



# Polovodičové detektory světla v astronomii

Pavel Cagaš  
e-mail: [pc@gxccd.com](mailto:pc@gxccd.com)

# Zrození CCD

- V roce 1969 vytvořili kanadský fyzik **Willard S. Boyle** a jeho americký kolega **George E. Smith** (toho času zaměstnanci Bell Laboratories) první CCD čip – křemíkový obvod schopný měnit světlo na elektrický signál.
- Za tento vynález obdrželi řadu ocenění, nejvýznamnější z nich je **Nobelova cena za fyziku**, udělená v roce 2009.
- Jako u řady významných objevů a vynálezů, i v případě vynálezu CCD existují rozepře o skutečné prvenství.



# Willard S. Boyle a George E. Smith



held on Sept. 8, 1969 and the basic scheme was disclosed to F. H. Smith later that day. The principle is demonstrated by the following specific structure.

↓ Metal Electrodes

leads to external voltage supply

SiO<sub>2</sub>

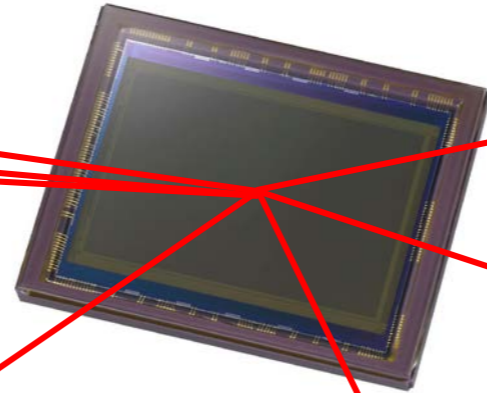
edge of depletion region

A n-type Si

A negative voltage applied to the electrodes of the above structure causes a depletion region to form under the electrode. The band bending across section A-A when the voltage is first applied is shown below. As a result of generation-recombination centers in the depletion region and at

W. S. Boyle      G. E. Smith 10/18/69  
10/18/69

# Dnes jsou polovodičové obrazové snímače doslova všudypřítomné



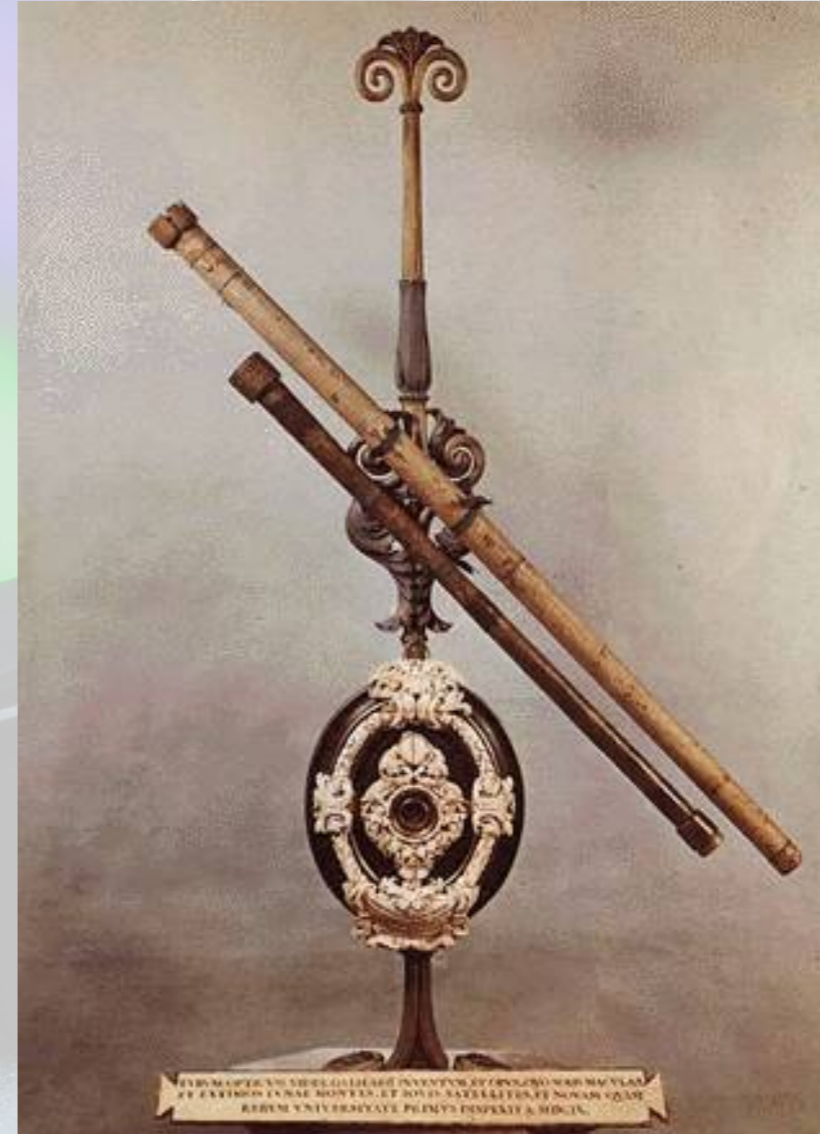
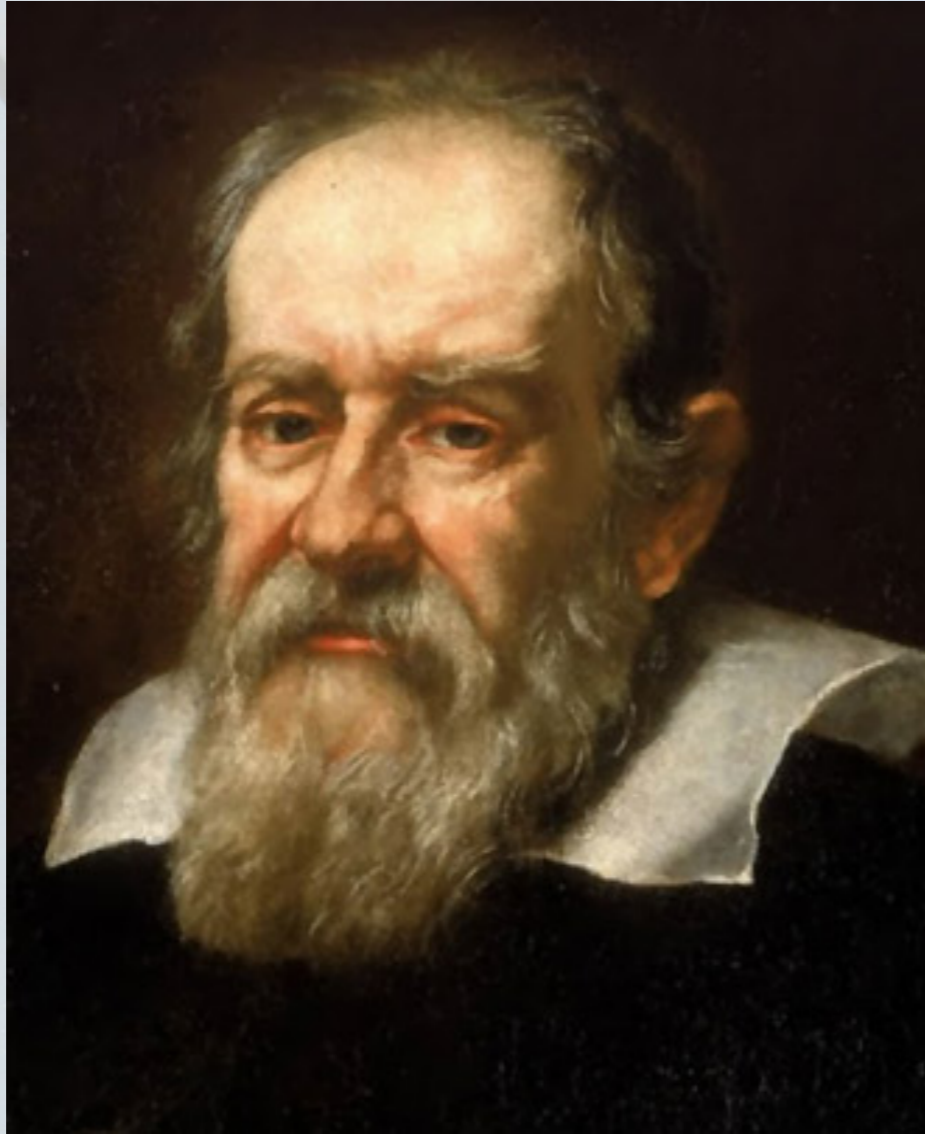


**Stručná historie přístrojů a detektorů  
v astronomii**

# Rozvoj našeho poznání Vesmíru

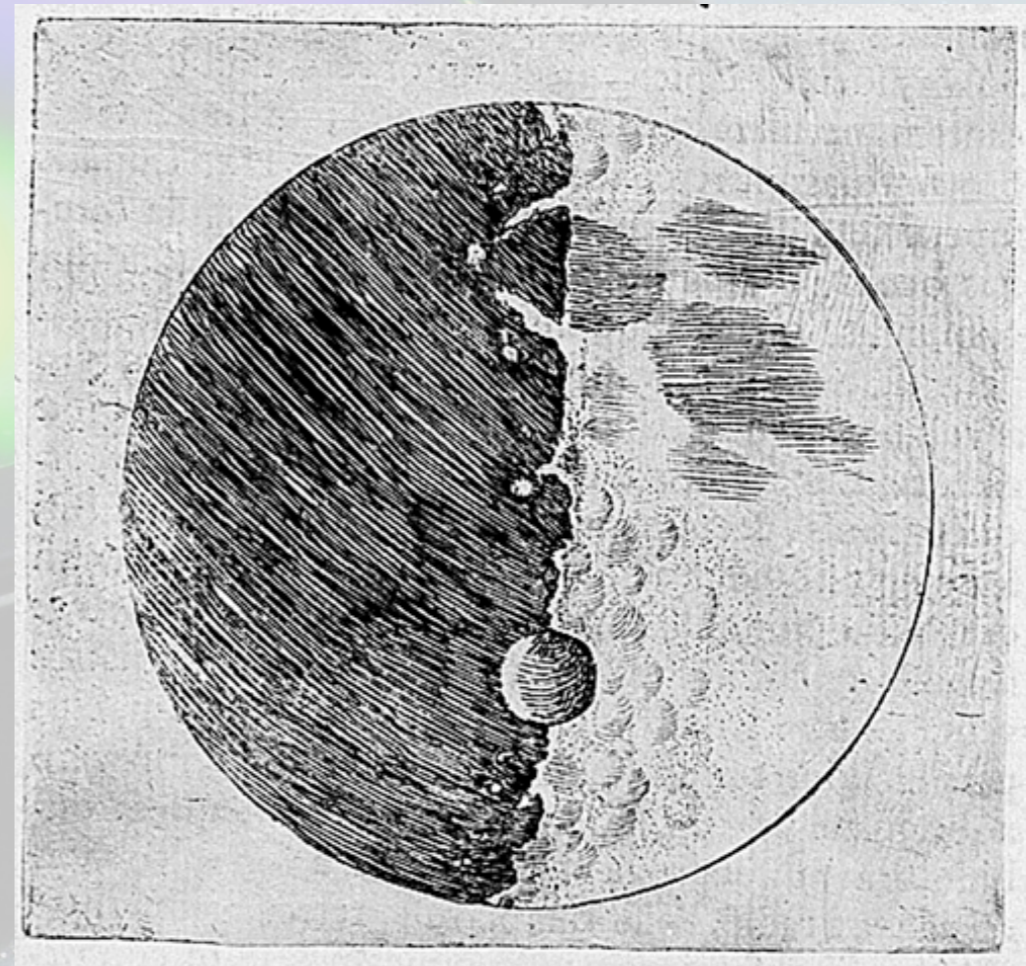
- **Experiment je základním stavebním kamenem přírodních věd** – bez experimentálního potvrzení má sebekrásnější teorie jen nevalnou cenu.
- **V astronomii ale až na naprosté výjimky nemůžeme experiment sami provést.**
  - Astronomie zkoumá objekty jako jsou planety, hvězdy, galaxie nebo i celý vesmír a je odkázána na pozorování dějů, které se v daném okamžiku odehrávají bez našeho přičinění nebo naplánování.
- Proto má pozorování a pozorovací technika v astronomii zcela klíčovou úlohu a podíváme-li se do dějin astronomie, **rozhodující skoky v našem poznání vesmíru jsou vždy spjaty s novou technikou pozorování.**

# 1. astronomická revoluce: Dalekohled (Galileo Galilei, 1609)

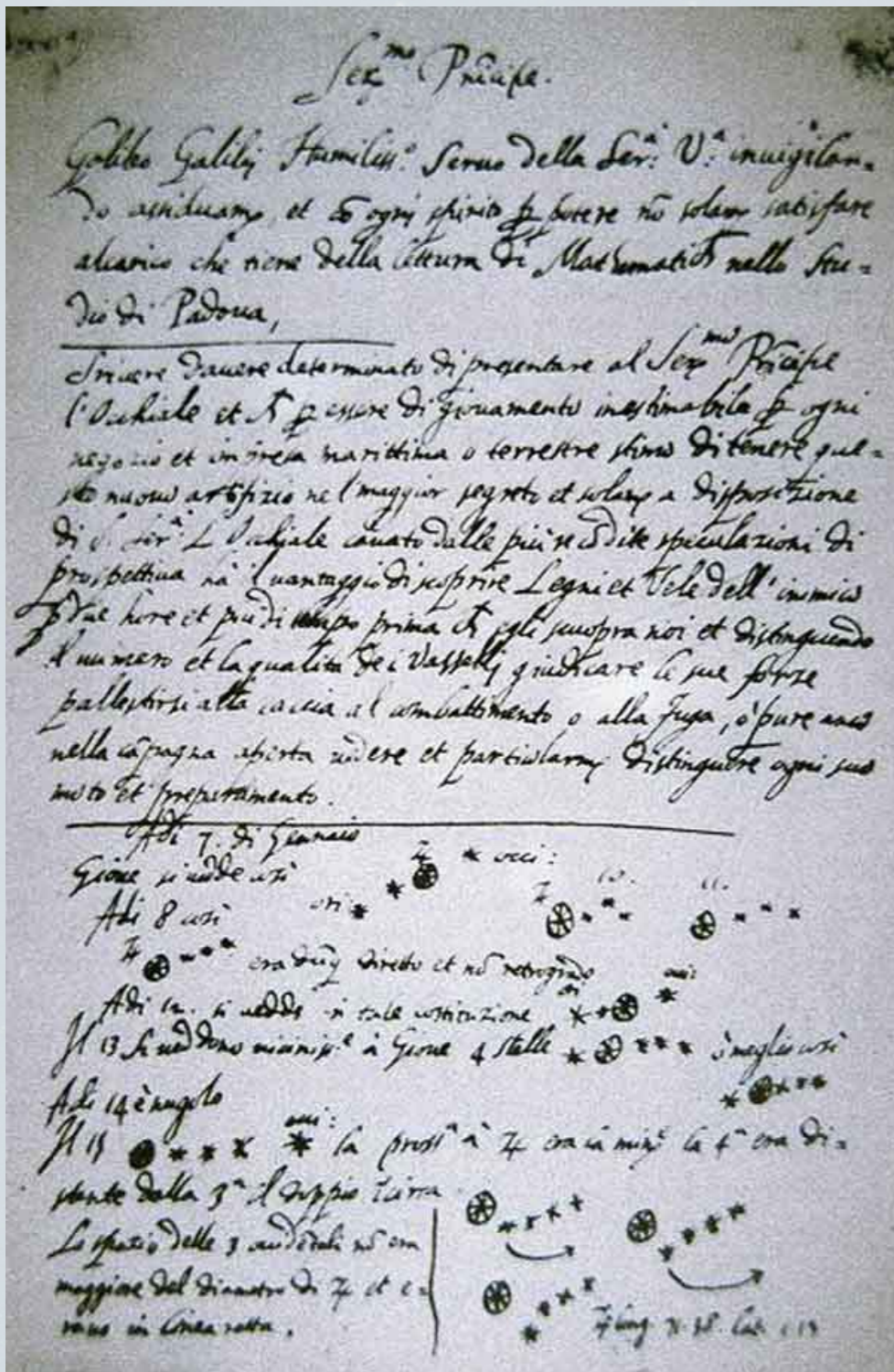




- Měsíc je svět podobný Zemi.
- Jsou na něm pohoří i nížiny, dobře viditelné dalekohledem zejména na rozhraní světla a stínu.







- Planety nejsou jen body jako ostatní hvězdy, ale kotoučky.
  - Venuše mění fáze podobně jako Měsíc.
- Kolem planet obíhají satelity.
  - Galileo objevil 4 největší měsíce Jupitera – Io, Europu, Ganymed a Callisto.
  - Dnes se tyto 4 satelity nazývají „Galileovské“.
- Mléčná dráha není jen světlejší pozadí nebeské sféry, ve skutečnosti je složena z množství hvězd.
  - Jsou ale tak slabé, že bez dalekohledu je nelze rozlišit.

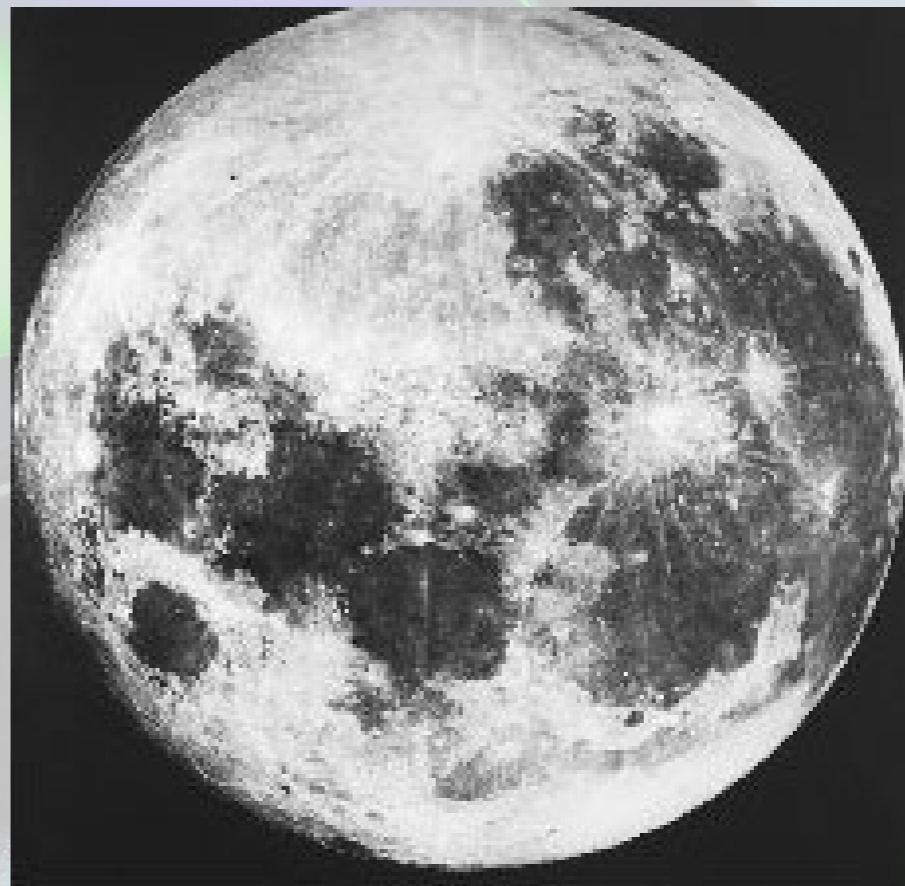
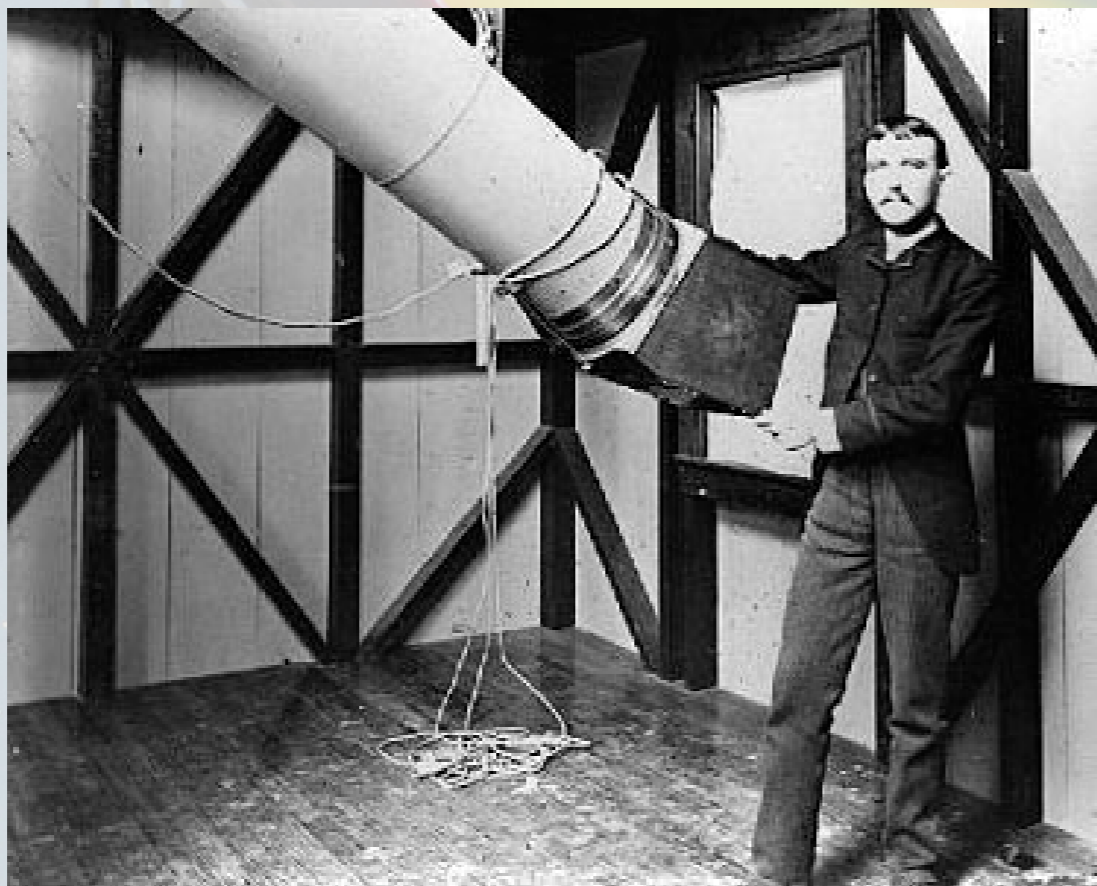
## 2. astronomická revoluce: Fotografie (Louis Daguerre, 1839)

- V lednu 1839 **Louis Daguerre** ohlásil vynález procesu zaznamenání světelného obrazu.
- Oznámení o několik měsíců předcházelo snímek Měsíce pořizovaný Daguerrovým zastáncem **Francoisem Aragem**.
  - Zdá se tedy, že astrofotografie předešla obecnou fotografii.



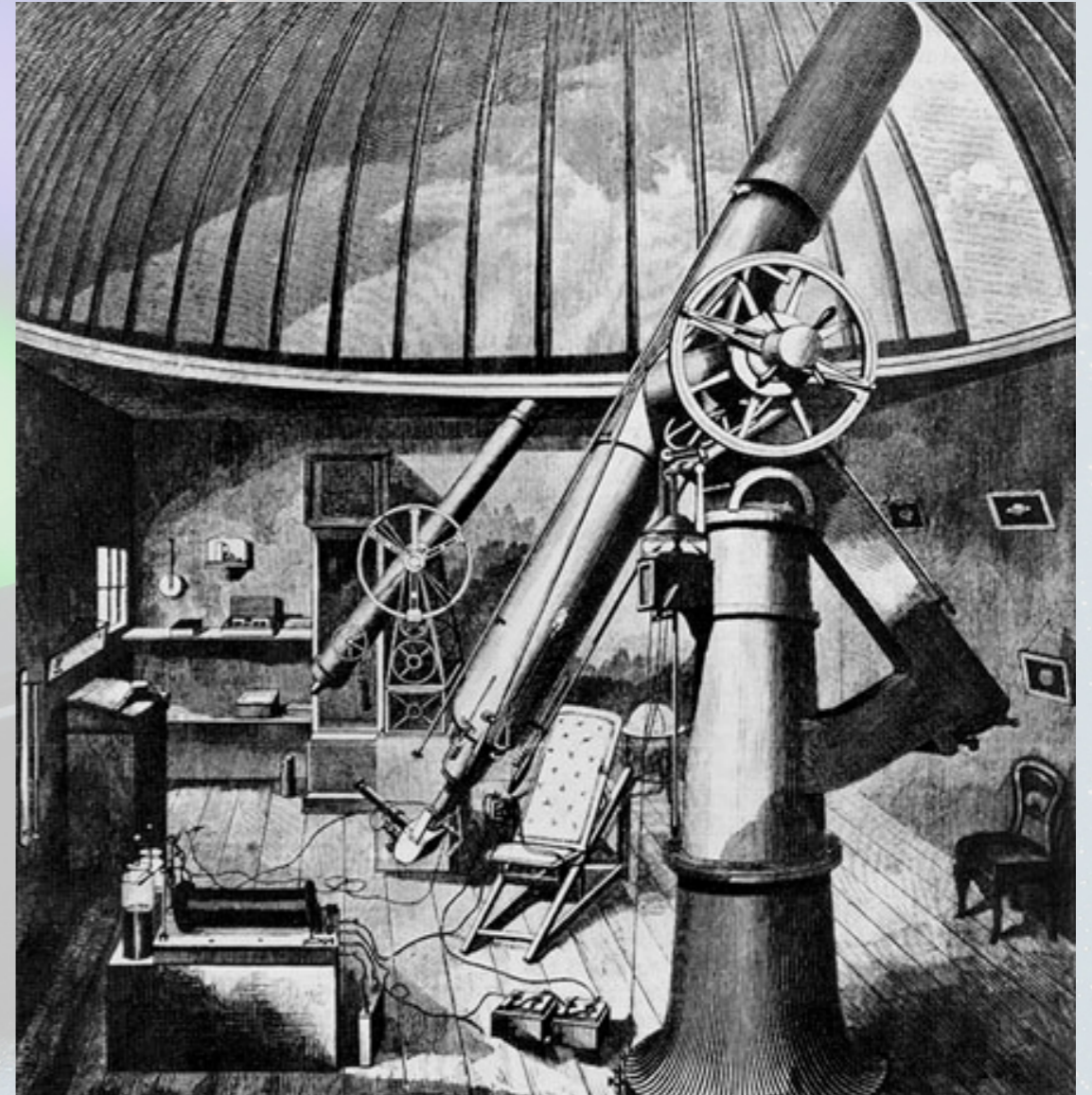
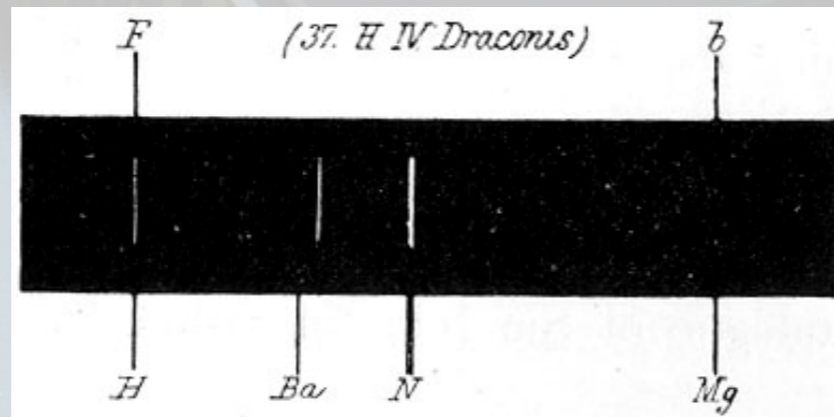
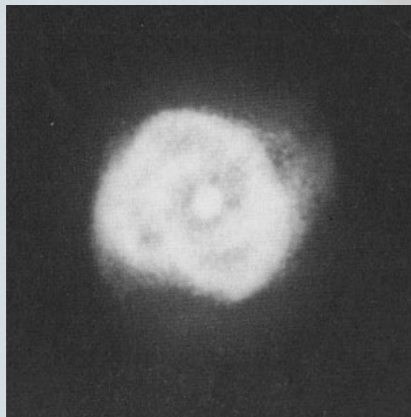
# Henry Draper – průkopník fotografie v astronomii

- Henry Draper jako první fotografoval Velkou Mlhovinu v Orionu.
- Portrét Měsíce z roku 1880.



# William Huggins – první záznam spekter

- První fotografie spekter otvírají dodnes nesmírně významné okno poznání vesmíru.
- Spektra nám o pozorovaných objektech prozrazují mnohem více informací než pouhá fotografie
  - Spektrum H IV Draconis (NGC 6543)



# Fotografie dokáže střídat světlo

- Na rozdíl od lidského oka a mozku, který zpracovává obraz na sítnici nepřetržitě, fotografická emulze dokáže shromažďovat světlo po dlouhou dobu.
  - Prodloužením expozic tak lze zachytit astronomické objekty pro oko neviditelné.
- Záznam na fotografická desce není zatížen subjektivní chybou pozorovatele – únavou, nepohodlím apod.
- Fotografická deska navíc nabízí další možnosti zpracování
  - změření pozic hvězd
  - změření jasnosti hvězd

# Fotografie nám ukazuje skutečnou Mléčnou dráhu

- **Edward Emerson Barnard** fotografuje Mléčnou dráhu a objevuje řadu svítících a temných mlhovin.
  - 19 NGC objektů
  - 131 IC objektů
- Barnard u Crocker Telescope na Mt. Hamilton.

