

Vlivy atmosféry na CCD pozorování

(Lenka Šarounová, CCD setkání 18.–19. 3. 2000)

proč pro fotometrii používáme filtry a jak dělat kalibrace

Pozorování z povrchu Země ovlivňuje atmosféra a to velmi proměnlivým způsobem. Jaký tento vliv je, to není většinou jednoduché zjistit během pozorování, protože nevíme, jaká je jasnost a spektrum právě pozorovaného objektu (kdybychom to věděli, ten objekt bychom nepozorovali). Při pozorování se tedy snažíme měřit neznámé jasnosti a spektra přes atmosféru, která nějakým neurčitým způsobem ovlivňuje měření. Přesně vzato je to neřešitelný problém, ale při správném způsobu pozorování můžeme vliv atmosféry velmi výrazně potlačit, nebo aspoň odhadnout, jak se podílí na celkové chybě měření. To je hlavním cílem těchto lekcí. Na závěr se dozvíte ještě něco praktického o fotometrických filtrech.

Obsah

- co je atmosférická extinkce a jaké má vlastnosti
- jak extinkce závislá na vlnové délce ovlivňuje diferenciální fotometrii
- jak extinkci popisovat a měřit
 - pomocí jedné hvězdy
 - pomocí více hvězd
- jak dělat absolutní CCD fotometrii (kalibrace) v praxi
- jaké jsou vlastnosti fotometrických filtrů, a jak je možné jednoduše korigovat chyby způsobené nepřesnými profily
- na závěr: s čím je nutné si lámat hlavu
- Johnson-Cousins fotometrický systém
- co je to optická hmota

Extinkce v atmosféře

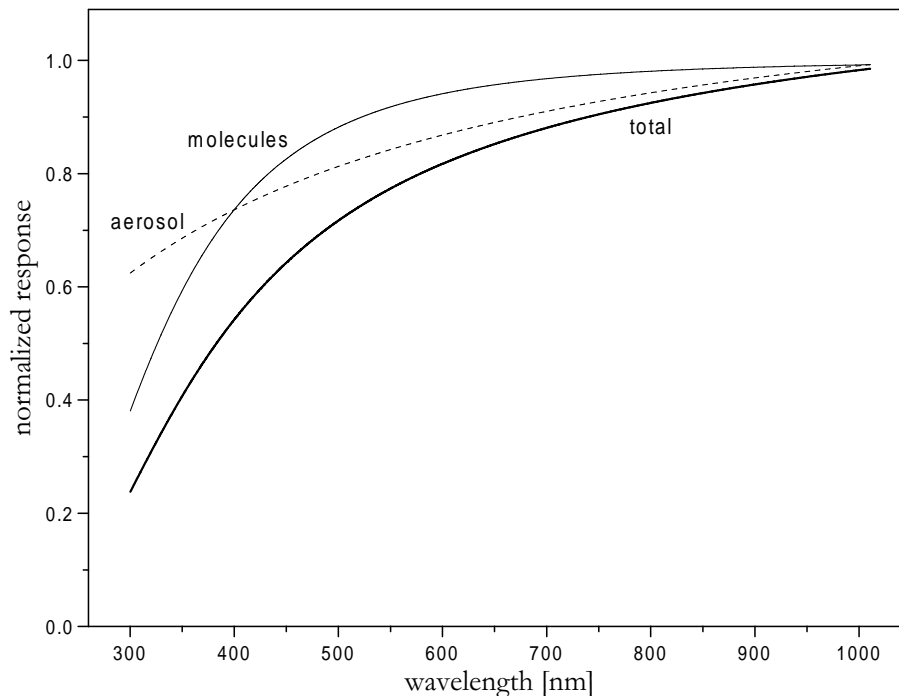
Intenzita záření se při průchodu světla atmosférou zeslabuje absorpcí a rozptylem. Souhrnně se tento jev nazývá **extinkce**.

Při absorpci je foton zachycen molekulou, jeho energie způsobí excitaci této molekuly nebo vede k jejímu rozkladu. Tato část extinkce se projevuje úbytkem záření na vlnových délkách charakteristických pro jednotlivé druhy molekul a vytváří ve spektru zdrojů absorpční čáry nebo pásy. V optickém oboru nejsou tyto čáry příliš významné pro astronomická fotometrická měření, zajímavé jsou snad jen pásy ozónu, jejichž intenzita se měří pro určení celkového množství ozónu v atmosféře.

Rozptylem se míní změna směru pohybu fotonu v důsledku srážky s atmosférickou částicí. Tyto částice mají různé velikosti a čím jsou menší, tím více je rozptyl na nich závislý na vlnové délce. V úplně čisté atmosféře se světlo rozptyluje na sluchých molekul vzduchu, a to přibližně úměrně λ^{-4} , což s dobrou přesností odpovídá Rayleighovu rozptylu. Barevná závislost rozptylu na pevných zrníčkách a malých vodních kapičkách řádově srovnatelných s vlnovou délkou světla se dá charakterizovat vztahem $\beta\lambda^{-\gamma}$, kde β je faktor turbidity (hodnota úměrná hustotě částic), a γ je parametr, který s rostoucí velikostí částic klesá. Za normálních okolností dosahuje hodnot kolem 1,3 (tomu odpovídá průměr částic zhruba 1 μm , ale při znečištění atmosféry většími částicemi, např. po výbuchu sopky, může nabývat hodnot i menších než 0,5, zatímco v místech ovlivněných průmyslovou činností produkující velmi malé částice je tento parametr i větší než 1,5. Rozptyl na velkých částicích nezávisí na vlnové délce.

Optické vlastnosti atmosféry jsou tedy složité a proměnlivé, obecně je popisuje teorie Mieova rozptylu a nedají se spočítat z nějakých snadno měřitelných veličin.

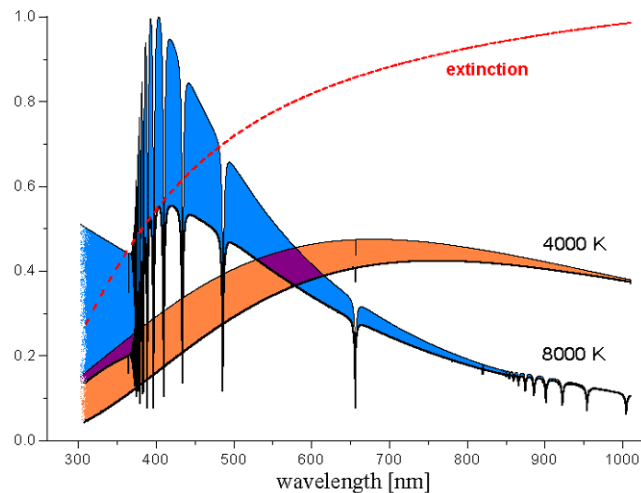
Extinkce je závislá na vlnové délce a způsobuje kromě úbytku energie dopadající do detektorů také zčervenání pozorovaných objektů (obr. 1), tj. zvyšování jejich barevného indexu. Proto, stejně jako jasnosti objektů, extinkci studujeme v barevných fotometrických systémech.



Obr. 1: Celková extinkce se dá rozdělit do dvou složek — Rayleighova rozptylu na molekulách, který je stálou vlastností atmosféry, a rozptylu na větších pevných a kapalných částicích (aerosolech), který je velmi proměnný; na obrázku je zachycena situace, která odpovídá měřením na 65cm dalekohledu Astronomického ústavu Ondřejov za poměrně kvalitních podmínek s vyšší průzračností atmosféry. Absorpce není brána v úvahu.

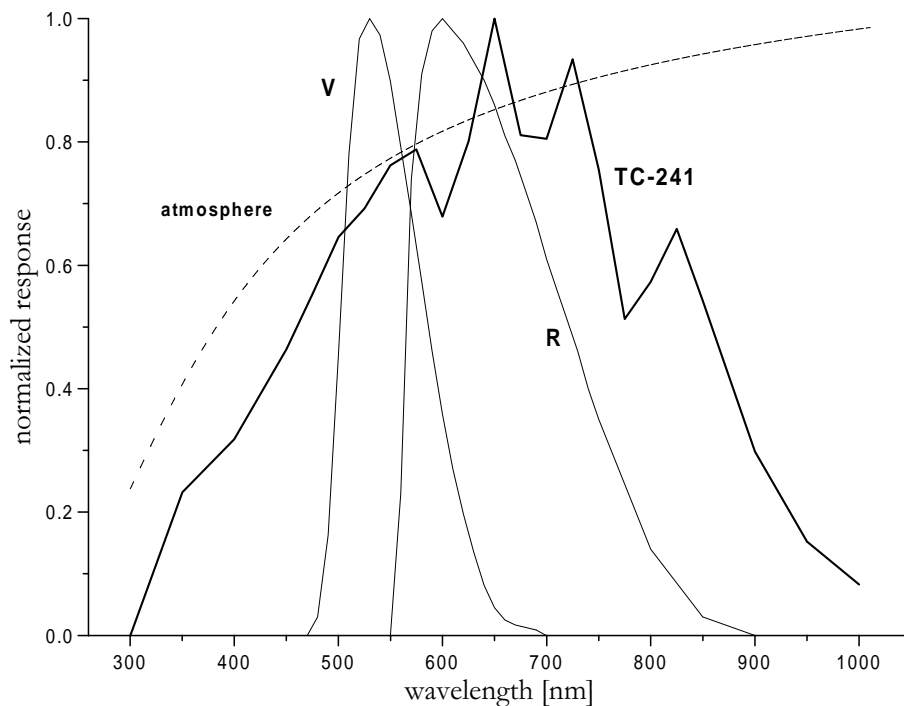
Vliv extinkce na diferenciální fotometrii

Tato barevná závislost extinkce má dopad i na diferenciální, relativní fotometrii. Nízko nad obzorem se červené hvězdy jeví relativně jasnější než ty modré, které mají maximum záření v modré oblasti spektra, kde je extinkce silnější (obr. 2). Světelné křivky budou tedy deformované.

