

Vzdělávací soustředění studentů

v rámci projektu KOSOAP

Kooperující síť v oblasti astronomických odborně-pozorovatelských programů



METODICKÝ A VZDĚLÁVACÍ MATERIÁL

Hvězdárna Valašské Meziříčí 4. – 6. listopadu 2011

PROMĚNNÉ HVĚZDY A MOŽNOSTI JEJICH POZOROVÁNÍ A VÝZKUMU

Luboš Brát, Ladislav Šmelcer, Jaroslav Trnka



Tento mikroprojekt je spolufinancován Evropskou unií, z prostředků Fondu mikroprojektů spravovaného Regionem Bílé Karpaty



1. Mechanizmy hvězdné proměnnosti

Bc. Luboš Brát, podle skript Z. Mikulášek a M. Zejda, Proměnné hvězdy, AÚ PŘF MÚ Brno

Proměnné hvězdy a mechanismy, jak k jejich změnám jasnosti dochází, si popíšeme postupně podle oblastí, kde k proměnnosti dochází. Ještě dříve ale musíme rozlišit mezi tzv. geometrickými proměnnými a fyzickými proměnnými hvězdami.

- A. GEOMETRICKÉ proměnné (nemění se světelný tok z hvězdy či hvězdné soustavy, ale mění se pozorovaná svítivost)**
- B. FYZICKÉ proměnné (skutečně proměnné hvězdy, u nichž se mění jejich zářivý výkon v daném spektrálním oboru)**

A. GEOMETRICKÉ proměnné hvězdy

Ke změnám jasnosti dochází kvůli rotaci hvězdy nebo kvůli oběhu těles kolem společného těžiště.

A 1. Rotující proměnné

Záření objektu není izotropní a osa rotace nesměruje k pozorovateli. Téměř vždy je souvislost s přítomností magnetického pole, přičemž osa magnetického pole je odlišná od osy rotační. Jedná se o pulzary, Ap hvězdy, typ RS CVn (fotosférické skvrny).

A 2. Dvojhvězdy

Složky dvojhvězdy se při svém oběhu **vzájemně zastiňují** (vůči pozorovateli).

Složky těsné dvojhvězdy jsou **slapově deformovány** a mají rotaci vázanou na dobu oběhu. Pozorujeme různě velký průřez kolmý na směr k pozorovateli a zároveň platí, že menší povrchový jas je v místech s menším gravitačním zrychlením a naopak.

V těsných dvojhvězdách se uplatňuje i **efekt odrazu** – složky se vzájemně osvětlují. Světlo složky se ve fotosféře druhé složky rozptýlí a vyzáří do prostoru a zároveň absorbuje a nahřeje fotosféru. Oba projevy vedou ke zvýšení jasu přivrácených stran dvojhvězdy.

Efekt odrazu je nejvýraznější při konfiguraci normální hvězda + zhroutená složka s akrecí hmoty. Zhroutená složka vyzařuje rentgenové záření, které nahřívá druhou složku soustavy až o 1000 K.

Dodatečně lze pozorovat i **zákryty akrečním diskem či plynnými proudy** při přetoku hmoty.

B. FYZICKÉ proměnné hvězdy

Dochází k reálným změnám charakteristik (L, R, M) v čase. Týká se to různých oblastí hvězdy:

- těsného okolí hvězdy
- v povrchových vrstvách, většinou projevy hvězdné aktivity
- v podpovrchových vrstvách, nejčastěji pulsace
- v jádru – rychlé fáze hvězdného vývoje, supernovy

B 1. Nestacionární děje v okolí hvězdy

Okolohvězdný materiál / zárodečná mlhovina u T Tauri, FU Ori (dopady na hvězdu) či odvržená obálka po výbuchu novy či supernovy (interakce s mezihvězdnou látkou, rázové vlny).

Materiál v interagujících dvojhvězdách – **akreční disk** (materiál ze složky – dárkyně – si s sebou nese moment hybnosti => nedopadá přímo na BT, ale vytváří akreční disk. Při turbulentním pohybu dochází k přeměně E_p na vnitřní energii částic => pokles látky v disku směrem k BT = zjasnění (**trpasličí novy**)). Kolísání jasnosti horké skvrny v akrečním disku = **flickering**.

B 2. Nestacionární děje na povrchu hvězdy

Dopad hmoty z okolí na povrch – **klasické novy** (ukládána látka na povrchu BT svou hmotností kontrahuje BT, stlačuje degenerovanou hvězdu. Uvolněná gravitační energie se transformuje na vnitřní energii a dochází k zahřívání BT. Dochází k ohřevu i vrstvy uložené hmoty na povrchu => zápalná teplota CNO cyklu => překotná termonukleární reakce => exploze povrchových vrstev BT, rozlet rychlostí $n \times 1000$ km/s. Zjasnění o 7 – 19 mag. Opakuje se po řádově 10^5 let.

B 3. Povrchová aktivita hvězd

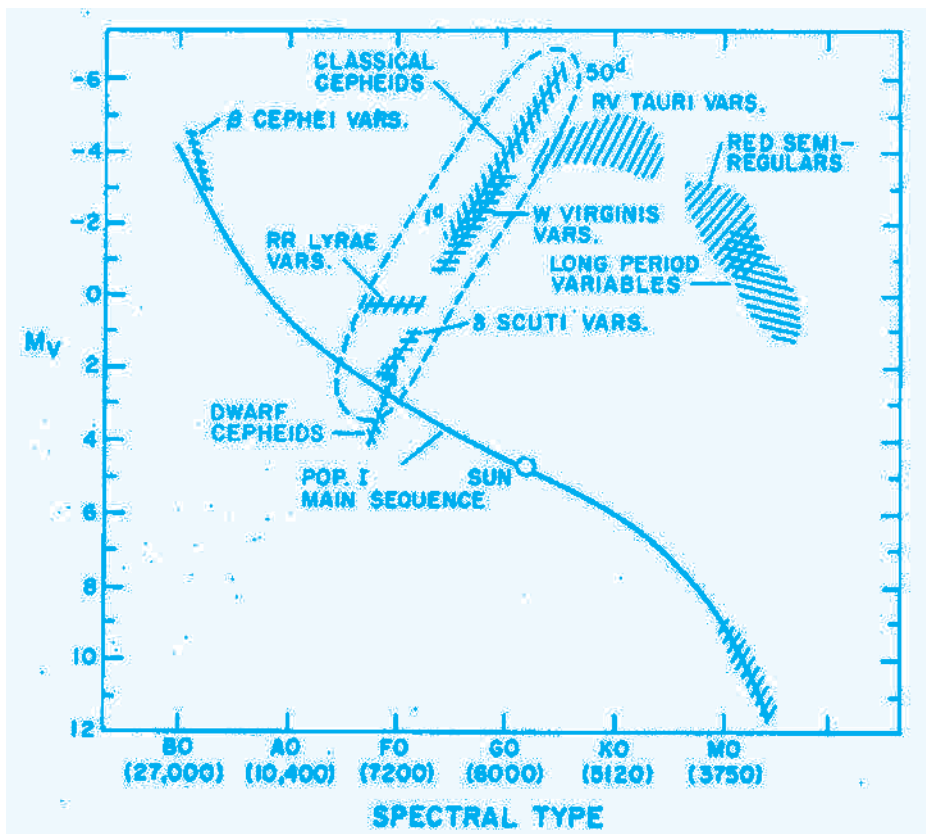
Fotosférická aktivita – **chladné skvrny na povrchu** – obdoba slunečních skvrn. U hvězd se silným magnetickým polem => s konvektivní vrstvou pod povrchem => chladné hvězdy G, K, M. Bývá doprovázena erupcemi ~ o řád silnější než erupce na Slunci – **eruptivní trpasličí UV Ceti**.

- **T Tauri** – erupce, proměnné emise v čarách H a K (**chromosférické projevy**) mohutný **hvězdný vítr**;
- **Obři a veleobři** – rovněž chromosférická aktivita, **hvězdný vítr** => ztráta hmoty;
- **RS CVn** (skvrnití psi) – těsné dvojhvězdy. Zde **fotosférické skvrny** (až na 50 % povrchu!), **chromosférická aktivita, mohutné erupce**.