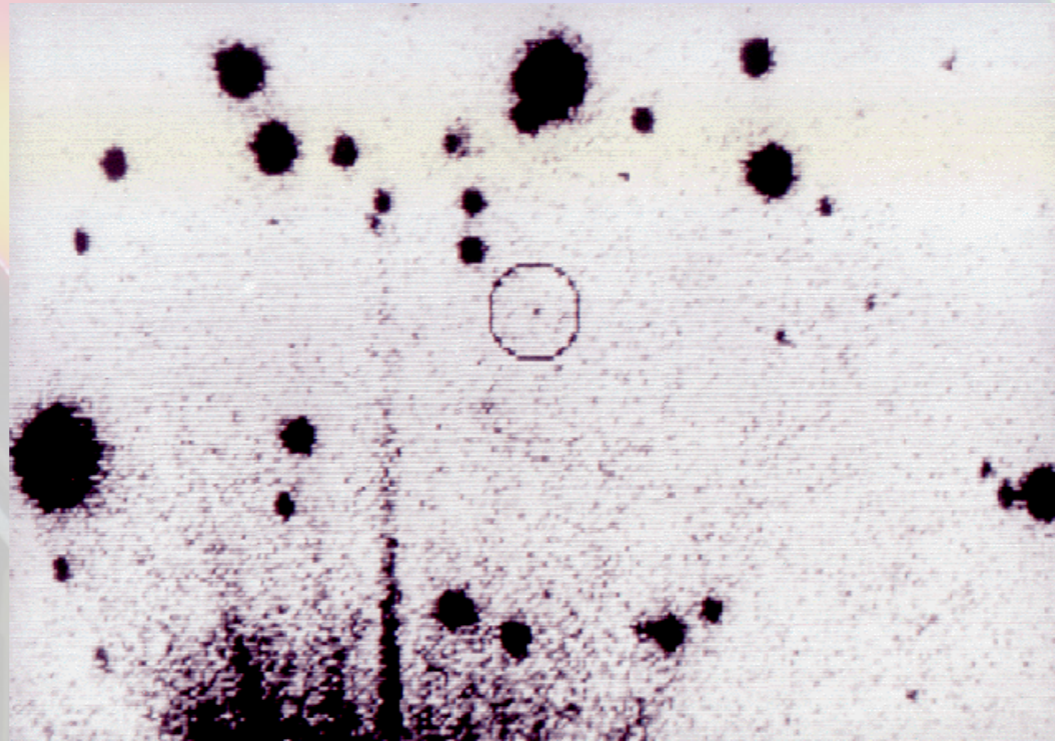


# Fotografie na vrcholu

- Ve 2. polovině minulého století zažívá astronomická fotografie vrchol.
- Mnohahodinové expozice tehdy největším dalekohledem na hoře Mt. Palomar (se zrcadlem o průměru 5 m) zobrazují vzdálené galaxie a hvězdy až do jasnosti  $\sim 23$  mag.
- Schmidtova fotografická komora o průměru 1,2 m na téže hvězdárně pořídila fotografický atlas celé severní oblohy.



### 3. astronomická revoluce: CCD a digitální zpracování obrazu (Willard S. Boyle, George E. Smith)



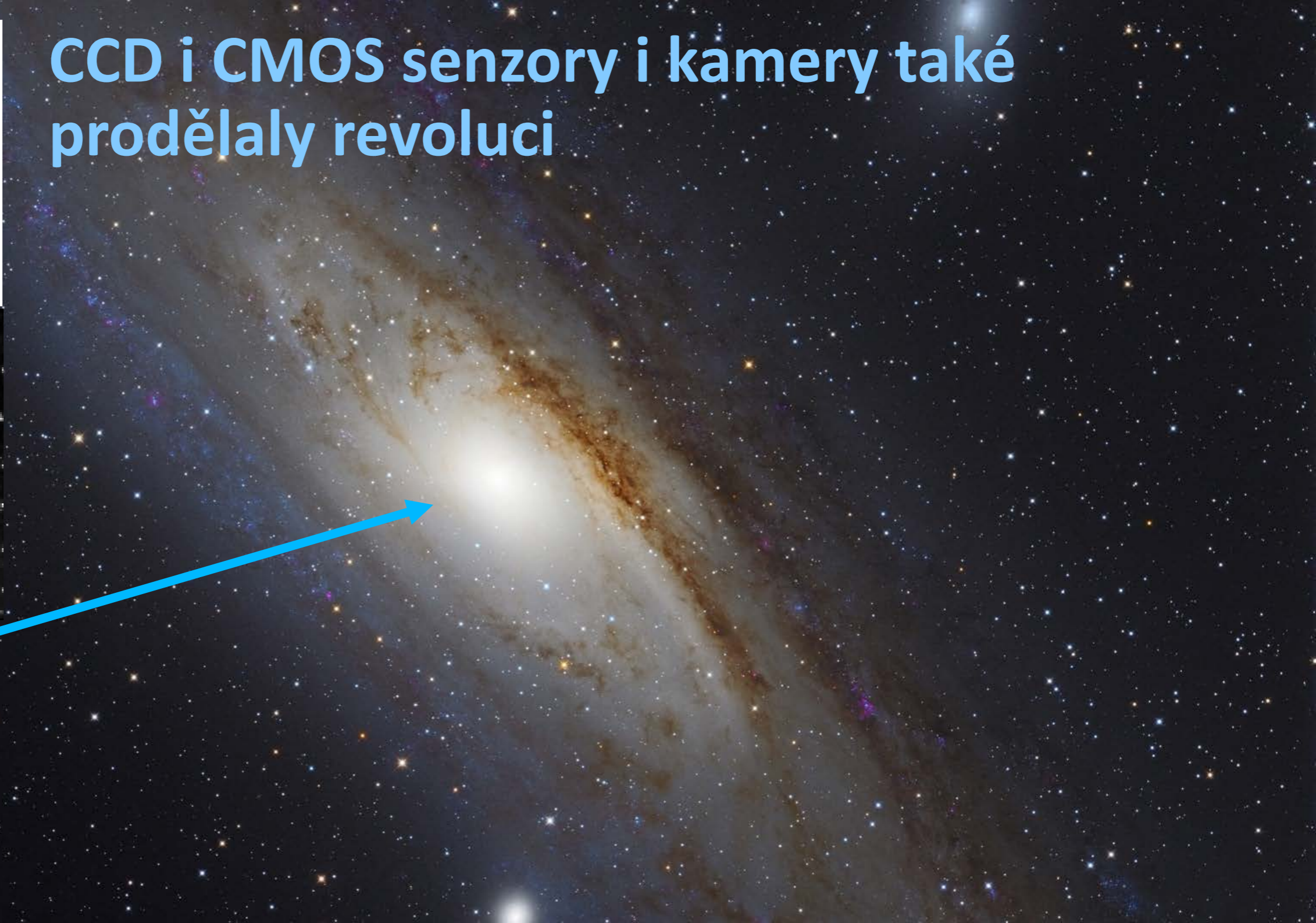
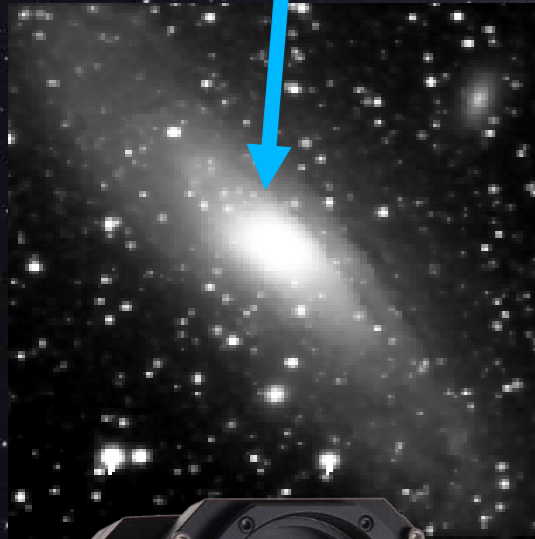
- 16. října 1982 objevuje 5 m dalekohled na hoře Mt. Palomar s CCD kamerou jádro Halleyovy komety ve vzdálenosti 1,6 miliardy kilometrů.



# Charge Coupled Device

- CCD (česky nábojově vázaný prvek) byl původně používán v televizních kamerách jako náhrada vidikonové snímací elektronky. Díky menší váze i rozměrům a nižší spotřebě dovolily CCD čipy konstruovat výrazně menší a lehčí televizní kamery s výrazně vyšší citlivostí.
  - První kosmickou sondou, vybavenou CCD snímači na místo vidikonových trubic, byla sonda Galileo, vyslaná k Jupiteru v roce 1989. CCD sondy Galileo měly rozlišení 800×800 bodů.
  - Předchůdci této sondy včetně sond Voyager, Mariner apod. nesly klasické televizní kamery s vakuovou trubicí nebo jen jednodušší skenovací fotometry (např. sondy Pioneer).

CCD i CMOS senzory i kamery také  
prodělaly revoluci



# Dalekohled s CCD/CMOS kamerou je srovnatelný s 10 násobně větším přístrojem s filmovou emulzí

- Srovnajme několik obrázků ze slavné knihy **Vesmír** autorů J. Grygar, Z. Horský a P. Mayer.
- Snímky vlevo byly pořízeny světovými observatořemi (převážně U.S. Naval Observatory) před érou CCD.
- Snímky vpravo jsou pořízeny amatéry s komerčními dalekohledy o průměru kolem 25 cm, ale s CCD kamerami.

# NGC 6946 galaxie „Ohňostrojn“



# M 51 „Vírová galaxie“



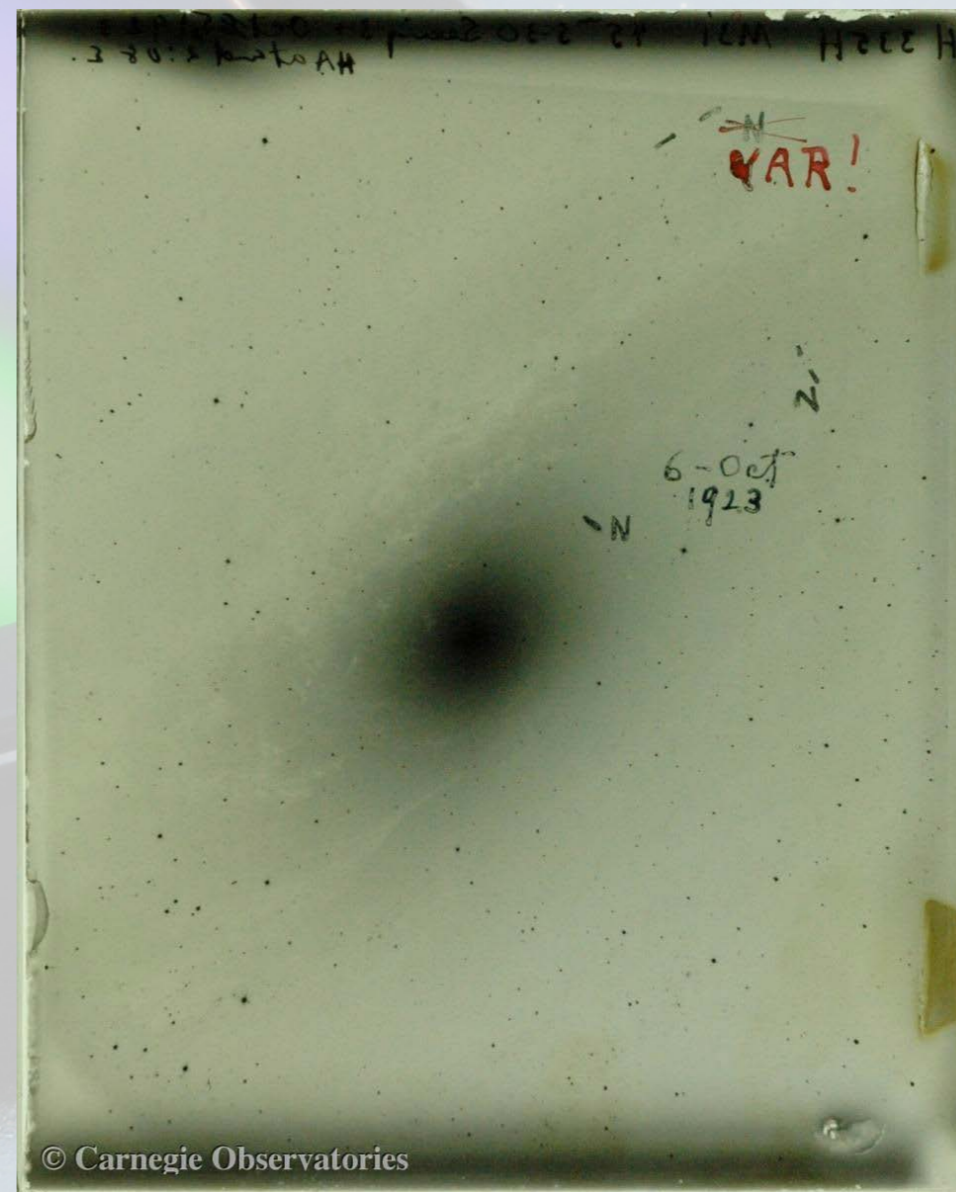
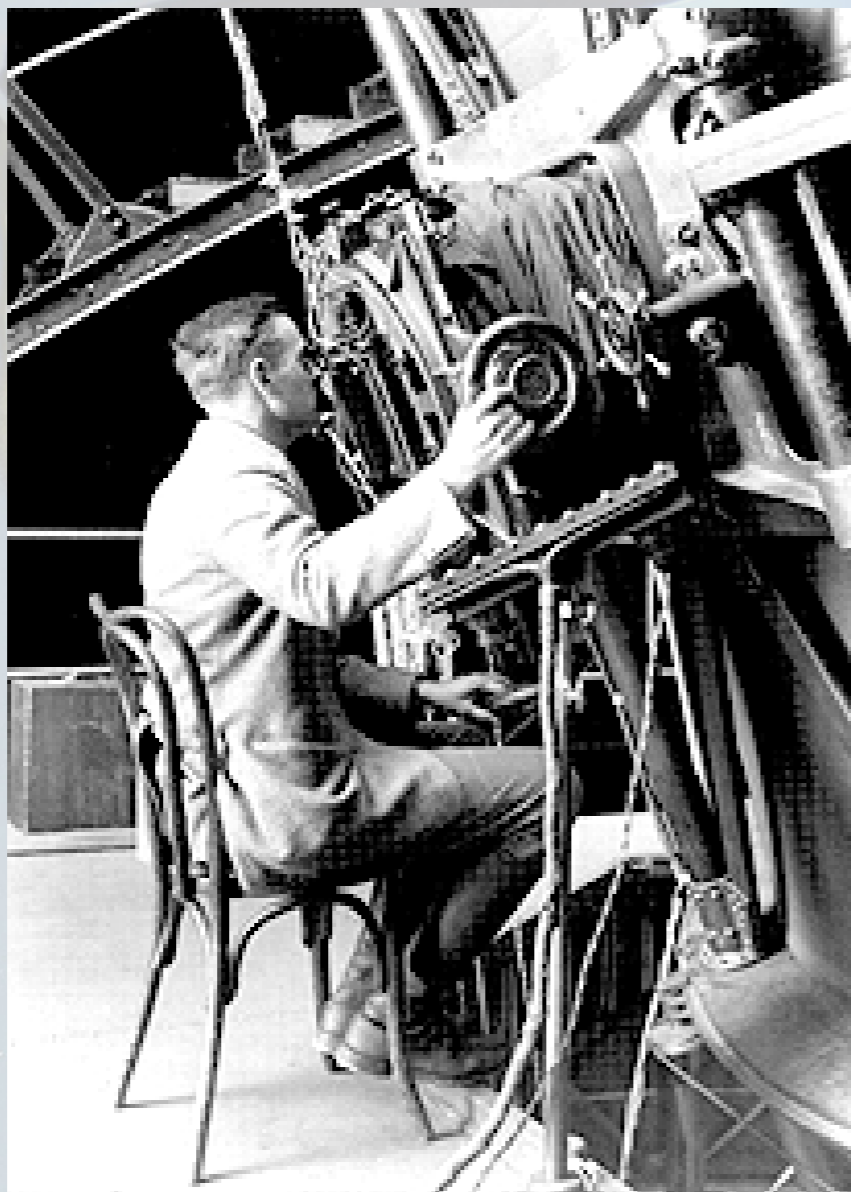
# M 42 „Velká mlhovina v Orionu“



# M 42 „Velká mlhovina v Orionu“ v celé kráse



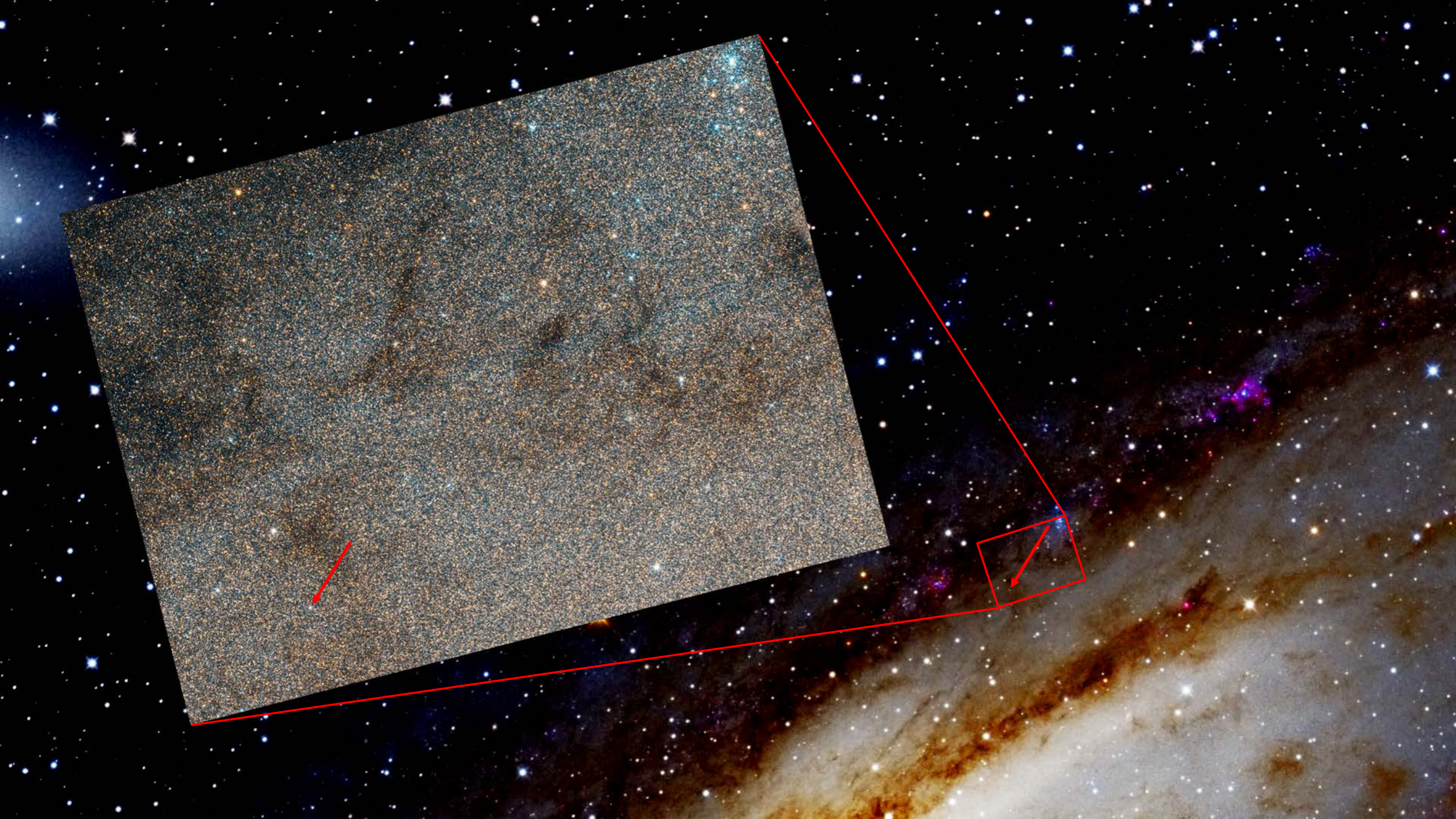
# Edwin Hubble objevuje cefeidu v M31 s použitím 2,5m „Hookerova“ dalekohledu na hoře Mt. Wilson

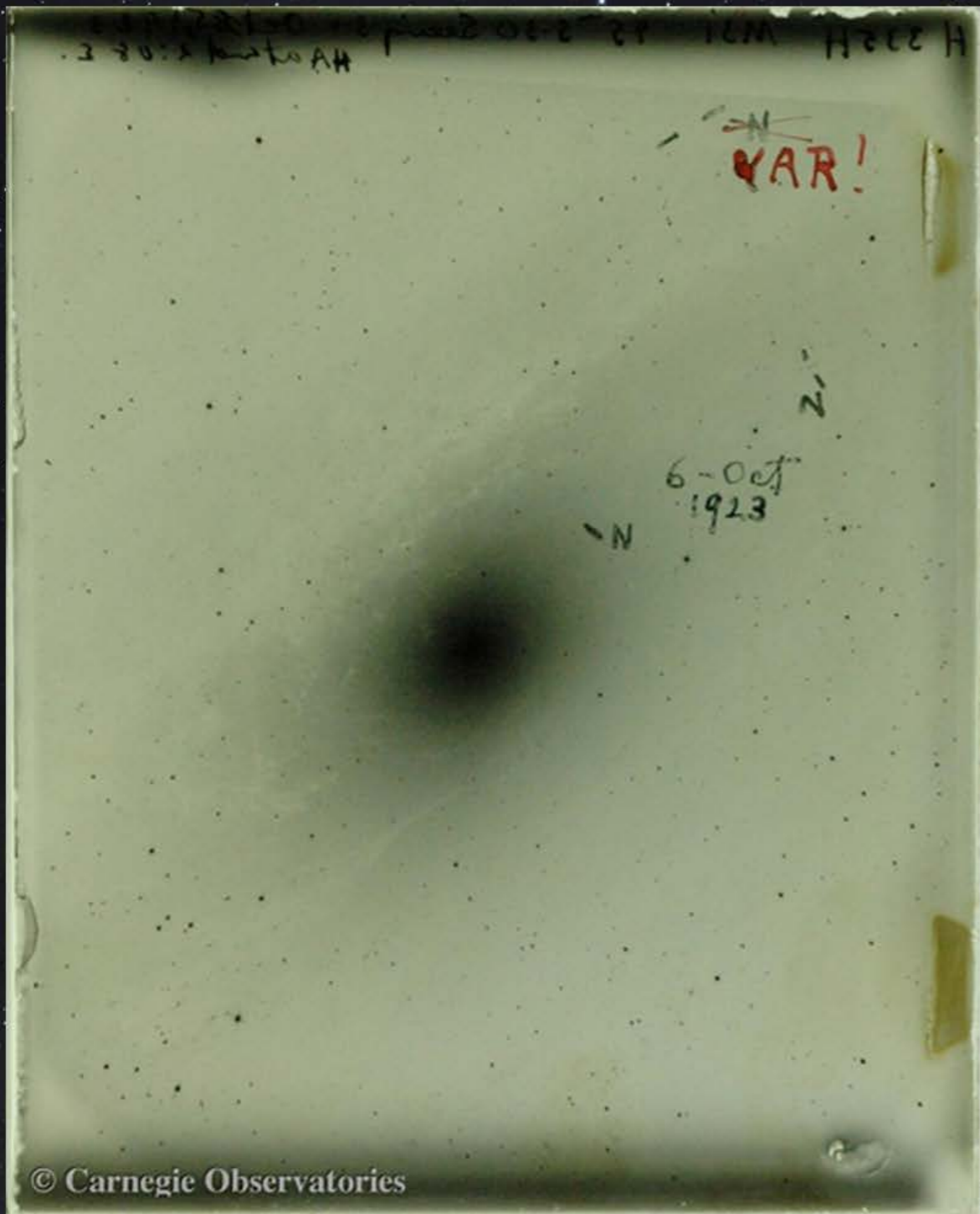






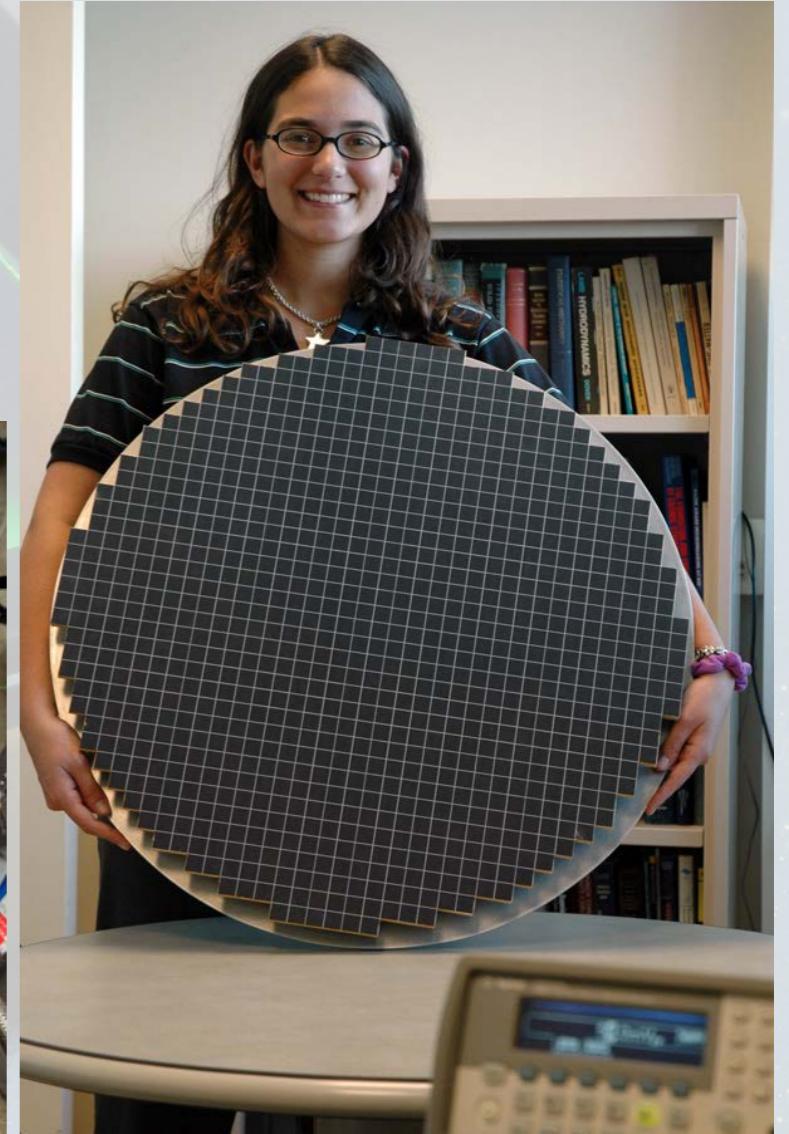
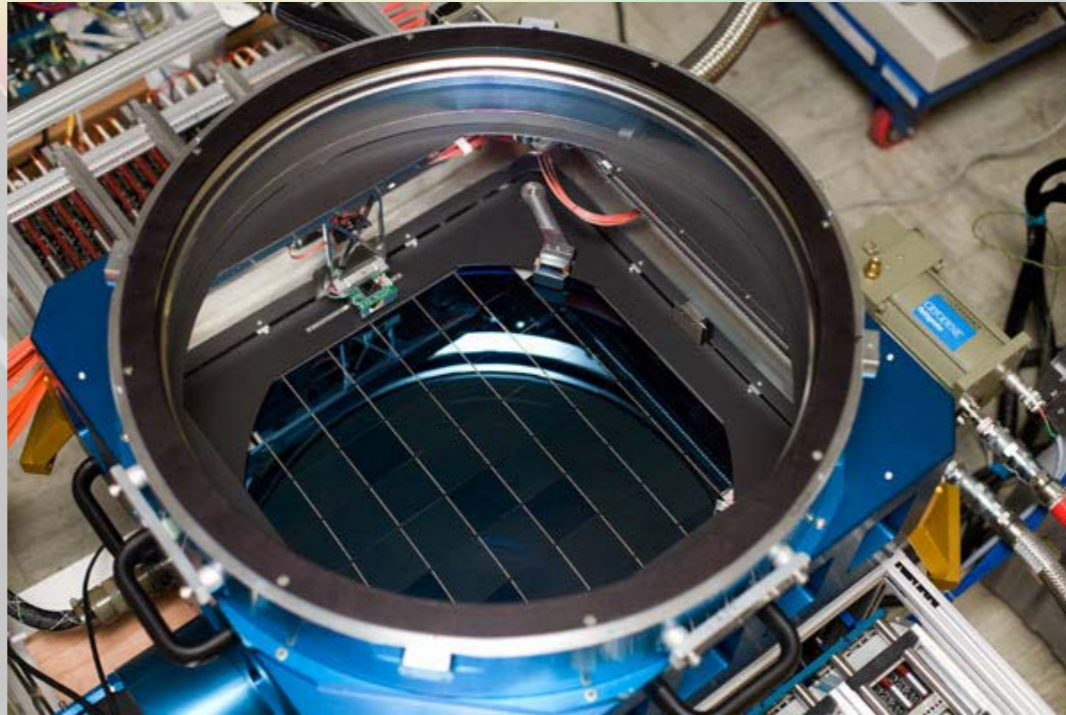
**Hubblova cefeida v M31 z domácí hvězdárny**



