

Vzdělávací soustředění studentů projekt KOSOAP Proměnné hvězdy a možnosti jejich pozorování a výzkumu

TENTO PROJEKT JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKOU UNIÍ, Z PROSTŘEDKŮ FONDU MIKROPROJEKTŮ
SPRAVOVANÉHO REGIONEM BÍLÉ KARPATY



TENTO PROJEKT JE SPOLUFINANCOVANÝ EURÓPSKOU ÚNIOU, Z PROSTRIEDKOV FONDU MIKROPROJEKTOV
SPRAVOVANÉHO TRENČIANSKYM SAMOSPRÁVNÝM KRAJOM

Základní principy a metody fotometrie



Jaroslav Trnka

Základní principy a metody fotometrie

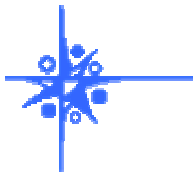
Jaroslav Trnka



Městská hvězdárna ve Slaném

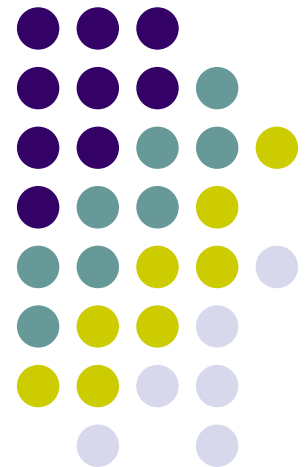
Sekce proměnných hvězd a exoplanet ČAS

Aldebaran Group for Astrophysics



www.hvezdarna-slany.cz

hvezdarna@volny.cz





I. část

Od fotonu k magnitudě

Co je fotometrie?



- fotometrie je obor optiky, který se v astronomii využívá k měření světelného toku a stanovení jasnosti nebeských objektů v rozsahu 400 – 750 nm, zkoumá působení světla na světločivný systém.
- takovým systémem může být např. oko, fotografická deska nebo CCD čip
- je součástí širšího oboru - radiometrie (celý rozsah el. mag. spektra)



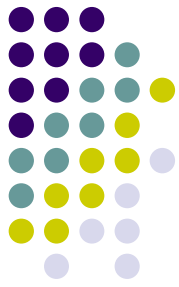
Co je fotometrie?

- název vznikl ze 2 latinských slov
photos (světlo) + *metron* (měřit)
- fotometricky je možné pozorovat prakticky všechny objekty na obloze: hvězdy, planety, planetky případně mlhoviny a galaxie
- spektrofotometrie – zkoumá působení světla ve velmi malém rozsahu vlnových délek, nejčastěji jen několika nanometrů
- vzestup CCD technologie od sedmdesátých let 20. století přiblížil tato měření i amatérům

Cíle fotometrie v astronomii

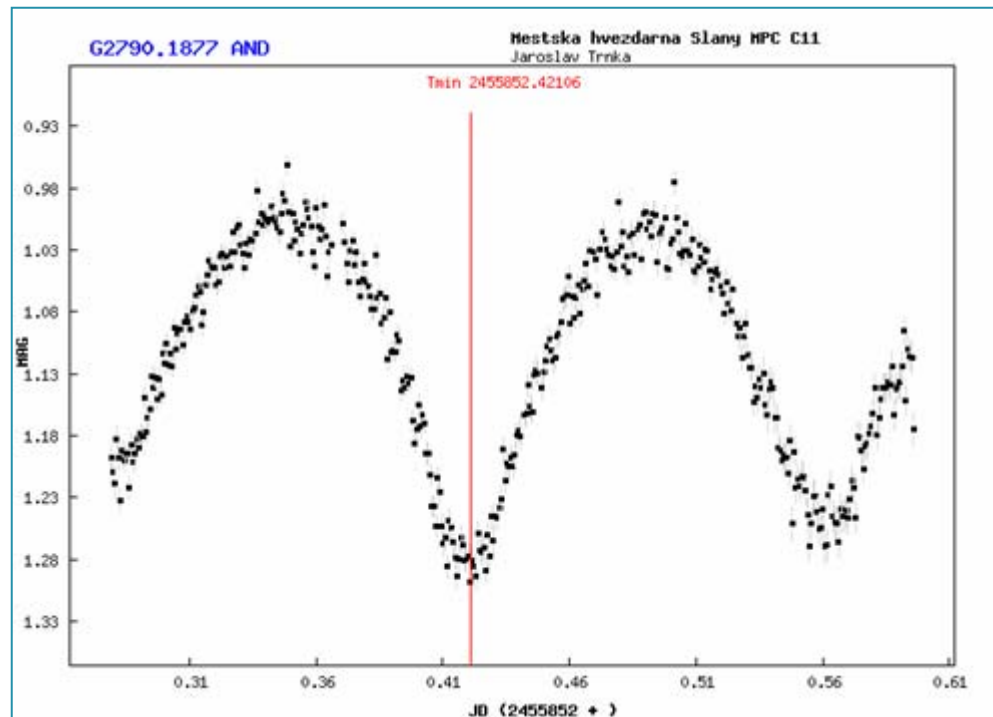


- I. měřit prostorové rozložení světla emitovaného objekty v různých oblastech spektra
- II. monitorování objektů v určité oblasti spektra a zjišťování případných změn jasnosti
- III. porozumět fyzikální podstatě těchto změn



Proměnná veličina - jasnost

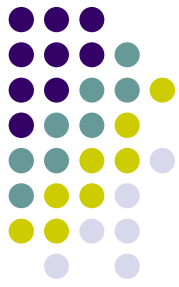
- o hlavním zdrojem informací o povaze sledovaných objektů (proměnných hvězd) je jejich světelná křivka - závislost jasnosti na čase



Světlo - specifikace

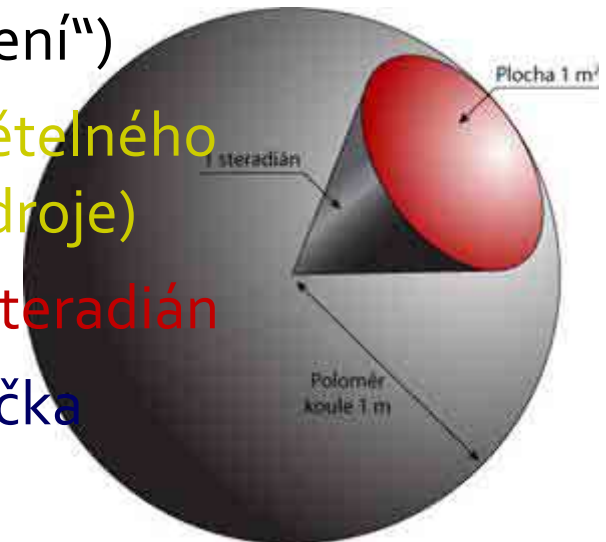


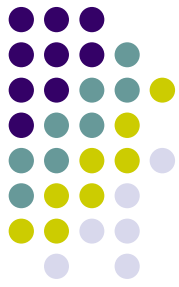
- informaci o objektech (hvězdách) přináší el. mag. záření
- el. mag. záření je podle KT tvořeno fotony - tzv. polní částice, které zprostředkovávají el. mag. interakci
- fotony se od sebe liší kmitočtem - sítnice oka je citlivá na energii fotonu kolem 2eV
- světlo však představuje velmi úzký interval el. mag. záření
- každý foton obsahuje určité množství energie, které je tím větší, čím je větší kmitočet fotonu f
- pro energii fotonů platí vztah $E = h \cdot f$, kde h je Planckova konstanta: $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$



Fotometrické veličiny

- hvězda - zdroj který září do prostoru izotropně
- celkový zářivý výkon (zářivý tok) $L \rightarrow$ celková E vyzářená na všech vl. délkách za jednotku času (W, $L_s=3,846 \cdot 10^{26}$ W)
- světelný tok F (lm) - množství energie procházející plochou za jednotku času (obdoba W, ale vyvážená relativní lidskou citlivostí na sv. - „užitečné záření“)
- svítivost I (cd) - prostorová hustota světelného toku (síla světla v určitém směru od zdroje)
- definice: $I = F / \Omega$, lumen = kandela * steradián
- *candela* z lat. v překladu znamená svíčka