B 3.I Příčiny hvězdné aktivity

Hlavní roli zde hrají lokální magnetická pole, **dynamový mechanismus**. Zesilování slabého (náhodného) magnetického pole současným působením **podpovrchové konvektivní vrstvy** a **rotace hvězdy**. Magnetické pole vzniklé pod povrchem je vynášeno na povrch, zde se rozbíjí (disipuje) => **magnetohydrodynamické vlny** se šíří vodivým prostředím (plasmou) fotosféry => transport energie do horké chromosféry a koróny.

- Čím rychleji rotuje hvězda, tím větší má chromosférické projevy (emise H a K) a koronální projevy (rentgenové záření) => silné magnetické projevy u těsných hvězd s vázanou rotací (RS CVn) či mladé rychle rotující hvězdy.
- Horké O a B hvězdy – koróna vzniká tlakem silného UV záření.
- A hvězdy nemají ani silné UV záření, ani konvektivní vrstvy => klidná fotosféra => **chemicky pekuliární hvězdy** (vlivem **zářivé separace chemických prvků** je povrchové chemické složení odlišné od složení samotné hvězdy).



B 4. Pulzující proměnné hvězdy

- **radiální pulzace** (změny poloměru), **neradiální pulzace** (změny tvaru hvězdy) vs. změny povrchové teploty
- největší amplitudy jasnosti při **radiální pulzaci**, změny R menší než 10 %
- **pás nestability**, zde typy **DCEP**, **WVIR**, **RR LYR**, **DSCT**, **ZZ CET**
- **mimo pás nestability** jsou typy proměnnosti **BCEP**, **RV TAU**, **SR**, **M**

B 4.I Radiální pulzace

- **hydrostatická rovnováha** – v rovnováze je **gravitační síla a gradient tlaku**. Perioda pulzací odpovídá periodě vlastních kmitů hvězdy => **perioda pulzací je nepřímě úměrná odmocnině ze střední hodnoty hustoty hvězdy** => Mira Ceti, P ~ 100 d, DCEP P ~ 10 d, ZZ CET P ~ 0,01d;
- v jádru hvězdy je uzel **stojatého vlnění**, na povrchu je **kmitna stojatého vlnění** – u základního módu pulzací. U vyšších pulzačních módů je uzel ještě v obalu hvězdy – uzlové koule;
- většina DCEP a WVIR v základním módu, RR LYR v základním i v 1. harmonické frekvenci;
- proti pulzacím působí tření; aby se pulzace neutlumily, je třeba nalézt mechanismus, který pulzacím dodává energii – zářivý tok z nitra na povrch vs. oblasti HeII a HeIII. Při stlačení HeII dojde k ionizaci na HeIII (ztmavnutí), následuje expanze a rekombinace HeIII -> HeII (zprůhlednění) = přebytek HeII => ionizace na HeIII atd. dokola;
- tento proces je účinný jen pro určité rozmezí L – u chladnějších hvězd je oblast HeII/HeIII moc hluboko => malá amplituda kmitů, u teplejších hvězd je oblast HeII/HeIII ve vyšších – řídkých vrstvách obalu => malá hustota HeII/HeIII oblasti a málo zadrženého záření => **úzký pás nestability**;
- **RR LYR** – staré hvězdy první generace obsahují He => potvrzení faktu, že raný vesmír obsahoval prvotní He;
- vztah **perioda – zářivý výkon** (Henrieta Swan Leavittová);
- $M_V = -2.8 \times \log(P) - 1.43$, platí ale **jen pro pulzující proměnné v základním módu!** DCEP pulzující v 1. harmonickém módu mají při tomtéž výkonu kratší periodu. Lze je odlišit – v **základním módu asymetrická světelná křivka vs. v 1. nadtónu symetrická křivka**;
- BCEP – rozdíl oproti DCEP v tom, že **fotoionizace prvků skupiny železa**, ne HeII.

B 4. II Pulzace neradiální, módy pulzací

- hvězdné pulzace mají povahu **podélného vlnění** (jako zvuk), které se šíří plasmou – pulzace prostupuje hvězdou a interferuje samo se sebou a vzniká **stojaté vlnění**;
- hvězda je tzv. **prostorový rezonátor** (jako Země - zemětřesení), uzlový bod v jádru hvězdy, kmitna na povrchu – ve fotosféře, zde dochází k odrazu zpět, vlna se postupem dovnitř láme (roste hustota – obdoba lomu světla), odchyluje se od kolmice až dosáhne opět fotosféry, zde se odrazí a interferuje sama se sebou – vznik stojatého vlnění, na povrchu vznikají **uzlové kružnice**;
- **uzlové kružnice** na povrchu – obdoba poledníků a rovnoběžek, mimo uzlové kružnice oddělují oblasti, které se od sebe zároveň vzdalují a přibližují – pulzují v opačné fázi;
- vzniká tak i **postupná vlna**, která se šíří rovnoběžně s rovinou rovníku.

B 4.III – Dlouhoperiodické proměnné

- M, SR = hvězdy asymptotické větve obrů (ABG);
- povaha pulzací jako u klasických cefeid – energii pulzací dodává zářivý tok postupující z nitra, k akumulaci zářivé energie dochází na vrstvě ionizovaného vodíku (HI / HII), pulsy mají v řídkém obalu povahu **rázové vlny**, při jejím postupu dochází k ohřevu obalu a disociaci molekul TiO => pokles opacity => zvýšení jasnosti;
- SR se od M liší tím, že TiO je ve spektru přítomno neustále – postup rázové vlny zde není tak „devastující“ jako u M => menší amplitudy.

B 5. Hvězdná proměnnost související s ději v jádru hvězdy

- v průběhu života hvězdy dochází k pozvolné změně chemického složení nitra v důsledků jaderných reakcí;
- supernovy – několik odlišných příčin exploze.

B 5.I Supernovy typu II

- důsledek vývoje mimořádně hmotných hvězd, v průběhu vývoje dojde ke změně chemického složení jádra z H/He => Fe (a dalších prvků skupiny železa), prvky skupiny Fe mají jádra silně vázána => jsou jaderně „nehořlavá“;
- dochází k poruše hydrostatické rovnováhy mezi působením gravitace a tlaku záření => kontrakce vnějších částí jádra hvězdy;
- v jádru roste hustota látky, po překročení kritické hustoty elektronově

degenerovaného Fe jádra, až do té doby padá látka do centra volným pádem => až rychlostí tisíce km/s => uvolňuje se obrovské množství E_p , únik E_p z jádra formou **neutrin**;

- většina **neutrin** prolétá obalem hvězdy bez interakce, malá část jich je absorbována => ohřev látky na velmi vysokou teplotu => mohutná **rázová vlna** se nadzvukovou rychlostí šíří k povrchu hvězdy a rozmetá celou hvězdu do prostoru;
- na H bohatý obal je navrácen do prostoru, zjasnění až o 18 mag;
- vznik prvků těžších než Fe, radioaktivní izotopy Ni^{56} ($T_{1/2} = 6,1$ d), Co^{57} ($T_{1/2} = 270$ d) a Na^{22} ($T_{1/2} = 2,6$ r) => dodatečný zdroj energie v období poklesu jasnosti.

B 5.II Supernovy typu Ia

- nejsvítivější supernovy (-19,6 mag), identické světelné křivky => **standardní svíčky** pro určování vzdáleností blízkých galaxií;
- jiný scénář – **jaderná detonace** uhlíko-kyslíkového BT;
- příčinou je pozvolný nárůst hmotnosti BT v důsledku přenosu hmoty z druhé složky dvojhvězdy na povrch BT, roste M => zmenšuje se R => roste ρ a uvolňuje se E_p => zvyšuje se T ;
- při překročení kritické hmotnosti $1,3 M_{\odot}$ dojde ke zvýšení T v jádru natolik, že se zažehnou termonukleární reakce => další zvyšování T , až je vyšší než teplota degenerace;
- vazby elektronového degenerovaného plynu povolí a dojde k explozi BT, expanze až rychlostí 10^4 km/s, exploze uhasí termonukleární reakce, ale předtím dojde k přeměně více než poloviny hmoty C, O na Fe;
- tempo poklesu jasnosti udává i zde radioaktivní rozpad v expandující obálce.