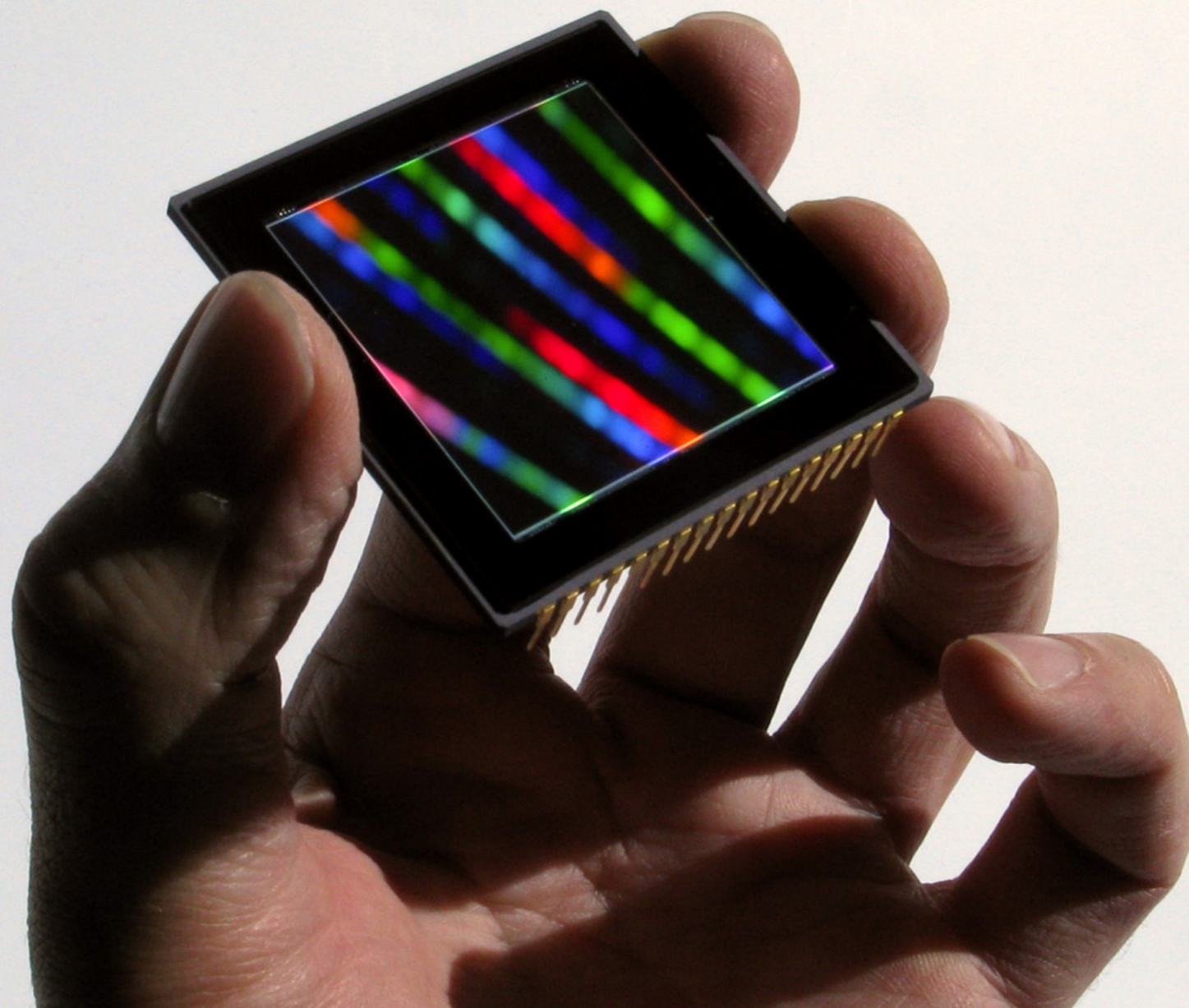


Na co byl  
zapotřebí  
2,5 m  
dalekohled  
s filmem,  
dnes stačí  
25 cm  
dalekohled  
s CCD nebo  
CMOS  
kamerou

# Moderní pole CCD detektorů dosahují rozlišení miliard pixelů



# Principy práce CCD a CMOS detektorů



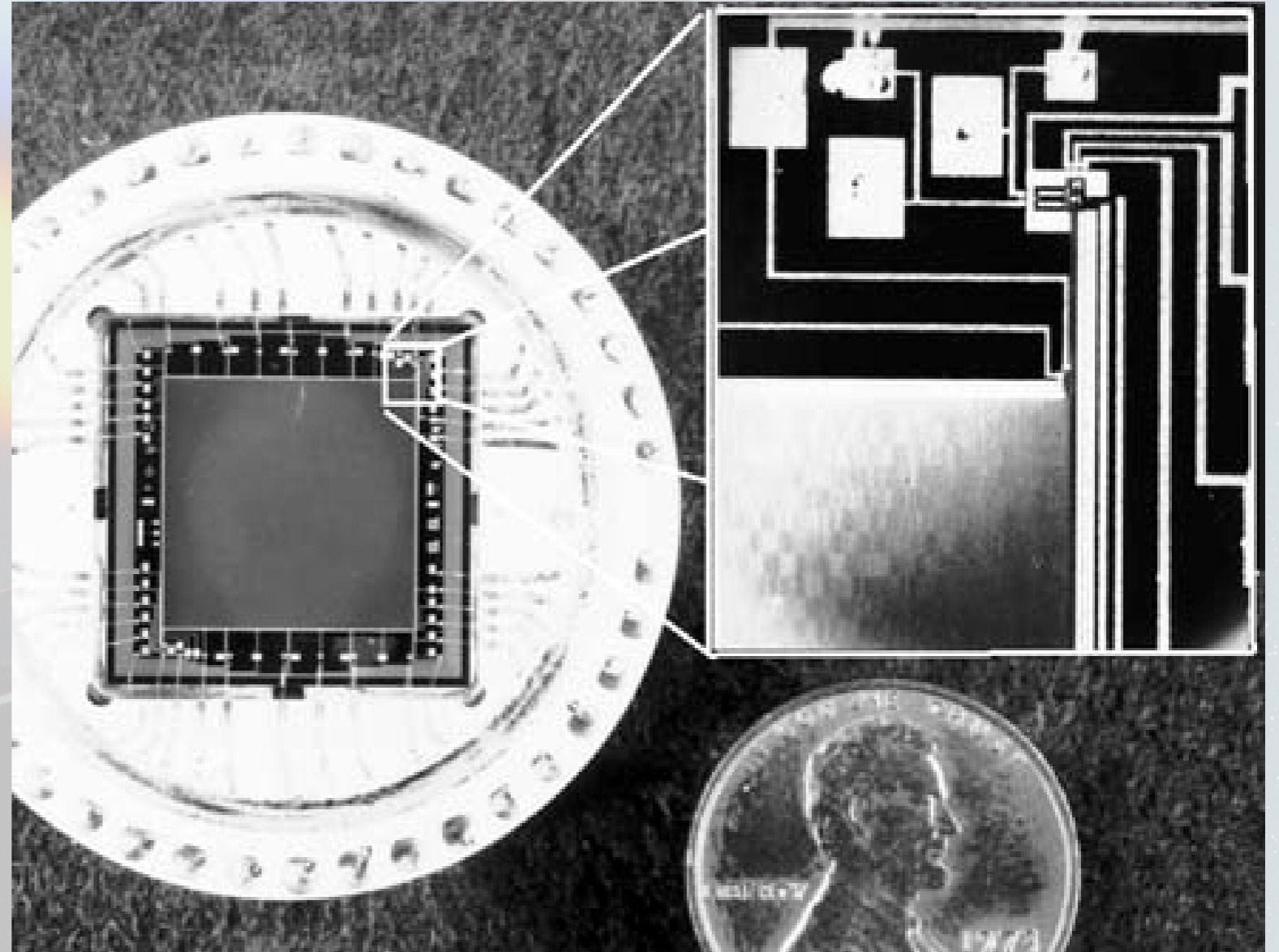
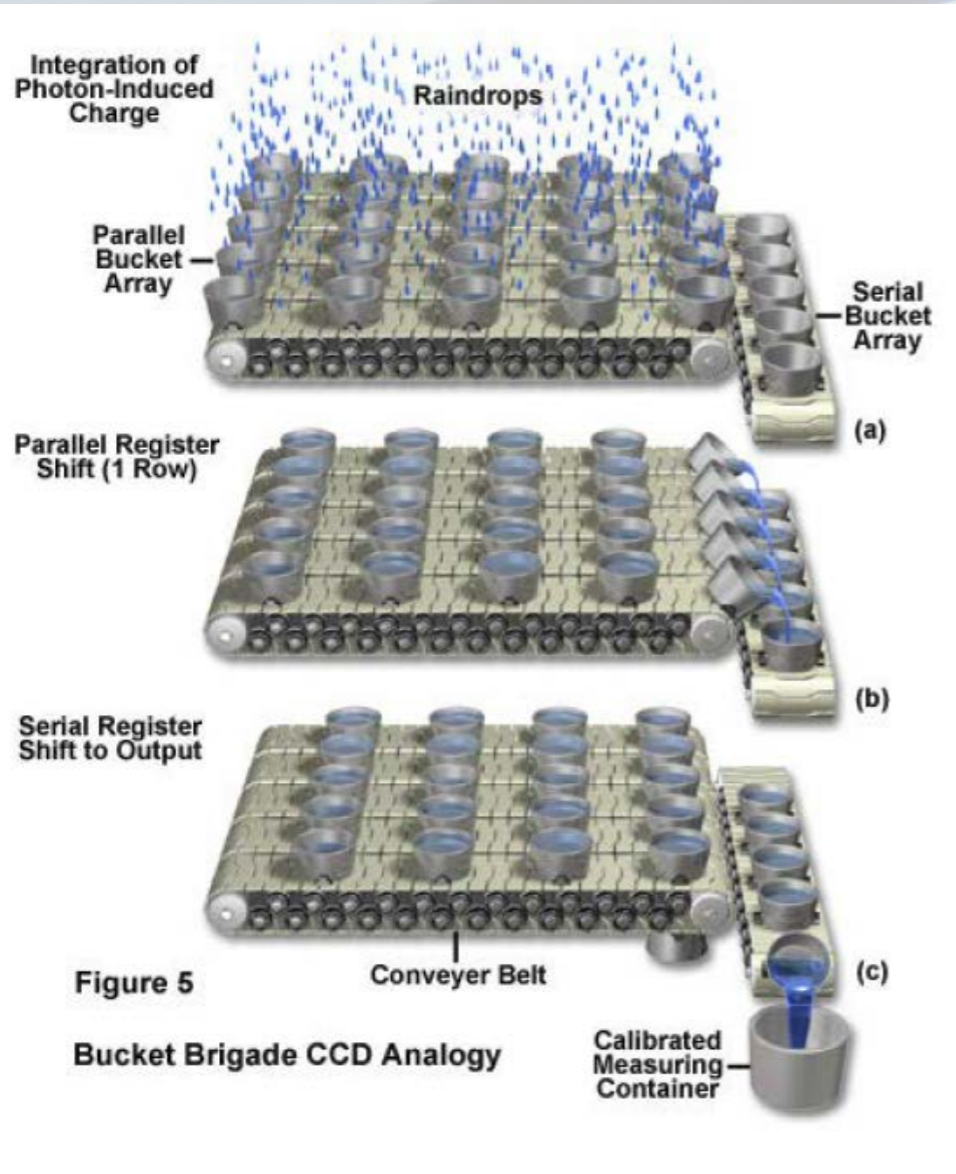
# Jak funguje CCD

- Základní princip práce CCD je poměrně jednoduchý — přicházející **světlo vytváří v polovodiči elektrický náboj** (elektrony).
- Elektrony se nemohou volně pohybovat po čipu, neboť na čipu jsou vytvořeny svislé negativní potenciálové valy (odpuzující elektrony).
- Systém vodorovných elektrod, rovněž s negativním nábojem, vytváří na čipu mřížku tzv. **potenciálových studní**, z nich elektrony nemohou uniknout.

## Jak funguje CCD (2)

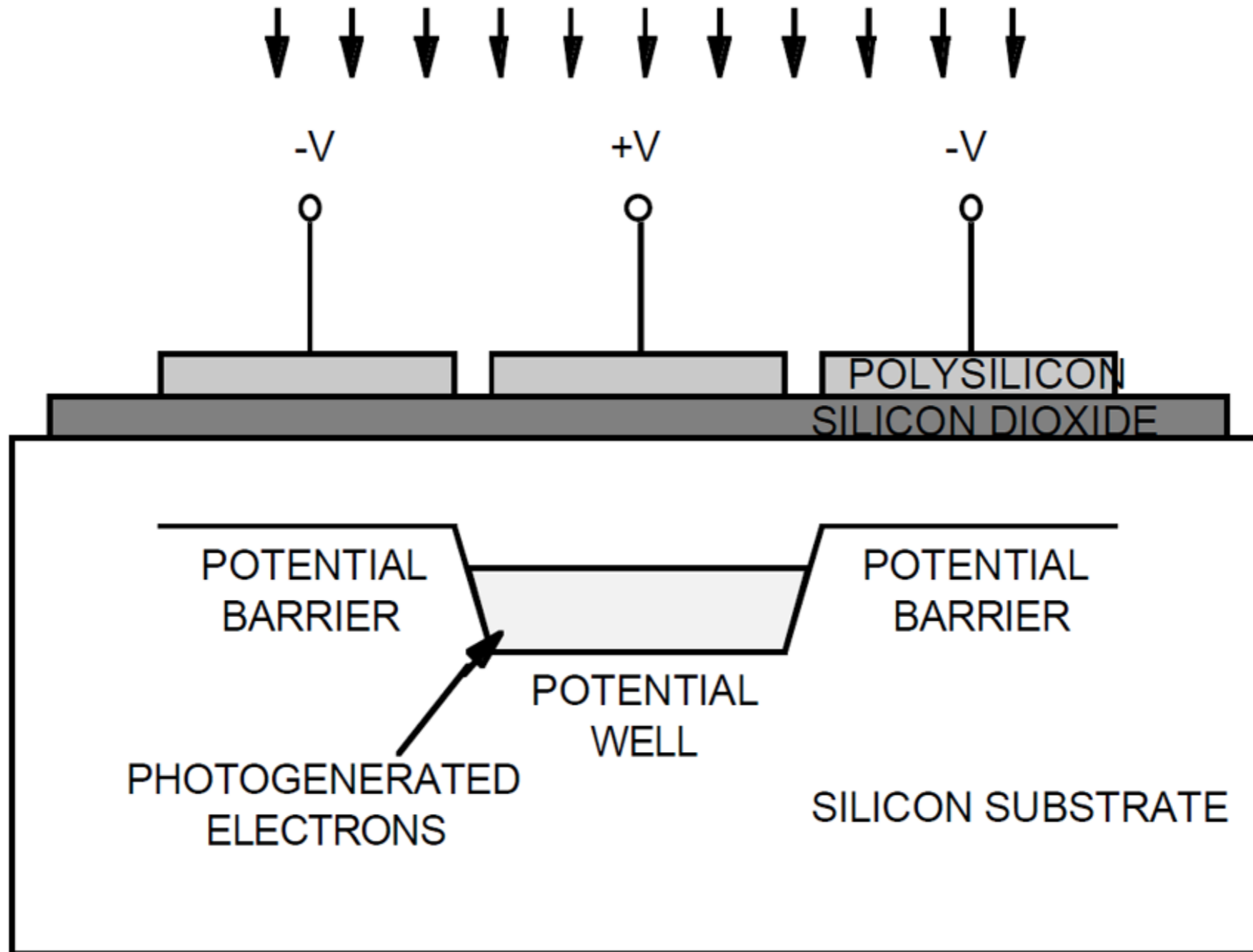
- Každá potenciálová studna reprezentuje jeden obrazový bod (tzv. **pixel** z anglického „picture element“), tedy nejmenší čtvereček obrazu.
  - Pixely vystavené většímu množství světla nashromáždí více elektronů a naopak.
- Jedna ze základních výhod CCD čipů ve srovnání s lidským okem tedy je **schopnost akumulace náboje** po dlouhou dobu.
  - CCD tak mohou postupně nashromáždit dostatek světla i z velmi slabých světelných zdrojů.

# Charge Coupled Device (Nábojově vázané prvky)



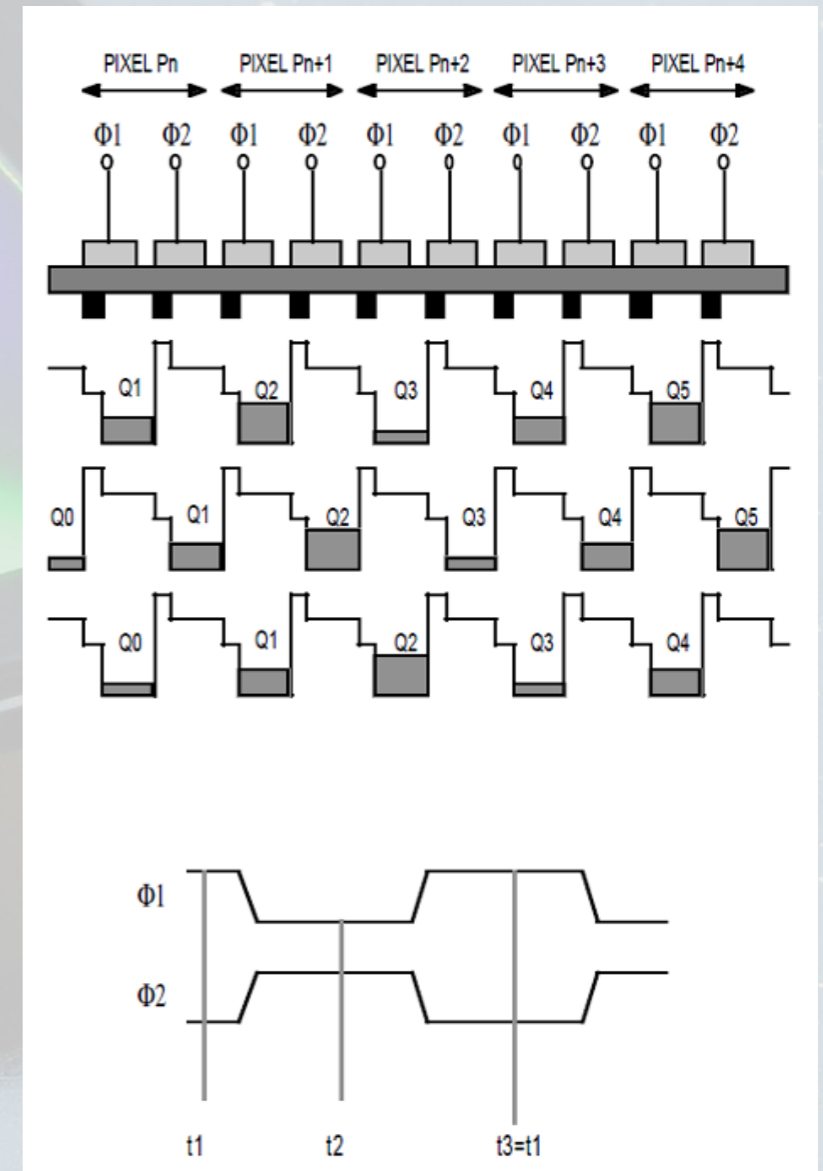
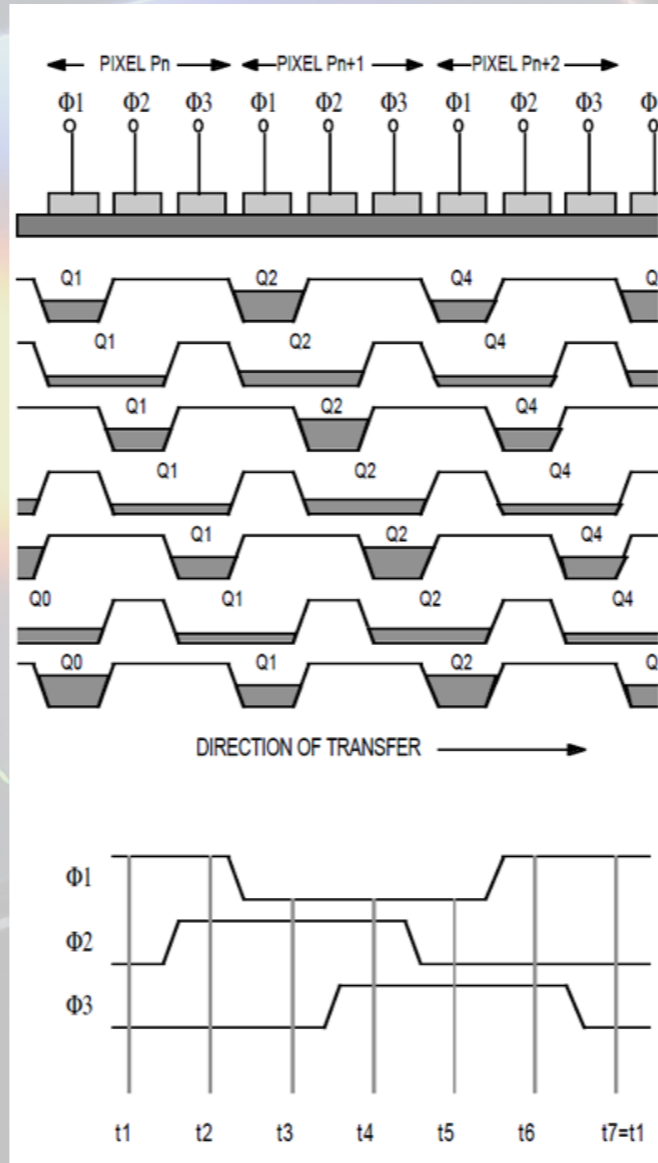


# INCIDENT LIGHT

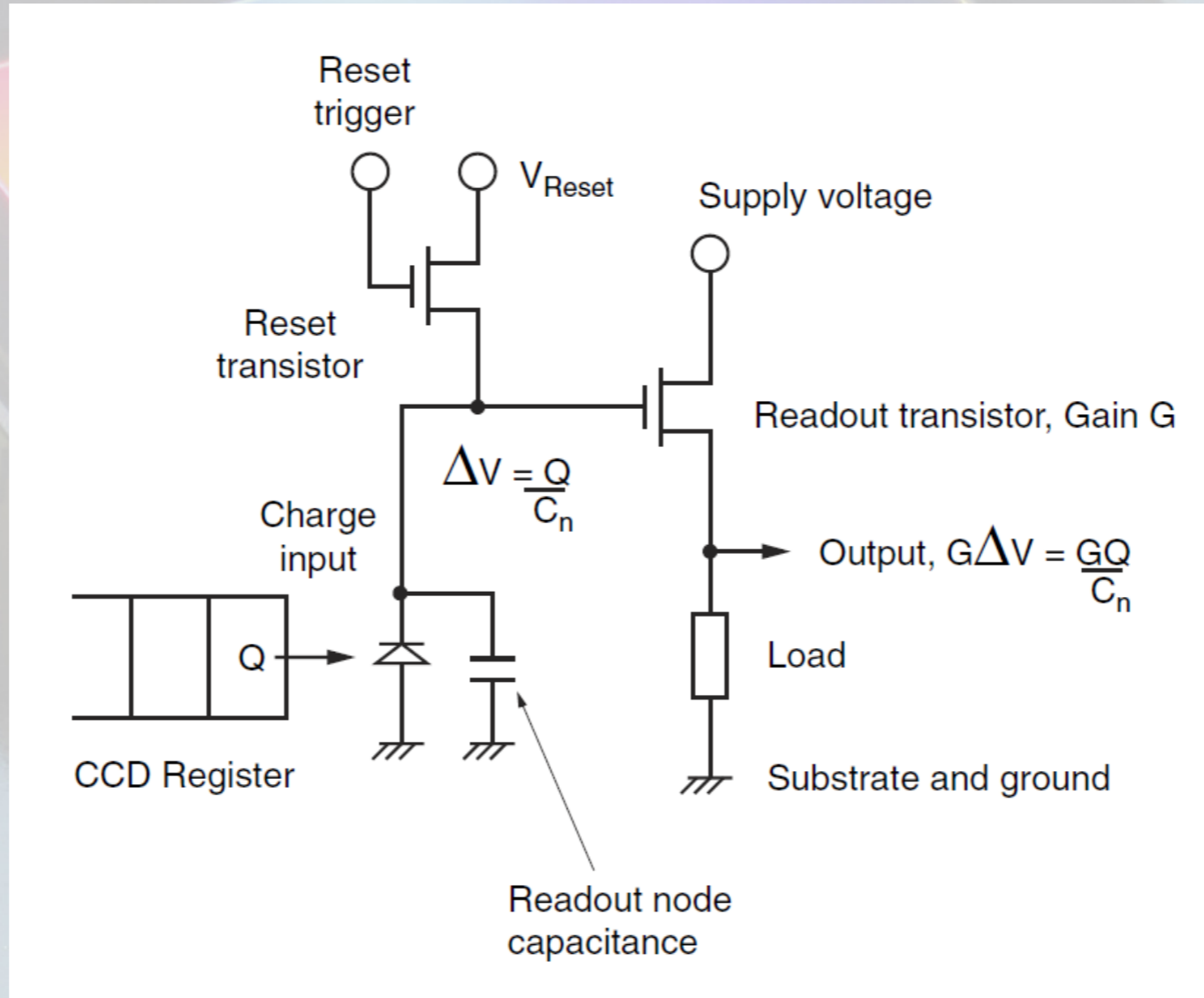


# Posun náboje (charge coupling)

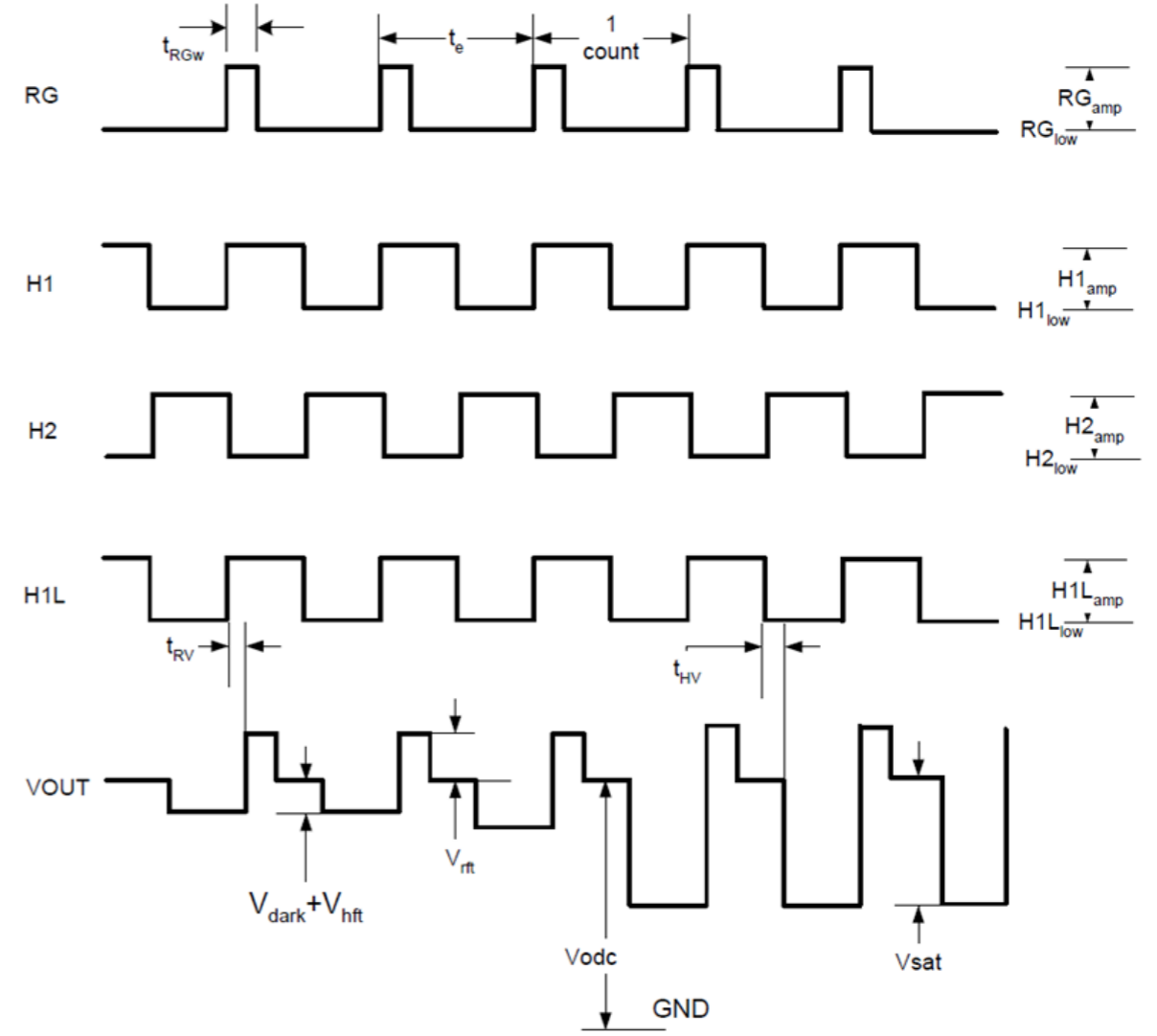
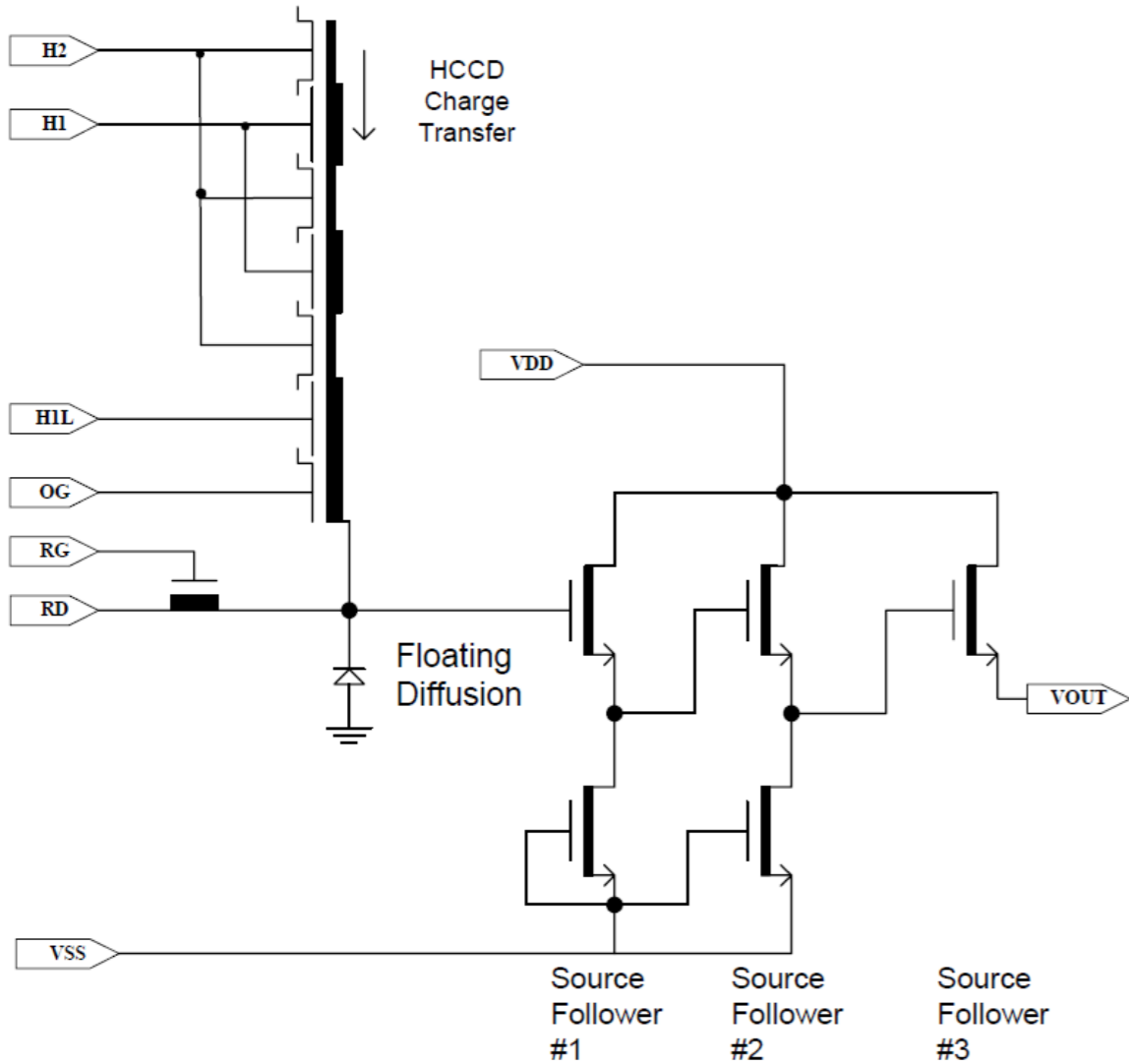
- Základní třífázový posun náboje (vlevo).
- Pravý dvoufázový posun náboje (vpravo).
  - Využívá schodového potenciálu pod řídicími elektrodami.