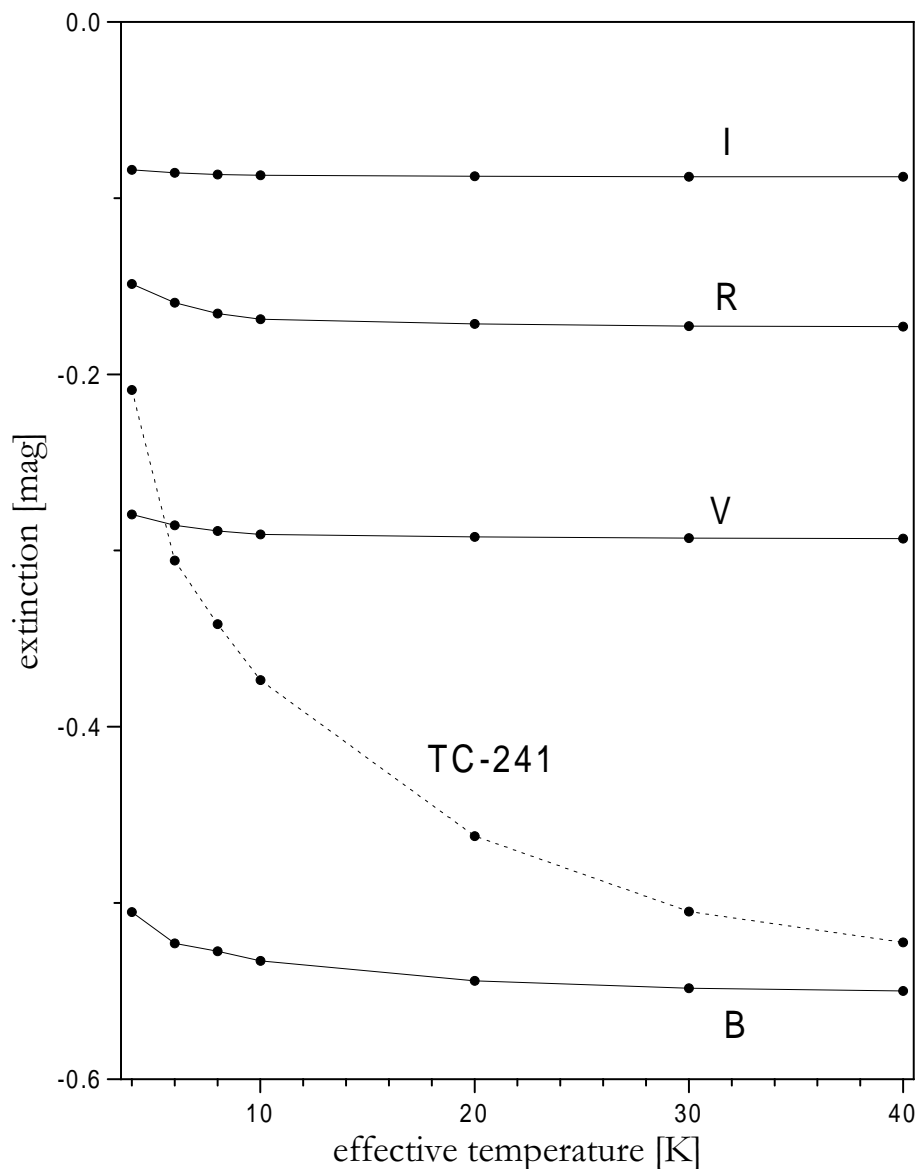


Obr. 2: Úbytek záření při kolmém průchodu světla atmosférou pro modelové hvězdy hlavní posloupnosti o teplotách 4 000 K a 8 000 K. Světlo modrých hvězd je za stejných okolností zeslabené více než u hvězd červených.

Aby relativní jasnosti hvězd při fotometrii lépe odpovídaly, pozorujeme přes **filtry**, které omezí rozsah citlivosti CCD na užší pásmo, kde poměry zeslabení světla různých barevných hvězd zůstanou zhruba konstantní (obr. 3), a zeslabení měřené v jakýchkoli fotometrických filtrech je výrazně méně závislé na barvě objektu (obr. 4).



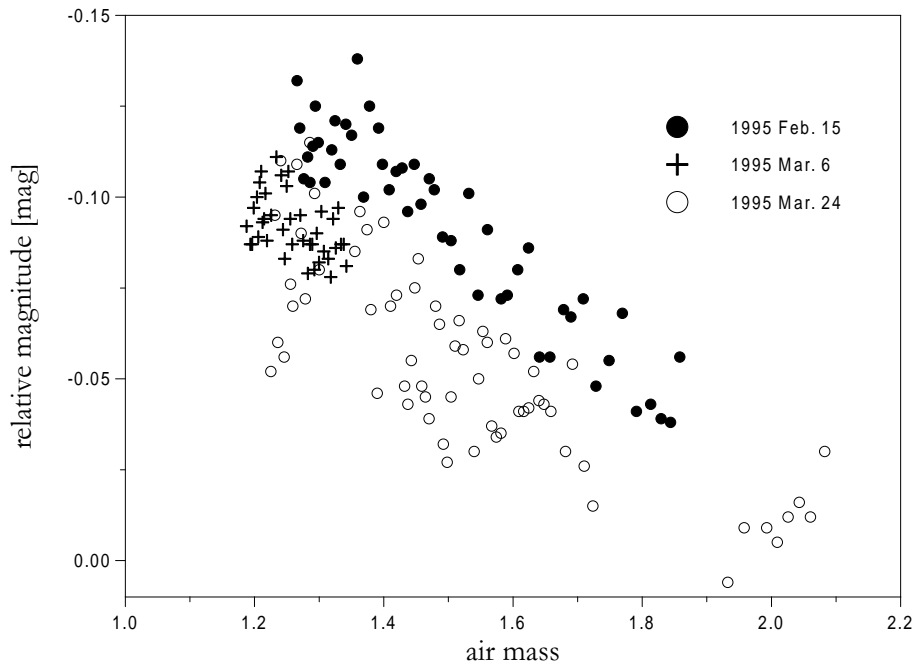
Obr. 3: V CCD fotometrii nejčastěji používaná pásma V (Johnson-Morgan) a R (Cousins) omezí citlivost systému na užší oblast spektra, než má samotné CCD (v tomto případě čip TC-241, který obsahuje např. kamera ST-6).



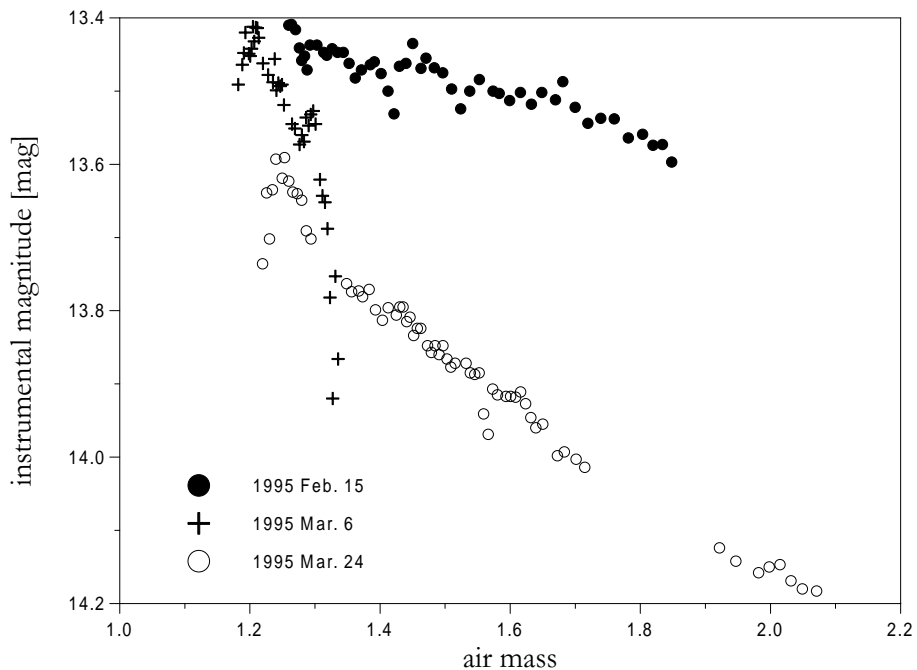
Obr. 4: Extinkce v BVRI pásmech Johnson-Cousins systému a CCD TC-241 bez filtru (profily jsou normalizované, propustnost/citlivost v maximu je 100 %) pro syntetická spektra hvězd hlavní posloupnosti o efektivních teplotách 4 000 K až 40 000 K, světlo prochází atmosférou kolmo při kvalitních pozorovacích podmínkách. Ve filtrech se jasnost různě teplých hvězd zeslabí zhruba stejně, zatímco budeme-li porovnávat navzájem stejně jasné barevné hvězdy bez filtru, jak se bude měnit jejich výška nad obzorem, můžeme naměřit trendy až několik desetin magnitudy.

