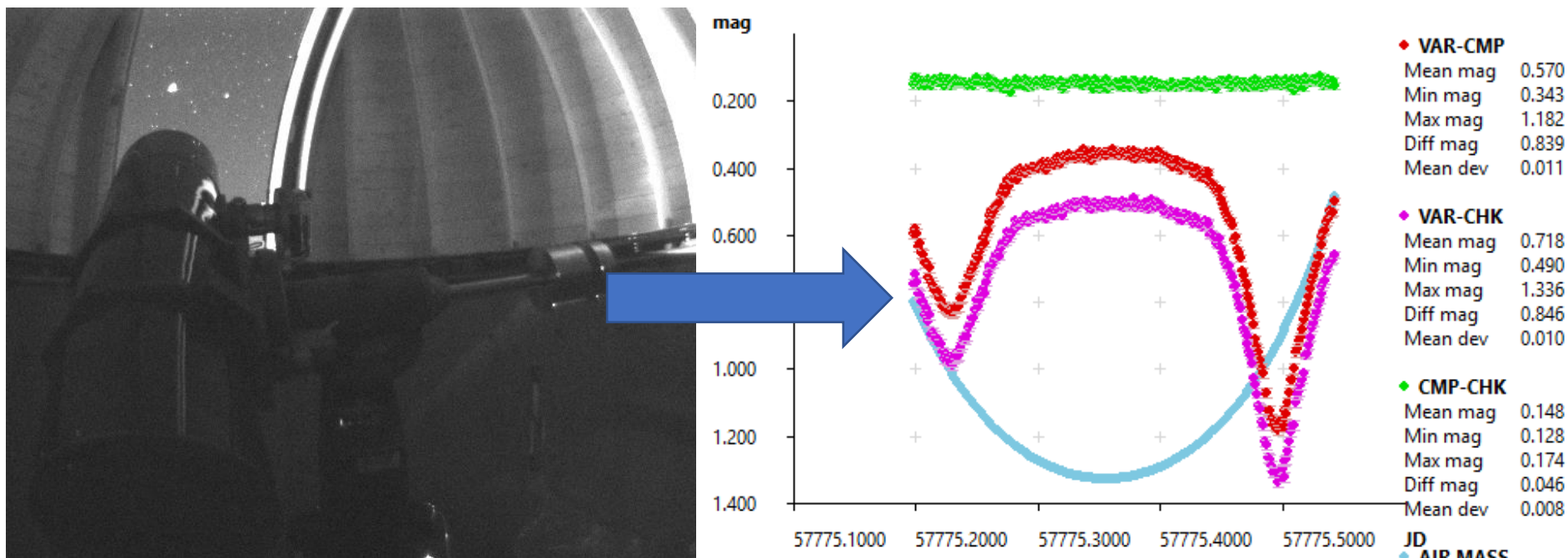


Od fotonu k magnitudě



Co se všechno děje než vznikne světelná křivka

Pavel Cagaš (SPHE ČAS, <https://www.tcmt.org/>)

Obsah

1. Dalekohled a montáž

- Typy dalekohledů, jejich přednosti a nedostatky
- Montáže a pointace, zorné pole, ostření

2. Kamera

- „Solid-state“ detektory, technologie CCD a CMOS
- Monochromní a barevné senzory, binning, blooming
- Linearita, zisk, fotony-elektrony-ADU
- Chlazení a temný proud, poměr signál/šum

3. Obraz a jeho kalibrace

- Datová reprezentace astronomického snímku v počítači
- Artefakty v obrazu ovlivňující měření
- Temný proud, vinětace, ...
- Artefakty způsobené pozorovacími podmínkami
- Co dalšího lze potkat na obloze

4. Fotometrické zpracování

- Krátká odbočka k astrometrii
- Apertura, flux a magnituda
- Proměnné, srovnávací (a kontrolní) hvězdy
- Barevný index, atmosférická extinkce
- Světelná křivka (konečně!)

Dalekohled a montáž

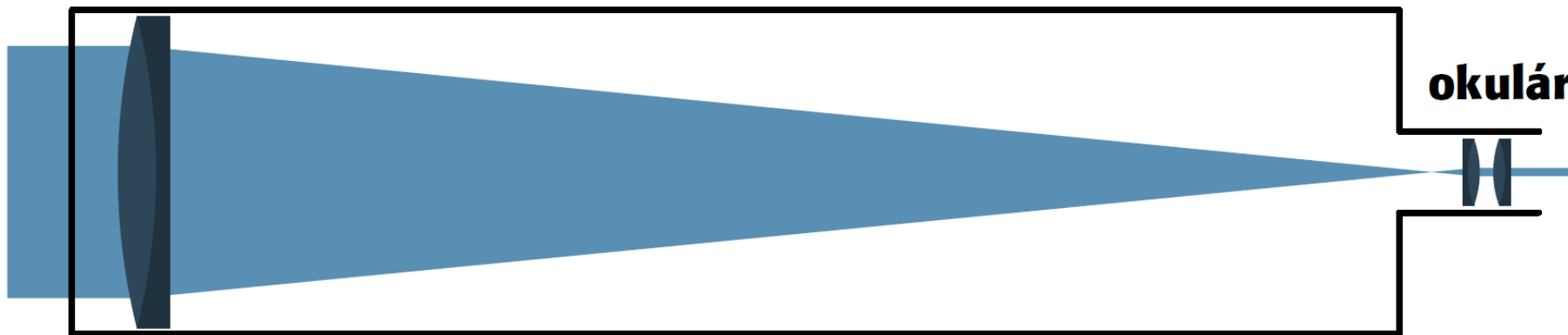


Dalekohled (nebo objektiv)

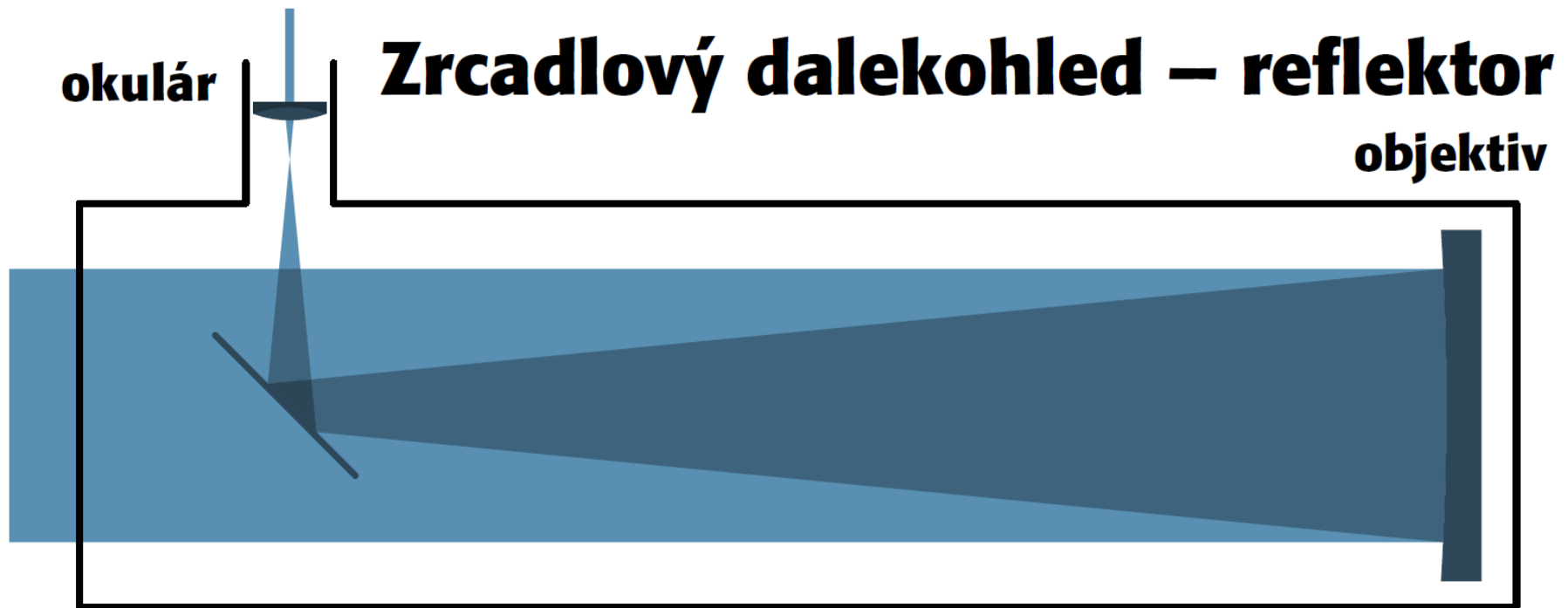
- Dalekohled v ohniskové rovině vytváří skutečný obraz pozorovaného předmětu
- Na místo okuláru do ohniskové roviny umístíme detektor (kameru)
 - Kamera/PC objektivně zaznamenávají přicházející světlo a zbavují nás subjektivních chyb
- Ne všechny dalekohledy jsou stejně vhodné pro různé typy pozorování
 - Navíc se liší cenou (poměrem cena/výkon) i daty, která s jejich pomocí můžeme získat

objektiv

Čočkový dalekohled – refraktor



- Výborná konstrukce malých a přenosných přístrojů
 - Levné (achromatické) varianty nedávají kvalitní obraz
- Nelze vyrobit dost velký, jsme omezeni jasností
- Špatný až velmi špatný poměr cena/výkon
 - Jen trochu větší refraktory o průměru >10 cm jsou extrémně drahé
 - Kvalitní (ED, APO) refraktory jsou extrémně drahé i při průměru <10 cm

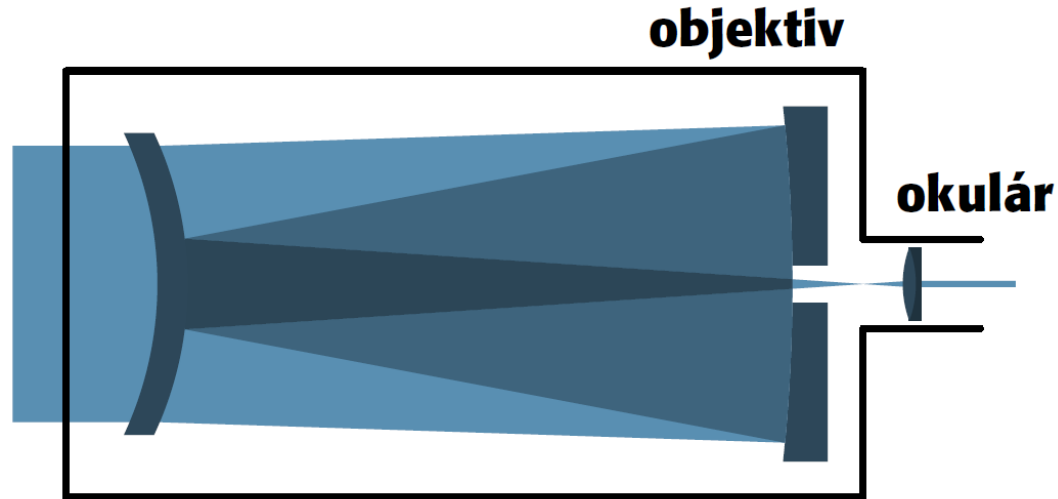


- Newton – jednoduchá, ale elegantní a účinná konstrukce
 - Nejlepší poměr cena/výkon
- Optimální ohnisková vzdálenost pro dosažení limitního rozlišení, omezeného neklidem atmosféry
- Optická vada parabolických zrcadel (koma) **vyžaduje použití korektoru**
 - S korektorem nabízí Newton velmi široké zorné pole

Korektory komy parabolických zrcadel

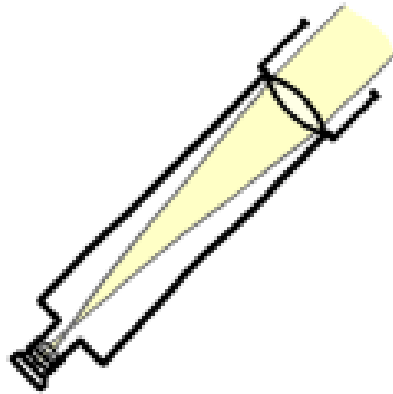


Katadioptrický dalekohled – Maksutov-Cassegrain



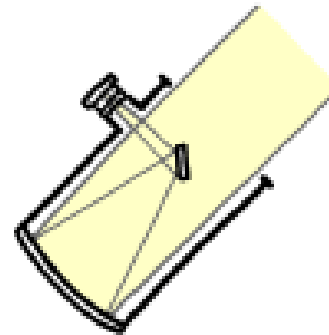
- Krátký tubus, kompaktní konstrukce
- Velmi dlouhá ohnisková vzdálenost, malé zorné pole
 - V praxi často kombinovány se zkracovači ohniska, výsledná konstrukce je ale už hodně složitá (hodně optických prvků)
- Vhodné spíše pro vizuální pozorování (konkurence malých refraktorů)
- Při měření proměnných hvězd malé zorné pole omezuje výběr srovnávacích hvězd

REFRACTOR



- MORE EXPENSIVE
- LESS COMPACT
- CHROMATIC ABERRATION
- REDUCED LIGHT-GATHERING

REFLECTOR



- CAN'T SEE SPACE VAMPIRES

<https://www.xkcd.com/1791/>

Montáž

- Dalekohled zobrazuje objekty na obloze, které:
 - jsou slabé, vyžadují dlouhé expozice
 - otáčí se spolu s oblohou
- Dalekohled musíme umístit na montáž, která jej vede za hvězdami
- Vedení za hvězdami dovolují rovníkové (ekvatoreální) montáže
 - Rovníková montáž vede dalekohled rovnoměrným pohybem v jedné ose
 - Azimutální montáž vyžaduje nerovnoměrné pohyby ve třech osách

Rovníkové montáže



Vidlicová (Anglická)



Německá (GEM –
German Equatorial Mount)

Rovníkové montáže

Vidlicová:

- (+) Dokáže sledovat objekt přes meridián
- (-) Náročné na výrobu
- (-) Dostatečně tuhá vidlice je těžká a velká
- (-) Dalekohled nelze jednoduše vyvážit
- (-) Omezená délka tubusu
- (-) Omezený prostor pro přístroje na spodní straně tubusu

Německá (GEM):

- (+) Jednoduchá konstrukce
- (+) Tuhá a robustní
- (+) Snadné vyvážení dalekohledu v obou osách
- (?) Vyžaduje protizávaží, i když ne nutně těžší než robustní vidlice
- (-) Schopnost sledovat objekt přes meridián závisí na konstrukci, deklinaci apod.

Pointace

- Tvzení, že při pozorování proměnných hvězd nezáleží na kvalitě obrazu (jako třeba u astronomické fotografie), platí pouze podmíněně:
 - Pokud máme signálu nazbyt (pozorujeme velmi jasnou hvězdu), skutečně na kvalitě moc nezáleží
 - Pokud sledujeme hvězdy u teoretické hranice dosahu sestavy, vysoká kvalita obrazů je naopak nezbytná
- Kvalita obrazu je dána:
 - Dalekohledem (kvalita optiky, kolimace, korekce aberací, uchycení kamery, ...)
 - Kvalitou vedení dalekohledu za hvězdami (tracking)

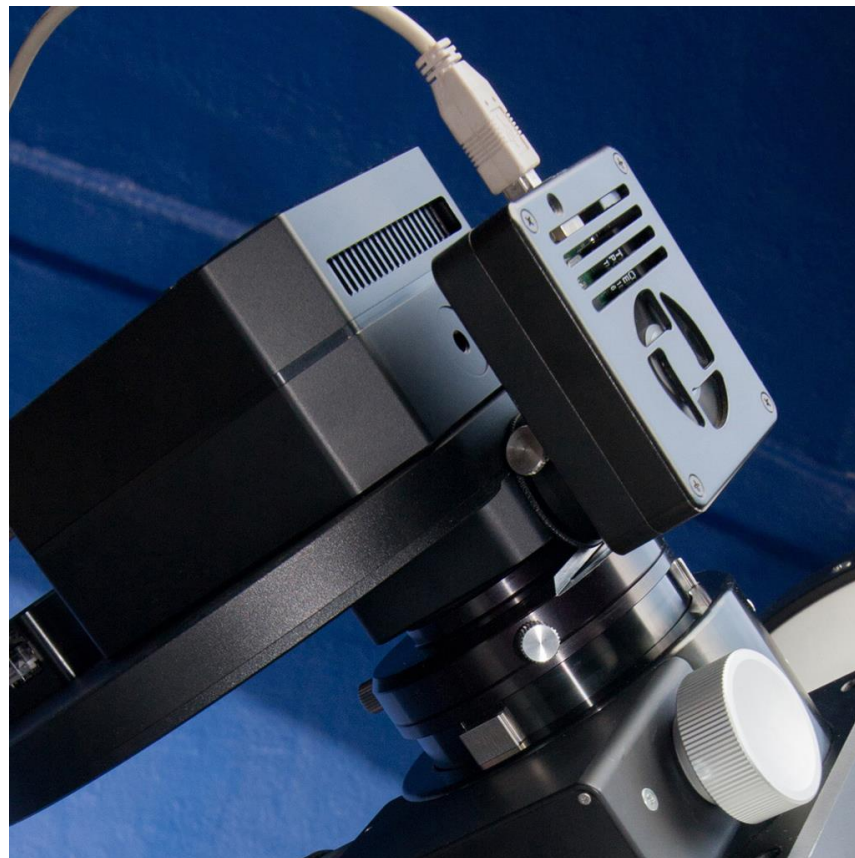
Pointace

- Většina komerčních montáží nezvládne udržet hvězdy v rámci povolených tolerancí (~jednotky úhlových vteřin) po celou dobu expozice
- Je nezbytné chod montáže korigovat snímáním vybrané hvězdy a měřením její polohy vzhledem k referenčnímu (prvnímu) snímku
- Perioda snímání $<$ čas, po který je montáž schopna dodržet zadanou toleranci
 - U běžných komerčních (Čínských) montáží to jsou jen jednotky sekund

Pointační kamera



Na samostatném
dalekohledu



Na Off-Axis Guider (OAG)
adaptéru

OAG zblízka

Port pro pointační kameru
Diagonální zrcátko



Umístění pointační kamery

Pointační dalekohled

- (-) Deformuje se jinak než hlavní dalekohled
- (-) Zatěžuje montáž
- (+) Dovoluje optimalizovat ohniskovou vzdálenost pro pointaci (širší zorné pole)
- (+) Snazší hledání pointační hvězdy
- (+) Nezvyšuje nároky na zorné pole hlavního dalekohledu

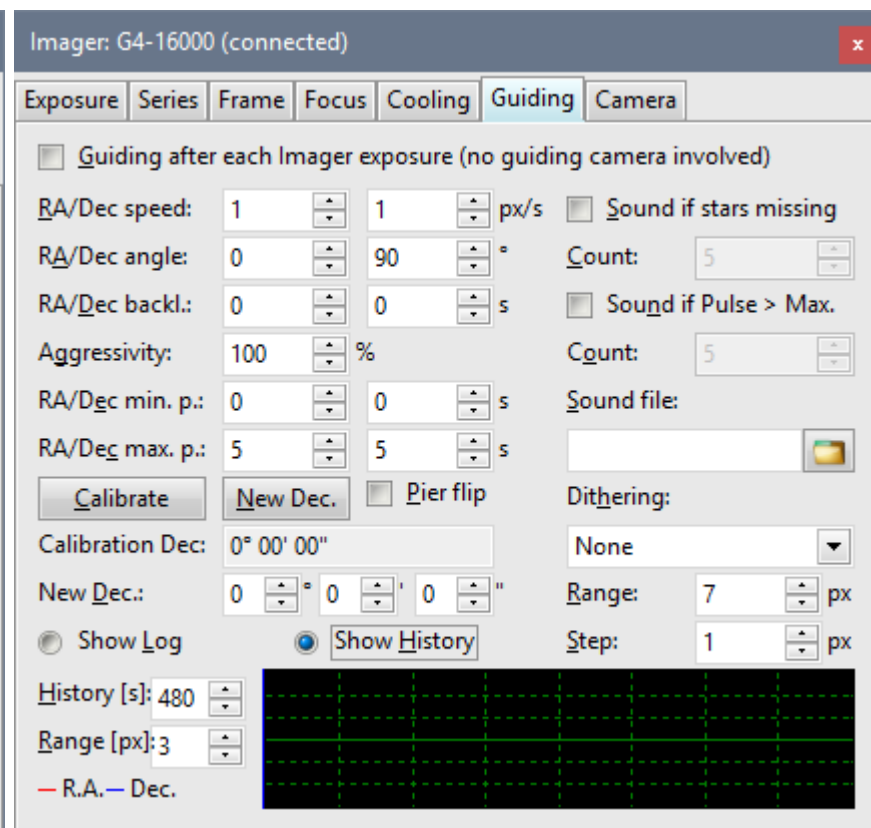
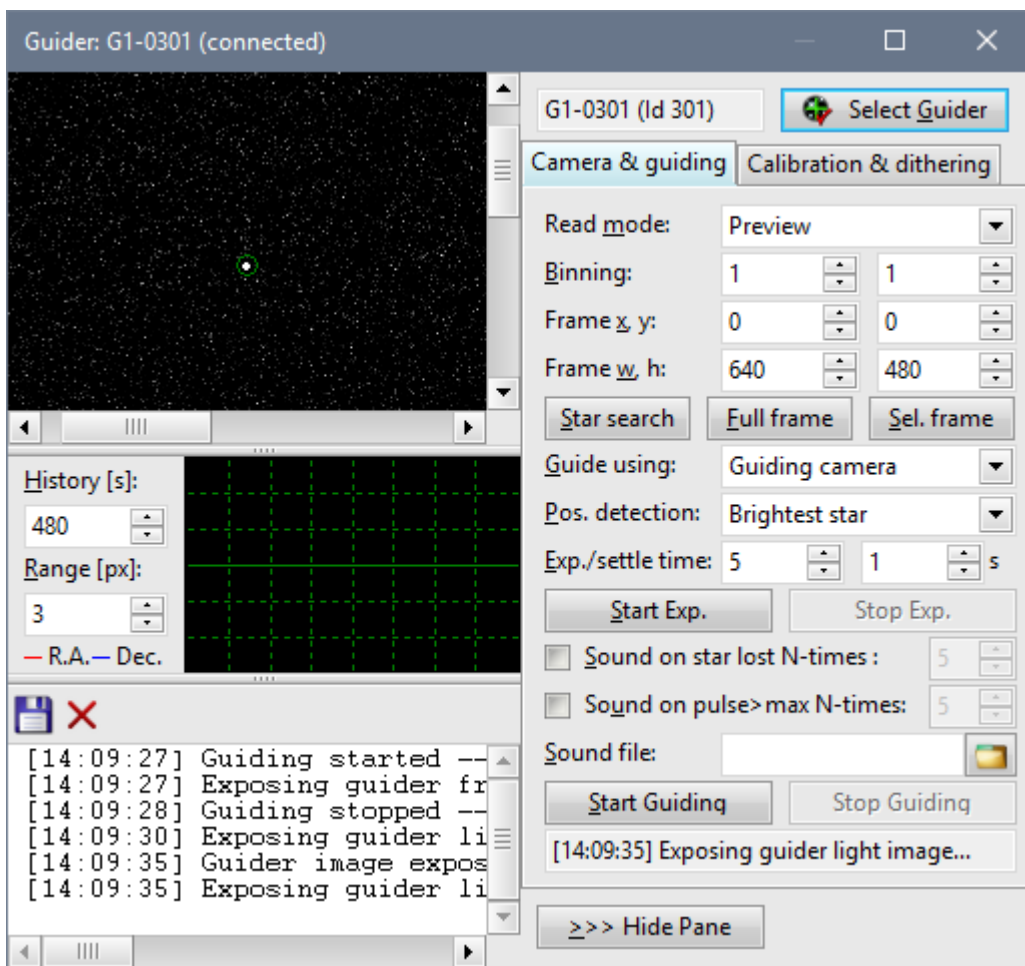
Off-Axis Guider adapter

- (+) Odpadají rozdílné optické osy (rozdílné mechanické deformace)
- (+) Odpadá pointační dalekohled (lehčí sestava)
- (-) Ohnisková vzdálenost často moc dlouhá pro pointaci
- (-) Obtížné (někdy nemožné) hledání pointační hvězdy
- (-) Vysoké nároky na zorné pole hlavního dalekohledu

Mezi-snímková pointace

- Pokud je montáž natolik kvalitní, že udrží obraz v rámci tolerancí během jedné expozice, není pointace samostatnou kamerou nutná
- Je možné korigovat odchylky pouze mezi jednotlivými snímky hlavní kamery
- Korekce eliminuje refrakci, deformace tubusu, ...
 - Refrakci do jisté míry eliminuje i moderní montáž („King tracking rate“, přesnost je ale samozřejmě omezena)
- Hvězda pak „necestuje“ po zorném poli
- Vyžaduje se možnost korekce prostřednictvím montáže (Pulse-Guide), nemáme „autoguider“ port

Ovládací prvky pro klasickou (vlevo) a mezi-snímkovou pointaci (vpravo)



Pointace

- V obou případech jsou odchylky korigovány krátkými a pomalými posuny montáže
 - tzv. „guiding speed“, typicky $\sim \frac{1}{2}$ „tracking speed“
- Příkazy montáži lze předávat:
 - HW: standardizovaný 6-pin (tzv. „autoguider“ konektor)
 - SW: rozhraní ovladače musí podporovat tzv. „Pulse-Guide“ rozhraní, tedy příkazy o směru a době trvání posunů
- V obou případech není posun absolutní (úhel na obloze), ale je zadán potřebný čas (délka pulsu)

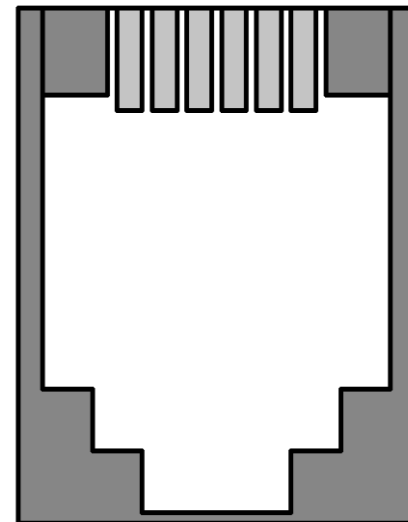
Auto-guider port

Standard zavedený
kamerou SBIG ST4:

1. R.A. + (doleva)
2. Dec + (nahoru)
3. Dec – (dolů)
4. R.A.– (doprava)
5. Společný pól (zem)
6. Nezapojeno



123456



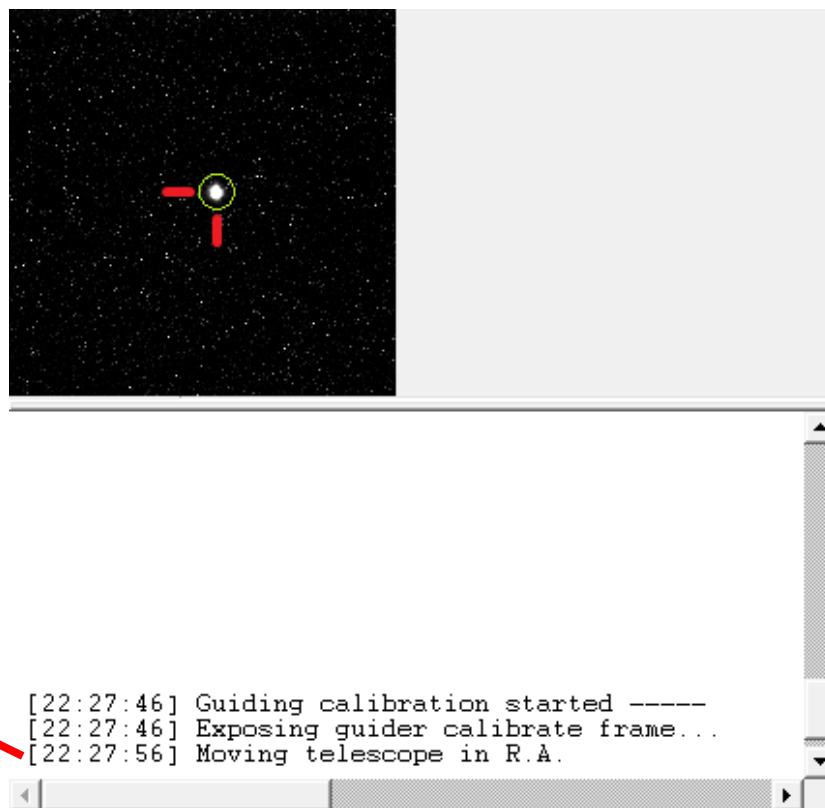
Kalibrace pointace

- Kamera dokáže spočítat odchylku od referenčního snímku v pixelech (ve zlomcích pixelu)
- Montáž se ovládá časem (délkou) posunu
- Vztah mezi pixely a časem je nutné určit **kalibrací**
- Kalibrace určí rychlosti posunu v obou osách a úhel mezi osami montáže a osami snímku z pointační kamery
 - Protože rovníkové souřadnice jsou sférické, ale projekce oblohy na čip je tangenciální, odezva v R.A. závisí na deklinaci

Kalibrace pointace – krok 1

- Expozice snímku, zjištění [X, Y] referenční hvězdy
- Posun dalekohledu v R.A. o **kalibrační puls**

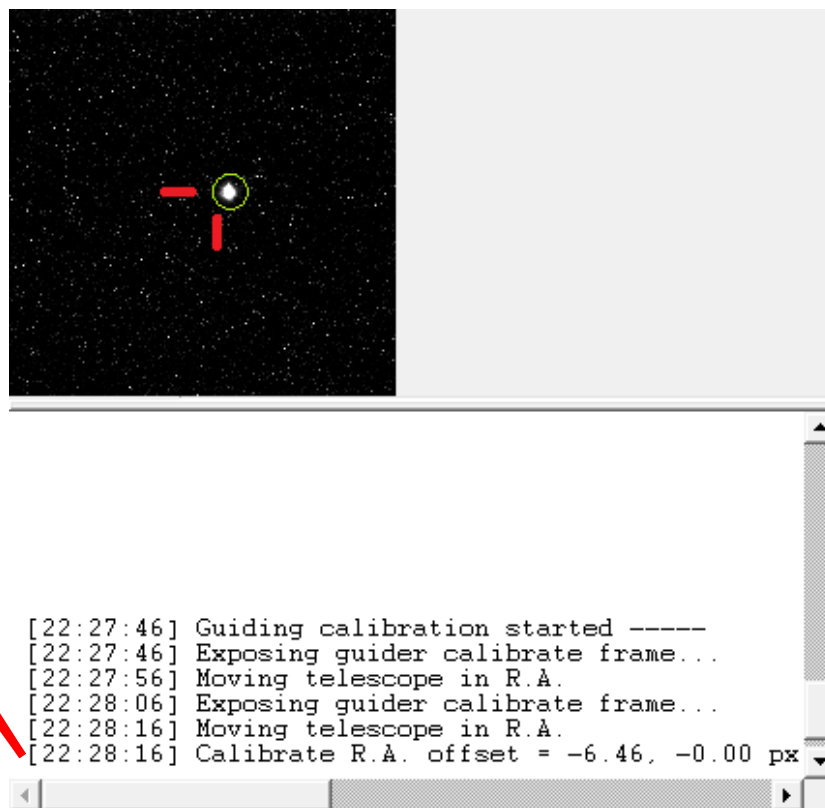
RA/Dec speed:			px/s
RA/Dec angle:			°
RA/Dec backl.:	0	0	s
Aggressivity:	75		%
RA/Dec min. p.:	0	0	s
RA/Dec max. p.:	10	10	s
RA/Dec cal. p.:	10	10	s



Kalibrace pointace – krok 2

- Expozice snímku, zjištění ΔX , ΔY proti referenci
- Výpočet **rychlosti** a **úhlu** pro posun v R.A.

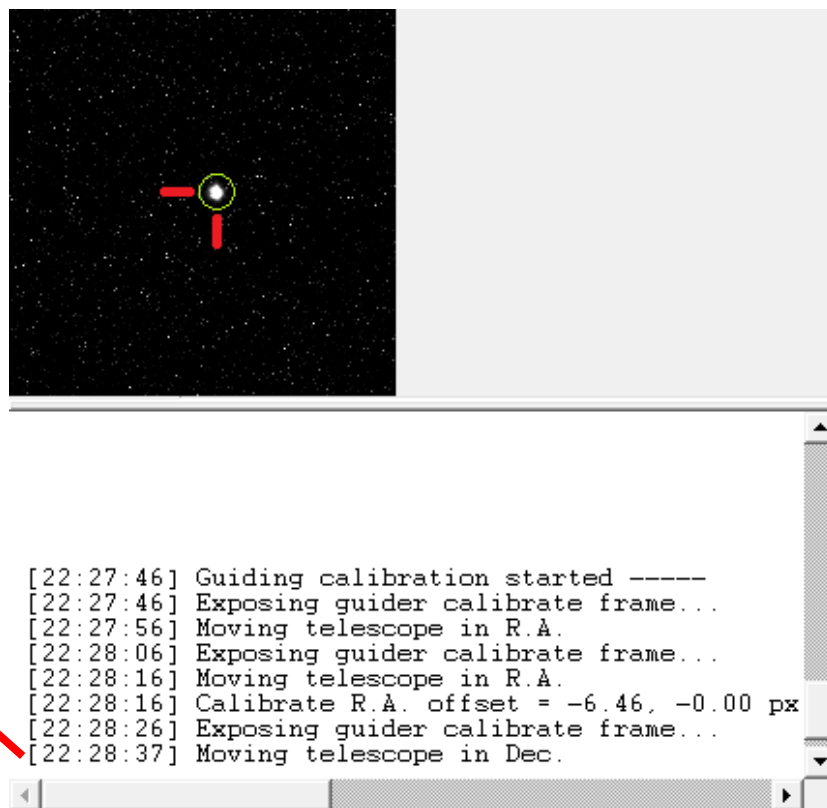
RA/Dec speed:	0.64	px/s
RA/Dec angle:	-179.96	°
RA/Dec backl.:	0	s
Aggressivity:	75	%
RA/Dec min. p.:	0	s
RA/Dec max. p.:	10	s
RA/Dec cal. p.:	10	s



Kalibrace pointace – krok 3

- Posun zpět, nová expozice (nové souřadnice [X, Y])
- Posun dalekohledu v Dec. o **kalibrační puls**

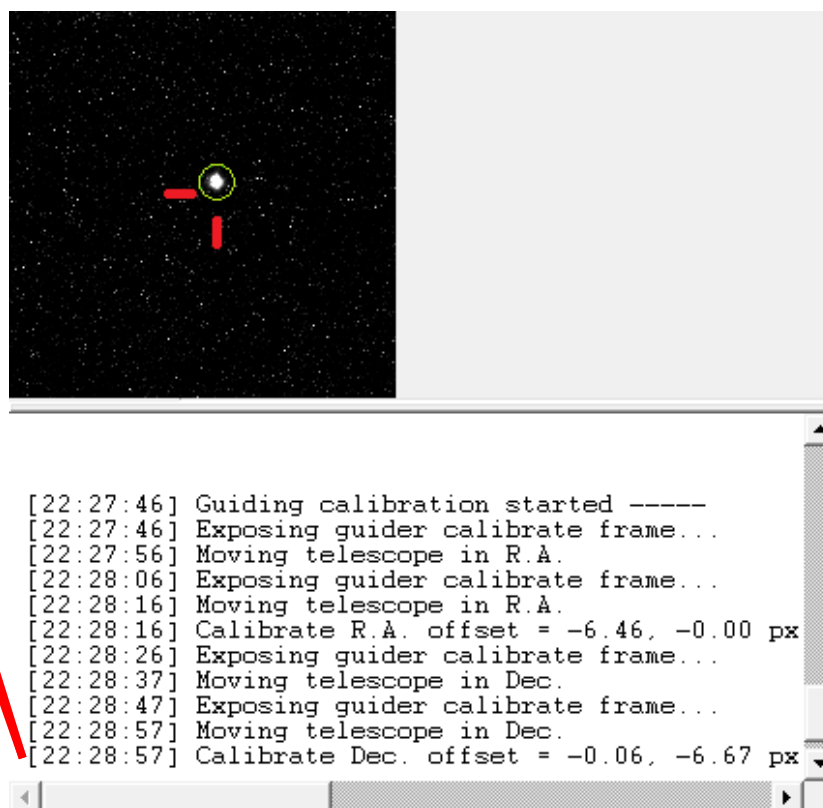
RA/Dec speed:	0.64		px/s
RA/Dec angle:	-179.96		°
RA/Dec backl.:	0	0	s
Aggressivity:	75		%
RA/Dec min. p.:	0	0	s
RA/Dec max. p.:	10	10	s
RA/Dec cal. p.:	10	10	s



Kalibrace pointace – krok 4

- Expozice snímku, zjištění ΔX , ΔY proti referenci
- Výpočet **rychlosti** a **úhlu** pro posun v Dec.

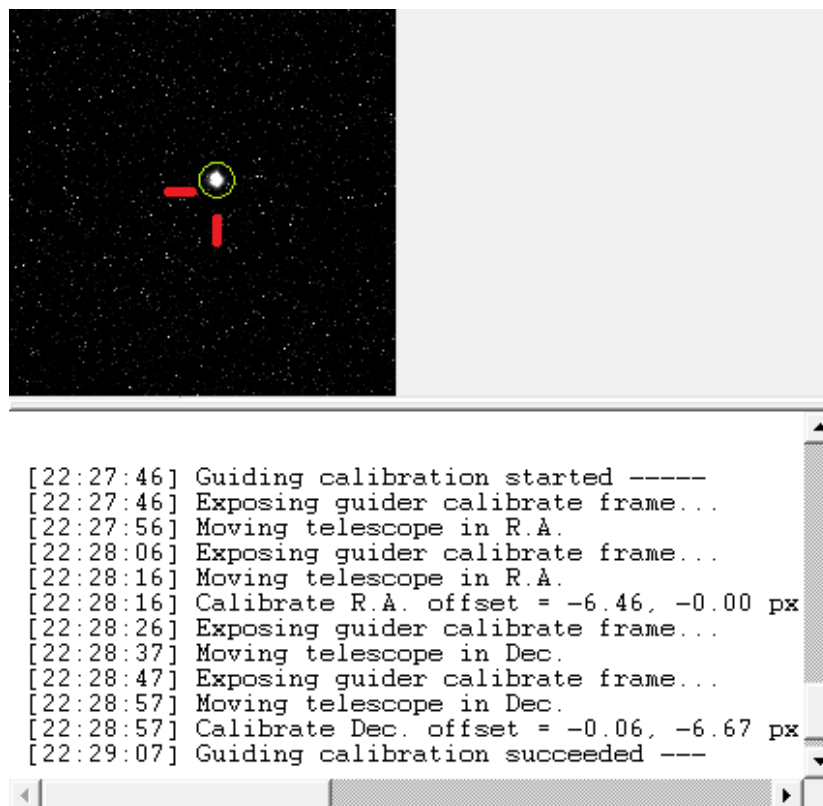
RA/Dec speed:	0.64	0.66	px/s
RA/Dec angle:	-179.96	-90.52	°
RA/Dec backl.:	0	0	s
Aggressivity:	75	%	
RA/Dec min. p.:	0	0	s
RA/Dec max. p.:	10	10	s
RA/Dec cal. p.:	10	10	s



Kalibrace pointace – krok 5

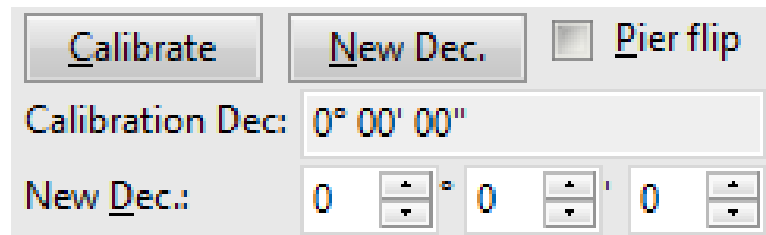
- Návrat dalekohledu v Dec., ukončení kalibrace
- Nový snímek se už neexponuje (není zapotřebí)

RA/Dec speed:	0.64	0.66	px/s
RA/Dec angle:	-179.96	-90.52	°
RA/Dec backl.:	0	0	s
Aggressivity:	75		%
RA/Dec min. p.:	0	0	s
RA/Dec max. p.:	10	10	s
RA/Dec cal. p.:	10	10	s



Parametry pointace při přesunu dalekohledu a přeložení montáže

- Při přesunu na nové souřadnice nebo přeložení montáže se parametry pointace mění
- Není ale nutno opětovně kalibrovat, nové parametry lze dopočítat z existujících
 - Při přeložení se vektory otočí o 180°
 - Při přesunu na nové souřadnice zůstává rychlost v Dec. shodná, rychlost v R.A. se přepočítá
 - Je ale nezbytné znát deklinaci v době původní kalibrace

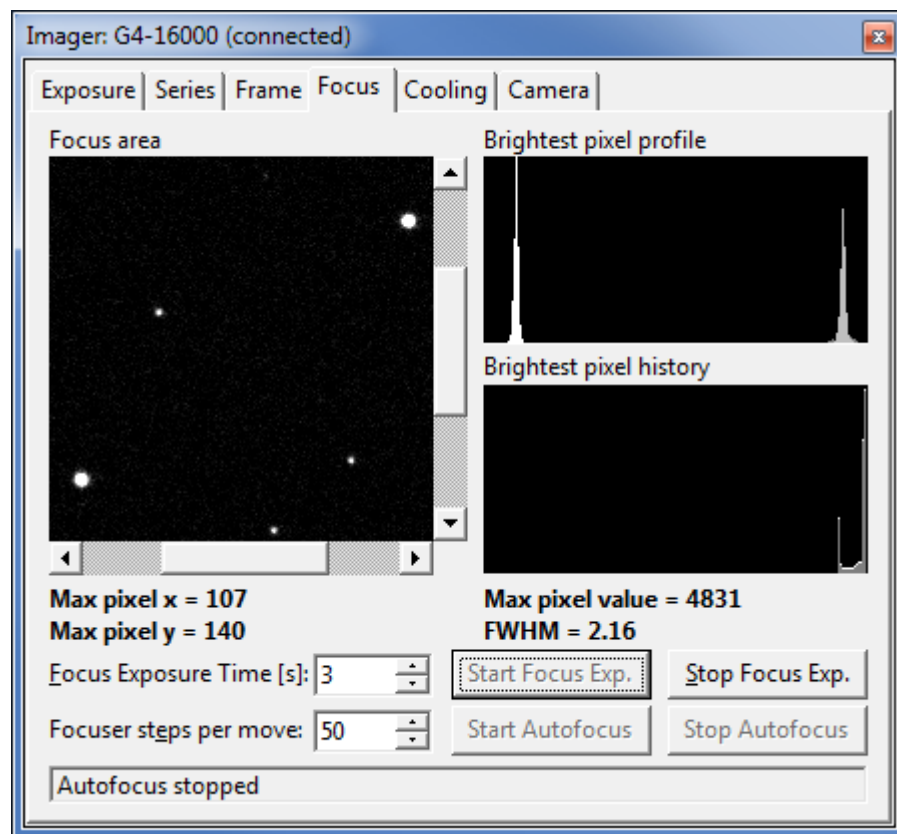
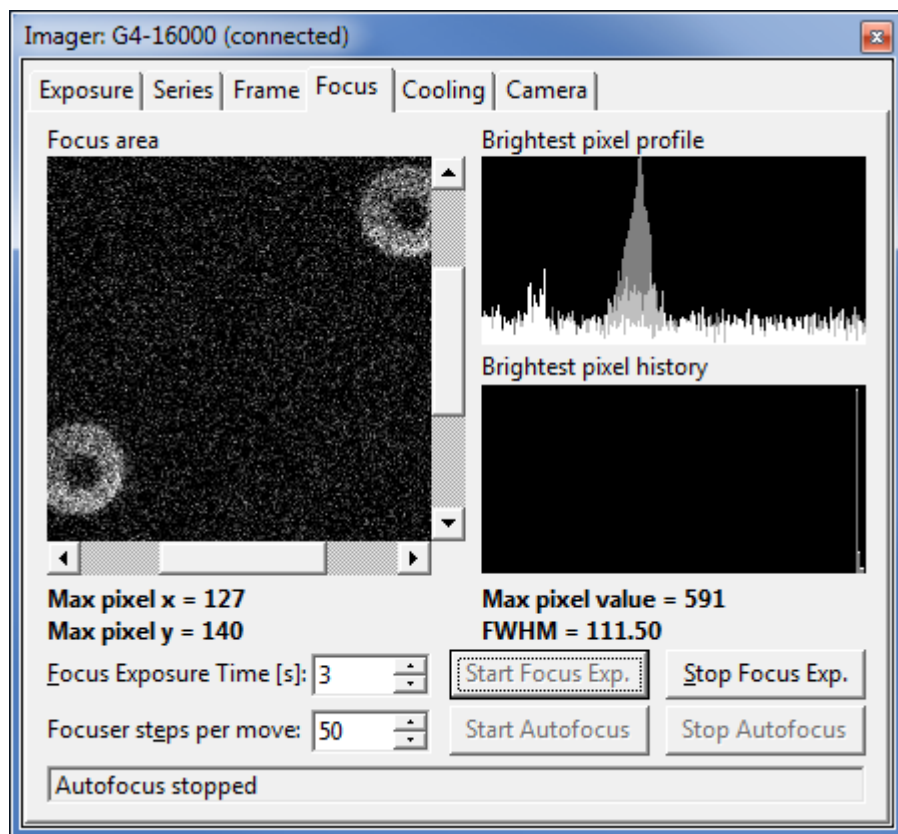


The image shows a software interface for telescope pointing calibration. It features three buttons at the top: "Calibrate", "New Dec.", and a checkbox labeled "Pier flip". Below the buttons, there is a text field labeled "Calibration Dec:" containing the value "0° 00' 00"". At the bottom, there is a label "New Dec.:" followed by three input fields for degrees, minutes, and seconds, each with a spinner control. The values in these fields are 0, 0, and 0 respectively.

Reálné problémy kalibrace (a pointace)

- Je-li „guiding“ rychlost < „tracking“ rychlost, pohyb v R.A. nemění směr, jen zpomalí nebo zrychlí
- Pohyb v Dec. ale směr mění a proto je kalibrace i pointace ovlivněna mrtvým chodem montáže (vůle v převodech – tzv. „backlash“)
 - Pokud je délka kalibračního pulsu menší než doba mrtvého chodu, kalibrace v Dec. se vůbec neprovede
 - I pokud je délka kalibračního pulsu jen mírně větší než doba mrtvého chodu, kalibrace je zatížena velkou chybou
 - Může pomoci mírné rozvážení dalekohledu v Dec.

Ostřit nebo neostřit?



Někdy ostřit, někdy neostřit

Neostřit (**mírně** rozmazat):

- Při nadbytku světla zabrání mírné rozostření saturaci pixelů hvězdy a tím znehodnocení dat
- Dovolí prodloužit expozici a shromáždit více signálu
- Rozptýlení signálu do více pixelů s velkým odstupem signálu od šumu eliminuje statistické odchylky pixelů

Ostřit:

- Při nedostatku světla (nehrozí saturace) zaostření dovolí použít menší clonku a tím zahrnout méně pixelů pozadí
- Odstup signálu od šumu je u méně pixelů lepší
- V hustých hvězdných polích kvalitní zaostření dovoluje měřit hvězdy v úhlové blízkosti jiných hvězd

Kamera



V čem se CCD a CMOS senzory liší?

- Zažité zkratky **CCD** a **CMOS** pro dva základní typy snímačů naneštěstí označují každá něco jiného:
 - **Charge Coupled Device** je označení principu práce.
 - **Complementary Metal Oxide Silicon** je označení konstrukce integrovaných logických obvodů s unipolárními tranzistory (FET).
- Základní princip práce je identický – foton excituje atomy křemíku a uvolněné elektrony reprezentují míru osvětlení.
 - Vše další se ale liší – CCD je v principu analogový obvod, CMOS je digitální obvod (využívá výrobní linky pro digitální obvody).

CCD

- Dopadající fotony uvolňují elektrony.
- Elektrony jsou vázány v tzv. „nábojových pastích“ (pixelech).
- Akumulací roste počet elektronů v každé nábojové pasti.

CMOS

- Dopadající fotony uvolňují elektrony.
- Elektrony nabíjejí kondenzátory (diody v závěrném směru) v pixelech.
- Akumulací roste napětí na kondenzátorech.

CCD

- CCD je sériové zařízení.
 - K hodnotě pixelu se nelze dostat jinak než postupným posunem náboje po ploše čipu.
- Výstupem je analogové napětí, na číslo je převede až elektronika kamery.
- A/D převod je typicky 16 bitový (0-65535).

CMOS

- Jednotlivé pixely jde adresovat (jako paměť).
- Napětí se převádí na číslo přímo v čipu zpravidla řadou paralelních A/D převodníků.
- Rozlišení je mezi 8 a 12 bity (0-255 až 0-4095).
 - Výjimečně 14 a nově i 16 bitů.
- Výstupem je digitální datová sběrnice.