B 5.III Supernovy typu Ib a Ic

- podobné jako typ II, pravděpodobně jde o závěr života velmi hmotných hvězd ve dvojhvězdném systému – kombinace mezi typy Ia a II.

2. Pozorování proměnných hvězd

Ladislav Šmelcer, Hvězdárna Valašské Meziříčí a Sekce proměnných hvězd a exoplanet ČAS

Úvod

Noční obloha nám nabízí mimořádnou podívanou na mnoho zářících objektů, nejenom hvězd, ale i mlhovin, galaxií, hvězdokup a dalších zajímavostí. Lidé se odjakživa zajímali o dění na obloze. V minulosti to byly i praktické důvody, kdy podle vzhledu oblohy určovali období příchodu klimatických událostí – monzunové deště nebo nástup vhodného času na setbu plodin.

Mnoho učenců – astronomů se v průběhu staletí snažilo pochopit a popsat, jestli existuje nějaký řád ve vesmíru. Pozorovali bludná světla (planety), ale netušili, že se jedná o tělesa naší Sluneční soustavy. Správného vysvětlení se nám dostalo počátkem 17. století.

Podrobné zápisy ze starých kronik z celého světa (nejlépe dochované informace máme od asijských učenců) odhalují i další jevy pozorované na obloze. Kromě komet se na obloze objevovaly **nečekaně zářivé hvězdy** a staří astronomové je považovali za **nové hvězdy**. Dnes víme, že sledovali jedny z nejpůsobivějších představení noční oblohy – **vzplanutí supernovy**. A zde se dostáváme již do oblasti proměnných hvězd – neboť i supernovy můžeme považovat za proměnné hvězdy.

V současné době máme k dispozici historické záznamy o tzv. **hvězdách – hostech**. Musíme si uvědomit, že v minulosti astronomové do doby před použitím dalekohledu měli k dispozici pouze svůj zrak. V tomto případě máme možnost vidět jenom několik proměnných hvězd. První zmínka o pozorování je z roku 1596, kdy si astronom Fabricius všiml jasné hvězdy v souhvězdí Velryby. Teprve po několika desetiletích pozorování se podařilo prokázat, že změny jasnosti jsou periodické. Dnes je tato hvězda označována jako *o Cet* a je prototypem **dlohoperiodických proměnných hvězd**. S nástupem dalekohledů v astronomii se staly pozorovatelnými hvězdy, které zrakům astronomů byly nedostupné. Počet objevených proměnných hvězd rychle narůstal a s nástupem fotografické techniky se tempo ještě zvýšilo. Ještě dnes mnoho astronomů využívá přehlídkové archivní fotografické desky na identifikaci nových proměnných hvězd. Přibližně po sto letech klasického fotografování nastupuje **digitální záznam obrazu**. Tato technika přináší neuvěřitelné výhody – odpadá zdoluhavé zpracování snímků; pokud pomíneme práci v temné komoře při vyvolávání negativů, tak to bylo zejména proměřování snímků na fotometrech a určování jasnosti proměnné hvězdy. **Účinnost CCD kamer** je mnohem vyšší, což výrazně zkracuje expoziční časy. Také archivace snímků je daleko pohodlnější.

Díky rychlému vývoji techniky se během 20 let ceny CCD kamer dostaly

na úroveň, která je dnes dosažitelná i amatérským astronomům. I proto vám přinášíme tyto přednášky, které vám umožní udělat si přehled o tom, k čemu tuto techniku využít.

CCD fotometrie ve Valašském Meziříčí – z pohledu pozorovatele

První **polovodičové detektory CCD** se v astronomii objevily začátkem osmdesátých let. Jejich tvůrci, Willard Boyle a George Smith, si v roce 1969 těžko uvědomovali, jak velkého dosahu jejich hodinová práce na principu kamery bude mít. Tento nápad byl kromě jiných ocenění odměněn Nobelovou cenou za fyziku v roce 2009. Ještě dnes si vzpomínám na první znovuobjevové snímky Halleyovy komety pořízené prvními CCD kamerami použitými na astronomických dalekohledech. Rozvoj techniky a technologií v dnešní době umožňuje nejenom profesionálním pracovištím, ale i amatérským astronomům díky CCD kamerám **vykonávat vědecky publikovatelné výsledky**. Ve srovnání s prací s nákladnými fotoelektrickými fotometry je provoz CCD kamer levnější a ve spojení s programovým vybavením je zajištěna komunikace s osobním počítačem.

Ještě než se začneme bavit o technických detailech **CCD fotometrie**, je potřeba si uvědomit zásadní věc. Prvním krokem každého začínajícího astronoma by mělo být rozhodnutí, co chci pozorovat. Je to samozřejmě těžké rozhodnutí, neboť obloha poskytuje mnoho možností, nejenom proměnné hvězdy. Nicméně je potřeba říct, že nejen z vlastní zkušenosti známe snad i drtivou většinu astronomů, kteří si pořídí nákladné vybavení (dalekohled, montáž, detekční zařízení a další vybavení), za které utratí nemalé finanční prostředky. Posléze začnou zjišťovat, co by se dalo s postaveným zařízením pozorovat a pokud k takovému rozhodnutí dospějí, zjistí, že vybavení není ideální, v horším případě je nevhodné (a to se může týkat dosahu přístroje, ale i dostupnosti přístroje pozorovateli nebo umístění pozorovacího stanoviště). Pokud si stavíme vlastní pozorovatelnu, je tento postup – tedy výběr vhodného pozorovacího programu a posléze pořízení daného technického vybavení – jednoznačně efektivnější než opačný postup.

V mém případě jsem tuto otázku řešil tím způsobem, že jsem nastoupil na hvězdárnu do Valašského Meziříčí, tedy nic nového nestavěl a snažil se najít uplatnění daného vybavení a jejího využití. Moji zájmovou skupinou objektů byly od začátku proměnné hvězdy. Víme, že jejich počet na obloze lze počítat na tisíce a i různorodost typů je velká. I v tomto směru je tedy nutné udělat užší výběr. V polovině devadesátých let jsem se soustředil na **skupinu dlouhoperiodických proměnných hvězd – mirid**. Do programu jsem zařadil několik zajímavých případů, které z nejasných příčin měnily délky změn jasnosti (tedy něco jako periody). Z tohoto seznamu jsem do současné doby zachoval v pozorovacím programu **miridu T UMi**, která se během 13 let zajímavě vyvinula pravděpodobně

v polopravidelnou proměnnou. Zachytit hvězdu v takovém stadiu vývoje je poměrně unikátní.

Postupem let jsem si začal uvědomovat, že nástup nových technik, zejména přehlídkových robotických dalekohledů, přebírá tuto práci pozorovatelskou a nemá dalšího významu věnovat pozorovací čas těmto dlouhoperiodickým proměnným hvězdám. Počátkem nového tisíciletí po navázání spolupráce se **Sekcí pozorovatelů proměnných hvězd při ČAS** jsem se začal více zajímat o program zákrytových dvojhvězd. Dalším posunem v práci bylo navázání spolupráce s astronomickým ústavem Karlovy univerzity. Zde jsou zaměřeni na pozorování **zákrytových dvojhvězd s excentrickými drahami a systémy dvojhvězd se třetí složkou**. Samostatnou speciální skupinou jsou systémy dvojhvězd, kde je možné studovat **relativistické efekty** v pohybu složek a zároveň vnitřní strukturu hvězd.

Důležitou součástí práce je publikování výsledků pozorování. Je zřejmé, že nepublikování degraduje vaše výsledky činnosti a tzv. pozorování do šuplíku není to pravé. Pokud se podíváme na výsledky činnosti **Sekce pozorovatelů proměnných hvězd při ČAS**, je několik možností publikování. Zpravidla jednou ročně vydáváme práci, kde se zveřejňují okamžiky minim zákrytových dvojhvězd. Ta se zveřejňuje v *Open European Journal on Variable Stars*, který je registrován i přes *The SAO/NASA Astrophysics Data System*. Díky tomu se o vašich výsledcích dozví i mezinárodní komunita. Další využití našich výsledků pozorování jsou pak další práce teoretických astrofyziků, kteří na základě dat z fotometrie a následné spektroskopie jsou schopni modelovat jednotlivé případy zákrytových dvojhvězd a spočítat všechny parametry systému. To se v *Astrophysics Data System* objeví jako citace dané práce.