Přesto i při pozorování přes filtry můžeme naměřit u hvězd s konstantní jasností trendy, které souvisí zřejmě s výškou nad obzorem (přesněji řečeno [optickou hmotou](#)). Problémy jsou zejména v B filtru, kde prudce narůstá extinkce se zkracující se vlnovou délkou (obr. 5, 6), a menší trendy se dají naměřit i v R filtru, který má podstatně širší profil než ostatní (obr. 7). Trendy jsou poměrně malé, většinou jen několik málo setin magnitudy, což bývá u malých přístrojů pod hranicí detekovatelnosti. Pokud je však světelná křivka velmi kvalitní a amplituda změn, které se snažíme zachytit, velmi malá, musíme brát v úvahu, že pozorování může být ovlivněné atmosférou. Proto se snažíme fotometricky pozorovat objekty alespoň 25° nad obzorem, porovnáваме mezi sebou několik srovnávacích hvězd nebo volíme takové, o nichž víme, že mají barvu podobnou sledovanému objektu, a při odhadu chyb měření bereme v úvahu, že pozorování může být postižené systematickými chybami řádu několik procent. Při měření okamžiků minima se to tedy může promítnout ve výsledcích, běžně se stává, že formální chyba určení času minima je mnohem menší než O–C u hvězd, kde zřejmě k podstatným změnám periody nedochází. Naměřené minimum

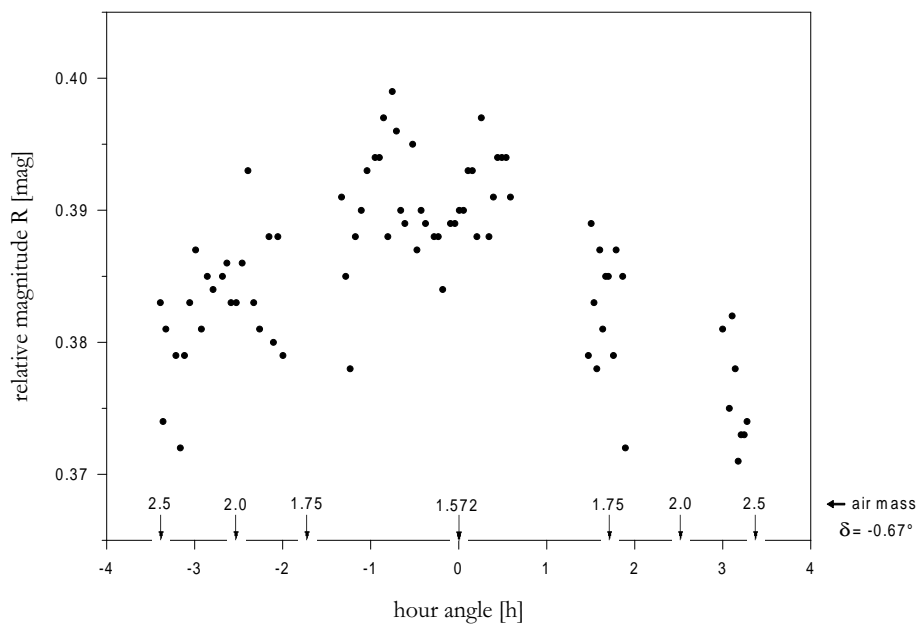
vypadá „krásně“, ale je zdeformované. Podobné trendy však mohou souviset i s nedokonalým zpracováním snímků nebo nějakými instrumentálními efekty, ne všechny nejasné trendy musí mít na svědomí atmosféra. Dokonce mohou být i reálné, jak bychom si to nejspíš přáli, i když to asi není nejčastější případ . . .



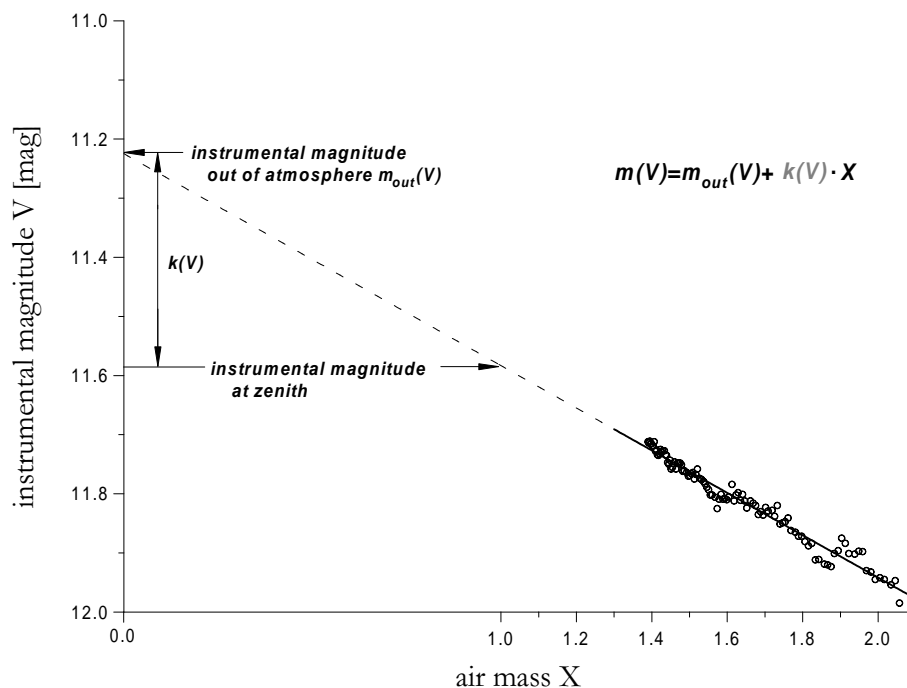
Obr. 5: Rozdíly jasností hvězd GSC 1326.1673 a GSC 1326.1684 měřených v B filtru závisí zřejmě na optické hmotě. Rozdíl barevných indexů $B-V$ je podle našich měření zhruba 0,8. Velikost změn je značná a zdá se, že souvisí s optickou hmotou i celkovou extinkcí (obr. 6)



Obr. 6: Závislost instrumentální magnitudy hvězdy GSC 1326.1430 v B filtru na optické (vzdušné) hmotě. Nejlepší byla první noc, během druhé noci se měnily podmínky, třetí noc byla zhoršená, ale poměrně konstantní extinkce. (Pozorováno v Ondřejově, 14. 2.–24. 3. 1995)



Obr. 7: Malé trendy se dají naměřit i v R filtru. Tyto hvězdy leží zhruba na rovníku, byly měřené 7 hodin od východu přes kulminaci k západu za stabilních a velmi kvalitních podmínek.



Obr. 8: Extinkční koeficient je směrnici přímky fitované závislosti instrumentální magnitudy objektu o konstantní mimoatmosférické jasnosti na optické hmotě. Atmosféra musí být homogenní a extinkce časově stálá.

Měření extinkce

Protože je extinkce závislá na vlnové délce světla, přesně vzato bychom ji měli měřit a popisovat v co nejužších pásmech vlnových délek. Je to však těžko realizovatelné a nepraktické, a tak budeme dále uvažovat profily jednotlivých filtrů, v kterých provádíme svá fotometrická měření, nejčastěji tedy **Johnson-Cousins BVRI fotometrický systém**.

Předpokládejme, že atmosféra je homogenní v tom smyslu, že stejná hmotnost vzduchu v různých místech zeslabí paprsek světla stejně, v atmosféře se nevyskytují nějaké vrstvy obsahující zvýšené množství aerosolu („sliz“, pozn. pro

Moraváky). V takové atmosféře extinkce způsobuje, že monochromatická hvězdná velikost pozorovaného objektu (jasnost v určité vlnové délce) je přímo úměrná **optické hmotě**. Tento koeficient úměrnosti nazveme **extinkčním koeficientem**. Jeho velikost tedy vyjadřuje, o kolik magnitud je hvězdná velikost zeslabena při kolmém průchodu paprsku atmosférou, a závisí na vlnové délce. Známe-li velikost extinkčního koeficientu v daném okamžiku, můžeme srovnávat jasnosti hvězd různě vysoko nad obzorem, a tedy i kalibrovat, určovat skutečnou, mimoatmosférickou jasnost objektů. Jak se dá extinkce změřit?