(ne) výhody CCD

- (-) Pomalé čtení
- ($\pm$) Citlivost
- ($\pm$) Větší dynamický rozsah (větší pixely)
- (-) Vyšší čtecí šum
- (+) Elektroluminiscenci lze zcela eliminovat
- (-) Kosmetické vady (vadné sloupce)

(ne) výhody CMOS

- (+) Velmi rychlé čtení
- ($\pm$) Citlivost
- ($\pm$) Menší dynamický rozsah (menší pixely)
- (+) Nižší čtecí šum
- (-) Artefakty v obraze (elektroluminiscence, ...)
- (+) Bez vadných sloupců

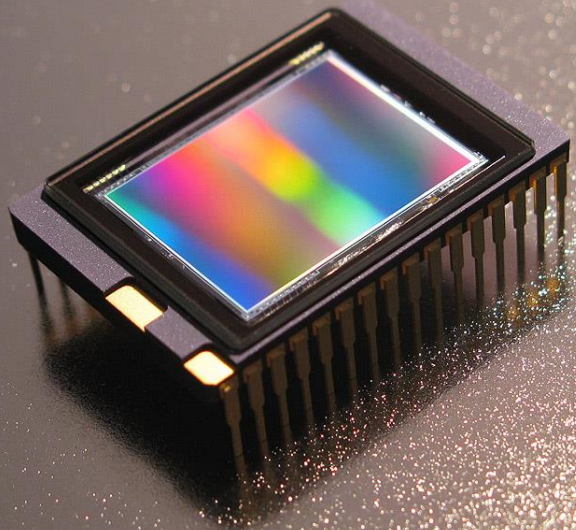
(ne) výhody CCD

- (+) Během snímání je CCD jen pasivní kus křemíku
- (+) Minimální tepelné ztráty $\Rightarrow$ lepší chlazení $\Rightarrow$ menší temný proud
- (-) CCD je stále více okrajová a exotická technologie

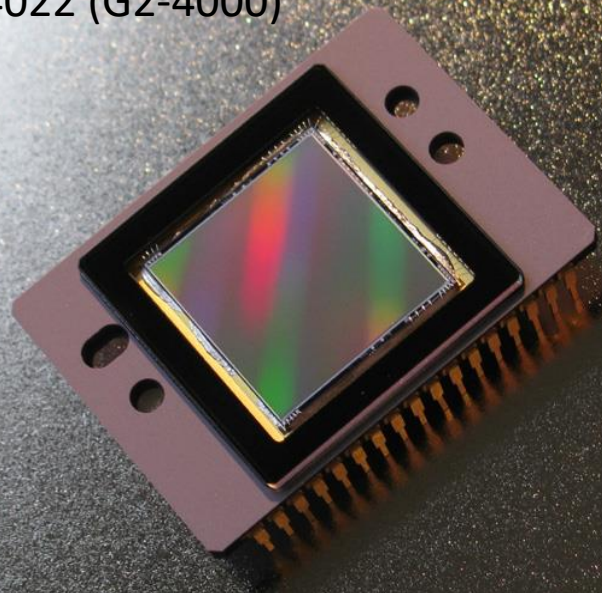
(ne) výhody CMOS

- (-) CMOS je neustále (a zpravidla velmi rychle) pracující digitální obvod
- (-) Velké tepelné ztráty $\Rightarrow$ horší chlazení $\Rightarrow$ vyšší temný proud
- (+) Na další vývoj CMOS snímačů se soustřeďují největší polovodičové firmy a investují do něj ohromné částky

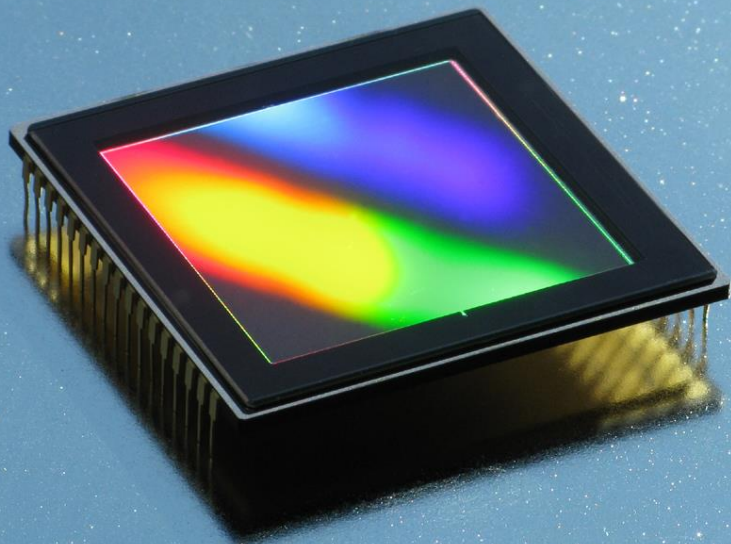
KAF-8300 (G2-8300)



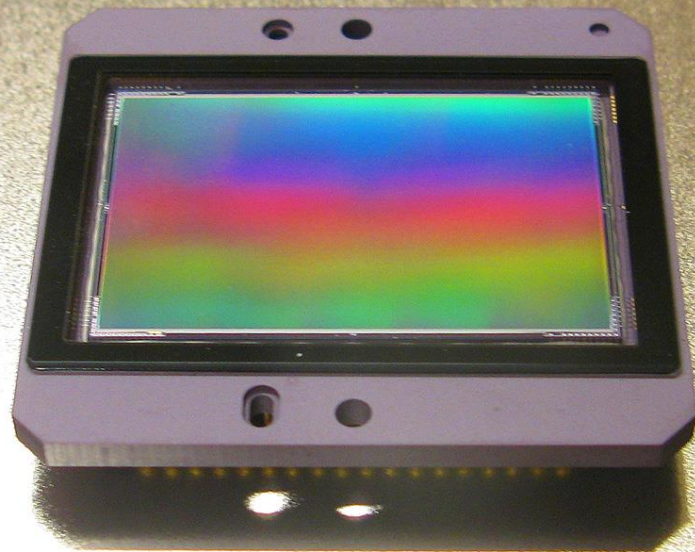
KAI-4022 (G2-4000)



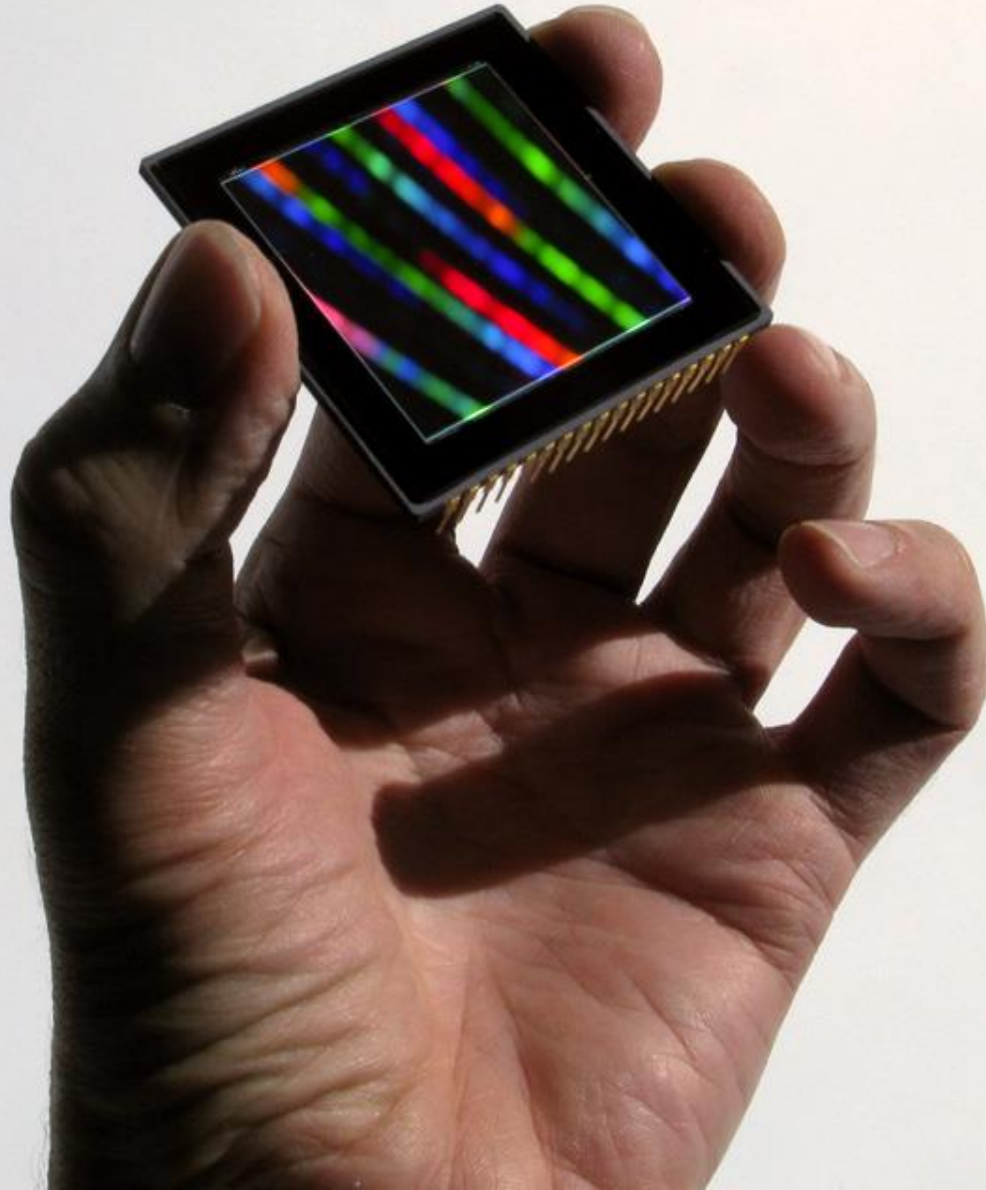
KAF-09000 (G4-9000)



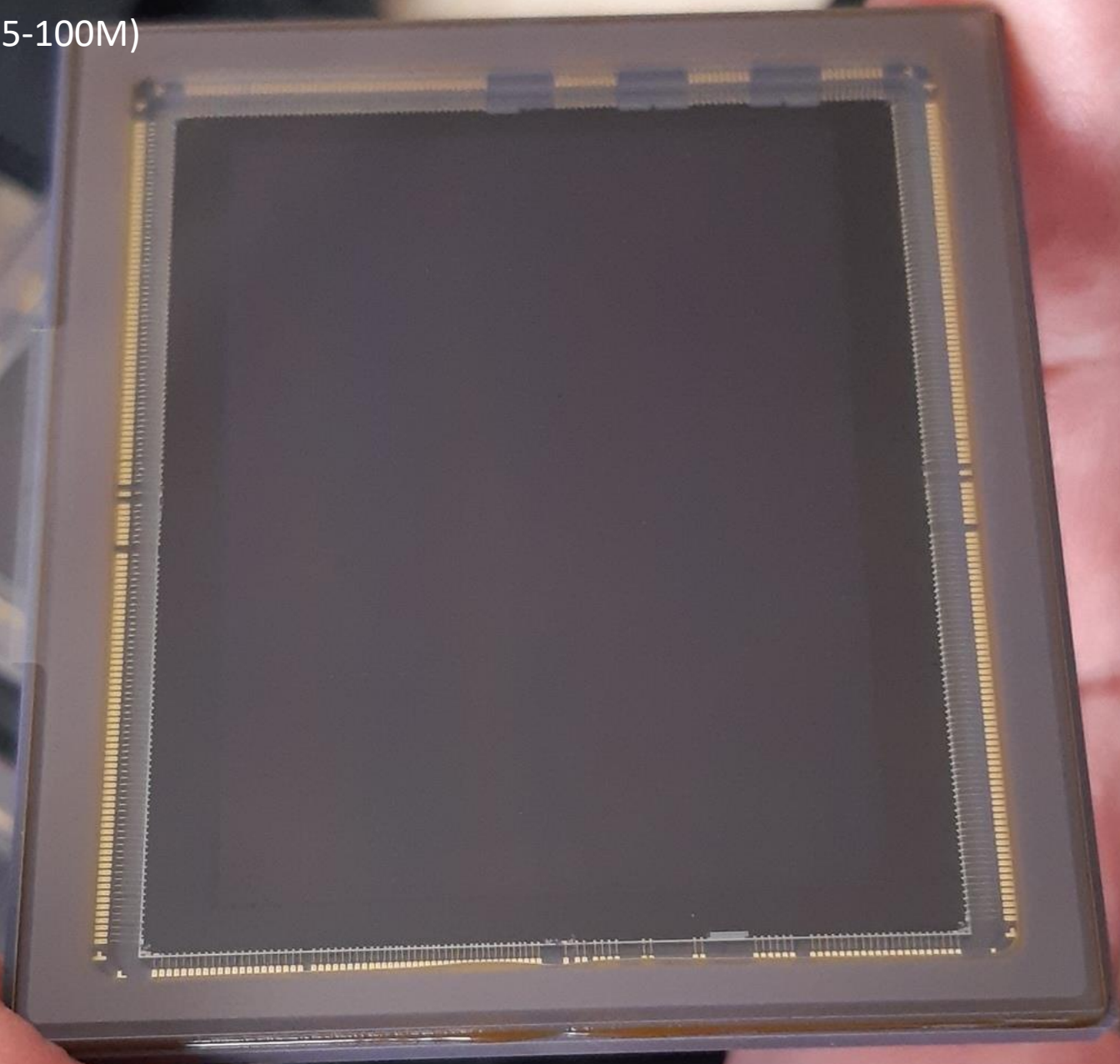
KAI-16070 (G3-16000)



KAF-16803 (G4-16000)



IMX461 (C5-100M)



INCIDENT LIGHT



$-V$

$+V$

$-V$



POTENTIAL
BARRIER

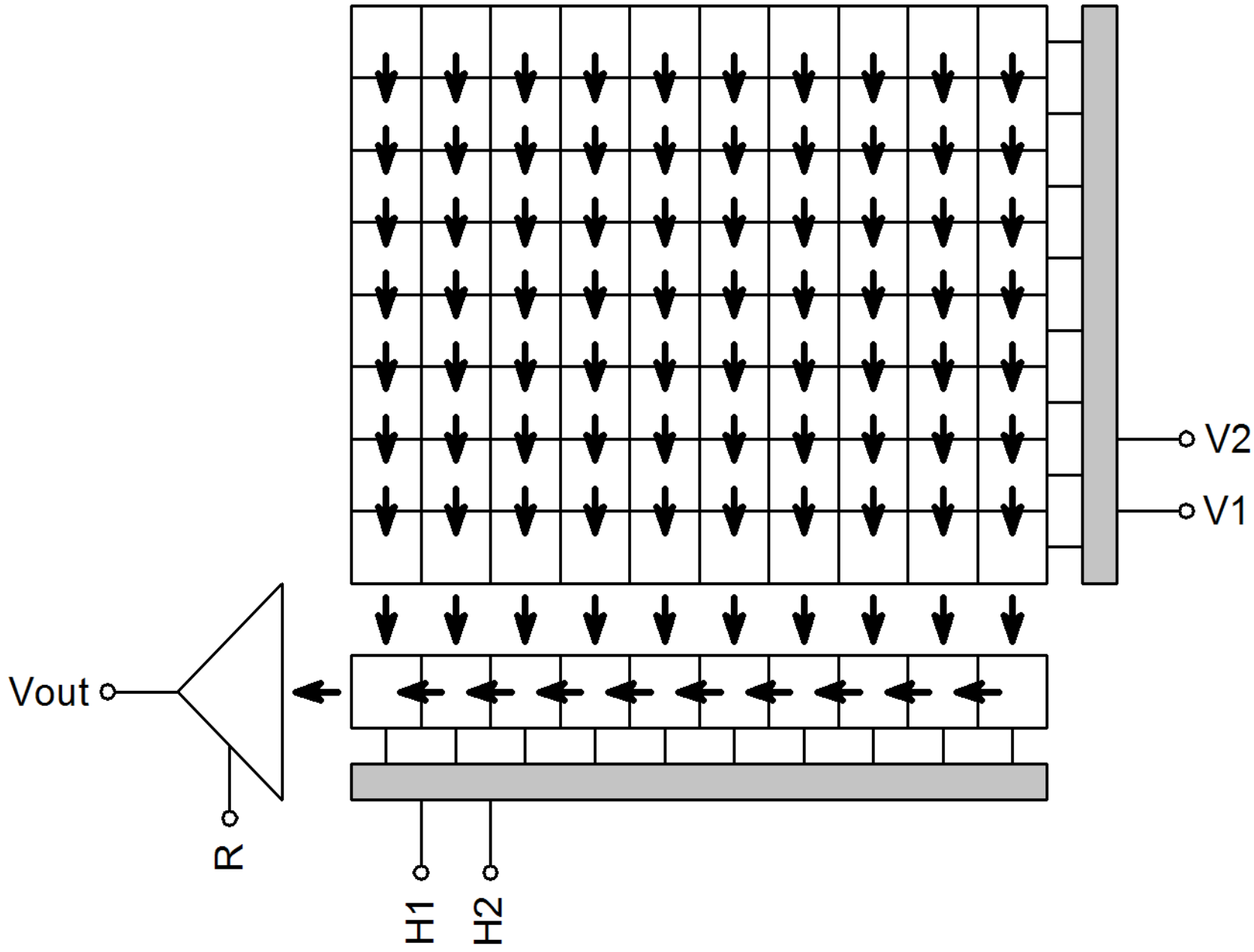
POTENTIAL
BARRIER

POTENTIAL
WELL

PHOTOGENERATED
ELECTRONS

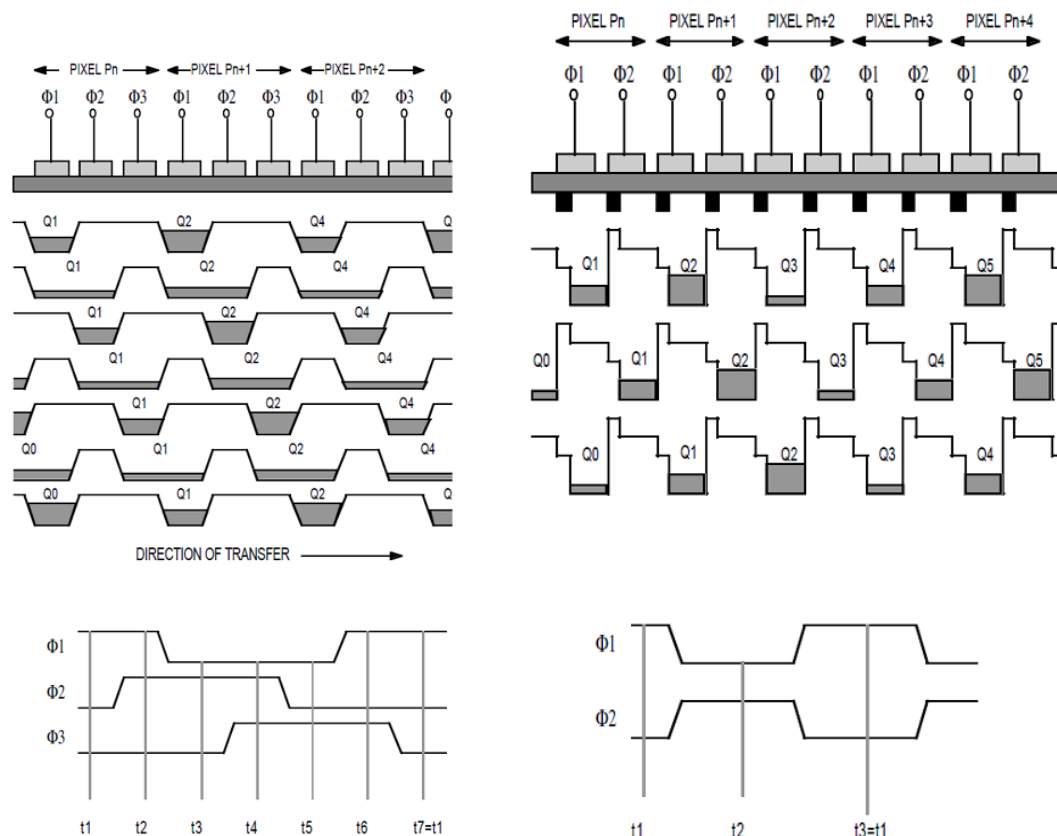
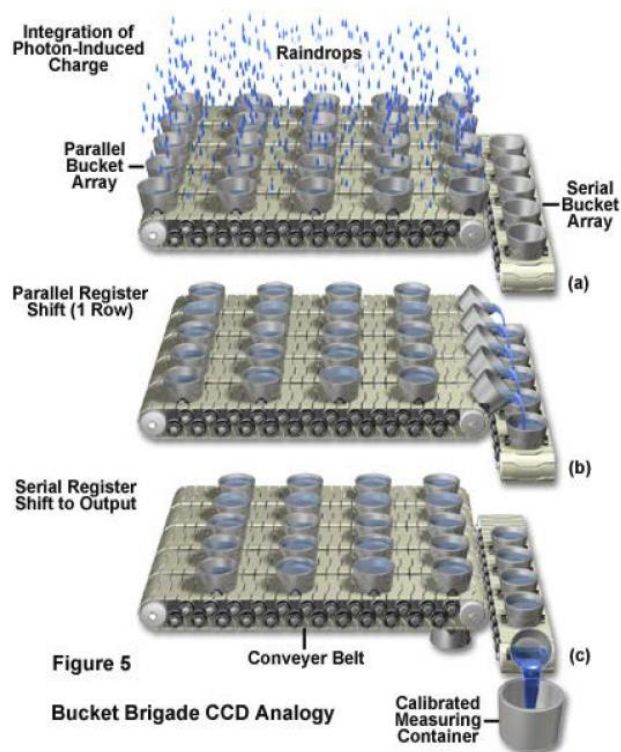
SILICON SUBSTRATE





Posun náboje (charge coupling)

Základní třífázový (uprostřed) a pravý dvoufázový (vpravo) posun náboje, využívající schodového potenciálu pod řídicími elektrodami



Vlastnosti CCD a CMOS snímačů

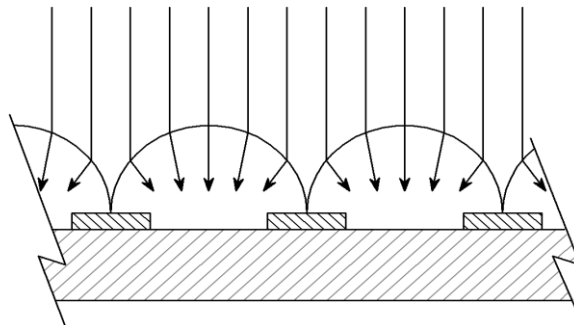
- CCD i CMOS jsou podstatně citlivější než film
 - Kvantová účinnost CCD čipů v digitálních fotoaparátech se pohybuje kolem 15 až 30%
 - QE CCD čipů používaných v kvalitních astronomických kamerách může být 60 nebo i 80%
 - Tenčené, zezadu osvětlované čipy mohou dosáhnout QE přes 90 %
 - Velmi citlivý film dosáhne QE kolem 3%
- CCD mají lineární odezvu na světlo
 - Lineární odezva je klíčová pro precizní fotometrická měření

Vlastnosti CCD a CMOS snímačů

- Křemíkový čip, na němž je CCD vyroben, má velice stálé mechanické rozměry
 - Precizně definované a stálé rozměry dovolují provádět přesná astrometrická měření
- Obrazy pořízené CCD kamerou jsou datové soubory, bezprostředně zpracovatelné pomocí počítačů
 - Digitální obraz je okamžitě k dispozici pro zpracování, ať už fotometrické, astrometrické, apod.
 - Digitální snímky mohou být snadno archivovány, rozmnožovány, odeslány kolegům elektronickou poštou, publikovány na WWW apod.

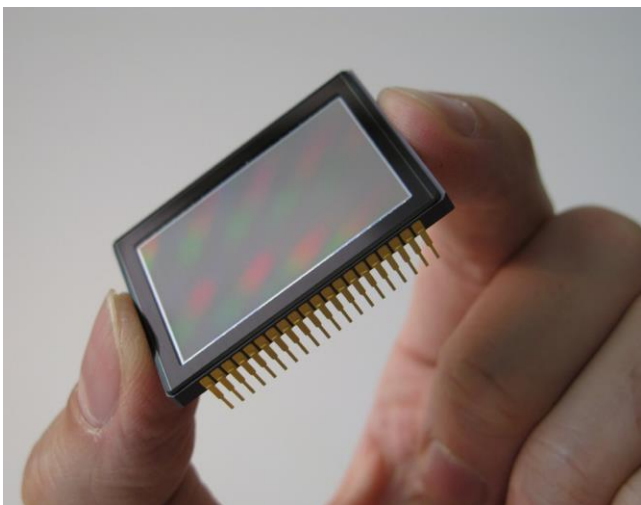
Mikročočky

- Elektrody, případně zastíněné sloupce omezují plochu, kterou čip shromažďuje světlo
- Tento efekt může být částečně kompenzován aplikací tzv. mikročoček
 - Ty soustředí světlo z oblastí CCD čipu necitlivých na světlo (zastíněné vertikální sloupce) na aktivní světlocitlivé oblasti



Kvantová účinnost KAI-11002

- ~50% s mikročočkami
- ~15% bez mikročoček



Monochrome with Microlens Quantum Efficiency

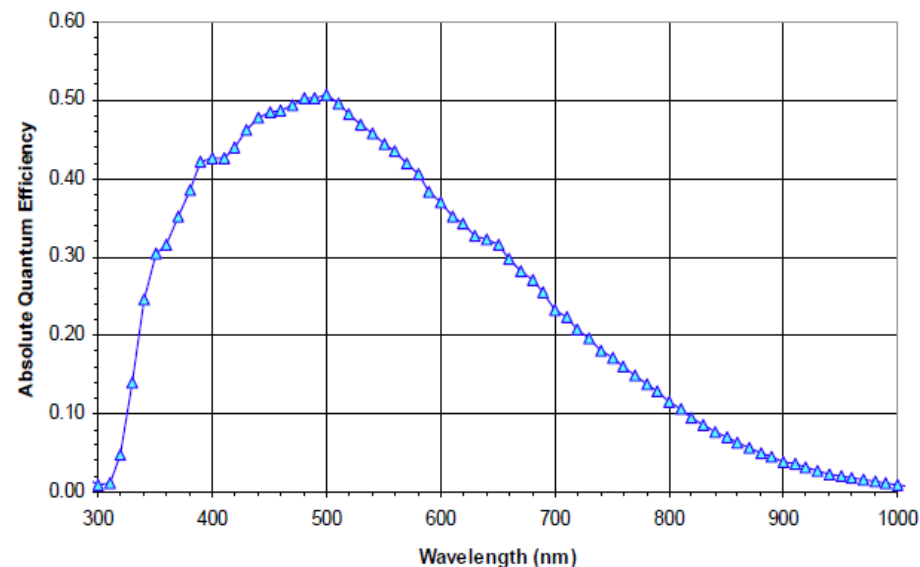


Figure 12: Monochrome with Microlens Quantum Efficiency

Monochrome without Microlens Quantum Efficiency

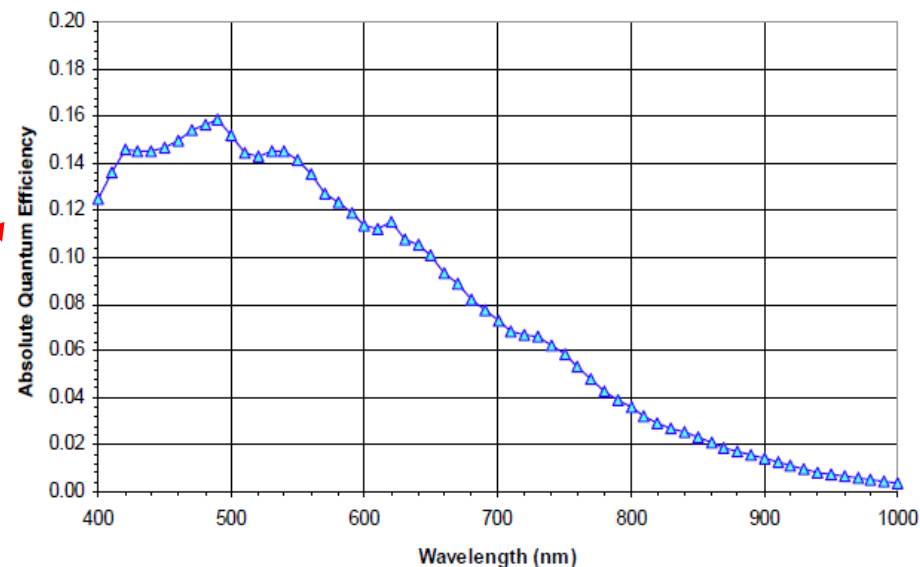
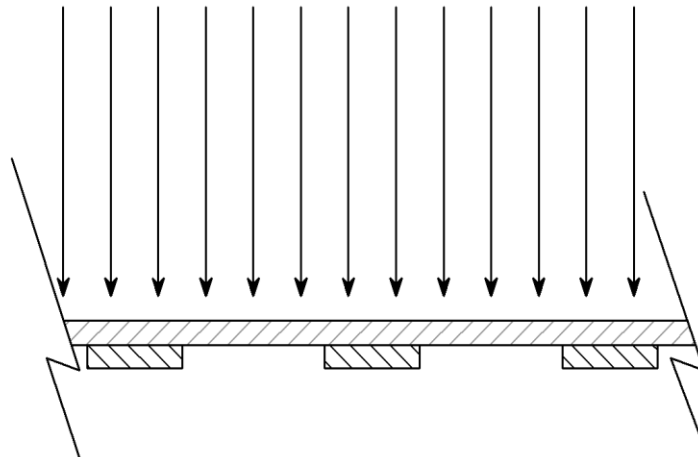


Figure 13: Monochrome without Microlens Quantum Efficiency

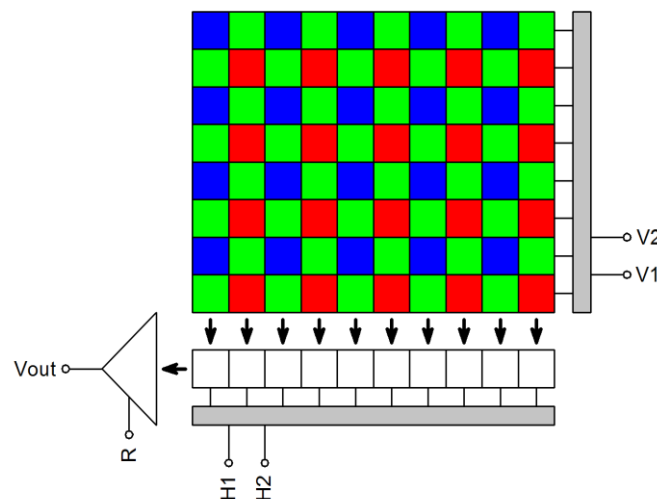
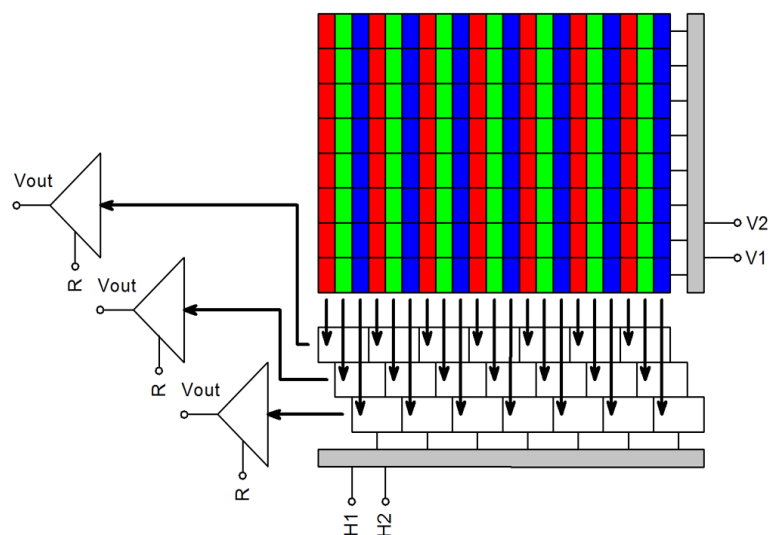
Zezadu osvětlované (back-illuminated) senzory

- Nejvyšší možné QE lze dosáhnout použitím tenčených čipů osvětlovaných zezadu
 - Čipy jsou zapouzdřeny „vzhůru nohama“, takže elektrody jsou na spodní straně čipu a neblokují přicházející světlo
 - Samotný čip je velmi ztenčen až na tloušťku několika μm
 - Prakticky celá zadní strana čipu je tedy vystavena světlu.

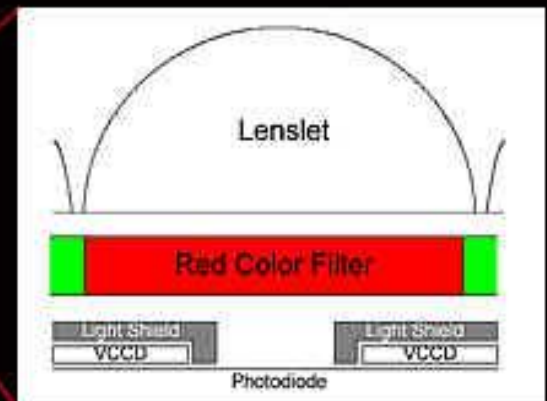
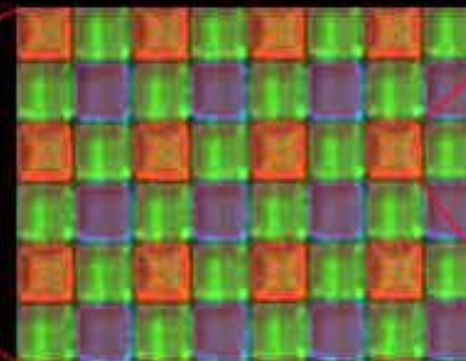
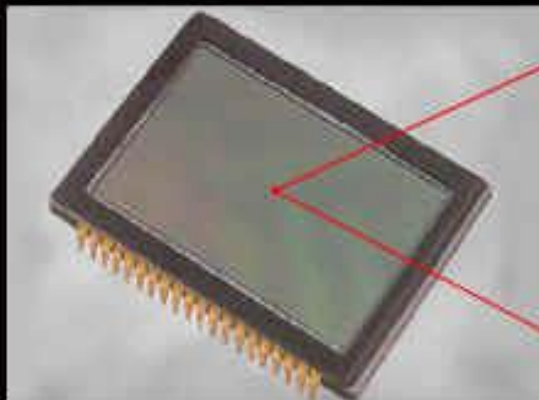
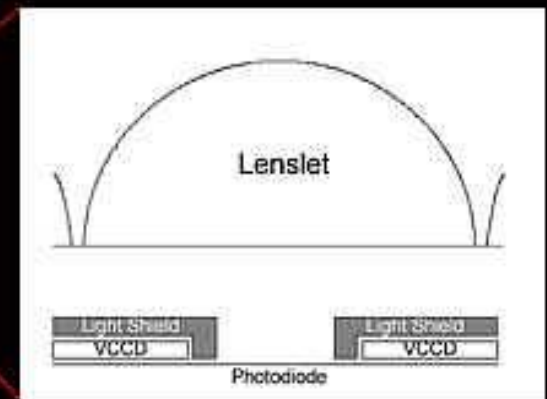
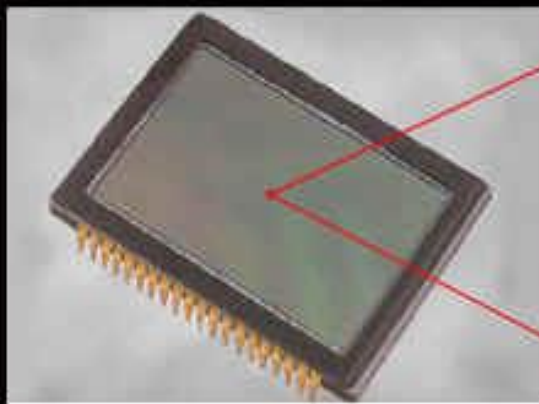


Zachycení barev

- V principu lze filtry k vytvoření barevného obrazu použít dvěma způsoby:
 - Je možné exponovat samostatné snímky s monochromním čipem přes červený, zelený a modrý filtr
 - Je také možné aplikovat filtry přímo na CCD pixely, barevný obraz je pak možné získat jedinou expozicí

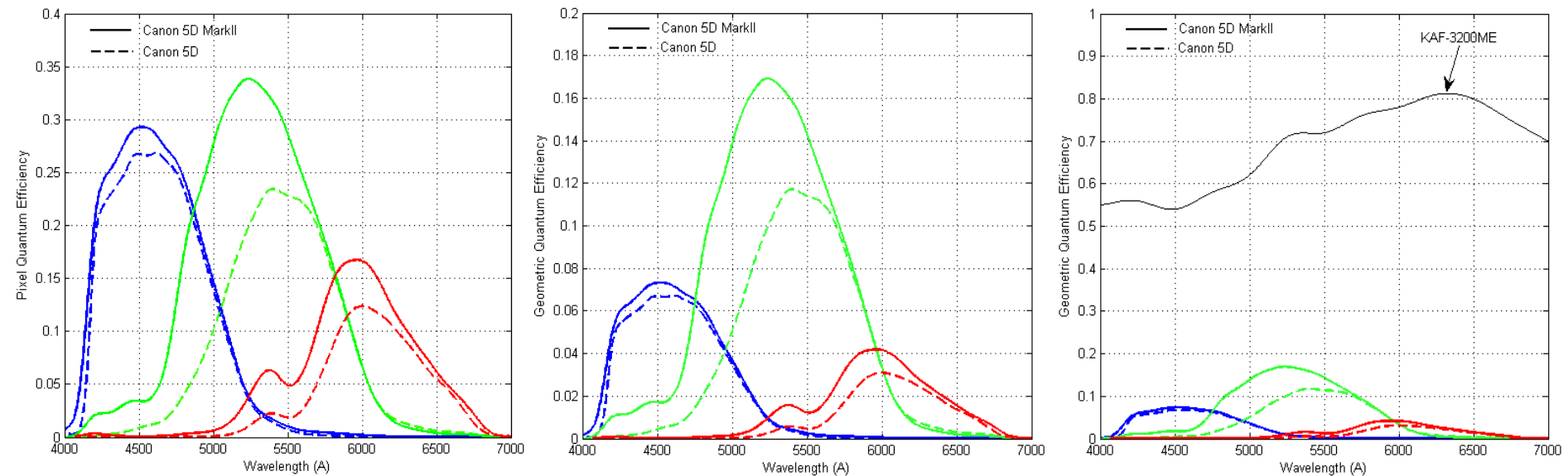


Monochromní a barevná verze čipu KAI-11002



Omezení rozlišení a citlivosti

Porovnání pixelové a geometrické kvantové účinnosti DSLR (Canon EOS 5D) a CCD kamery (KAF-3200ME):



Barevné a monochromní snímače v astronomii

- Monochromní čip může s použitím filtrů vytvořit barevný obraz
 - Tento obraz je zpravidla vyšší kvality než obraz z barevného čipu
 - Ovšem pouze u statických (nepohyblivých) objektů
- Barevný čip může vytvořit monochromní obraz jen za cenu ztráty rozlišení a omezení citlivosti
- Barevný CCD čip má jednu pevnou masku barevných filtrů bez možnosti filtry měnit nebo zcela odstranit
 - Řada aplikací vyžaduje snímání bez filtrů s maximální citlivostí a barevná informace není podstatná.

Barevné a monochromní snímače v astronomii

- Monochromní čip může pořizovat úzkopásmové snímky v čáře $H\alpha$, OIII, SII apod.
- Profesionálové preferují standardní sadu (U)BVRI filtrů pro fotometrická měření
- Barevné čipy mají menší kvantovou účinnost než monochromní senzory
- Barevné CCD čipy nedovolují použít binning
 - Binning by pomíchal pixely různých barev a barevná informace by byla ztracena
 - Naopak pro vytvoření monochromního snímku se často sečtou sousední barevné pixely

Binning

- Pojmem „binning“ rozumíme slučování balíčků náboje jednotlivých pixelů ještě před jejich digitalizací
- Binning může být:
 - Vertikální – do horizontálního registru CCD přesuneme více než jeden řádek, aniž bychom mezi tím horizontální registr přečetli (vymazali)
 - Horizontální – do výstupního uzlu přesuneme více jak jeden pixel horizontálního registru, aniž bychom mezi tím výstupní uzel resetovali (nastavili na referenční úroveň napětí)
- Oba druhy binningu lze kombinovat (např. 2×2)

Blooming a ABG

- Příliš velký náboj v pixelech přetéká do okolních pixelů



Anti-Blooming Gate (ABG)

- Do konstrukce CCD čipu lze zahrnout elektrody, které slouží k odvádění náboje ještě dříve, než začne náboj přetékat do okolních pixelů (ABG)
 - Veškeré snímáče, používané ve spotřební elektronice (fotoaparáty, kamery, mobilní telefony, ...), jsou ABG vybaveny
- Historicky ale ABG zavádělo dva zásadní problémy, které způsobily, že vědecká komunita snímáče s ABG odmítala
 - Přítomnost ABG snižovala QE čipu
 - ABG deformovalo odezvu detektoru v celém jeho rozsahu, ne jen blízko saturace

Linearita CCD

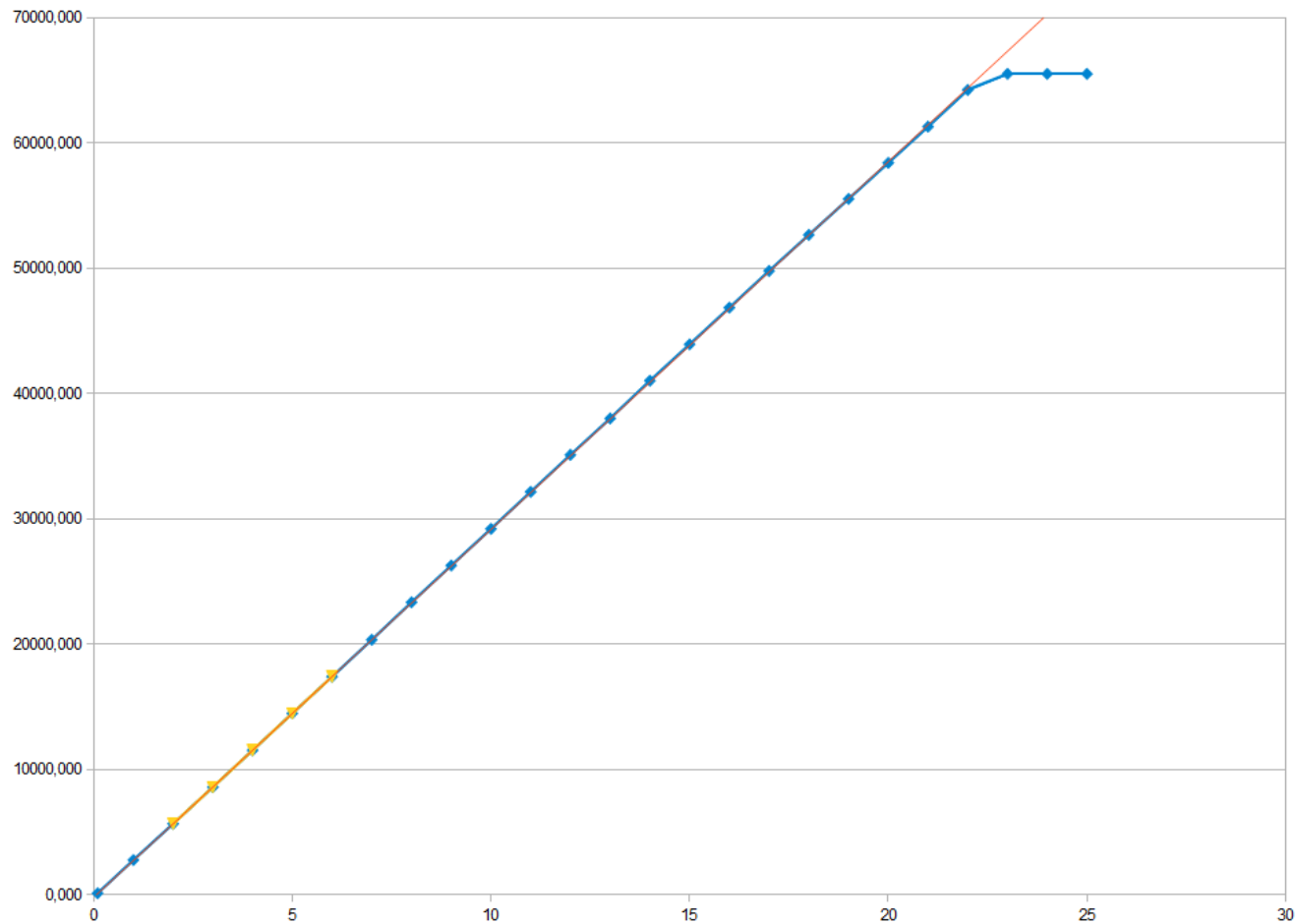
- Pro přesná fotometrická měření potřebujeme, aby závislost mezi množstvím dopadajícího světla a velikostí signálu přečteného z CCD byla lineární s co možná nejvyšší přesností
 - Filmová emulze, používané před érou CCD i k fotometrickým měřením, je velmi silně nelineární
- Za dostatečně lineární je považována odezva s odchylkou do 1% v rámci dynamického rozsahu kamery
 - Některé moderní CCD jsou dostatečně lineární bez ohledu na přítomnost ABG

Linearita CCD

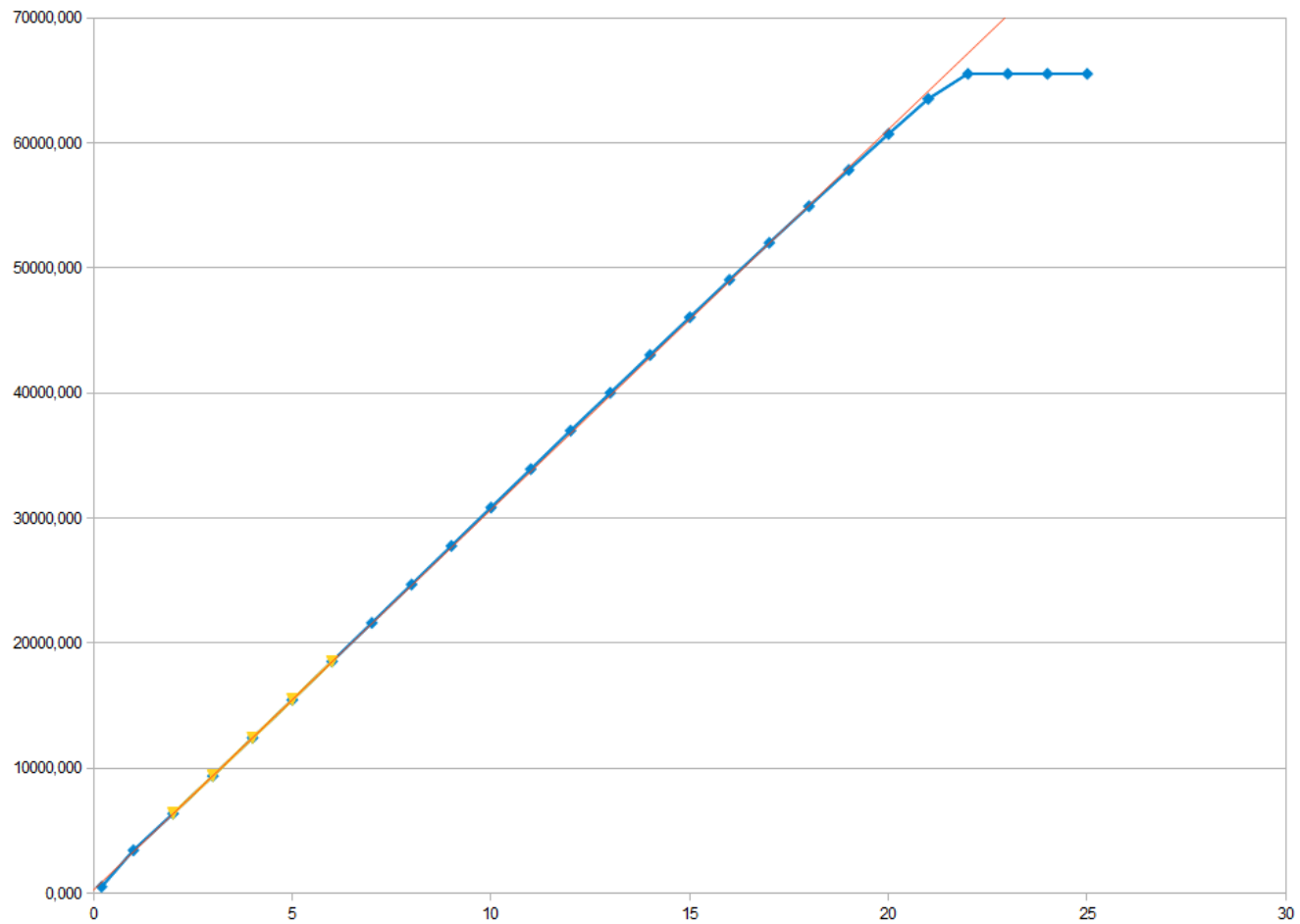
- Full-Frame CCD bez ABG bývají typicky lineární
 - KAF-0402ME, KAF-1603ME
- U CCD s ABG závisí linearita na intenzitě ABG (udávané v násobcích saturačního signálu)
 - KAF-16803: $ABG = 100 \times$ saturační signál
 - KAI-4022: $ABG = 300 \times$ saturační signál
 - KAF-8300: $ABG = 1000 \times$ saturační signál
 - KAF-16200: $ABG = 2800 \times$ saturační signál