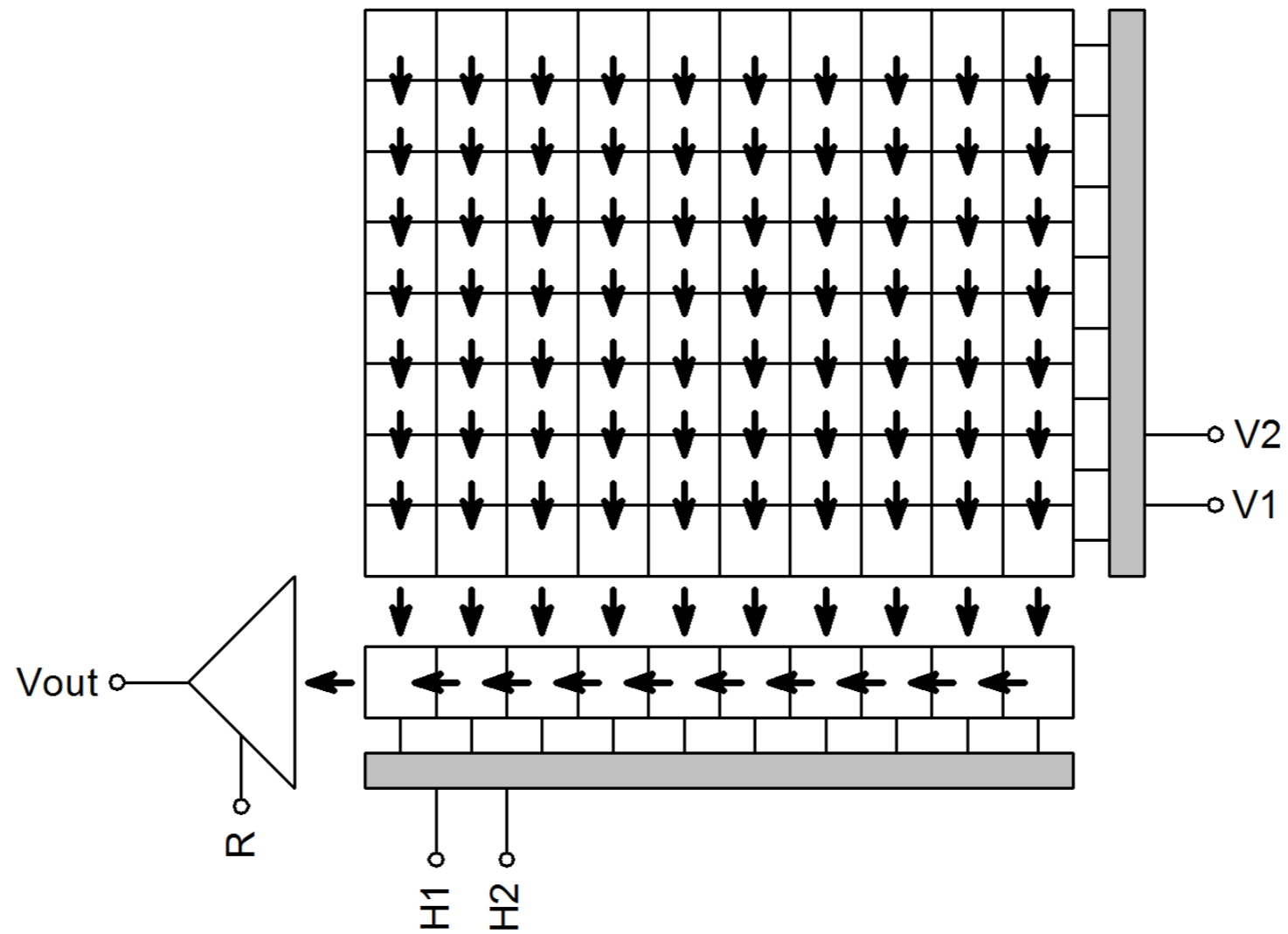
# Výstupní zesilovač CCD senzoru (převodník náboje na napětí)



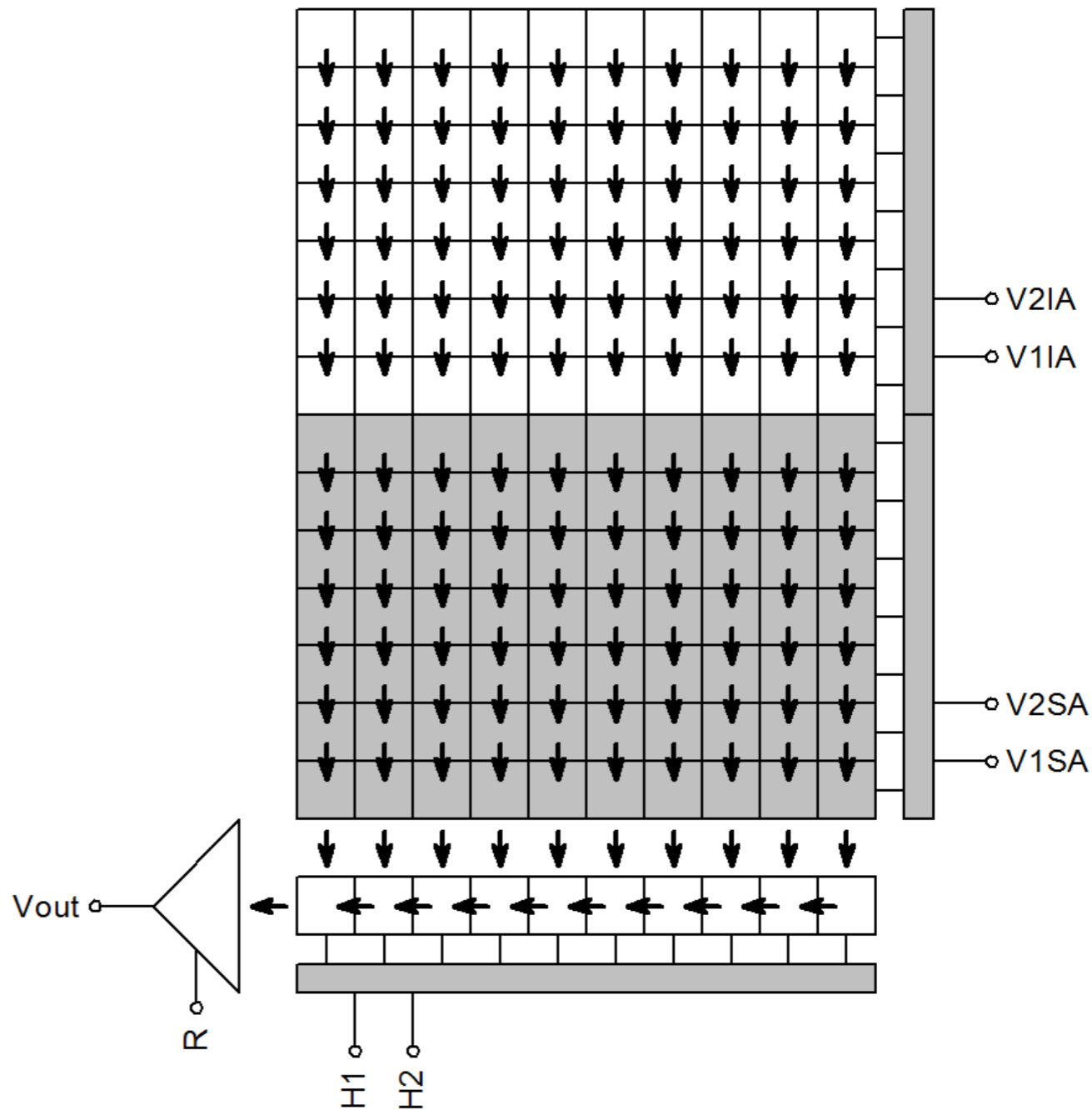
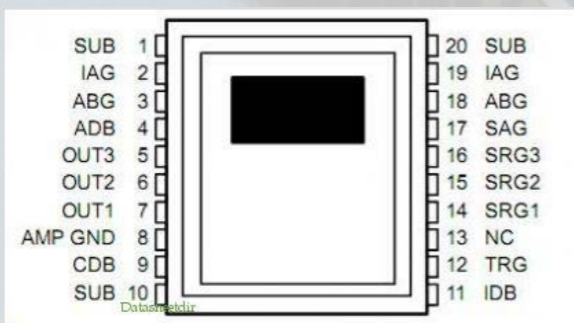
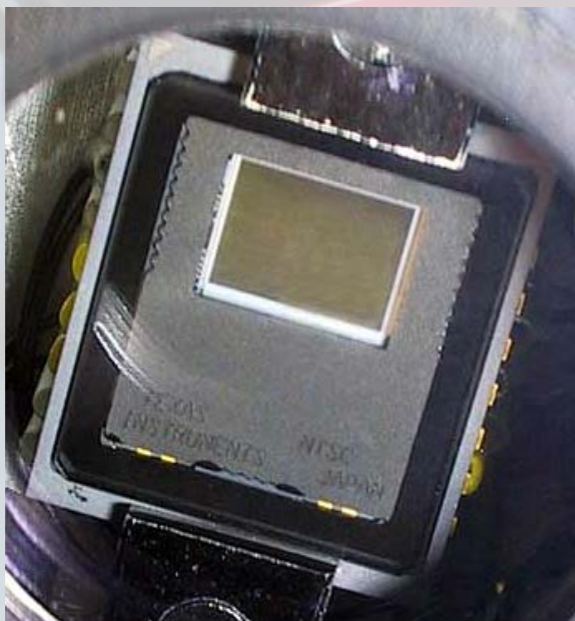
# Výstupní signál CCD senzoru



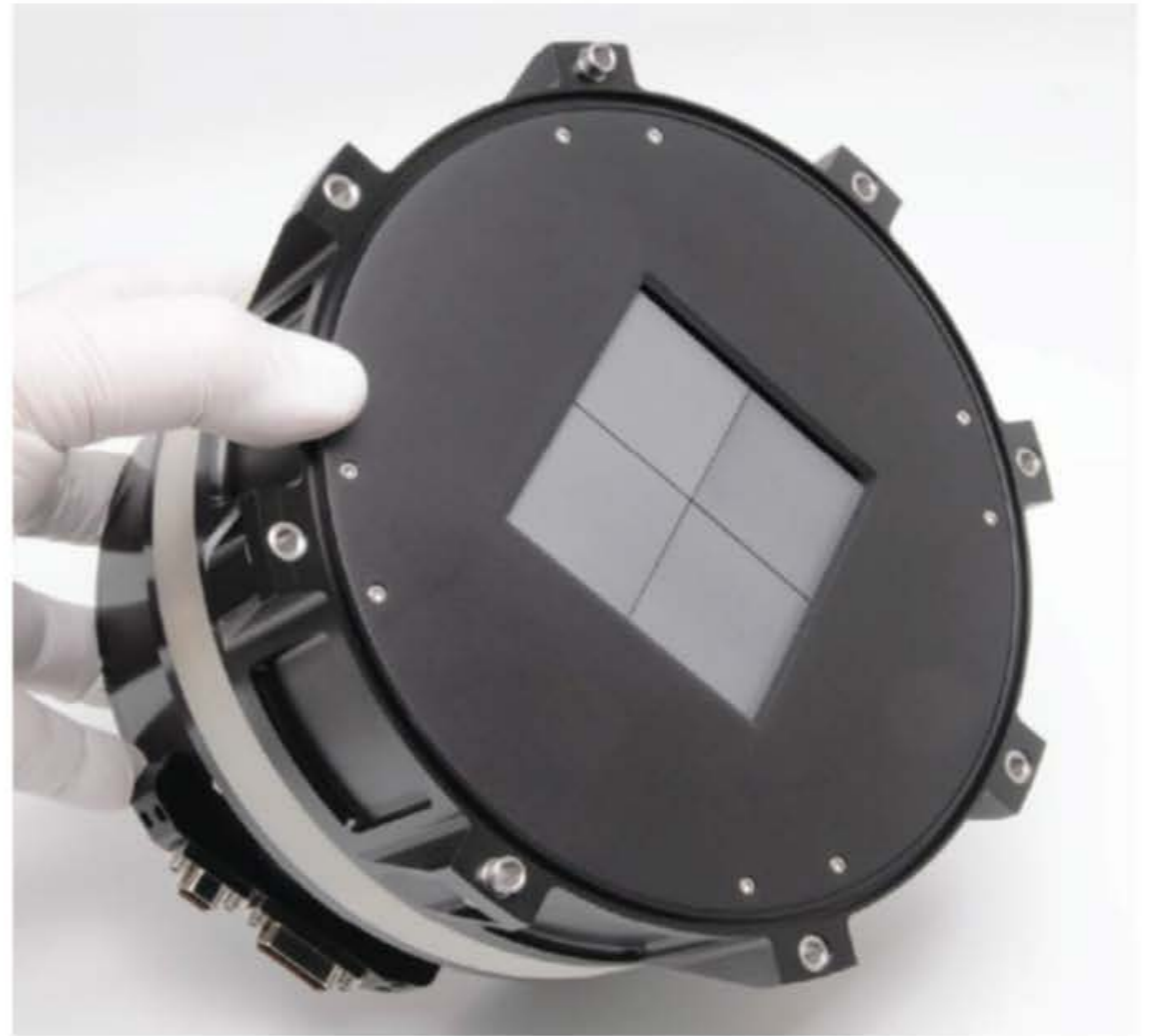
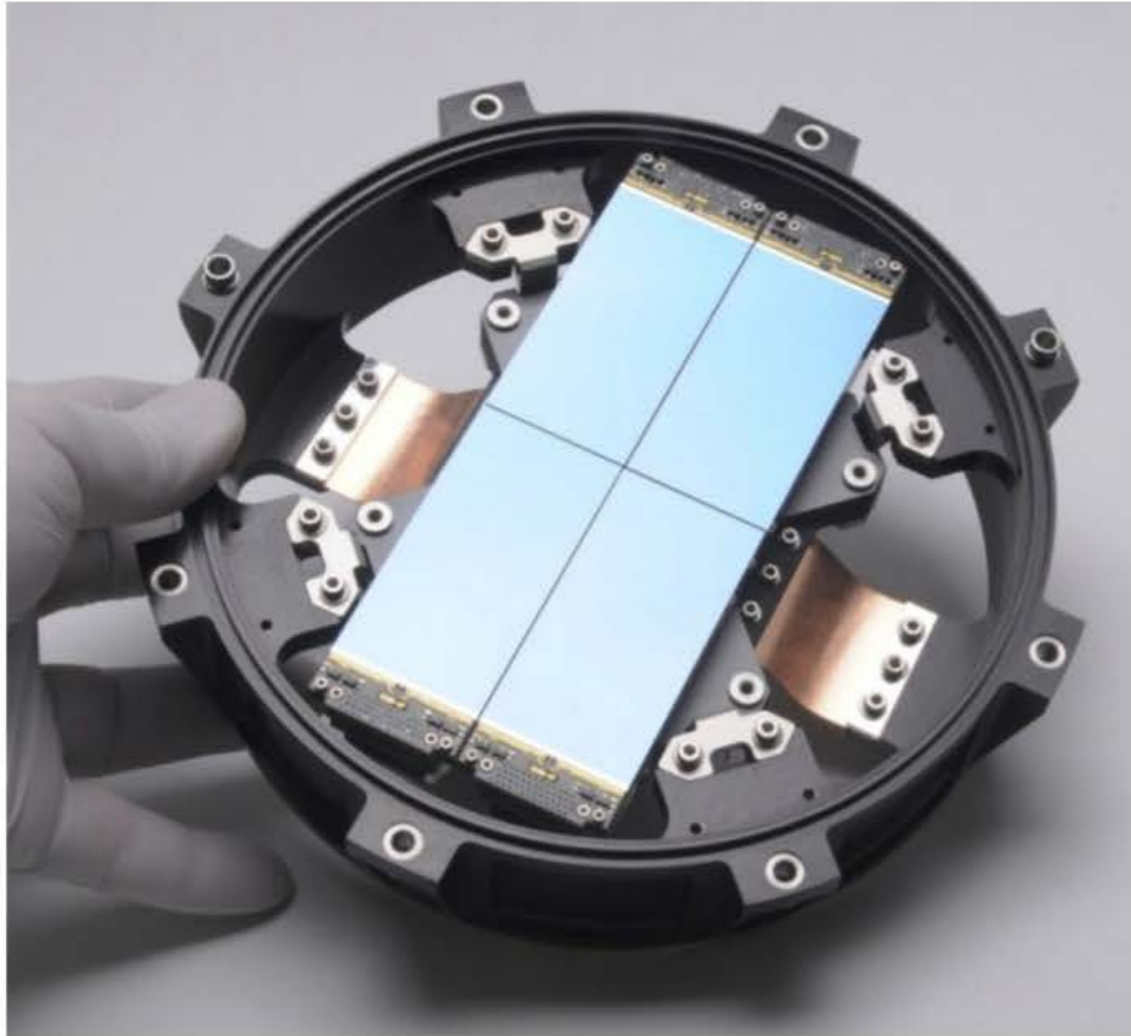
# Full Frame (FF) CCD sensor



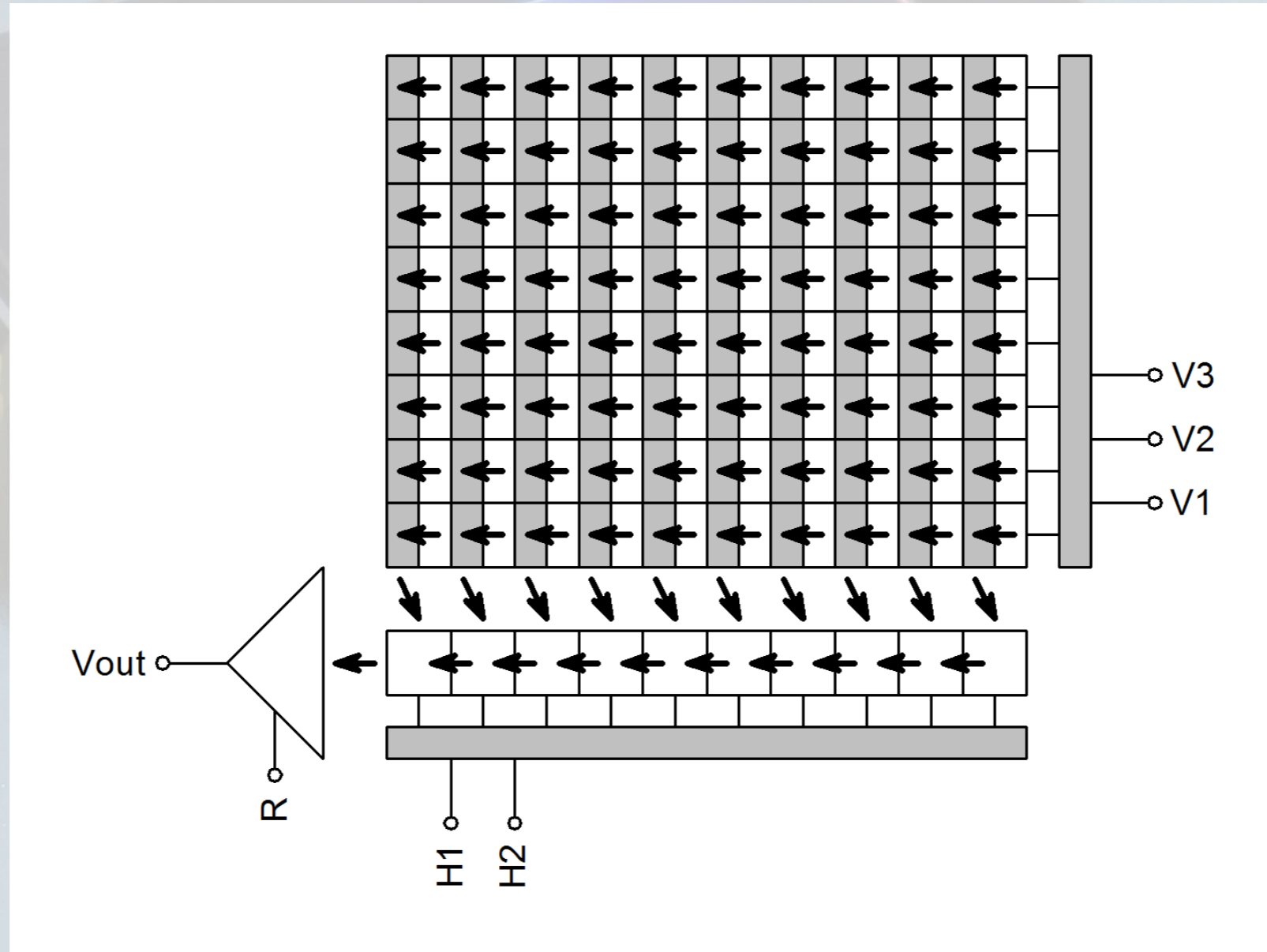
# Frame Transfer (FT) CCD sensor



# FT architektura CCD senzorů kamer TESS



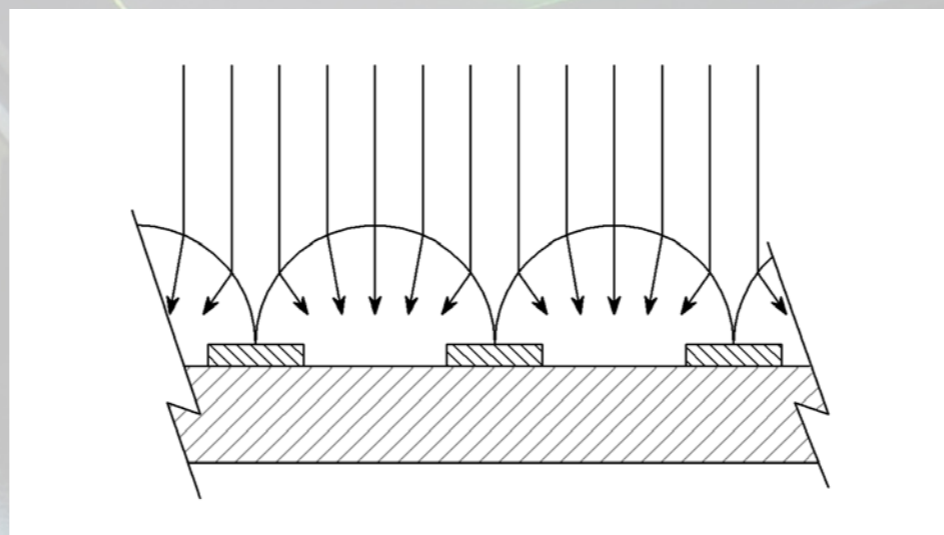
# Interline Transfer (IT) CCD sensor





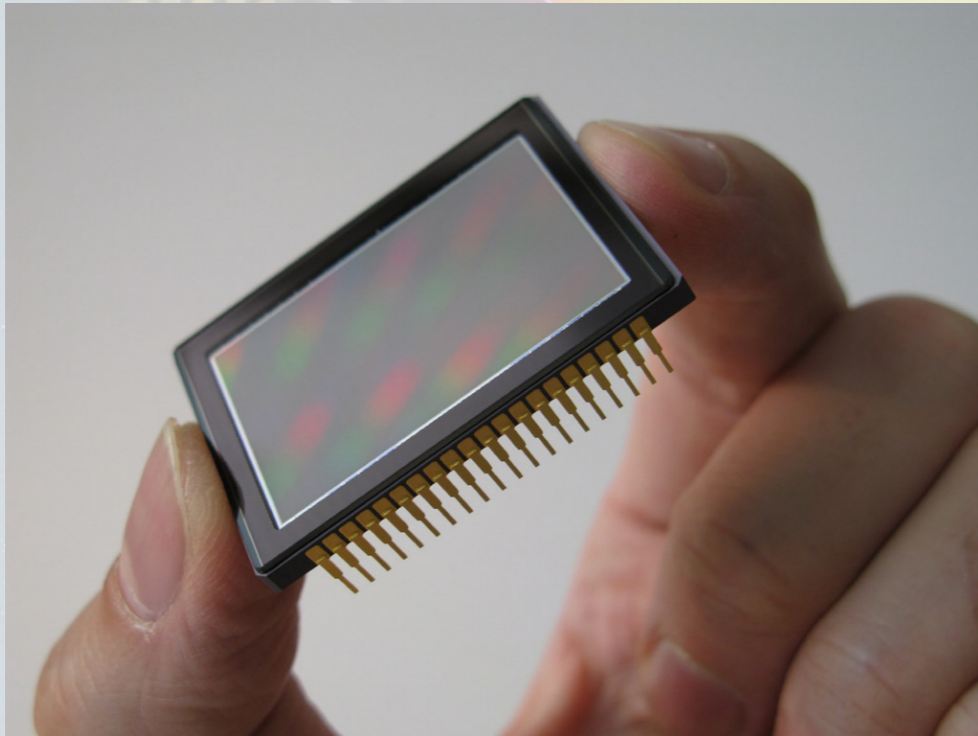
# Boj o kvantovou účinnost (mikročočky)

- Prokládání aktivních a neaktivních sloupců omezuje plochu, kterou čip shromažďuje světlo. Tento efekt může být částečně kompenzován pokročilými výrobními postupy, např. aplikací tzv. **mikročoček**.
- Mikročočky soustředí světlo z oblastí CCD čipu necitlivých na světlo (zastíněné vertikální sloupce) na aktivní světlocitlivé oblasti.