V případě spolupráce s astronomickým ústavem UK se pak věnujeme některým konkrétním případům **zákrytových dvojhvězd**, kdy se vyhláší pozorovací kampaně. Výsledkem je odborná monografie pro daný pozorovaný systém.

Všechny publikované výsledky a citované práce pak slouží jako zpětná vazba na úpravu pozorovacího programu. To znamená, jestli danou dvojhvězdu je zajímavé dál pozorovat, nebo ne.

Současné možnosti pozorování proměnných hvězd na Hvězdárně Valašské Meziříčí

Pro **fotometrii proměnných hvězd** je možné používat dvě stanoviště. První se nachází v jižní budově, neboli budově odborného pracoviště. Zde je k dispozici dalekohled typu Schmidt-Cassegrain o průměru 280 mm a s ohniskem 1 765 mm. Na fotometrii slouží CCD kamera G2 – 1600 s čipem KAF-1603 ME, s rozlišením

1536×1024 a velikostí pixelu 9×9 μm. V rámci projektu z OP Přeshraniční spolupráce SR-ČR s názvem Obloha na dlani byl pořízen nový dalekohled sloužící především vzdělávací činnosti a pro praktická pozorování s využitím CCD techniky při vzdělávacích akcích. Je to také typ Schmidt-Cassegrain, ovšem o průměru 355 mm a s ohniskem 2460 mm. Pro fotometrii se používá starší kamera SBIG ST 7 s čipem KAF 0-400, s rozlišením 768×512. Robustní poloautomatická montáž CGE PRO slouží pro přesné navádění dalekohledu pomocí elektronického ovladače.

Krátký pohled do historie: první CCD kamera se pořídila na hvězdárnu v roce 1997. K plnému nasazení do pozorovatelny a její využití pro pozorování proměnných hvězd došlo v roce 1999.

Poslední důležitá poznámka. Pokud je k dispozici řádné astronomické vybavení, je také potřeba si uvědomit, jak často bude využívána. Řekl bych, že to je asi největší kámen úrazu. Samozřejmě mladý člověk plný elánu a nevázan jinými povinnostmi bude mít jiný přístup než člověk starší. Mladý člověk je ochoten i s přístroji cestovat do tmavých lokalit s pěknými pozorovacími podmínkami, instalovat přístroje a pozorovat (pokud se mezi tím nezatáhne). S časem se samozřejmě dostaví potřeba tuto činnost z pohodlnit. Mnoho kolegů z oblasti pozorovatelů proměnných hvězd časem zjistilo, že není nad stálé stanoviště s možností okamžité práce s přístroji. K tomu nezbytně patří i nějaká malá budova či kopule, která chrání drahocenné přístroje. V mém případě i z tohoto hlediska mám velkou výhodu, neboť bydlím 350 m od kopule hvězdárny. Z toho vyplývají i výsledky statistiky, kdy mám v průměru cca 100-110 pozorovacích nocí (i když ne třeba celých).

Chápu, že v případě mé osoby se sešlo několik šťastných okolností, které mi umožňují věnovat se práci na hvězdárně a věnovat se kromě jiného pozorovatelské činnosti. Nicméně si myslím, že člověk skutečně zapálený pro danou věc je ochoten podstoupit určité obtíže a překonat překážky, aby se mohl věnovat své oblíbené činnosti.

Příprava pozorování

V této části předpokládáme, že pozorování bude prováděno pomocí CCD kamery. Příprava před nadcházející pozorovací nocí se sestává z několika kroků. V případě pozorování zákrytových dvojhvězd je důležité **vyhledání objektu zájmu**. Zpravidla se snažíme najít zajímavý objekt, který podle O-C diagramu vykazuje nějaké krátkodobé nebo dlouhodobé změny. To může být způsobeno několika faktory – přítomnost třetí hvězdy, excentrické oběžné dráhy, rotační nesouosost s rovinou oběžné dráhy dvojhvězd, případná aktivita na některé hvězdě. Takové případy jsou zajímavé z hlediska poznání stavby hvězd, jejich vnitřní struktury a ověření fyzikálních zákonů u vzdálených objektů.

Z předpovědi předpokládaného času minima jasnosti (tedy zákrytu) určíme **optimální pozorovací interval**. Zde záleží na délce orbitální periody, hloubce změny jasnosti (amplitudě) a zastávky v minimu (důsledek rozdílných velikostí hvězd v systému). Optimální je zachytit celou světelnou křivku, tedy i mimo zákryt, ale v některých případech je to velmi obtížné. Běžně se sleduje dostatečná část sestupné a vzestupné světelné křivky, podle které se dá určit dostatečně přesně okamžik zákrytu dvojhvězdy.

Příprava techniky před pozorováním spočívá ve vychlazení kamery, kdy se spouští aktivní chlazení CCD Peltierovými články, které udržuje čip hluboce zmrazený, aby byl minimalizován tepelný šum (u nových kamer lze dosáhnout až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ oproti okolní teplotě). Tuto proceduru se doporučuje provádět 1 – 2 hodiny před začátkem pozorování (zajistí se tak rovnoměrné vychlazení čipu a případně vymrazení vlhkosti na povrchu čipu).

Nastavení dalekohledu na patřičné hvězdné pole je dalším krokem. Prvním krokem je pořízení potřebné mapky s okolím kolem proměnné hvězdy. K tomu je možné použít různé elektronické hvězdné katalogy a mapy.

Nastavení dalekohledu na proměnnou hvězdu je možné provádět několika způsoby. Prvním je vizuální nastavení pomocí hledáčku – dalekohledu s kratší ohniskovou vzdáleností, kde se pozorovatel snaží nastavit zorné pole podle vyhledávací mapky. V tomto případě je ovšem nutná znalost noční oblohy a dobrá orientace na obloze. Pokud je k dispozici dalekohled s dělenými kruhy, je možné hvězdu nastavit podle jejích souřadnic – rektascenze a deklinace. Zde je nutné mít také k dispozici výpočet místního hvězdného času. Poloautomatické montáže dalekohledů dnes umožňují nastavení daleko pohodlnější. Po procesu zjišťování montáže stačí navolit patřičné souřadnice do ovladače a dalekohled najede na pozici automaticky.

Nastavování dalekohledu bude praktickou součástí semináře.

Výsledek pozorování a jejich zpracování

Další praktickou ukázkou bude zpracování snímků pomocí programu *Muniwin*. Tento program sestává z několika podprogramů pro zpracování, redukci a fotometrii proměnných hvězd. Intuitivní a jednoduché ovládání programu je velkým přínosem pro všechny astronomy zabývající se fotometrií proměnných hvězd.

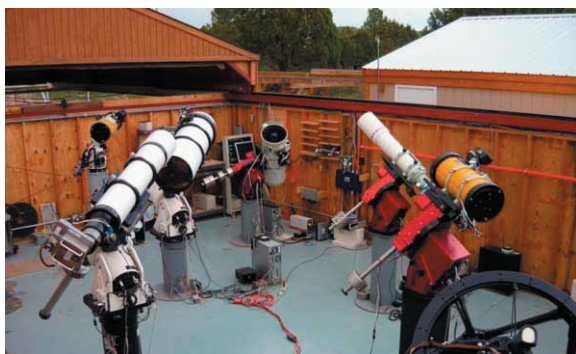
Další možnosti

S rozvojem elektroniky a internetu se objevují pro pozorovatele další zajímavé možnosti. V současné době vznikají na různých místech ve světě pozorovací stanoviště, kde si můžete rezervovat dalekohled a **provádět pozorování na dálku**.

Mezi ně patří například projekty *Global rent a scope* nebo *Sierra stars observatory*. Drobnou nevýhodou je, že se jedná o placené služby, o horentní sumy se však nejedná. I když na pozorování se může čekat delší doba, pozorovatelný jsou stavěny v lokalitách, kde je během roku převaha jasných nocí.



