v systému planeta je, obíhá okolo hvězdy stejně jako Země obíhá okolo Slunce. Jeden oběh hvězdy trvá přesně jednu periodu. Při každé periodě nastane právě jednou situace, že planeta přejde z pohledu pozorovatele před diskem hvězdy. Napadlo vás, že k tomu nemusí docházet vždy? Máte pravdu — záleží na orientaci roviny oběhu (pomyslná rovina, ve které leží oběžná dráha planety) v prostoru vůči nám. Ale pro zjednodušení uvažujme případ, kdy je rovina vhodně orientována a planeta nám před hvězdným diskem prochází. Tomuto jevu se říká tranzit exoplanety (Obrázek 5). Nastává právě jednou při každém oběhu planety a čas mezi dvěma po sobě jdoucími tranzity vyznačuje oběžnou periodu planety.

Jak se tranzit projeví na světelné křivce? Stejně jako když něco proletí před žárovkou. Zakrytím části disku hvězdy poklesne její jasnost. Typický tvar světelné křivky je proto prudký pokles jasnosti, když planeta vchází před disk hvězdy, a následný nárůst na normální hodnotu, když planeta opouští disk hvězdy. Tranzit exoplanety je velmi užitečný. Nejen, že poukazuje na přítomnost planety v systému, ale i nám poskytuje o tomto systému informace. Zaprvé je to perioda. Když pozorujeme hvězdu dostatečně dlouho a ve světelné křivce pozorujeme dva po sobě jdoucí tranzity, čas mezi nimi nám určuje periodu, anebo též délku roku na dané planetě. Země má periodu 365 dní, to je i náš rok, ale například oběžná doba Marsu je 687 dní, proto rok na Marsu trvá právě tuto dobu. Známe exoplanety, kterým rok trvá jen pár hodin! Teď můžeme lehce vidět, proč většina objevených exoplanet má krátké periody. Na objevení a potvrzení planety s periodou jeden rok je potřebné nepřetržité pozorování po dobu 2 roků (abychom měli jistotu, že budeme pozorovat aspoň dva tranzity). V současnosti převládá snaha objevovat exoplanety s kratší periodou, ale ve větším počtu, kde se postupně skenuje téměř celá obloha. Do budoucna se však počítá s misemi, které budou pozorovat právě jednu část oblohy po dobu několika roků, ve snaze objevit dlouhoperiodické exoplanety (například dvojče Země s periodou jeden rok).

Perioda však není jediná informace, kterou poskytuje světelná křivka během tranzitu. Další důležitou informací jsou rozměry systému (hvězdy a planety). Čím je exoplaneta větší, tím zakryje více z disku



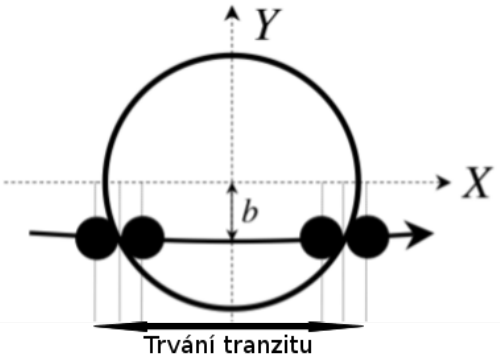
Obrázek 5: Grafické znázornění průběhu tranzitu z pohledu pozorovatele na Zemi. Pod obrázkem odpovídající světelná křivka.

hvězdy a tím bude i pokles její jasnosti větší. Máme pro to vztah mezi poklesem jasnosti a velikostí (poloměrem) planety. Z něj přímo plyne, že větší planety se i lehčeji detegují. Malé planety k jejich zaznamenání vyžadují nesmírně přesná měření jasnosti hvězd, která zabezpečují především vesmírné dalekohledy. Navzdory tomu, že existuje vztah mezi hloubkou poklesu jasnosti a poloměrem planety, neumíme přesně určit poloměr planety. Proč? Protože to platí i obráceně — větší hvězdě zakryje stejná planeta menší část jejího disku než hvězdě menší. Proto jsme schopni určit jen poměr mezi poloměrem planety a hvězdy. Konkrétněji pomocí vztahu:

$$\textit{hloubka poklesu} = \frac{R_\mathrm{p}^2}{R_\star^2},$$

kde R_p značí poloměr planety a $R_\star$ poloměr hvězdy. Abychom tedy přesně určili poloměr planety, nejprve potřebujeme znát poloměr hvězdy. Ten se určuje pomocí jiných metod, proto se tím nebudeme zabývat. Existují však mise, které jsou zaměřeny právě na charakterizaci velkého počtu hvězd. Proto většinou není problém si poloměr hvězdy dohledat. Další parametry, které se z tranzitu můžeme dozvědět, jsou: délka trvání tranzitu (čas mezi začátkem poklesu a koncem nárůstu jasnosti ve světelné křivce) a impaktní parametr systému. Impaktní parametr s označením b udává, jak daleko od centra hvězdného disku tranzit planety probíhá (Obrázek 6).

Poslední zajímavý jev, který můžeme během tranzitu pozorovat, se nazývá okrajové ztemnění. Pokud by hvězda svítila rovnoměrně jasně na celém svém disku, po poklesu jasnosti na začátku tranzitu bychom pozorovali konstantní jasnost až do momentu opětovného nárůstu. Ovšem jelikož ve skutečnosti jasnost hvězdy směrem k okrajům mírně klesá, můžeme pozorovat mírné prohloubení ve světelné křivce. V centru hvězdy, kde planeta prochází před nejjasnější plochou na disku hvězdy, nám planeta cloní o něco více světla a pokles je o něco větší, než směrem ke krajům hvězdy (Obrázek 5).



Obrázek 6: Geometrie tranzitu s vyznačeným impaktním parametrem a časem trvání tranzitu.

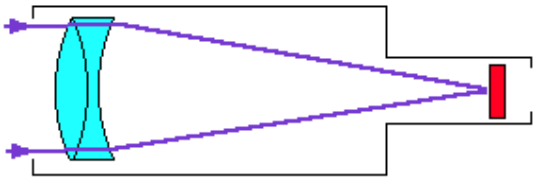
5. Jak pozorujeme dalekohledem

Dalekohled je základním přístrojem používaným v astronomii. Jako první jej použil na pozorování noční oblohy Galileo Galilei v roce 1609. Použil jej na zkoumání Měsíce a planet (později i na pozorování Slunce, čímž si poškodil zrak). Neslouží jen na „přiblížení“ toho, co vidíme. Při pozorování slabých objektů a hvězd je jeho úloha důležitá také v tom, že „shromažďuje” co nejvíce světla do našeho oka, anebo do objektivu kamery. A právě díky tomu vidíme i velmi slabé hvězdy. V kombinaci s dalšími přístroji (jako například spektrograf anebo citlivá

CCD kamera) tak můžeme o pozorovaném objektu získat obrovské množství informací.

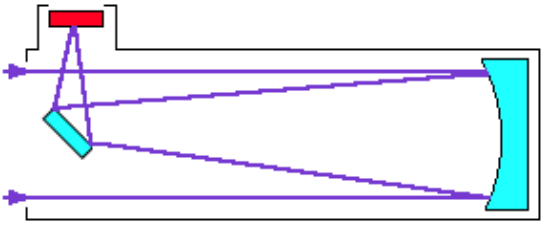
Dalekohledy můžeme rozdělit na dva typy. Tím prvním jsou čočkové dalekohledy (refraktory). Ty fungují na principu lámání světla čočkou, která se nachází v objektivu dalekohledu (viz obrázek 7). Tato čočka zároveň určuje velikost objektivu dalekohledu. Obecně platí, že čím je průměr objektivu větší, tím je dalekohled výkonnější, protože do něj může dopadnout více světla.