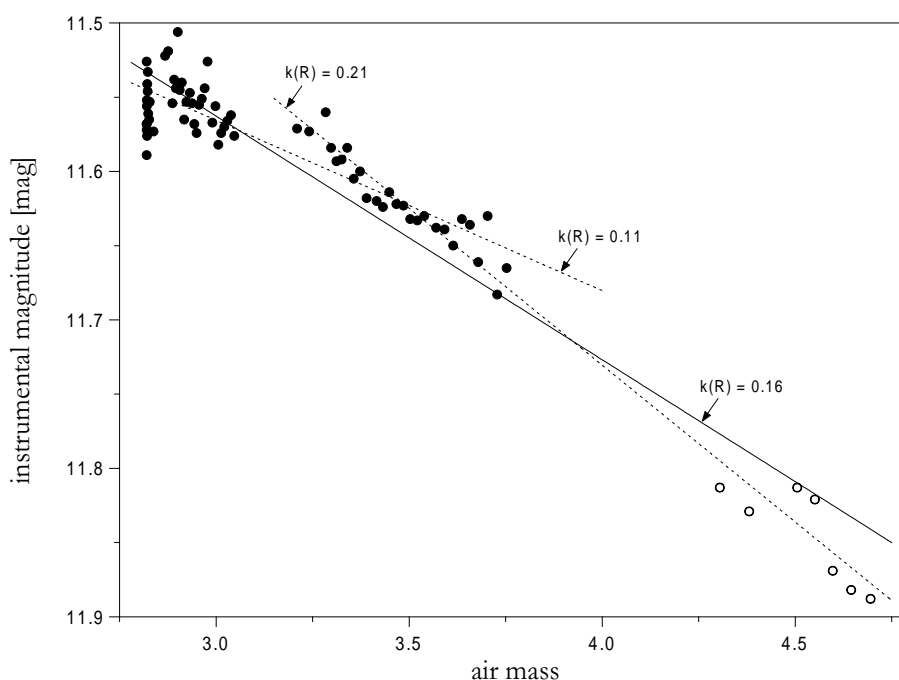
Měření pomocí jedné hvězdy o neznámé jasnosti

Nejjednodušší a v učebnicích často doporučovaný způsob je určení koeficientu jako směrnice přímky proložené body naměřené instrumentální hvězdné velikosti v závislosti na optické hmotě (obr. 8). Za ideálních podmínek bychom měli naměřit tuto závislost jako lineární. Jasnost hvězdy nemusí být známá, jen je nutné, aby byla konstantní. Nejčastěji jde tedy o nějakou osvědčenou srovnávací hvězdu v poli proměnky, která nás zajímá.

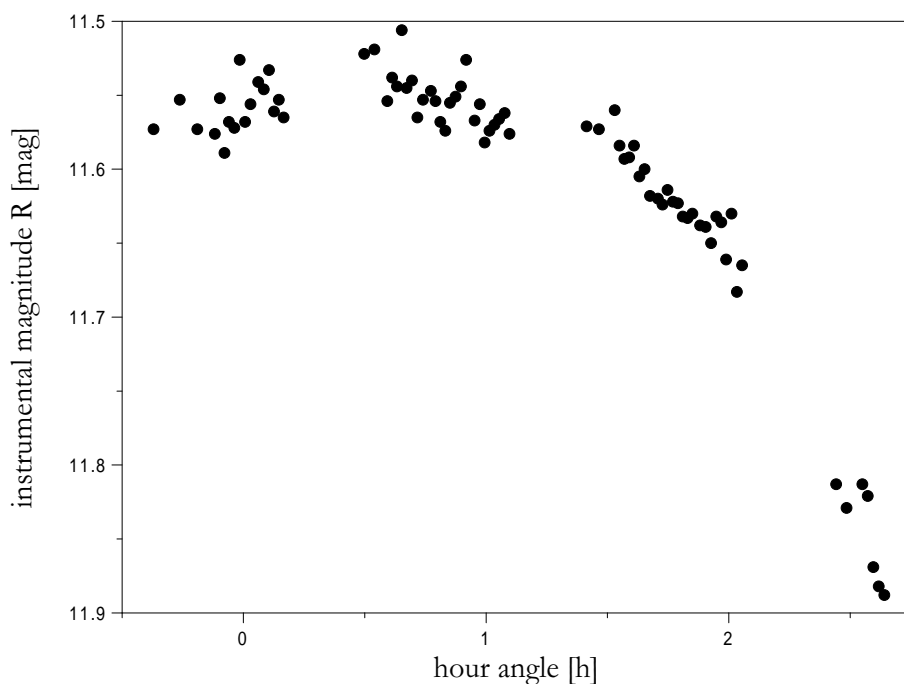
V našich končinách se však extinkce během noci i za kvalitních podmínek při jasné obloze většinou mění tak, že určování extinkčního koeficientu tímto způsobem je velmi pochybné. Změny extinkce bývají poměrně plynulé, a tak ve změně instrumentální magnitudy nelze odlišit podíl způsobený změnou optické hmoty a časovou změnou extinkce (obr. 9–12), případně nehomogenitami atmosféry (obr. 13, ...).

Měření pomocí více hvězd se známou jasností

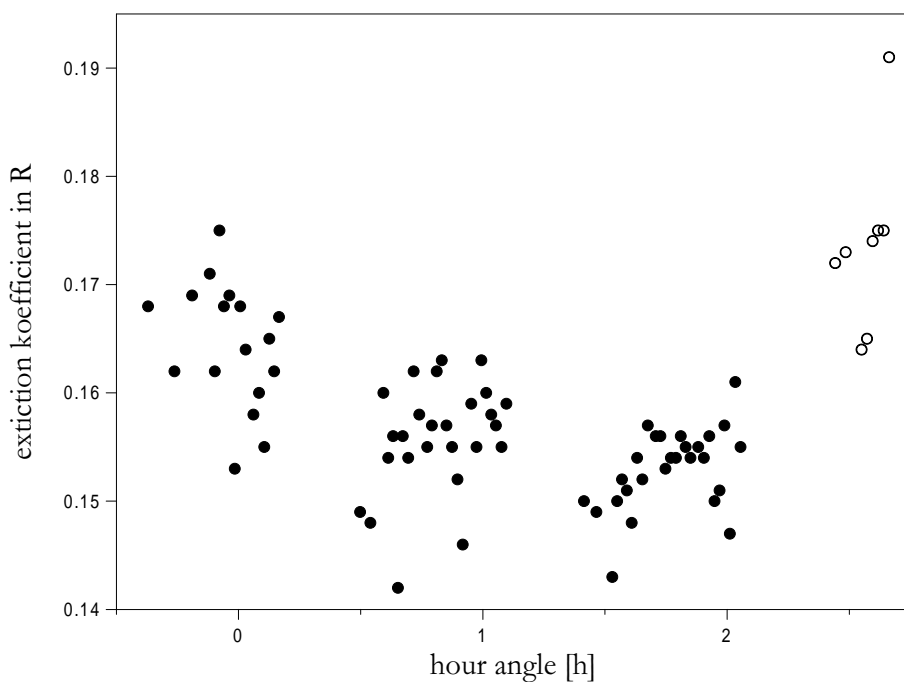
Mnohem spolehlivěji je možné extinkci zjistit pozorováním alespoň dvou hvězd o známé jasnosti na rozdílné optické hmotě, různě vysoko nad obzorem, v co nejkratším časovém odstupu. Na obloze existuje několik oblastí, kde jsou přesně změřeny jasnosti hvězd vhodně jasných pro CCD pozorování v **UBVRI** **filtrech** Johnson-Cousins systému. Nejvhodnější je Landoltův systém rovníkových kalibračních polí. Během několika minut můžeme pořídit snímek pole, které právě kulminuje 40° nad obzorem, a sousedního pole ve vzdálenosti 3^h v hodinovém úhlu na východ nebo západ, které se nachází ve výšce asi 27° . Rozdíl **optické hmoty** je přitom asi 0,6 a během několika minut měření se za stabilních podmínek extinkce změní málo. Po porovnání rozdílů instrumentálních a katalogových hodnot u zkalibrovaných hvězd spočítáme extinkční koeficient s přesností i lepší než 10 %.



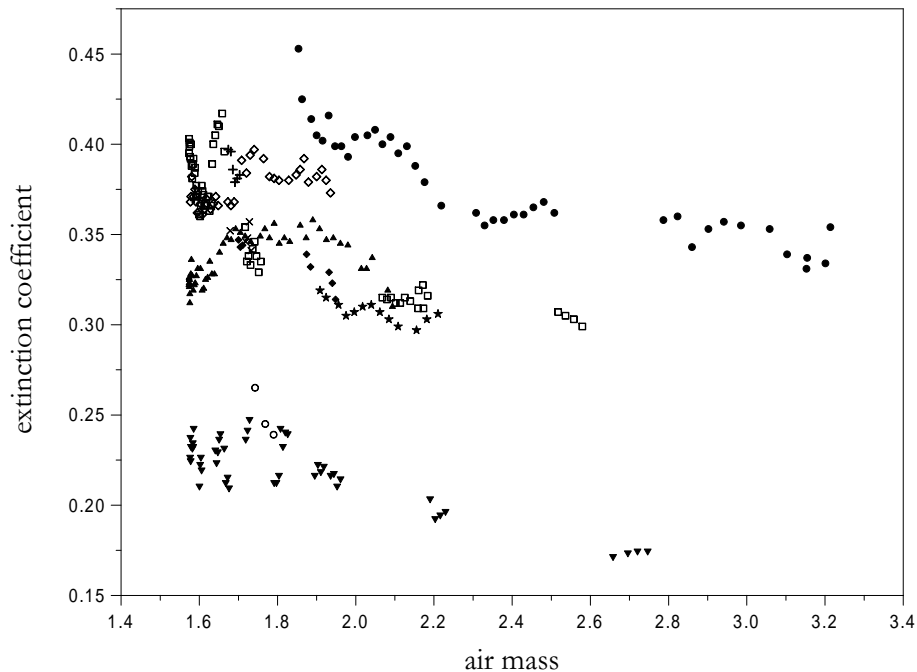
Obr. 9: Závislost instrumentální magnitudy hvězdy GSC 6288.0707 (deklinace $-19^\circ 28'$) na optické hmotě v R filtru. Velikost směrnice velmi závisí na tom, pomocí jakých bodů ji počítáme. Kolem kulminace se optická hmotota mění nejpomaleji a sebemenší změna extinkce může měření ovlivnit. Naopak velmi nízko nad obzorem už není možné určit dost přesně optickou hmotu a přízemní vrstva, kterou paprsek prochází relativně dlouhou dráhou, může mít jiné optické vlastnosti, nehomogenita atmosféry se tu projeví mnohem výrazněji než na menších optických hmotách. (Ondřejov, 8./9. 7. 1995)