Obrázek 1 - Světelná křivka zákrytové dvojhvězdy EW Del. Díky krátké periodě bylo možné během jedné noci zachytit sekundární i primární minimum. Na vodorovné ose je zobrazen čas v juliánském datování, na svislé ose relativní změna jasnosti v magnitudách.



Obrázek 2 - Sestava dalekohledů pro pozorování na stanovišti *Global rent a scope*.

3. Základní principy a metody fotometrie

Jaroslav Trnka, Hvězdárna ve Slaném a Sekce proměnných hvězd a exoplanet ČAS

Fotometrií rozumíme specializovanou oblast vědy, která se **zabývá měřením toku a intenzity světla v nejrůznějších částech elektromagnetického spektra**. Název „fotometrie“ vznikl spojením dvojice latinských slov - *photos* (světlo) a *metron* (měřit). V současnosti patří fotometrie k nezákladnějším pilířům observační astronomie. Fotometricky je možné pozorovat všechny objekty na obloze – hvězdy, planety, asteroidy, komety, mlhoviny i galaxie. Fotometrie není obor výhradně astronomicky zaměřený, nýbrž setkáváme se s ní například v elektrotechnice, výpočetní technice, stavebnictví apod.

Úlohou fotometrie v astronomii je měření prostorového rozložení světla objektů emitovaného v různých částech spektra, monitorování objektů ve vybrané části spektra s cílem zaznamenat změny jasnosti a porozumět fyzikální podstatě těchto změn.

Hlavním zdrojem informací o povaze sledovaných objektů (proměnných hvězd) je jejich **světelná křivka - závislost jasnosti na čase**. Proměnnou veličinu – **jasnost** – blíže specifikujeme. Elektromagnetické záření přenáší důležité informace o hvězdách, bez nich bychom tyto objekty nemohli studovat. **Elektromagnetické záření** je podle kvantové teorie tvořeno fotony. Fotony se počítají mezi ostatní elementární částice, jako jsou elektrony nebo protony, a proto je můžeme popisovat stejnými fyzikálními charakteristikami. **Fotony** jsou v současném pojetí částice intermediální (částice pole) a zprostředkovávají elektromagnetickou interakci. Fotony se od sebe liší kmitočtem. Sítnice oka je citlivá na fotony o energii kolem 2 eV, které v ní vyvolávají pocit barvy. Světlo ale představuje velmi úzký interval z ohromného rozsahu elektromagnetického záření - fotonů s energií blízkou nule až po více než miliarda eV. Každý foton obsahuje určité množství energie, které je tím větší, čím větší je kmitočet fotonu f . Pro energii fotonů platí vztah $E = h \cdot f$, kde h je tzv. Planckova konstanta: $6,626 \times 10^{-34}$ J.s.

Hvězdy považujeme za zdroje elektromagnetického záření, které do prostoru září izotropně – rovnoměrně ve všech směrech. **Celkový zářivý výkon** (zářivý tok) zdroje odpovídá celkové energii vyzážené ve všech vlnových délkách za jednotku času. Buďto je vyjádřen ve watttech nebo v zářivých jednotkách tzv. nominálního Slunce $L_S = 3,846 \times 10^{26}$ W.

V souvislosti se zářivým výkonem se též můžeme setkat s veličinou **bolometrická intenzita záření**, což je zářivý tok vysílaný do prostorového úhlu o velikosti 1 steradiánu a jednotkou $W \times m^{-2} \times sr^{-1}$. Hustota zářivého toku, který za sekundu projde 1 m^2 plochy kolmo nastavené ke směru přicházejících paprsků, nazýváme **bolometrickou jasností**. Hustotu zářivého toku vyjadřujeme

jednotkou $W \times m^{-2}$. Měření hustoty zářivého toku přicházejícího od hvězd patří k neobtěžnějším astrofyzikálním úlohám, neboť tu jde zpravidla o nesmírně nízké toky, které je navíc nutno registrovat v celém rozsahu elektromagnetického spektra. Pomineme-li instrumentální komplikace týkající se nestejné spektrální citlivosti detektorů záření, pak hlavní překážku představuje zemská atmosféra, která je pro řadu oborů elektromagnetického spektra prakticky nepropustná. Výsledky měření je pak nutno o vliv propustnosti atmosféry opravit nebo přímo vést pozorování z kosmického prostoru. Pozorovaný tok záření je závislý na více parametrech. Jedná se například o propustnost filtrů, kvantovou účinnost detektoru, kvantovou účinnost optiky, propustnost atmosféry a kvalita pozorovacích podmínek (seeing, oblačnost, vzdušná hmota).

Dalším, tentokrát neodstranitelným vlivem zkreslujícím naše měření, je zeslabení světla hvězdy působením mezihvězdné látky nacházející se mezi hvězdou a námi. I z tohoto důvodu se v řadě astrofyzikálních aplikací místo bolometrických veličin, zahrnujících v sobě celý rozsah elektromagnetického spektra, **používají veličiny vztahující se jen na jistý obor elektromagnetického záření vymezený zpravidla vybraným filtrem s přesně definovanou propustností**. Mezi množstvím používaných oborů (fotometrických barev) zaujímá zvláštní postavení vizuální obor, definovaný **filtrem V** s propustností, jež odpovídá spektrální citlivosti lidského oka v denním (fotopickém) režimu vidění: maximum propustnosti filtru leží u 550 nm, efektivní šířka filtru činí 89 nm. Hustota zářivého toku v barvě V se tak přímo ztotožňuje s hustotou světelného toku - jasnosti. Jednotkou jasnosti je v principu $W \times m^{-2}$, jasnost lze ovšem také vyjadřovat ve speciálních jednotkách zavedených pro světlo 1 lumen $\times m^{-2}$. Podobně lze zavést další nevizuální jasnosti definované vždy jako hustoty zářivého výkonu po průchodu určitým filtrem.

Astronomové z tradičních i praktických důvodů vyjadřují jasnost zdroje záření pomocí tzv. **hvězdné velikosti** vyjadřované v jednotkách zvaných **magnitudy**. Hvězdná velikost m je logaritmická veličina svázaná s příslušnou jasností tzv. **Pogsonovou rovnící**. Pomocí tohoto vztahu můžeme určit naměřenou diferenciální instrumentální jasnost proměnné hvězdy, přičemž změřené veličiny proměnné a srovnávací hvězdy jsou veličiny závislé na jejich jasnosti. Čili může to být například výpočet pulzů na výstupu fotonásobiče, propustnost fotografické desky, počet analogových jednotek na CCD detektoru.

Vše tedy vychází ze základního předpokladu, že porovnáváme jasnosti dvou (případně většího počtu) hvězd. Jedna z nich je zkoumaná hvězda a druhá je tzv. **srovnávací hvězda**. O této předpokládáme, že její jasnost je dlouhodobě konstantní. Tato metoda fotometrie se nazývá fotometrie diferenciální, při níž není hlavním cílem změřit absolutní jasnost zkoumaného objektu, nýbrž rozptýl jasnosti mezi dvěma měřenými objekty (hvězdami). Absolutní jasnosti objektů a barevné indexy můžeme měřit, jestliže známe extinkční koeficient v oboru, ve kterém měříme.

Rozdílem instrumentálních a skutečných jasností kalibračních hvězd při určité optické hmotě opravíme instrumentální jasnosti měřených objektů na skutečné magnitudy.

K nevýznamnějšímu vlivu na přesnost výsledku diferenciální fotometrie patří bezpochyby **výběr srovnávacích hvězd**. Výběr srovnávacích hvězd provádíme zpravidla dvěma způsoby: buď přímo u dalekohledu při pozorování, nebo předem s pomocí katalogů. To platí jak při vizuálním pozorování, tak i CCD snímkování. Pro přesnější práci je pochopitelně výhodnější druhý způsob, neboť v katalogu nalezneme také další, velmi zajímavé údaje.