KAF-0402/KAF-1603 (non-ABG)

G2-0402/G2-1600

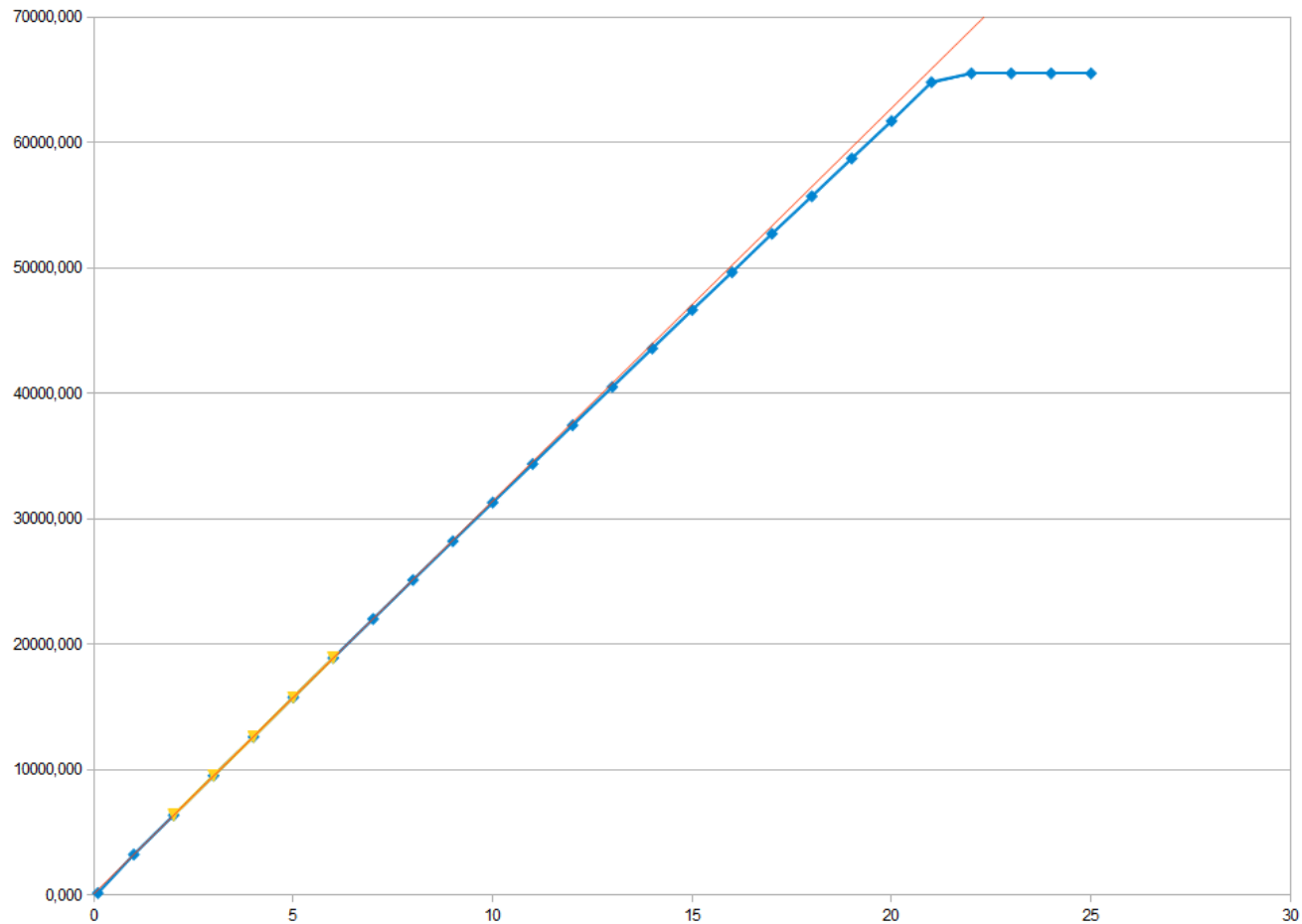


KAF-16803 (ABG 100×) G4-16000

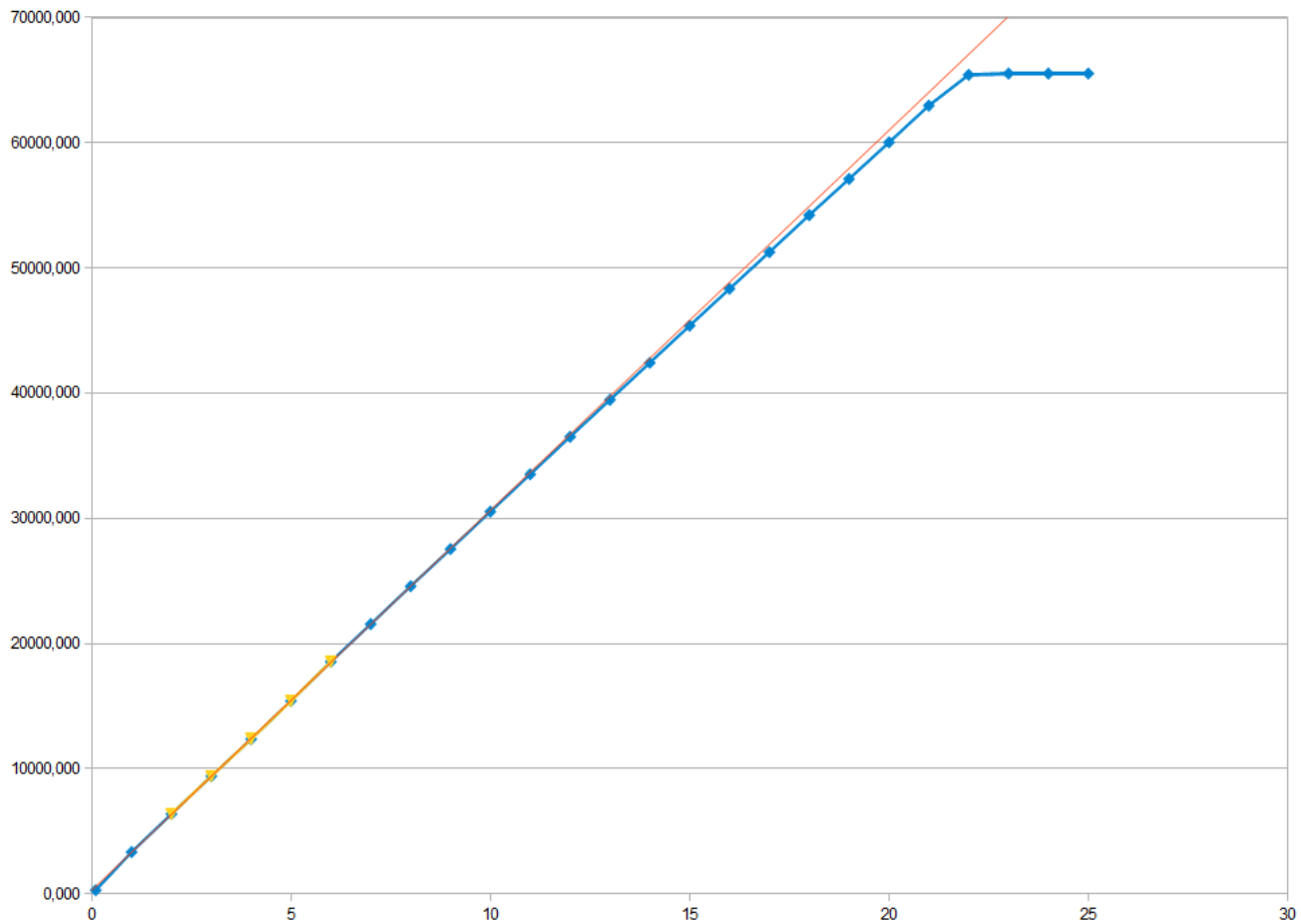


KAI-4022 (ABG 300×)

G2-4000

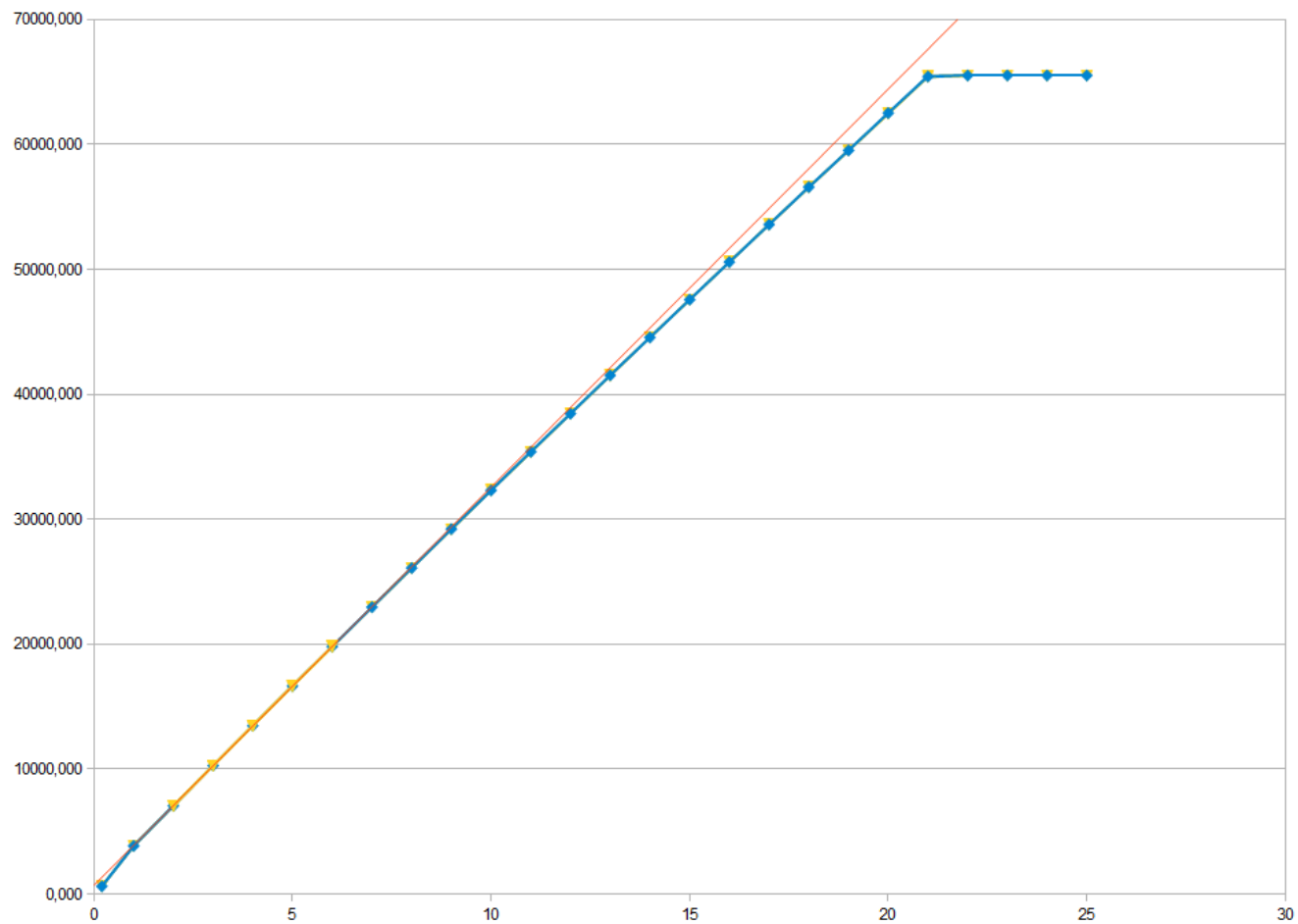


KAF-8300 (ABG 1000×) G2-8300



KAF-16200 (ABG 2800×)

G3-16200



Temný proud (dark current)

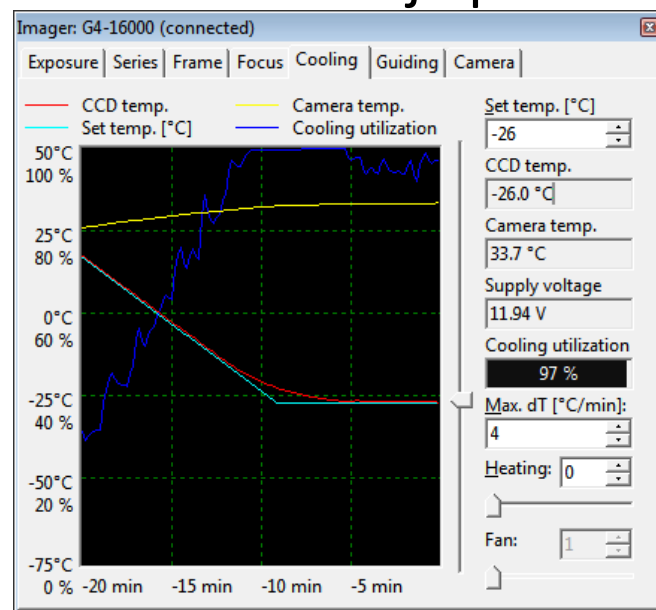
- Nevýhoda CCD/CMOS technologie je fakt, že elektrony vznikají v pixelech nejen v důsledku dopadajícího světla, ale také náhodně v závislosti na okolní teplotě
 - Tento tepelně generovaný náboj bývá nazýván **temný proud** (generuje signál, i když čip je zcela ve tmě)
 - Temný proud závisí nejen na okolní teplotě, ale i na velikosti pixelu, architektuře čipu a výrobní technologii
- Temný proud je obvykle vyjádřen v elektronech za sekundu na pixel při definované teplotě
 - Např. CCD detektor Kodak KAF-1603 produkuje $\sim 1 \text{ e}^-/\text{s}$ na pixel při 0°C

Temný snímek – obraz temného proudu

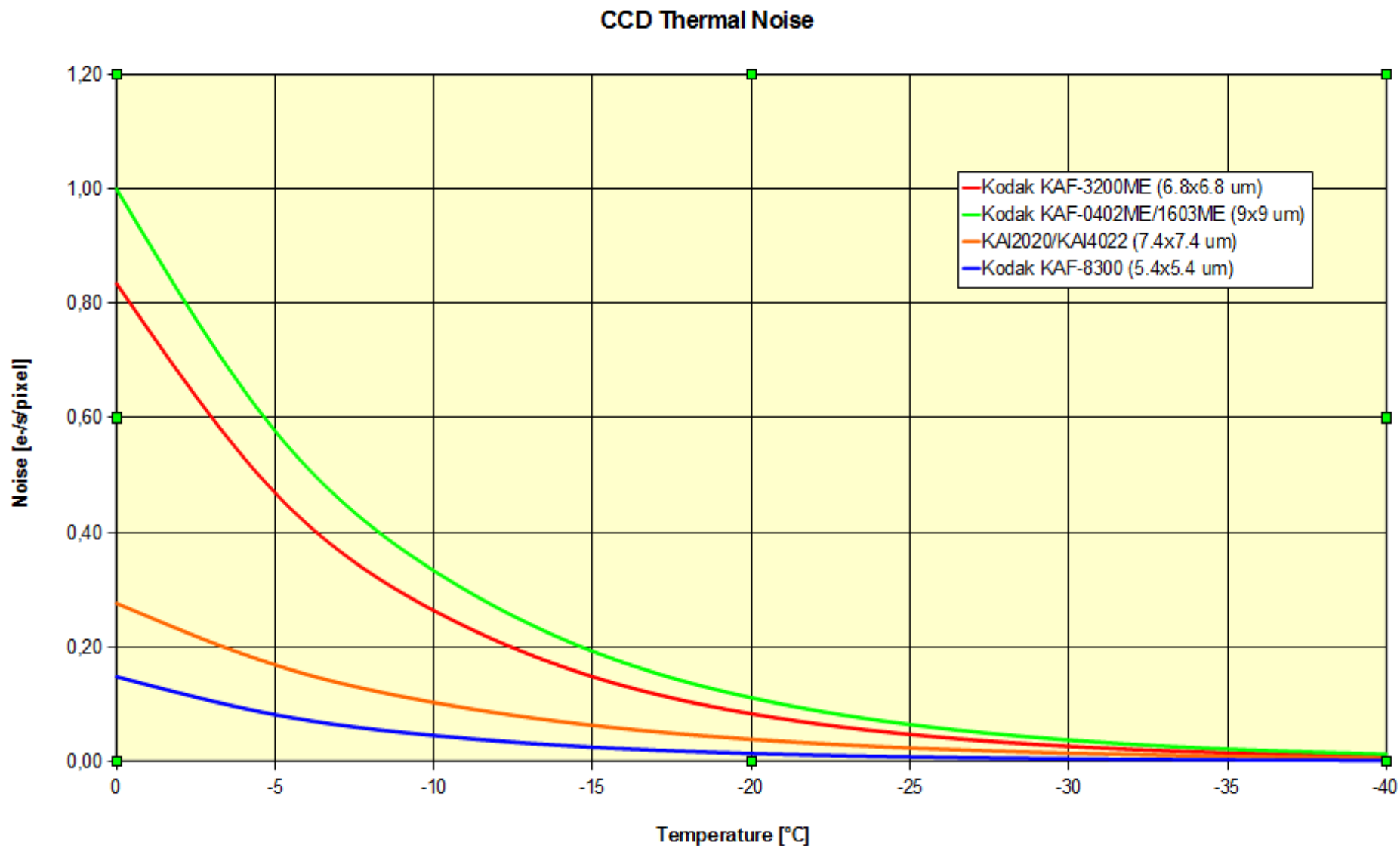
- Temný proud je za daných podmínek stále stejný (nebo velice podobný)
 - Snímek astronomického objektu obsahuje signál generovaný osvětlením i signál generovaný temným proudem
 - Ta samá expozice, ale s uzavřenou závěrkou, bude obsahovat pouze signál generovaný temným proudem – **temný snímek** (anglicky **dark frame**)
 - Poté je možné oba snímky odečíst a tím obraz generovaný temným proudem vyrušit
 - Protože rozptyl signálu odpovídá $\sqrt{\text{signálu}}$, odečtení temného proudu nikdy nefunguje na 100%

Temný proud závisí na teplotě

- Závislost temného proudu na teplotě je exponenciální
 - Zdvojnásobuje se s každými $\sim 6-7^{\circ}\text{C}$ (podle typu senzoru)
- Proto je důležité regulované chlazení senzoru
 - Snížení teploty o každých $\sim 6-7^{\circ}\text{C}$ sníží temný proud na $\frac{1}{2}$
 - Regulace udržuje stejnou teplotu senzoru a dovoluje pořídit reprodukovatelné temné snímky



Temný proud některých CCD



Elektrony, volty a „ADU“ jednotky

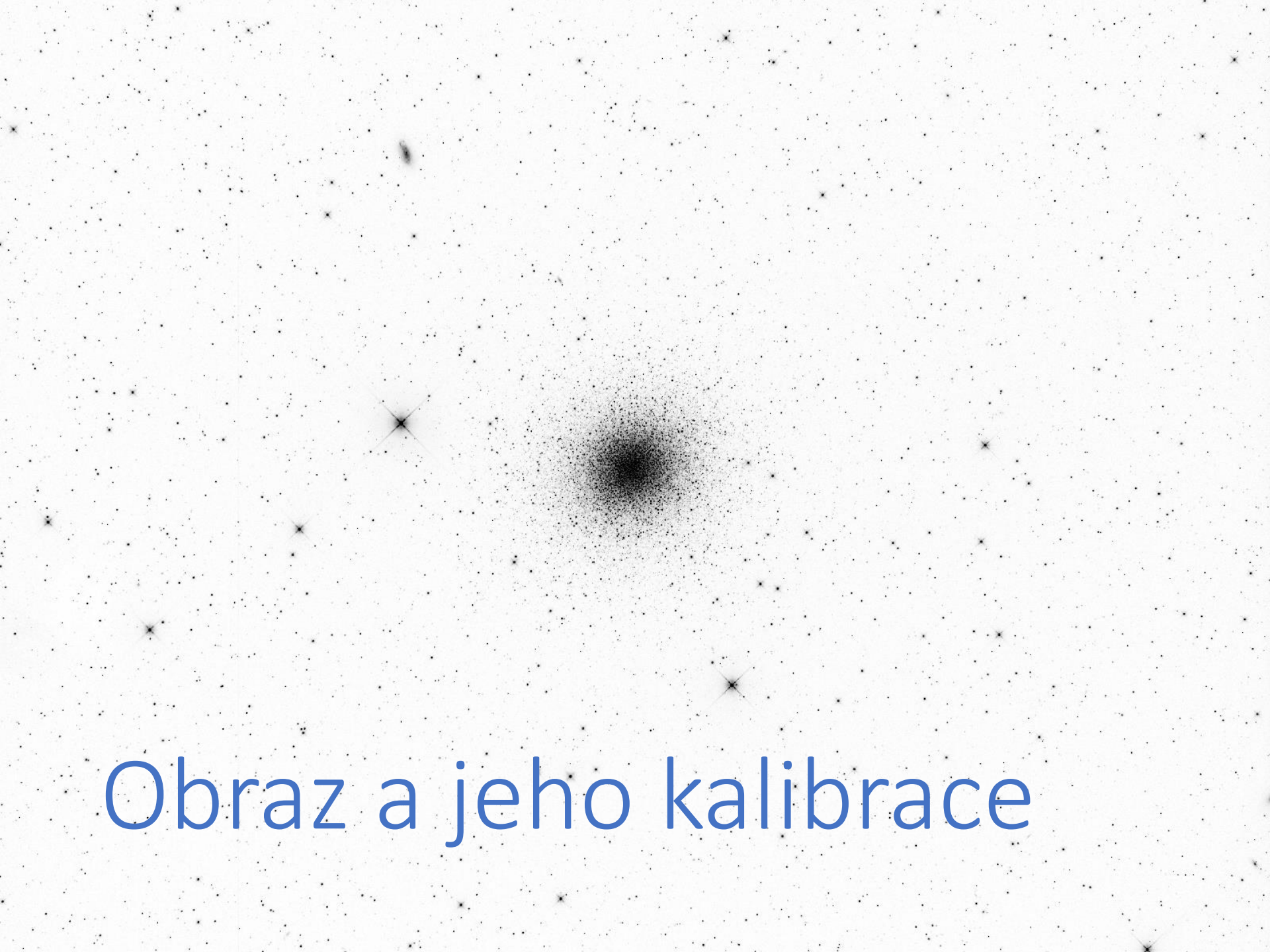
- Každý CCD čip (výstupní uzel čipu) je charakterizován převodním poměrem „volty/elektron“
 - Například výstupní uzel Kodak KAF-1603 převede 1 elektron na napětí $10\ \mu\text{V}$
- Výsledkem čtení CCD čipu je matice čísel, z nichž každé reprezentuje obrazový bod (pixel)
 - Čísla jsou generována A/D převodníkem (ADC) v kameře
- Hodnoty čísel v pixelech jsou dány převodovým poměrem vyjádřeným v elektronech na ADU
 - **ADU** znamená „Analog to Digital Unit“, tedy číselný výstup převodníku

Zesílení (zisk) CCD kamery

- Stanovme poměr e^-/ADU pro hypotetickou kameru
 - Kamera je vybavena 16 bitovým A/D převodníkem se vstupním rozsahem 2 V
 - To znamená, že 2 V signál je rozdělen na 65 536 jednotek
 - 1 jednotka ADU reprezentuje $2 \text{ V} / 65\,536 = 30,5 \text{ } \mu\text{V}$
 - Výstupní uzel CCD generuje napětí $10 \text{ } \mu\text{V}$ na elektron
 - Zesílení je $(30,5 \text{ } \mu\text{V}/\text{ADU}) / (10 \text{ } \mu\text{V}/e^-) = 3 \text{ } e^-/\text{ADU}$
- Výpočty platí jen statisticky, pro velké množství pixelů a elektronů
 - Kamery mívaní neceločíselný převodní poměr třeba $2,3 \text{ } e^-/\text{ADU}$ nebo $0,6 \text{ } e^-/\text{ADU}$ atd.

Dynamický rozsah detektoru

- Každá potenciálová studna reprezentující CCD pixel má nějakou maximální kapacitu, zpravidla závislou na velikosti pixelu
 - Malé pixely ($\sim 5 \mu\text{m}$) typicky uchovají $\sim 25\,000 \text{ e}^-$
 - Střední pixely ($\sim 10 \mu\text{m}$) typicky uchovají $\sim 100\,000 \text{ e}^-$
 - Velké pixely ($\sim 25 \mu\text{m}$) typicky uchovají $\sim 300\,000 \text{ e}^-$
- CCD kamery zpravidla používají 16 bitový A/D převodník s rozlišením 65 536 jednotek
 - Tomu je přizpůsoben zisk kamery, aby se celý dynamický rozsah pixelů převedl na rozsah převodníku



Obraz a jeho kalibrace

Data z kamery

- Obraz stažený z kamery je matice čísel, reprezentující osvětlení jednotlivých pixelů
- Rozsah čísel je dán elektronikou
 - 8-12 (někdy i 14) bitů u CMOS kamer
 - 12-16 bitů u CCD kamer
 - >16 bitů u snímků sečtených, programově binnovaných atd.
- Software v PC dovoluje získat ze snímku požadovaná data
 - Informace o poloze objektů na obloze (astrometrie)
 - Informace o jasu objektů (fotometrie)

Formát FITS (Flexible Image Transport System)

- Historický formát založený ještě na děrných štítcích
 - Hlavička se skládá z bloků 36 řádků po 80 znacích
- Velice flexibilní, dovolující uložit n-rozměrné matice řady numerických typů (celá čísla, plovoucí čárka)
- Kromě několika předepsaných položek dovoluje hlavička definici libovolných uživatelských parametrů
- Absence standardizace těchto parametrů vede na spoustu problémů s kompatibilitou, např.:
 - expozice: EXPTIME, EXPOSURE
 - úhlová velikost pixelu: SECPIX, SECPPIX, PIXSCALE
 - souřadnice: RA, OBJRA, OBJECTRA

FITS Header Editor

D:\FITS\BSO\2017\07\19 (V729 Aql)\V729_NoFilter_0000.fits

```
SIMPLE = T
BITPIX = 16
NAXIS = 2
NAXIS1 = 4096
NAXIS2 = 4096
BZERO = 32768.00000000
BSCALE = 1.00000000
EXPTIME = 120.00000000 / seconds
EXPOSURE = 120.00000000 / seconds
GAIN = 1.60000000 / e-/ADU
XBINNING = 1
YBINNING = 1
FILTER = 'NoFilter'
CCD-TEMP = -15.11000000 / deg. Celsius
UT = '20:20:31.278' / begin of exposure
DATE-OBS = '2017-07-19T20:20:31.278' / begin of exposure
JD = 2457954.34758424 / begin of exposure
DATE-BEG = '2017-07-19T20:20:31.278'
DATE-END = '2017-07-19T20:22:31.285'
IMAGETYP = 'OBJECT'
RA = '19:55:35.00'
DEC = '+13:21:04.0'
XPIXSIZE = 9.00000000
YPIXSIZE = 9.00000000
FOCALLEN = 1408.00000000
OBJECT = 'V729'
TELESCOP = 'TCMT'
INSTRUME = 'G4-16000'
OBSERVER = 'PC'
ORIGIN = 'SIPS Version 3.4 64bit (x64)'
OBSERVAT = 'BSO'
LONG-OBS = 17.68187264 / 17deg 40min 54.74sec East
LAT-OBS = 49.20101000 / 49deg 12min 3.64sec North
ELEV-OBS = 404.00000000 / meters above sea level
END
```

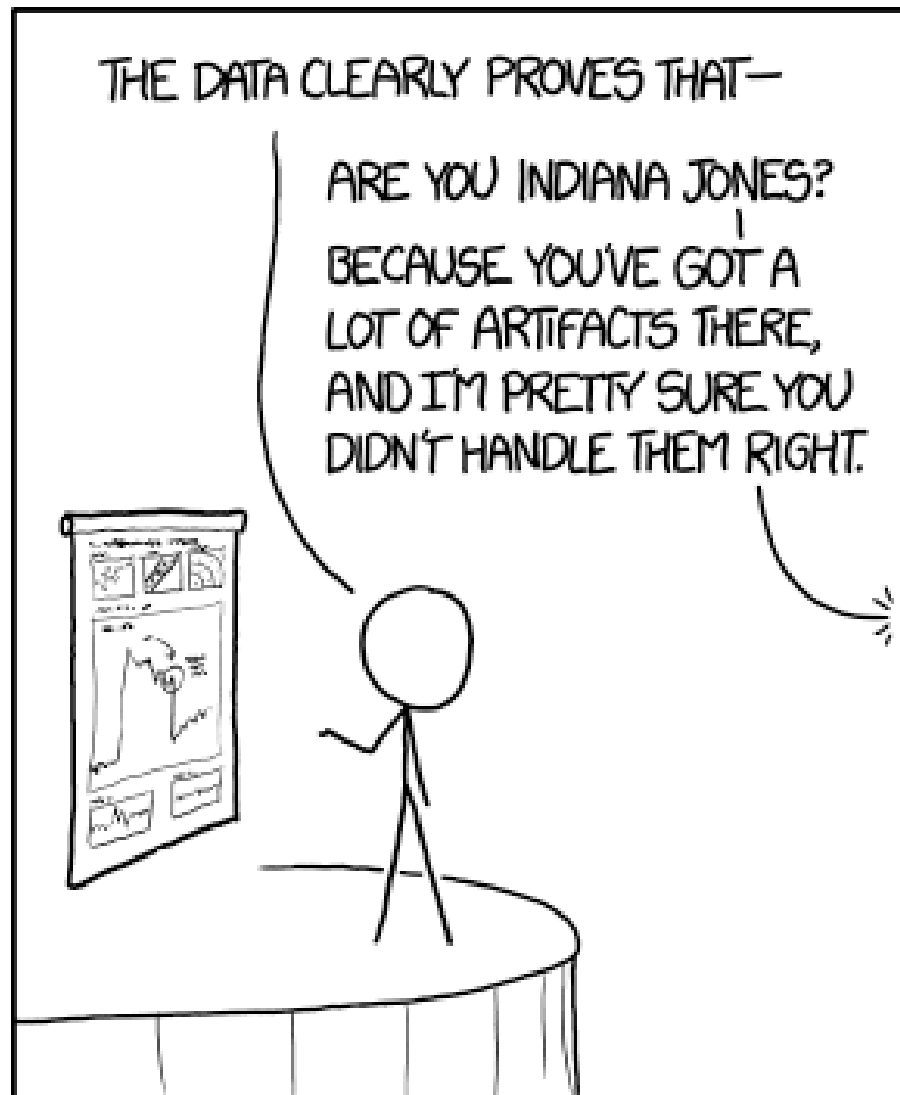
Apply

1:1

Insert

Artefakty

- Artefakty v obraze zavádějí chyby a omezují přesnost měření
- Artefakty **systematické** (můžeme je potlačit):
 - Temný proud
 - Vinětace optiky
- Artefakty **náhodné** (nic s nimi nenaděláme):
 - Stopy částic (v astronomickém slangu „kosmíky“)
 - Letadla, družice, planety, ...
- Něco mezi (musíme s nimi počítat a rozpoznat je):
 - Vliv atmosféry (extinkce)
 - Změny pozorovacích podmínek (seeing, mlha, cirry, ...)



<https://www.xkcd.com/1781/>

Temný proud

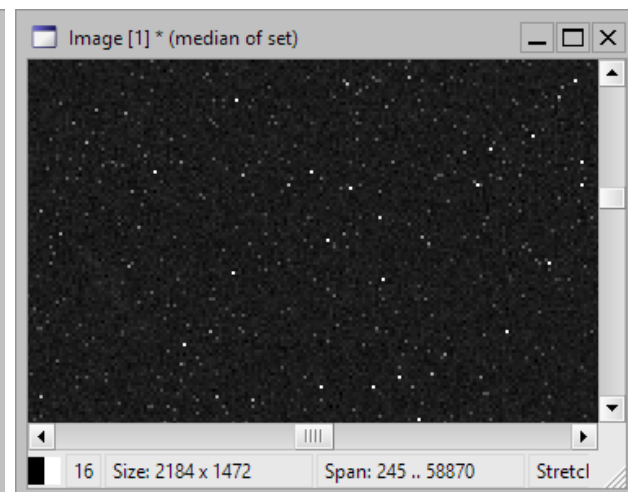
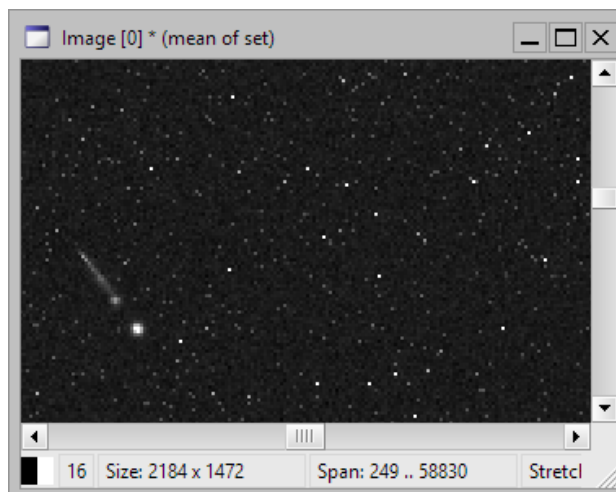
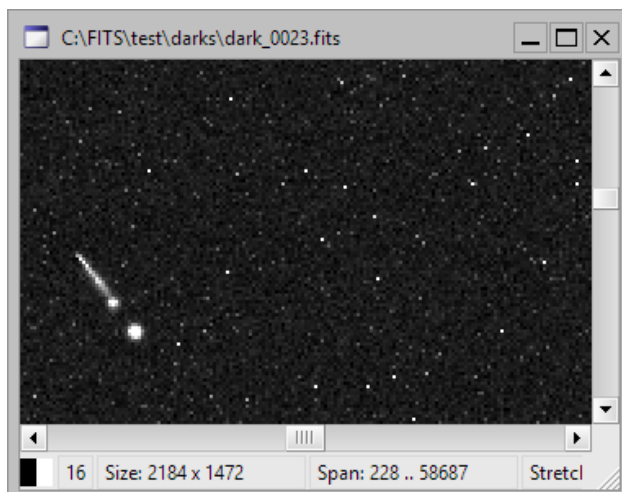
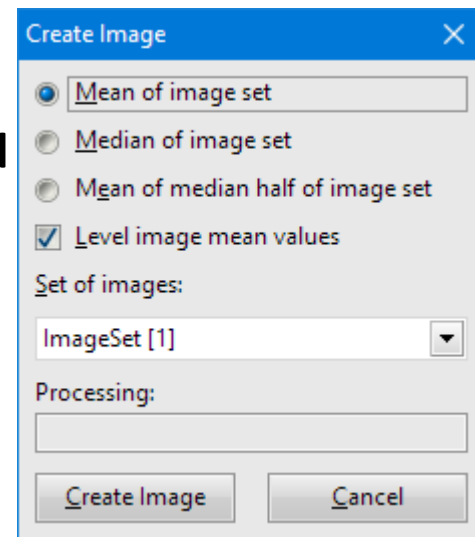
- Vliv temného proudu odstraňujeme odečtením **temného snímku**
- Hodnota pixelů temného proudu závisí:
 - Lineárně na čase
 - Exponenciálně na teplotě
- Optimální je vytvořit temný snímek pro každý expoziční čas a každou teplotu čipu
 - Lineární interpolace podle expozičního času je vždy horší než temný snímek snímaný vždy daným časem
 - U některých horkých pixelů je závislost hodnoty na čase složitější než je prostá lineární závislost

Temný snímek

- Uváděný temný proud platí pro většinu pixelů CCD
 - Určitá část pixelů má výrazně vyšší temný proud
 - Nazýváme je **horké pixely**
- Rozptyl signálu odpovídá $\sqrt{\text{signálu}}$
 - Čím je hodnota pixelu vyšší, tím vyšší jsou rozdíly mezi jednotlivými snímky
- Abychom se co nejvíce přiblížili střední hodnotě temného proudu každého pixelu, vytváříme temný snímek z více jednotlivých expozic
 - Empirické pravidlo doporučuje **minimálně 5 expozic**

Tvorba temného snímku

- Temný snímek vytváříme z jednotlivých expozic jako medián jednotlivých snímků
 - Prostý průměr je ovlivněn stopami částic
- Příklad:
 - Temný snímek se stopou částice (vlevo), průměr (uprostřed) a medián (vpravo)

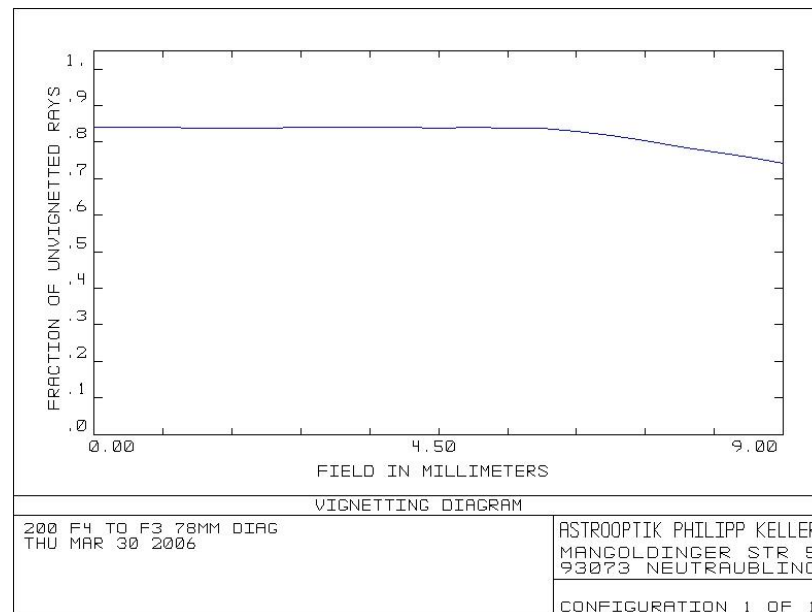


Kdy pořizovat temný snímek?

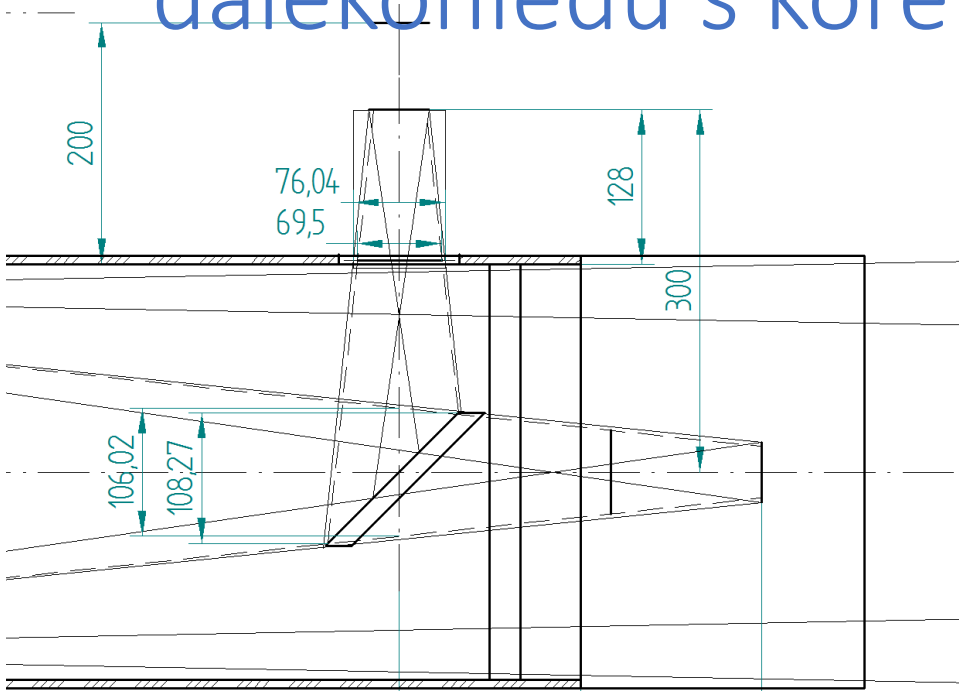
- Temný snímek pořizujeme pro:
 - každou použitou expoziční dobu
 - každou použitou teplotu snímače
 - každý použitý binning
- Charakteristiky snímače se s časem mění, proto by temný snímek neměl být používán déle jak ~měsíc
- Temné snímky je nutné začít pořizovat až po teplotním ustálení kamery (>5 minut), nikoliv okamžitě po dosažení cílové teploty
 - Chlazení senzoru je dynamický jev, uvnitř jsou teplotní toky a gradienty

Vinětace

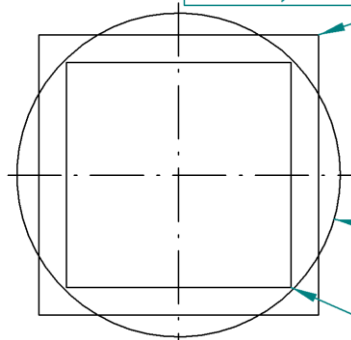
- Žádná optická soustava nedokáže soustředit stejné množství světla po celé ploše snímáče
 - Nejvíce světla je soustředěno ve středu snímku
 - K okrajům snímek tmavne
 - Tmavnutí okrajů je označováno jako „vinětace“



Příklad vinětace 30cm f/4 Newtonova dalekohledu s korektorem

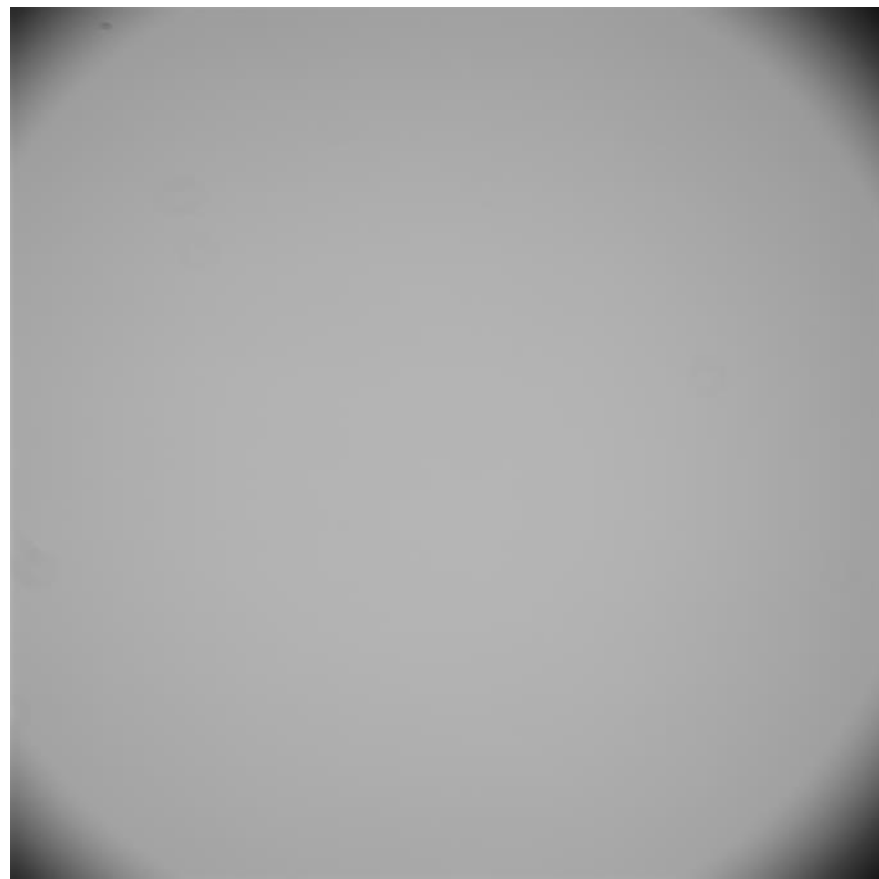


0.3m, f/4 - 91.8' x 91.8', 1.35"/px



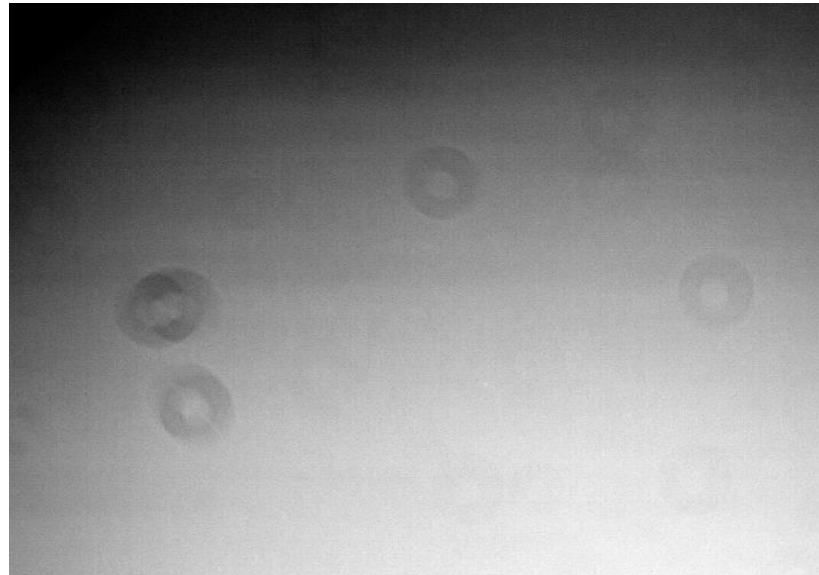
Limit vinětace

0.3m, f/5 - 73.5' x 73.5', 1.08"/px



Stopy prachových částic

- Nečistoty zákonitě ulpívají na čelním skle komory CCD, na filtrech, na korektoru atd.
- Ve snímku jsou stopy částic viditelné tím více, čím:
 - jsou blíže senzoru (mají menší průměr a jsou tmavší)
 - je dalekohled méně světelný (kužel dopadajícího světla je užší)



Flat-field

- **Flat-field** je snímek, reprezentující přenos světla optickou soustavou
- Získáme jej snímáním rovnoměrně osvětlené plochy
 1. Snímání oblohy za soumraku nebo za úsvitu
 2. Snímání umělého, **rovnoměrně** osvětleného povrchu
- V obou případech by střední hodnota snímku měla být asi $\frac{1}{2}$ dynamického rozsahu kamery (asi 30000 až 40000 ADU)
- Stejně jako u temného snímku i flat-field by měl vzniknout kombinací alespoň 5 snímků

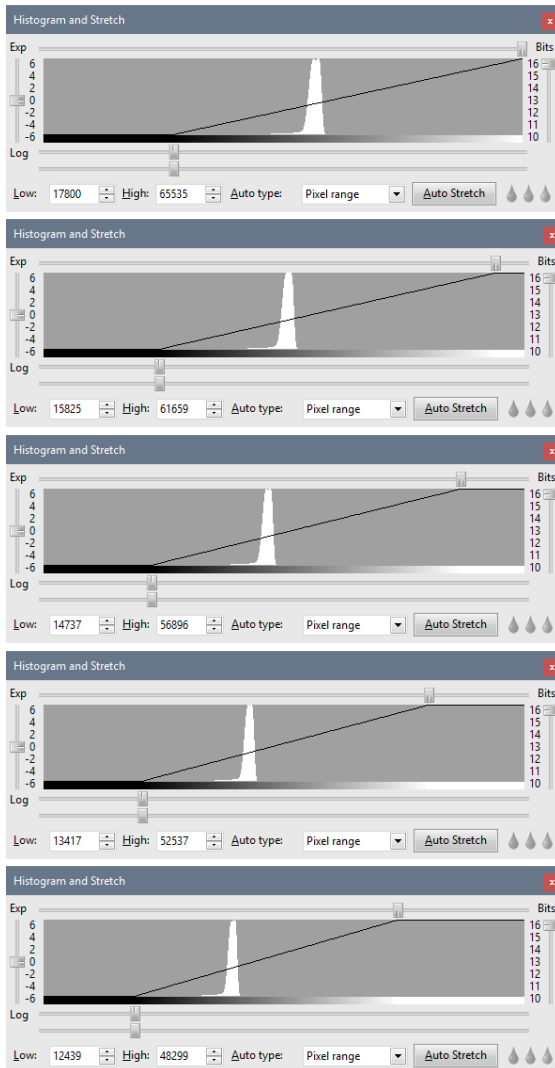
Snímání flat-field na obloze

- Obloha musí být zcela jasná, bez jakékoliv oblačnosti
- Rovnoměrná obloha je asi 120° od Slunce
 - Níže k obzoru obloha zjasňuje
 - Směrem ke Slunci také zjasňuje
 - Místo rovnoměrného jasu závisí na průzračnosti atmosféry
- Problém je, že jas oblohy se velmi rychle mění
 - Je nezbytné vystihnout poměrně krátký okamžik a pořídít všechny potřebné snímky
 - Flat-field je nutno pořídít pro všechny používané filtry (případně bez filtru), nejméně 5 snímků pro každý filtr
 - Pořadí filtrů je vhodné volit podle propustnosti modré oblohy

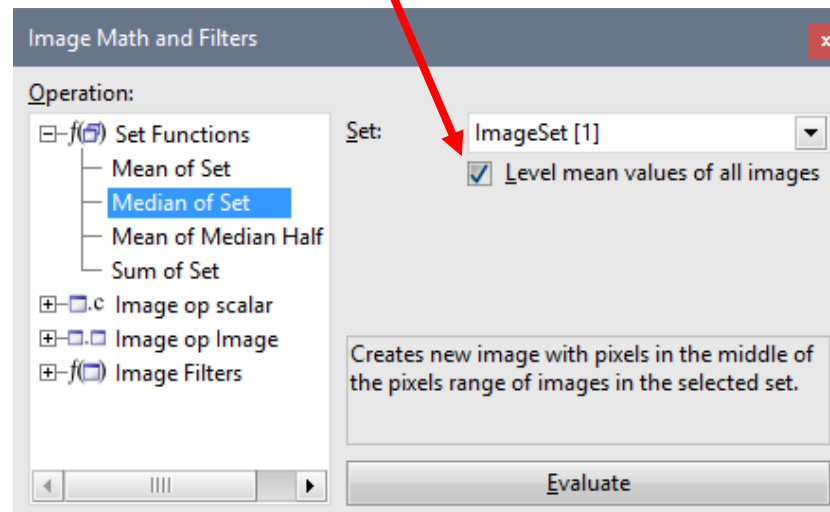
Snímání flat-field na obloze

- Při snímání flat-field by dalekohled měl být zaostřený
 - zaostření ovlivňuje průchod světla celou soustavou
- Zejména při delších expozicích flat-field na obloze (jednotky sekund) se v obraze objevují hvězdy
 - Flat-field na obloze je vhodné snímat s vypnutým pohonem montáže
 - Mezi jednotlivým snímky je vhodné mírně změnit polohu dalekohledu (namířit kousek vedle)
 - Stopy hvězd pak odstraní mediánová kombinace jednotlivých snímků

Tvorba flat-field snímaného na obloze



- Při dané expozici se střední hodnota snímku mění
- Před výpočtem mediánu je nutné střední hodnoty srovnat, jinak je výsledek prakticky shodný s prostředním snímkem



Tvorba flat-field snímaného na rovnoměrně osvětlené ploše

- Jas plochy musí být zcela rovnoměrný, jinak zavedeme do snímků chybu
- Jas plochy musí být dostatečně malý, aby dovolil dostatečně dlouhou expozici
 - Kamery optimalizované pro dlouhé expozice typicky nejsou schopny krátkých expozic
 - Nejkratší expozice ($<1s$) mohou být nerovnoměrné vlivem nerovnoměrného chodu závěrky
- Výhodou je nezávislost na počasí a denní době
 - Osvětlení snímané plochy ale nesmí rušit další okolní světlo

Kdy pořizovat flat-field?