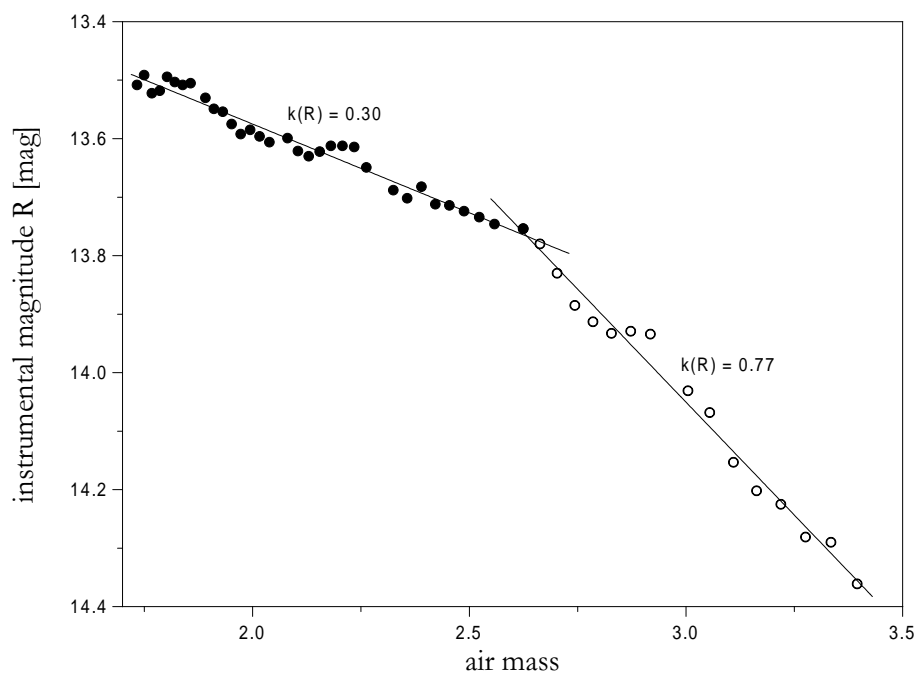
Obr. 10: Změna instrumentální magnitudy hvězdy z obr. 9 na času. Je zřejmé, že během noci se obloha stávala průzračnější, i po kulminaci se ještě určitou dobu zvyšovala pozorovaná jasnost hvězdy.



Obr. 11: Vývoj extinkčního koeficientu během noci (obr. 9). Na konci pozorování už extinkční koeficient zřejmě příliš neodpovídá realitě. Přestože velikost extinkčního koeficientu byla ověřována i jinými metodami, mohou být hodnoty posunuté o několik setin. Relativní změny, trendy, však zůstávají zhruba zachované.



Obr. 12: Během stabilních nocí se většinou extinkční koeficient snižuje, jak se usazují aerosoly zvržené a vynesené do výšky přes den zvýšenou turbulencí. Pozorování během jednotlivých nocí probíhala většinou po kulminaci a v krátkém časovém období, takže větší optická hmota odpovídá přibližně pozdějšímu času během noci. Hodnoty extinkčního koeficientu mohou být systematicky trochu posunuté, ale trendy zůstávají zachované.



Obr. 13: Při pozorování za ranní inverze hvězda zřejmě zapadala do přízemní aerosolové vrstvy a její instrumentální magnituda klesala rychleji než odpovídalo reálnému extinkčnímu koeficientu.

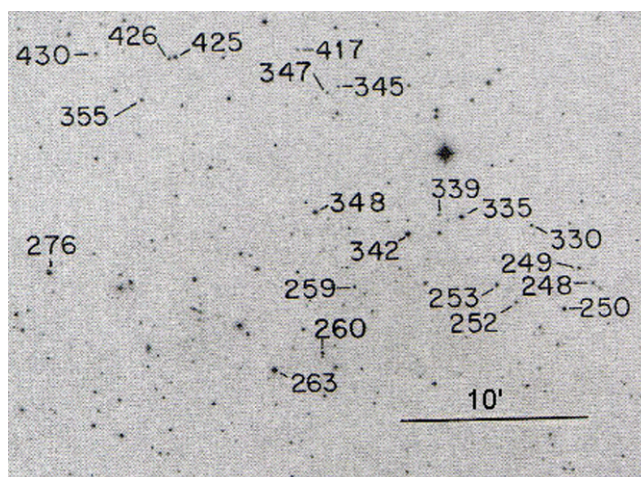
Jiný způsob určení extinkce

Přesnější než měření extinkce pomocí jedné neznámé hvězdy bývá většinou po určitých zkušenostech metoda „kouknu a vidím“: pohlédneme na oblohu, trochu se rozkoukáme a řekneme si — „... dneska to bude v R asi 0,25...“. Tato metoda by se však neměla z morálních důvodů příliš propagovat.

Absolutní fotometrie

Častým cílem měření je zjistit skutečné jasnosti a barevné indexy objektů, protože se tím podstatně rozšíří možnosti, jak objekty popsat nebo i modelovat. Známe-li extinkční koeficient v oboru, kde pozorujeme, můžeme instrumentální jasnosti objektů přepočítat na optickou hmotu, kde se nachází kalibrační hvězdy a porovnat je s instrumentálními jasnostmi kalibračních hvězd (obr. 14). Zjistíme tedy rozdíly instrumentálních a skutečných jasností (obr. 15) kalibračních hvězd na určité optické hmotě a o tyto rozdíly opravíme instrumentální magnitudy měřených objektů na skutečné magnitudy.

Protože určování extinkce není přesné a je na něj třeba obětovat pozorovací čas, pokud je to možné, provádíme kalibrace tak, že si spočítáme okamžik, kdy bude nějaké kalibrační pole stejně vysoko jako pole měřené, a zároveň co nejvýše nad obzorem. Pak měření není závislé na velikosti extinkčního koeficientu, jen je třeba, aby extinkce byla během kalibrace stálá a obloha na různých azimutech stejně průzračná.



Obr. 14: Výřez snímku kalibračního pole SA92 s označenými kalibrovanými hvězdami z Landoltova atlasu [3].

TABLE 2. UBVRI standard stars.