Druhou skupinou (do které spadá i Perkův 2metrový dalekohled na observatoři v Ondřejově) jsou zrcadlové dalekohledy (reflektory). Jejich hlavním optickým prvkem je parabolické zrcadlo (můžeme si to představit jako duté kulové zrcadlo), které posílá všechno světlo do ohniska dalekohledu. Čím větší zrcadlo je, tím více světla dalekohled zachytí, a můžeme tak pozorovat o to slabší objekty. Světlo může být z primárního zrcadla do ohniska vedeno pomocí dalších zrcadel, na základě čehož rozlišujeme různé typy reflektorů. Nejjednodušším typem zrcadlového dalekohledu je Newtonův reflektor, který posílá světlo do ohniska mimo tubus pomocí rovinného sekundárního zrcadla (jeho schéma vidíme na obrázku 8).



Obrázek 7: Schéma čočkového dalekohledu. Světlo (fialové čáry se šipkami) vstupuje zleva, prochází čočkou (tyrkysová) a spojí se v ohnisku, kde je umístěn detektor (červená).

Jak už název napovídá, Perkův dvoumetrový dalekohled má primární zrcadlo s průměrem 2 metry. Jde tak o největší dalekohled v České republice. Vyroben byl v roce 1967. Většinu času byl používaný na získávání hvězdných spekter — světlo z hvězd bylo rozkládané pomocí spektrografů na barevné spektrum, ze kterého se určovaly různé parametry. Světlo

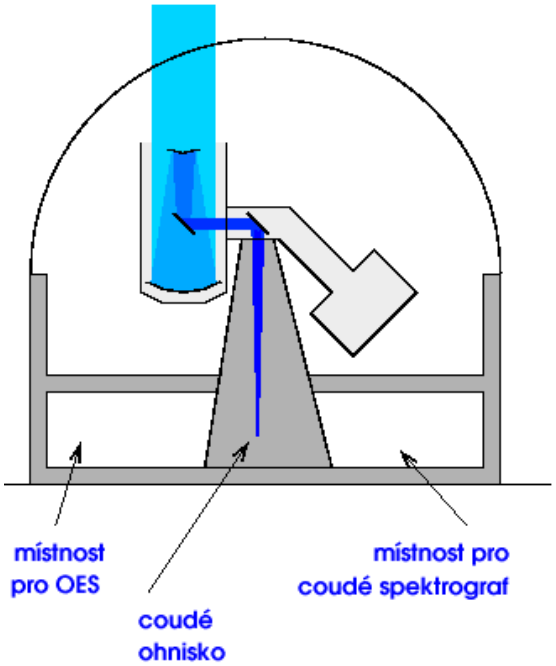


Obrázek 8: Schéma Newtonového zrcadlového dalekohledu. Světlo (fialové čáry se šipkami) vstupuje zleva, odráží se od primárního zrcadla (tyrkysové vpravo), poté od menšího sekundárního zrcadla (tyrkysové vlevo) a vychází nahoru dírou v tubusu do detektoru (červená) umístěném v ohnisku.

šlo z primárního zrcadla na menší sekundární, které jej posílalo přes stojan dalekohledu (pomocí odrazů od menších rovinných zrcadel) do tzv. Coudé ohniska. Z něj šlo světlo dále do jednotlivých spektrografů, které se právě používaly. Schéma dalekohledu můžeme vidět na obrázku č. 9.

V roce 2019 prošel dalekohled rozsáhlou rekonstrukcí, při které byly nainstalované optické kabely, které nahradily soustavu zrcadel. Světlo tak jde z primárního zrcadla přímo do jeho ohniska, ve kterém se nachází optický kabel a pozorovaný signál se tak přenáší tímto kabelem až k detektorům. Aby bylo možné provádět i optické pozorování, k spektrografům byla přidaná i CCD kamera, se kterou je možné dělat například fotometrii tranzitů exoplanet.