- Flat-field musíme pořídit pro každý používaný filtr a pro každý používaný binning
 - Flat-field pochopitelně nezávisí na teplotě senzoru nebo expoziční době při pořizování dat
- Pokud provedeme jakoukoliv mechanickou změnu pozorovací sestavy, musíme flat-field pořídit znovu
 - Po každém sundání (a nasazení) kamery
 - Po kolimaci optiky
 - Po manipulaci s filtry
- Pokud je sestava pevná, můžeme flat-field používat značnou dobu (měsíce)

Aplikace flat field

- Aplikace flat field obrazu spočívá v dělení každého pixelu syrového obrazu odpovídajícím pixelem flat field obrazu
 - Pixely jasnější díky nerovnoměrnému osvětlení pole jsou tedy poděleny větší hodnotou flat field obrazu, jasnějšího ze stejných důvodů, a naopak
- Dělení ale zmenšuje škálu obrazu, proto je každý pixel současně vynásoben průměrnou hodnotou flat field obrazu
 - Pokud je výpočet prováděn s celými čísly, násobení pochopitelně musí předcházet dělení, jinak by ztráta přesnosti po celočíselném dělení zcela zničila obraz

Kalibrace astronomických snímků

- Kalibrace astronomických snímků zahrnuje 2 kroky:
 1. Odečtení **dark frame**
 2. Aplikace **flat field**
- I při tvorbě samotných flat field snímků je velice vhodné odečíst dark frame, odpovídající expoziční době flat field snímků, od každého snímku
 - I dark frame pro flat field je vhodné vytvořit jako medián alespoň 5 temných snímků o expoziční době odpovídající expozici flat field
- Pokud používáme binning, kalibrační snímky je nezbytné pořizovat v daném binningu

Poznámka k „bias“ snímkům

- Jako „bias“ je označován temný snímek s nulovou expoziční dobou
 - Vzhledem k nenulové době digitalizace ale nulová expoziční doba nelze dosáhnout
 - I v bias snímku je obsažen temný proud, pro první digitalizovaný řádek nejméně, pro poslední digitalizovaný řádek nejvíce
 - I bias snímek tedy závisí na teplotě senzoru
- Bias snímek reprezentuje „základní“ odezvu kamery
 - V bias snímku je obsažena např. elektroluminiscence výstupního zesilovače během digitalizace apod.

„Bias“ snímky a kalibrace

- V astronomické komunitě se traduje použití bias snímků pro kalibraci
 - Od temného snímku se odečte (master)bias
 - Od datového (light) snímku se odečte (master)bias
 - Od datového snímku (bez biasu) se odečte temný snímek (také bez biasu)
- Smyslem má být možnost škálovat temný snímek podle expoziční doby (temný proud závisí na expoziční době lineárně)
 - Škálování ale vždy vede k horším výsledkům než použití temného snímku s expozicí odpovídající light snímku

„Bias“ snímky a kalibrace

- Bias snímek je v kalibraci nadbytečný

$$(\text{light} - \text{bias}) - (\text{dark} - \text{bias}) =$$

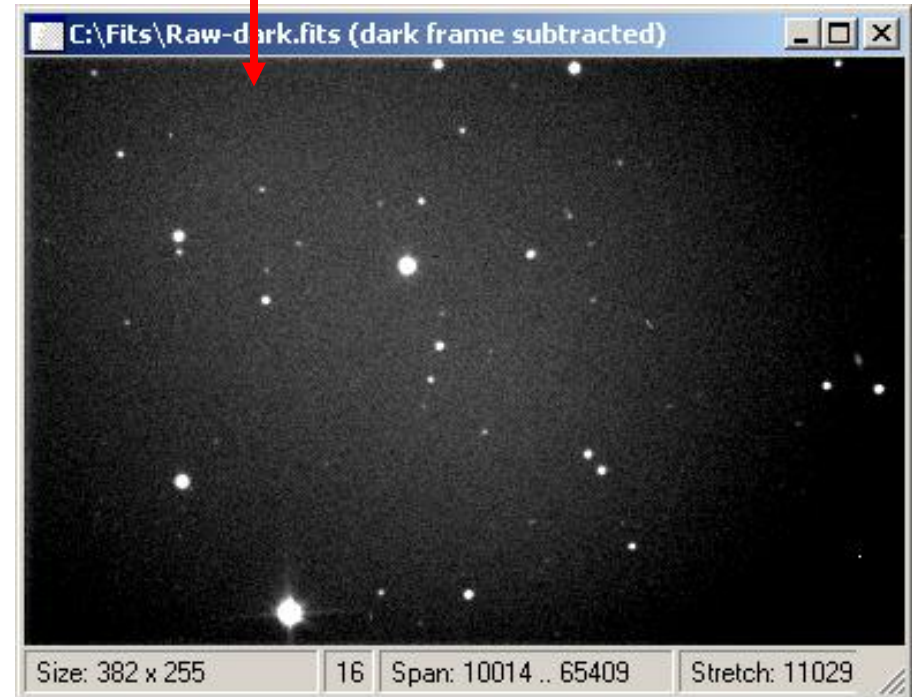
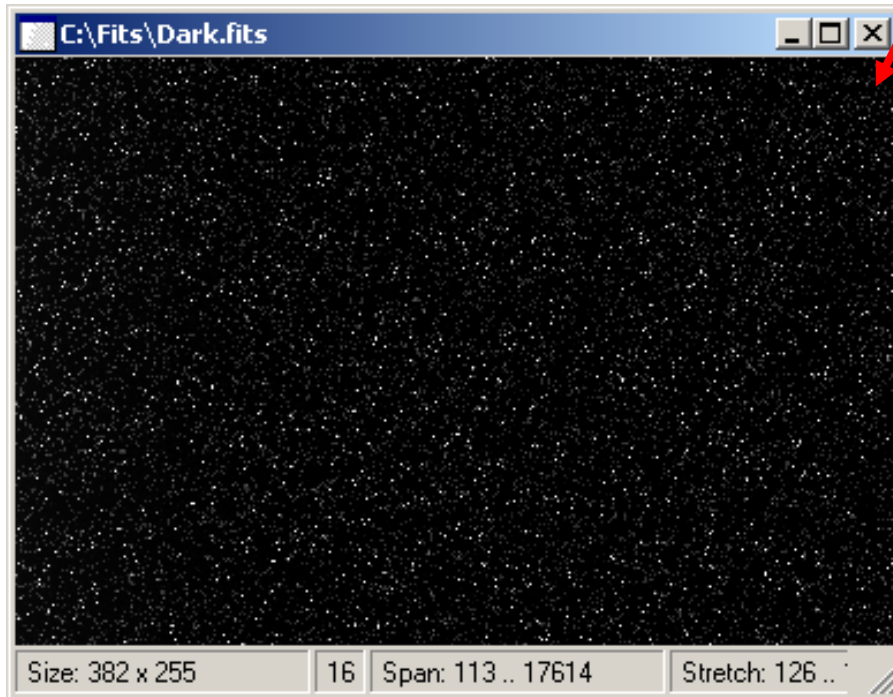
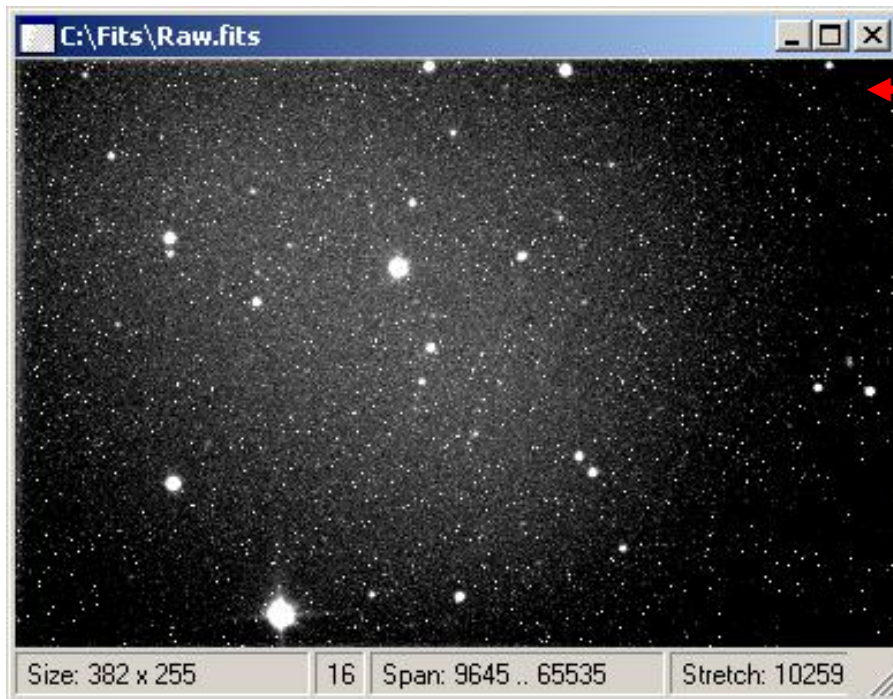
$$\text{light} - \text{bias} - \text{dark} + \text{bias} =$$

$$\text{light} - \text{dark}$$

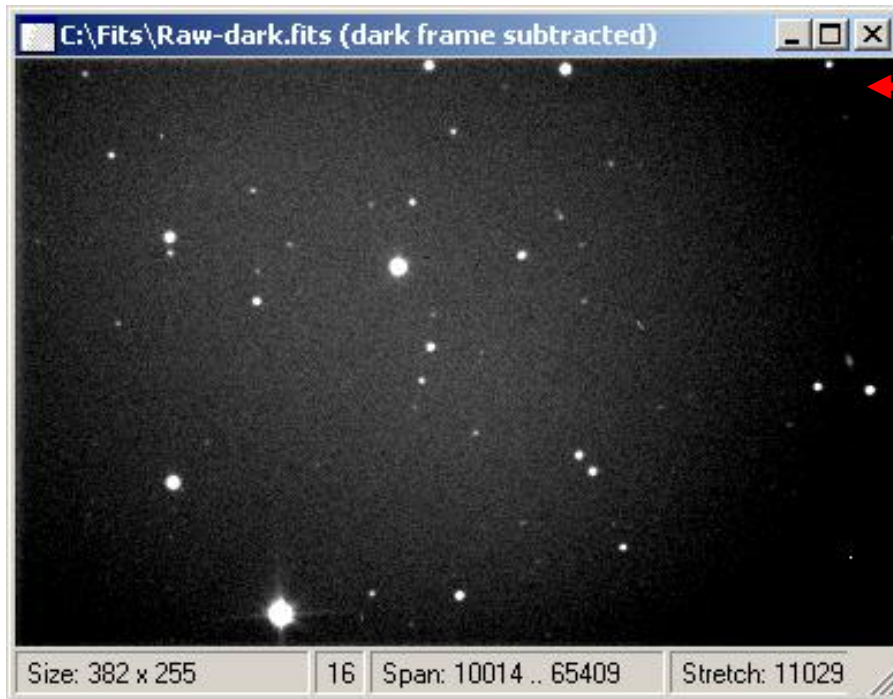
- Aditivní operace zvyšují šum snímku

$$\sigma_{result} = \sqrt{\sigma_{frame1}^2 + \sigma_{frame2}^2}$$

- Nahrazení 1 aditivní operace 3 operacemi je kontraproduktivní
- Použití bias snímků pro kalibraci není tedy pouze nadbytečné, ale přímo škodlivé



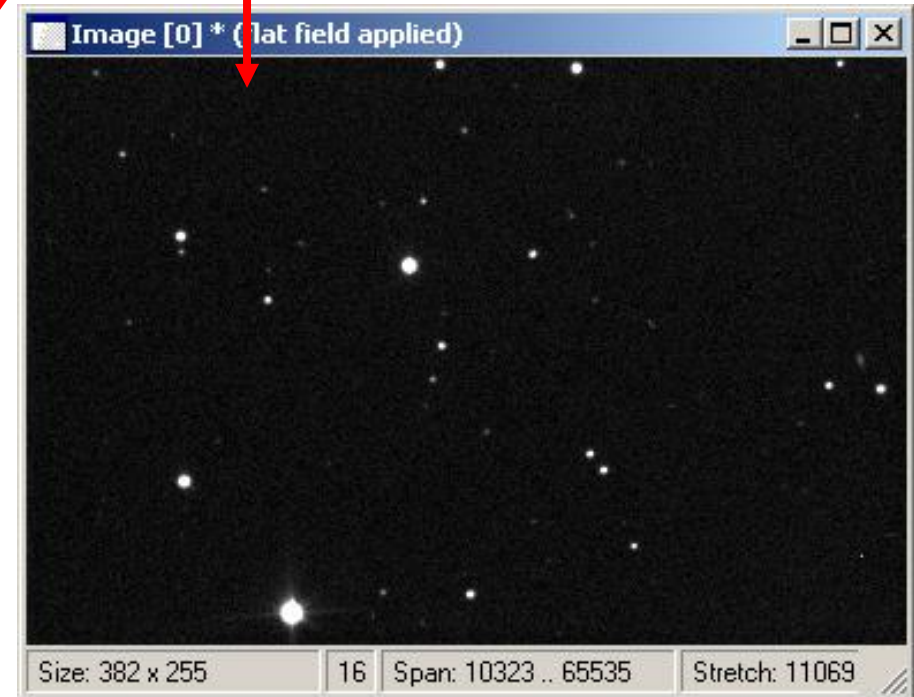
- Raw (syrový) snímek
- Temný snímek
- Výsledek po odečtení temného snímku od syrového snímku



- Snímek po odečtení temného snímku

- Flat field

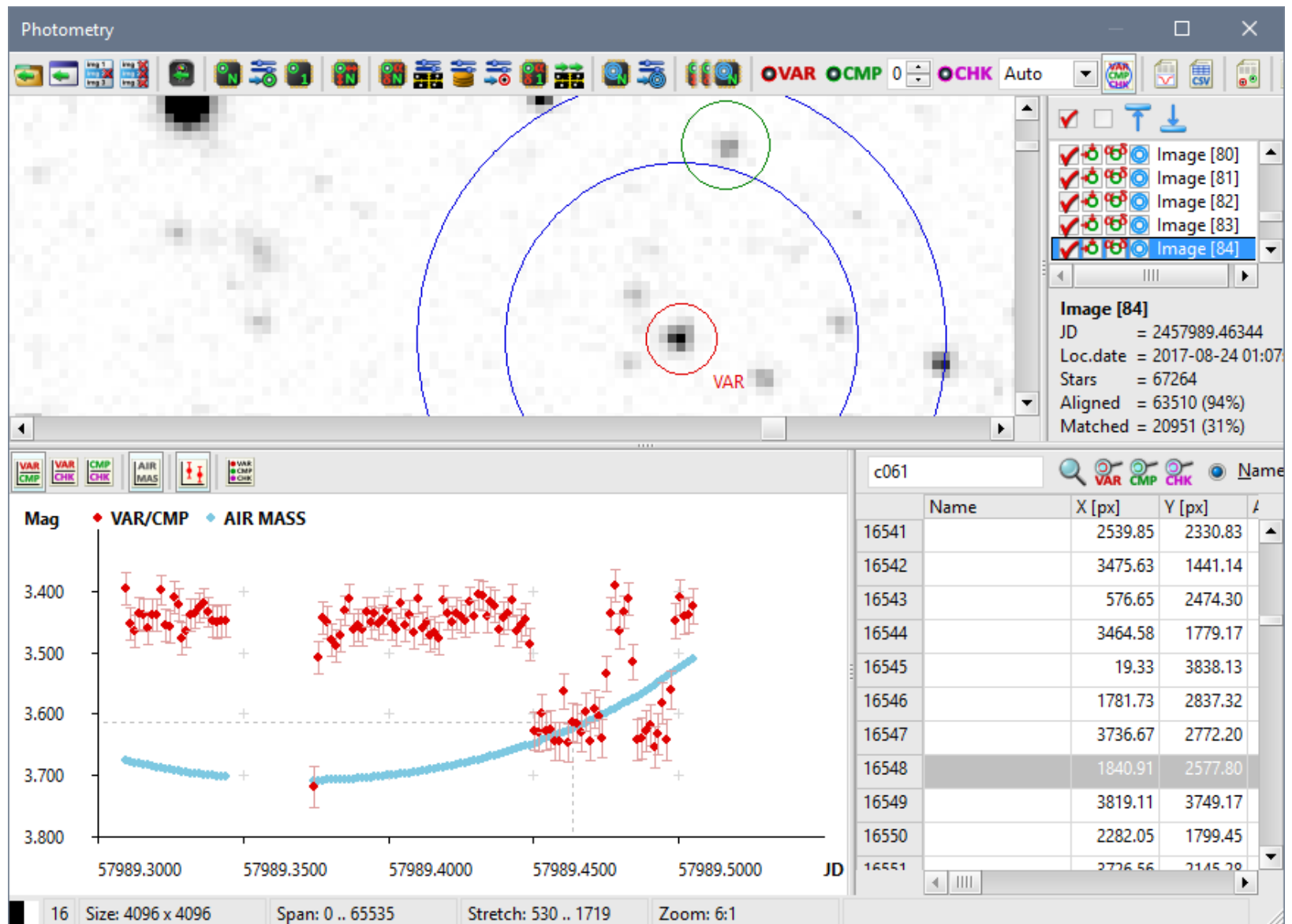
- Výsledek po aplikaci flat field



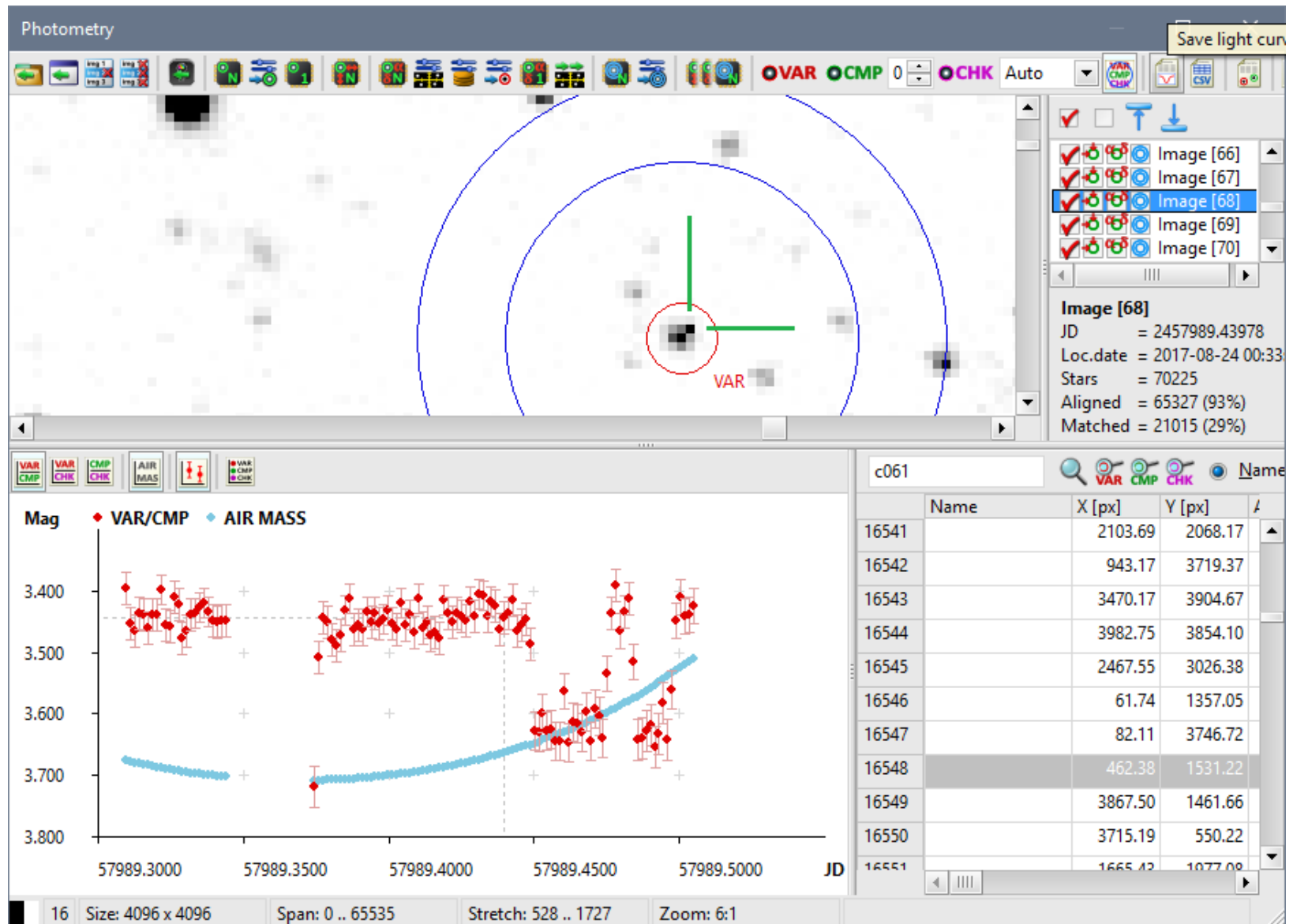
„Horký pixel“ (hot-pixel)

- Pixel s vyšším temným proudem než je průměr
- Často vykazuje „nevyzpytatelné“ chování
 - Hodnota horkého pixelu někdy není závislá na čase přesně lineárně
 - Některé horké pixely vznikají v důsledku překryvů řídicích signálů CCD atd.
- Horké pixely nelze zcela odstranit odečtením temného snímku
 - Připomeňme, že rozptyl signálu odpovídá $\sqrt{\text{signálu}}$
- U nezvyklých jevů ve světelné křivce je nezbytné prohlédnout aperturu

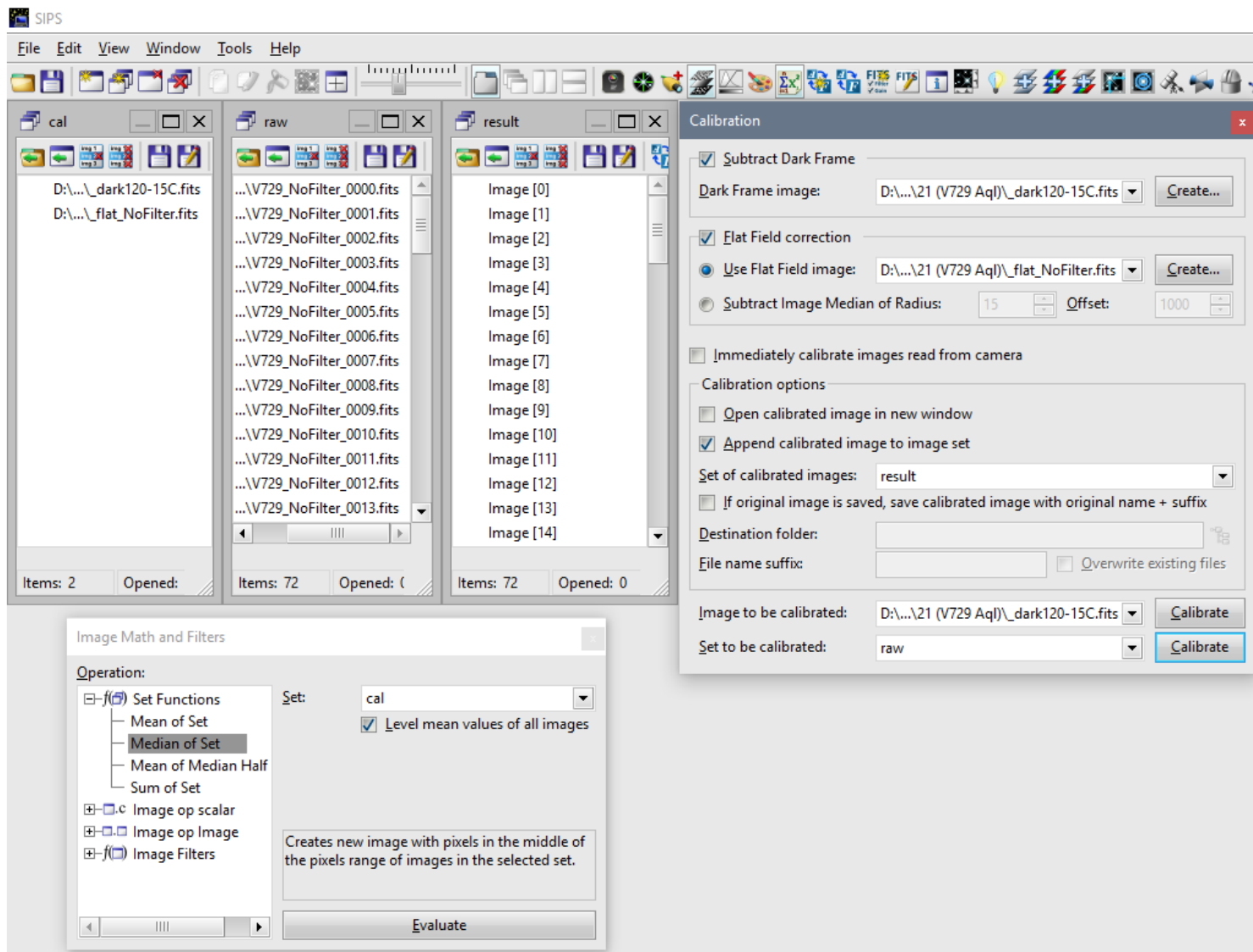
„Nevyzpytatelné“ chování horkého pixelu



„Nevyzpytatelné“ chování horkého pixelu



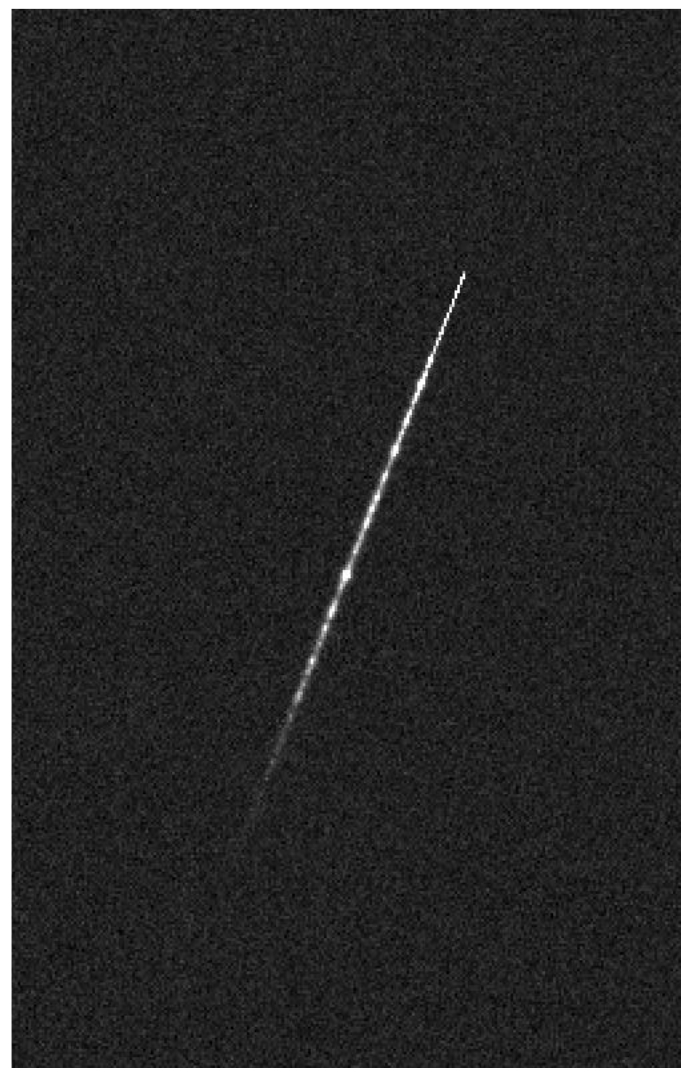
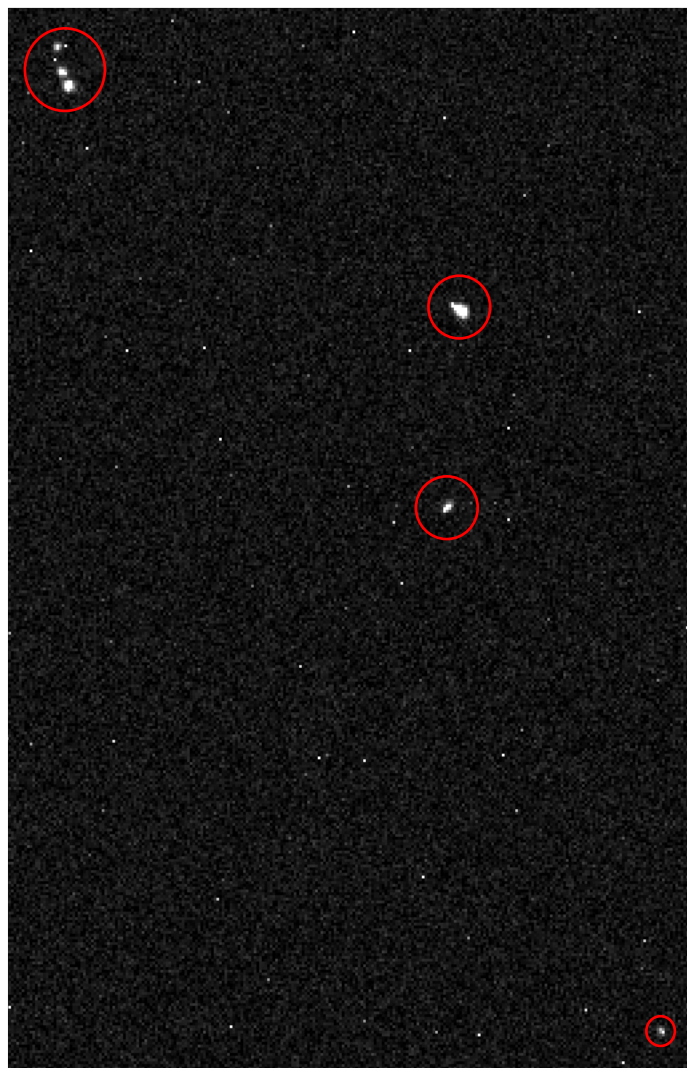
Programové nástroje pro kalibraci



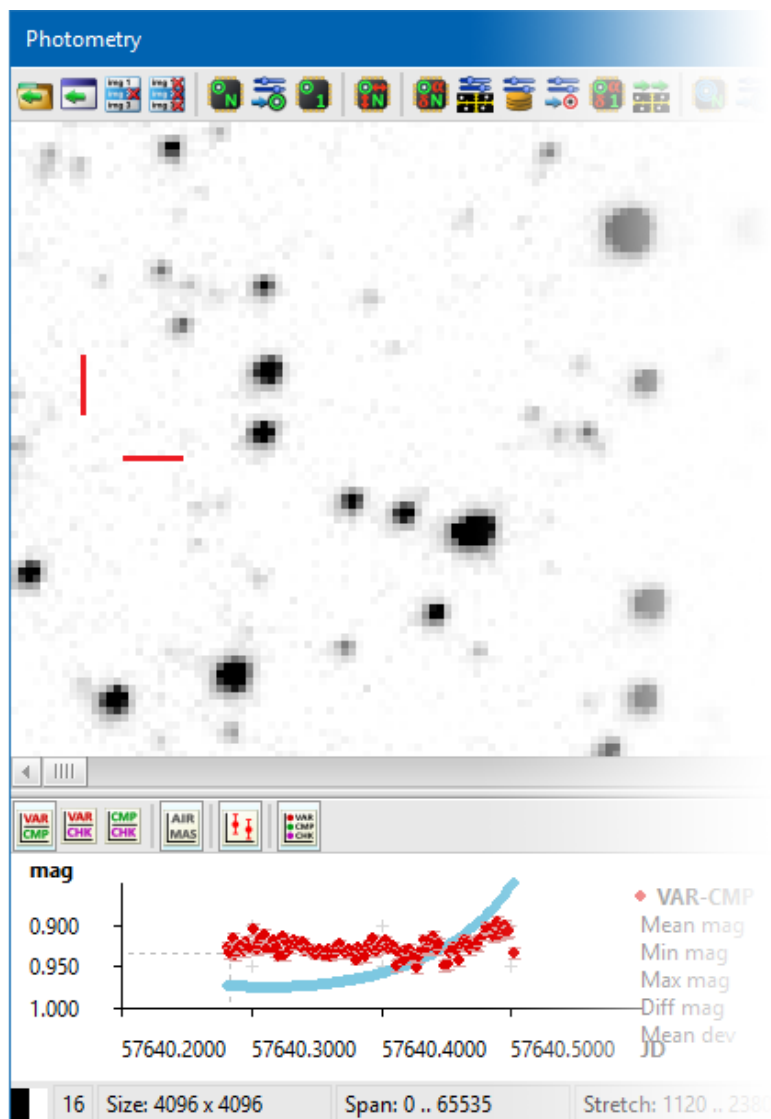
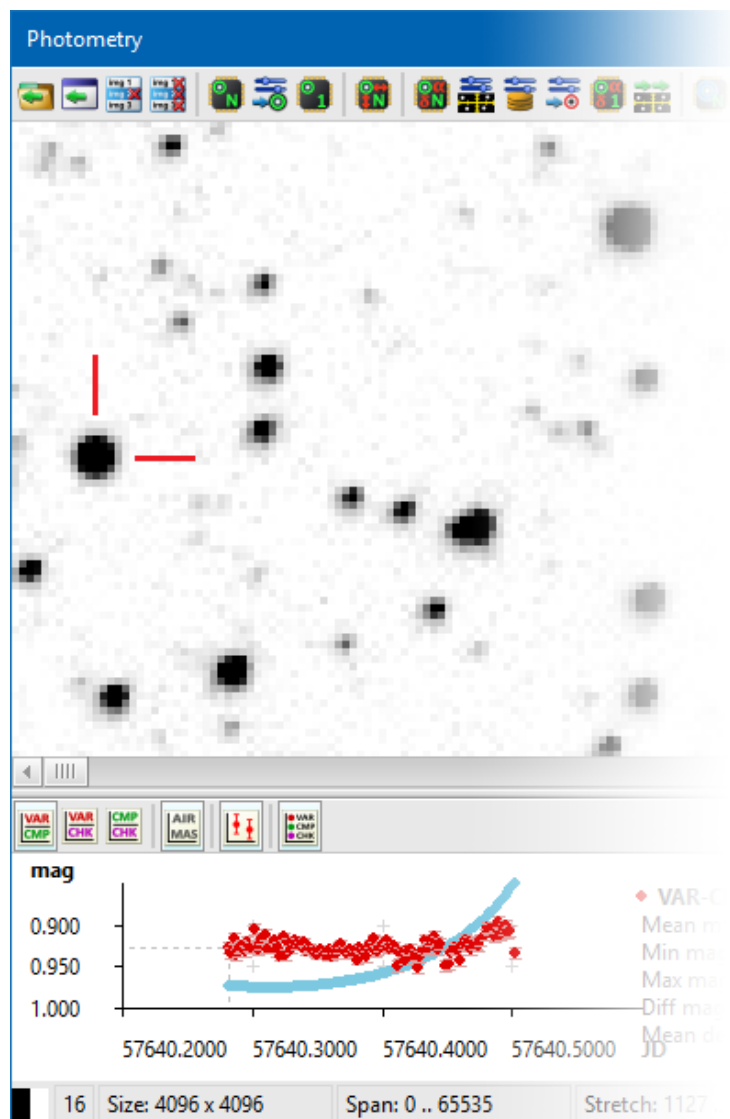
Stopy částic

- Elektrony se do nábojových pastí pixelů mohou dostat díky excitaci po průchodu částice čipem
 - Křemíkový čip funguje jako detektor částic
 - Hodně urychlovačů používá i detektory založené na podobném principu
 - Prolétající částice ionizuje atomy křemíku
 - Kladné ionty rekombinují s elektrony dodanými elektrodami nebo substrátem
 - Elektrony zůstávají v nábojových pastech (pixelech)
- Stopy částic mohou výrazně ovlivnit jednotlivý snímek