# Kvantová účinnost KAI-11002

- S mikročočkami (nahore)
- Bez mikročoček (dole)



Monochrome with Microlens Quantum Efficiency

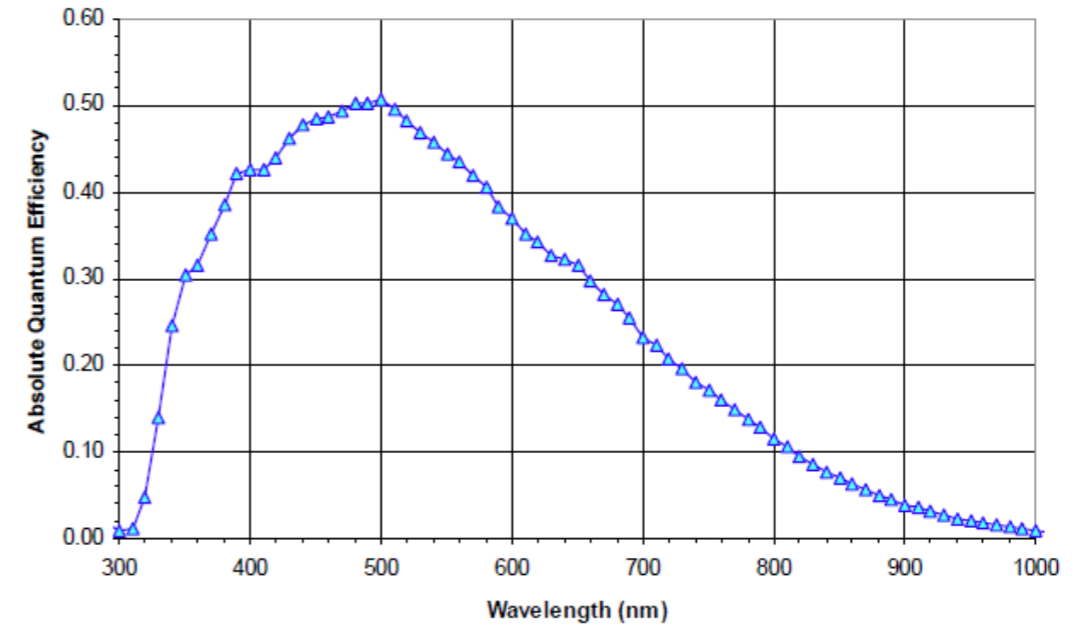


Figure 12: Monochrome with Microlens Quantum Efficiency

Monochrome without Microlens Quantum Efficiency

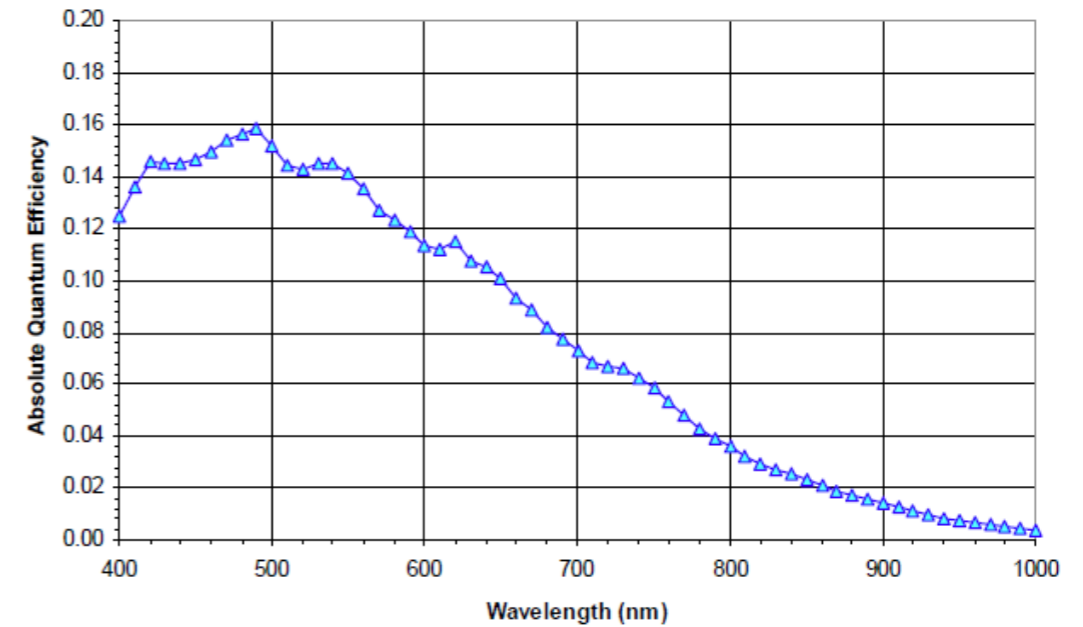
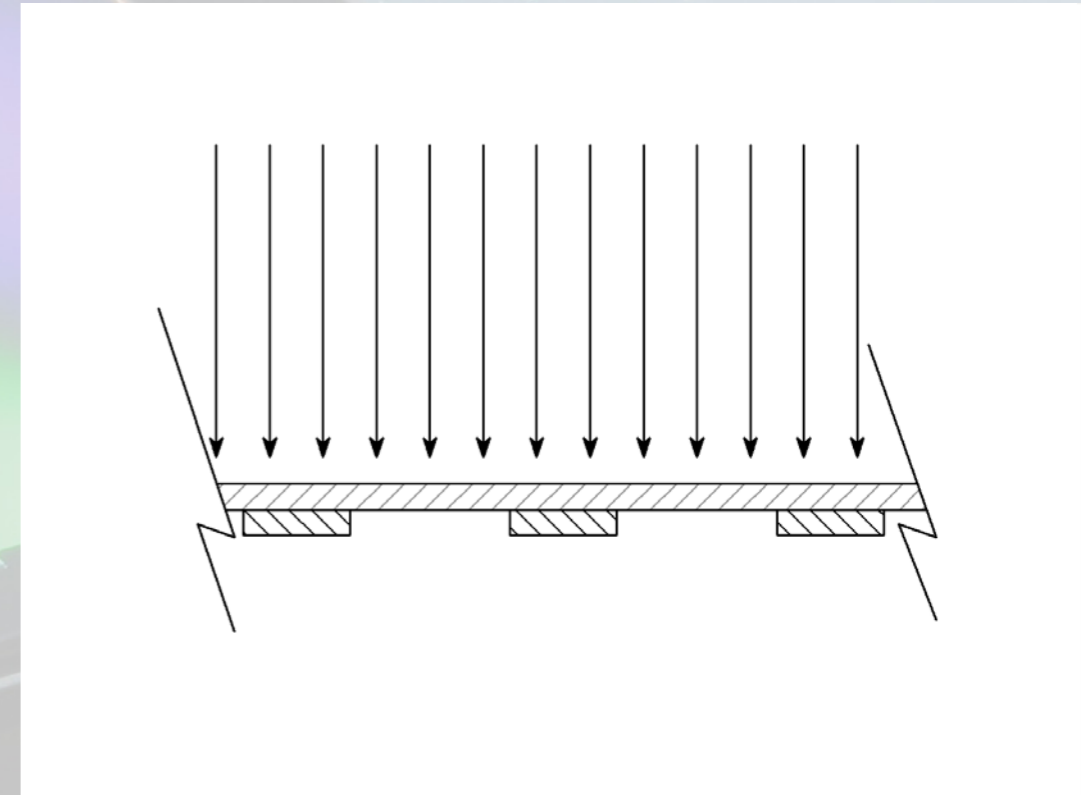


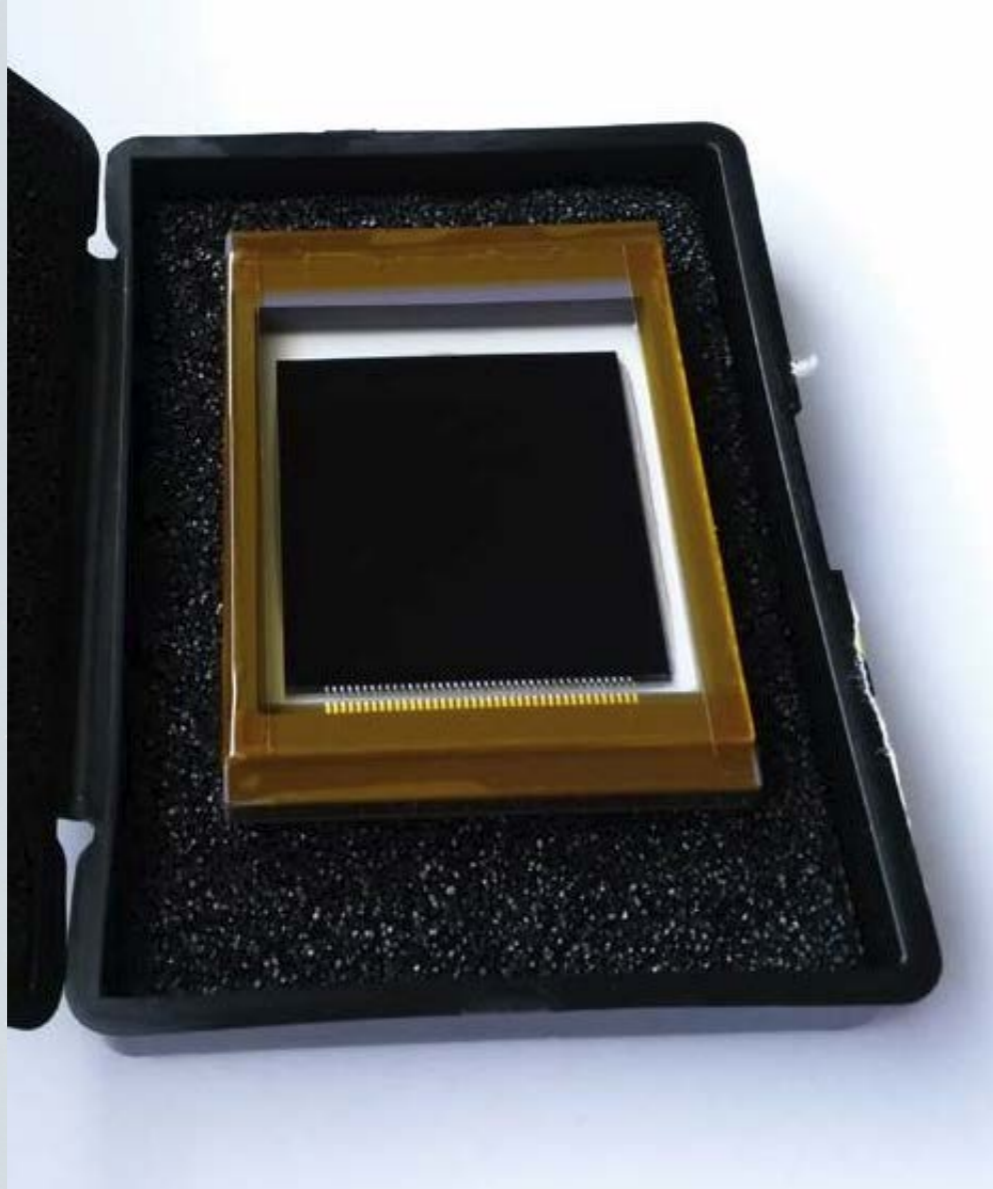
Figure 13: Monochrome without Microlens Quantum Efficiency

# Boj o kvantovou účinnost (Back-illuminated CCDs)

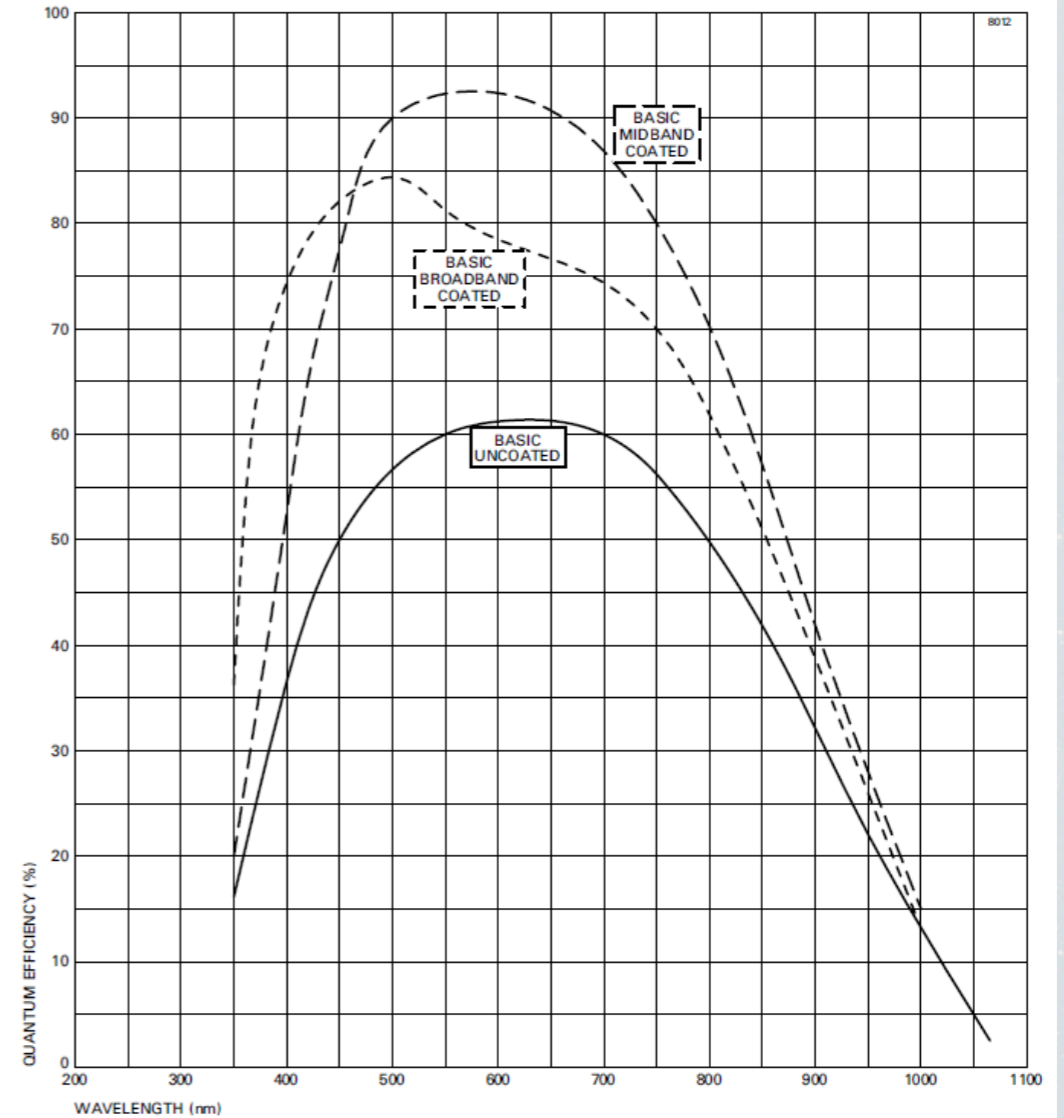
- Nejvyšší možné QE lze dosáhnout použitím tenčených čipů **osvětlovaných zezadu** (anglicky back-illuminated CCD).
- Tyto čipy jsou zapouzdřeny „vzhůru nohama“, takže elektrody jsou na spodní straně čipu a neblokují přicházející světlo.
- Samotný čip je velmi ztenčen až na tloušťku několika mikrometrů. Prakticky celá zadní strana čipu je tedy vystavena světlu.



# Back-illuminated CCD firmy E2V

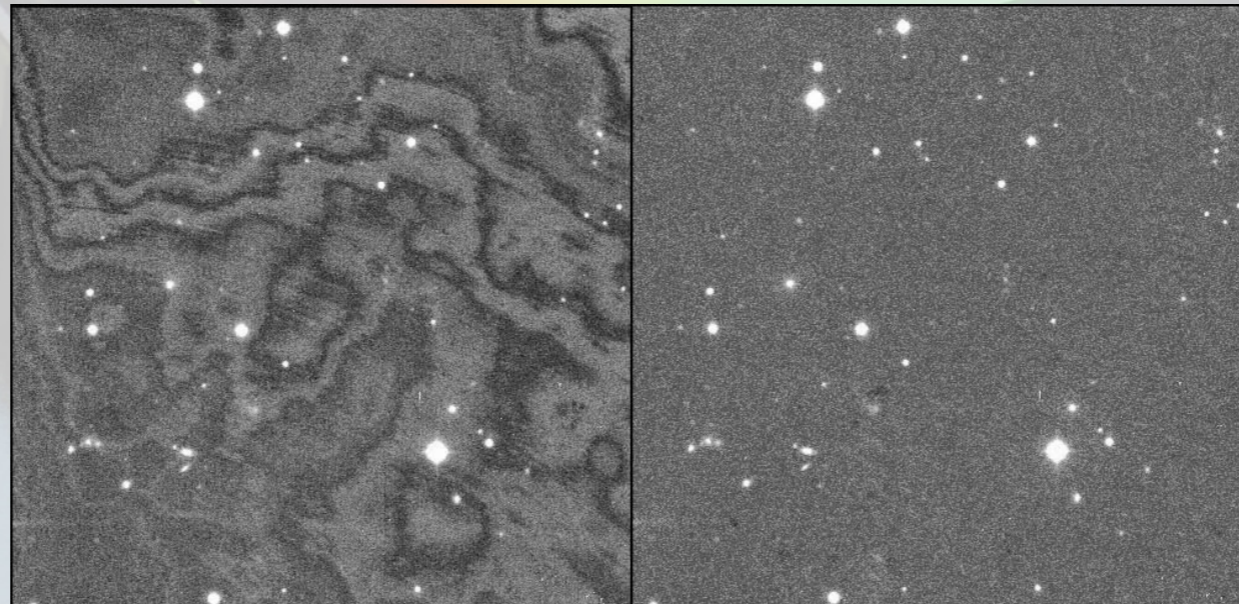


TYPICAL SPECTRAL RESPONSE (At  $-20^{\circ}\text{C}$ , no window)



# Back-illuminated CCDs

- Výroba tenčených čipů je ale velmi náročná a čipy jsou hodně drahé.
- Osvětlení zezadu také může způsobovat některé negativní efekty, jako jsou např. interferenční obrazce způsobené infračerveným zářením atmosféry („fringing“ – třásně).



# CMOS a/nebo CCD senzory

- 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 FE tranzistory.
- Velice 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
- ( $\pm$ ) Dynamický rozsah
- (-) Vyšší čtecí šum
- (+) Elektroluminiscenci lze zcela eliminovat
- (-) Kosmetické vady (vadné sloupce)

## (ne) výhody CMOS

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

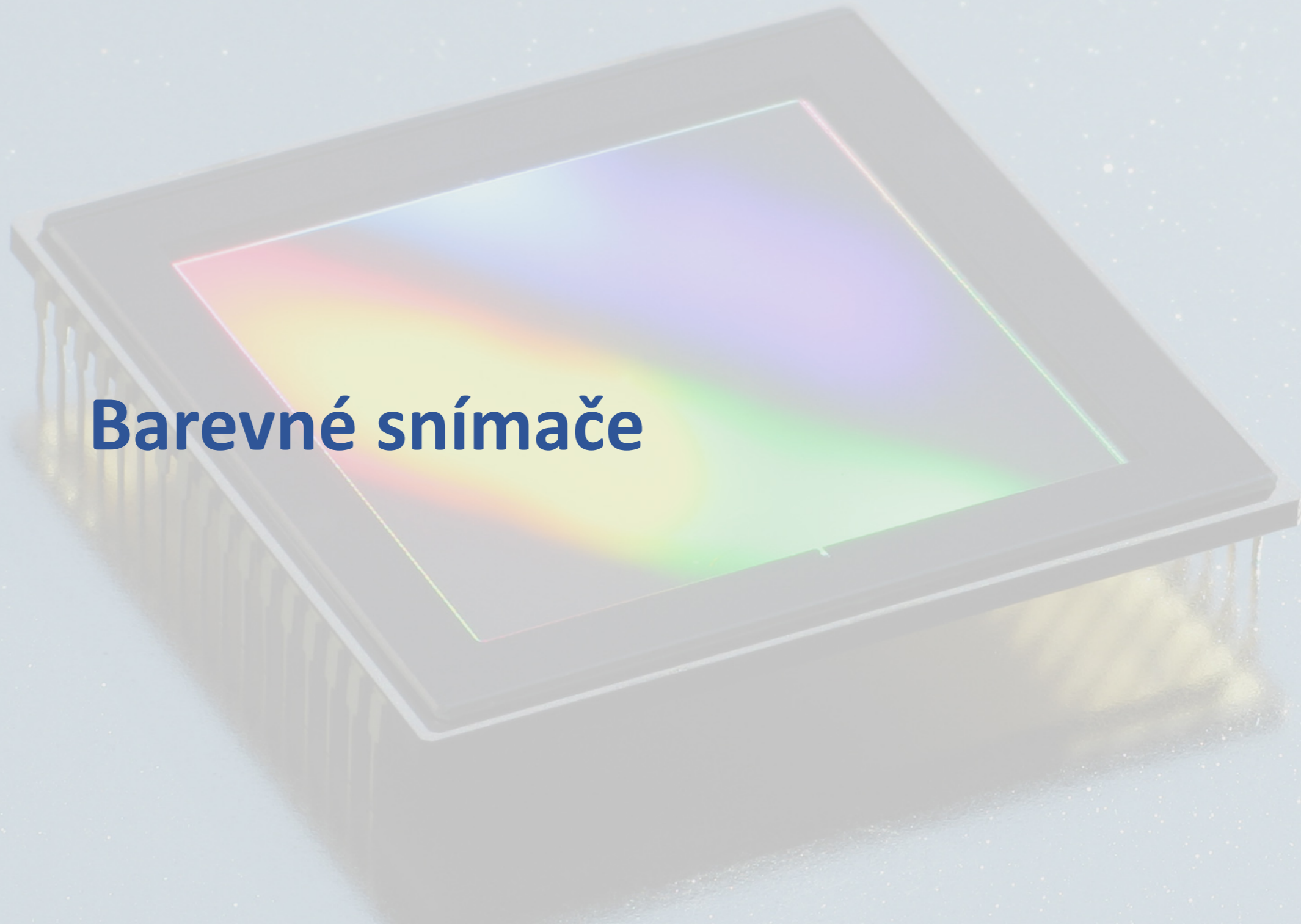
## (ne) výhody CCD

- (+) 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

# Barevné snímače



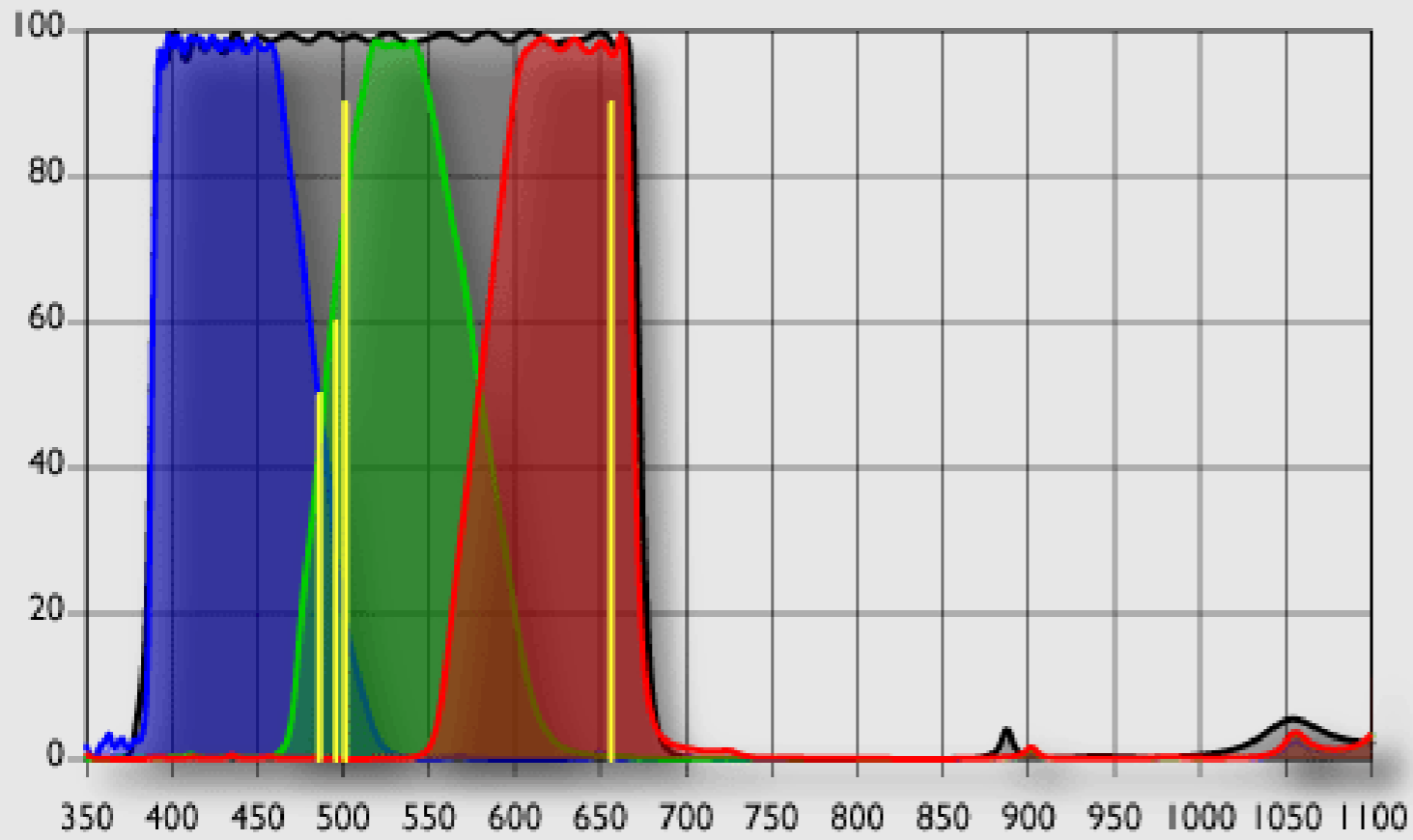
# Barevné snímky

- Abychom vytvořili barevný obraz, potřebujeme snímat zvlášť ve třech barvách – v **červené, zelené a modré**.
  - Za to může přítomnost tří druhů světločivých buněk – čípků – na sítnici našeho oka, citlivých právě na červenou, zelenou a modrou barvu.
- Ale CCD snímač je citlivý na všechny barvy a dokonce zasahuje i mimo viditelné spektrum do části ultra-fialové a blízké infra-červené oblasti.
- K detekci pouze požadované barvy je tedy zapotřebí světlo filtrovat.

# Snímání barevných snímků

- V principu lze filtry k vytvoření barevného obrazu použít dvěma způsoby:
  1. Je možné exponovat samostatné snímky s monochromním čipem přes červený, zelený a modrý filtr.
    - Obraz pak není možné pořídit najednou, je nutno více expozič.
    - Zejména u pohybujících se objektů (třeba u komet) to je vážná komplikace.
  2. Je také možné aplikovat filtry přímo na pixely snímače.
    - Barevný obraz je pak možné získat jedinou expozič.
    - Ve všech aplikacích kromě specializovaných kamer jsou barevné senzory.

# RGB filtry pro monochromní snímače





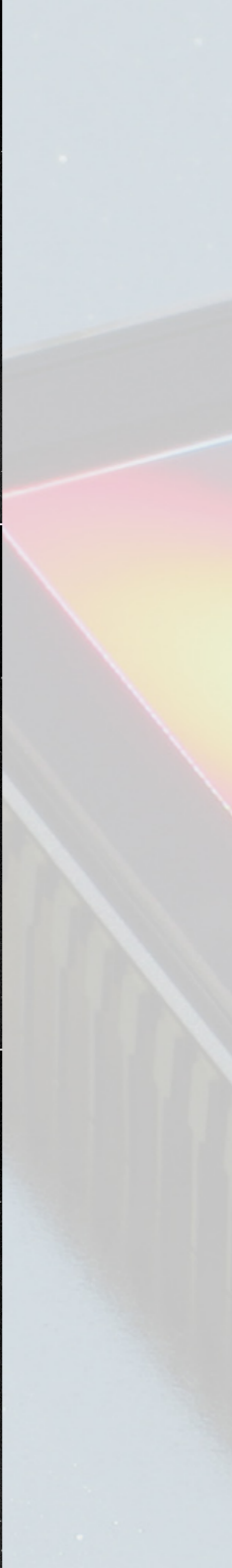
Červená



Zelená

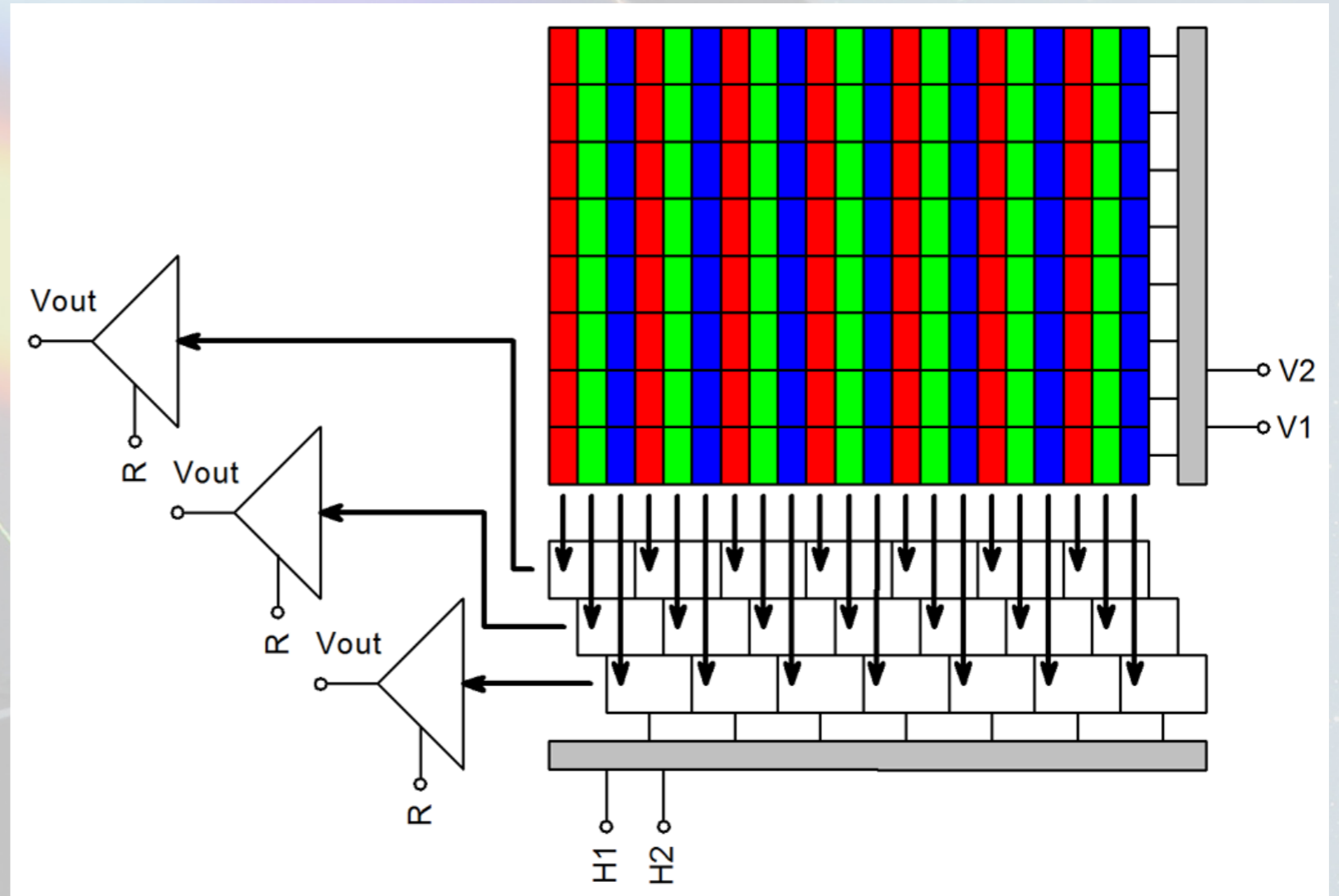


Modrá



# Barevné CCD snímače

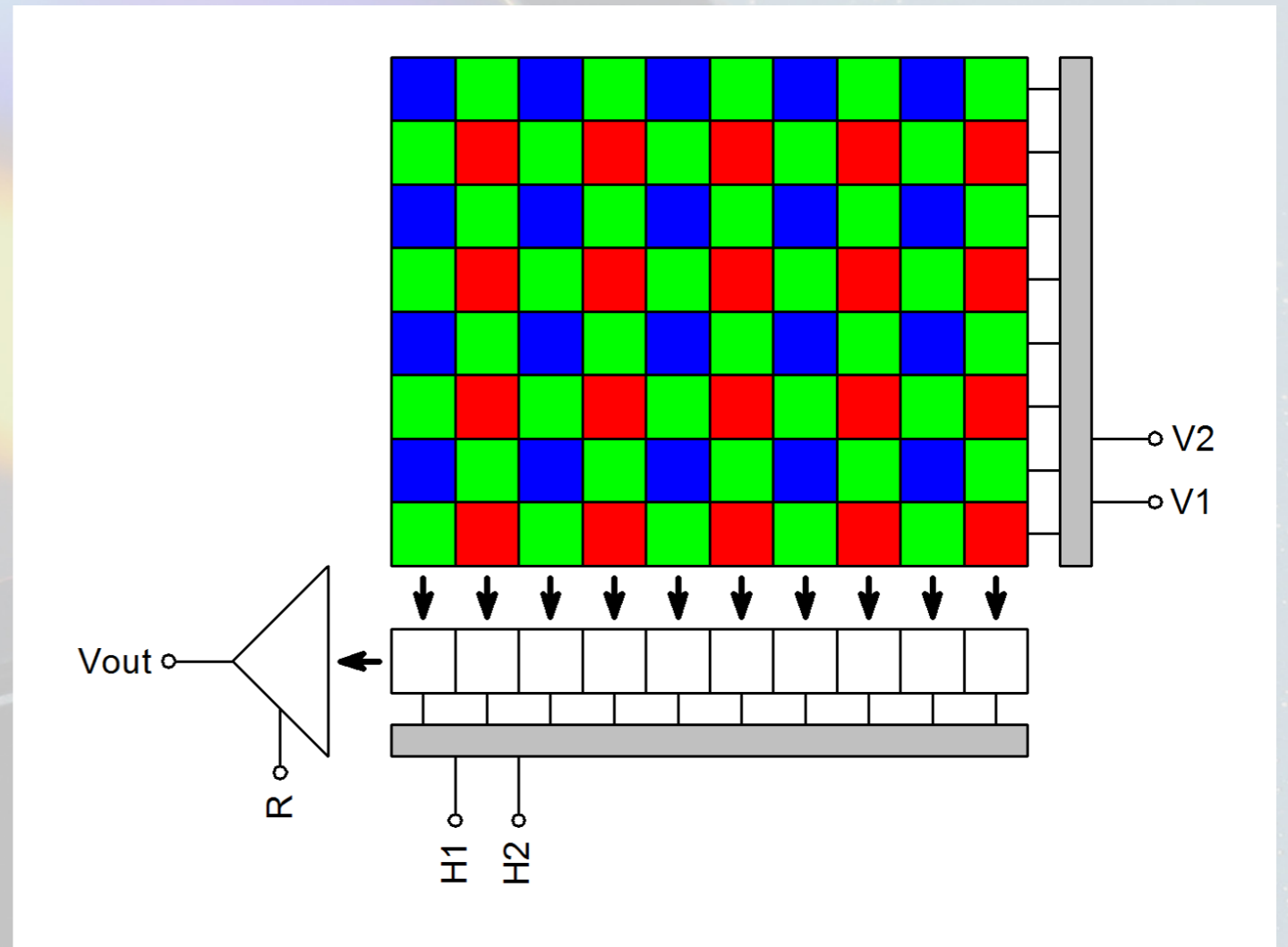
- První barevné CCD snímače pracovaly s celým sloupcem pixelů zakrytým jednou barevnou maskou.
- Rozlišení senzoru v osách X a Y bylo odlišné.