Nejužívanějším detektorem světla je v současné době **CCD detektor** (Charge Couple Device). Hlavní výhodou oproti například fotometrům a fotografickým deskám tkví v tom, že umožnil pozorování slabších objektů i pomocí menších dalekohledů a tato citlivost je navíc rozložena i mimo optický obor. CCD plošný zobrazovací detektor, složený z tzv. **pixelů**, zaznamenává obraz vytvořený v ohniskové rovině objektivem dalekohledu. Uplatnění má například ve videokamerách, digitálních fotoaparátech, faxech, scannerech, čtečkách čárových kódů, ale i v řadě vědeckých přístrojů, jakými jsou například astronomické dalekohledy (včetně například Hubbleova teleskopu). CCD bylo vynalezeno roku 1969 v Bellových laboratořích a na jeho objevení se podíleli pánové Willard Boyle a George E. Smith. Za tento svůj objev obdrželi v roce 2009 Nobelovu cenu za fyziku. Vynález se váže k vývoji určitého typu paměťového registru, který v podstatě funguje jako CCD bez přístupu světla, respektive CCD není nic jiného než posuvný registr vystavený působení světla. Od roku 1983 se CCD používají v astronomických dalekohledech, čímž přinášejí obrovský průlom do observační astronomie.

CCD využívá podobně jako všechny ostatní světlocitlivé součástky fyzikálního jevu známého jako **fotoefekt**. Tento jev spočívá v tom, že foton při nárazu do atomu dokáže vybudit některý z jeho elektronů ze základního do excitovaného stavu. Odevzdá mu přitom energii $E = h \cdot f$. CCD detektory sice nejprve vznikly jako experimentální počítačové paměti, ale jejich schopnost převádět světlo na elektrický signál z nich udělala nejlepší známé detektory světla. **Základní princip** práce CCD je poměrně jednoduchý - přicházející světlo vytváří v polovodiči elektrický náboj (elektrony). Elektrony se nemohou volně pohybovat po čipu, neboť na čipu jsou vytvořeny svislé negativní potenciálové valy (odpuzející elektrony). Systém vodorovných elektrod, rovněž s negativním nábojem, vytváří na čipu mřížku tzv. „potenciálových studní“, z nichž elektrony nemohou uniknout. Každá potenciálová studna vytváří - reprezentuje jeden obrazový bod (tzv. **pixel** z anglického *picture element*), tedy nejmenší čtvereček obrazu. Počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru stejně jako velikost pixelu tvoří jedny z nezákladnějších charakteristik CCD čipu. Pixely vystavené většímu množství

světla naakumulují více elektronů a naopak. Jedna ze základních výhod CCD čipů ve srovnání s lidským okem tedy je schopnost akumulace náboje po dlouhou dobu. CCD tak mohou postupně nashromáždit dostatek světla i z velmi slabých světelných zdrojů. Jak již bylo řečeno, CCD čip je pokryt sítí elektrod, která udržuje světlem uvolněné elektrony v pixelech. Ale struktura elektrod je poněkud komplikovanější. Pokud se na elektrody přivede různé napětí, elektrony mohou být „přelévány“ z jedné nábojové studny do sousední. Tak je možné náboj posouvat po ploše čipu. Tento proces je používán v případě, kdy je potřeba informaci z CCD čipu vyčistit. Balíky elektronů, reprezentující jednotlivé pixely, jsou posouvány do výstupního zesilovače, kde je elektrický náboj převeden na napětí. Toto napětí se objeví na výstupním pinu CCD čipu. Elektronika kamery pak musí toto napětí změřit (převést na číslo pomocí analogově/digitálního převodníku, anglicky Analog/Digital Converter - ADC) pro každý pixel. Informace o náboji akumulovaném v každém pixelu (a tedy o množství světla, která do každého pixelu dopadlo) tvoří datový soubor reprezentující obrázek.

V současnosti lze říci, že existují dvě základní metody na získávání fotometrické informace ze snímku hvězdného pole: **aperturní a profilová fotometrie**. V případě aperturní fotometrie jde o sečtení veškerého signálu od daného objektu v uměle vytvořené clonce (apertuře). Clonka bývá zpravidla kruhová. Základním krokem této metody je především vymezení velikosti apertury a odečtení všech rušivých dodatečných zdrojů světla. Standardně je aperturní fotometrie implementována v CMUNIPACKu. Profilová fotometrie, stejně jako fotometrie aperturní, přináší informaci o hvězdné velikosti objektů. Profilová fotometrie využívá PSF (*point spread function*), respektive snaží se vystihnout tvar obrazu bodového zdroje na snímku. Na základě znalosti tohoto tvaru lze odhadnout celkový tok energie záření.

Největší **přesnost** jednoho CCD fotometrického měření při použití menšího dalekohledu a několikaminutové expozice se pohybuje okolo **0,003 mag**. Určitou nevýhodou CCD fotometrie je malý rozměr detektoru, čili proto je nutné záběry většího pole skládat z několika snímků. CCD detektor je schopen registrovat velmi nízké hodnoty zářivého toku, ale v případě jasných hvězd dochází k tzv. přetečení snímku, kdy v detektoru dochází k uvolnění přílišného množství elektronů, z nichž se část přesouvá do vedlejších pixelů – tzv. *blooming*.

Nevýhodou CCD technologie je fakt, že elektrony vznikají v pixelech nejen v důsledku dopadajícího světla, ale také náhodně v závislosti na okolní teplotě, velikosti pixelu, architektuře čipu a výrobní technologii. Tento tepelně generovaný náboj bývá nazýván „temný proud“ (generuje signál, i když čip je zcela ve tmě) nebo také tepelný šum. **Temný proud** je obvykle vyjádřen v elektronech za sekundu na pixel při definované teplotě. Pozitivní věc na temném proudu je, že je za daných podmínek stále stejný (nebo velice podobný). Pokud přečteme z kamery obraz

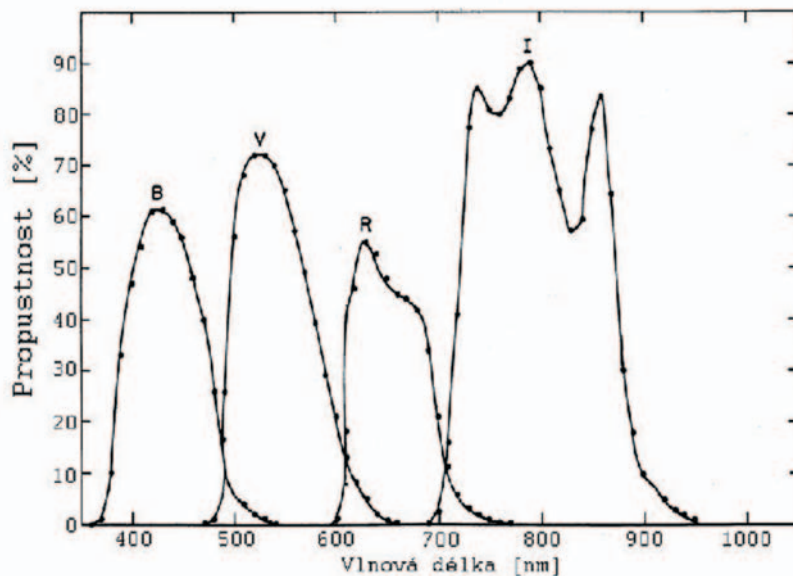
nějakého astronomického objektu, bude obsahovat signál generovaný osvětlením i signál generovaný temným proudem. Je ale možné provést tu samou expozici ještě jednou, ale s uzavřenou závěrkou. Takový obraz bude obsahovat pouze signál generovaný temným proudem - nazýváme jej temný snímek (dark frame). Poté je možné oba snímky prostě odečíst a tím obraz generovaný temným proudem vyrušit.

Vliv multiplikativního šumu a nerovnoměrného osvětlení detektoru odstraníme následným podělením snímku zprůměrovaným **flat-fieldem** (tzv. master-flat), od kterého byl již předtím také odečten temný snímek, což je snímek rovnoměrně osvětlené plochy (oblohy) za soumraku nebo za úsvitu, kdy není ještě natolik jasná, aby hrozilo přesvětlení detektoru. Flat-field musí být opět pořízen za stejných podmínek jako vlastní snímek; pokud používáme více barevných filtrů, musí být pořízen zvlášť pro každý z nich.