Astronomická fotometrie

- Hipparchos (2.stol.př.n.l.) - zavedl první rozdělení hvězd podle jasnosti „hvězdných tříd“ nejjasnější 1. mag, nejslabší 6. mag
- hvězdná velikost (m , M) - představuje zdánlivou, tedy subjektivně vnímanou nebo přístrojem detekovanou, jasnost hvězdy
- N. R. Pogson matematicky vyjádřil obecnou jednotku jasnosti → Pogsonova rovnice
- PR vychází z Weber-Fechnerova psychofyzikálního zákona



Astronomická fotometrie

- Pogsonova rovnice (r.1854) - poměr osvětlení z. povrchu hvězdami lišící se o jednu mag. je 2,512 : 1

$$\Delta m = m_2 - m_1 = -2,5 \cdot \log (F_1 / F_2)$$

m_1, m_2magnituda první a druhé hvězdy

F_1, F_2osvětlení zem. povrchu první a druhou hvězdou

- tento poměr navrhnul Pogson tak, aby rozdíl 5.mag odpovídal poměru hustotě sv. toků 100:1
- rozdíl jedné mag je tedy $\sqrt[5]{100:1}$, což je tedy 2,512:1 → Pogsonův poměr

Poměr osvětlení zemského povrchu hvězdami lišícími se o jednu magnitudu je 2,512 : 1 (Pogsonův poměr)



Tedy rozdíl 5 magnitud odpovídá poměru 100 : 1

rozdíl magnitudy	poměr jasnosti
0	1
0.2	1.2
1	2.5
1.5	4
2	6.3
2.5	10
4	40
5	100
7.5	1000
10	10000

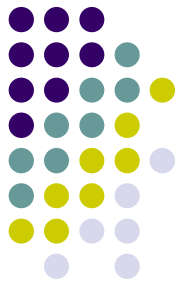


Astronomická fotometrie

- Pozorovaná hvězdná velikost - úpravou Pogsonovy rovnice dostaneme výraz pro hvězdnou velikost libovolné hvězdy

$$m = -2,5 \cdot \log (F / F_0)$$

- F_0 ... světelný tok hvězdy s 0^m , pak tedy $m_2 = 0^m$ a $m_1 = m$
- referenční světelný tok má hodnotu $F_0 = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ lm.m}^{-2}$



Zkreslení výsledků měření

- měření hustoty zářivého toku přicházejícího od hvězd patří k nejobtížnějším astrofyzikálním úkolům
 - I. zpravidla nesmírně nízké toky záření
 - II. nutné registrovat v celém rozsahu el. mag. spektra
- instrumentální komplikace týkající se rozdílné spektrální citlivosti detektorů záření
- zemská atmosféra - hlavní překážka (pro řadu oborů el. mag. spektra prakticky nepropustná)
 - I. výsledky nutno o vliv atmosféry opravit
 - II. provádět měření z kosmického prostoru

Zkreslení výsledků měření



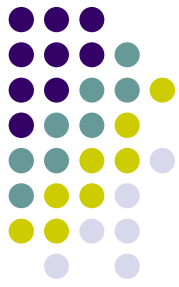
- o samotný pozorovaný tok je závislý ještě na dalších parametrech
- I. propustnost jednotlivých filtrů
- II. kvantovou účinnost detektoru světla
- III. kvantovou účinnost optiky
- IV. propustnost atmosféry a kvalita pozorovacích podmínek (seeing, oblačnost, vzdušná hmota, světelné znečištění)
- V. neodstranitelným vlivem je zeslabení světla hvězdy působením mezihvězdné látky → bolometrické veličiny jsou často nahrazovány veličinami pro určitý obor vymezený filtrem a propustností

$$F_{\lambda}^{Ins} = T_{\lambda}^f \cdot R_{\lambda}^{Det} \cdot R_{\lambda}^{Opt} \cdot X_{\lambda}^{Atm} \cdot F_{\lambda}^{Bol}$$

Fotometrické systémy



- v měřící soustavě aparatury může být do cesty fotonu postaven barevný filtr
- filtr má přesně dané vlastnosti, které určují charakteristiku zaznamenaného záření v závislosti na vlnové délce (širokopásmové, středněpásmové, úzkopásmové)
- instrumentální a standardní fotometrický systém, pečlivě změřené konstantní hvězdy - *hvězdné standardy*
- standardní systém - několik barevných filtrů, přičemž každý filtr pokrývá nějakou oblast vlnových délek
- k nejznámějším a nejpoužívanějším patří:
 - I. Johnsonův UBV systém
 - II. Strömgrenův ubvy systém



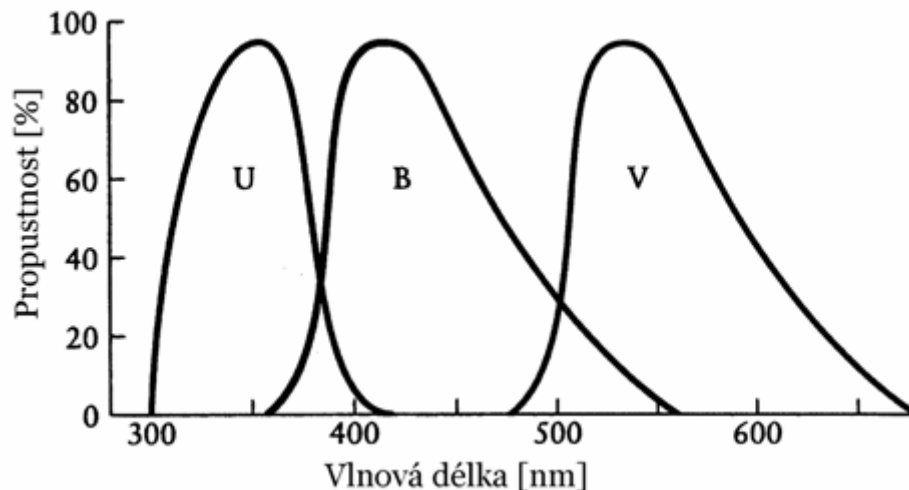
Johnsonův UBV systém

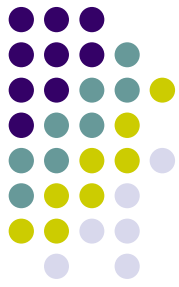
- Johnsonův (1953)
- trojice filtrů: U (ultraviolet), B (blue), V (visual)

U - propustnost od 300 nm do 420 nm s maximem u 360 nm

B - propustnost od 360 nm do 560 nm s maximem u 420 nm

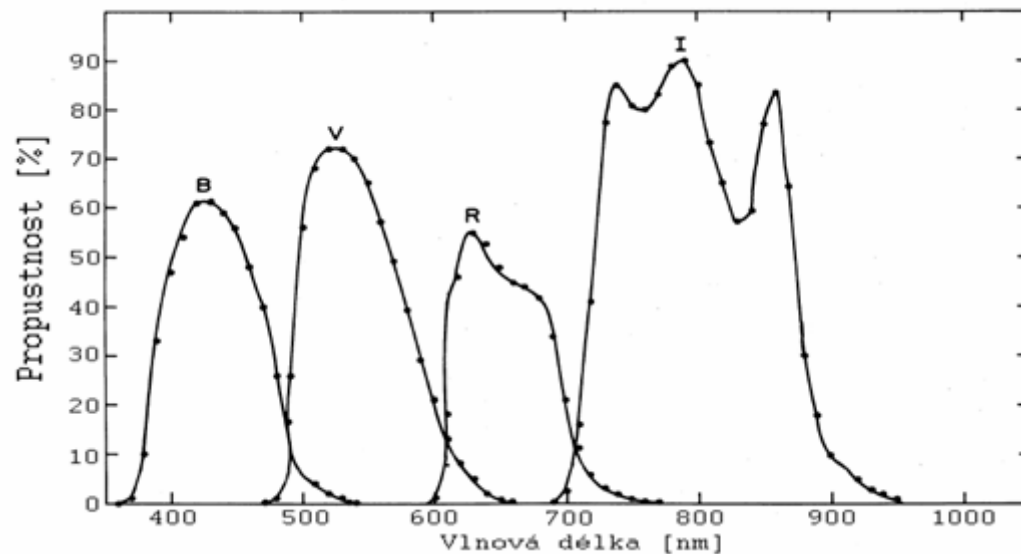
V - propustnost od 460 nm do 740 nm s maximem u 535 nm