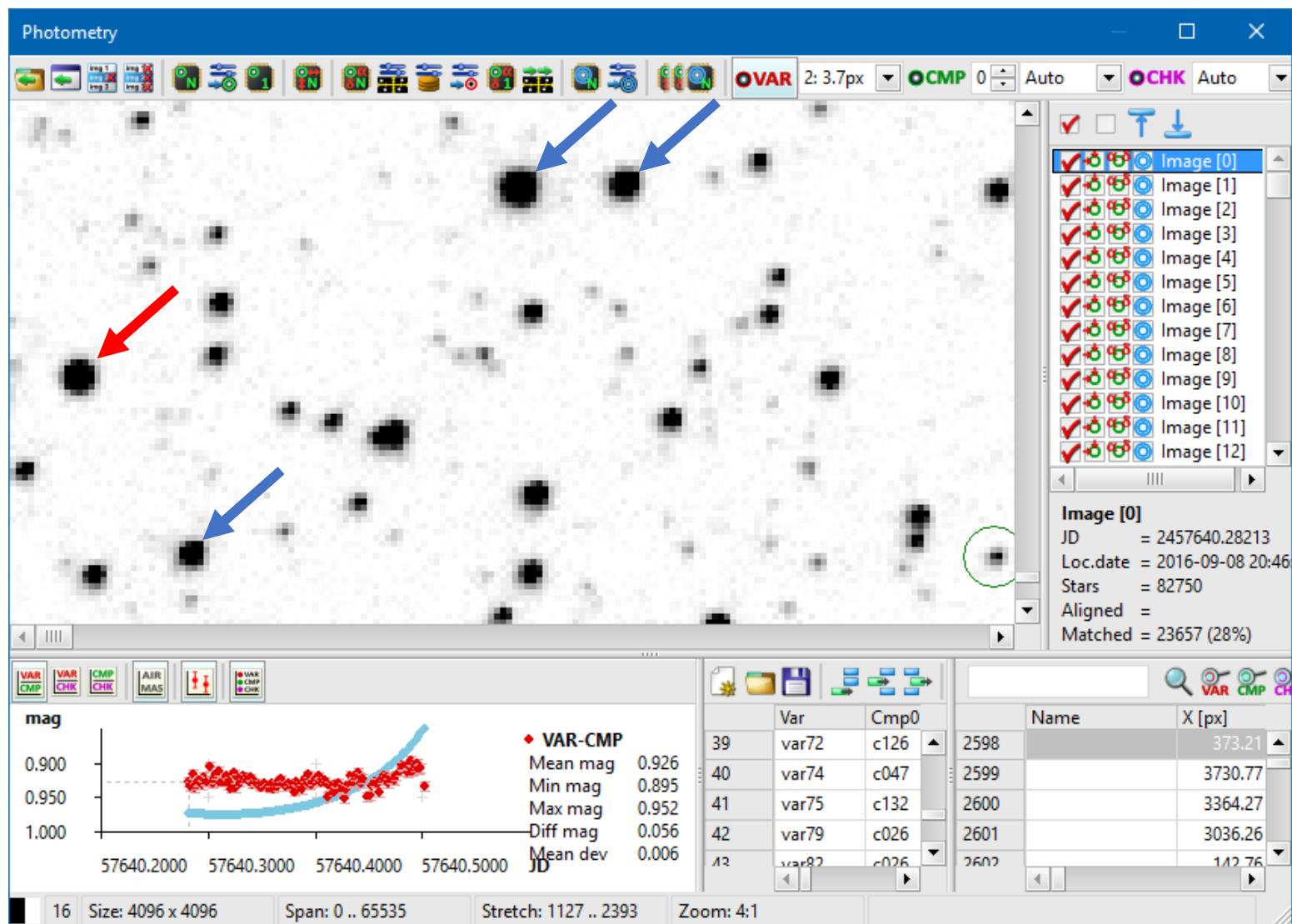
Stopy částic na temných snímcích



Stopy částic na snímcích oblohy

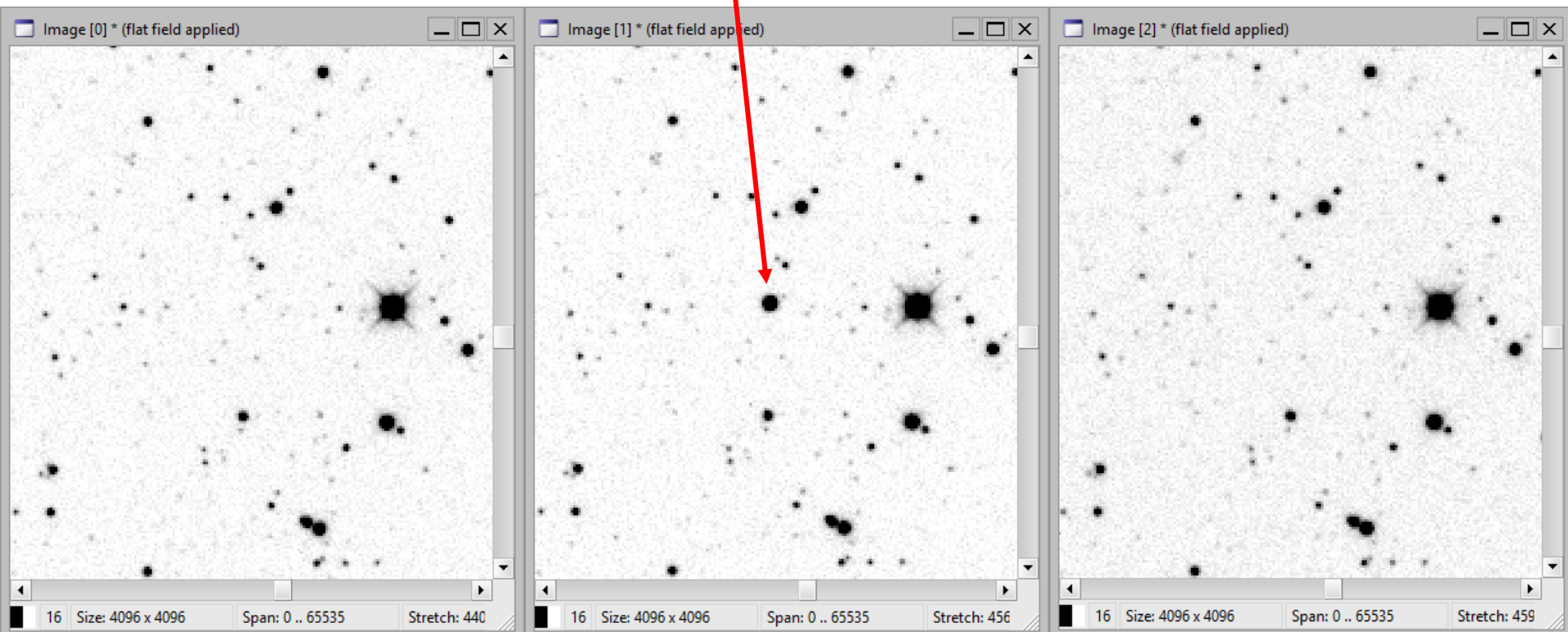


Rozdíly ve tvaru proti hvězdám

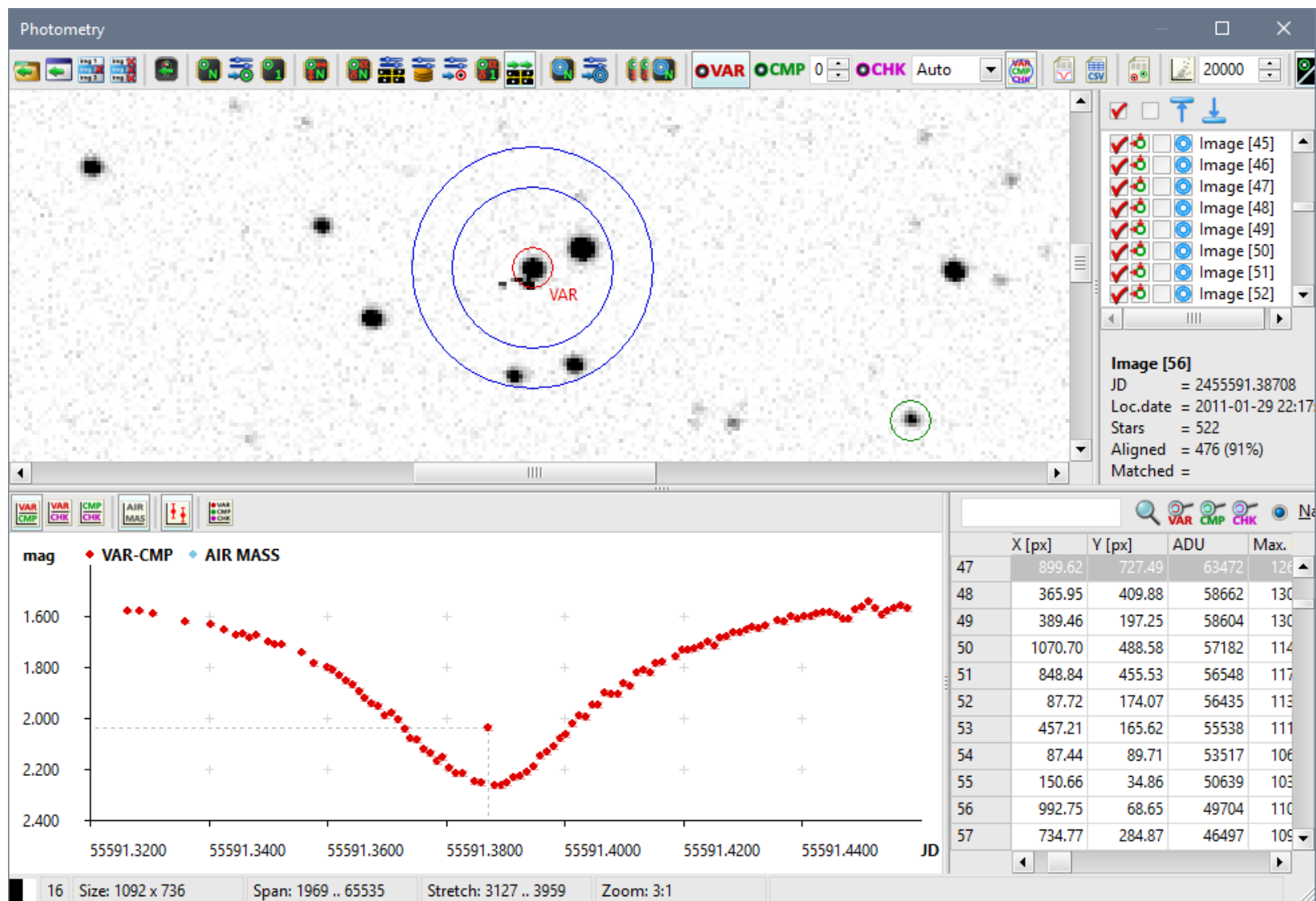


Stopy částic na snímcích oblohy

- V některých případech jsou stopy částic téměř nerozlišitelné od hvězd



Stopa částice v apertuře

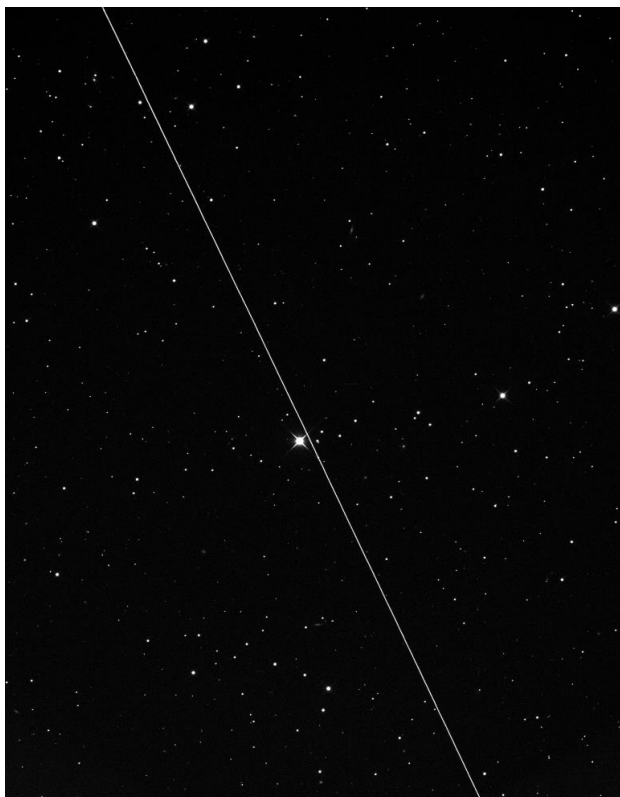


Letadla

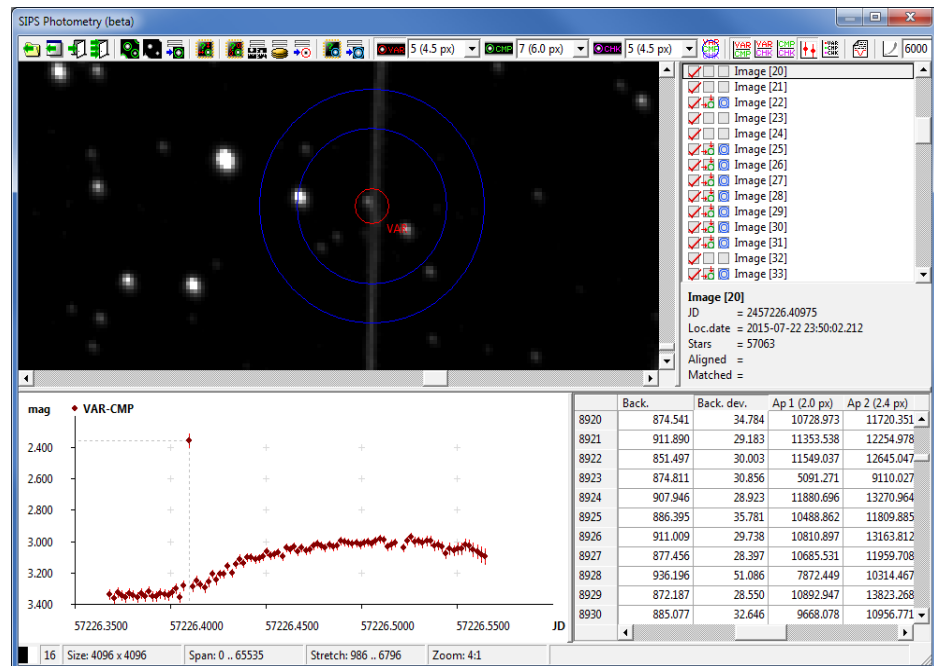
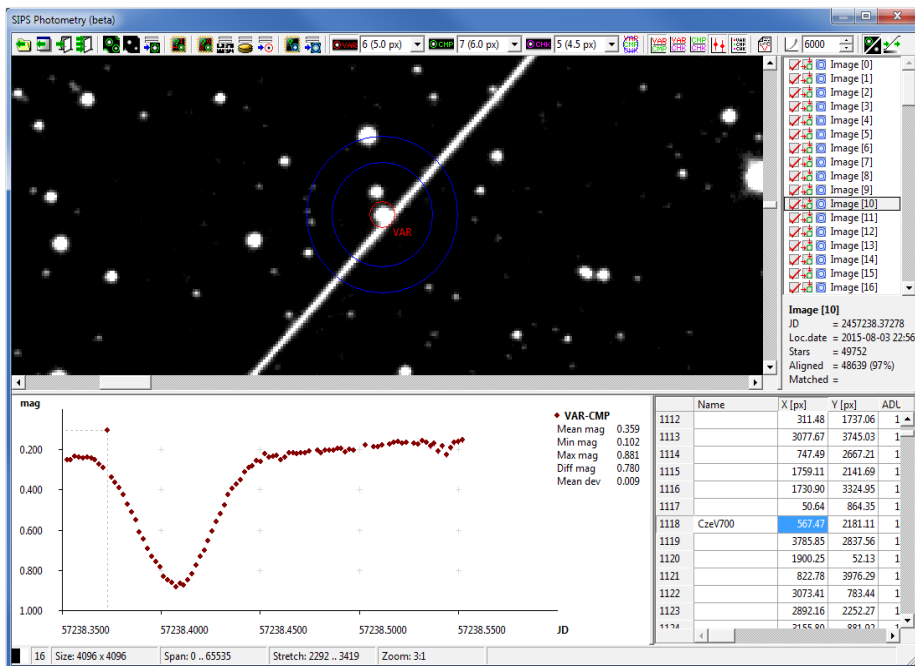
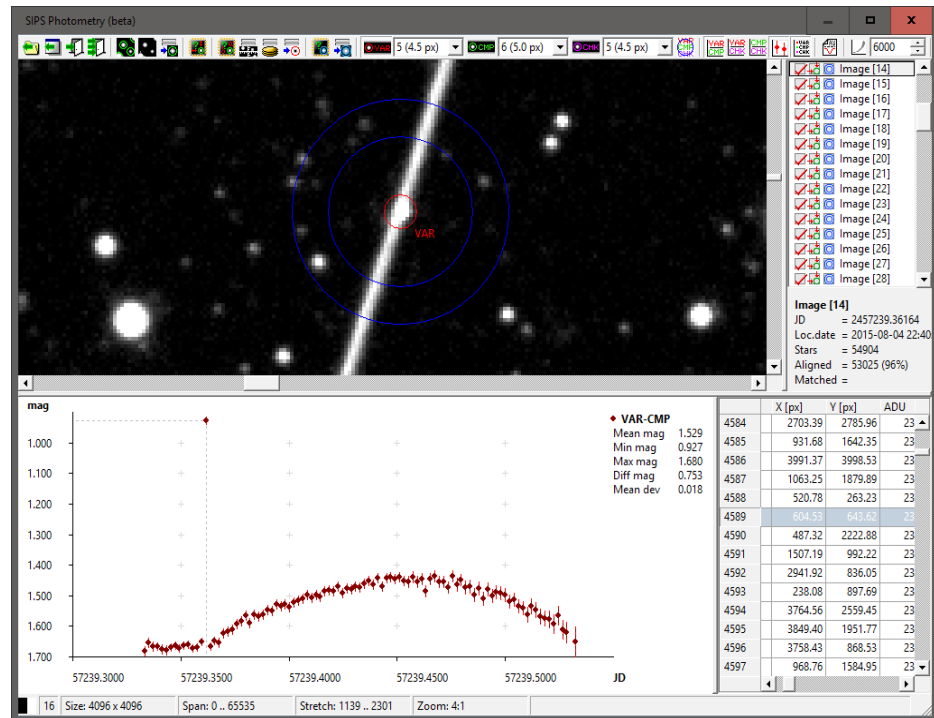


Družice

- Stopy po družicích jsou dnes bohužel všudypřítomné



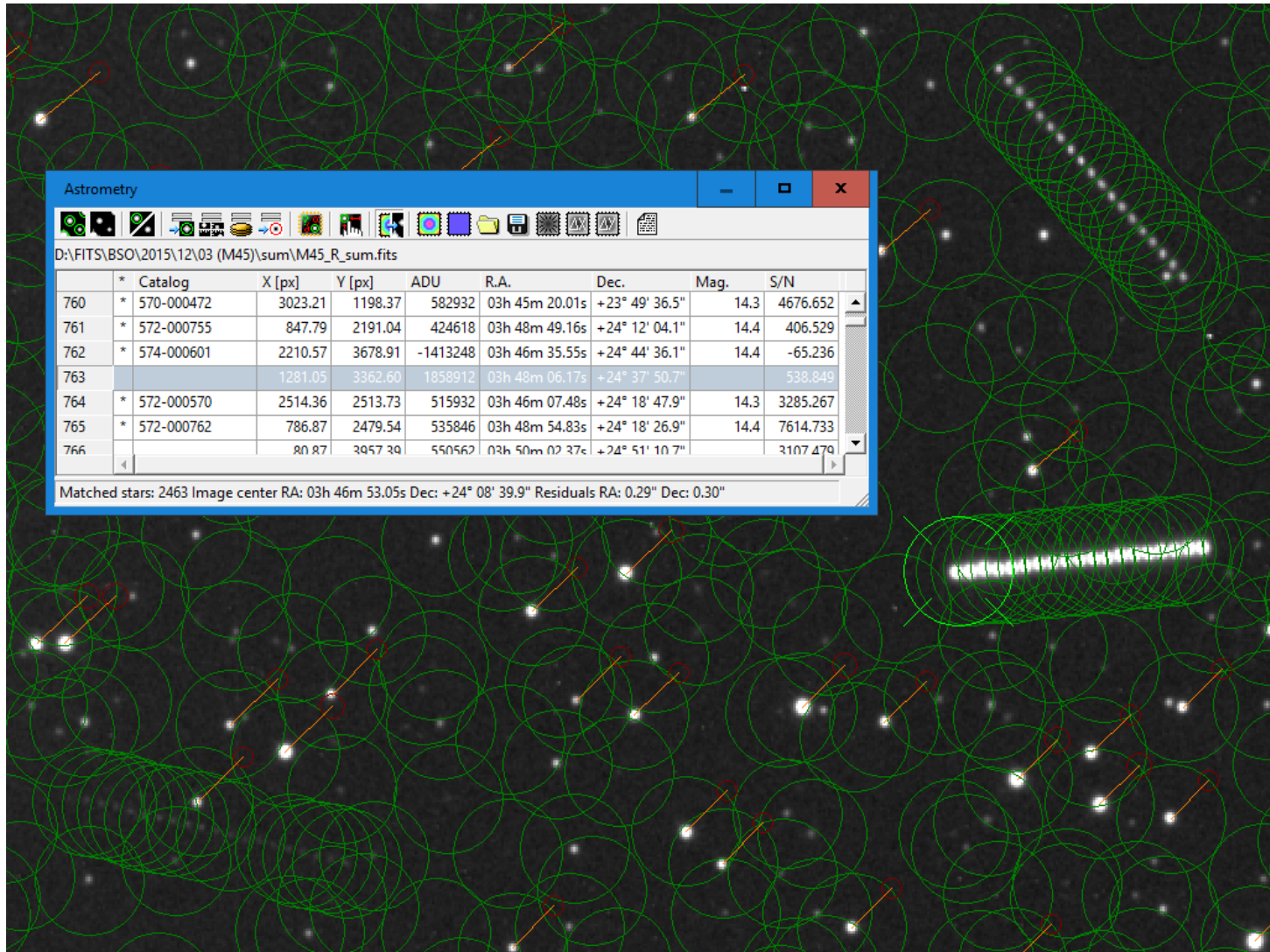
Družice v apertuře



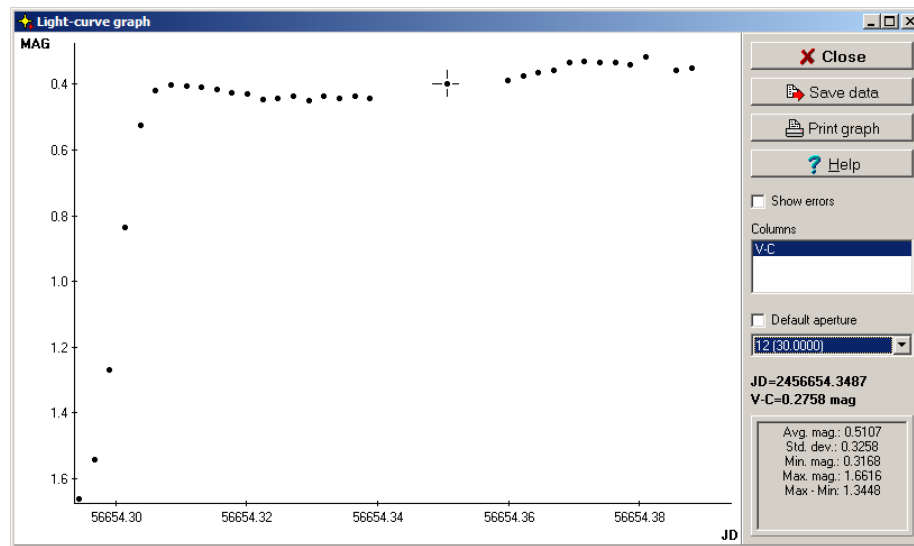
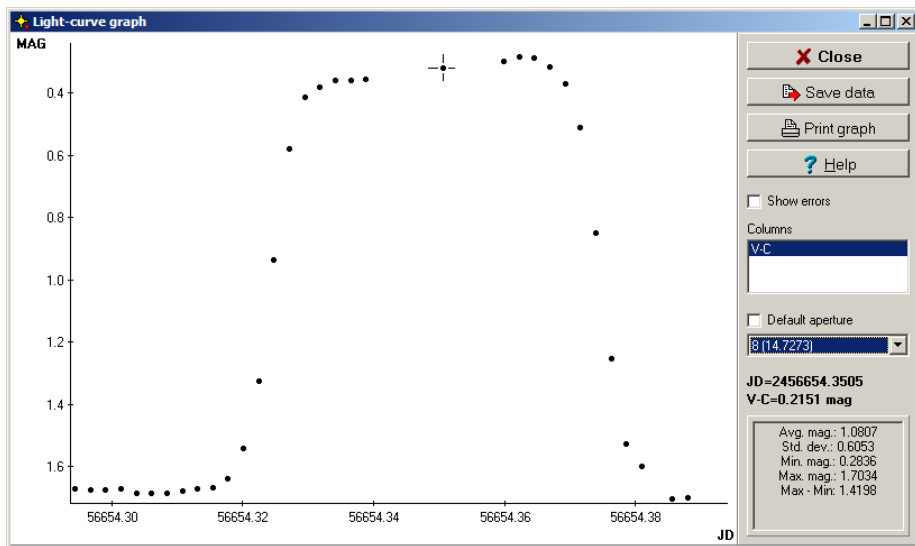
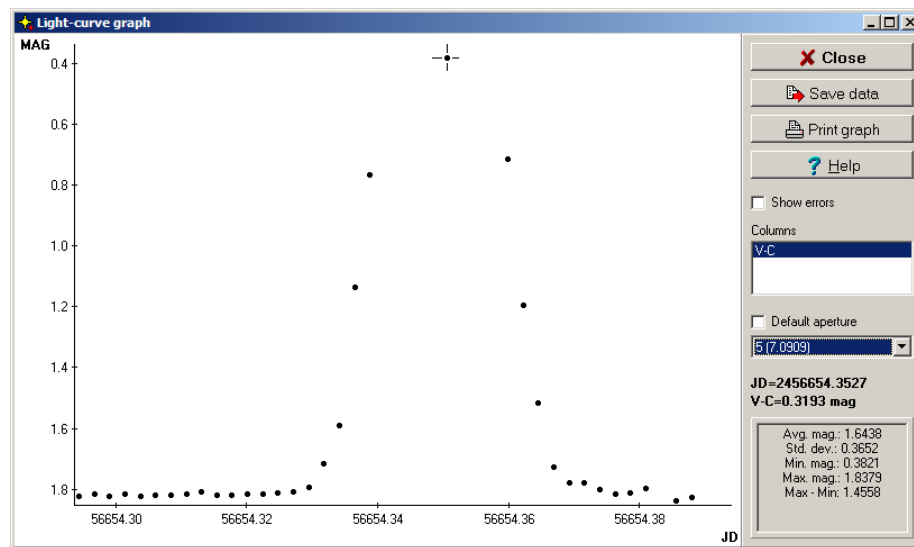
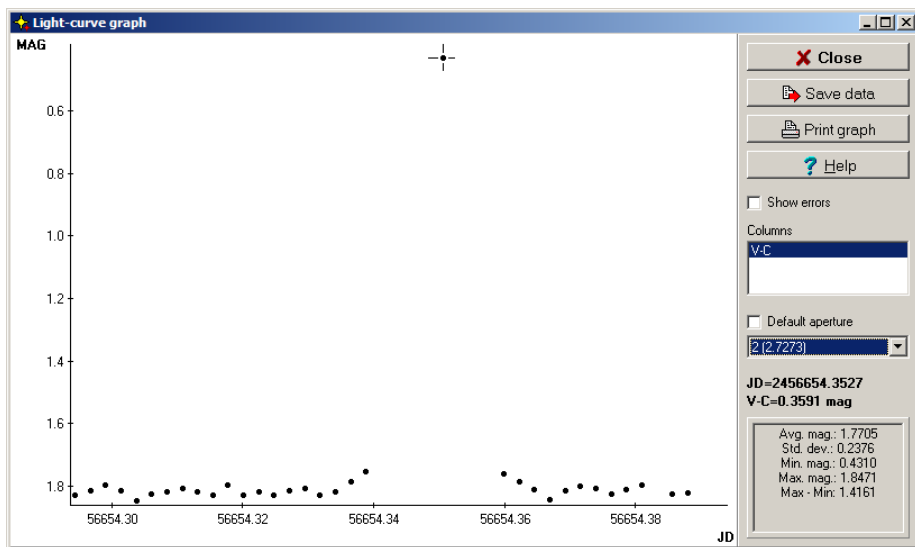
Zánik umělého kosmického tělesa
v atmosféře?

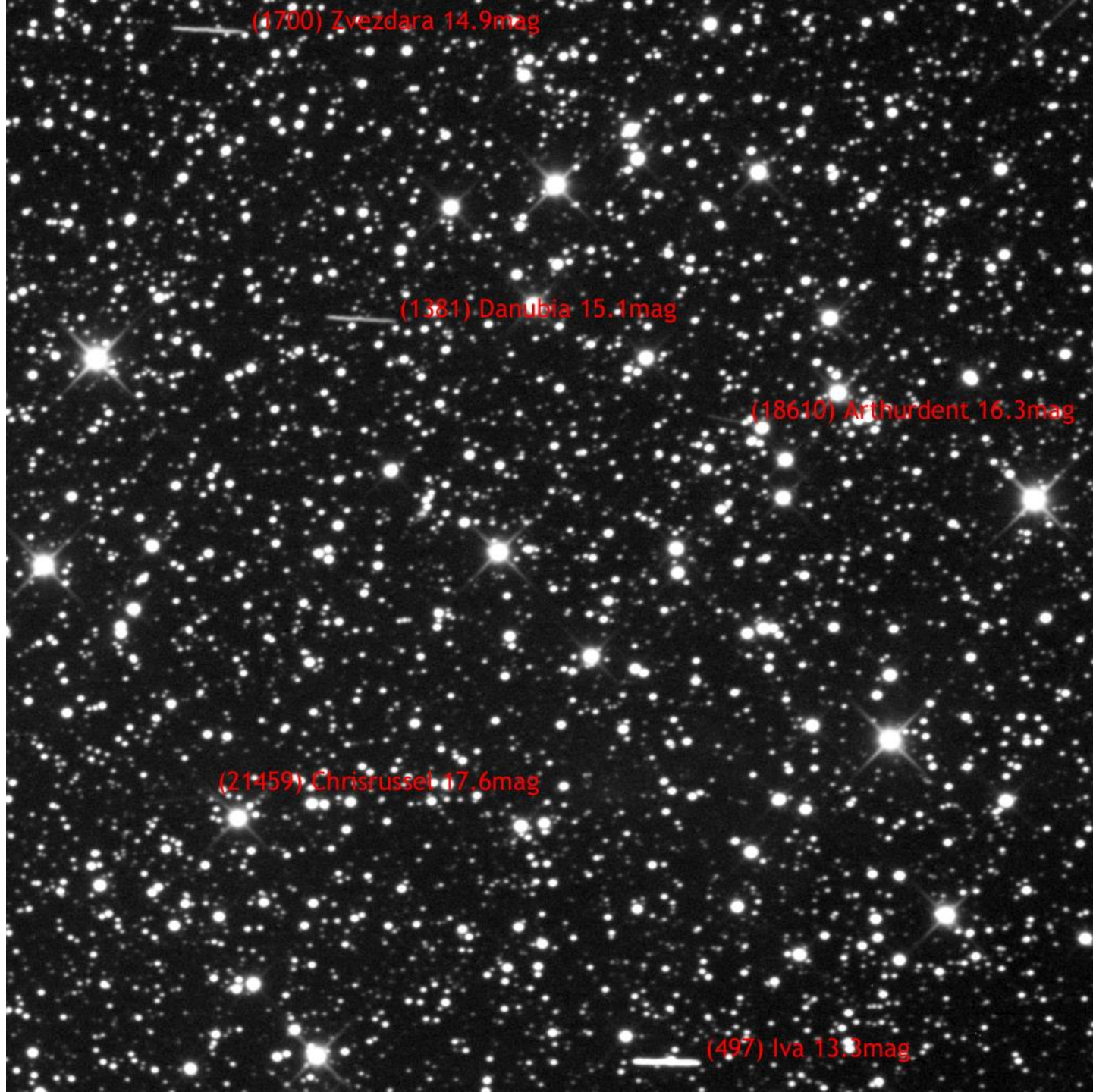


Planetky



Planetka Iva prochází přes aperturu





(1700) Zvezdara 14.9mag

(1381) Danubia 15.1mag

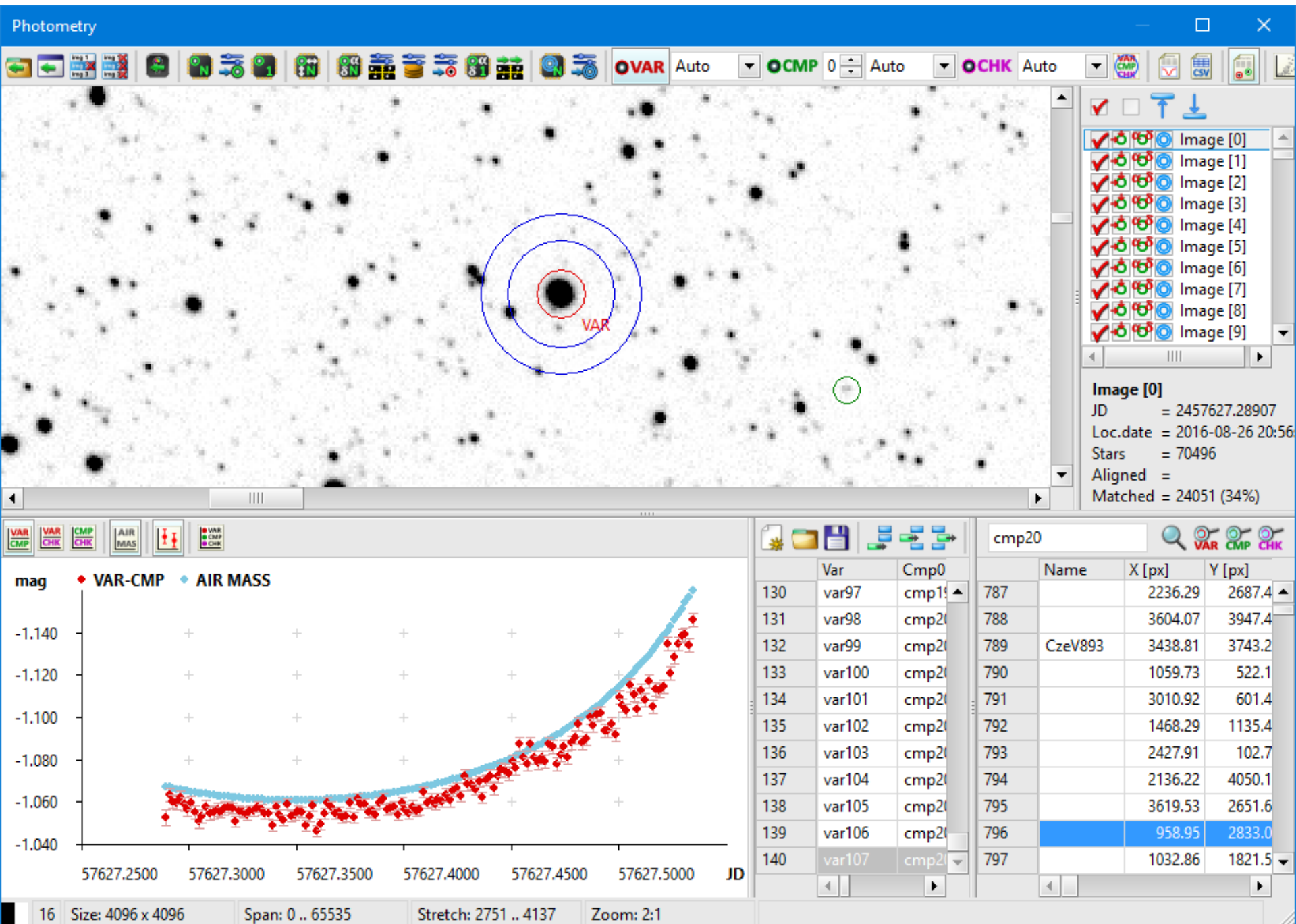
(18610) Arthurdent 16.3mag

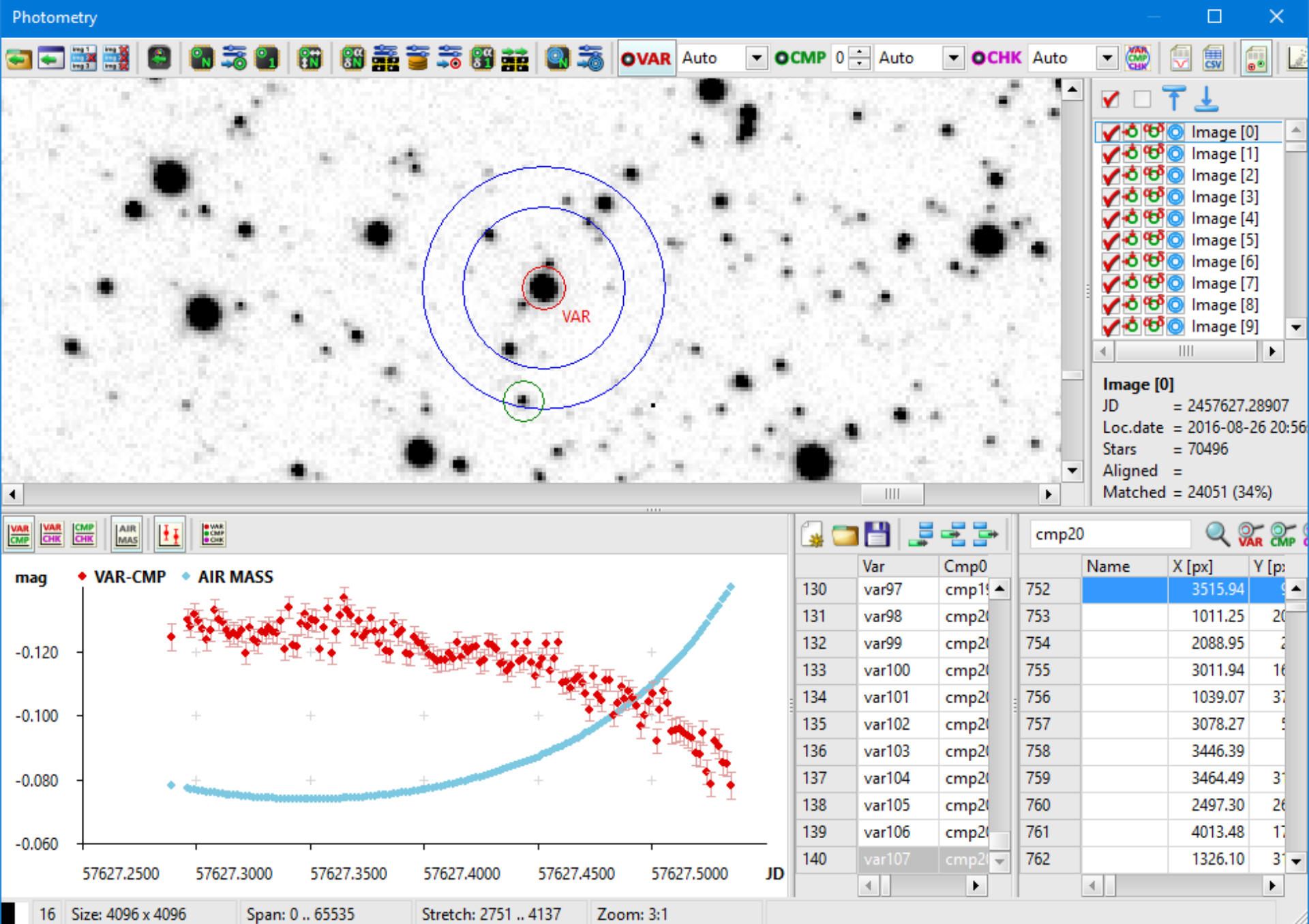
(21459) Chrisrussel 17.6mag

(497) Iva 13.3mag

Atmosférická extinkce

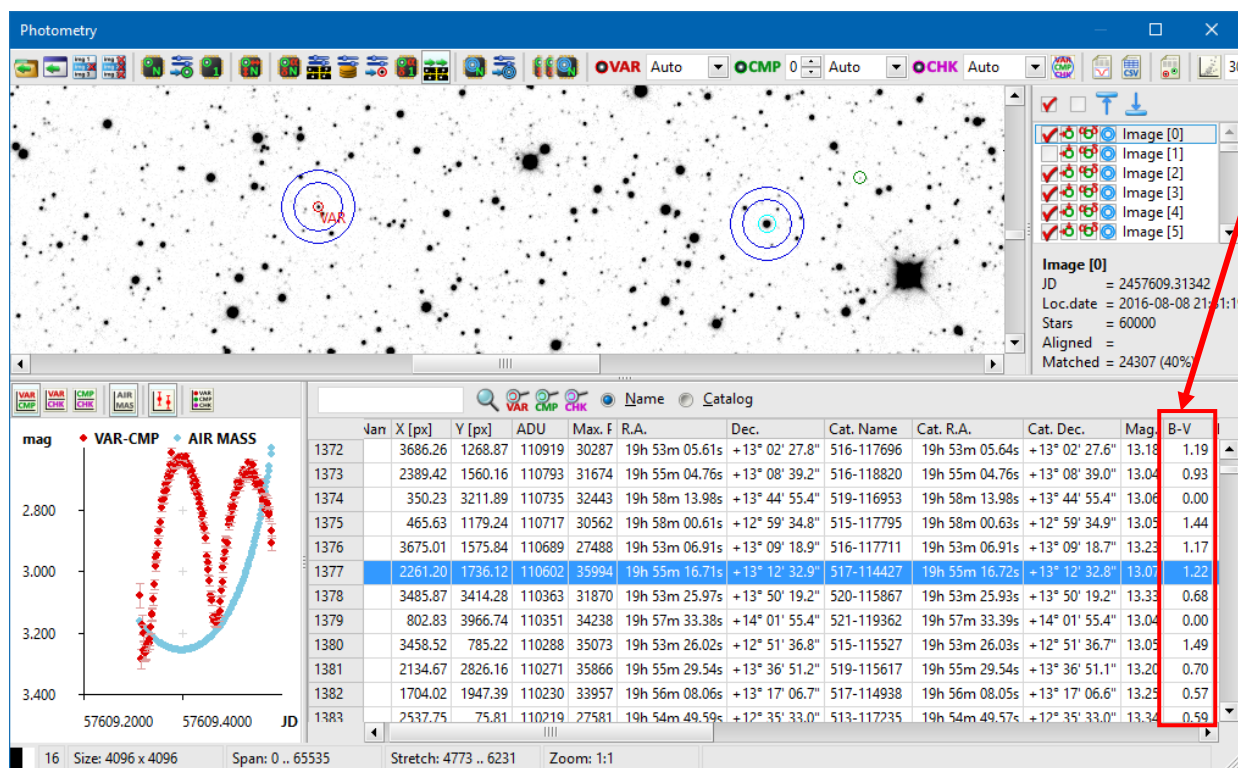
- Atmosféra rozptyluje krátké vlnové délky (modrou) a propouští dlouhé vlnové délky (červenou)
- V různé výšce nad obzorem prochází světlo různě silnou vrstvou vzduchu
 - Vrstva vzduchu (anglicky **air mass**) je udávána v jednotkách zenitové vrstvy (v zenitu je air mass = 1)
- Pokud mají dvě hvězdy rozdílnou barvu, v různé výšce nad obzorem se jejich vzájemná jasnost mění
 - V případě proměnné a srovnávací hvězdy to vede na falešné změny jasnosti





Co s atmosférickou extinkcí?

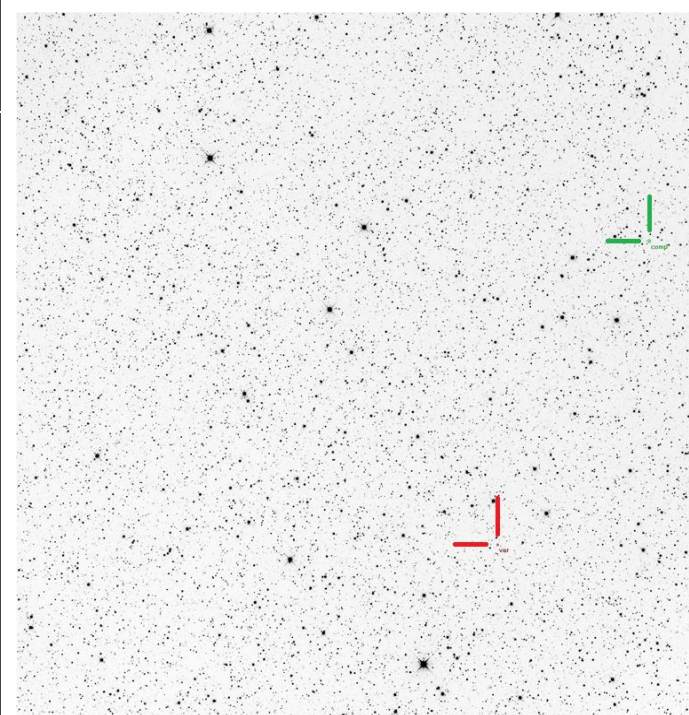
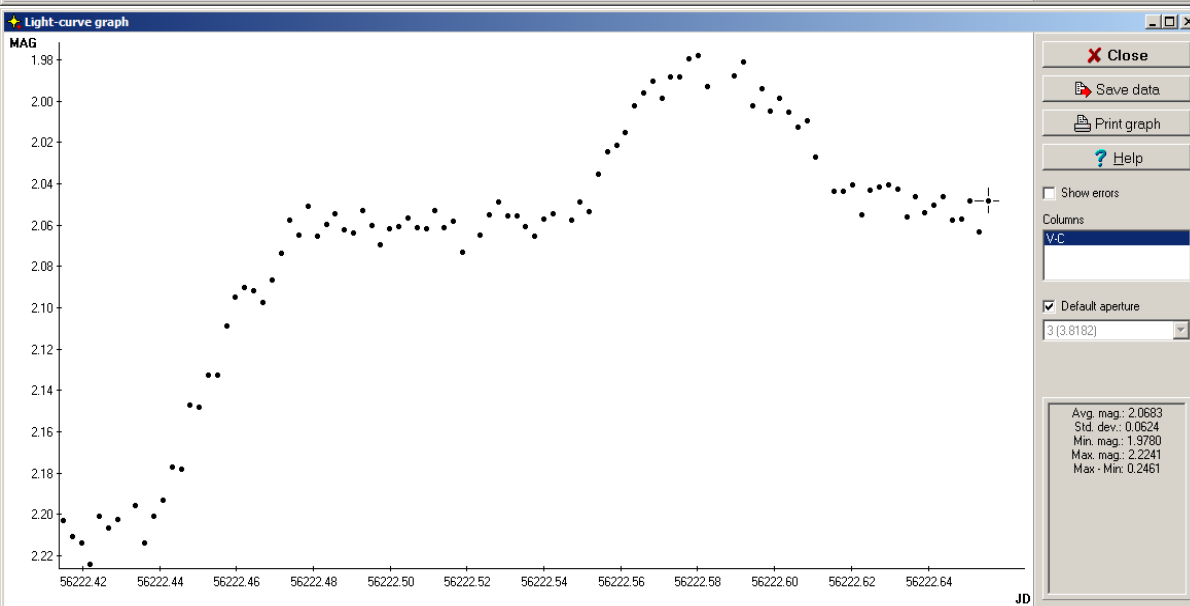
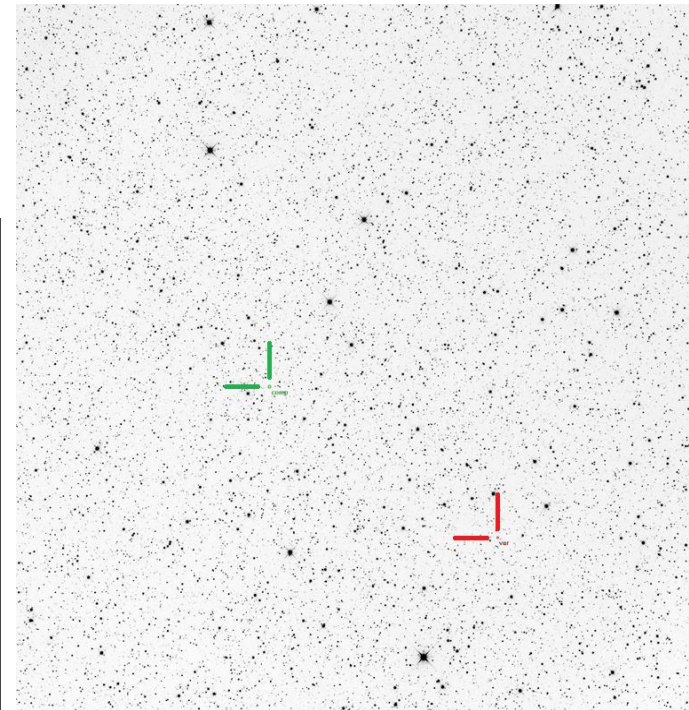
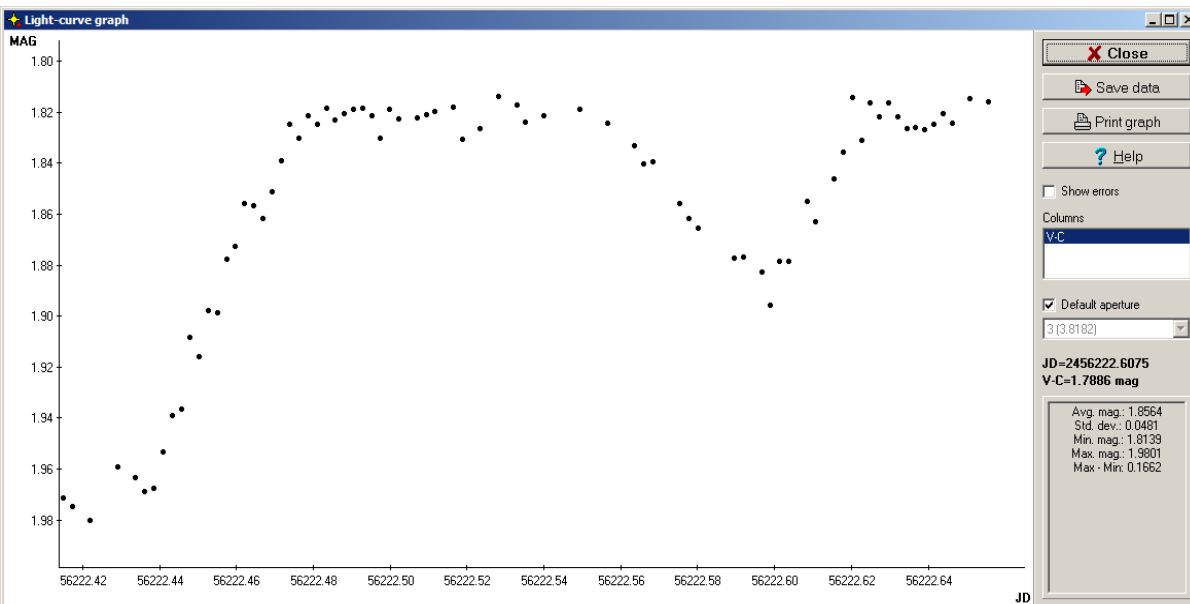
- Vliv extinkce je výrazně omezen použitím filtrů
- Při pozorování bez filtru je nutné volit proměnnou a srovnávací hvězdu stejné (co nejpodobnější) barvy



Vlivy počasí

- Změny počasí jsou příčinou velkého množství artefaktů
- Vliv počasí je umocněn svitem Měsíce a světelným znečištěním
- Vysoká oblačnost, mlha, změny seeingu atd.:
 - Zvyšují rozptyl měření
 - Vytváření falešná minima (nebo naopak maxima)
- Vliv počasí samozřejmě závisí na poměru signál/šum
 - Velmi jasné hvězdy jsou ovlivňovány méně

Falešné minimum

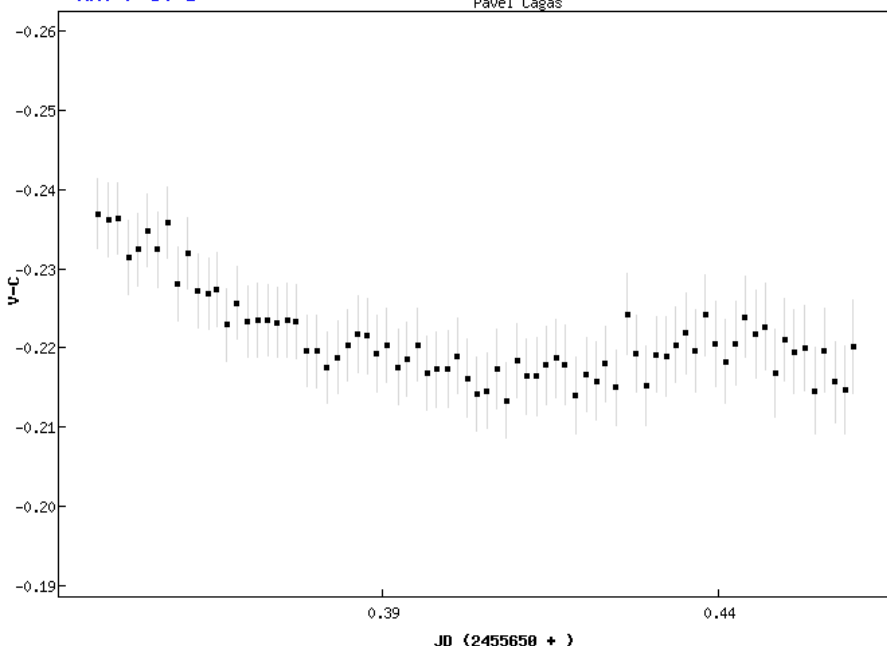


Skutečný vs. falešný tranzit

- Vysoký B-V index nabádá k opatrnosti
- Změna nesmí záviset na průměru clonky
- Změna se nesmí opakovat i u jiných hvězd v poli

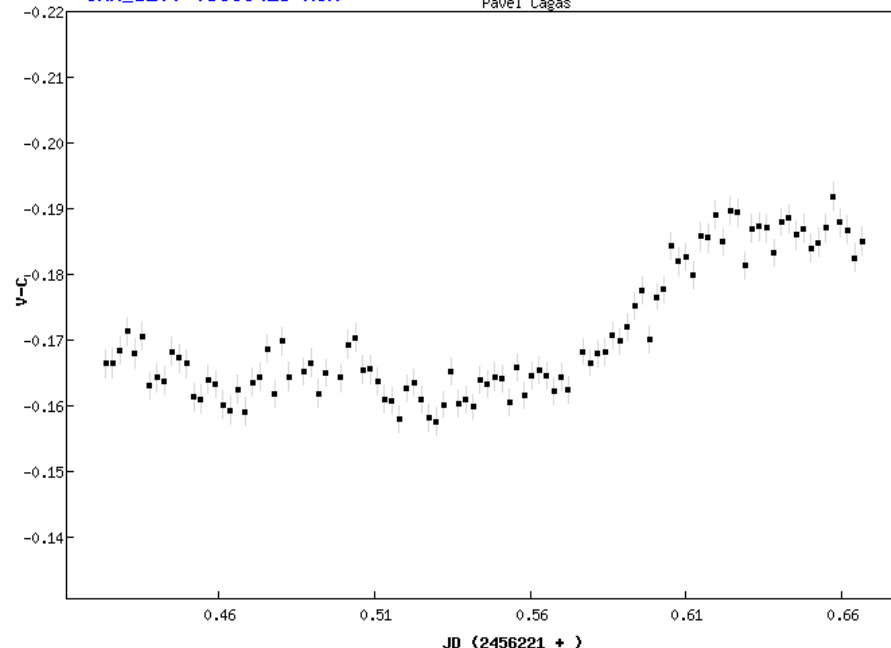
HAT-P-30 B

BSO Zlin
Pavel Cagas



UNA_1200-03895423 AUR

BSO Zlin
Pavel Cagas



Fotometrické zpracování snímků

```
#pragma omp parallel for
for ( i = 0; i < Depth; i++)
{
    int j;
    double ix, ix2;
    double iy, iy2;
    double rp;
    unsigned int * PPixel;

    iy = (double) (i - Depth/2);
    iy2 = iy * iy;
    PPixel = (unsigned int *) malloc(Width*sizeof(unsigned int));

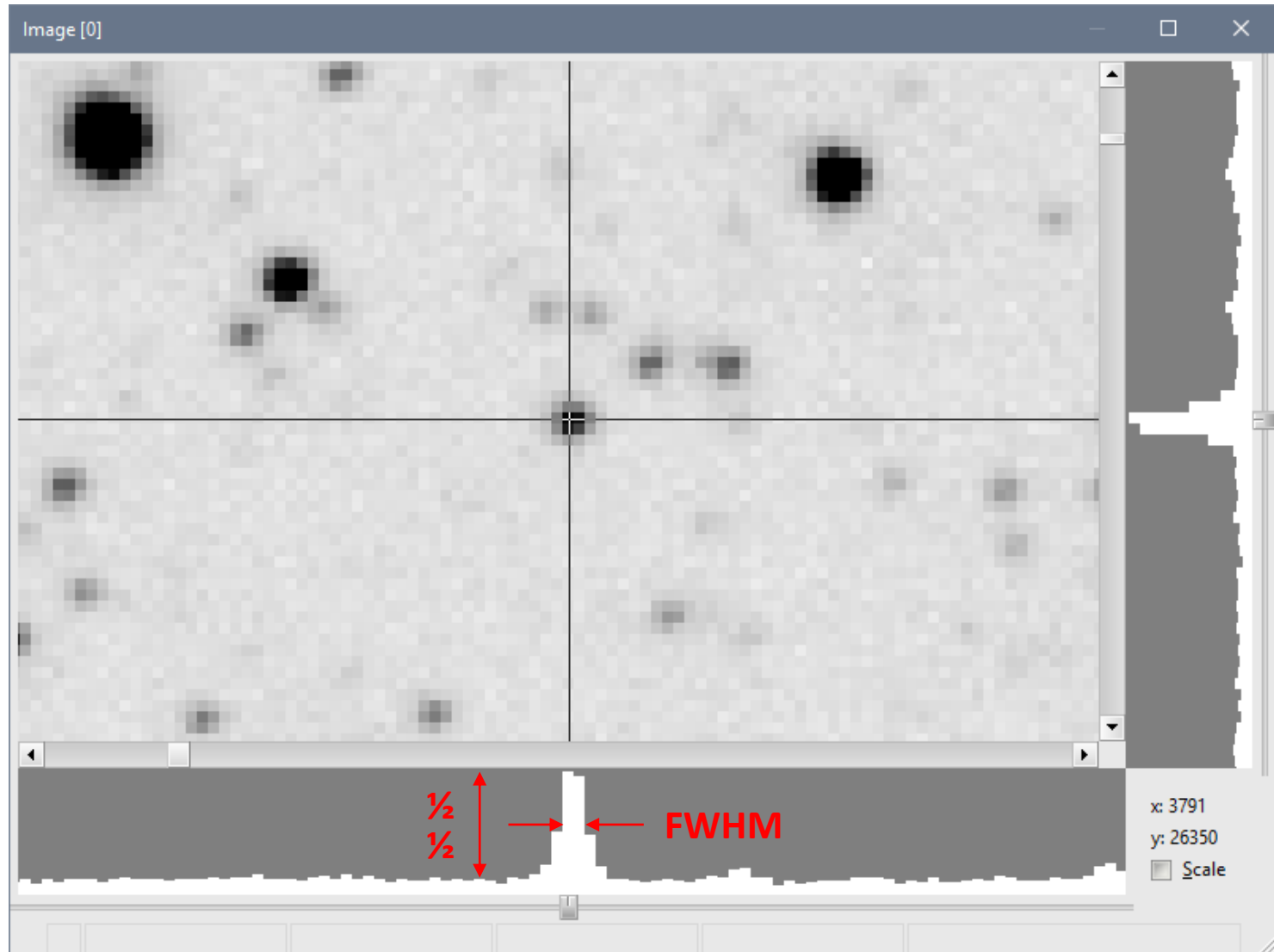
    for ( j = 0; j < Width; j++)
    {
        ix = (double) (j - Width/2);
        ix2 = ix * ix;
        rp = ix * ix2 * x3[i][j];
        rp = rp * Scale;
        rp = rp * 100.0 + 0.5;
        if (rp < 0) {
            (*PPixel) = 0;
        } else if (rp > (double) 255) {
            (*PPixel) = (unsigned int) 255;
        } else {
            (*PPixel) = (unsigned int) rp;
        }

        PPixel++;
    }
}
```