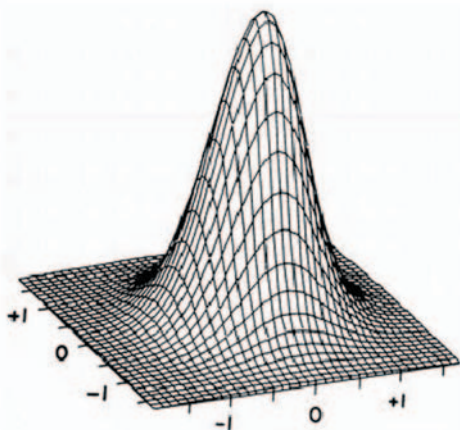
Důležitou součástí CCD detektorů jsou **barevné fotometrické systémy**. Fotometrická metoda je založena na pozorování hvězd pomocí přesně definovaných sad spektrálních filtrů a citlivých detektorů. Výsledkem je základní klasifikace spektra hvězdy, určení její efektivní vlnové délky - vlnové délky dominantní barvy hvězdy, která přibližně odpovídá efektivní teplotě jejího povrchu. Aby soubor barevných magnitud a příslušných barevných indexů dával co nejlepší informace o zkoumaném zdroji záření, je potřeba vhodně zvolit rozsah a upořádání používaných filtrů. Značná různorodost pozorovaných objektů spolu s rozmanitostí astronomických detektorů (danou přirozeným historickým vývojem, technickými i finančními možnostmi jednotlivých observatoří) tak vedla ke vzniku velkého množství definovaných uskupení filtrů, tzv. fotometrických systémů.

Nejvíce fotometrických měření bylo vykonáno v tzv. **širokopásmovém standardním (Johnsonově nebo mezinárodním) fotometrickém systému** a jeho dlouhovlnném rozšíření. Speciální filtry zde udávají jasnosti v barvě **U** (365 nm), **B** (440 nm), **V** (550 nm), **R** (700 nm), **I** (900 nm), **J** (1250 nm) atd. Měřením jasnosti hvězd v řadě fotometrických barev si lze učinit uspokojivou představu o celkové hustotě zářivého výkonu F i o rozložení energie ve spektru hvězd, které je funkcí jejich povrchové teploty.

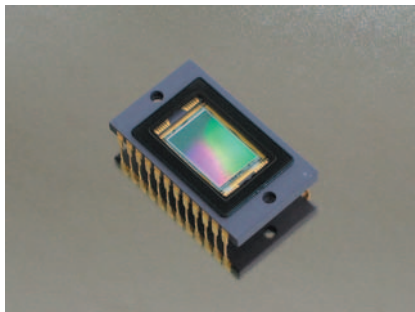
Nevýhodou tohoto systému je jeho značná šířka pásem, proto byl v 60. letech 20. století vytvořen **středněpásmový systém (Strömgrenův) uvby**, který má maxima propustnosti po řadě 350 nm, 410 nm, 465 nm, 545 nm, s šířkou pásem od 15 do 35 nm. Existují i další systémy (např. ženevský nebo vlastní systém družice Hipparcos atd.). Při měření v jakémkoliv systému je nezbytná znalost vzájemné transformace, zejména transformace do standardního systému UB V , který tvoří nejširší bázi pro porovnávání výsledků pozorování.



Obrázek 1 - Johnsonův UBV fotometrický systém byl rozšířen do červené a do infračervené oblasti spektra. Přidáno bylo několik širokospektrálních filtrů. Konkrétně R (700 nm), I (900 nm), J (1 250 nm), K (2 200 nm) a L (3 400 nm). Velmi častou používanou kombinací je BVRI systém, jehož charakteristika je na obrázku.

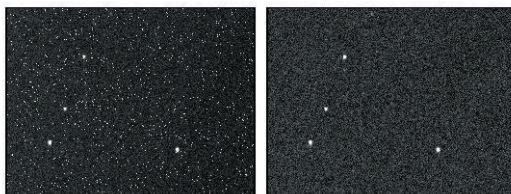


Obrázek 2 - Profilová fotometrie je metoda založená na hledání dostatečně přesného tvaru rozložení bodového zdroje na snímku, neboli „Point spread function“ neboli „funkce bodového rozložení“. Nejjednodušší aproximací této funkce je Gaussova funkce. Na obrázku je příklad možného vzhledu takové funkce.



Obrázek 3 - CCD je elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace. Zkratka CCD pochází z anglického Charge-Coupled Device, což v překladu znamená zařízení s vázanými náboji. Na obrázku je 1,6 MPx CCD čip Kodak KAF-1603ME.

Obrázek 4 - Neredukovaný snímek a výsledný snímek pro kameru SBIG ST-5.



4. Pozorování exoplanet pro každého

Bc. Luboš Brát, předseda Sekce proměnných hvězd a exoplanet ČAS

1. Historické mezníky

- 1992, dvě exoplanety u pulsaru 1257+12 (Vir), první objevené exoplanety (terestrické!)
- 1995, 51 Pegasi, první „horký jupiter“ a zároveň první exoplaneta kolem hvězdy na hlavní posloupnosti
- 1999, HD209458 b, první tranzitující exoplaneta
- 2004, gravitační mikročočka, OGLE-2003-BLG-235Lb
- 2008, první přímé zobrazení Folmahaut b, HR 8799 b, c, d

2. Způsoby detekce exoplanet

- metoda časování pulzů
- metoda měření radiálních rychlostí
- metoda tranzitní fotometrie
- přímé zobrazení
- gravitační mikročočky

- astrometrická metoda
- zárodečné disky
- LTE v zákrytové dvojhvězdě (HW Vir, NN Ser, HU Aqr)

3. Tranzit exoplanety a jeho parametry

Tranzit charakterizují 3 základní parametry, z nichž každý nám dává jinou informaci o systému:

- okamžik středu tranzitu,
- délka trvání,
- hloubka poklesu,
- impact faktor určuje polohu na disku hvězdy, kudy tranzituje planeta. Hodnoty 0,0 (planeta jde přes střed disku) až 1,0 (tečný tranzit).

4. Co nám tranzity umožňují měřit

- **Hloubka tranzitu** => R_p [R_{Jup}] – poloměr planety

Určuje se z hloubky změřeného tranzitu, relativně vůči poloměru hvězdy, při znalosti rozměrů hvězdy => absolutní hodnota v km (většinou jednotky R Jupiteru).

$$\Delta F = \frac{F_* - F_t}{F_*} = \frac{\pi R_*^2 I_* - (\pi R_*^2 I_* - \pi R_p^2 I_*)}{\pi R_*^2 I_*} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Změna zářivého toku se vypočte z amplitudy v magnitudách pomocí Pogsonovy rovnice $dm = -2.5 \times \log(I_1/I_2)$.

- **Délka tranzitu** => inklinace i [$^\circ$]

Určuje se ze změřené doby a hloubky tranzitu, nutná znalost poloměru hvězdy, za pomoci Pythagorovy věty a algebraických úprav goniometrických funkcí \sin a \cos .

$$i = \arccos \sqrt{\frac{(R_* + R_p)^2}{a^2} - \sin^2 \frac{\pi t_z}{P}}$$

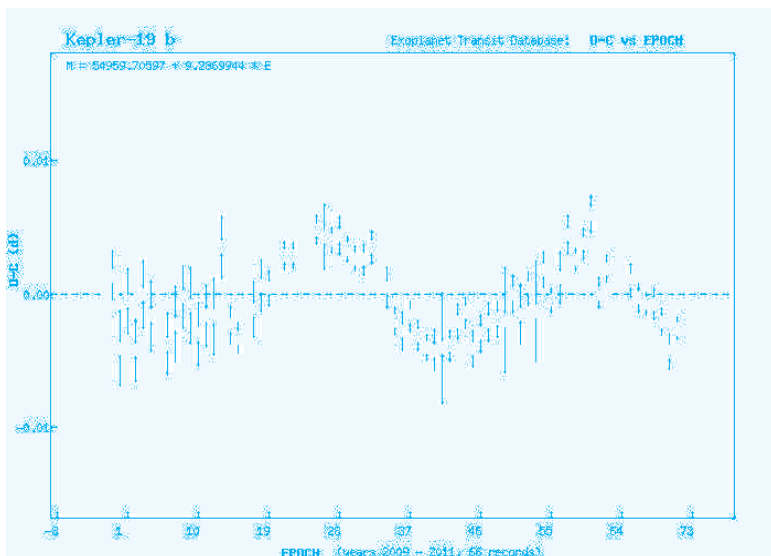
- **Okamžik středu tranzitu** => TTV diagram

TTV (*transit timing variations*), odchylky od přesné periodicity

Příčiny vzniku TTV:

- Light Time Effect (LTE);
- Skutečné kolísání periody způsobené gravitačním působením druhé planety (či planet) v rezonanci;

- Stáčení eliptické dráhy
 - o musí být doprovázeno změnami v délce tranzitu
 - o sekundární tranzity musí vykazovat změny v protifázi
- Přítomnost exoměsíce;
- Změny polohy mateřské hvězdy (ve vícenásobných systémech, Kepler-16).