Rozšířený Johnsonův systém

- Johnsonův UBV systém se dočkal rozšíření do červené a infračervené oblasti spektra
- přidáno bylo několik širokopásmových filtrů konkrétně R (700 nm), I (900 nm), J (1250 nm), K (2200 nm) a L (3400 nm)
- velmi často používanou kombinací filtrů je BVRI systém

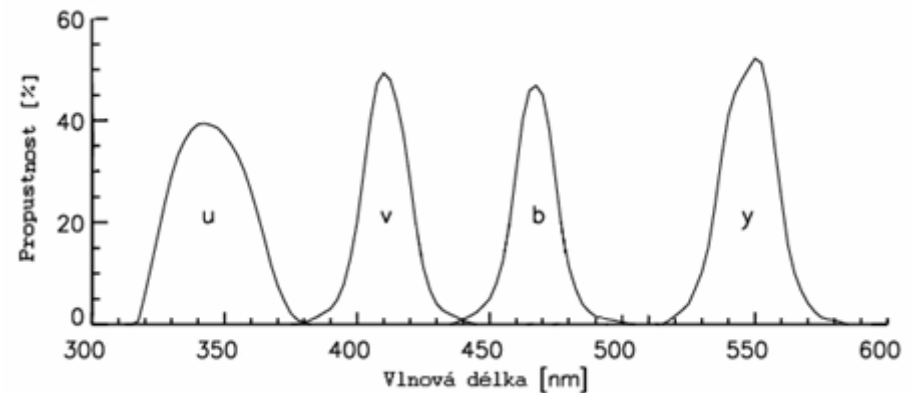
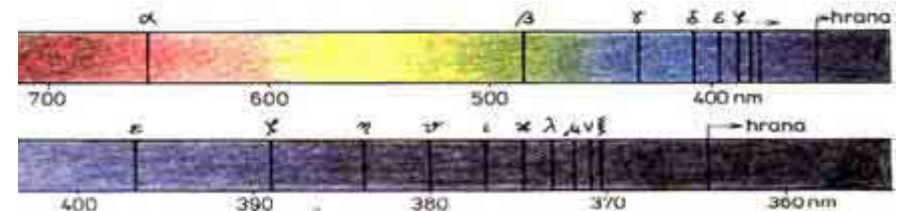
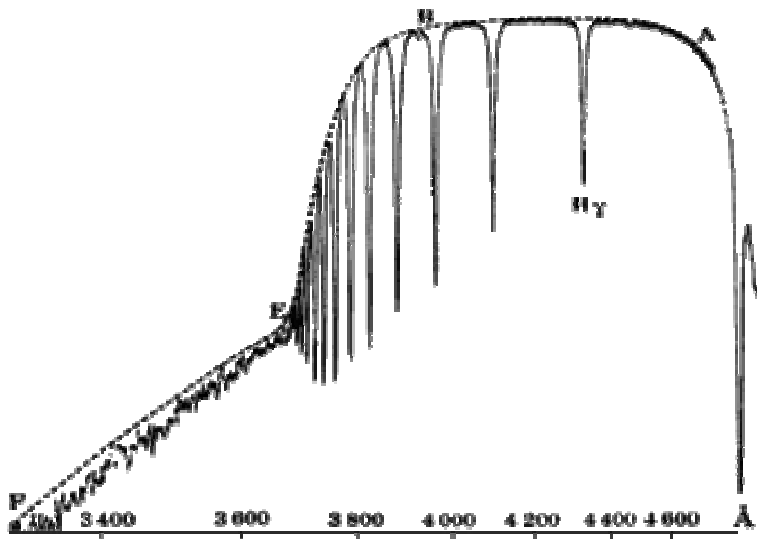


Strömgrenův uvby systém



- nevýhodou Johnsonova systému je, že barevný filtr U v sobě zahrnuje oblast vlnových délek v okolí Balmerova skoku → možnost určovat fotometricky výšku BS

u - maximum u 350 nm, v - maximum u 410 nm, b - maximum u 470 nm, y - maximum u 550 nm





Rozdělení fotometrie

- fotometrii lze rozdělit podle metod měření poz. toku
 - I. vizuální - odpovídá celkové intenzitě vlnových délek na které je citlivé lidské oko ($\lambda = 555 \text{ nm}$).
 - II. fotografická - odpovídá citlivosti fotografických desek (maximum u $\lambda = 430 \text{ nm}$)
 - III. fotoelektrická - vztahuje se na určité části spektra podle citlivosti fotočlánků (fotonásobič, fotočlánek)
 - IV. radiometrická - metoda se zabývá radiovou částí spektra (termočlánek, radiometr)
 - V. bolometrická - metoda se vztahuje na celkovou energii v celém rozsahu spektra hvězdy
 - VI. CCD - v oblasti 2D fotometrie přinesly revoluci v astronomii



II. část

Hvězdná fotometrie v praxi

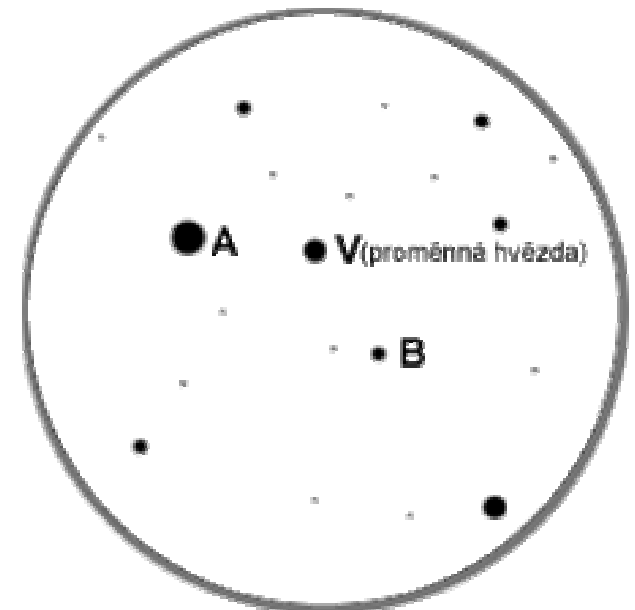
Vizuální fotometrie



- je založená na metodě porovnávání jasnosti (diferenciální fotometrie) dvou, nebo většího počtu srovnávacích hvězd
- pomocí oka, nezřídka používáme dalekohled
- v praxi se používají 2 základní metody fotometrie

I. Argelangerova metoda

II. Nijland - Blažkova metoda



Vizuální fotometrie

Argelangerova metoda



- o jasnost mezi srovnávací a proměnnou hvězdou si rozdělíme na několik tzv. odhadních stupňů a podle individuálního vjemu určíme její hodnotu například:

(AS)	definiční popis rozdílu slabostí srovnávacích hvězd	zápis
0	Hvězda a se jeví stejně slabá jako hvězda b nebo se chvílemi zdá střídavě nepatrně slabší a nepatrně jasnější než hvězda b .	$a0b$
1	Při bedlivém pozorování se hvězda a jeví častěji jasnější než stejně jasná jako hvězda b a jen vzácně se jeví hvězda b jasnější než hvězda a .	$a1b$
2	Hvězda a se jeví takřka vždy o málo jasnější než hvězda b . Jen zřídka se zdá, že se jejich slabosti rovnají.	$a2b$
3	Hvězda a se již na první pohled jeví jasnější než b .	$a3b$
4	Hvězda a je výrazně jasnější než hvězda b .	$a4b$