Rozptylová funkce (PSF – Point Spread Function)

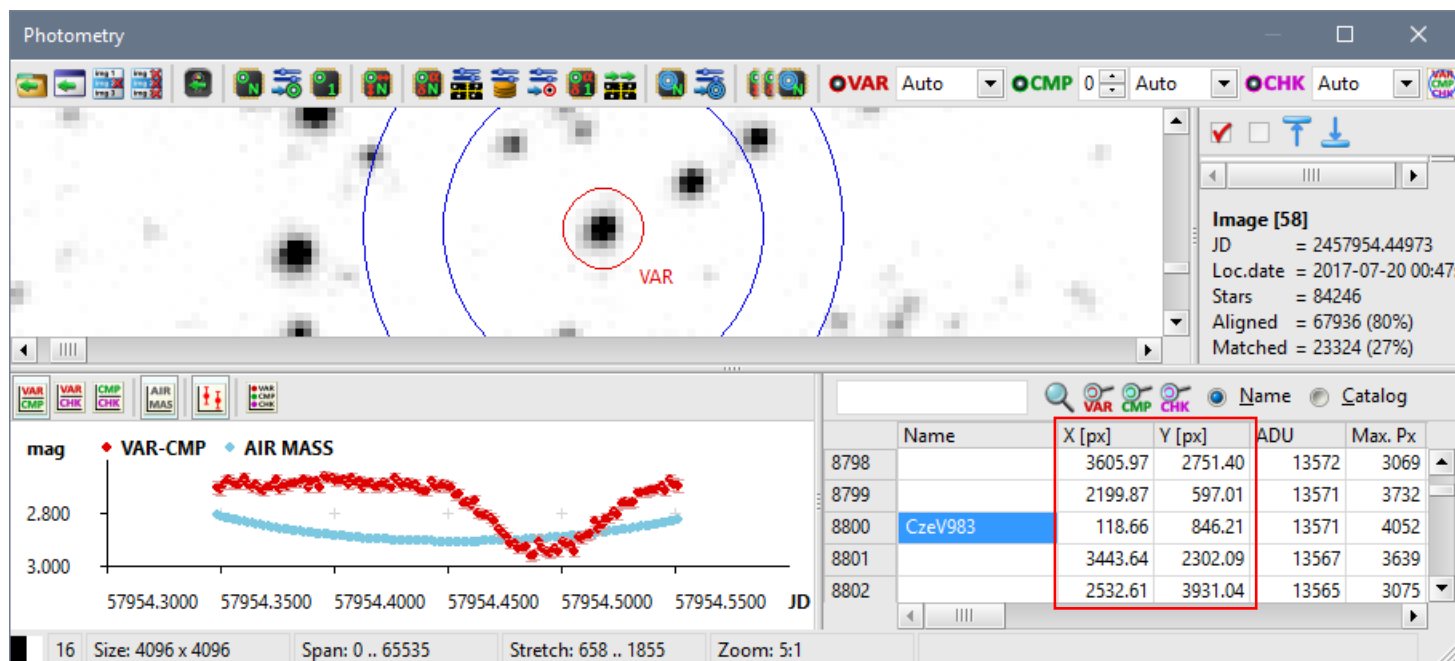
- Bodový zdroj světla není zobrazen do bodu, ale je „rozmazán“ do řady pixelů
- Rozmazání je způsobeno:
 - Vlnovou povahou světla (náš detektor má omezený průměr)
 - Nedokonalostí optiky (Strehl ratio < 1)
 - Neklidem atmosféry (anglicky **seeing**)
 - Nedokonalostí vedení za hvězdami, deformacemi tubusu a montáže atd.
- Funkce popisující „rozmazání“ je nazývána **Rozptylová funkce** (anglicky **Point Spread Function – PSF**)

Hvězda zobrazená vzorkováním 1,3"/px



Těžiště hvězdy

- Těžiště je vážený průměr pozice hvězdy
 - Vahou je hodnota (ADU) pixelu
- Vážený průměr dovoluje určit polohy hvězdy s přesností lepší jak 0,1 pixelu



Astrometrie

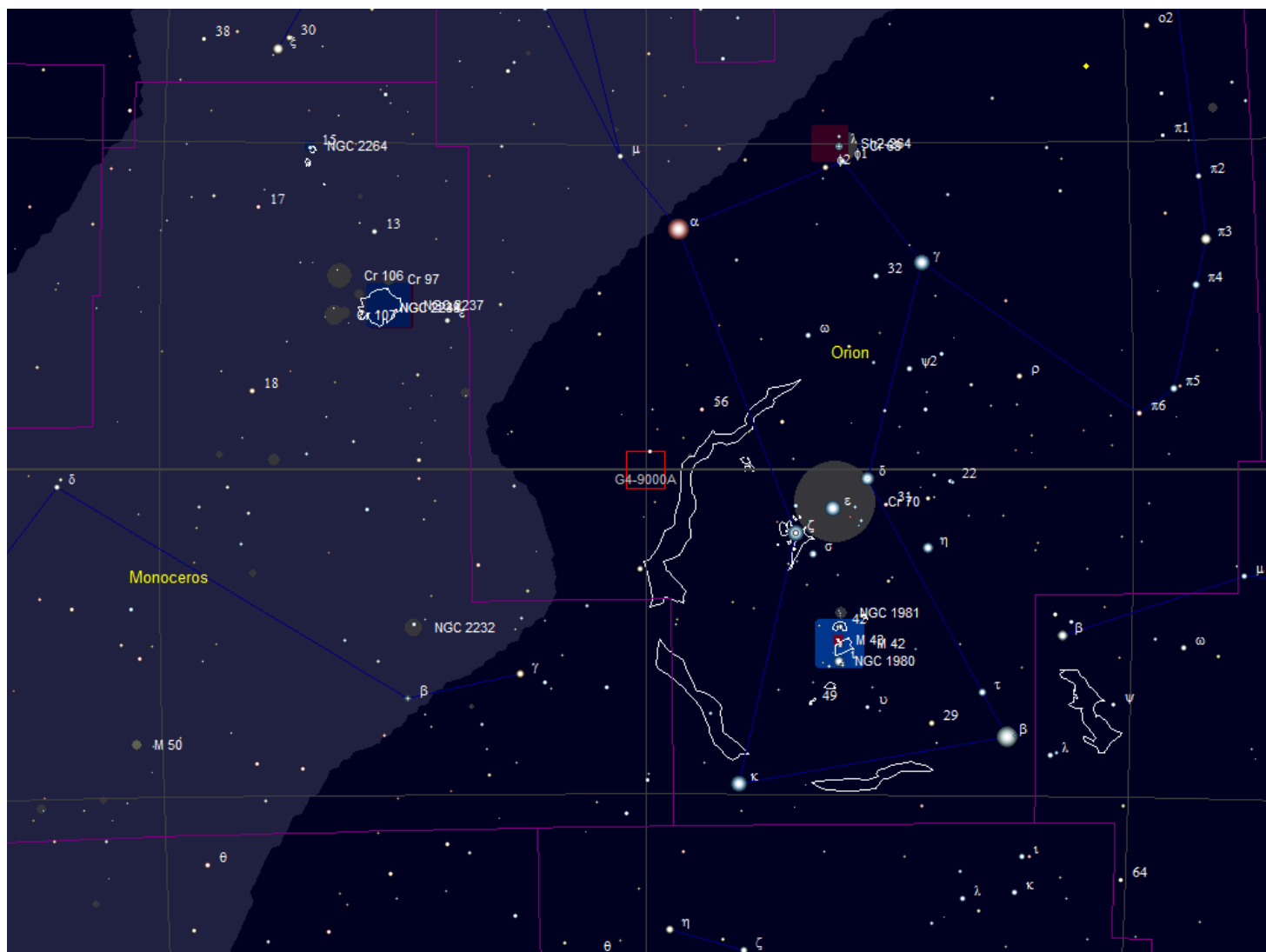
- Cílem astrometrické redukce je získat souřadnice pozorovaného objektu
- Astrometrie je vždy relativní, tedy vztažená vzhledem k jiným objektům (hvězdám) v poli, jejichž poloha je dobře známa
 - Hvězdy jsou obsaženy v katalogu včetně svých souřadnic α , δ (rektascenze a deklinace)
- Kalibrace souřadného systému snímku pomocí známých hvězd dovolí určit souřadnice α , δ libovolného dalšího objektu v obraze

Vztah mezi souřadnicemi snímku (x, y) a (α, δ)

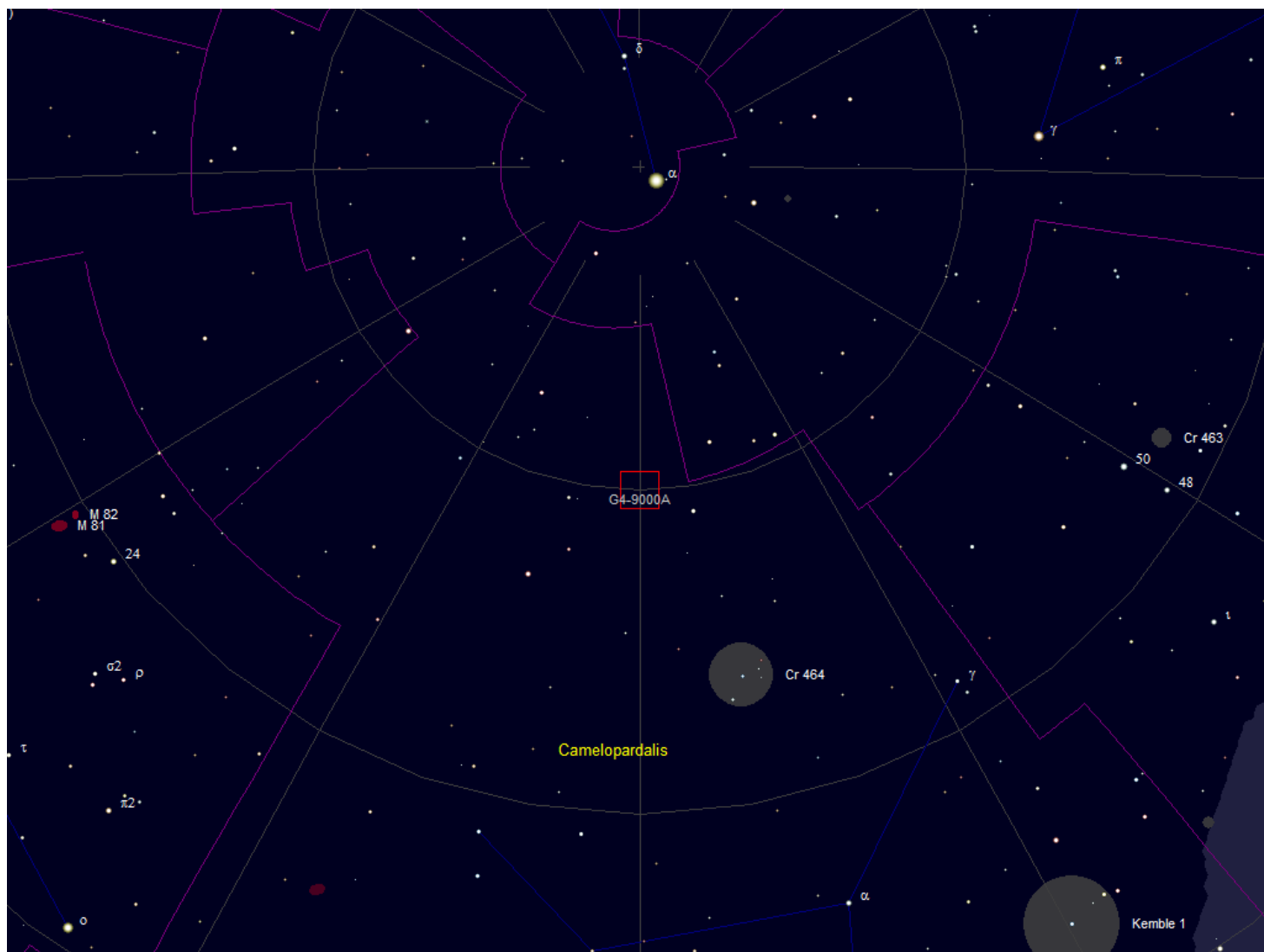
- Nebeská sféra je promítnuta na rovinu čipu, je nutno zvolit transformaci souřadnic
- Pro malá zorná pole dobře vyhovuje tangenciální projekce
 - Plocha obrazu je v jednom bodě ve středu snímku „přiložena“ na kulový povrch nebeské sféry



Blízko rovníku je zkreslení malé



Směrem k pólům zkreslení roste

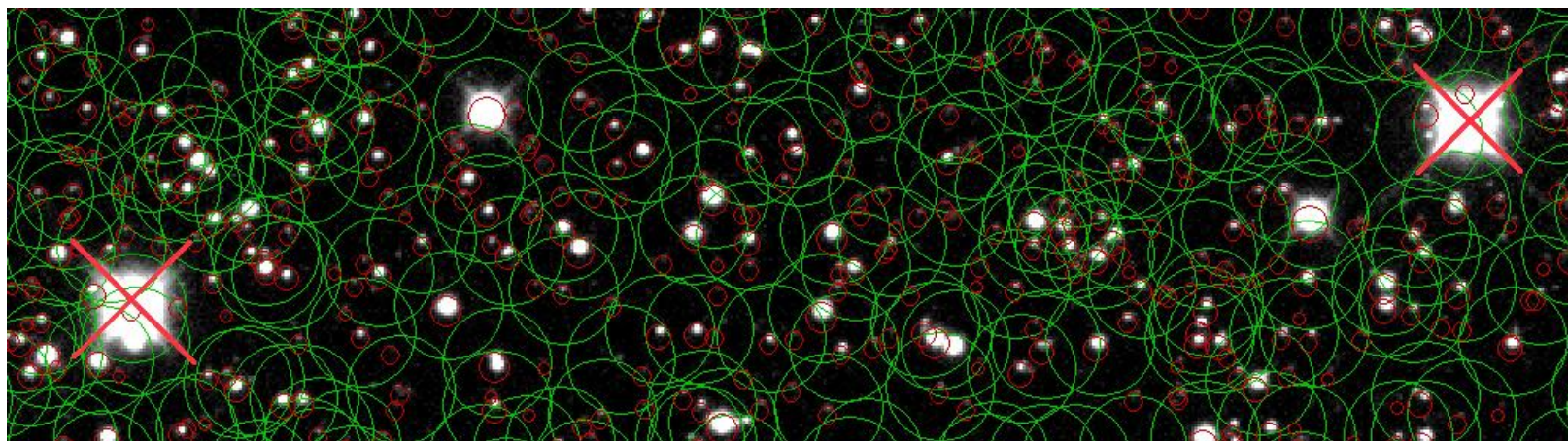


Astrometrie ve fotometrii

- Astrometrická redukce není pro fotometrii nutná
 - Uživatel pak ale musí ručně označit proměnnou, srovnávací a případně kontrolní hvězdu aby získal světelnou křivku
 - Pro jedinou křivku v pozorovací řadě to není problém
- Astrometrická redukce přináší možnost automatického zpracování, bez nutnosti zásahů uživatele
 - Také eliminuje případné chyby a přehlédnutí
- U řady hvězd ve velkých polích dokáže automatické označování ušetřit velké množství času

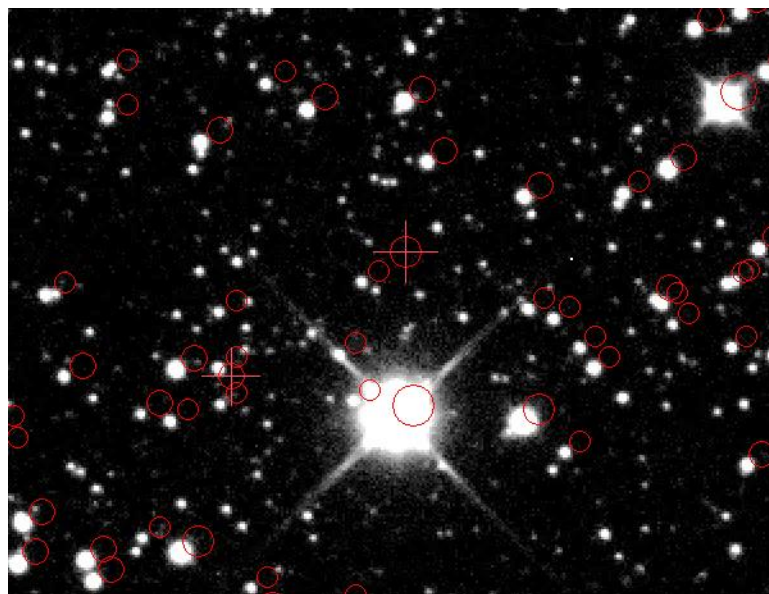
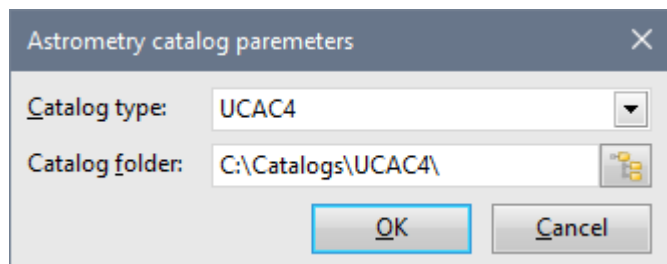
Astrometrický katalog

- Astrometrická redukce potřebuje referenční katalog, se kterým páruje hvězdy na snímku
- SIPS (momentálně) podporuje katalogy USNO-A2.0 a UCAC4
 - USNO-A2.0 není katalog vhodný pro astrometrii, protože v něm chybí řada jasných hvězd



Astrometrický katalog

- UCAC4 je v současnosti nejsnáze dostupný astrometrický katalog
 - <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/I/322A/UCAC4/>
- Chyby v UCAC4 představují nadbytečné hvězdy, což pro astronomickou redukci nevadí tak, jako když jasné hvězdy chybí



Astrometrie v programu SIPS

- Pro úspěšné sesazení s hvězdami potřebuje SIPS znát měřítko:
 - Buď přímo úhlovou velikost pixelu
 - Nebo fyzickou velikost pixelu a ohniskovou vzdálenost
- Dále je zapotřebí znát alespoň přibližné souřadnice středu snímku

Plate astrometry information

Coordinates of the image center:

R.A.: 19 h 30 m 13.35 s
Dec.: 50 ° 38 ' 18 ''

CCD camera parameters:

X pixel scale: 1.557 arcsec
Y pixel scale: 1.557 arcsec
X pixel size: 9 um
Y pixel size: 9 um
X binning: 1
Y binning: 1
Connected camera X pixel size: 9.00 um
Connected camera Y pixel size: 9.00 um

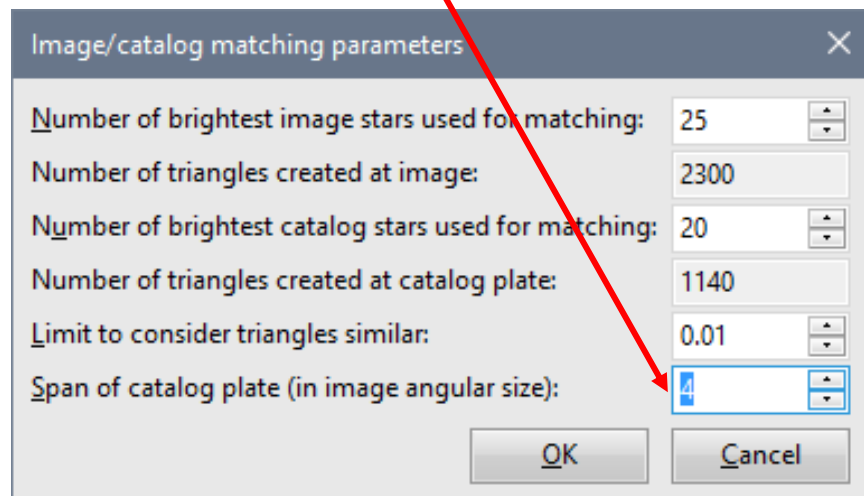
Telescope parameters:

Focal length: 1192 mm

Update Image Cancel

Astrometrie v programu SIPS

- Pokud jsou souřadnice středu snímku nepřesné (chyba $> \sim \frac{1}{4}$ velikosti zorného pole), je nutné zvolit větší oblast katalogu
 - Velikost prohledávané oblasti katalogu je zadávána v násobcích zorného pole





C:\...CzeV343_0000.fits * x

X: 2316
Y: 2894
V: 725

Astrometry

C:\FITS\test PM 2\CzeV343_0000.fits

	*	X [px]	Y [px]	ADU	R.A.	Dec.	Cat. Name	Cat. R.A.	Cat. Dec.	Mag.
1	*	713.63	2685.94	3236038	05h 50m 44.66s	+31° 12' 10.4"	607-024436	05h 50m 44.66s	+31° 12' 10.7"	8.84
2	*	2719.41	3969.28	3073583	05h 47m 14.28s	+31° 39' 35.1"	609-023318	05h 47m 14.27s	+31° 39' 35.7"	8.64
3	*	151.62	1446.08	2942776	05h 51m 44.56s	+30° 44' 59.1"	604-025783	05h 51m 44.60s	+30° 44' 59.8"	8.72
4	*	873.05	2314.81	2813443	05h 50m 28.86s	+31° 03' 54.9"	606-024833	05h 50m 28.86s	+31° 03' 54.7"	8.77
5	*	1763.66	1370.19	2538454	05h 48m 59.05s	+30° 42' 40.0"	604-024948	05h 48m 59.05s	+30° 42' 40.1"	8.84
6	*	533.74	3813.50	2474455	05h 51m 01.36s	+31° 37' 08.8"	609-024473	05h 51m 01.37s	+31° 37' 09.0"	8.76
7	*	3894.85	3036.74	2101329	05h 45m 15.16s	+31° 18' 17.1"	607-022924	05h 45m 15.21s	+31° 18' 17.1"	9.03
8	*	284.31	887.18	2066365	05h 51m 31.78s	+30° 32' 35.7"	603-026740	05h 51m 31.79s	+30° 32' 35.6"	9.24
9	*	2054.00	2729.82	2035402	05h 48m 26.15s	+31° 12' 33.6"	607-023769	05h 48m 26.14s	+31° 12' 33.7"	9.04
10	*	1174.81	948.83	2007883	05h 50m 00.34s	+30° 33' 37.2"	603-026314	05h 50m 00.34s	+30° 33' 37.0"	9.25
11	*	3649.04	1595.42	2001521	05h 45m 44.74s	+30° 46' 36.8"	604-024249	05h 45m 44.79s	+30° 46' 36.8"	9.18
12	*	2826.55	1245.46	1990057	05h 47m 10.17s	+30° 39' 22.2"	604-024522	05h 47m 10.20s	+30° 39' 22.7"	9.16
13	*	2368.44	145.64	1985901	05h 47m 59.80s	+30° 15' 19.5"	602-024575	05h 47m 59.79s	+30° 15' 19.9"	9.24
14	*	1212.75	463.20	1956657	05h 49m 57.37s	+30° 22' 52.6"	602-025113	05h 49m 57.38s	+30° 22' 53.0"	9.25

Matched stars: 12757 Image center RA: 05h 48m 28.31s Dec: +30° 57' 30.1" Residuals RA: 0.46" Dec: 0.44"

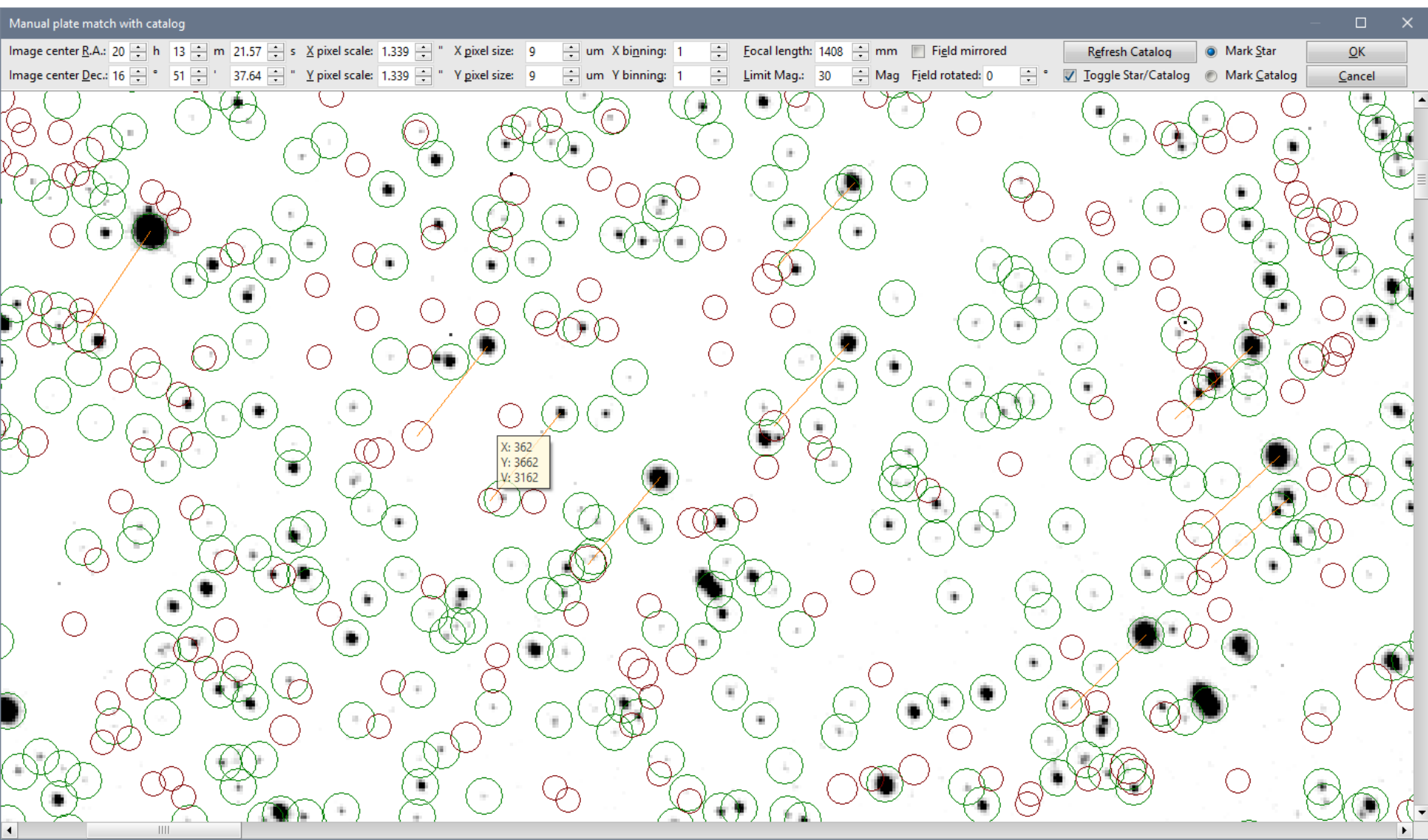
Popis deformace pole

- Kamery s velkými senzory vyžadují optické korektory, zajišťující vykreslení velkého zorného pole bez aberací
- Širokoúhlé optické soustavy ale zpravidla nedokáží přesně dodržet tangenciální projekci
 - Pokud je odchylka polohy hvězd od tangenciální projekce $< \text{FWHM}$ hvězd, není nutné se jí zabývat
 - Větší odchylka (násobek FWHM hvězd) ale může způsobit selhání astrometrických algoritmů
 - Pokud se pole během snímání fotometrické řady posouvá, může selhávat i vzájemné sesazení snímků během zpracování fotometrie

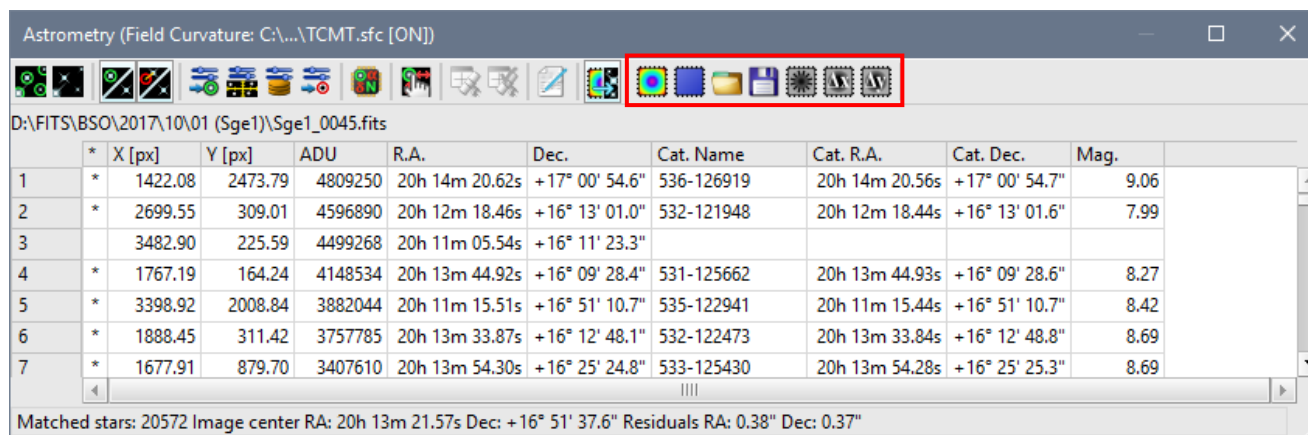
Korekce deformace pole v SIPS

- Korekce pole je v SIPS implementována dvěma plošnými (2D) polynomy 3. stupně nezávisle pro zkreslení v ose X a v ose Y
- Tvorbu těchto korekčních polynomů zajišťuje nástroj **Astrometrie**, nástroj **Fotometrie** pak korekční polynomy pouze používá
 - Zkreslení je určeno podle rozdílů polohy hvězd na snímku a v katalogu
 - U velkých zkreslení ale není automatické sesazení možné (Hlava 22)
 - Astrometrie proto nabízí možnost manuálního sesazení 

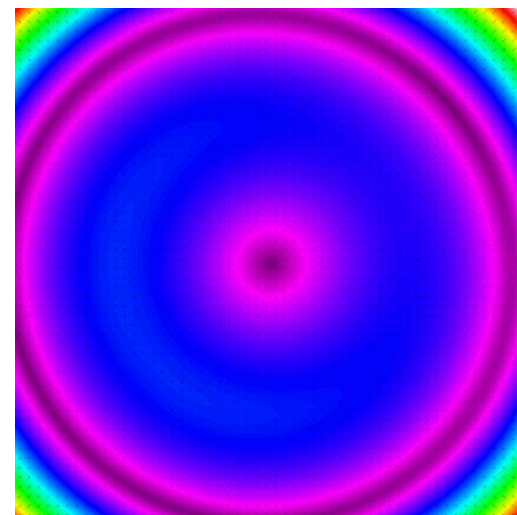
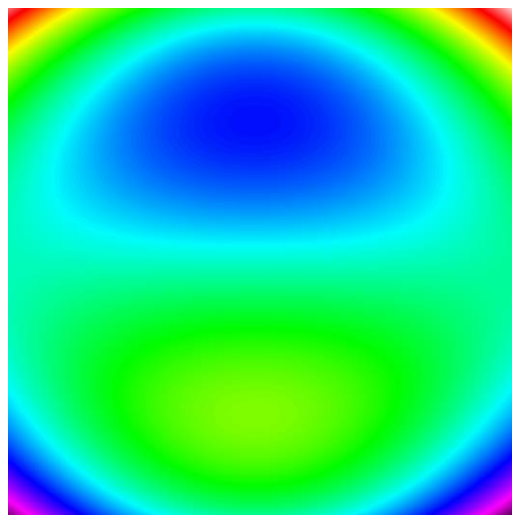
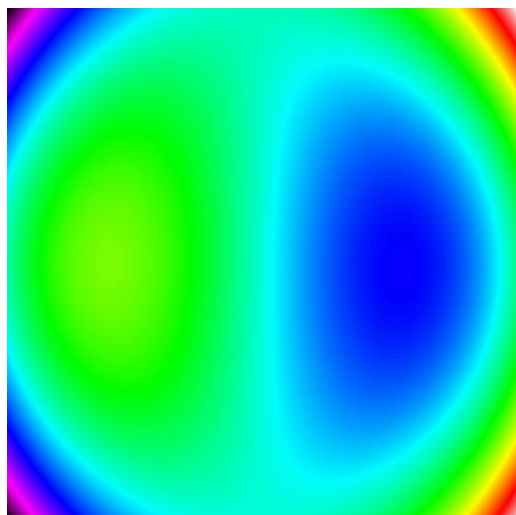
Nástroj pro manuální sesazení snímku s katalogem



Výpočet a ukládání korekčních polynomů v nástroji Astrometrie

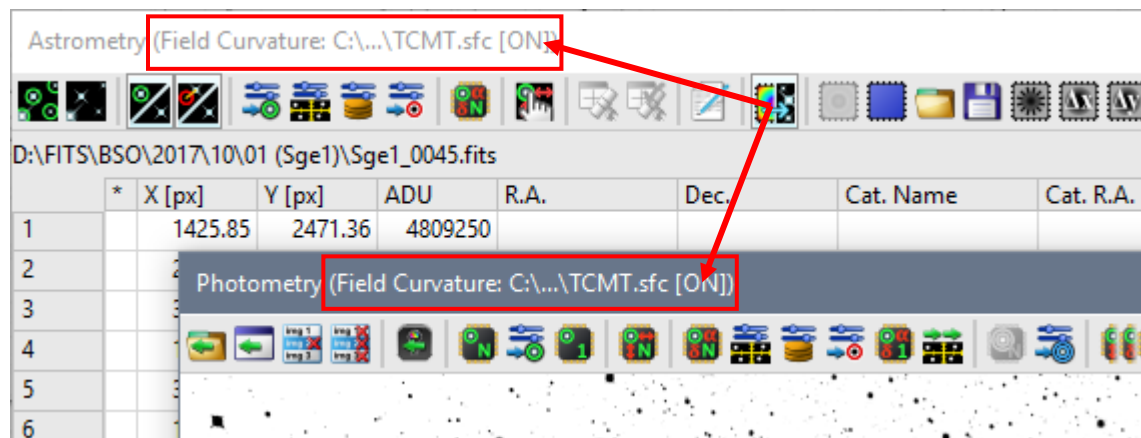


Vizualizace odchylek v osách x, y a celková odchylka



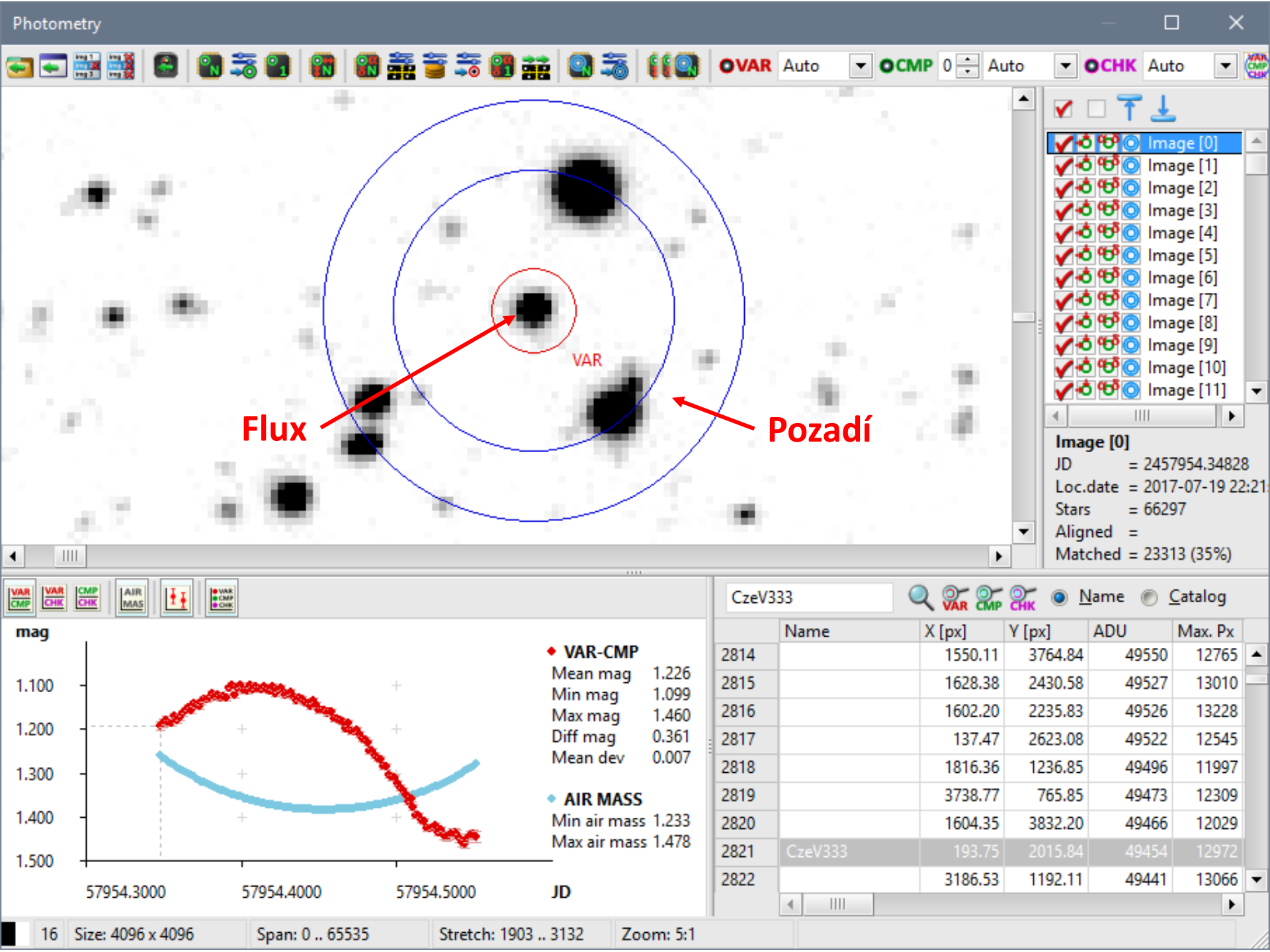
Indikace použití korekce deformace pole

- Použití popisu deformace pole je ovládáno výhradně z nástroje **Astrometrie**
 - Zvolená korekce deformace pole je ale používána i nástrojem **Fotometrie**
- Nástroje Astrometrie i Fotometrie indikují aktivní popis deformace pole v titulku



Fotometrie (aperturní)

- Světelný tok hvězdy (anglicky **flux** [flʌks]) je spočítán jako součet hodnot všech pixelů v kružnici o zadaném poloměru (**apertuře**)
- Příspěvek každého pixelu je počítán jako rozdíl mezi hodnotou pixelu a hodnotou pozadí
- Pozadí je určeno jako průměrná hodnota jasu oblohy spočítaná v mezikruží obklopující měřenou hvězdu
 - Prostý průměr nestačí, v mezikruží může být řada rušivých vlivů – horké pixely, stopy částic, jiné hvězdy, ...



Role apertur

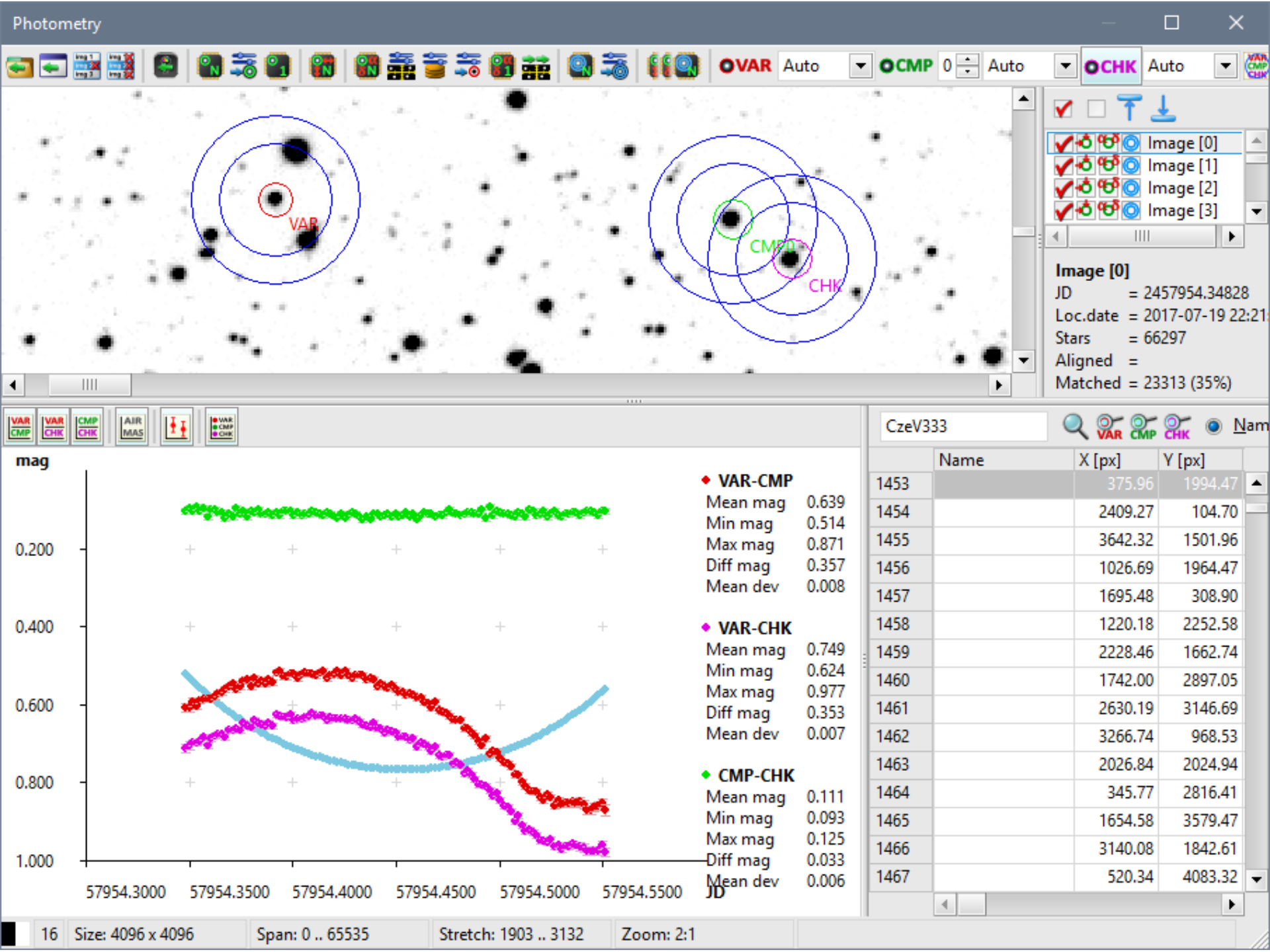
- Správné určení apertur hraje velkou roli při měření
 - Příliš malá apertura nezahrnuje veškerý jas hvězdy
 - Příliš velká apertura zahrne hodně pixelů nepatřících hvězdě a zhoršuje tak poměr signál/šum
- Někdy se podobným problémům nelze vyhnout
 - Hvězda během měření mění FWHM, např. soustava se rozostřuje, mění se atmosférické podmínky (zhoršuje se seeing) apod.