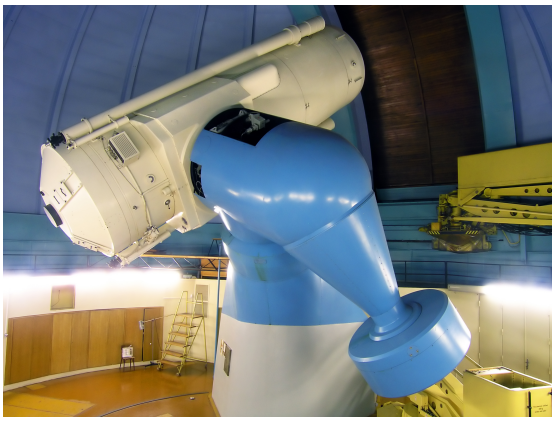
CCD kamera (z anglického Charge-Coupled Device — zařízení s vázanými náboji) je nejrozšířenějším typem snímače astronomických objektů. Funguje na principu fotoefektu. Každý snímač je složen z mnoha jednotlivých bodů, tzv. pixelů. Jednotlivé pixely zaznamenávají elektrický signál, když na ně dopadá světlo. Velikost signálu a jeho rozložení přímo souvisí s tím, jak jasný je pozorovaný objekt a na kterou část čipu světlo dopadá. Pokud chceme zkoumat slabší objekty, expoziční doba (čas, po který na CCD čip dopadá světlo) můžeme nastavit i na desítky minut. Po skončení expozice se celý snímek „vyčítá“ a vytvoří se z něj digitální snímek („fotka“) pozorovaného objektu.



Obrázek 9: Schéma Perkova 2m dalekohledu. Odstíny modré barvy znázorňují cestu světla přicházejícícho seshora, odrážející se od zrcadel a pokračující do Coudé ohniska (zdroj: webové stránky AsÚ AV ČR).

Na to, abychom dostali přesné výsledky, musíme eliminovat různe rušivé vlivy (jako například tepelný či elektrický šum, optické vady dalekohledu atd.). Proto děláme mimo samotných snímků zkoumaného objektu vždy i řadu tzv. korekčních snímků. Ty se používají na digitální úpravu nafocených snímků, abychom odstranili všechny nežádoucí efekty a dostali co „nejhezčí“ snímek.

Korekční snímky, které používáme nejčastěji, jsou zero snímky, flat snímky a dark snímky. **Zero (Bias) snímky** jsou takové snímky, kterých expoziční čas je nulový. To znamená, že na snímek nedopadne žádne světlo. I přesto ale nějaký signál zaznamenáme a tímto signálem je elektrický šum, který vzniká při vyčítání snímku z CCD čipu. **Flat snímky** jsou zase snímky, při kterých svítí homogenně (rovnoměrně jasně) světlo přímo do CCD kamery. Snímek má



Obrázek 10: Perkův dalekohled v kupoli Ondřejovské hvězdárny s uchycením na stojanu včetně protizávaží (zdroj: wikipedie).

několikasekundovou expoziční dobu. Pokud má světlo dopadat rovnoměrně na celý čip, každý pixel by měl tedy zaznamenat stejný signál. To se však nikdy nestane, což je způsobeno nedokonalostmi čipu a jednotlivých pixelů. Flat snímky nám pomáhají korigovat tyto nedokonalosti. **Dark** snímky získáme tak, že zakryjeme objektiv kamery a snímáme snímky „naprázdno“, obvykle několik sekund. I v tomto případě zaznamenáme nějaký slabý signál a to navzdory tomu, že na kameru nedopadá žádné světlo. Zachycený signál je projevem tepelného šumu — teplo se projevuje jako infračervené záření a to projde i přes krytku kamery.

Z každého typu korekčního snímku vytvoříme několik kusů, které potom zprůměrujeme (vytvoříme tzv. **master snímek**), abychom co nejlépe odstranili jednotlivé rušivé vlivy. Tento master snímek aplikujeme na náš vědecký snímek pozorovaného objektu/hvězdy při jeho digitálním zpracování a analýze.

Při pozorování si musíme zaznamenat mnoho přesných informací, protože přesnost našeho výsledku může ovlivnit i nejmenší drobnost. Zajímá nás vlhkost vzduchu, oblačnost, zdali svítí Měsíc, případně jeho fáze atd. Samotné pozorování si popíšeme přímo v kupoli dalekohledu, kde si ukážeme i přesný postup získávání a následného zpracování vědeckých dat.