Vizuální fotometrie

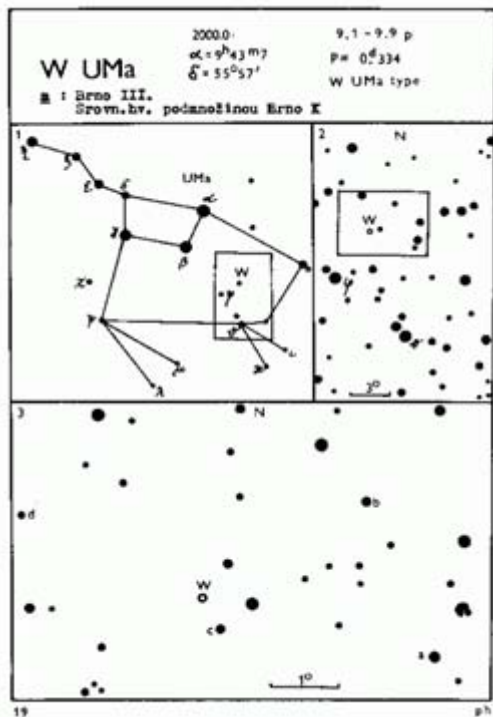
Nijland – Blažkova metoda



- odhadování poměrného rozdílu jasností mezi srovnávkami a proměnnou
- při odhadu se pozorovatel střídavě dívá na obě srovnávací hvězdy a proměnnou a odhaduje, o kolik odhadních stupňů se od sebe vzájemně liší
 - I. v prvním kroku je třeba stanovit rozdíl slabostí srovnávací hvězdy a proměnné v odhadních stupních
 - II. v druhém pak odhadnout velikost rozdílu slabostí mezi proměnnou a druhou srovnávací hvězdou při stálém porovnávání s velikostí prvního rozdílu

Vizuální fotometrie

Zákrytová proměnná hvězda W UMa

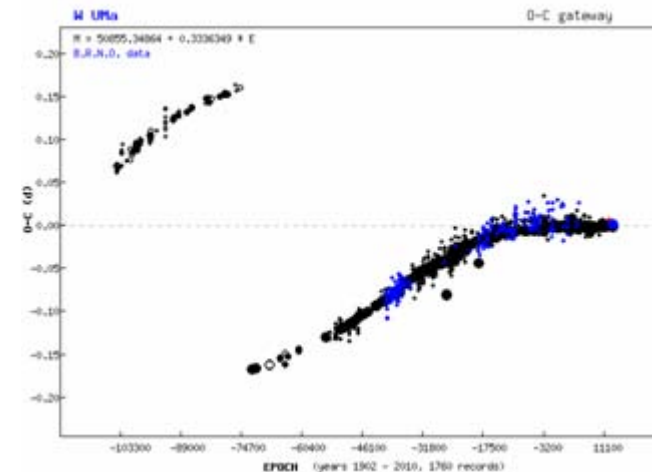
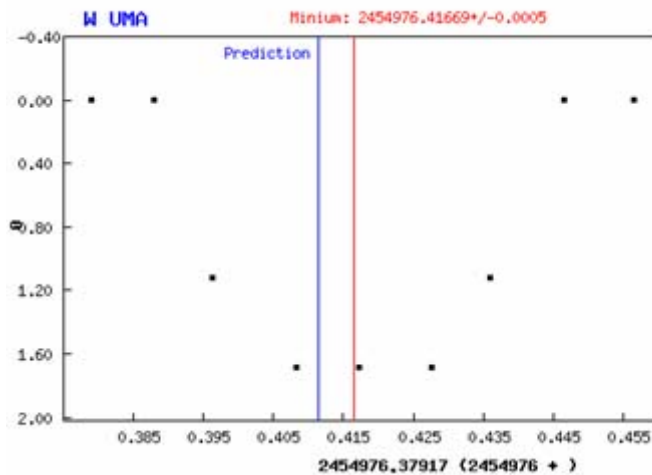


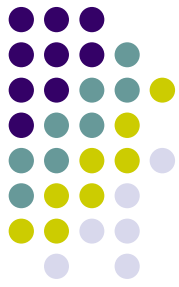
zápis	JD a-c	dV
a0v3c	2454976.37917	3 0
a0v3c	2454976.38819	3 0
a1v2c	2454976.39653	3 1.12
a2v2c	2454976.40833	4 1.68
a2v2c	2454976.41736	4 1.68
a2v2c	2454976.42778	4 1.68
a1v2c	2454976.43611	3 1.12
a0v3c	2454976.44653	3 0

a = 0 mag
 c = 3.37 mag
 $\phi 27/8 = 3.37$

$$V = \frac{Y - X}{p + q} \cdot p + X$$

výpočet HV provedeme podle vztahu pro *lineární interpolaci*

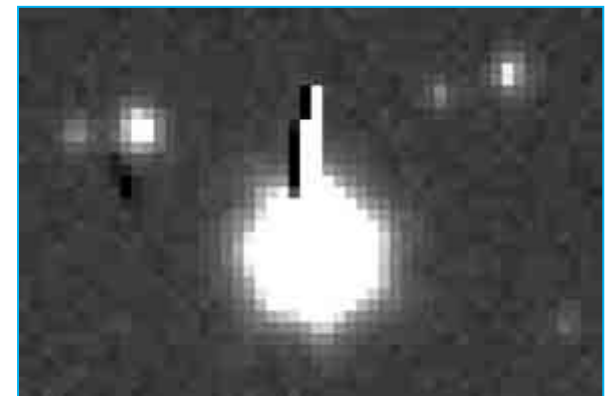
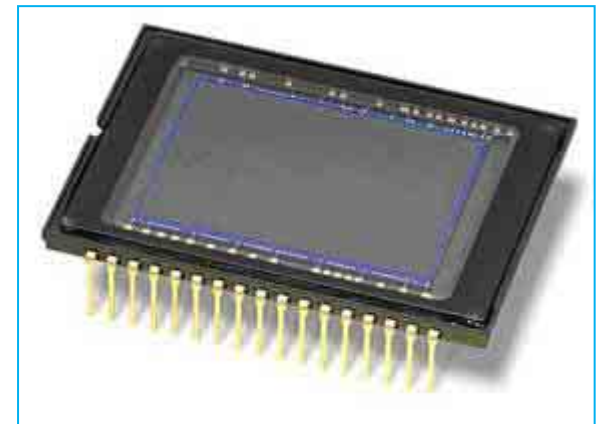
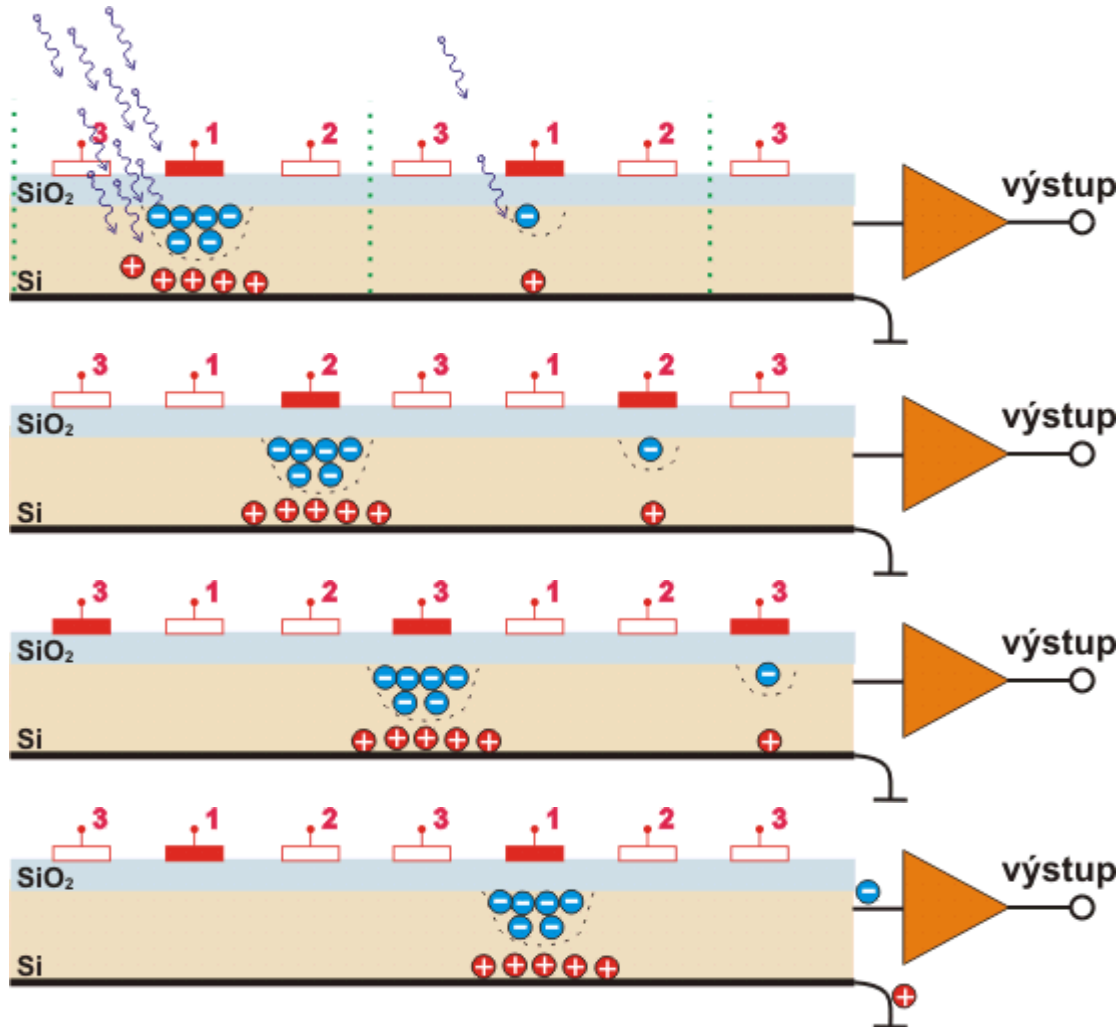
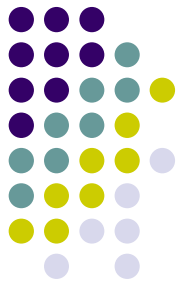