Apertura a jas proměnné a srovnávací hvězdy

- Pro nejlepší dosažitelný poměr signál/šum je žádoucí, aby měřená i srovnávací hvězda vyplnily dynamický rozsah kamery
 - Kamera zpravidla digitalizuje pixely v rozsahu 0..65535 ADU
 - Pokud byť jediný pixel dosáhne 65535, je saturován a přesnost měření je omezena (nelze totiž zjistit kolik ADU nad 65535 chybí)
 - Velmi nízké hodnoty (stovky ADU) na druhé straně hodně snižují odstup signálu od šumu pozadí
- Proměnná i srovnávací hvězda by měly optimálně vyplňovat zvolenou aperturu

Flux (světelný tok)

- Suma pixelů v apertuře hvězdy nad úrovní pozadí reprezentuje množství světla zachycené z dané hvězdy
- Flux se během noci mění se změnou výšky nad obzorem, ale i se změnami počasí atd.
- Proto se jas sledované hvězdy (typicky **proměnná hvězda, variable, VAR**) vztahuje k vybrané **srovnávací hvězdě (comparison, CMP)**
- Abychom vyloučili, že srovnávací hvězda je také proměnná, volíme ještě další **kontrolní hvězdu (check, CHK)**



Hvězdná velikost

- Hvězdná velikost vyjadřuje jasnost hvězdy
 - S velikostí hvězdy tedy nemá nic společného ☺
 - Jednotkou hvězdné velikosti je magnituda (Mag nebo ^m)
- Rostoucí hvězdná velikost znamená menší jasnost
- Hvězdná velikost je logaritmická jednotka
 - Hvězda, jejíž flux je 100× menší, je o 5 magnitud slabší
 - Hvězda slabší o 1 magnitudu je $\sqrt[5]{100} = \sim 2,512\times$ slabší
- Referenční hvězdou na obloze je Vega (α Lyr) s jasností 0 Mag
 - Naneštěstí Vega je proměnná typu δ Sct s rozsahem jasností -0,02 až 0,07 Mag

Standardní a přístrojová hvězdná velikost

- Standardní hvězdná velikost je jasnost vztažená k některému fotometrickému systému (barvě)
- Přístrojová hvězdná velikost je jasnost vztažená ke zvolené referenční (srovnávací) hvězdě
 - Odhad standardní hvězdné velikosti proměnné hvězdy můžeme získat jako standardní hvězdnou velikost srovnávací hvězdy plus přístrojovou hvězdnou velikost proměnné hvězdy
- Problematika určení standardní hvězdné velikosti v některém fotometrickém systému je poměrně komplexní a přesahuje rámec této prezentace

Přístrojová hvězdná velikost

- Hvězdnou velikost určuje **Pogsonova rovnice**:

$$\text{Mag} = -2,5 \cdot \log_{10} \frac{\text{Flux}_{VAR}}{\text{Flux}_{CMP}}$$

- Přístrojová hvězdná velikost je naprosto vyhovující pro velké množství různých typů měření
 - Určení času minima
 - Určení typu proměnnosti
 - Určení periody, hledání změn O-C
 - Fyzikální modelování proměnných hvězd
- Standardní hvězdná velikost je vhodná k dlouhodobému sledování jasu hvězdy více přístroji na více pracovištích

Jak se dostat ke světelné křivce (zpracování fotometrie v programu SIPS)



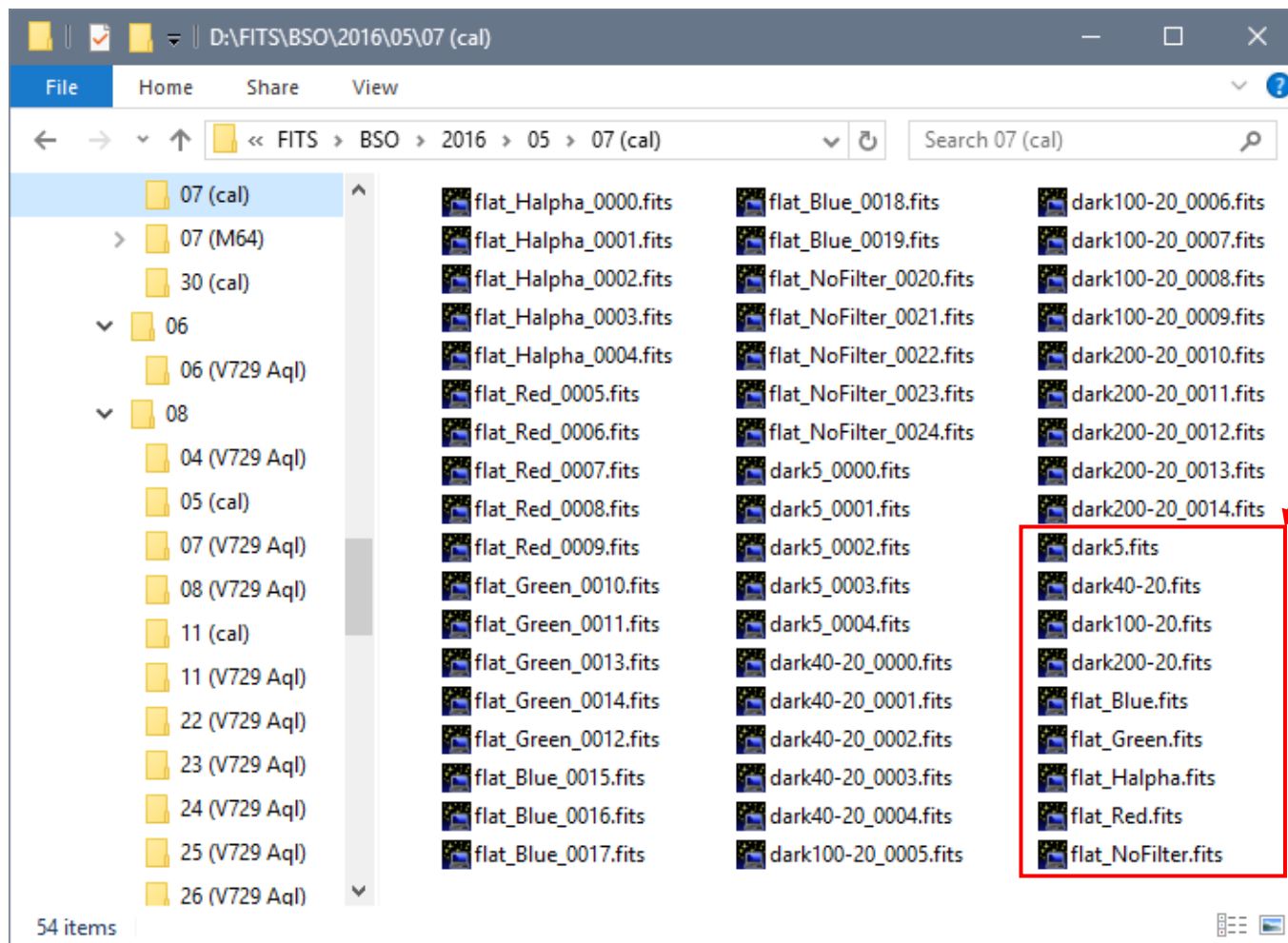
Funkce programu SIPS:

- Ovládání hardware (hlavní, pointační a kontextová kamera, montáž dalekohledu, ostření, kopule, GPS, ...)
- Zobrazení snímků (histogram, barevná paleta, zoom, ...)
- Kalibrace a transformace obrazů (rotace, překlápění, ...)
- Matematické operace se snímky a obrazové filtry
- Manipulace s FITS (definice a editace hlaviček), export
- Blikání a skládání snímků (monochromní i RGB)
- Astrometrie a **Fotometrie**

Kalibrace dat

- Z pozorovací noci máme řadu FITS snímků pole obsahující měřenou hvězdu
 - Předpokládáme, že hvězdy jsou přiměřeně zaostřeny, sledovaná hvězda nesaturuje, ale má dostatečný poměr signál/šum
- Dále máme k dispozici alespoň 5 temných snímků stejné expoziční doby pořízených při stejné teplotě a binningu jako datové snímky
- Měli bychom mít alespoň 5 flat-field snímků a k nim odpovídajících 5 temných snímků
 - Nutnost flat-field korekce závisí na zorném poli

Příklad sady kalibračních snímků

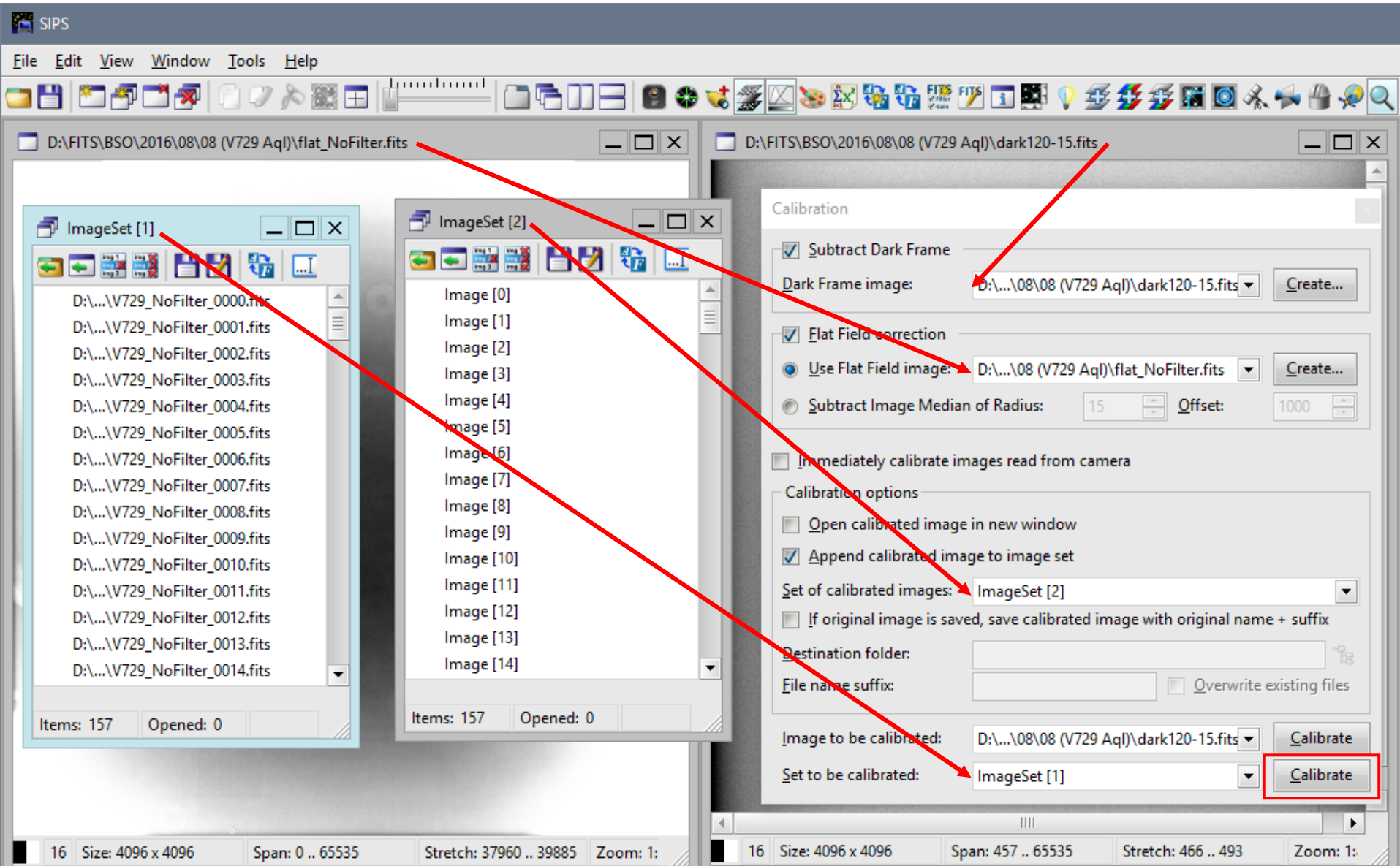


Zpracované
„master“
kalibrační
snímky

Kalibrace dat

- SIPS pracuje s konceptem **množin** (seznamů) snímků
 - Manipulace s více obrazy tedy nepracuje přímo s diskovými soubory, ale s množinami
 - Snímky v množině mohou mít různé názvy, mohou pocházet z různých adresářů atd.
 - Snímky vůbec nemusí existovat jako soubory na disku
- Řada nástrojů (Fotometrie, Blink, Image add, ...) obsahuje **implicitní množinu** snímků
- Každý snímek je v paměti jen jednou, bez ohledu na to v kolika je množinách nebo jestli je zobrazen
 - Vysoká rychlost je vykoupěna náročností na paměť

Kalibrace dat v SIPS

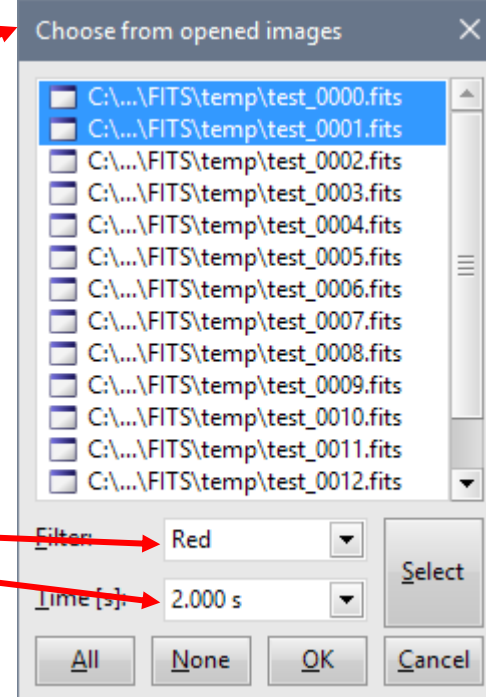
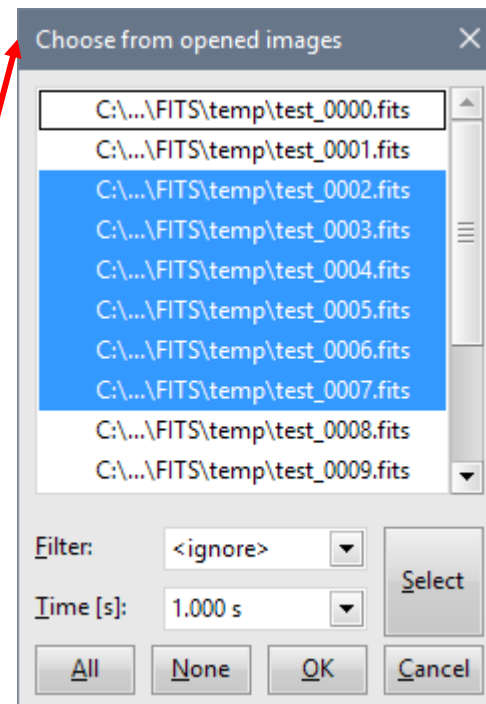


Kalibrované snímky v množině

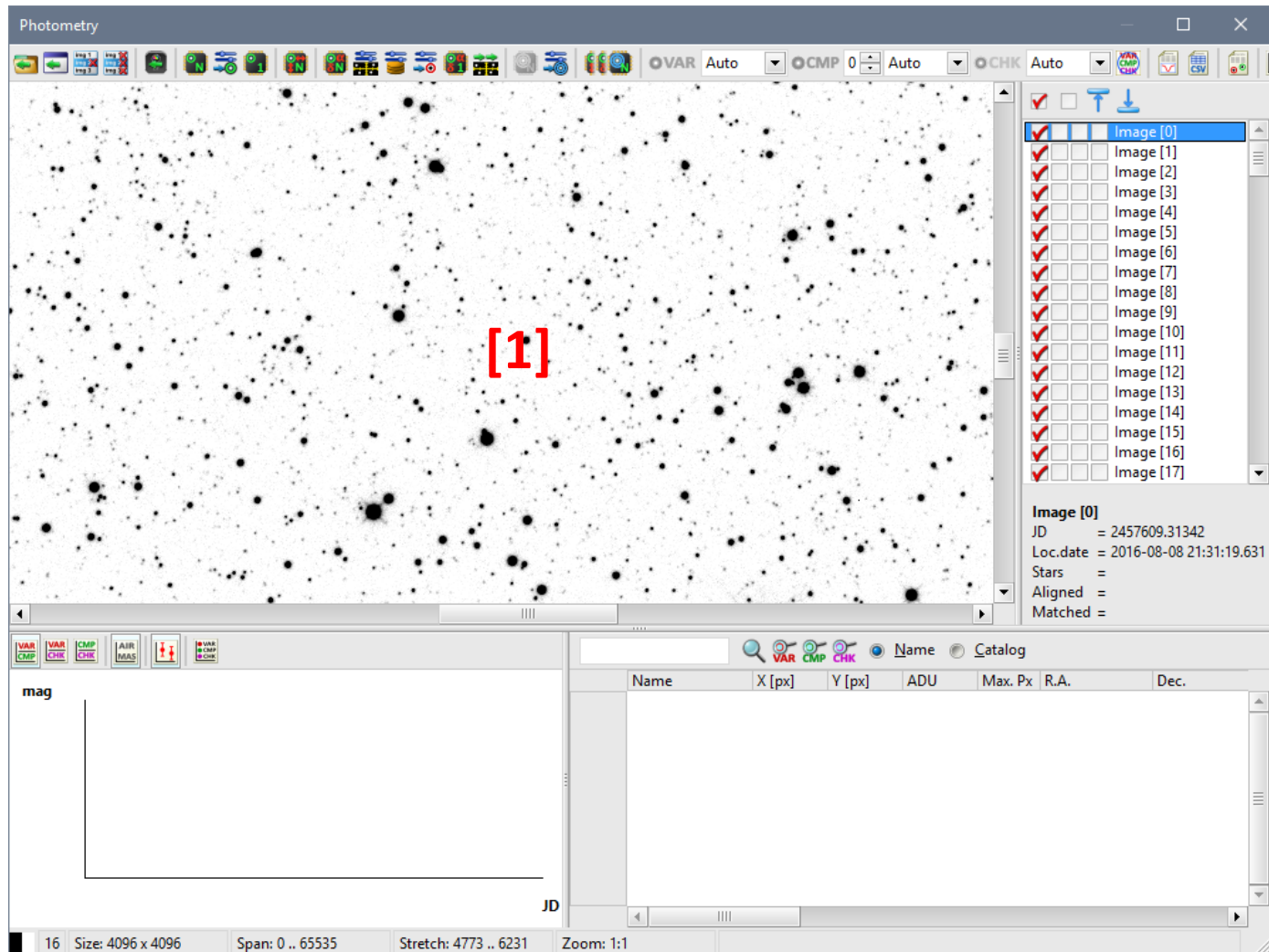
- Do implicitní množiny snímků, s
nimž pracuje nástroj fotometrie,
lze přidat snímky stejně jako do
jakékoliv jiné množiny:

- Načtení FITS souborů z disku
- Přidání již otevřených snímků,
lhostejno jestli v samostatných
oknech nebo v jiných množinách

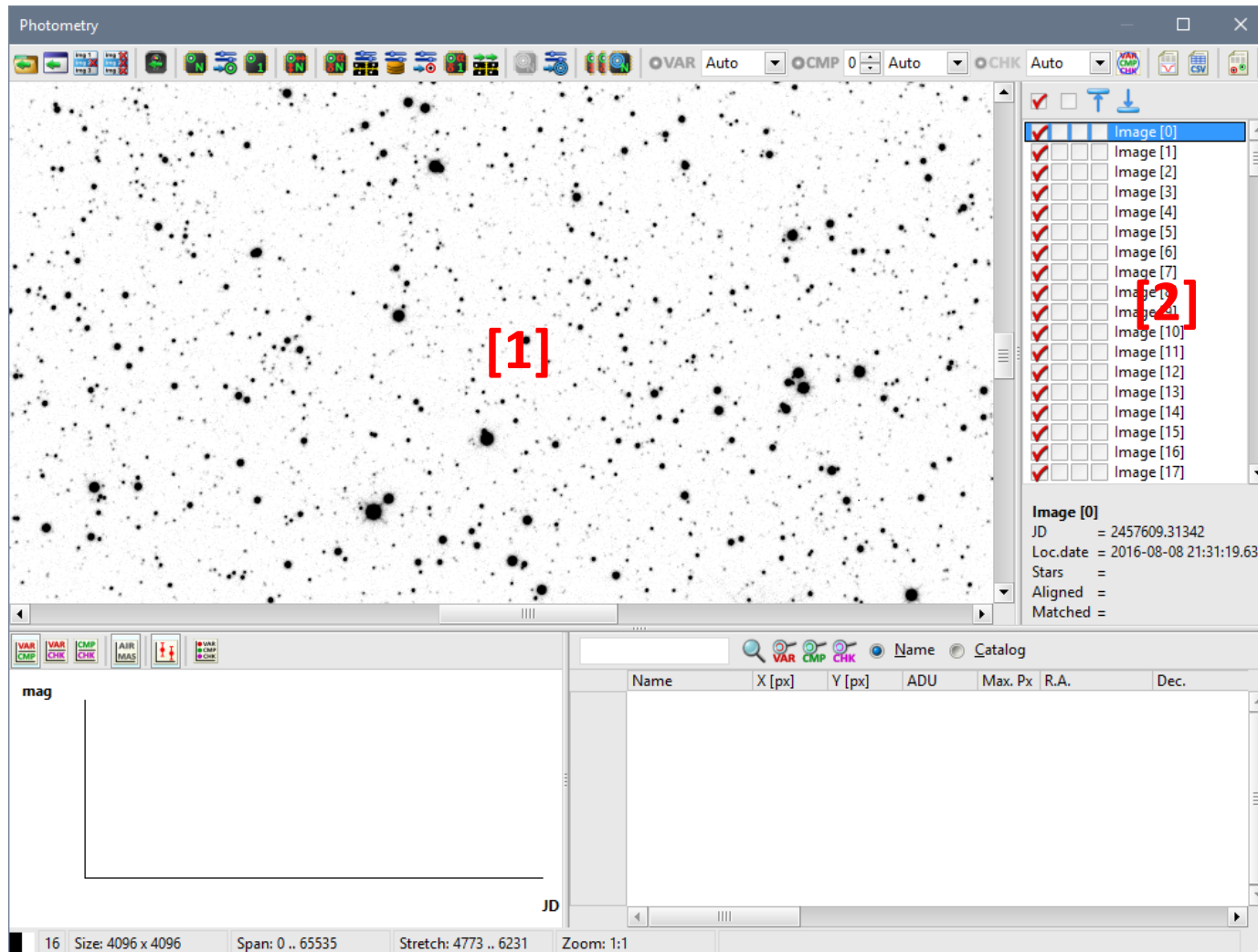
- Výběr z otevřených snímků lze
filtrovat podle délky expozice
a/nebo podle filtru



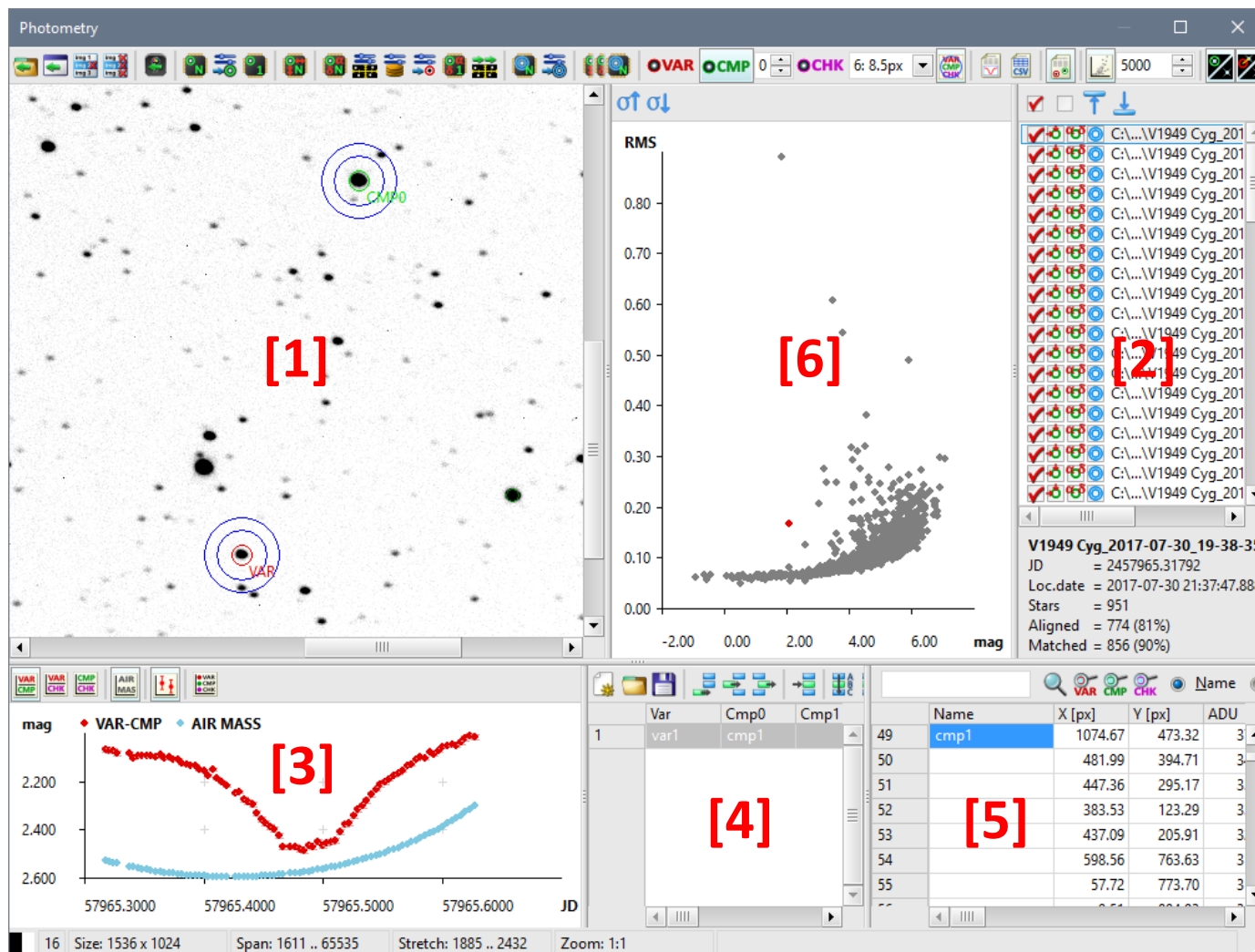
Nástroj **Fotometrie** má několik panelů. Panel s vybraným snímek z řady [1], dovoluje veškeré manipulace (zoom, drag, stretch, barevná paleta, ...).



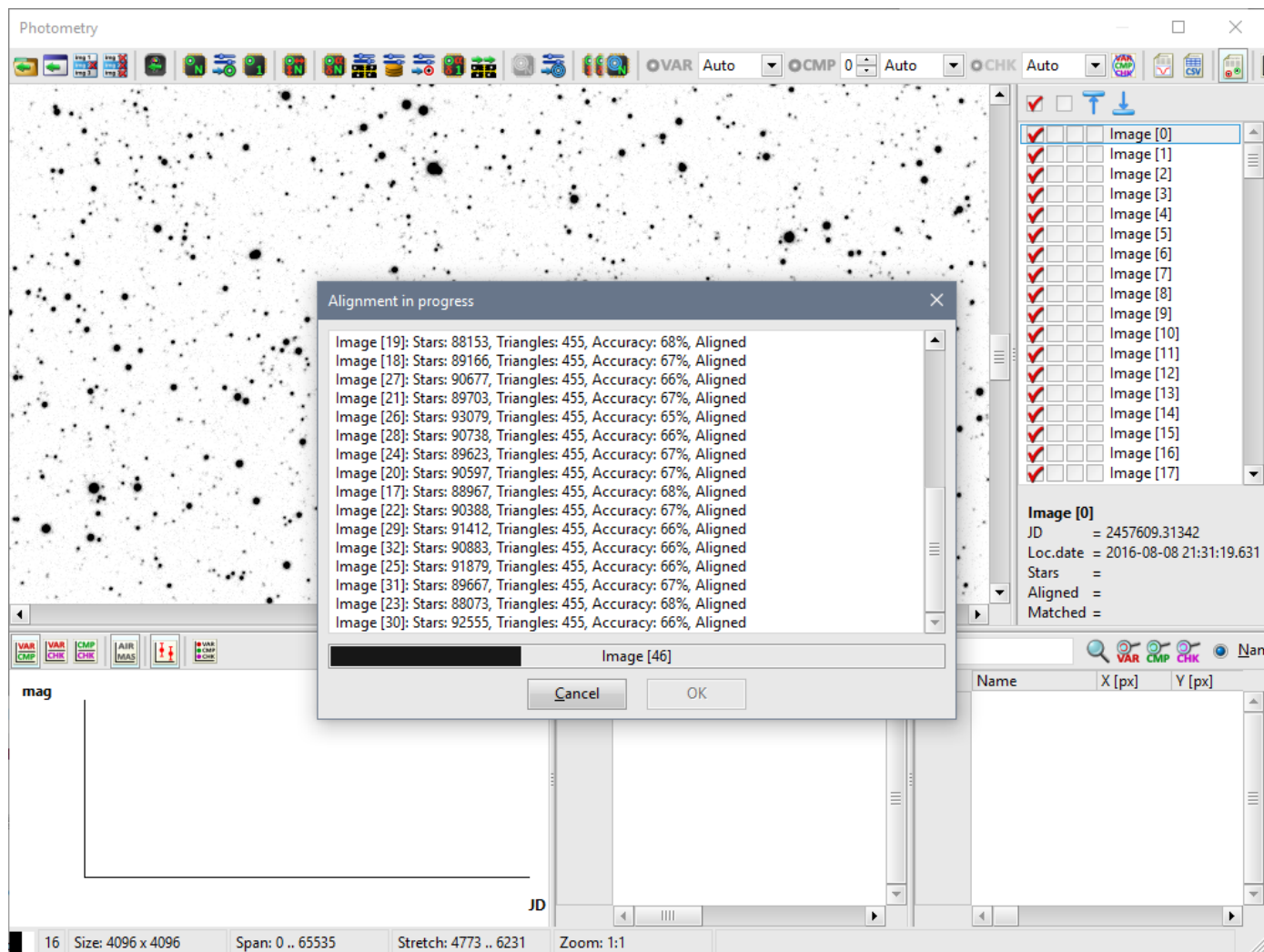
Seznam všech snímků (množina) [2] zobrazí vybraný snímek v panelu [1], indikuje stupeň zpracování, dovoluje zařazení/vyřazení snímku z křivky atd.



K panelu světelné křivky [3], (volitelnému) panelu popisu pole [4], panelu s tabulkou hvězd [5] a (volitelnému) panelu hledání [6] se dostaneme později.

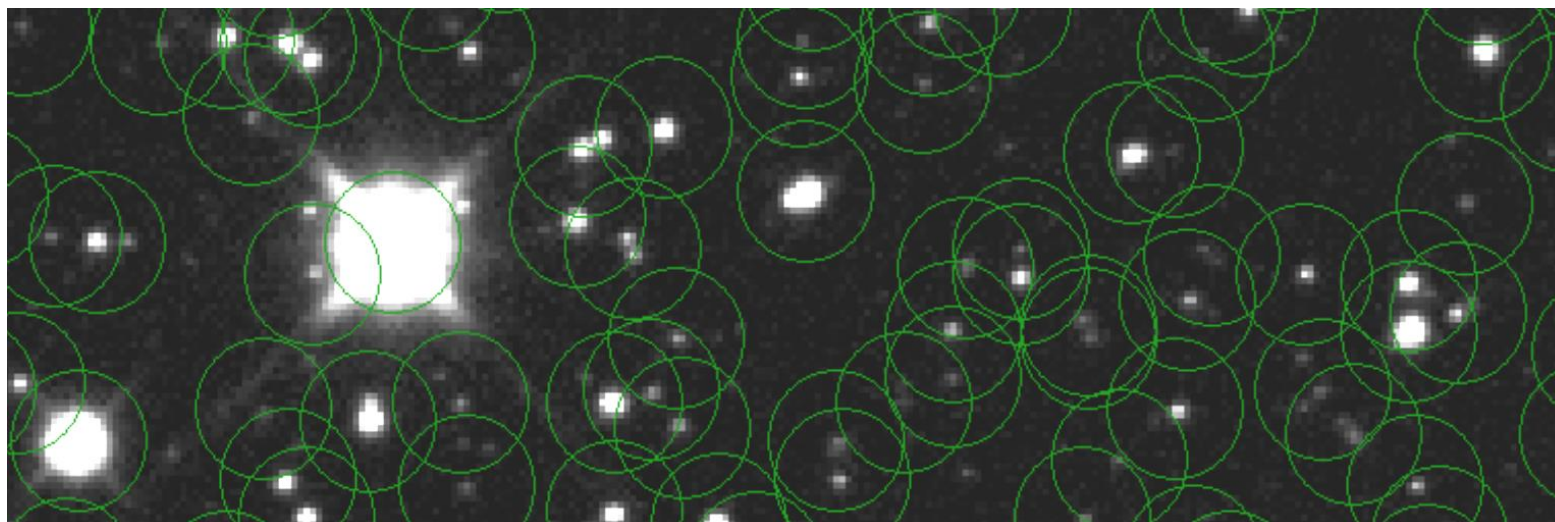


Nástroj  sesadí všechny snímky. Pokud dosud nebyly ve snímcích nalezeny hvězdy, budou nejprve vyhledány. Není nutno hledat hvězdy explicitně .



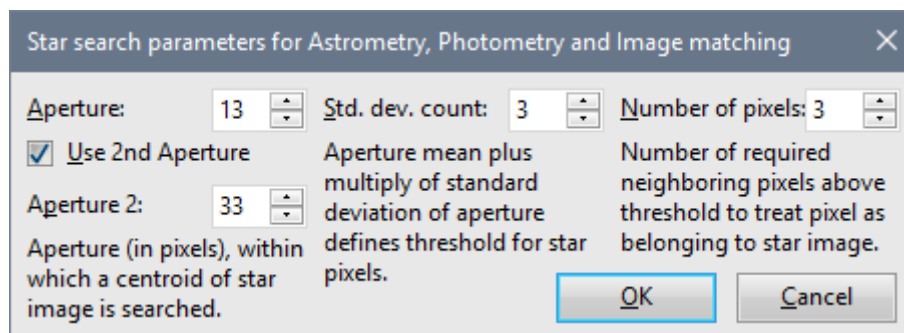
Hledání hvězd

- Pro sesazení a případnou astrometrii je velice důležité, aby SIPS našel všechny jasné hvězdy
 - Nejjasnější hvězdy jsou zpravidla saturované a pro fotometrii bezcenné, slouží ale k sesazení
 - U širokých polí jsou v obraze zastoupeny hvězdy s velkým rozpětím jasů, což se projevuje velkým rozsahem průměrů



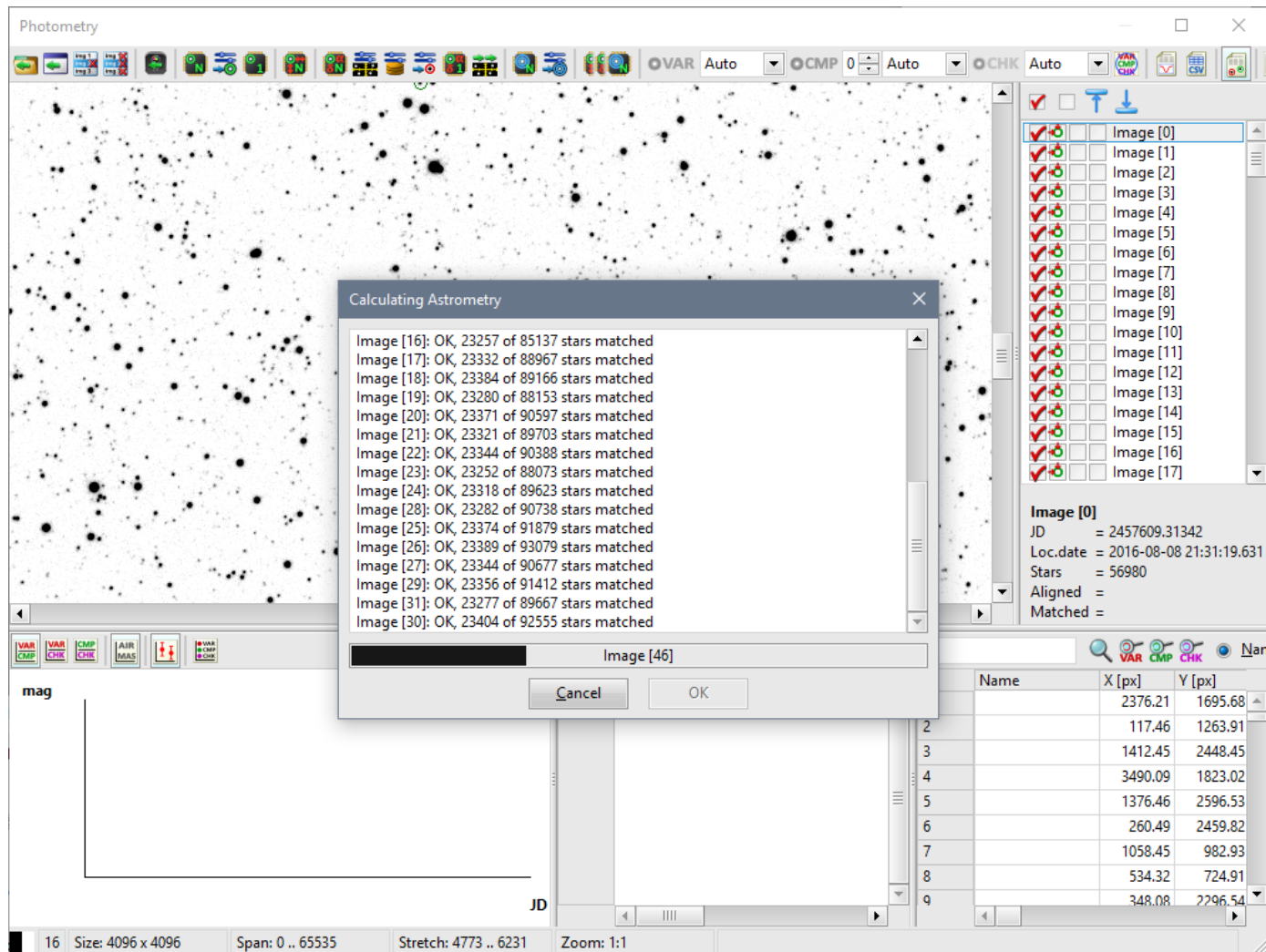
Parametry hledání hvězd

- Aby SIPS nevynechával velmi slabé hvězdy s úhlovou vzdáleností $\ll$ prohledávaná apertura a současně našel i nejjasnější hvězdy v poli, dovoluje použití dvou apertur
- Druhá (vždy větší) apertura dohledá hvězdy, které se „nevlezly“ do první (menší) apertury

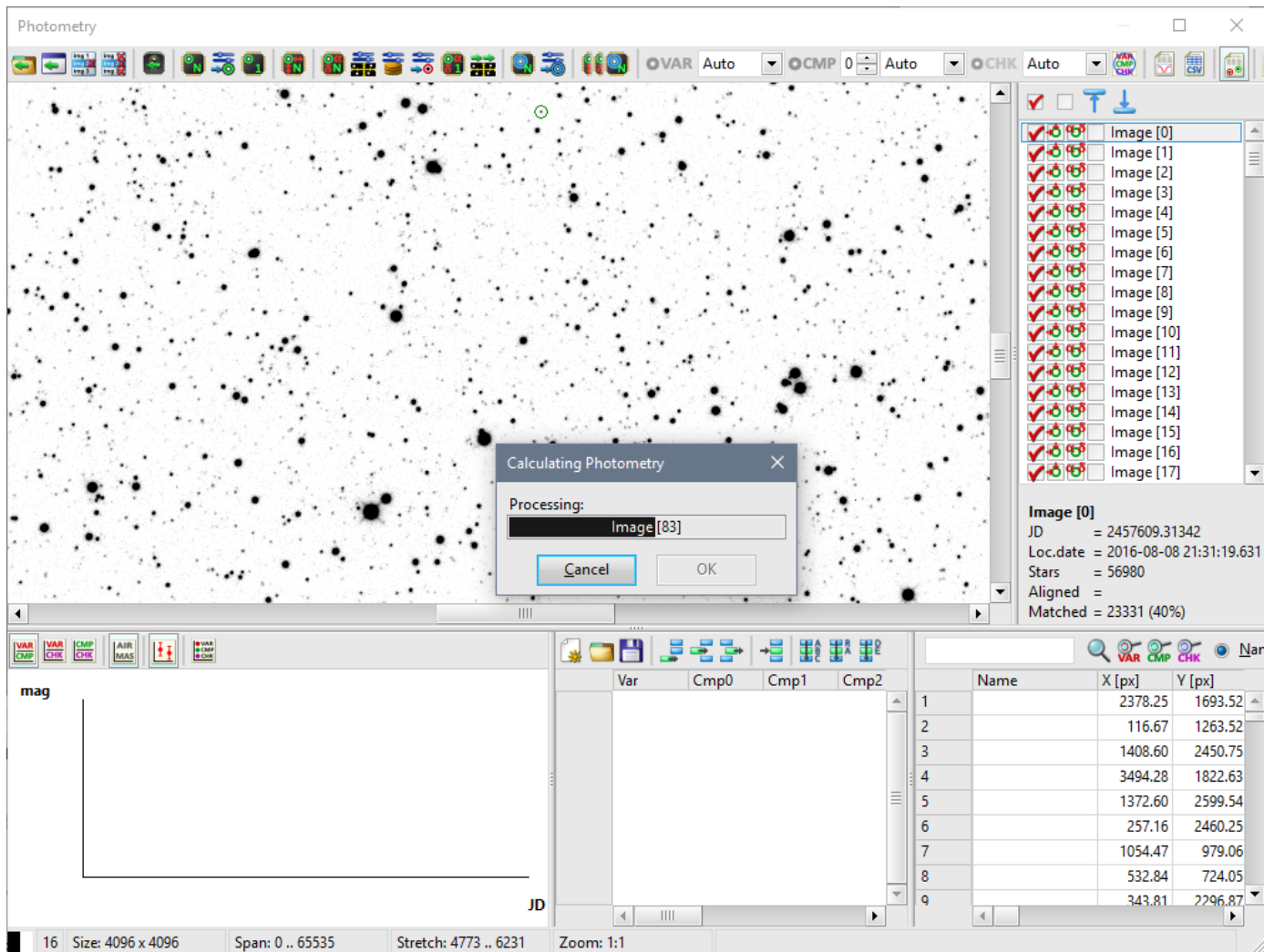


-  C:\...\test PM\TY_Tri_0000.fits Sesazení indikuje ikona v seznamu

Nástroj  spočítá astrometrii. Podmínky pro úspěšné sesazení s katalogem byly diskutovány dříve. Astrometrie není nutná pro tvorbu světelná křivky!

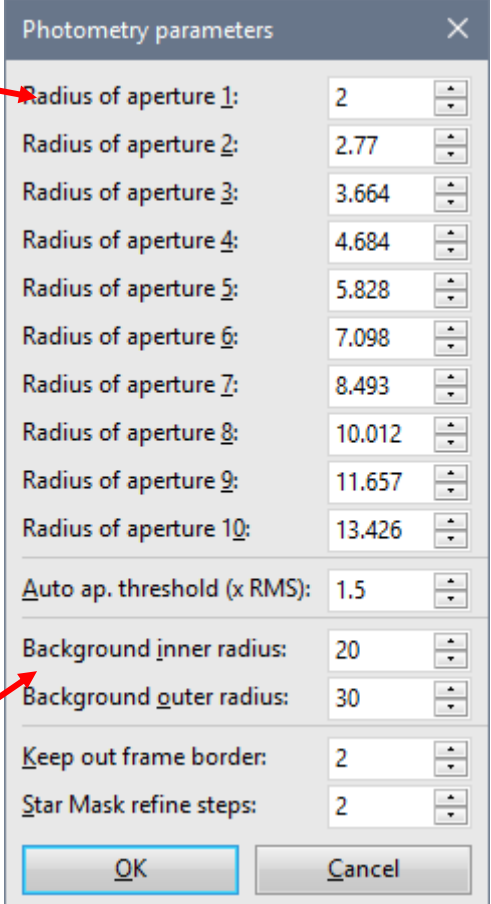


Nástroj  spočítá fotometrii pro všechny detekované hvězdy na všech snímcích.



Parametry fotometrie

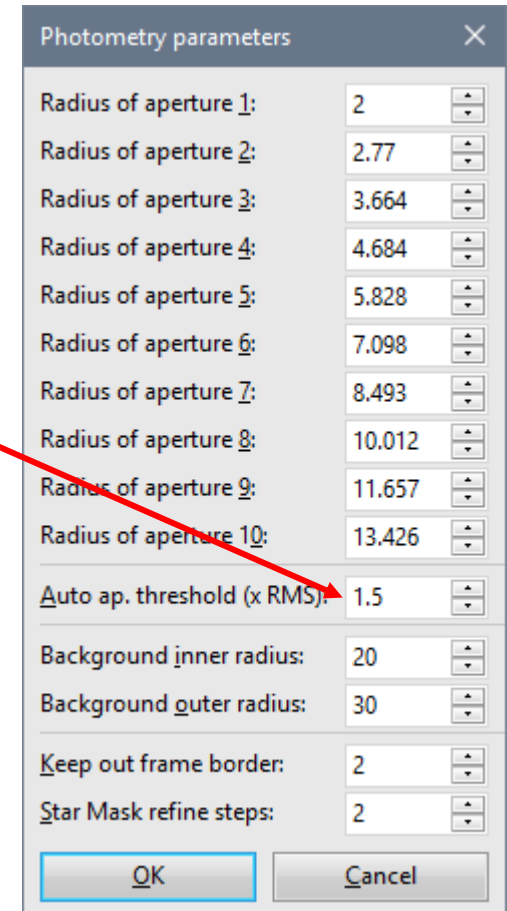
- Fotometrie je spočítána pro 10 zvolených apertur + pro **automatickou aperturu**
- Automatická apertura je spočítána pro každou hvězdu v poli pro všechny snímky
 - Poté je sjednocena pro danou hvězdu na všech snímcích
 - Zvolena je 2. největší nalezená apertura
- Mezikruží pozadí je pro všechny apertury shodné



Photometry parameters	
Radius of aperture 1:	2
Radius of aperture 2:	2.77
Radius of aperture 3:	3.664
Radius of aperture 4:	4.684
Radius of aperture 5:	5.828
Radius of aperture 6:	7.098
Radius of aperture 7:	8.493
Radius of aperture 8:	10.012
Radius of aperture 9:	11.657
Radius of aperture 10:	13.426
Auto ap. threshold (x RMS):	1.5
Background inner radius:	20
Background outer radius:	30
Keep out frame border:	2
Star Mask refine steps:	2
OK Cancel	

Jak se počítá automatická apertura

- Směrem od těžiště hvězdy se ve 4 směrech hledá pixel, jehož hodnota je o zadaný násobek směrodatné odchylky nad úrovní pozadí
 - Menší násobek vede na větší apertury a naopak
- Největší nalezený poloměr je považován za poloměr automatické apertury
- Automatická apertura je pak sjednocena na všech snímcích

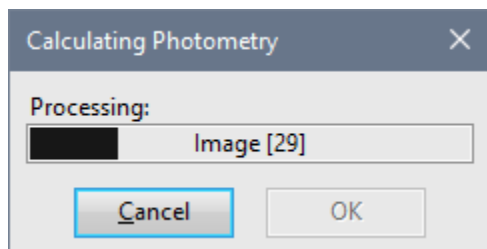
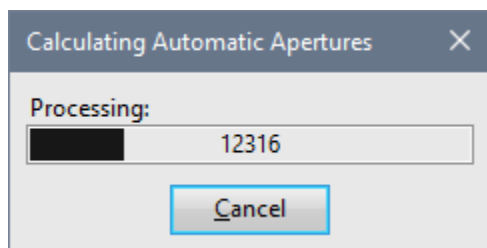
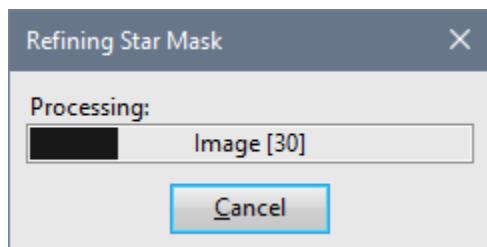


Photometry parameters

Radius of aperture 1:	2
Radius of aperture 2:	2.77
Radius of aperture 3:	3.664
Radius of aperture 4:	4.684
Radius of aperture 5:	5.828
Radius of aperture 6:	7.098
Radius of aperture 7:	8.493
Radius of aperture 8:	10.012
Radius of aperture 9:	11.657
Radius of aperture 10:	13.426
Auto ap. threshold (x RMS):	1.5
Background inner radius:	20
Background outer radius:	30
Keep out frame border:	2
Star Mask refine steps:	2

OK Cancel

Fáze výpočtu fotometrie



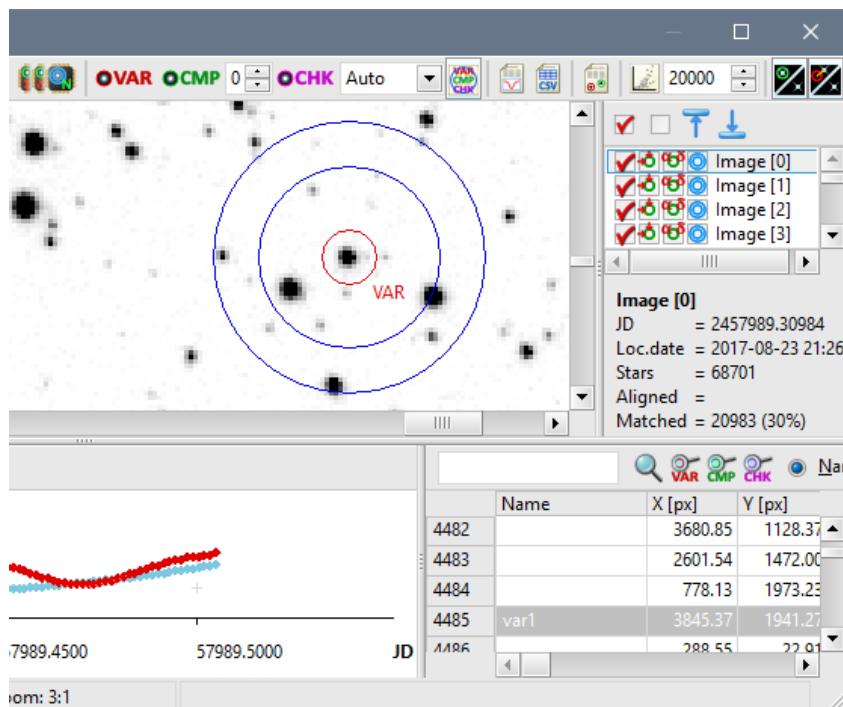
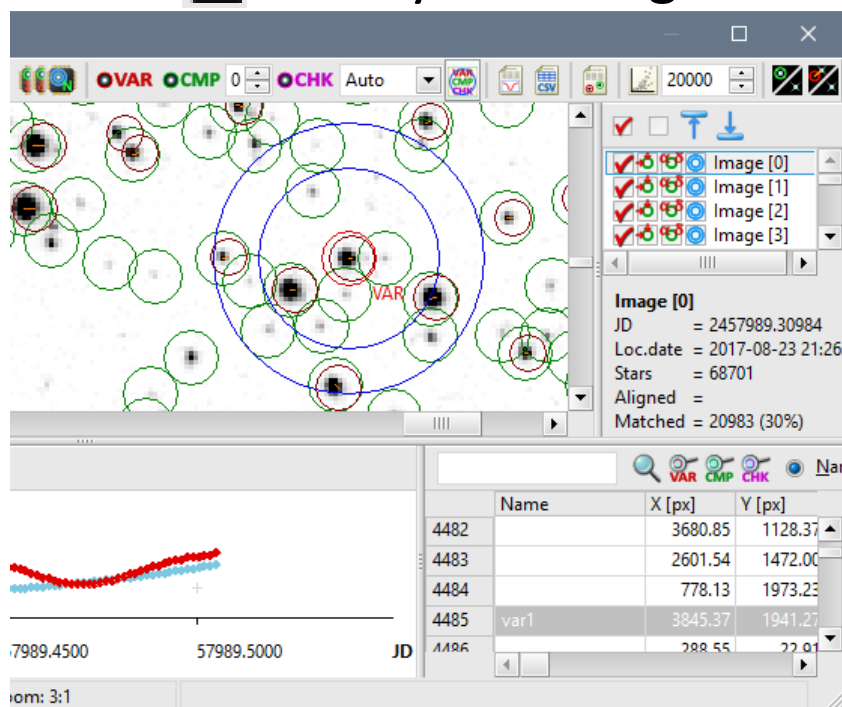
1. Vyladění masky hvězd
 - Iterační proces, počet opakování je definován v parametrech fotometrie (2 opakování vyhovují)
 - Určuje se i automatická apertura
2. Sjednocení automatických apertur přes všechny snímky
3. Samotný výpočet fotometrie – hodnot pozadí s vyloučením hvězd a artefaktů a fluxů všech hvězd pro všechny apertury

Několik poznámek a tipů

- Při ladění parametrů pro hledání hvězd lze pokusně vyhledávat hvězdy jen na 1. snímku nástrojem 
- Totéž platí pro astrometrii (nástroj )
- Pokud parametry astrometrie (souřadnice, velikost pixelu, ...) nastavíme jen pro 1. snímek, můžeme vynutit jejich použití na všech dalších snímcích 
- Explicitní vyhledání hvězd  vymaže vše (sesazení, astrometrii, fotometrii), ostatní nástroje se ptají zda spočítat vše nebo jen dopočítat co chybí
- Nástroj **Photometry Batch**  udělá vše na jeden klik