Star	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	V	B-V	U-B	V-R	R-I	V-I	n	m	Mean Errors of the Mean					Notes	
											V	B-V	U-B	V-R	R-I		V-I
TPHE A	00:30:09	-46 31 22	14.651	0.793	0.380	0.435	0.405	0.841	29	12	0.0028	0.0046	0.0071	0.0019	0.0035	0.0032	
TPHE B	00:30:16	-46 27 55	12.334	0.405	0.156	0.262	0.271	0.535	29	17	0.0115	0.0026	0.0039	0.0020	0.0019	0.0035	1
TPHE C	00:30:17	-46 32 34	14.376	-0.298	-1.217	-0.148	-0.211	-0.360	39	23	0.0022	0.0024	0.0043	0.0038	0.0133	0.0149	
TPHE D	00:30:18	-46 31 11	13.118	1.551	1.871	0.849	0.810	1.663	37	23	0.0033	0.0030	0.0118	0.0015	0.0023	0.0030	
TPHE E	00:30:19	-46 24 36	11.630	0.443	-0.103	0.276	0.283	0.564	34	8	0.0017	0.0012	0.0024	0.0007	0.0015	0.0019	
TPHE F	00:30:50	-46 33 33	12.474	0.855	0.532	0.492	0.435	0.926	5	3	0.0004	0.0058	0.0161	0.0004	0.0040	0.0036	
TPHE G	00:31:05	-46 22 43	10.442	1.546	1.915	0.934	1.085	2.025	5	3	0.0004	0.0013	0.0036	0.0004	0.0009	0.0009	
FG0029+024	00:31:50	+02 38 26	15.268	0.362	-0.184	0.251	0.337	0.593	5	2	0.0094	0.0174	0.0112	0.0161	0.0125	0.0067	
FG0039+049	00:42:05	+05 09 44	12.877	-0.019	-0.871	0.067	0.007	0.164	4	3	0.0020	0.0030	0.0055	0.0035	0.0055	0.0046	
92 309	00:53:14	+00 46 02	13.842	0.513	-0.024	0.326	0.325	0.652	2	1	0.0035	0.0057	0.0028	0.0014	0.0035	0.0014	
92 235	00:53:16	+00 36 18	10.595	1.638	1.984	0.894	0.911	1.806	5	2	0.0058	0.0045	0.0098	0.0031	0.0045	0.0067	
92 322	00:53:47	+00 47 33	12.676	0.528	-0.002	0.302	0.305	0.608	2	1	0.0007	0.0049	0.0028	0.0014	0.0007	0.0007	
92 245	00:54:16	+00 39 51	13.818	1.418	1.189	0.920	0.907	1.836	21	8	0.0028	0.0079	0.0301	0.0024	0.0024	0.0028	
92 248	00:54:31	+00 40 15	15.346	1.128	1.289	0.690	0.553	1.245	4	2	0.0255	0.0160	0.0955	0.0215	0.0145	0.0175	
92 249	00:54:34	+00 41 05	14.325	0.699	0.240	0.399	0.370	0.770	17	8	0.0049	0.0085	0.0114	0.0046	0.0065	0.0073	
92 250	00:54:37	+00 38 56	13.178	0.814	0.480	0.446	0.394	0.840	20	9	0.0022	0.0034	0.0074	0.0022	0.0022	0.0029	
92 330	00:54:44	+00 43 26	15.073	0.568	-0.115	0.331	0.334	0.666	2	1	0.0141	0.0297	0.0163	0.0304	0.0000	0.0304	
92 252	00:54:48	+00 39 23	14.932	0.517	-0.140	0.326	0.332	0.666	41	18	0.0033	0.0055	0.0082	0.0047	0.0072	0.0068	
92 253	00:54:52	+00 40 20	14.085	1.131	0.955	0.719	0.616	1.337	39	17	0.0032	0.0062	0.0221	0.0027	0.0043	0.0050	
92 335	00:55:00	+00 44 13	12.523	0.672	0.208	0.380	0.338	0.719	2	1	0.0007	0.0028	0.0049	0.0000	0.0014	0.0014	

Obr. 15: Pro kalibrační hvězdy najdeme v publikaci [3] tabulky se souřadnicemi, jasnostmi, barevnými indexy a dalšími informacemi.

Po kalibraci tedy poznáme skutečné jasnosti hvězd i jinde na obloze, stanou se tedy s menší přesností novými kalibračními hvězdami, které mohou sloužit k měření extinkce nebo kalibracím dalších objektů (obr. 11, 12). Při těchto „sekundárních“ kalibracích se však mohou šířit systematické chyby, a tak pokud je to možné, používáme profesionálně kalibrované systémy hvězd jednoho autora. Ukazuje se, že přesná kalibrace (kolem 0,01 mag a lepší)

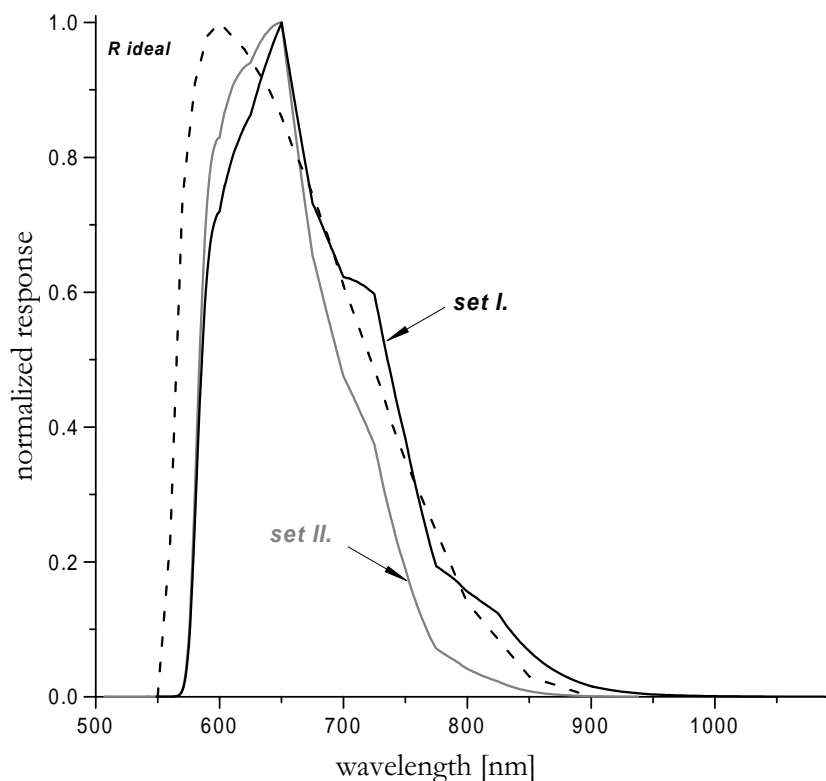
je velmi náročná a kalibrační systémy různých autorů jsou vůči sobě posunuté. I v rámci jednoho kalibračního pole nebo systému naměříme u některých hvězd soustavné odchylky o několik setin magnitudy, které mohou být způsobeny špatnou kalibrací nebo menší proměnností hvězdy. Proto je třeba proměřit na každém kalibračním poli co nejvíc hvězd, abychom mohli vyřadit ty „pochybné“.

Kromě hvězd, kde jejich jasnost neodpovídá skutečnosti, můžeme naměřit u některých hvězd odchylky, které souvisejí s nedokonalými profily našich filtrů. Tyto odchylky je možné do určité míry zkorigovat. Zejména pokud je měřený objekt extrémně barevný, je nutné svůj systém dalekohled+filtry+CCD po fotometrické stránce znát.

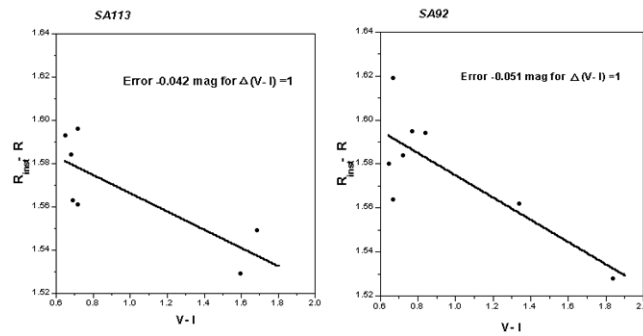
Fotometrické korekce filtrů

Kvalitní BVRI filtry pro fotometrická pozorování může dodat [Vývojová optická dílna Akademie věd \(Turnov\)](#). Na jejich stránkách se můžeme dočíst mimo jiné i o tom, jak jsou [fotometrické systémy](#) definované a jaké jsou [spektrální charakteristiky](#), propustnosti jejich filtrů, které v kombinaci s charakteristikou CCD a dalekohledu mají zhruba odpovídat definovaným profilům.

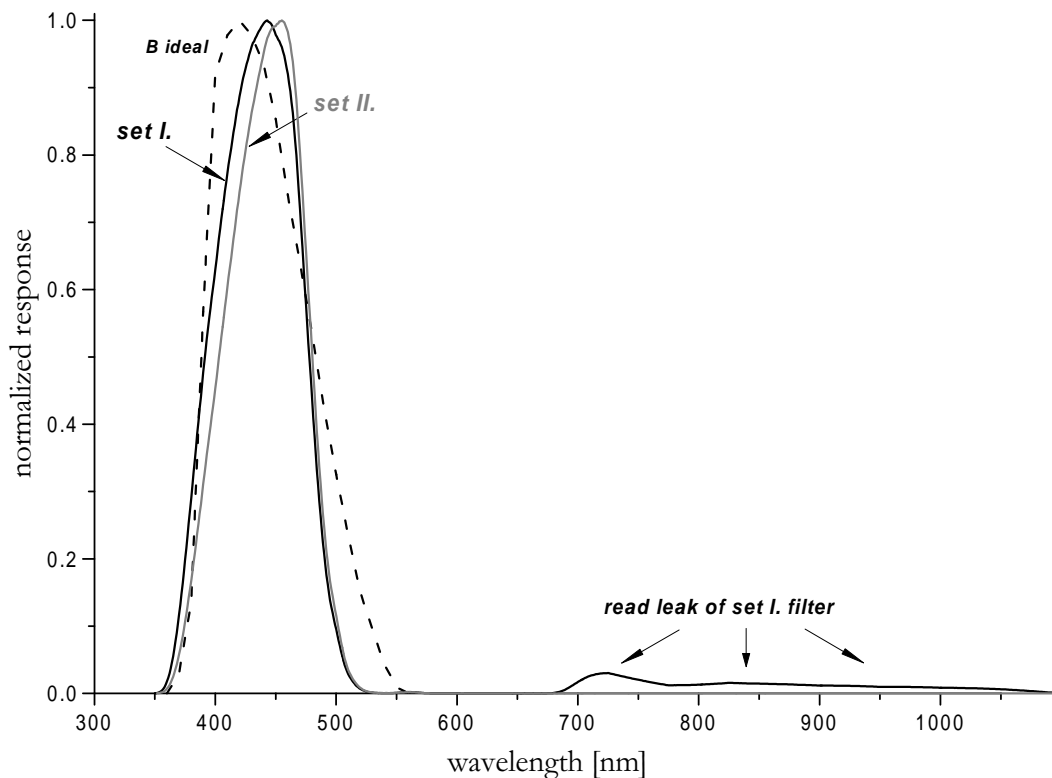
Vyrobít velmi přesné filtry je technologicky náročné, CCD mají složitou a možná i proměnnou spektrální citlivost, navíc dalekohled může také ovlivnit celkovou charakteristiku systému (zejména obsahuje-li skleněné části), takže výsledný profil soustavy CCD+filtr+dalekohled nemusí dost přesně odpovídat standardnímu profilu (obr. 16), a tak při kalibraci pomocí různě barevných hvězd můžeme zjistit systematické odchylky závislé na barevném indexu hvězd (obr. 17). Pokud tyto odchylky zmapujeme a například pomocí nejméně jednoho dalšího filtru máme možnost zjistit aspoň přibližné barevné indexy pozorovaného objektu, můžeme po kalibraci zkorigovat naměřené jasnosti objektů.