CCD detektor světla

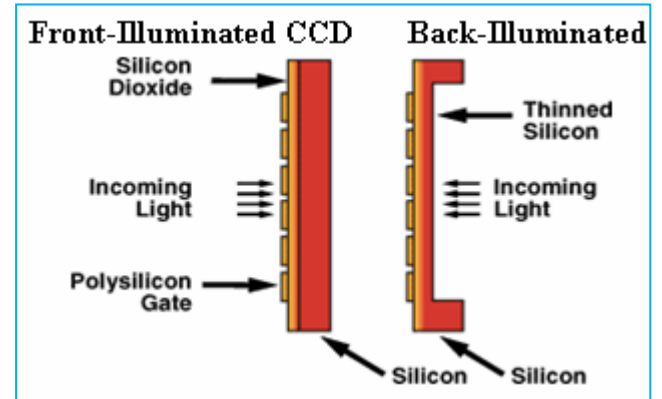
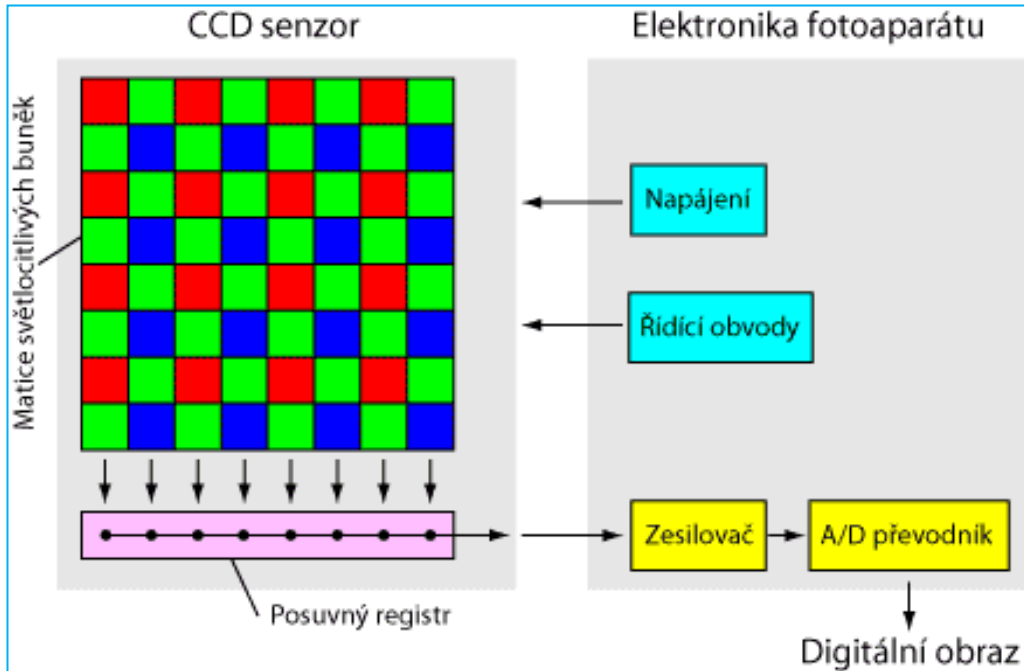
- v současnosti nejrozšířenější způsob určování hvězdných velikostí
- umožnil přesnější **fotometrické i astrometrické** pozorování slabších objektů za pomoci menších dalekohledů
- CCD je akronym z anglického názvu technologie Charge Coupled Device neboli nábojově vázané prvky
- CCD je zařízení, které přeměňuje energii dopadajícího světla na energii elektrického signálu - snímá obrazové informace
- plošný detektor (maticový), složený z tzv. pixelů

CCD - princip





CCD - princip

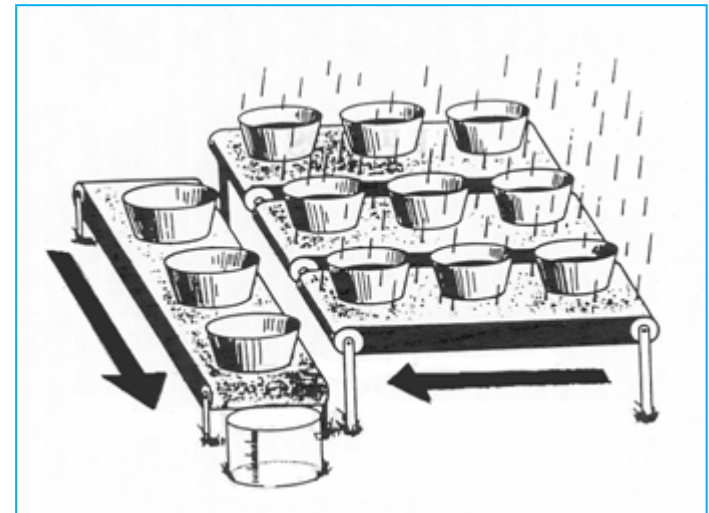
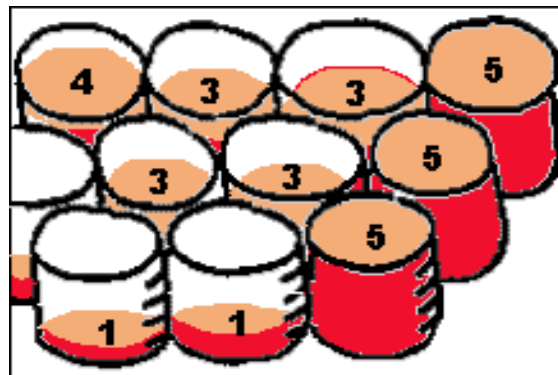


základní pojmy:

pixel

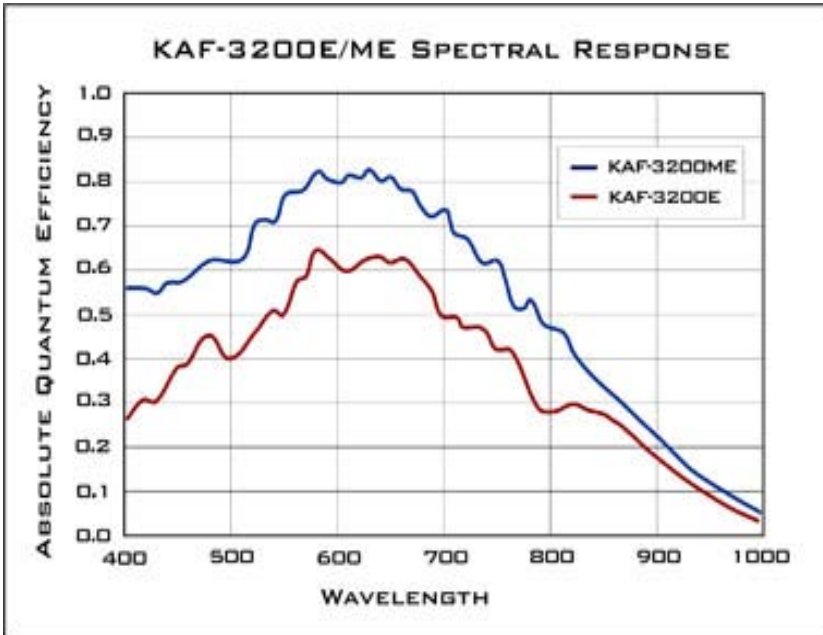
registr

ADU jednotka





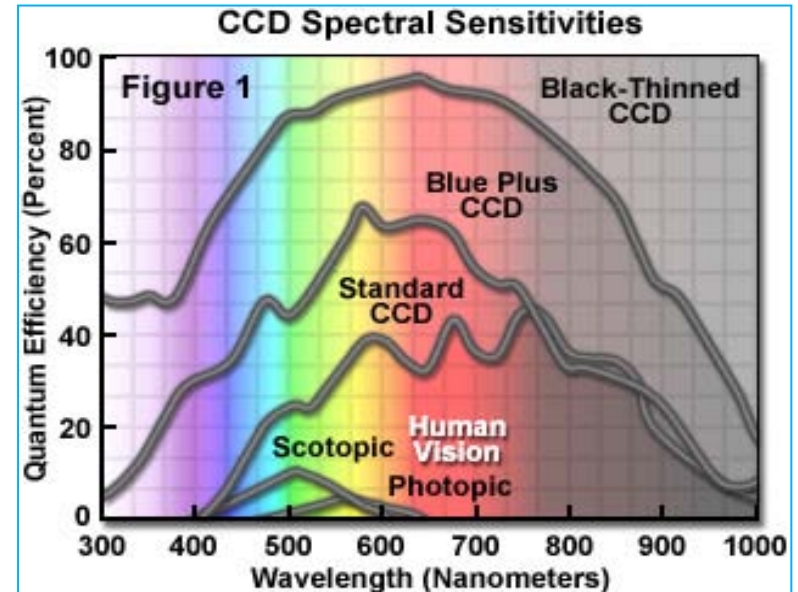
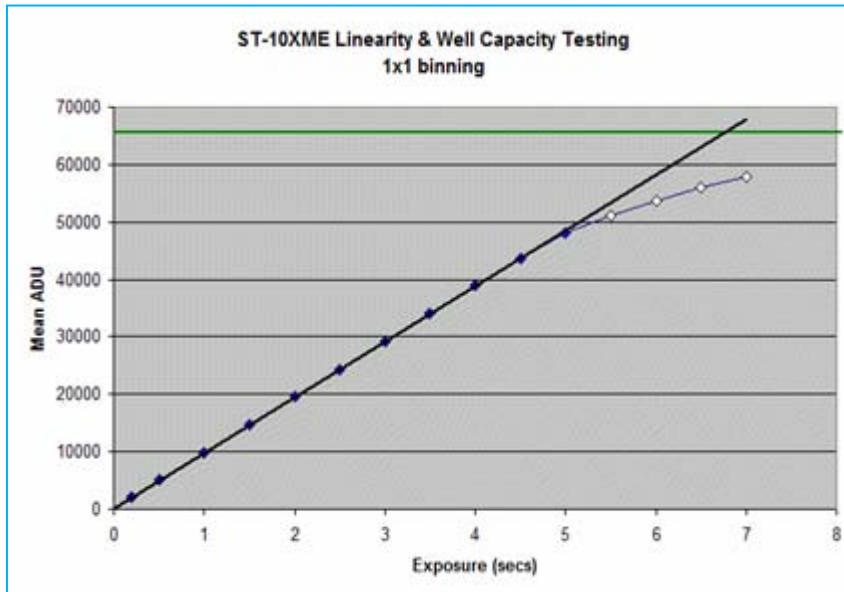
CCD SBIG *model ST-10XME*



CCD - hlavní výhody



- vysoká kvantová účinnost (80 - 90%)
- linearita v širokém rozsahu osvětlení
- současně měříme více hvězd



CCD - základní parametry



- o podle konstrukce:

- I. front illuminated - klasické CCD

- II. back illuminated - vyšší účinnost v modré a UV oblasti

- o rozdělení podle pixelů detektoru:

- I. rozměr pixelů - udávaný v μm (běžně používané jsou 9×9 až $24 \times 24 \mu\text{m}$)

- II. full well capacity - množství elektronů, které je pixel schopen uchovat v průběhu expozice $50\,000 - 300\,000 e^-$

- III. dark current - udává se v elektronech vygenerovaných při nula $^{\circ}\text{C}$ za sekundu na pixel (SBIG ST10 dosahuje $0.5 e^-/\text{pixel}/\text{sec}$)

CCD - základní parametry



CCD ST-10XME

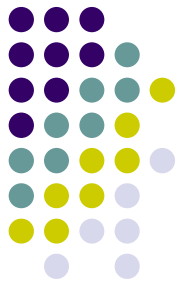
CCD	Kodak KAF-3200ME +TI TC-237
Pixel Array	2184 x 1472 pixels
CCD Size	14.9 x 10 mm
Total Pixels	3.2 million
Pixel Size	6.8 x 6.8 microns square
Full Well Capacity	~77,000 e-
Dark Current	0.5e-/pixel/sec at 0 degrees C.

CCD ST-9XE

CCD	Kodak KAF-0261E +TI TC-237
Pixel Array	512 x 512 pixels
CCD Size	10.2 x 10.2 mm
Total Pixels	262,000
Pixel Size	20 x 20 microns square
Full Well Capacity	~150,000 e-
Dark Current	4e-/pixel/sec at 0 degrees C.

- čím větší rozměr pixelu, tím má větší well capacity ale stoupá temný proud

CCD - základní parametry



- o další důležité parametry:

IV. bitová hloubka - kolik úrovní signálu dostáváme po konverzi A/D převodníkem 16bit = 65 536 ADU

V. gain - kolik elektronů tvoří jednu ADU jednotku 1,2 - 5 e-/ADU. To neznamena, že musíme dělit elementární částice 😊

VI. pixel digitization rate - kolik pixelů převede kamera na ADU (běžně $10^5/s$)

VII. binning - slučování pixelů. Náboj digitalizovaný ve výstupním uzlu tak představuje součet osvětlení pixelů slitých dohromady (běžně 2x2, 3x3)