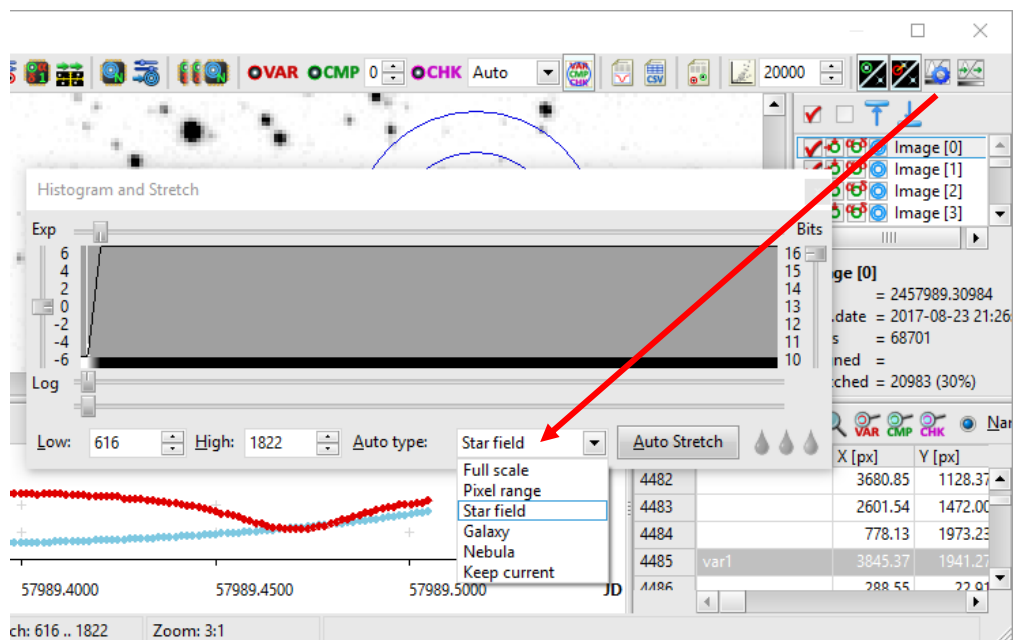
Zobrazování nalezených a katalogových hvězd ve snímku

- Fotometrie (i astrometrie) dovoluje zvolit, jestli ve snímku budou vyznačeny:
 -  Nalezené hvězdy
 -  Hvězdy z katalogu včetně relací s hvězdami na snímku



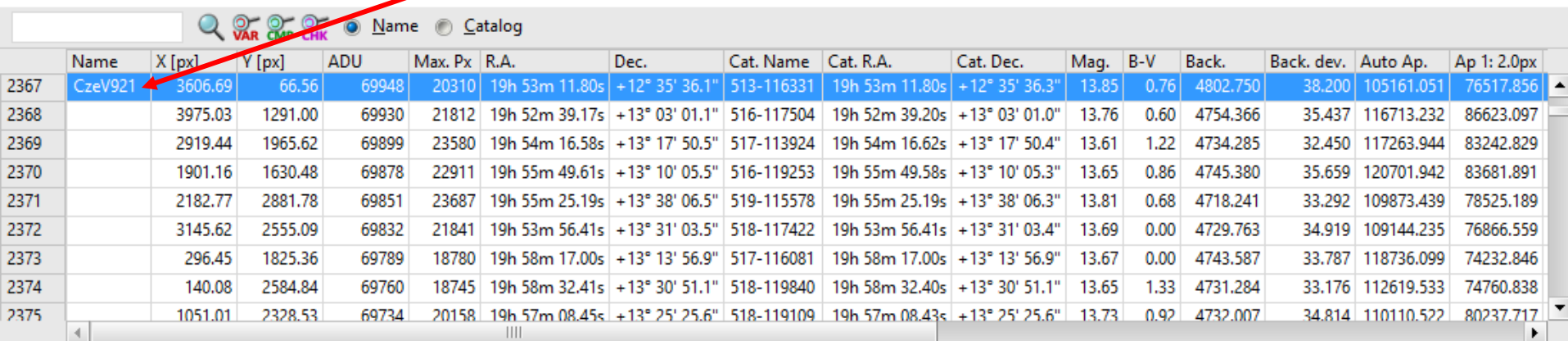
Rozpětí jasů (stretch) snímků

- Snímky jsou zobrazovány podle hodnoty „Stretch Auto type“ v době jejich vzniku (otevření)
-  přepočítá rozpětí podle „Auto type“ při výběru
-  okopíruje rozpětí z předešlého vybraného snímku



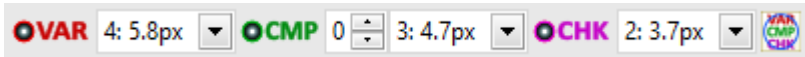
Tabulka hvězd

- Tabulka s parametry je během výpočtů doplňována
 - **X, Y, ADU, Max. Px.** po vyhledání hvězd
 - **R.A., Dec.** a pokud je hvězda sesazena s katalogem **Cat. Name, Cat. R.A., Cat. Dec., Mag., B-V, J-K** po astrometrii
 - **Back., Back. dev., Auto Ap., Ap 1 až Ap. 10** po fotometrii
- Tabulka dovoluje každou hvězdu pojmenovat
 - Buňky ve sloupci **Name** lze editovat

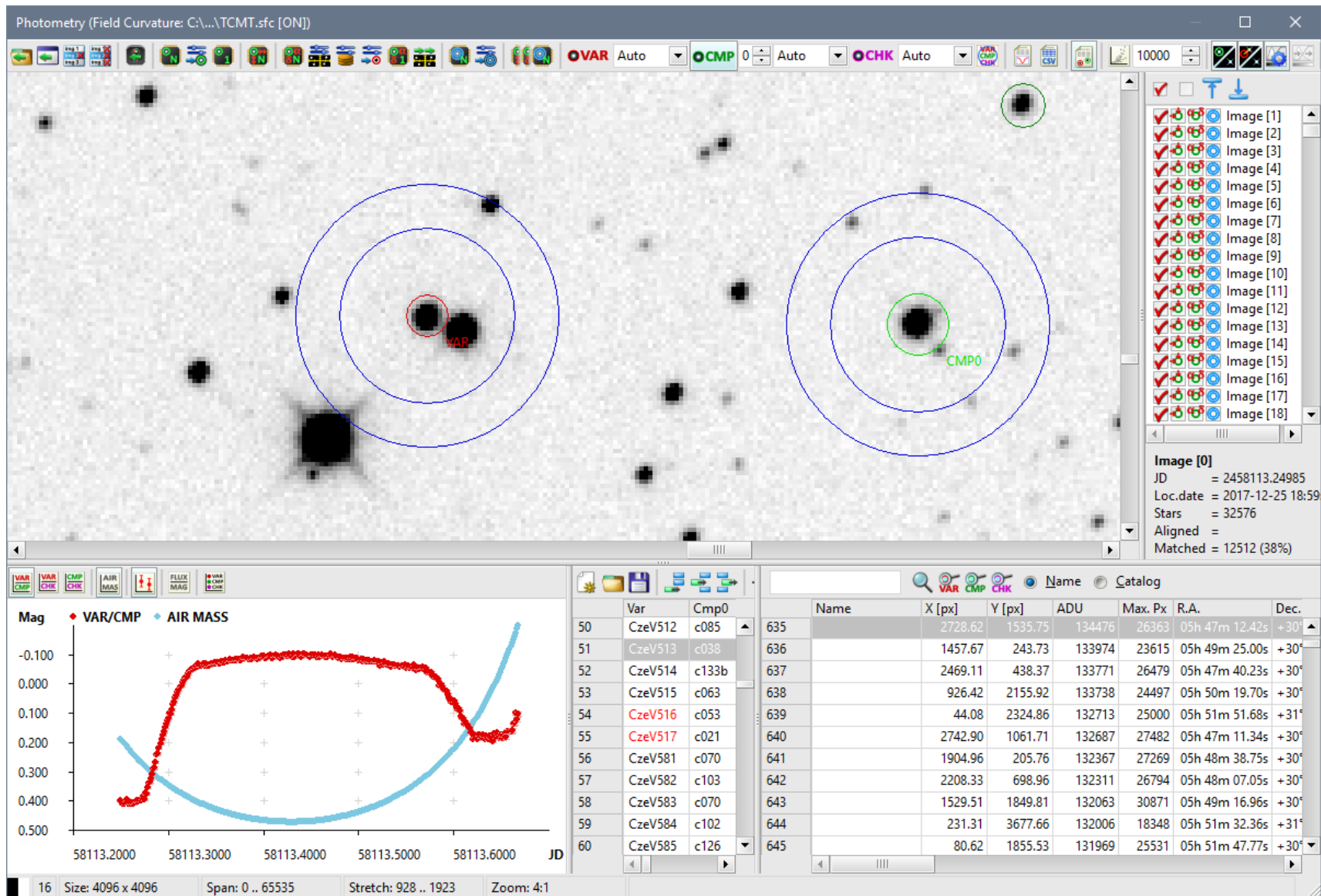


	Name	X [px]	Y [px]	ADU	Max. Px	R.A.	Dec.	Cat. Name	Cat. R.A.	Cat. Dec.	Mag.	B-V	Back.	Back. dev.	Auto Ap.	Ap 1: 2.0px
2367	CzeV921	3606.69	66.56	69948	20310	19h 53m 11.80s	+12° 35' 36.1"	513-116331	19h 53m 11.80s	+12° 35' 36.3"	13.85	0.76	4802.750	38.200	105161.051	76517.856
2368		3975.03	1291.00	69930	21812	19h 52m 39.17s	+13° 03' 01.1"	516-117504	19h 52m 39.20s	+13° 03' 01.0"	13.76	0.60	4754.366	35.437	116713.232	86623.097
2369		2919.44	1965.62	69899	23580	19h 54m 16.58s	+13° 17' 50.5"	517-113924	19h 54m 16.62s	+13° 17' 50.4"	13.61	1.22	4734.285	32.450	117263.944	83242.829
2370		1901.16	1630.48	69878	22911	19h 55m 49.61s	+13° 10' 05.5"	516-119253	19h 55m 49.58s	+13° 10' 05.3"	13.65	0.86	4745.380	35.659	120701.942	83681.891
2371		2182.77	2881.78	69851	23687	19h 55m 25.19s	+13° 38' 06.5"	519-115578	19h 55m 25.19s	+13° 38' 06.3"	13.81	0.68	4718.241	33.292	109873.439	78525.189
2372		3145.62	2555.09	69832	21841	19h 53m 56.41s	+13° 31' 03.5"	518-117422	19h 53m 56.41s	+13° 31' 03.4"	13.69	0.00	4729.763	34.919	109144.235	76866.559
2373		296.45	1825.36	69789	18780	19h 58m 17.00s	+13° 13' 56.9"	517-116081	19h 58m 17.00s	+13° 13' 56.9"	13.67	0.00	4743.587	33.787	118736.099	74232.846
2374		140.08	2584.84	69760	18745	19h 58m 32.41s	+13° 30' 51.1"	518-119840	19h 58m 32.40s	+13° 30' 51.1"	13.65	1.33	4731.284	33.176	112619.533	74760.838
2375		1051.01	2328.53	69734	20158	19h 57m 08.45s	+13° 25' 25.6"	518-119109	19h 57m 08.43s	+13° 25' 25.6"	13.73	0.92	4732.007	34.814	110110.522	80237.717

Rozdílné apertury

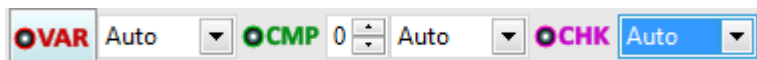
- Schopnost s pracovat s rozdílnými aperturami pro proměnnou, srovnávací (a případně kontrolní) hvězdu může velmi významně zpřesnit fotometrii, pokud:
 - Hvězdy mají velký rozdíl jasů (typické pro velká pole, kdy několik srovnávacích hvězd slouží pro více proměnných hvězd, včetně velmi slabých)
 - Potřebujeme omezit aperturu kvůli blízké hvězdě
 - ...
- Společná apertura 
- Rozdílné apertury 
- Automatické apertura vždy odpovídá zvolené hvězdě

Příklad použití rozdílných (automaticky určených) apertur u dvou velmi blízkých hvězd



Označování hvězd

- Hvězdy lze označit po kliknutí do snímku
 - SIPS nepracuje s jediným referenčním snímkem
 - Hvězdy lze označovat na kterémkoliv snímku
 - Typ vybrané hvězdy (VAR, CMPx, CHK) záleží na volbě v liště



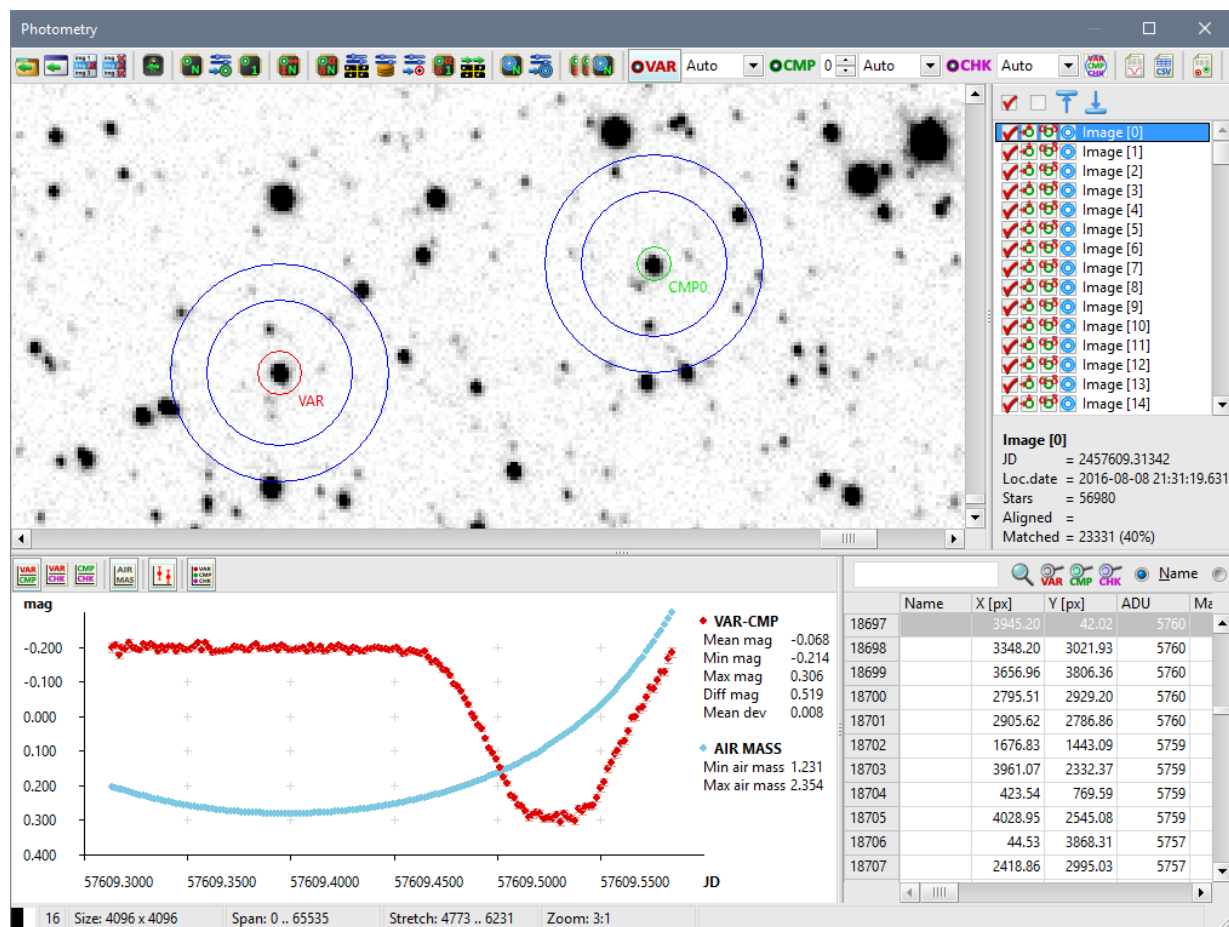
- Výběrem hvězdy v tabulce hvězd
 - Hvězdy v tabulce lze i vyhledávat
 - Hledat jde přidělené jméno nebo katalogové označení



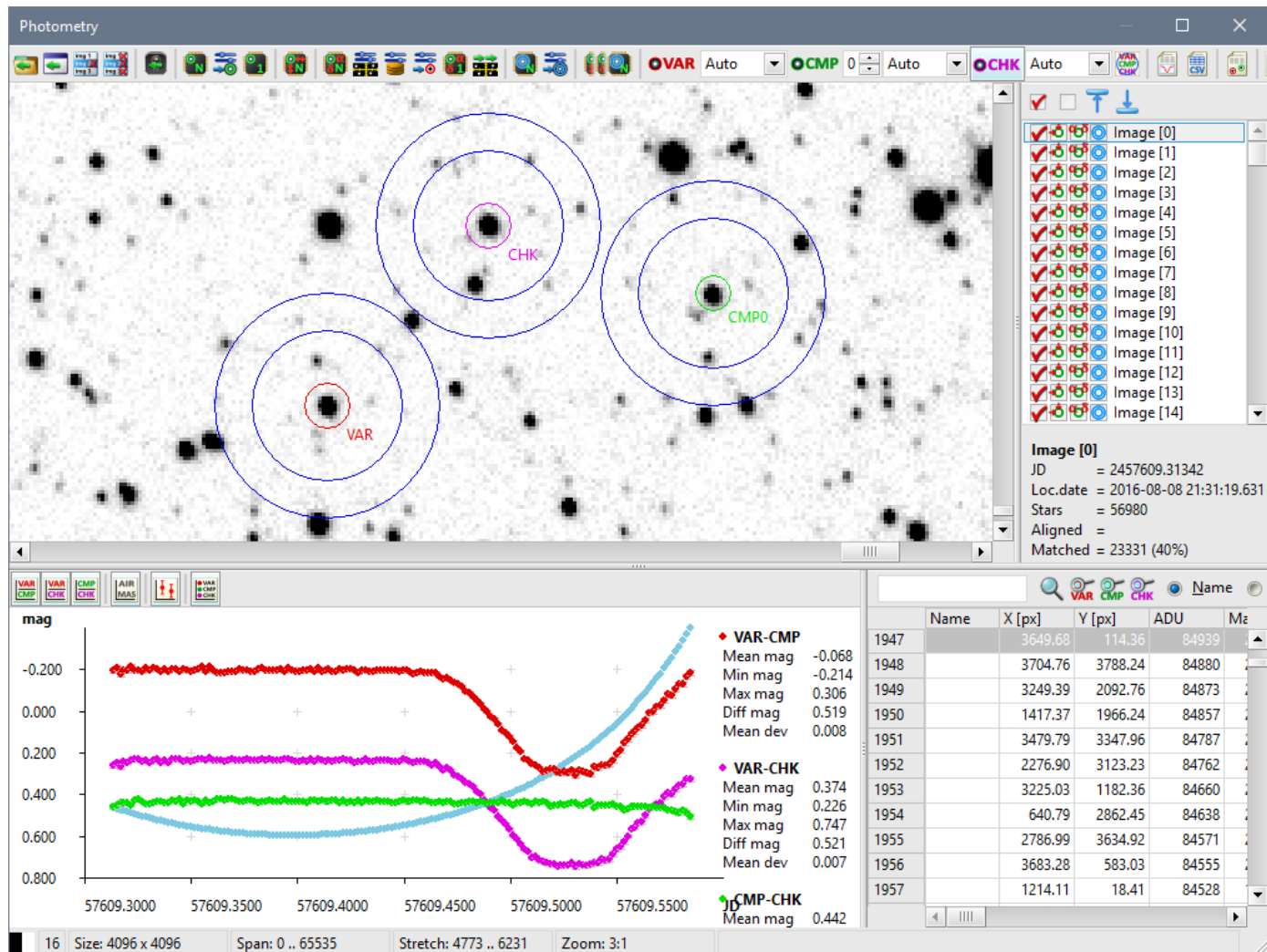
- Pokud klikneme na obecnou lupu, označí se typ nalezené hvězdy podle typu vybraného v hlavní liště, lze ale explicitně označit nalezenou hvězdu jako VAR, CMPx nebo CHK

Konečně světelná křivka

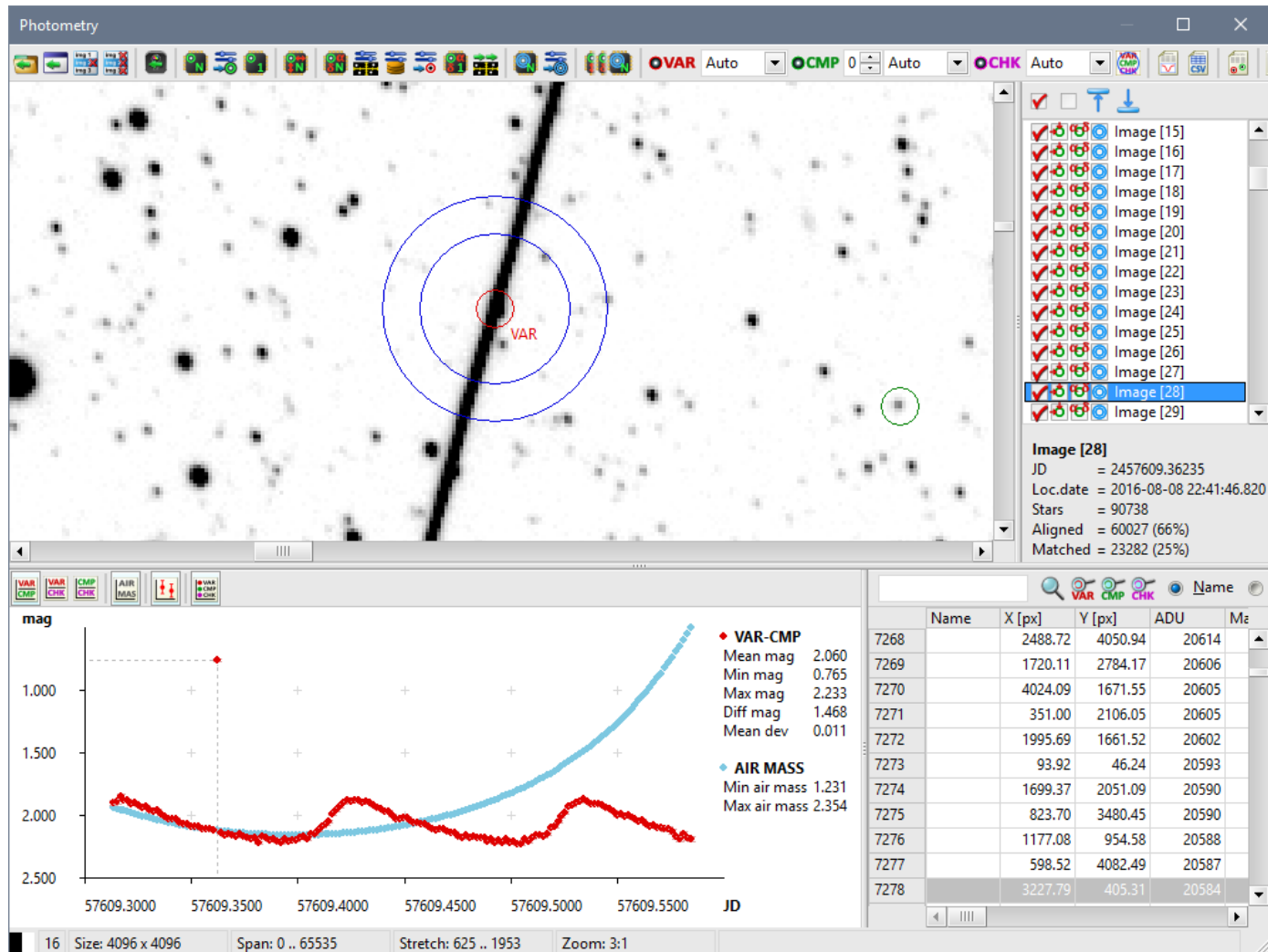
- Světelná křivka je vždy vytvořena z aktuálně označených hvězd (zakroužkovaných na snímku)



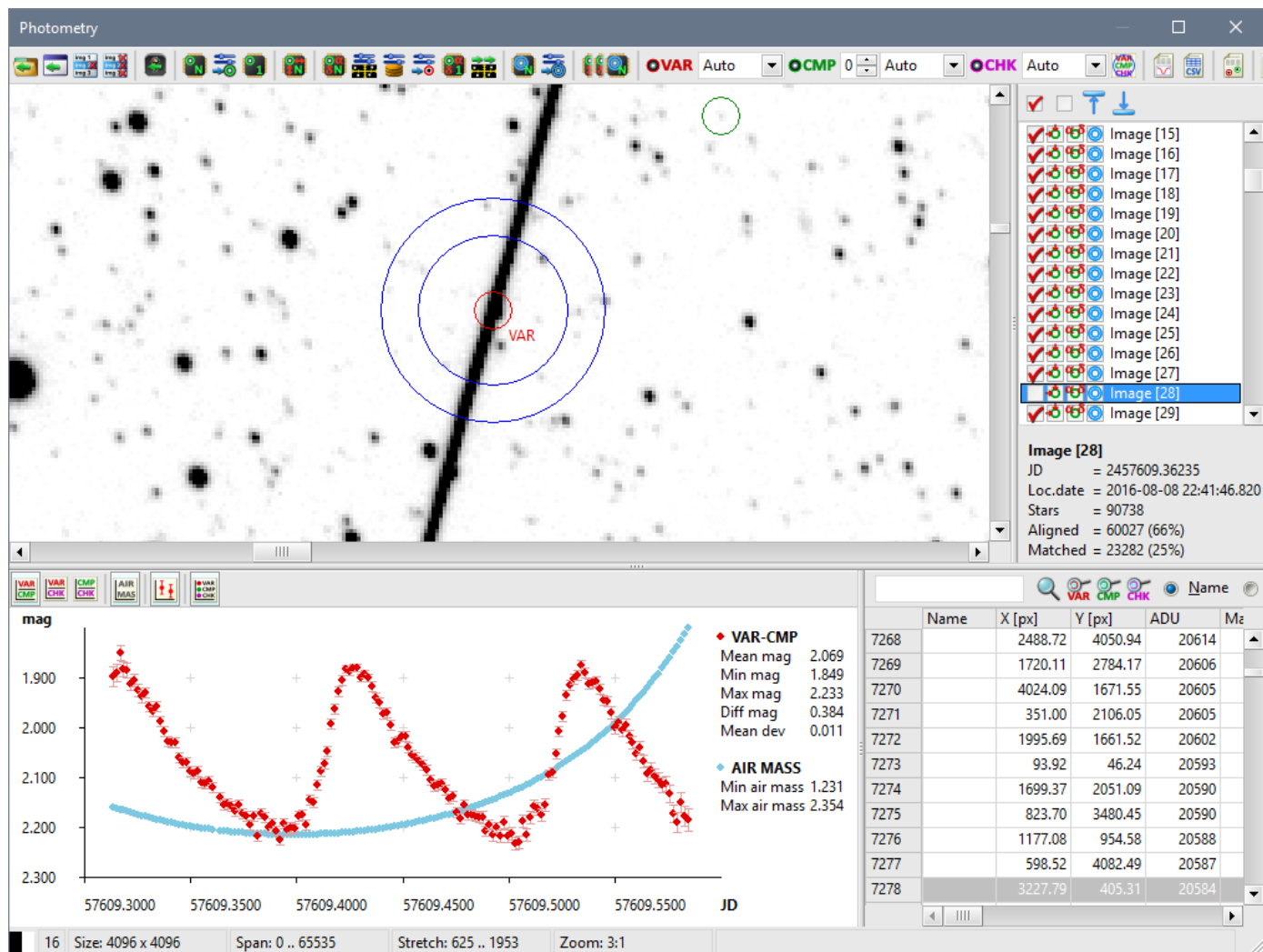
Graf světelné křivky dovoluje zobrazit vztahy mezi VAR-CMP-CHK hvězdami a pokud je známa tak i vzdušnou hmotu



Vadný bod lze vyřadit pomocí double-click v křivce i v seznamu snímků (v seznamu pracuje také klávesa <Enter>)



Opět zařadit jej lze ale pouze v seznamu snímků (ve světelné křivce už chybí). Všechny snímky lze zvolit nástrojem ☒ v liště nad seznamem (nebo <Ctrl A>)

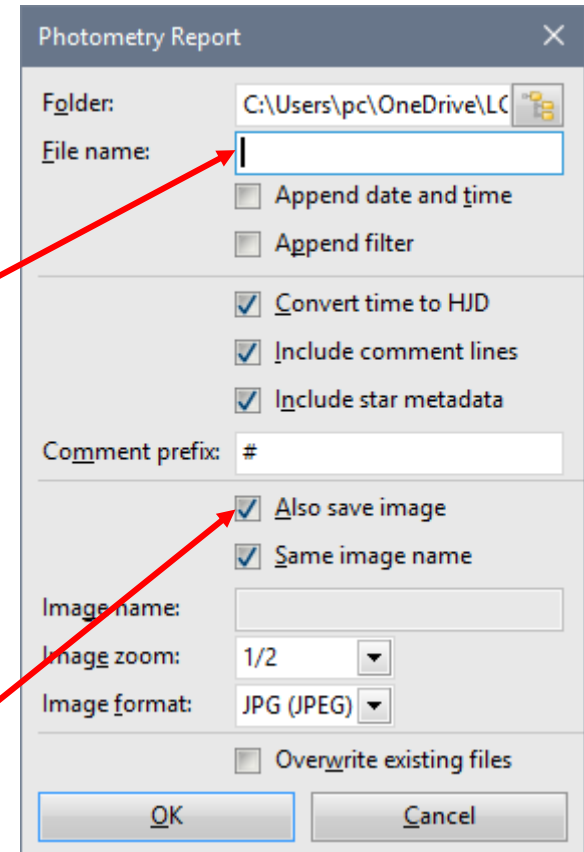


Provázané uživatelské rozhraní nástroje Fotometrie

- Výběr hvězdy ve snímku vybere hvězdu i v tabulce hvězd
- Výběr řádku v tabulce hvězd vybere (a vycentruje) hvězdu ve snímku
- Výběr snímku v seznamu zobrazí snímek, obnoví data v tabulce hvězd a označí bod ve světelné křivce
- Výběr bodu ve světelné křivce zobrazí snímek, vybere řádek v seznamu snímků a obnoví tabulku hvězd
- Výběr hvězdy v **tabulce popisu pole** označí VAR, CMP a CHK hvězdy ve snímku a VAR zobrazí v tabulce a vycentruje ve snímku (bude popsáno později)

Fotometrický protokol

- Nástroj 📄 (nebo <Ctrl R>) otevře dialog pro uložení protokolu
- Pokud má hvězda v tabulce definované jméno, nabídne se jako jméno souborů
- Dialog není klasický „File Box“, je optimalizován na ukládání velkého množství křivek do zvoleného adresáře
- Najednou ukládá protokol i mapku (obrázek)



Data fotometrického protokolu

- Data lze ukládat v GJD i HJD (doporučeno!)
- Data lze ukládat v Mag i Flux
 - Jestli je použita magnituda nebo flux rozhoduje nástroj  v panelu světelné křivky
- Protokol může a nemusí obsahovat komentářové řádky
 - Lze zvolit řetězec uvozující komentářové řádky
- Jako komentář lze uvést také metadata hvězdy

```
# Name: CzeV1111 RA: 05:48:21.81 Dec: 02:01:16.91 Catalog: UCAC4 CatalogId: 602-024653 CatalogRA: 05:48:21.74 CatalogDec: 02:01:16.92 CatalogMag: 15.44 CatalogJ-K: 0.51
```

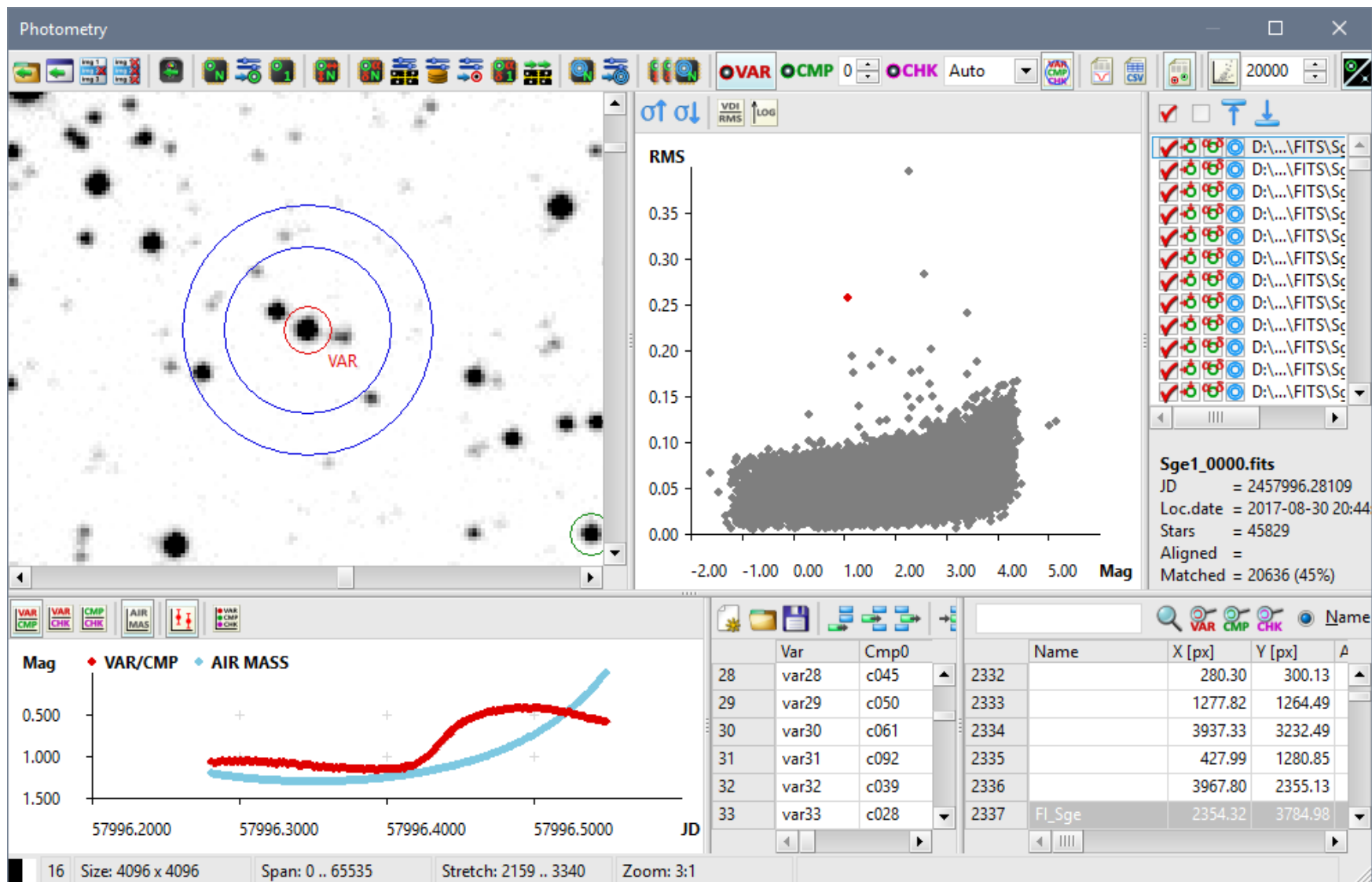
Vyhledávání proměnných hvězd

- K vyhledávání proměnných hvězd lze nástrojem  otevřít další panel
 - Lze omezit kolik nejjasnějších hvězd bude do grafu zahrnuto a tím eliminovat velmi slabé hvězdy  10000 
- V panelu lze kliknutím na bod označit proměnnou nebo kontrolní hvězdu
 - Srovnávací hvězdu v grafu označit nelze, neboť všechny hvězdy v grafu jsou srovnávány s aktuální CMP hvězdou
- Nástroji  a  (nebo kurzorovými šipkami ↑ a ↓) lze vybírat následující/předchozí hvězdu podle rozptylu

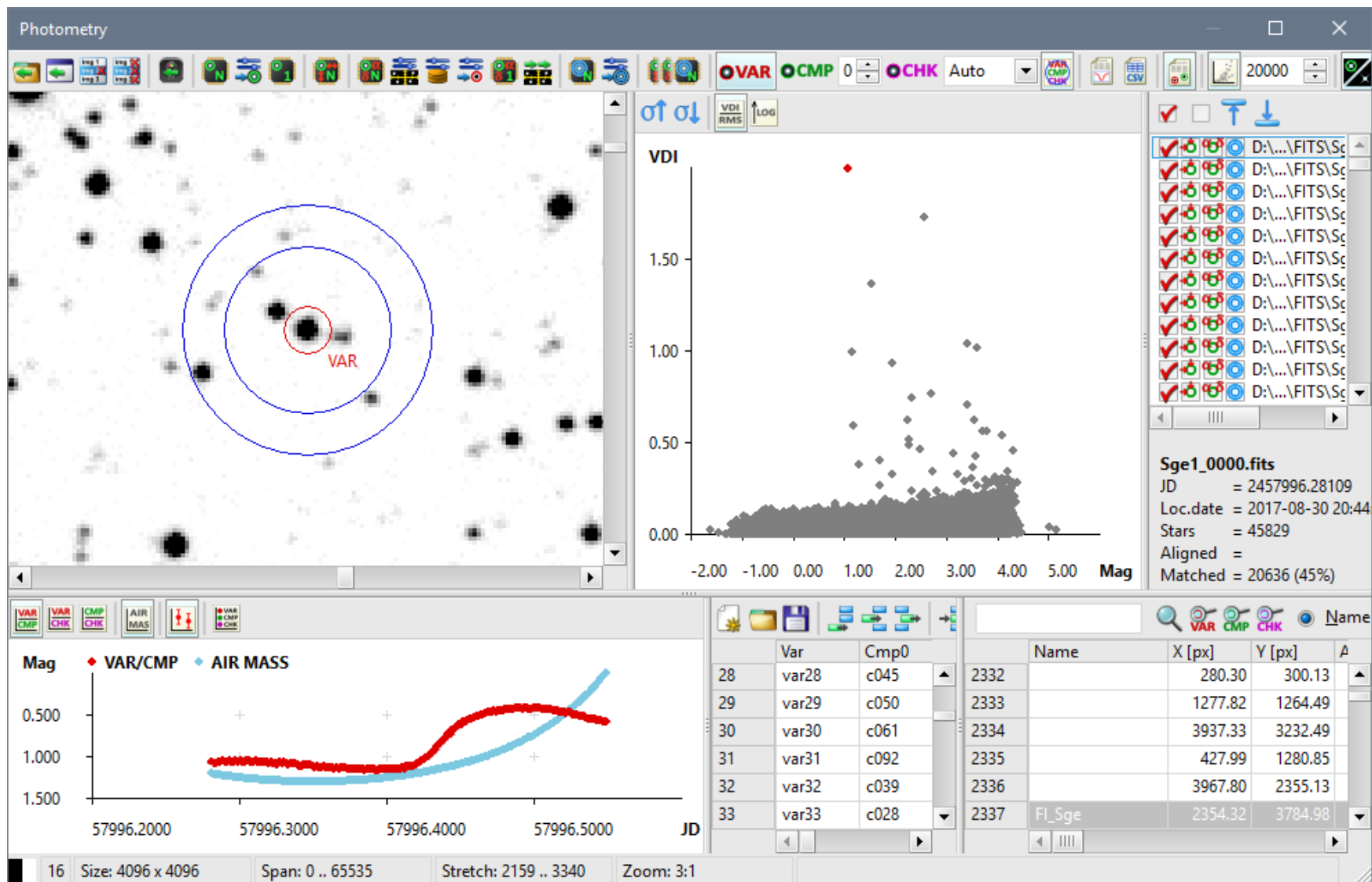
Vyhledávání proměnných hvězd

- Nástroj Fotometrie nabízí dvě možnosti indikace proměnnosti (přepínané nástrojem ):
 1. Směrodatná odchylka řady v průběhu noci (RMS z anglického Root Mean Square)
 2. Variability Detection Index (VDI) [Jaimes, R. F. at al, A&A, 2013]
- VDI je obecně méně náchylný na artefakty
- Žádná metoda ale není zcela odolná na falešné hodnoty, zvláště v polích s desítkami tisíců hvězd
- Alternativně lze RMS i VDI zobrazit v logaritmické škále 

Proměnná hvězda zobrazená v závislosti RMS



Proměnná hvězda zobrazená v závislosti VDI



Panel vyhledávání hvězd

- Hvězdy, zobrazené v panelu vyhledávání hvězd, jsou definovány aktuálně vybraným snímkem
 - Při zvolení jiného snímku je panel zavřen
- Hodnoty RMS nebo VDI jsou vztaženy k aktuálně vybrané srovnávací hvězdě
 - Při změně srovnávací hvězdy je panel přepočítán
- Hodnoty RMS nebo VDI závisí na zvolené apertuře
 - Při změně apertury je panel přepočítán
 - Automatická apertura mění typické rozložení bodů, rozptyl slabších hvězd není tak výrazný díky menší apertuře, se kterou je fotometrie počítána

Popis pole (Field Description)

- Smyslem popisu pole je výrazně usnadnit, urychlit a omezit chyby při výběru hvězd
 - Popis pole tedy není nic jiného, než způsob zapamatování výběru proměnné, srovnávací(ch) a kontrolní hvězdy
- Při tvorbě popisu pole určujeme, které kombinace VAR, CMPx a (volitelně) CHK se mají zapamatovat
 - Jeden záznam (řádek) definuje jednu sledovanou (proměnnou) hvězdu
- Při použití popisu pole pak Fotometrie označí VAR, CMPx a CHK hvězdy, definované v daném řádku

Tvorba popisu pole

- Popis pole lze vytvářet v samostatném panelu otevíraném nástrojem 
- **Podmínkou zařazení záznamu** (řádku – kombinace VAR, CMPx a CHK hvězd) do popisu pole je **pojmenování** všech zvolených hvězd (zakroužkovaných na snímku) v **tabulce hvězd**
 - Hvězdy lze pojmenovat kliknutím na buňku **Name** v tabulce hvězd
 - Všechny aktuálně vybrané hvězdy (VAR, CMPx, CHK) musí být pojmenovány, jinak nelze záznam přidat do popisu pole

Tvorba popisu pole

- Nástroje popisu pole:

-  přidá aktuálně vybranou kombinaci VAR, CMPx (a CHK) na konec popisu pole
-  vloží aktuálně vybranou kombinaci VAR, CMPx (a CHK)
-  smaže zvolený řádek (záznam o hvězdě)
-  přepíše zvolený řádek (záznam o hvězdě) aktuálně vybranými hvězdami
-    seřadí řádky podle jména proměnné hvězdy, rektascenze nebo deklinace
-  smaže aktuální tabulku a vytvoří novou (prázdnou)
-  otevře popis pole ze souboru (*.sfd)
-  uloží aktuální popis do souboru

Soubor popisu pole

- Soubor popisu pole se skládá ze dvou bloků
 1. Blok pojmenovaných hvězd, obsahující všechny hvězdy, u kterých bylo zadáno jméno ve sloupci **Name**
 2. Blok uspořádaných N-tic [VAR, CMP0, ..., CMP9, CHK]
- Při načítání slouží první blok k pojmenování všech uvedených hvězd v tabulce hvězd
 - Hvězdy jsou vyhledávány podle souřadnic α , δ
- Druhý blok N-tic hvězd [VAR, CMP0, ..., CMP9, CHK] se objeví v tabulce popisu pole
 - Výběr řádku v popisu pole je jen další způsob jak označit proměnnou, srovnávací a případně kontrolní hvězdu

Příklad souboru popisu pole

[Description]

version = 1
catalog = UCAC4

[Stars]

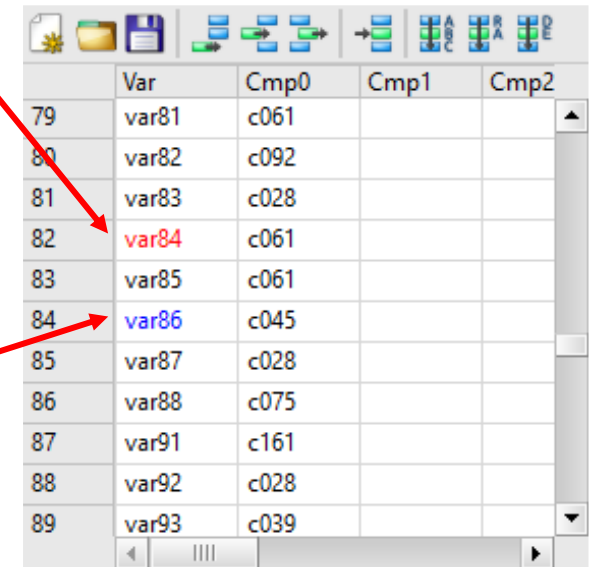
CzeV278 = 5.214202445E+0; 2.416943678E-1; 520-116786; 5.214201737E+0; 2.416945087E-1
CzeV277 = 5.213997768E+0; 2.416949445E-1; 520-116759; 5.21399635E+0; 2.416958225E-1
CzeV276 = 5.211927943E+0; 2.291749071E-1; 516-118485; 5.211928455E+0; 2.29174239E-1
CzeV274 = 5.217900065E+0; 2.386507444E-1; 519-115804; 5.217901258E+0; 2.386517938E-1
CzeV273 = 5.217856905E+0; 2.306025753E-1; 517-114737; 5.217855933E+0; 2.306040272E-1
CzeV272 = 5.213611888E+0; 2.316463544E-1; 517-114241; 5.213612257E+0; 2.316458191E-1
...

[Variables]

CzeV272 = c060; ; ; ; ; ; ; ; ;
CzeV273 = c110; ; ; ; ; ; ; ; ;
CzeV274 = c060; ; ; ; ; ; ; ; ;
CzeV276 = c069; ; ; ; ; ; ; ; ;
CzeV277 = c060; ; ; ; ; ; ; ; ;
CzeV278 = c026; ; ; ; ; ; ; ; ;
...

			Name Catalog						
	Var	Cmp0		Name	X [px]	Y [px]	ADU	Max. Px	R.A.
1	CzeV272	c060	14618		3872.06	2491.74	7755	7124	19h 52m 49.65s
2	CzeV273	c110	14619		2743.50	3239.56	7754	6913	19h 54m 34.05s
3	CzeV274	c060	14620		2797.77	209.81	7753	6913	19h 54m 25.94s
4	CzeV276	c069	14621		2432.46	3679.24	7753	6892	19h 55m 03.11s
5	CzeV277	c060	14622		2714.29	3286.59	7752	6856	19h 54m 36.78s
6	CzeV278	c026	14623		3267.78	272.22	7752	6929	19h 53m 43.00s
7	CzeV279	c126	14624		3583.22	23.21	7752	6816	19h 53m 13.91s
8	CzeV280	c081	14625		1683.11	191.49	7750	6213	19h 56m 07.90s
9	CzeV281	c026	14626		2188.08	827.65	7750	7216	19h 55m 22.41s
10	CzeV282	c110	14627		714.92	2646.43	7748	6950	19h 57m 39.71s
11	CzeV283	c110	14628	CzeV273	1891.11	1749.89	7746	7206	19h 55m 50.67s
12	CzeV284	c069	14629		2010.22	2705.56	7746	7734	19h 55m 40.84s

- Pokud hvězda s definovanými souřadnicemi není na vybraném snímku nalezena, je označena červeně
 - Hvězda může být mimo zorné pole
 - Pokud je v poli a pouze je např. příliš slabá, je možné zvolit jiný snímek, na kterém může mít hvězda lepší S/N
- Pokud hvězda daného jména není v tabulce hvězd, je označena modře
 - SIPS brání přidání nepojmenované hvězdy do popisu
 - Je ale např. možné jméno hvězdy v tabulce hvězd dodatečně smazat atd.



	Var	Cmp0	Cmp1	Cmp2
79	var81	c061		
80	var82	c092		
81	var83	c028		
82	var84	c061		
83	var85	c061		
84	var86	c045		
85	var87	c028		
86	var88	c075		
87	var91	c161		
88	var92	c028		
89	var93	c039		

Použití popisu pole

- Popis pole má smysl použít pokud:
 1. Dané pole sledujeme opakovaně
 2. V poli je více sledovaných hvězd (desítky, stovky)
- Popis pole dokáže zkrátit zpracování jedné pozorovací řady z hodin (až dní) na minuty až desítky minut
 - Zejména u velkých a hustých polí s desítkami tisíců hvězd
- Uložení pojmenovaných hvězd v tabulce hvězd výrazně usnadňuje vyhledávání nových proměnných hvězd
 - Při nalezení proměnné hvězdy nástrojem vyhledávání změn je ihned patrné, jestli se jedná o už známou hvězdu (je tabulce pojmenována) nebo ne

Několik rad na závěr (Proč vlastně pozorovat?)

- Jste astronomové!
- Zajímejte se o hvězdy, které pozorujete
 - Vyhledejte články o dané hvězdě, prohlédněte O-C diagram, ...
- Vždy byste měli vědět proč dané hvězdy pozorujete
 - Čím je daná hvězda zajímavá?
 - Co vaše pozorování pomůže objasnit?
- Příliš nespolehejte, že někdo za vás určí co pozorovat
- I když jste součástí týmu s profesionály (velmi užitečné!), vždy se zajímejte o to jaký cíl tým vlastně sleduje a proč jsou zapotřebí vaše data

The first principle is that you
must not fool yourself and you
are the easiest person to fool.

Richard Feynman

Děkuji za pozornost

Ukázka, otázky, ...