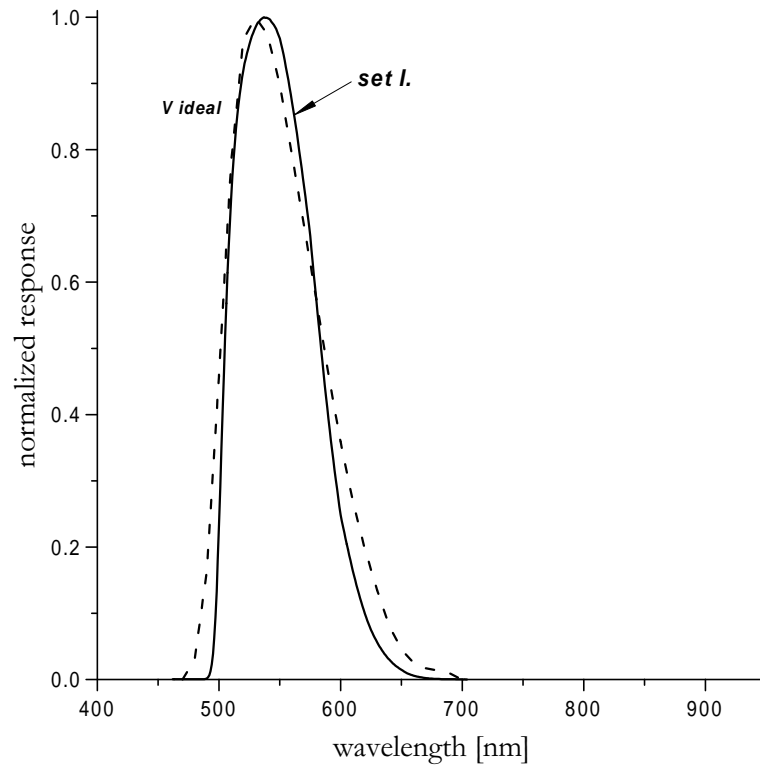
Obr. 16: Profily filtrů R ze sady I. a II. (R_a — 4 mm; R_b — 6 mm) v kombinaci s TC-241 při srovnání se standardním Cousins R profilem. Sada I. je trochu posunutá ke delším vlnovým délkám, protože byla původně navržena podle jiného fotometrického systému [Johnson](#), ve kterém však nemáme vhodné kalibrační hvězdy.



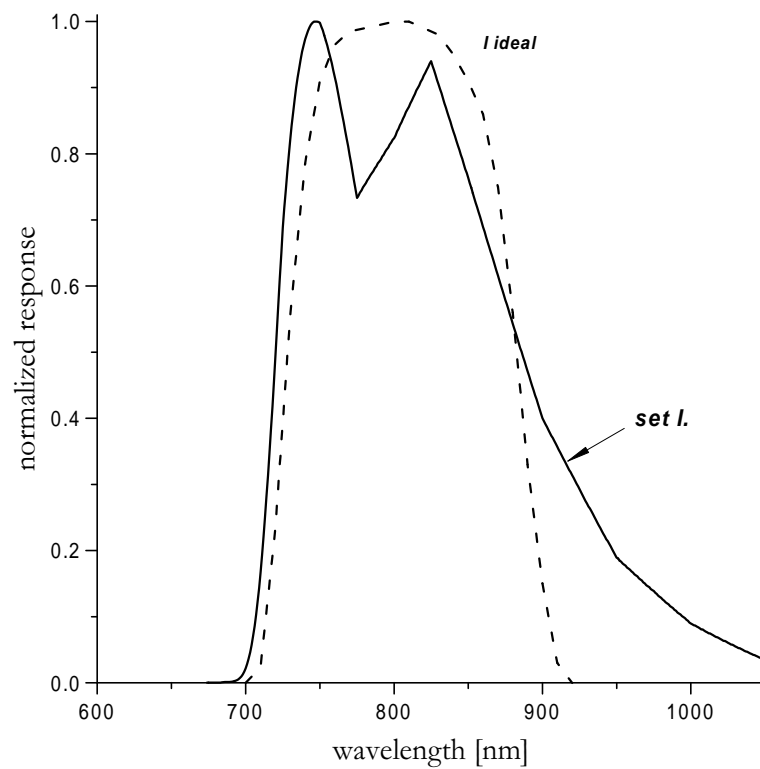
Obr. 17: Při měření kalibračních hvězd z Landoltových polí SA 113 a SA 92 v Ondřejově s R filtrem sady I. a CCD KAF 1600 zjišťujeme, že červené hvězdy se jeví relativně jasnější než odpovídá katalogovým hodnotám. Závislost zkoumáme pro barevné indexy $V-I$, protože tyto filtry odpovídají velmi dobře standardu a také tyto indexy snadno změříme, je však možné zvolit i jiné barevné indexy pro mapování odchylek systému. Toto jsou pouze ukázkové, které dokumentují dlouhodobé zkušenosti z kalibrací. Mapování odchylek je možné provádět i pomocí relativního měření na kalibračních polích, výsledky však není možné sloučit jednoduše do jednoho grafu, protože měření probíhá na různých optických hmotách a třeba i při rozdílné extinkci. Podstatné jsou směrnice přímek proložených měřenou závislostí rozdílu instrumentální magnitudy a odpovídající katalogové hodnoty na katalogovém barevném indexu.



Obr. 18: Profily filtrů B ze sady I. a II. (B_a — 4 mm; B_c — 6 mm) v kombinaci s TC-241 při srovnání se standardním Johnson B profilem. Sada I. má průsakov (red leak) v červené a infračervené oblasti, kde u červených objektů je víc energie než v modré části spektra, a tak i tento malý průsakov dost poznamenává měření a nedá se dobře zkorigovat. Hlavní oblast propustnosti však u obou sad vyhovuje.



Obr. 19: Filtr V *ze sady I.* (V_b — 4 mm) v kombinaci s TC-241 velmi dobře odpovídá standardnímu profilu.



Obr. 20: Filtr I *ze sady I.* (I_a — 4 mm) v kombinaci s TC-241 je dobře použitelný i pro absolutní fotometrii.

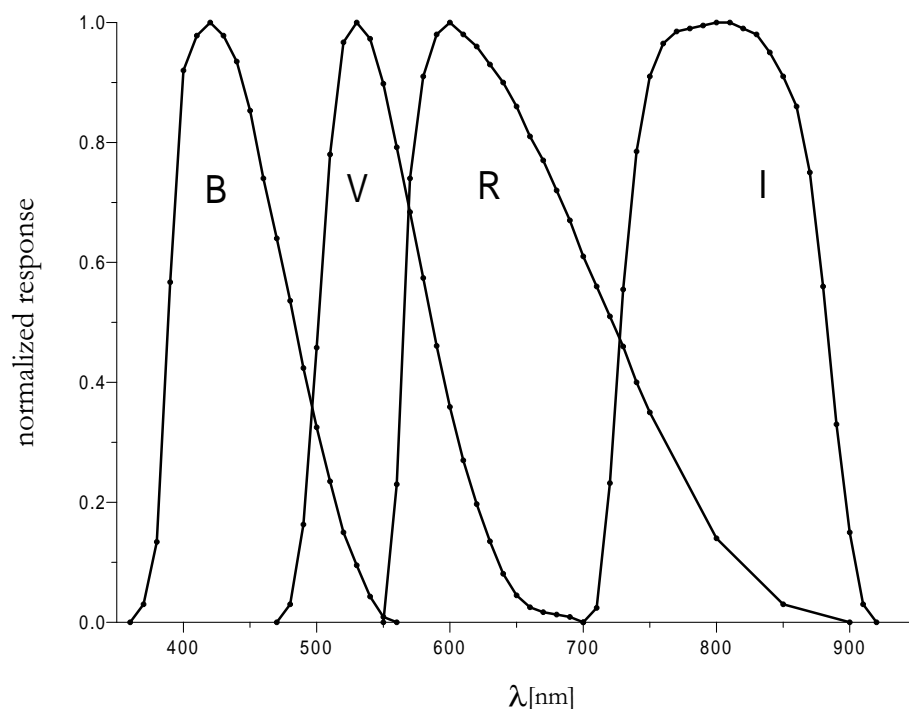
Závěr – všechno je jinak

Nezávislé reakce několika lidí po této přednášce na semináři byly takové, že to je hrozné, přes atmosféru na CCD se nic nedá naměřit nebo je to moc složité. Vzbudit tento dojem ale nebylo mým cílem, proto bych na závěr chtěla zdůraznit několik skutečností, které by podobné pochyby měly uvést na pravou míru.