CCD fotometrie

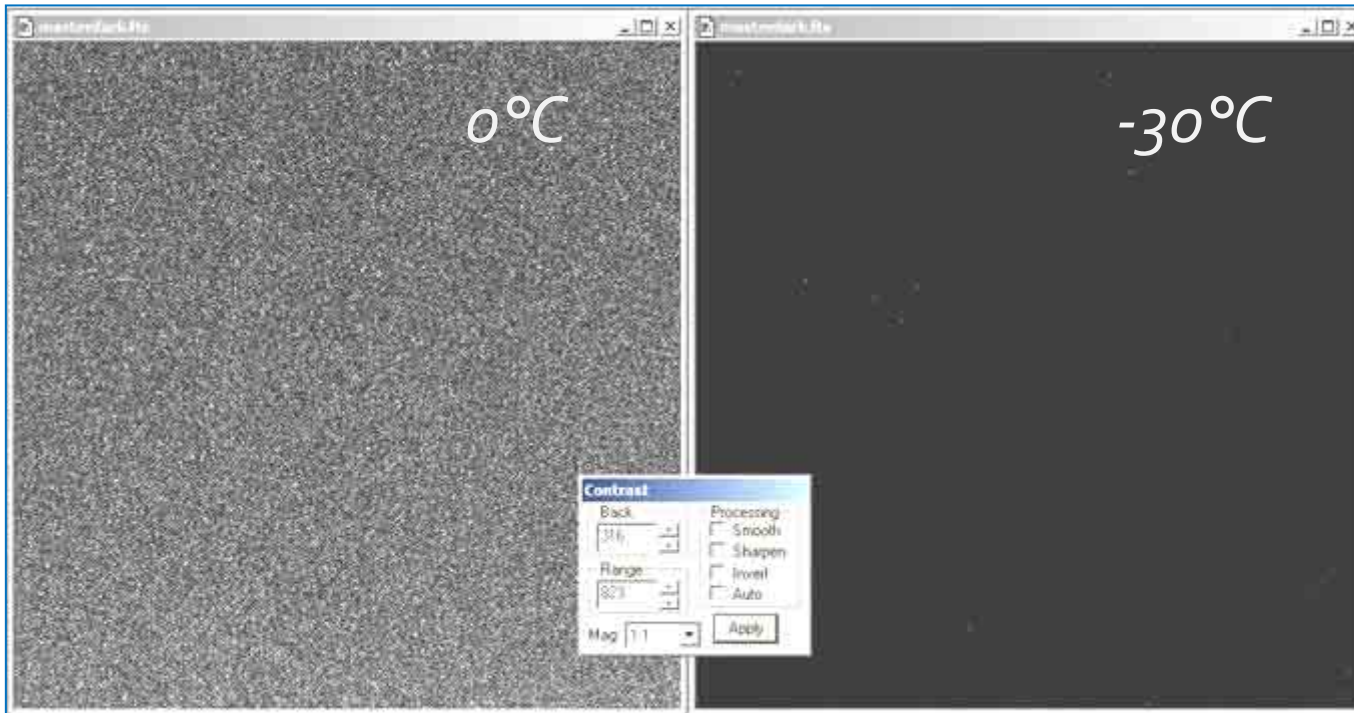


- porovnávání jasnosti (diferenciální fotometrie) hvězd na snímcích exponovaných CCD kamerou
- tyto snímky jsou již v digitální podobě → snadné zpracování počítačem
- Před vlastní fotometrií je nutné provést expozice pro tzv. fotometrickou kalibraci CCD snímků. V zásadě zahrnuje kalibrace dva kroky:
 - I. odečtení temného snímku
 - II. aplikace flat field

CCD fotometrie - temný snímek



- význam: eliminace (redukce) tepelného šumu CCD
- tepelný šum je závislý lineárně na teplotě a expoziční době
- získává se expozicí se stejným časem jako běžný snímek



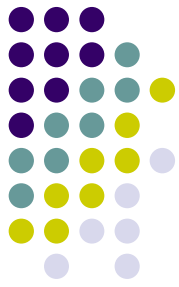
temný snímek
CCD SBIG
ST-9E exp. 50s

CCD fotometrie - flat field

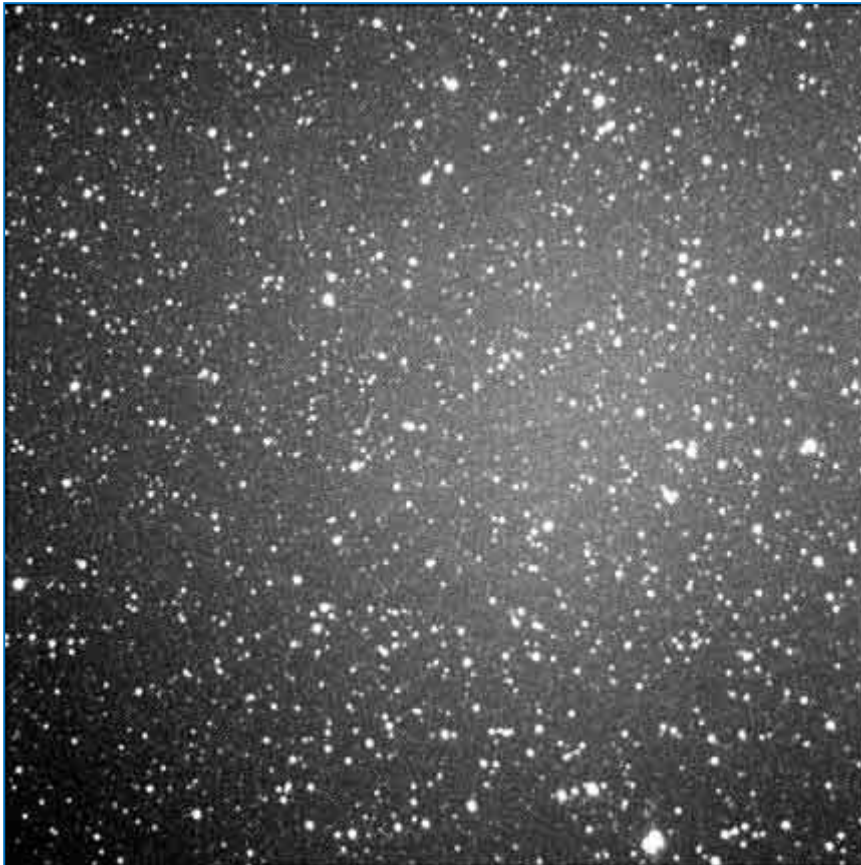


- význam: odstranění vinětace
- obrazové pole je dalekohledem často osvětleno nerovnoměrně - intenzita snímku na okrajích může být menší než u středu
- veškeré variace rovnoměrnosti osvětlení jsou způsobené dalekohledem nebo kamerou, nikoliv obrazem samotným
- flat field je obraz rovnoměrně osvětleného pozadí
- získává se: **krátkou expozicí (běžně 1 – 5 sekund)**
 - I. **namířením dalekohledu na rovnoměrně nasvětlenou bílou plochu**
 - II. **krátce před východem nebo po západu slunce**
 - III. **použitím tzv. light-boxu, zdroj plošně rovnoměrného bílého světla**