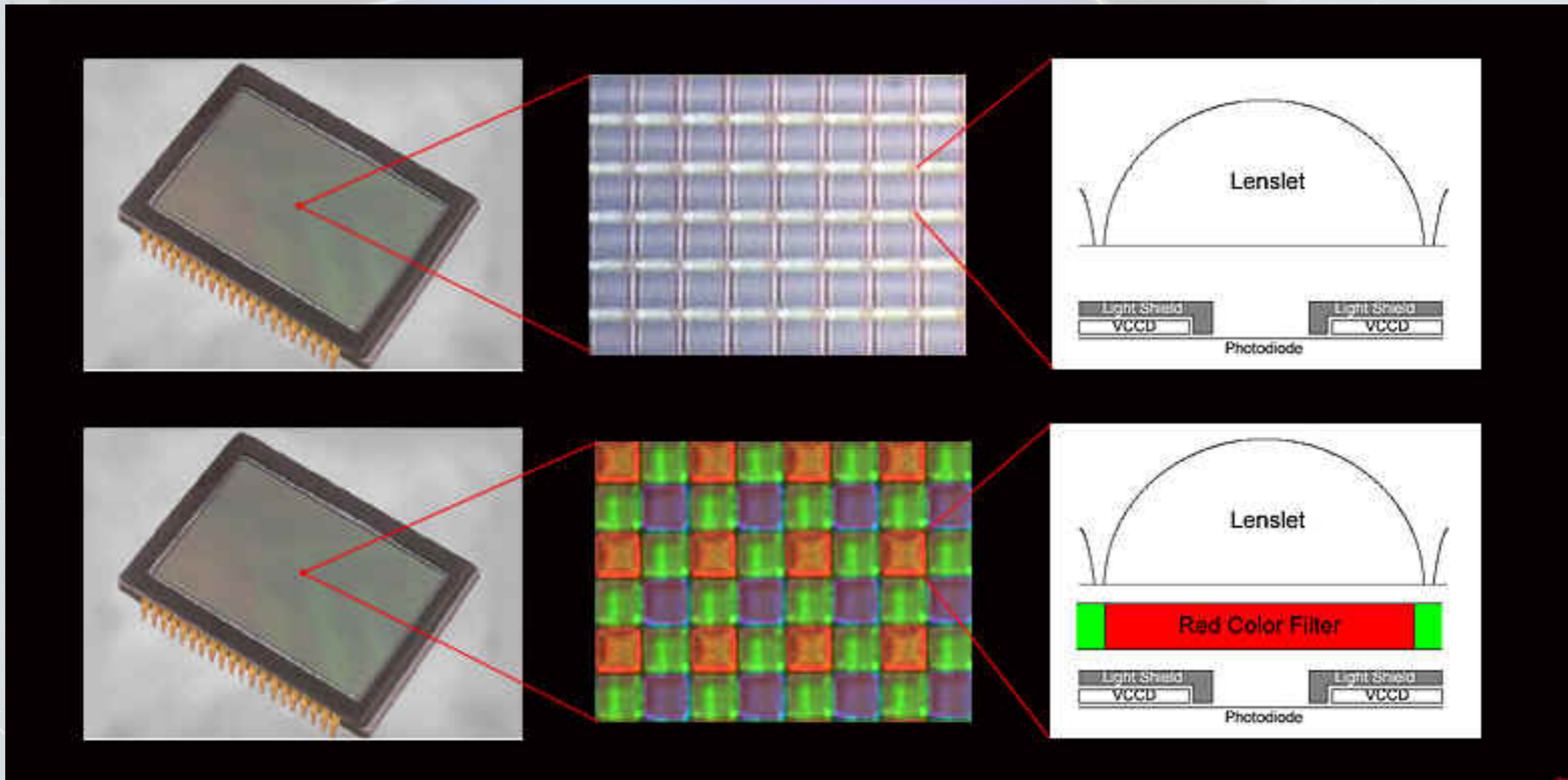


# Bayerova maska

- Dnešní barevné CCD čipy používají tzv. Bayerovy masky.
- Bryce E. Bayer, zaměstnanec firmy Kodak, přišel s ideou barevné masky, která je dnes používána u prakticky všech barevných CCD a CMOS snímačů.

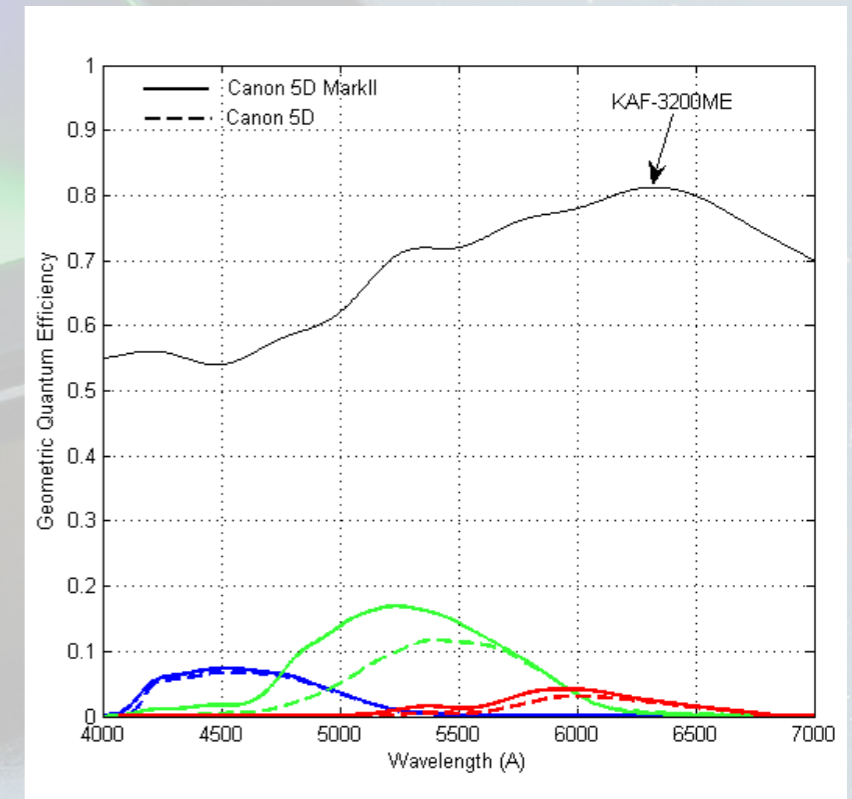
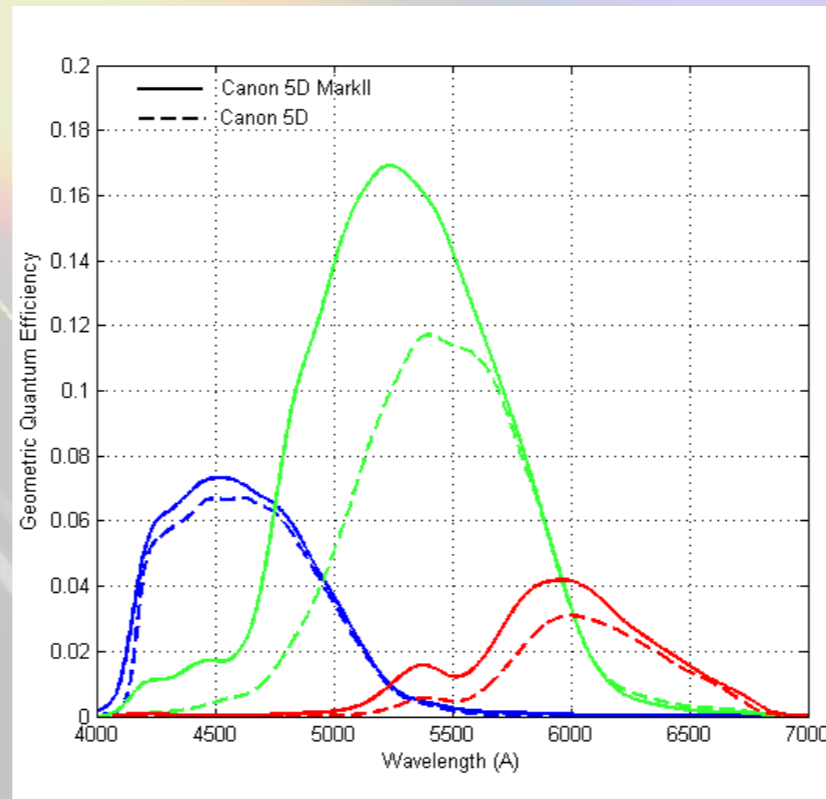
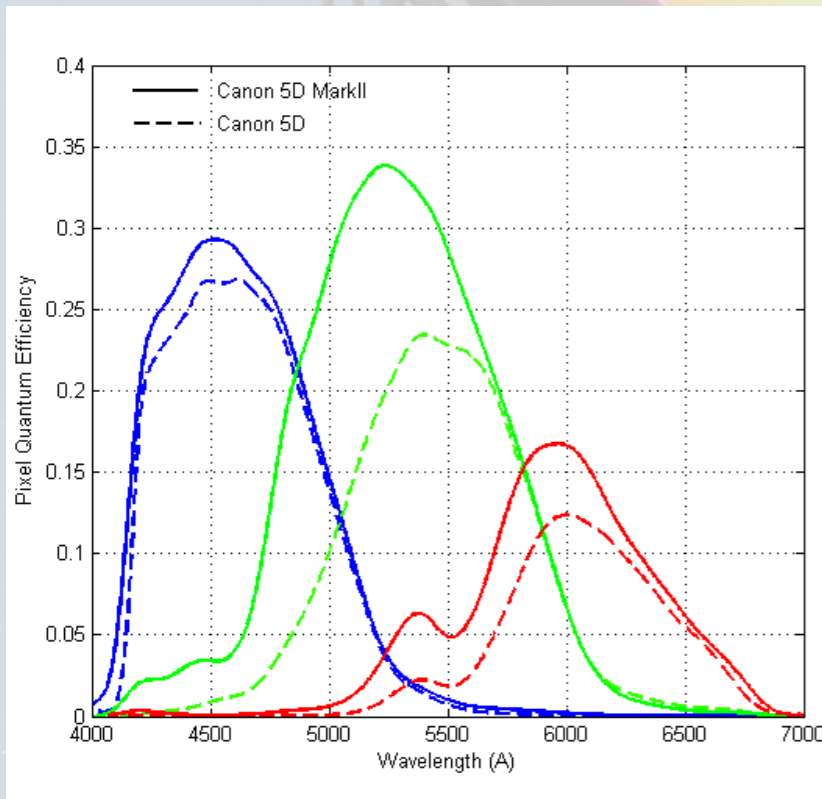


# Monochromní a barevná verze čipu KAI-11002

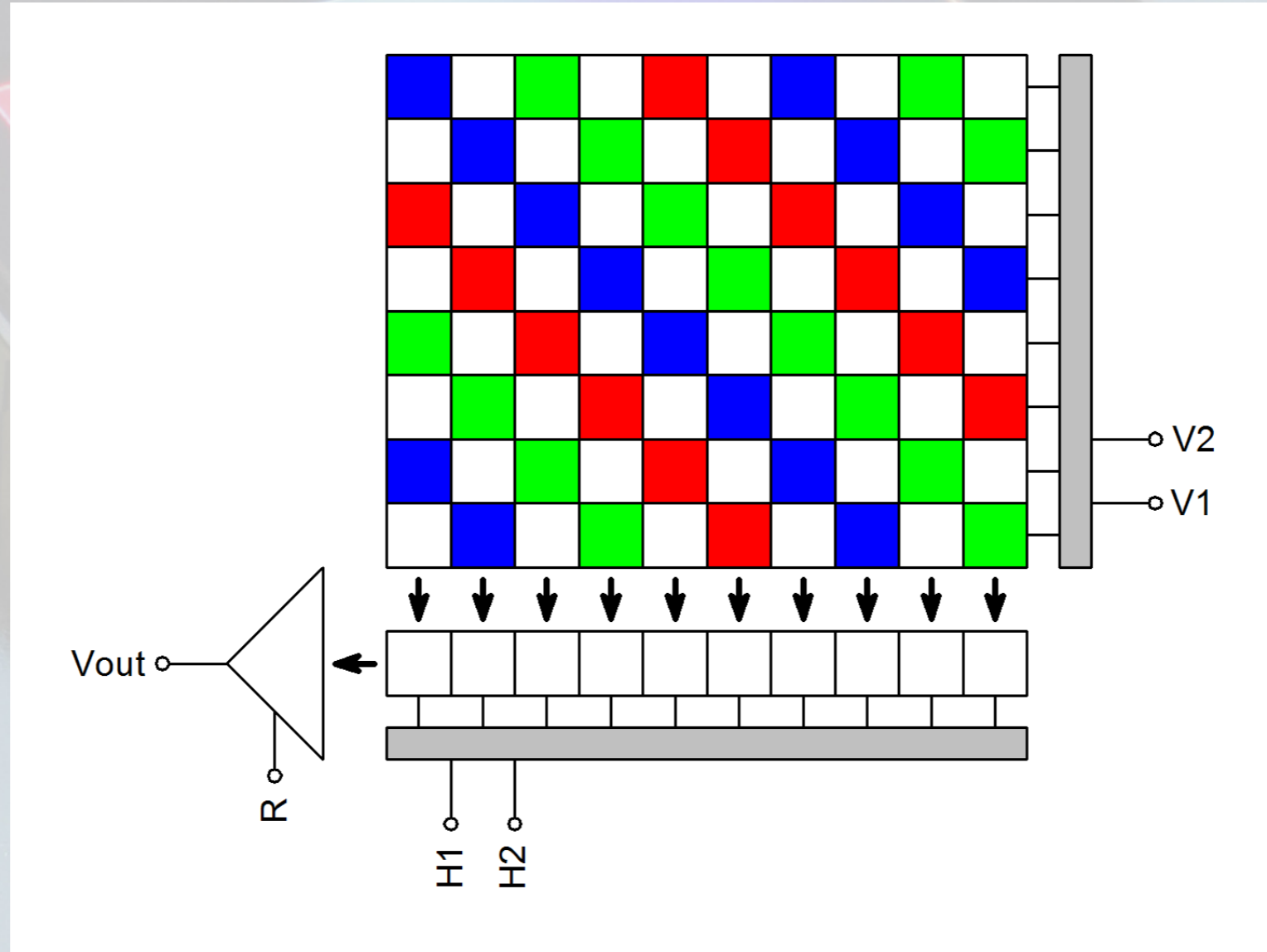


# Omezení rozlišení a citlivosti

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



# Řídká Bayerova maska (Sparse Bayer Mask)



# Barevná a jasová složka

- Zpracování obrazů z barevného čipu spoléhá na skutečnost, že lidské oko je mnohem citlivější na změnu jasu než na změnu barvy.
- Bayerova maska téměř zachová rozlišení čipu v jasové složce – je ji možné dopočítat pro každý pixel z barevné informace okolních pixelů jen s malou chybou.
- Barevná informace je pro každý pixel dopočítána rovněž z okolních pixelů s již znatelně větší chybou, to ale lidskému oku nevadí.

# Syrový snímek z barevného CCD (Bayerova maska)



# Rekonstrukce barevného snímku

- Existuje řada způsobů jako dopočítat chybějící barvy jednotlivých pixelů.
- Bilineární interpolace poskytuje výrazně lepší výsledky než prosté rozšíření chybějících barev do okolních pixelů a přitom je dostatečně rychlá. Pokud je ale rozlišení optiky blízké velikosti jednotlivých pixelů, u jemných detailů vznikají barevné artefakty.
- Víceprůchodová metoda je výrazně pomalejší ve srovnání s jednopřechodovou bilineární interpolací, její výsledky jsou ale zejména v detailech výrazně lepší. Tato metoda dovoluje využít rozlišení barevných kamer skutečně na maximum.

# Surový snímek z barevného CCD (bilineární interpolace)





# Surový snímek z barevného CCD (víceprůchodová interpolace)





# Barevné a monochromní snímače v astronomii

- Ačkoliv se barevné CCD čipy výborně hodí pro digitální fotoaparáty a video-kamery, astronomové jich používají jen výjimečně.
  - Zejména amatéři, zajímající se o snímání hezkých obrázků oblohy s co nejmenším úsilím, dávají přednost kamerám s barevnými čipy. Ale většina amatérů, stejně jako všichni profesionálové používají monochromní čipy a separátní filtry.
- Monochromní snímače jsou obecně vhodnější pro astronomické aplikace z řady důvodů:
  - Především monochromní čip může s použitím filtrů vytvořit barevný obraz. Tento obraz je zpravidla vyšší kvality než obraz z barevného čipu.

# Barevné a monochromní snímače v astronomii (2)

- 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.
  - Jiné aplikace vyžadují snímání v jediné oblasti spektra.
  - Monochromní čip může pořizovat úzkopásmové snímky v čáře H $\alpha$ , OIII, SII apod.
  - Profesionálové pak preferují standardní sadu (U)BVRI nebo u'g'r'i'z' filtrů pro fotometrická měření na místo (L)RGB filtrů vhodných pro barevnou fotografii apod.
- Barevné čipy mají menší kvantovou účinnost než monochromní. Omezení QE barevnými filtry z 80 % na asi 25 % v řadě aplikací plýtvá světlem.

**Mlhovina NGC7635 „Bublina“ ve falešných barvách,  
snímaná v úzkopásmových filtrech OIII, H $\alpha$  a SII**



Autor: Martin Myslivec

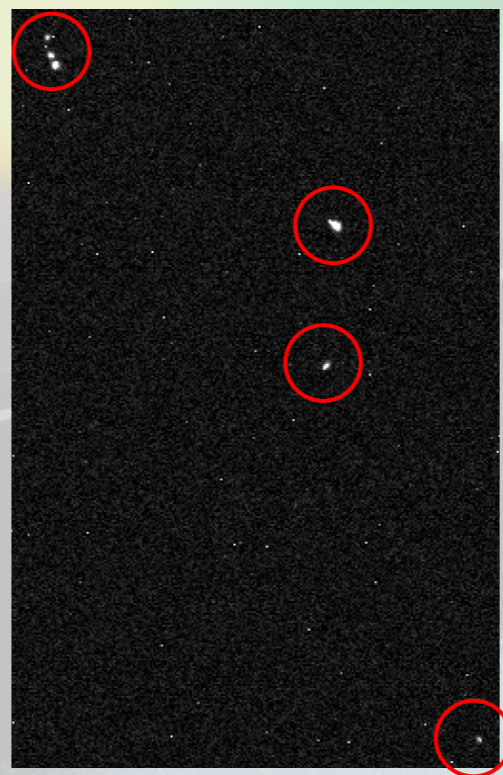
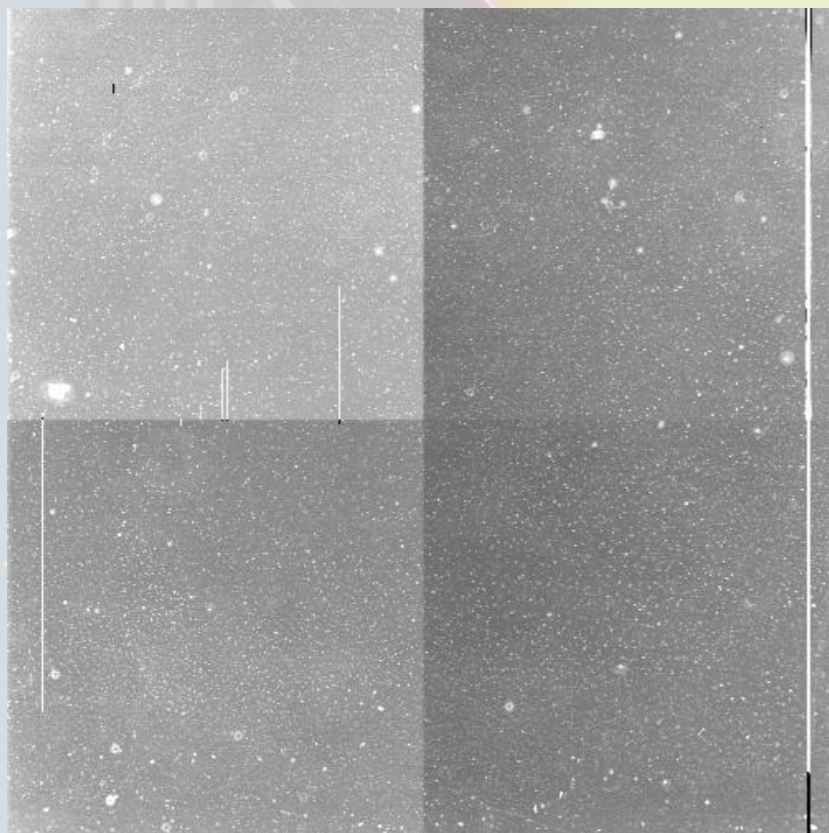
# Slunce ve falešných barvách v čáře $H\alpha$



**Nic není zadarmo – artefakty v obraze,  
čtecí šum, temný proud a další neduhy  
polovodičových senzorů**

# Elektronické detektory jsou často zatíženy artefakty poškozujícími obraz

- Kosmetické vady senzorů.
  - Horké pixely.
  - Vadné sloupce.
- Stopy nabitých částic.
  - Elektrony v křemíkovém čipu kromě dopadajícího světla a náhodných procesů (temný proud) excitují také prolétávající částice.





# Čtecí šum

- Žádná elektronika nepracuje zcela bez šumu. Tento **čtecí šum** je charakteristický pro daný čip a je udáván jako směrodatné odchylna signálu v elektronech.
- Např. čtecí šum zmíněného CCD senzoru Kodak KAF-1603 CCD je  $12 \text{ e}^-$  RMS (zkratka RMS značí Root-Mean-Square, tedy směrodatnou odchylnu).
  - Jednoduše řečeno, ze senzoru KAF-1603 není možné vyčíst obraz s menší úrovní šumu než  $12 \text{ e}^-$  RMS, bez ohledu na teplotu.
- CMOS senzory mají typicky výrazně menší čtecí šum.
  - Senzor Sony IMX25x mají čtecí šum  $< 2 \text{ e}^-$  RMS.

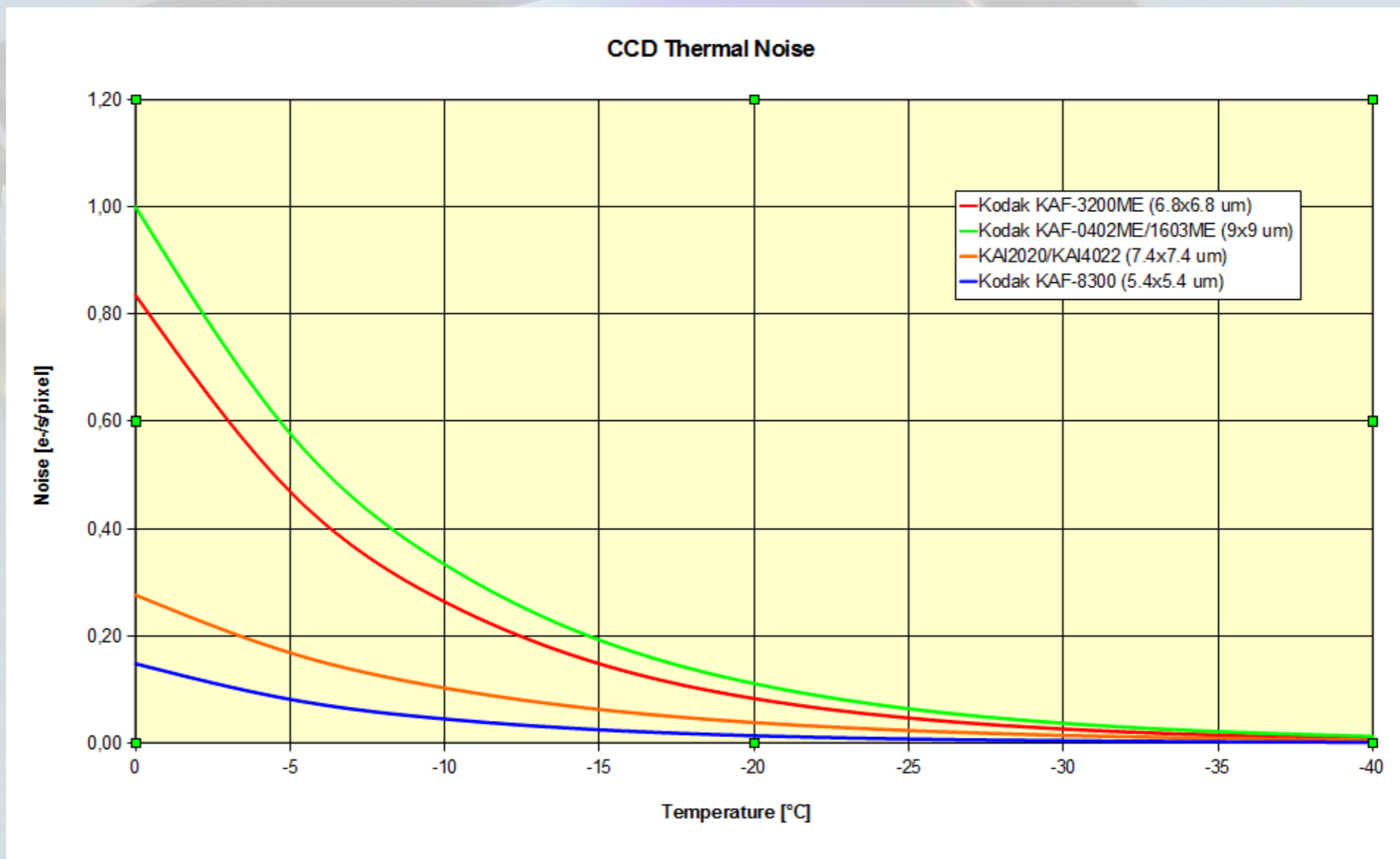
# Temný proud (dark current)

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

# Temný snímek – obraz temného proudu

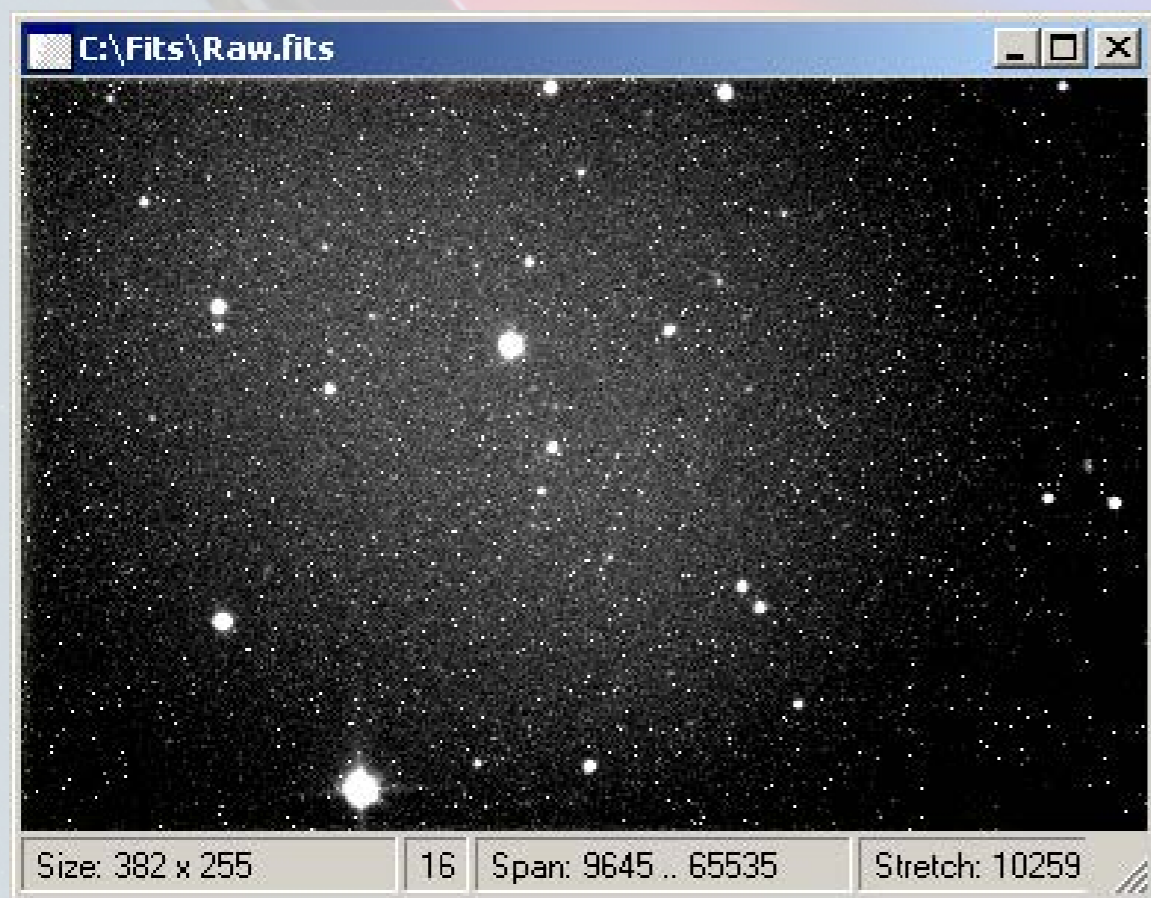
- Pozitivní věc na temném proudu je, že je za daných podmínek stále stejný (nebo velice podobný).
  - Pokud přečteme z kamery obraz nějakého astronomického objektu, bude obsahovat **signál generovaný osvětlením** i **signál generovaný temným proudem**.
  - Je ale možné provést tu samou expozici ještě jednou, ale s **uzavřenou závěrkou**. Takový obraz bude obsahovat pouze signál generovaný temným proudem – nazýváme jej temný snímek (anglicky dark frame).
  - Poté je možné **oba snímky odečíst** a tím obraz generovaný temným proudem (téměř) vyrušit.