- Systematické chyby při relativním měření ve filtrech a to jakýchkoli, i nestandardních (pokud nemají příliš širokou oblast propustnosti) jsou malé, v řádu setin magnitudy. Při pozorování malými dalekohledy a zejména při měření okamžiků minim s větší amplitudou jsou tyto efekty zanedbatelné a případně překryté chybami vzniklými jinými systematickými chybami, jako je nedokonalá korekce flat fieldem nebo parazitní osvětlení. To možná není dokonalá útěcha, ale při pozorování bez filtrů můžeme dostávat systematické chyby vzniklé atmosférou podstatně významnější než jiné efekty. Filtry tedy téměř zruší jeden významný zdroj systematických chyb, i když při velmi přesném měření musíme mít na paměti, že relativní změny jasnosti v řádu setin magnitudy nemusí být reálné, ale způsobené atmosférou.
- Měření extinkce je obtížné a nepřesné, ale kalibrace se standardními hvězdami (absolutní fotometrie) se dají většinou dělat i bez určování extinkčních koeficientů. Vždy je však důležité, aby extinkce byla co nejstálější. Nejlepší noci tedy většinou obětujeme na nudné kalibrace, celkem dobrá relativní fotometrie se dá dělat za mnohem horších podmínek.
- Absolutní měření může být dále postiženo chybami danými tím, že spektrální profily našeho systému se neshodují dokonale se systémem použitým autorem, který kalibroval hvězdy námi používané. Tyto odchylky jsou u problematického R filtru v řádu několik málo setin magnitudy a pro méně přesné měření na ně můžeme zapomenout. Jinak se dají poměrně snadno korigovat, a jak se to dělá vymyslí každý sám, kdo se nad tím zamyslí, i když to podle těchto stránek vypadá složitě a nejasně.
- Filtr B turnovské sady I. má průsak v červené a infračervené oblasti (red leak), kde je ještě CCD poměrně dost citlivé, a tak korekce jsou nevyzpytatelné, závisí na tvaru spektra objektu v oblasti průsaku, který může být odlišný pro různé objekty i při stejných barevných indexech. I u diferenciálních měření může docházet k problémům. Sada II. by ale měla být dobře použitelná, jen je třeba vzít v úvahu, že filtr je málo propustný a CCD navíc v B oblasti málo citlivé.
- Mnoho z toho, co je tu napsáno, nemusí být všeobecně pravda, protože jde o zkušenosti jen z jednoho dalekohledu a to proti amatérským přístrojům poměrně velkého. Proto sami pozorujte a zkoumejte a výše napsané berte jen jako výstrahu nebo inspiraci.
- Pojem „sliz“ je myslím na Ondřejově nebo na petřínské hvězdárně běžně používaný výraz pozorovatelů a mám dojem, že jsem ho nevymyslela já.

Co je však jasné a platí pro všechna fotometrická pozorování jasnějších objektů — potřebujeme filtry a pro kalibrace standardní. Výjimku tvoří pozorování pro daný přístroj relativně slabých objektů, kde přes filtr by neúnosně vzrostl šum podstatně nad možné systematické chyby.

Johnson-Cousins fotometrický systém



Normalizované profily pásem standardního fotometrického systému Johnson (B, V) a Cousins (V, R, I). Bílý paprsek procházející soustavou dalekohled, CCD a filtry by měl být zaregistrován s rozložením intenzit pro dané vlnové délky odpovídající těmto profilům. Nejde tedy o charakteristiky propustnosti pouhých filtrů; pro různé druhy detektorů potřebujeme různé filtry, abychom dostali potřebné profily.

Více informací najdete na stránkách [VOD Turnov](#).

Filtr U se pro obvyklé druhy CCD pozorování nepoužívá, protože v té oblasti spektra je CCD málo citlivé, filtry málo propustné a atmosféra proměnlivě pohlcuje podle okamžitého množství ozónu a vodních par.

Co je to optická hmota

Paprsky dopadající na zemský povrch šikmo procházejí delší dráhou atmosférou. Pojem optická (vzdušná) hmota vyjadřuje poměr hmotnosti sloupce, kterým světlo projde, k hmotnosti kolmého vzdušného sloupce o stejném horizontálním průřezu.

Pro zenitové vzdálenosti menší než 65° (výška nad obzorem nad 25°) je možné zanedbat vliv zakřivení zemského povrchu a paprsků (refrakce). Pak se dá vzdušná hmota vyjádřit pomocí jednoduchého vztahu

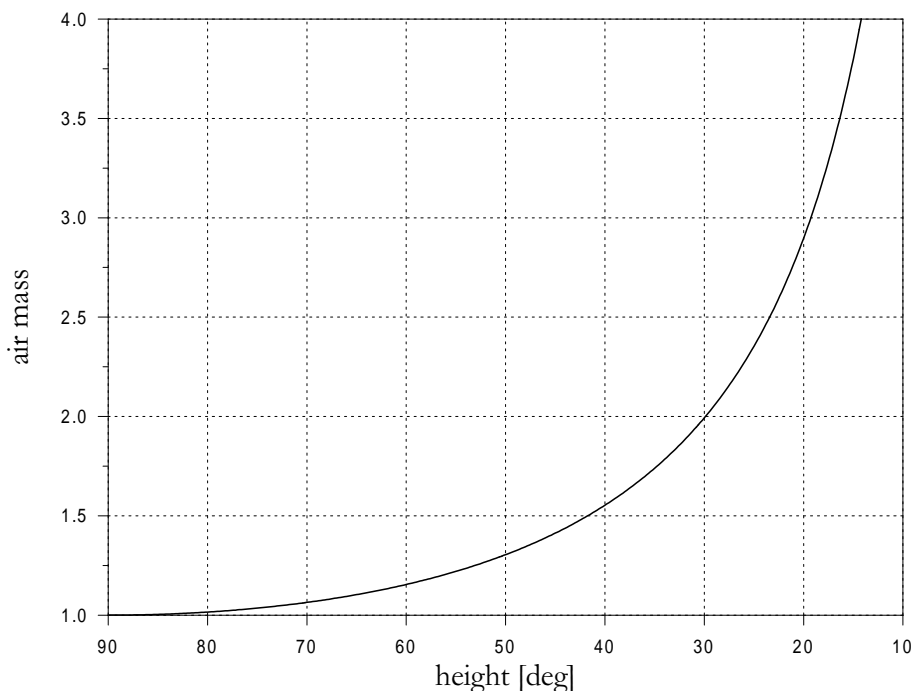
$$X = \sec z$$

kde z je skutečná zenitová vzdálenost (spočítaná podle souřadnic, tedy neovlivněná refrakcí), a $\sec z = 1/\cos z$.

Do optické hmoty 4 se používá například formule Younga a Irvina

$$X = \sec z(1 - 0,0012(\sec^2 z - 1))$$

kde je zkorigován vliv zakřivení zemského povrchu a refrakce.



Formule Younga a Irvina znázorněná graficky — výpočet optické hmoty z výšky nad obzorem ($90^\circ - z$)

Skutečnost je však složitější, uvedené formule neberou v úvahu závislost na profilu teploty a tlaku a zejména není zaručeno, že stejná hmotnost vzduchu v různých výškách pohltí stejné množství světla. Při nižších výškách nad obzorem je vlivem zakřivení Země větší podíl dráhy paprsku nižšími vrstvami atmosféry, a proto na tomto druhu nehomogenity atmosféry záleží. Odchytky na větších optických hmotách mohou být větší než 1 %, zvláště pro některé barvy, kde se nacházejí absorpční pásy molekul ozónu. Optická hmota se však definuje nezávisle na vlnové délce a barevné korekce se provádějí jinak.

Literatura

- [1] *Bednář, J.*
Pozoruhodné jevy v atmosféře
Academia Praha (1989)
- [2] *Bessel, M. S.*
UBVRI Passbands
Publications of the Society of the Pacific, Vol. 102 (1990)
- [3] *Landolt, A. U.*
UBVRI Photometric Stars in the magnitude range $11.5 < V < 16.0$ around the celestial equator
Astronomical Journal, Vol. 99, No. 1, 340–370 (1992)
- [4] *Lasker, B. M., Stur, C. R., McLean, B. J. a další*
The Guide Star Catalog
Astronomical and Algorithmic Foundations; Astronomical Journal, Vol. 99, 2 019–2 058 (1990)
- [5] *Reimann, H.-G., Ossenkopf, V., Beyersdorfer, S.*
Atmospheric extinction and meteorological conditions: a long time photometric study
Astronomy and Astrophysics 265, 360–369 (1992)
- [6] *Sterken, Chr., Manfroid, J.*
Astronomical Photometry — A Guide
Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1992)
- [7] *Šarounová, L.*
Extinkce v atmosféře
Závěrečná práce bakalářského studia meteorologie (1996)