- **Spektroskopie tranzitů** => Rossiter-McLaughlinův efekt

Sklon orbity exoplanety k rovníku hvězdy – obdoba sklonu orbity k rovině ekliptiky ve Sluneční soustavě. Neplést se sklonem orbity ke směru k Zemi – inklinaci. Lze zjistit z přesného měření RV během tranzitu.

5. Fotometrie tranzitů v praxi

Dostupné pro lépe vybavené amatéry a lidové hvězdárny.

- Nároky na vybavení:
 - o dalekohled o průměru od 3 cm výše
 - o CCD kamera
 - o paralaktická montáž nejlépe s autoguidingem
- Nároky na lokalitu pozorování:
 - o Téměř žádné – lze i z velkoměsta, je třeba vhodný výběr dalekohledu (delší ohnisko vykompenzuje světlou oblohu) a odstínění parazitního světla.

6. Dalekohled

V závislosti na pozorovacích podmínkách je třeba volit ohnisko. Z města (světelně znečištěná obloha) – ohniska $f/8$ až $f/11$. Venkov, hory (tmavá obloha) – ohniska $f/4$ až $f/6$. Průměr čím větší, tím lépe.

- nejmenší dalekohled – 3 cm v průměru;
- nejčastěji 20 cm v průměru;
- nejlépe 30 a více cm v průměru.

Rosnice o délce $2\times - 3\times$ průměr objektivu, nutné hlavně ve městě, odstranění parazitního světla.

7. Montáž

Musí být paralaktická, nikoliv azimutální. Jsou dvě možnosti: A) Německá montáž – výhoda v univerzálnosti. B) Vidlicová je ideální – není potřeba prokládat montáž po průchodu meridiánem.

Základní a nepřekonatelný požadavek – minimální nebo žádný drift snímaného pole po snímcích během měření. Musí být tedy dokonale polárně ustaveno, měla by být co nejmenší periodická chyba. Velká výhoda je možnost autoguidingu.

8. CCD kamera

Ideální CCD kamera by měla mít následující parametry:

- bez antibloomingu (NABG);
- 16 bitový AD převodník (rozsah odstínů šedi 65 tisíc úrovní);
- s regulovaným chlazením Peltierovými články;
- moderní citlivý čip (s mikročočkami zvyšujícími citlivost);
- rychlé USB 2.0 vyčítání;
- velký čip, aby bylo možné kameru použít i na větších ohniscích;
- na měření tranzitů není potřeba fotometrický filtr, ideální je „clear“ s maximálním ziskem signálu.

V praxi však lze používat i jednodušší vybavení:

- lze použít i levnou guidingovou kameru G1 či ATIC nebo jen DSLR;
- neporušitelná podmínka – znalost oblasti linearity kamery (a měřit jen v ní).

9. Kvalitní fotometrický snímek

Nesmí být příliš zaostřeno. Dokonalé zaostření nese s sebou nevýhody. Rychlá saturace signálu. Malý průměr hvězdy v pixelech, a tedy malá statistika a větší rozptyl dat. Jedině dostatečný poměr S/N (signál/noise) zaručí vysokou přesnost fotometrie.

Obecné pravidlo – na co největším počtu pixelů musí být co nejsilnější signál => kvalitní fotometrie.

Vliv expoziční doby – proměnný seeing způsobuje zvětšení rozptylu u krátkých expozic (řádově sekundy), při delších expozicích (minuty) dosahujeme několikanásobně vyšší přesnosti, má pak v průměru stejný vliv na signál. Nejkratší přijatelná expozice je 15 s.

Nelze ale prodlužovat expozice příliš. Nejdelší přijatelná expozice 180 s. Při dlouhých expozicích je ve světelné křivce málo bodů a roste chyba určení středu tranzitu – tranzit se nám „rozmazává“ v čase. Přitom právě hlavní výsledek měření má být okamžik středu tranzitu.

10. Postup při pozorování tranzitu

- 1) nalezení vhodného tranziteru podle předpovědi na var.astro.cz;
- 2) spustit snímkování minimálně 1 hodinu před začátkem a snímkovat minimálně 1 hodinu po konci tranzitu;
- 3) zvolte expozici tak dlouhou, aby byl signál měřené hvězdy a alespoň jedné srovnávací hvězdy ve 2/3 použitelného rozsahu;
- 4) expozice by neměly být kratší než 15 s, pokud je hvězda přeexponována, rozostřete ji;
- 5) při ohnisku pod 60 cm je rozostřování nutnost! Nad 1 m se o to postará seeing;
- 6) pokud musíte během pozorování proložit dalekohled na německé paralaktické montáži, udělejte to tak, aby nebyla „zasažena“ sestupná a vzestupná větev (ingress a egress);
- 7) pokud pozorujete v místě, kde jsou umělé světelné zdroje, použijte dlouhou rosnici k odstranění tzv. červeného šumu;
- 8) zpracování dat běžným způsobem v Muniwinu;
- 9) upload dat do fitovací procedury <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>.

11. Metody zvýšení přesnosti fotometrie

Existuje několik triků, jak **zvýšit kvalitu fotometrie**, snížit rozptyl dat a minimalizovat hrubé chyby v určení středu tranzitu. Jedná se především o:

- skládání tranzitů (za pomoci fitovací procedury TRESKA);
- použití více srovnávacích hvězd (průměrování křivky tranzitu z více detrendovaných křivek vůči více srovnávacím hvězdám v poli);
- použití více dalekohledů (vážené průměrování dat paralelního pozorování tranzitu více dalekohledy);
- více aperturová fotometrie (vykreslení světelné křivky pro více různých velikých aperturních clon – v programu Muniwin).

Obsah

1. Mechanizmy hvězdné proměnnosti	1
A. GEOMETRICKÉ proměnné hvězdy	1
B. FYZICKÉ proměnné hvězdy	2
2. Pozorování proměnných hvězd	7
Úvod	7
CCD fotometrie ve Valašském Meziříčí – z pohledu pozorovatele	8
Současné možnosti pozorování proměnných hvězd na HVM	9
Příprava pozorování	10
Výsledky pozorování a jejich zpracování	11
Další možnosti	11
3. Základní principy a metody fotometrie	13
4. Pozorování exoplanet pro každého	19
1. Historické mezníky	19
2. Způsoby detekce exoplanet	19
3. Tranzit exoplanety a jeho parametry	20
4. Co nám tranzity umožňují měřit	20
5. Fotometrie tranzitů v praxi	21
6. Dalekohled	22
7. Montáž	22
8. CCD kamera	22
9. Kvalitní fotometrický snímek	23
10. Postup při pozorování tranzitu	23
11. Metody zvýšení přesnosti fotometrie	23



Jako vzdělávací a metodický materiál vydala Hvězdárna Valašské Meziříčí, p. o.

© 2011, Hvězdárna Valašské Meziříčí, p.o., Vsetínská 78, 757 01 Valašské Meziříčí

Autoři: Luboš Brát, Ladislav Šmelcer, Jaroslav Trnka

Grafika a sazba: Libor Lenža

Vytiskla: Trikolora, s.r.o. Valašské Meziříčí

Materiál byl vydán v rámci projektu *Kooperující síť v oblasti astronomických odborně-pozorovatelských programů*. Partnery projektu jsou Hvězdárna Valašské Meziříčí, p. o. Zlínského kraje a Kysucká hvězdárna v Kysuckom Novom Meste.

Neprodejne!

Tento mikroprojekt je spolufinancován Evropskou unií, z prostředků Fondu mikroprojektů spravovaného Regionem Bílé Karpaty