# Temný proud některých CCD

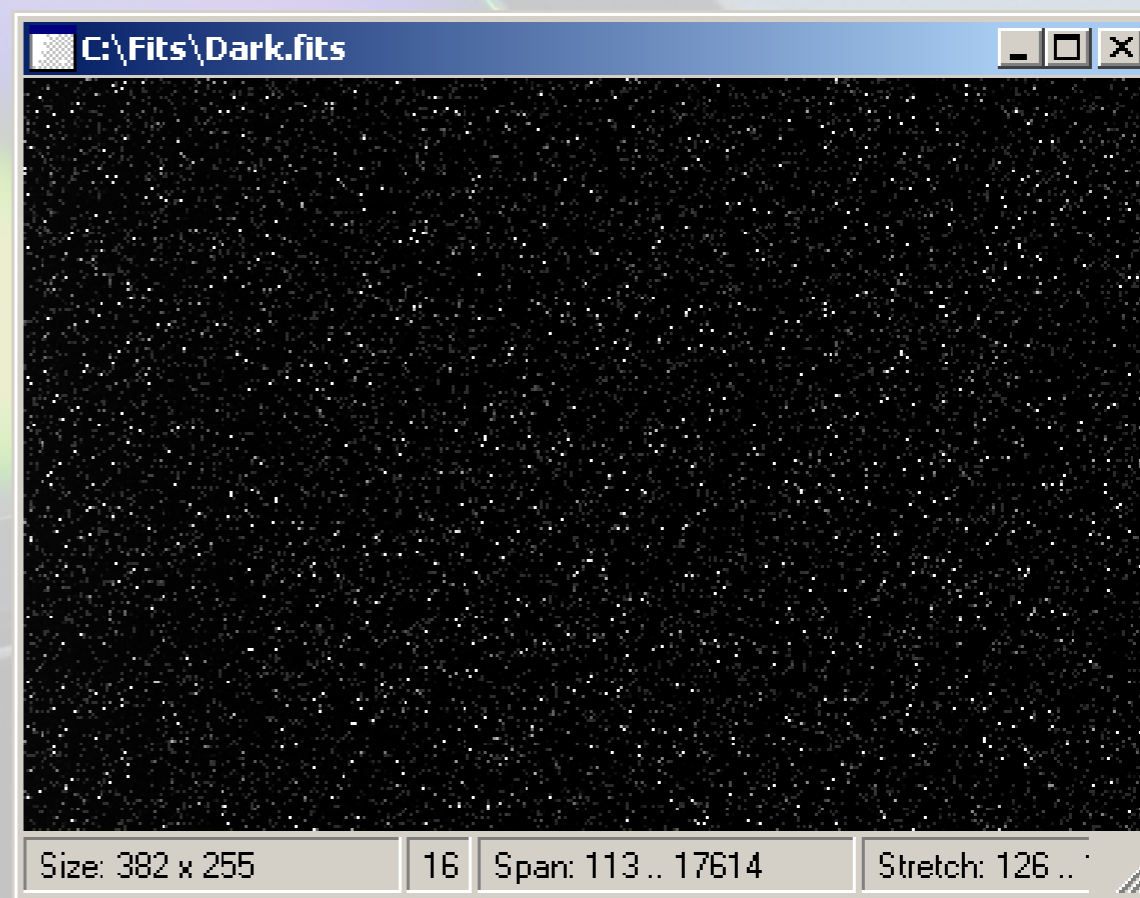


# Příklad kalibrace astronomického snímku

- Syrový snímek

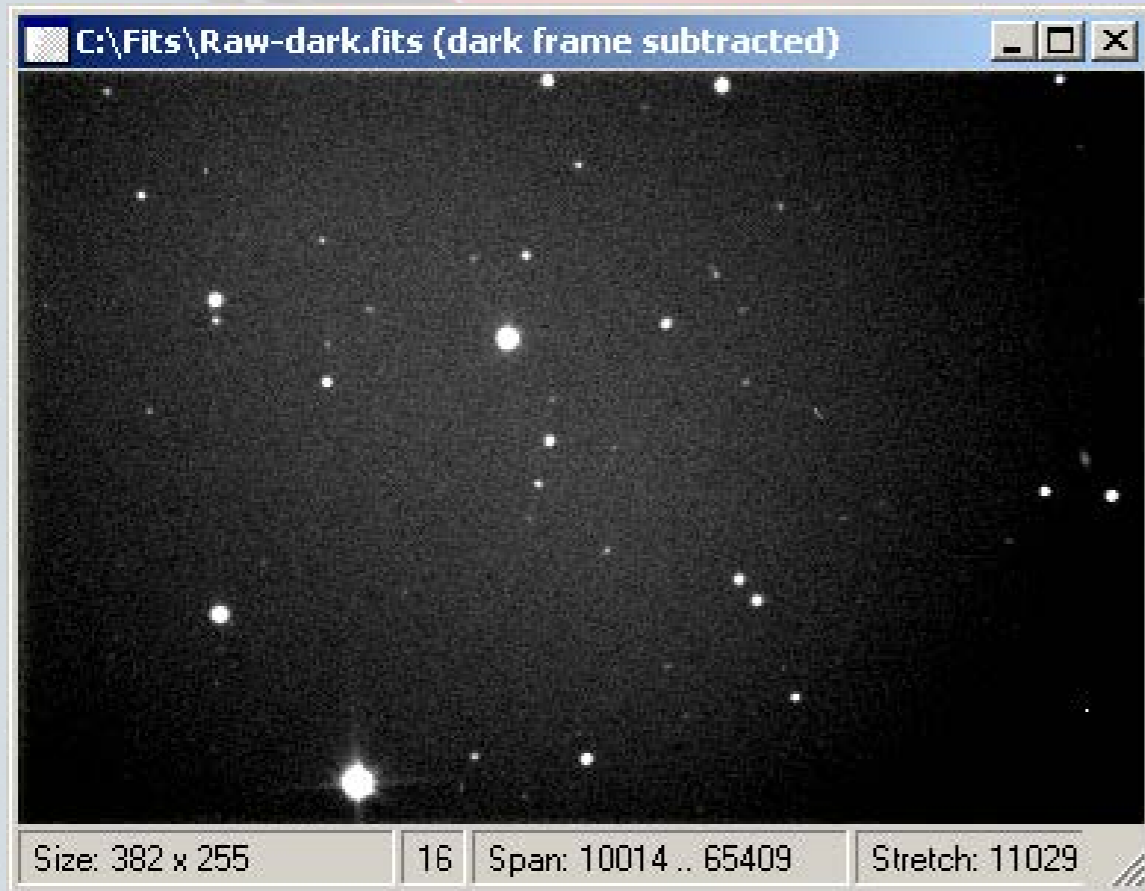


- Temný snímek



# Odečtení temného snímku

- Syrový – temný snímek

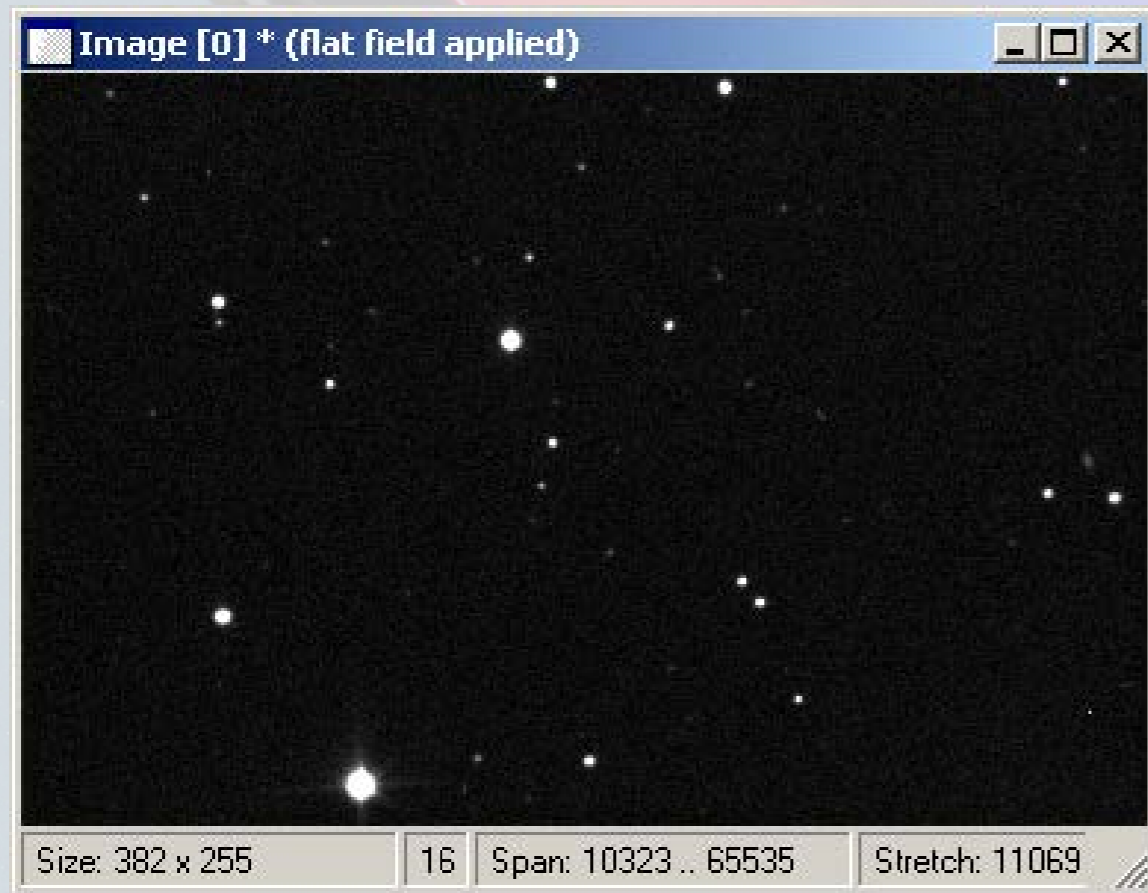


- Záznam odezvy dalekohledu

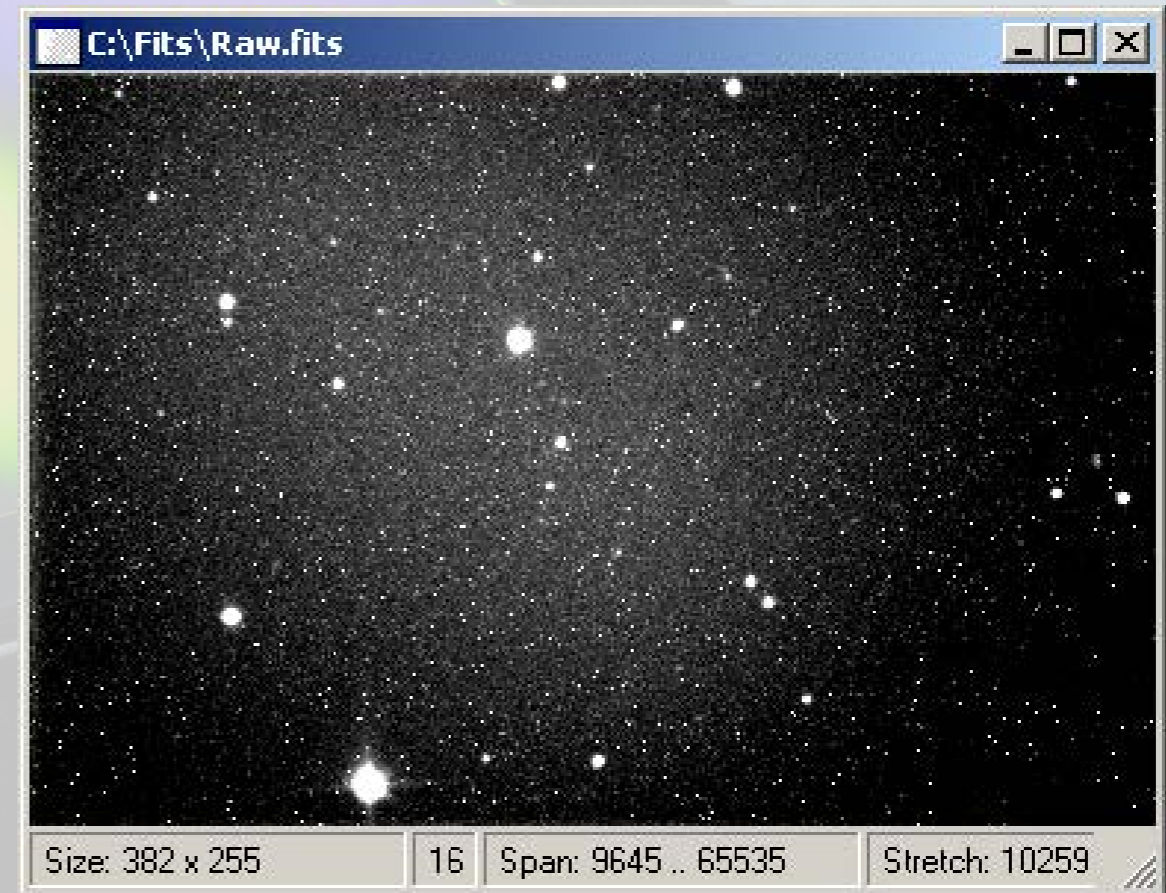


# Kalibrace obrazem plochého pole (flat field)

- Plně kalibrovaný snímek



- Syrový snímek (pro srovnání)





# CCD a CMOS senzory v astronomii



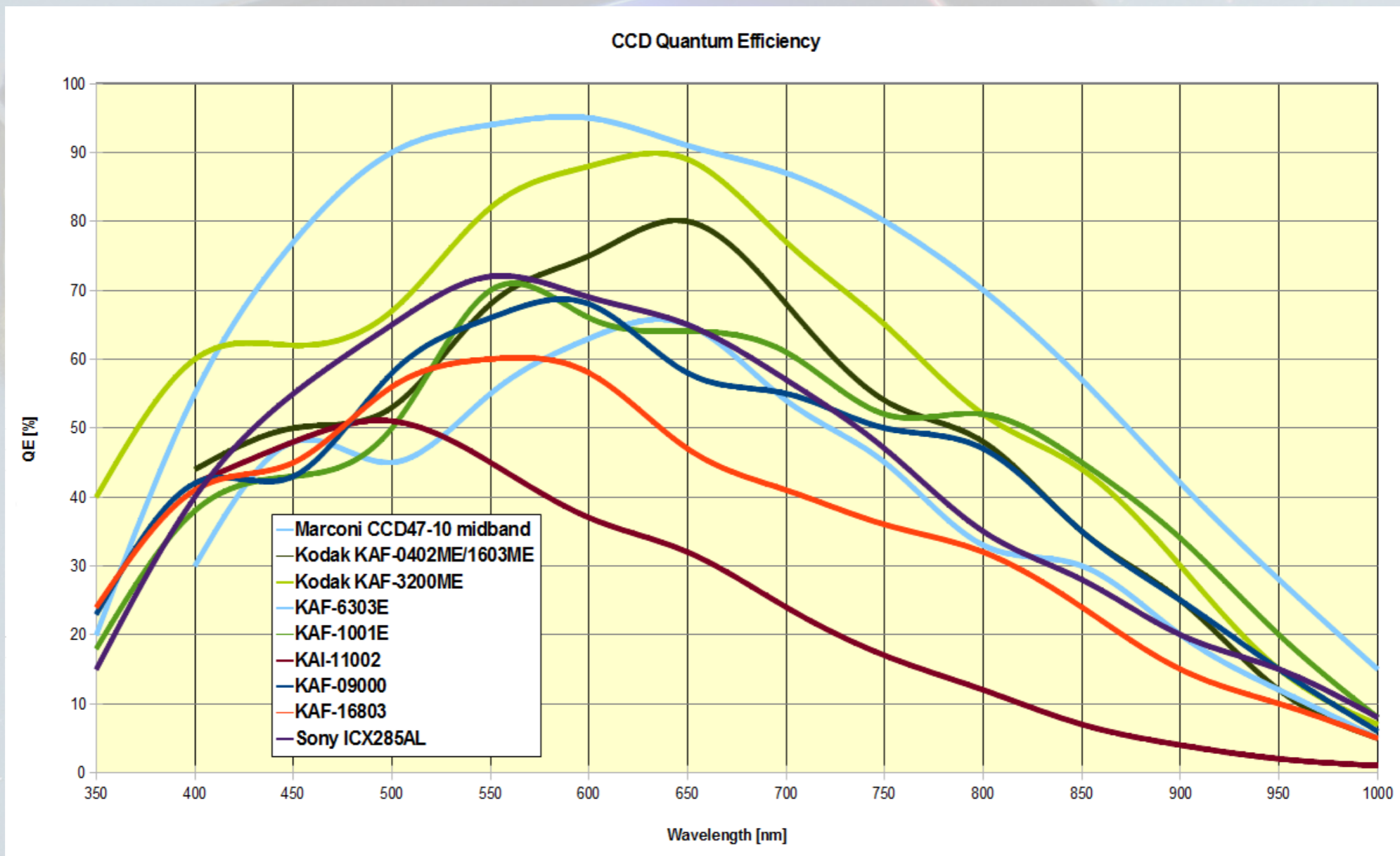
# Co přináší polovodičové senzory světla astronomům?

- **Velmi vysoká kvantová účinnost (QE – quantum efficiency)**
  - Ve srovnání s citlivostí několika procent u filmové emulze je QE 50-70% běžných snímačů více jak řádové zvýšení účinnosti.
  - Špičkové senzory nabízejí QE >90%.
- **Lineární odezva na světlo.**
  - Lineární odezva dovoluje přesně měřit jasnost pozorovaných objektů.
- **Křemíkový čip má stále mechanické rozměry.**
  - Stabilní rozměry dovolují přesně měřit polohu pozorovaných objektů.
- Kamery s polovodičovými senzory poskytují **snímky v digitální podobě.**
  - Výhody digitálních snímků jsou nesmírné, ani je nelze stručně popsat...

# Kvantová účinnost (QE)

- QE vyjadřuje poměr mezi množstvím fotonů dopadajících na detektor a množstvím vygenerovaných elektronů.
- Pro kvalitu zaznamenaných dat ale není ani tak důležitá absolutní velikost signálu, ale **poměr signál/šum**.
  - Např. signál 10 000 ADU při šumu pozadí 1 000 ADU RMS poskytne S/N jen 10.
  - Signál 1 000 ADU se šumem pozadí jen 10 ADU RMS má S/N 100.
- Zdrojem šumu není jen temný proud a čtecí šum senzoru, ale i jas oblohy – rozptyl signálu odpovídá  $\sqrt{\text{signál}}$ .
  - Jasná obloha (např. od Měsíce) tak generuje šum zhoršující přesnost, kterého se z principu nelze zbavit.

# Kvantová účinnost (QE) některých CCD snímačů



# Blooming (rozkvétání)

- Kyblík, do kterého nalijeme více vody než je jeho objem, přeteče. Stejně tak příliš velký náboj v pixelech přetéká do okolních pixelů.



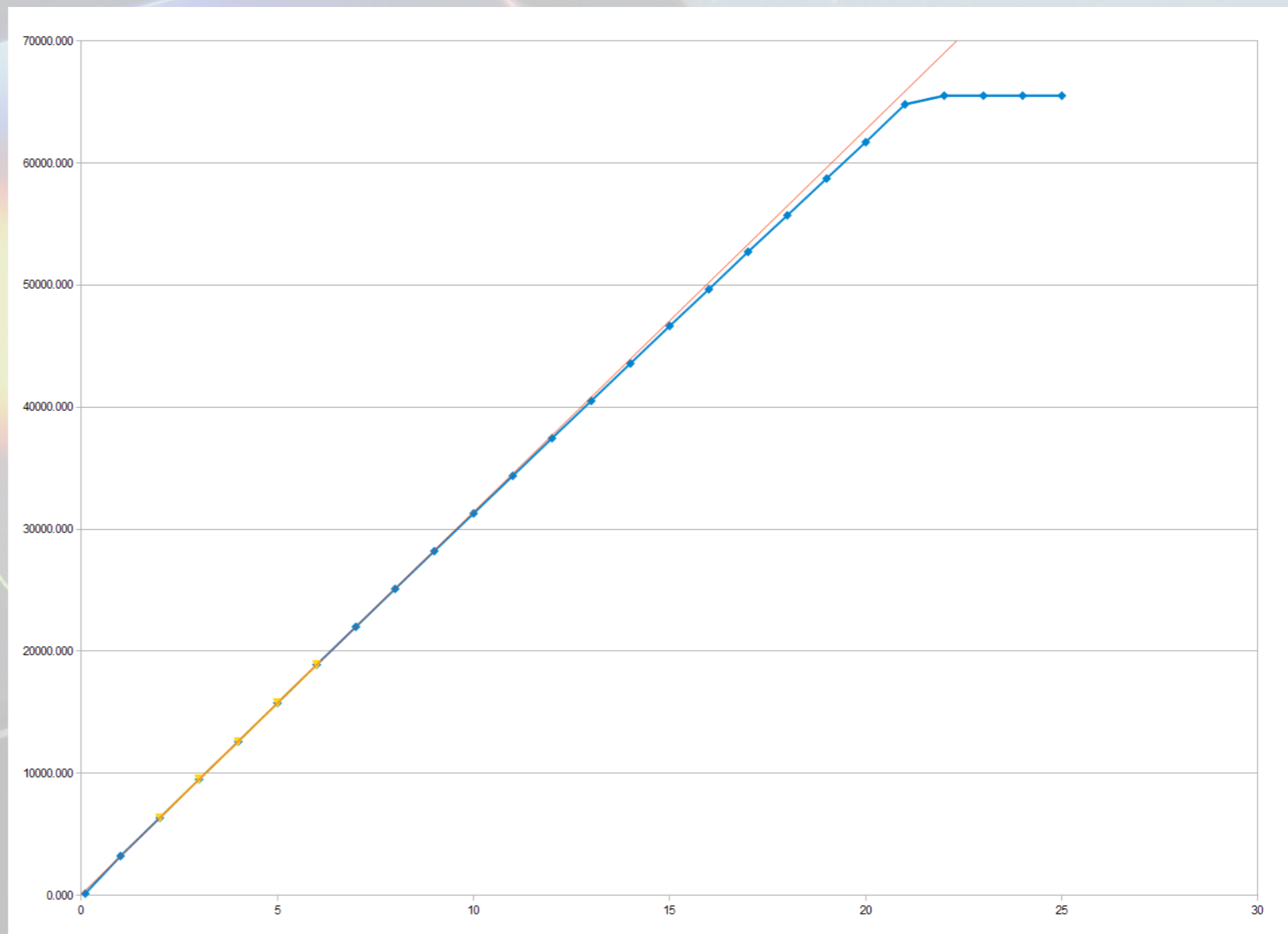
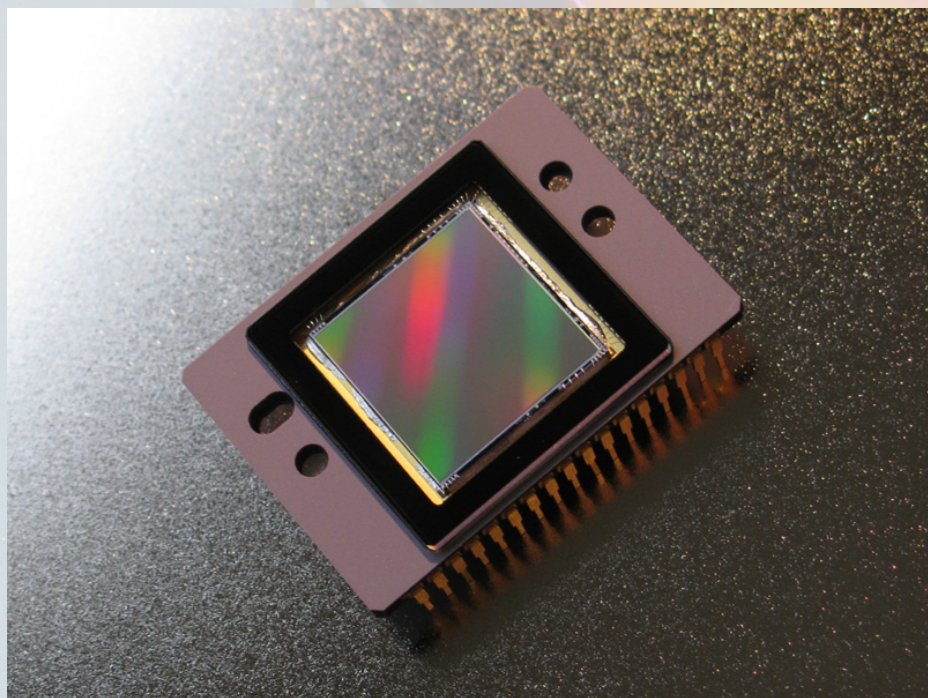
# Anti-Blooming Gate (ABG)

- Do konstrukce CCD čipu lze zahrnout elektrody, které slouží k odvádění náboje ještě dříve, než začne náboj přetékat do okolních pixelů (ABG).
  - Veškeré snímače, používané ve spotřební elektronice (fotoaparáty, kamery, mobilní telefony, ...), jsou ABG vybaveny.
- Historicky ale ABG zavádělo dva zásadní problémy, které způsobily, že vědecká komunita snímače s ABG odmítala (a dodnes řada vědců odmítá bez ohledu na skutečnosti):
  - Přítomnost ABG snižovala QE čipu až o 50%.
  - ABG deformovalo odezvu detektoru v celém jeho rozsahu, ne jen blízko saturace. Fotometrie s ABG čipy tak byla velmi nepřesná.

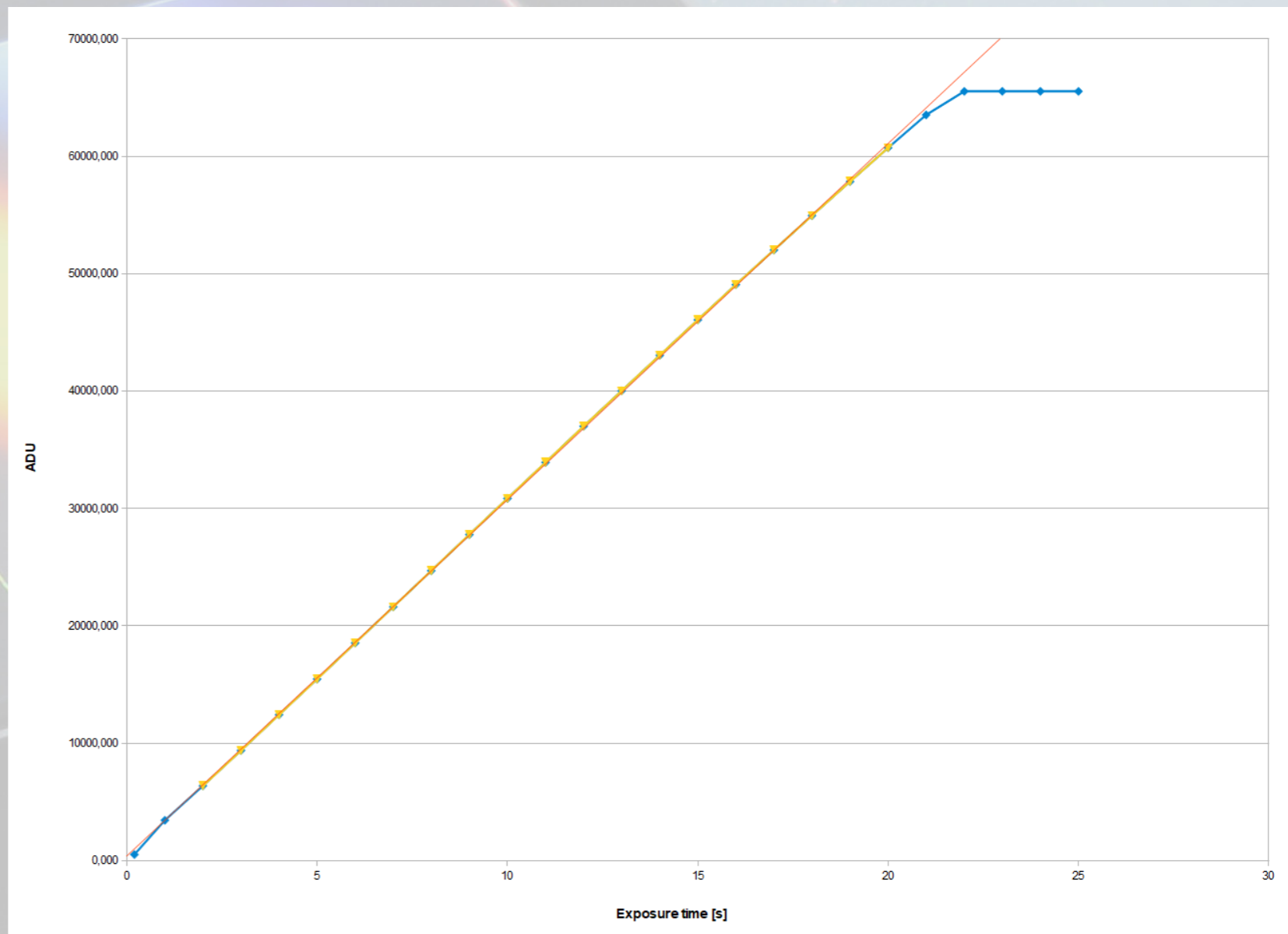
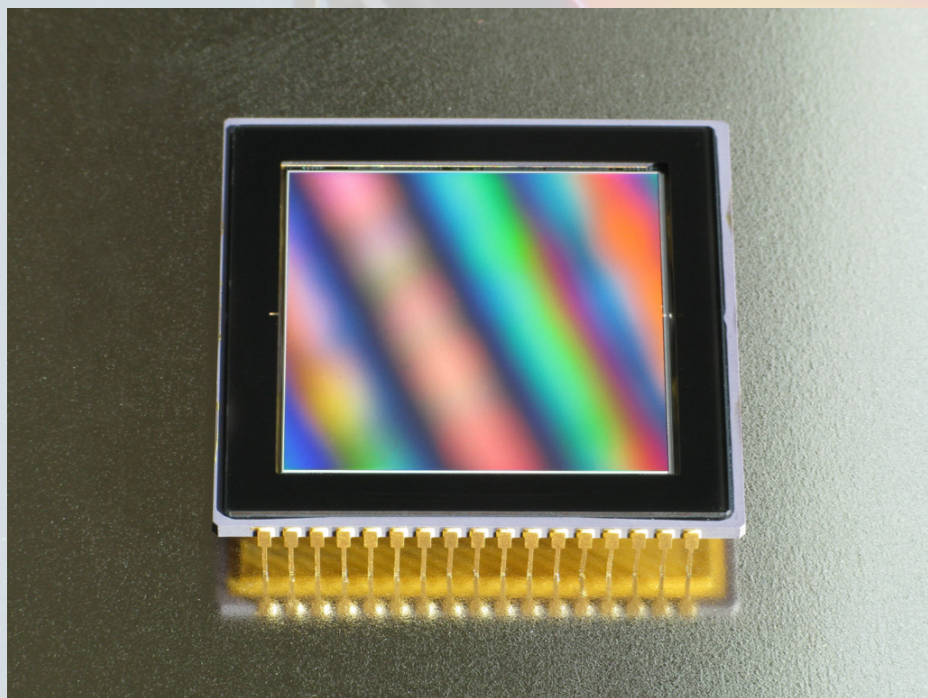
# Linearita CCD

- 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.
- Moderní CCD jsou dostatečně lineární bez ohledu na přítomnost ABG (Anti-Blooming Gate).
  - I ABG má různou intenzitu, počínaje 100× u KAF-16803 po 1000× u KAF-8300.