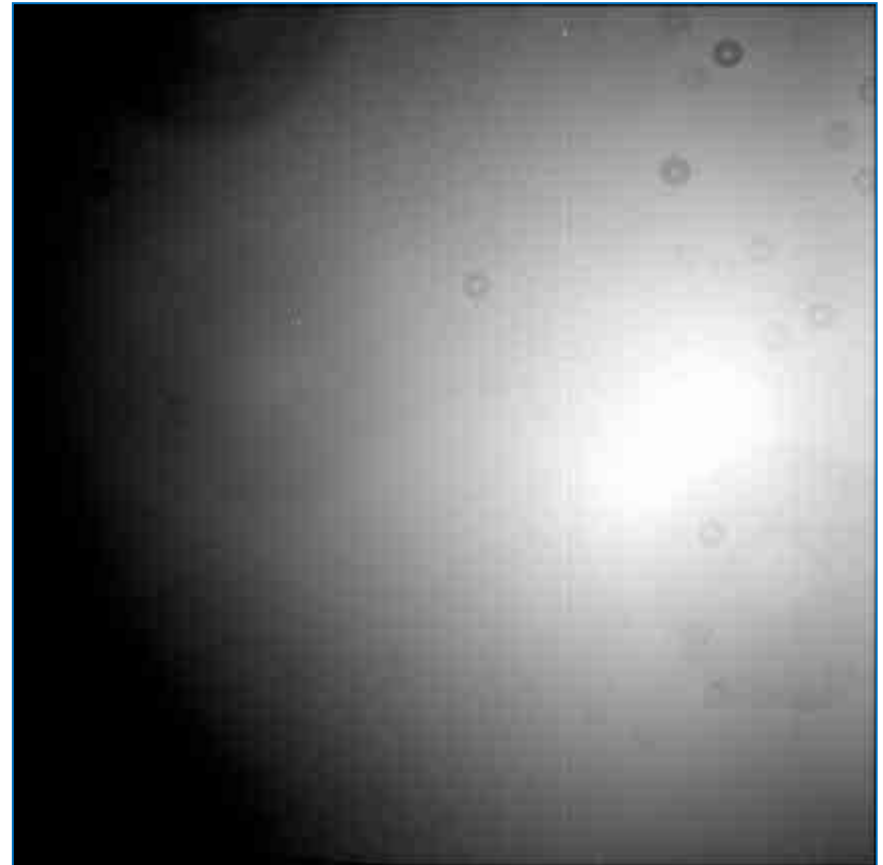
CCD fotometrie - flat field



běžný (light) snímek



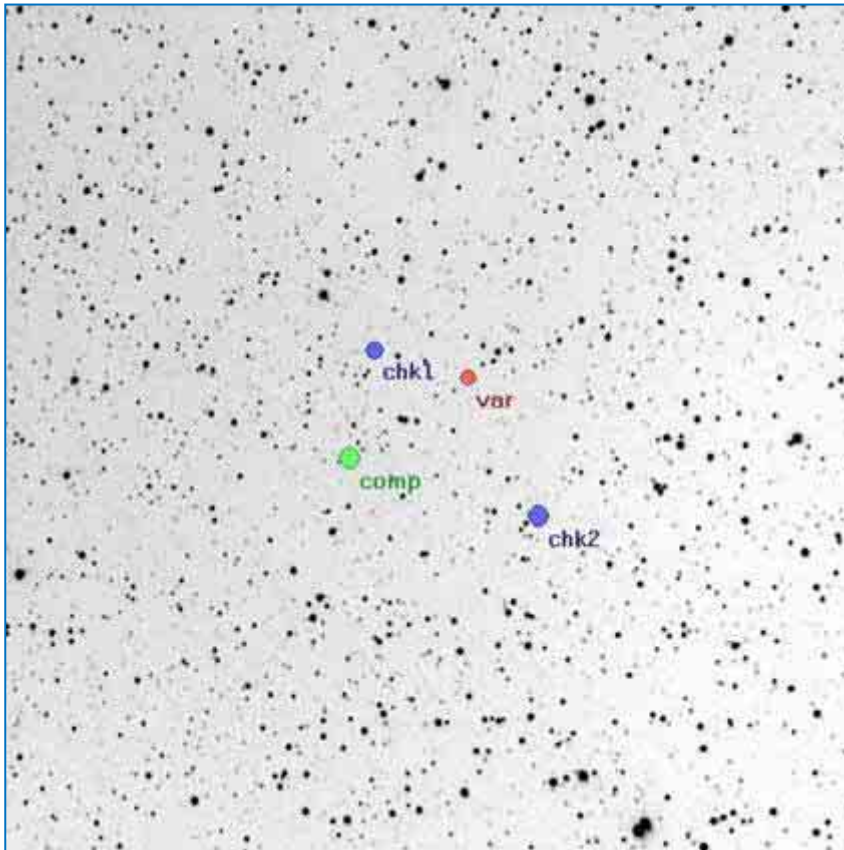
plochý (flat) snímek



CCD fotometrie



- o dalším krokem je výběr zkoumané a srovnávací hvězdy, na snímcích exponovaných CCD kamerou (Muniwin)

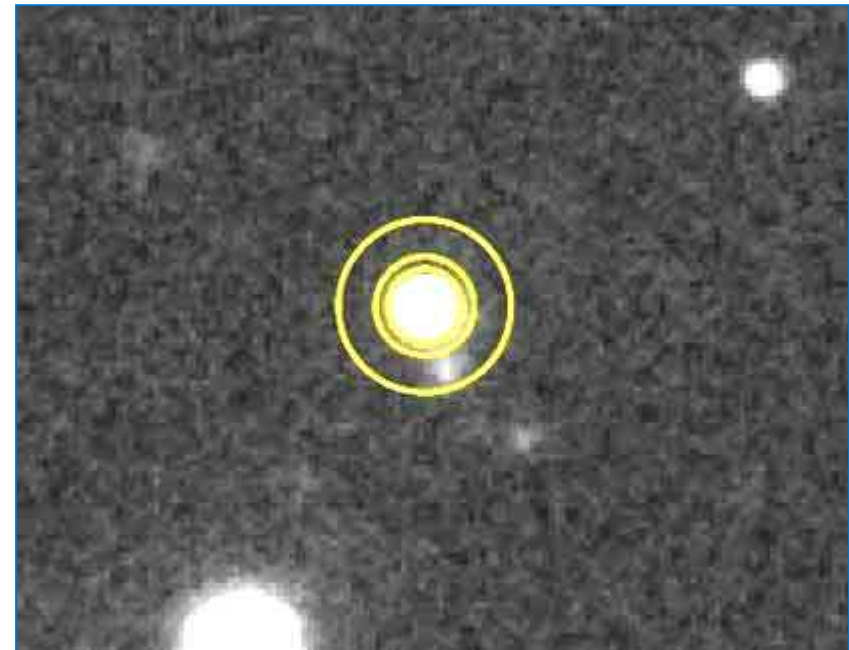
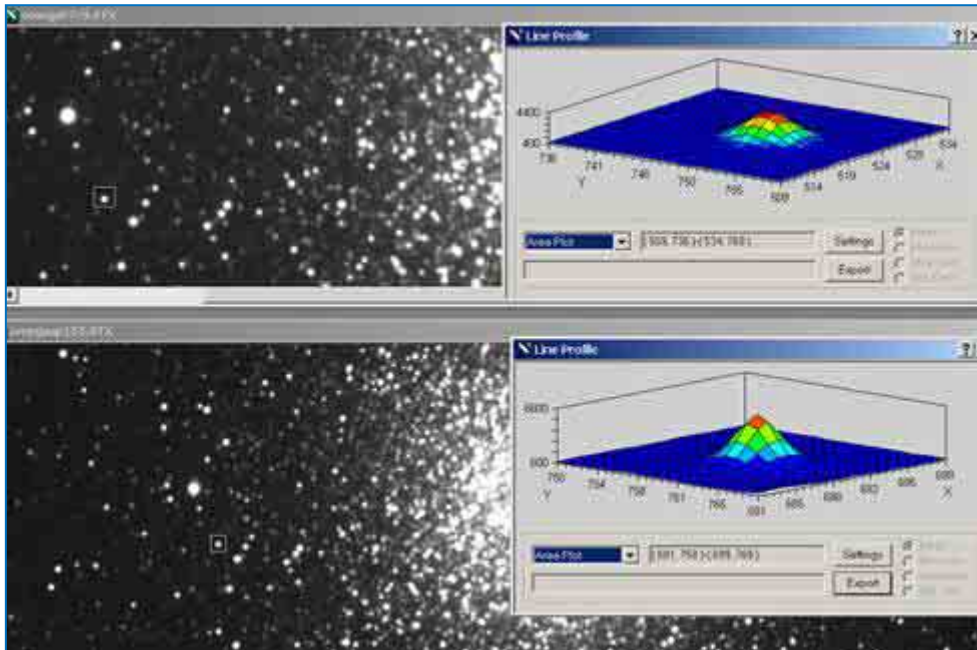


CCD fotometrie

metoda aperturní fotometrie



- provádí se pomocí softwarové clonky ve které se změří množství ADU jednotek pro zkoumanou hvězdu a všechny srovnávací a kontrolní hvězdy (obvykle průměr 2 - 30 px)
- stanovit mezikružší ve kterém změříme jas pozadí



CCD fotometrie

PSF (point spread function) fotometrie

- provádí se pomocí fitování profilu hvězdy na 3D snímku gaussovou funkcí
- jasnost hvězdy se určí integrací celkového toku
- pro každý snímek je nutné vytvořit empirickou PSF funkci