# G2-4000 (CCD KAI-4022 s ABG 300x)



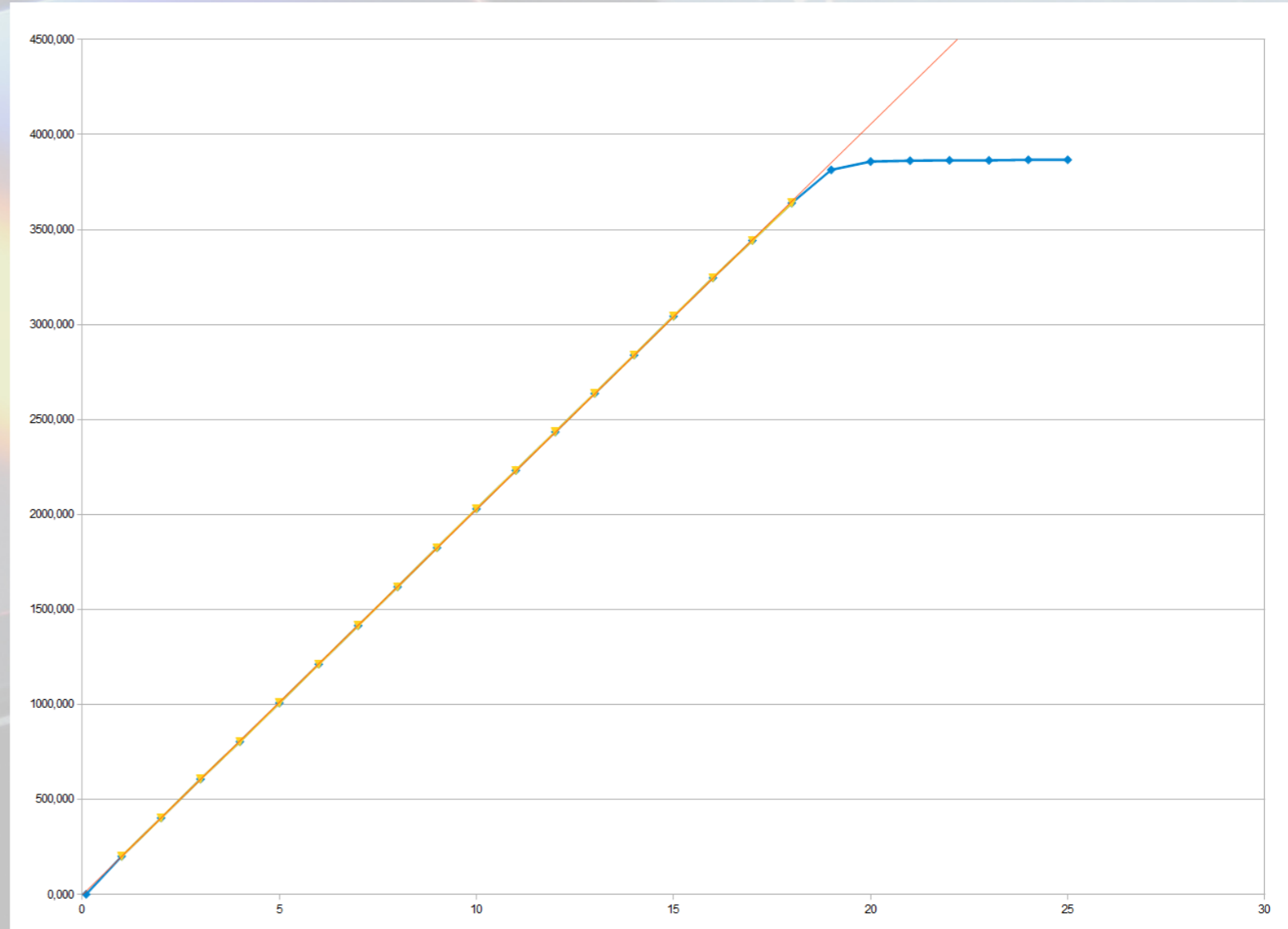
# G4-16000 (CCD KAF-16803 s ABG 100x)





# Linearita CMOS

- Přesto, že CMOS snímače zaručují vysokou míru anti-blooming ochrany, jejich odezva na světlo je velice dobře lineární.
- Příklad odezvy senzoru Sony IMX253 v kameře C2-12000



# Snímky jako digitální soubory

- Astronomové oceňují digitální podobu snímků od okamžiku jejich stažení z kamery do počítače až po jejich finální zpracování a uchování. Snímek je možné prohlédnout bezprostředně po expozici. Je snadné se ubezpečit, že objekt je ve středu pole a že dalekohled je správně zaostřen.
- Číslicové skládání více expozic také zvyšuje dynamický rozsah snímku. Sečtená výsledná jasnost snadno přesáhne saturační úroveň jediného snímku. Signál z jasných hvězd může dosáhnout stovek tisíc nebo i milionů jednotek, zatímco slabá galaxie na stejném snímku jen desítek či stovek jednotek.
- 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.



**CCD a CMOS senzory ve vědeckém výzkumu**

# Astrometrie

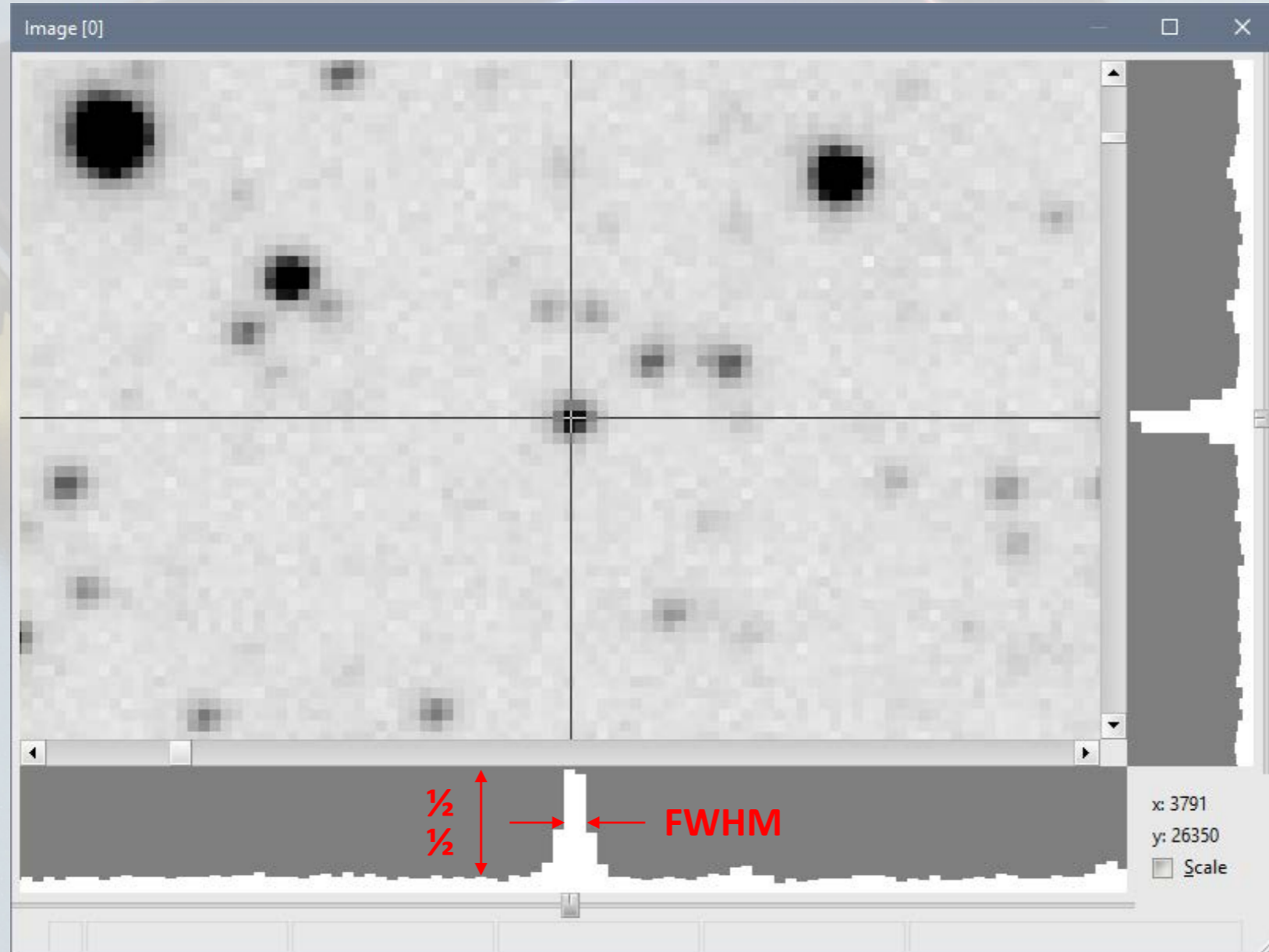
- Cílem astrometrické redukce je získat **souřadnice** pozorovaného objektu.
- Astrometrie je vždy relativní, tedy vztažená vzhledem k jiným objektům (hvězdám) v poli, jejichž poloha je dobře známa.
  - Hvězdy jsou obsaženy v katalogu včetně svých souřadnic  $\alpha$ ,  $\delta$  (rektascenze a deklinace).
- Kalibrace souřadného systému snímku pomocí známých hvězd dovolí určit souřadnice  $\alpha$ ,  $\delta$  libovolného dalšího objektu v obraze.
- Astrometrie s výhodou využívá **konstantních rozměrů** polovodičových detektorů světla.

# Vztah mezi souřadnicemi snímku $(x, y)$ a $(\alpha, \delta)$

- 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

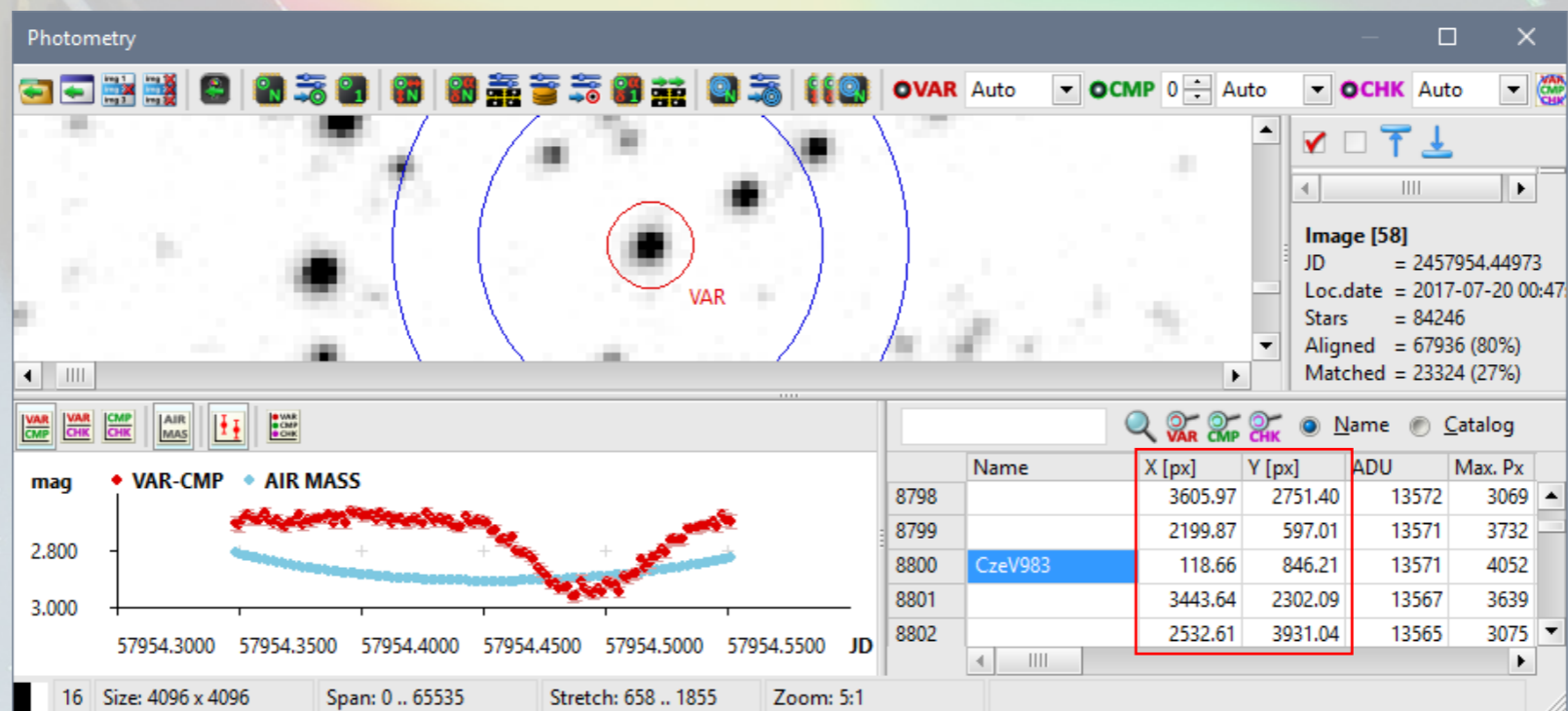


# Hvězda zobrazená vzorkováním 1,3"/px



# 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.



# Hvězdné pole sesazené s katalogem

The screenshot displays the SIPS (Stellar Image Processing Software) interface. The main window shows a star field with numerous stars, each surrounded by a green circle representing a detection or a red circle representing a match with a catalog. An 'Astrometry' window is open, displaying a table of matched stars with their coordinates and magnitudes.

Image [0]	X [px]	Y [px]	ADU	RA.	Dec.	Catalog	Cat. Name	Cat. R.A.	Cat. Dec.	Mag.
62	1036.87	2229.11	795200	05h 50m 08.73s	+31° 01' 11.4"	UCAC4	606-024717	05h 50m 08.68s	+31° 01' 11.6"	10.04
63	558.15	3477.18	791185	05h 50m 58.73s	+31° 29' 05.1"	UCAC4	608-025756	05h 50m 58.78s	+31° 29' 06.0"	10.22
64	378.09	4029.22	784150	05h 51m 17.67s	+31° 41' 25.0"	UCAC4	609-024549	05h 51m 17.85s	+31° 41' 26.3"	10.53
65	490.24	103.35	769775	05h 51m 05.51s	+30° 13' 41.6"	UCAC4	602-025422	05h 51m 05.59s	+30° 13' 40.6"	10.33
66	3977.19	2315.77	736784	05h 45m 02.09s	+31° 02' 39.0"	UCAC4	606-023300	05h 45m 02.22s	+31° 02' 39.0"	10.30
67	3126.06	1970.25	732875	05h 46m 31.18s	+30° 55' 08.7"	UCAC4	605-024700	05h 46m 31.15s	+30° 55' 08.5"	10.47
68	2908.33	2178.41	724354	05h 46m 53.67s	+30° 59' 50.5"	UCAC4	605-024792	05h 46m 53.61s	+30° 59' 50.6"	10.38
69	3400.46	1320.01	721926	05h 46m 03.31s	+30° 40' 33.1"	UCAC4	604-024308	05h 46m 03.35s	+30° 40' 34.1"	10.55
70	2126.87	1656.16	720270	05h 48m 15.42s	+30° 48' 17.8"	UCAC4	605-025091	05h 48m 15.26s	+30° 48' 18.9"	10.38
71	1908.16	1401.34	718505	05h 48m 38.29s	+30° 42' 37.7"	UCAC4	604-024863	05h 48m 38.19s	+30° 42' 37.9"	10.13
72	2508.07	3044.88	716790	05h 47m 34.76s	+31° 19' 16.6"	UCAC4	607-023544	05h 47m 34.67s	+31° 19' 16.2"	10.49
73	2307.04	1196.97	713899	05h 47m 56.97s	+30° 38' 00.7"	UCAC4	604-024694	05h 47m 56.88s	+30° 38' 00.7"	10.43
74	1444.43	3104.96	713259	05h 49m 25.98s	+31° 20' 44.5"	UCAC4	607-024029	05h 49m 25.92s	+31° 20' 44.8"	10.45
75	2833.18	287.79	712345	05h 47m 03.11s	+30° 17' 36.5"	UCAC4	602-024334	05h 47m 03.09s	+30° 17' 37.4"	10.39
76	273.78	2206.38	702275	05h 51m 28.28s	+31° 00' 40.9"	UCAC4	606-025093	05h 51m 28.35s	+31° 00' 40.9"	10.33
77	1558.64	4012.11	697965	05h 49m 13.73s	+31° 41' 00.2"	UCAC4	609-023902	05h 49m 13.71s	+31° 41' 00.6"	10.53
78	1148.60	2013.09	694910	05h 49m 57.12s	+30° 56' 21.5"	UCAC4	605-025594	05h 49m 57.02s	+30° 56' 21.7"	10.42
79	2599.01	611.27	691978	05h 47m 27.09s	+30° 24' 52.7"	UCAC4	603-025669	05h 47m 27.04s	+30° 24' 53.0"	10.67
80	3661.78	3909.00	688361	05h 45m 33.07s	+31° 38' 20.2"	UCAC4	609-022826	05h 45m 33.17s	+31° 38' 18.4"	10.71
81	1407.42	2663.23	688149	05h 49m 29.98s	+31° 10' 52.4"	UCAC4	606-024500	05h 49m 29.89s	+31° 10' 52.9"	10.36
82	2741.27	2684.04	687689	05h 47m 10.67s	+31° 11' 10.3"	UCAC4	606-023854	05h 47m 10.58s	+31° 11' 10.2"	10.48
83	801.82	1051.39	686515	05h 50m 33.27s	+30° 34' 52.6"	UCAC4	603-026476	05h 50m 33.28s	+30° 34' 51.7"	10.51
84	1468.18	2657.38	685373	05h 49m 23.64s	+31° 10' 44.3"	UCAC4	606-024458	05h 49m 23.54s	+31° 10' 44.5"	10.60
85	2888.99	3889.26	676199	05h 46m 54.17s	+31° 38' 04.5"	UCAC4	609-023212	05h 46m 54.14s	+31° 38' 03.7"	10.73
86	1834.38	3161.51	672724	05h 48m 45.17s	+31° 21' 58.3"	UCAC4	607-023851	05h 48m 45.08s	+31° 21' 58.3"	10.33

Matched stars: 13687 Image center RA: 05h 48m 23.41s Dec: +30° 57' 03.8" Residuals RA: 1.09" Dec: 0.80"



# K čemu je astrometrie?

- Obecně k označení polohy objektů na nebeské sféře.
- Určování polohy planetek a komet.
  - Ověřování, jestli se jedná o známé nebo nově objevené těleso.
  - Výpočet dráhy tělesa ve Sluneční soustavě.
- Ztotožnění hvězdy s katalogem.
  - Určení křížové identifikace pozorovaných objektů (katalogové označení).
  - Ověřování, jestli se jedná o známou proměnnou hvězdu nebo nově objevenou.
- Při komunikaci mezi astronomy.
  - Požadavek na pořízení spektra objevené novy atd.

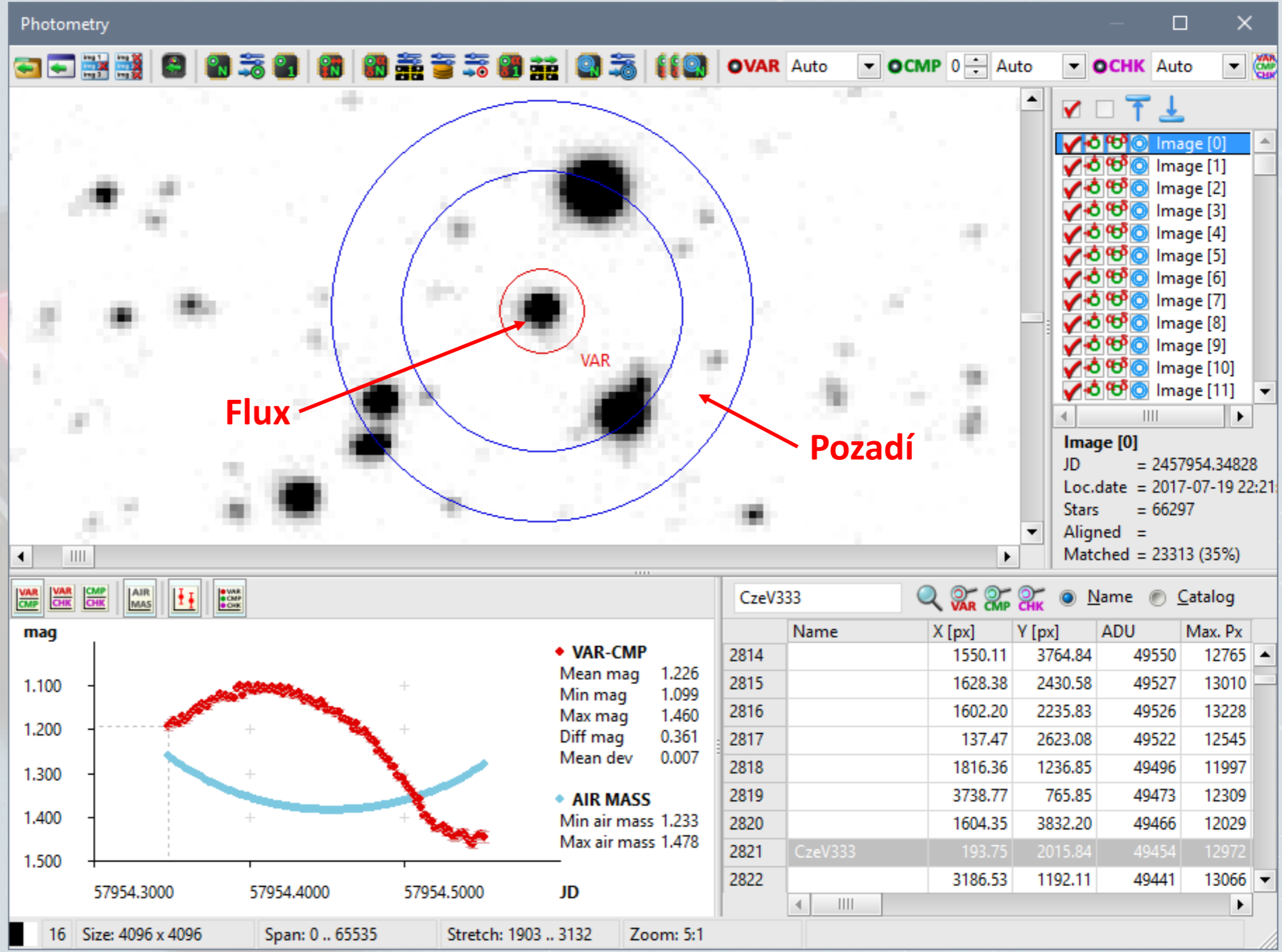
# Fotometrie

- Fotometrické zpracování dokáže získat **jasnosti** objektů na snímku.
- Množství světla přicházející od jednotlivých objektů se silně mění podle počasí, výšky nad obzorem, barvy objektu atd.
  - Proto je i fotometrie relativní, vždy měříme jasnost zkoumaného objektu porovnávanou s jasností jiného objektu (hvězdy).
- Fotometrie s výhodou využívá **lineární odezvy** polovodičových detektorů na světlo.

# Jak se počítá (aperturní) fotometrie

- 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 mezikružích obklopující měřenou hvězdu.
  - Prostý průměr nestačí, v mezikružích může být řada rušivých vlivů – horké pixely, stopy částic, jiné hvězdy, ...

# Apertura (clonka) a mezikruží pozadí



# K čemu je fotometrie?

- Sledování změn jasnosti hvězd nám prozradí obrovské množství jinak nedostupných informací:
  - Pokud hvězda sama pulsuje, můžeme odhadnout její absolutní svítivost a ze znalosti relativní svítivosti určit **skutečnou vzdálenost** (cefeida v M31).
  - Podobně je tomu se supernovami Ia – světelná křivka vypoví o vzdálenosti.
  - Pokud je hvězda vícenásobná a složky se navzájem zakrývají, změřením světelné křivky určíme oběžnou dobu, poměry hmotností a velikostí atd.
  - Naprostá většina dosud známých exoplanet byla objevena měřením poklesu jasnosti při přechodu exoplanety před hvězdným diskem.
  - ...
- Sledování změn jasnosti vypoví hodně nejen o hvězdách, ale i o planetkách, kometách, ...

# Záznam spekter

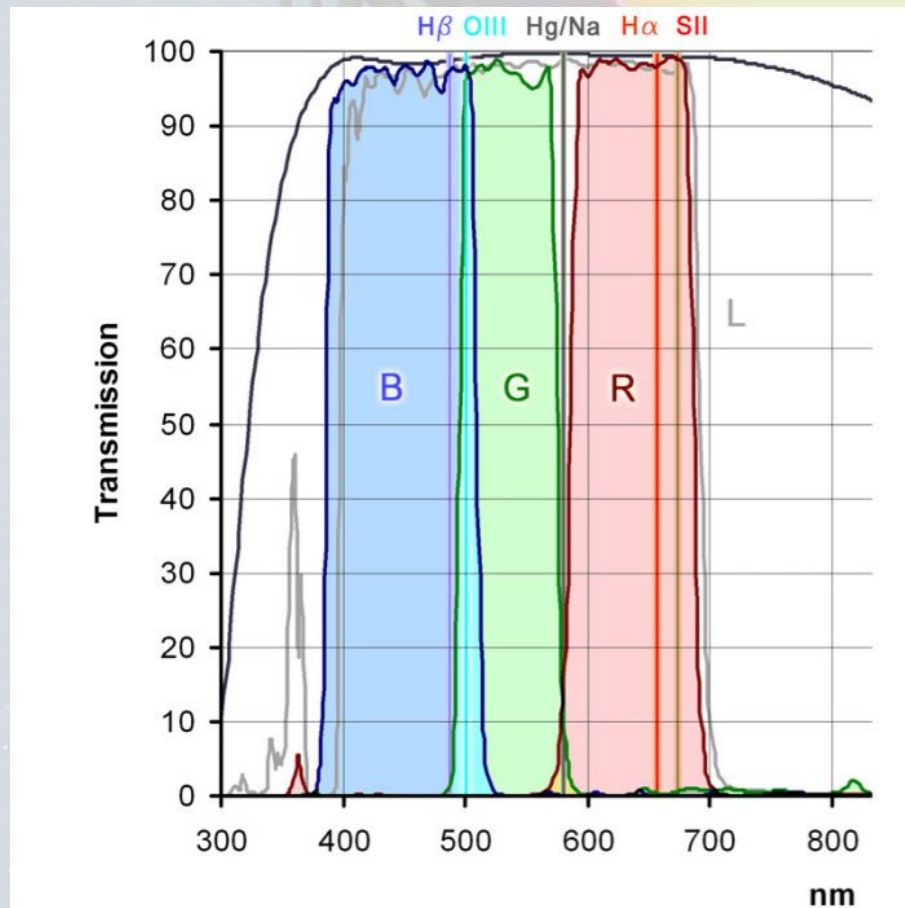
- Polovodičové senzory se používají ve spektrografech k záznamu spekter.
- Při záznamu spekter jsou důležité všechny základní vlastnosti polovodičových senzorů:
  - Využívá se **vysoké citlivosti**, když je světlo jediné hvězdy rozprostřeno na plochu stovek tisíců pixelů (obraz hvězdy zabere max. desítky pixelů).
  - Využívá se **lineární odezvy** na světlo k měření **intenzity spektrálních čar**.
  - A také **stálých mechanických rozměrů** k měření **pozice spektrálních čar**.

A 3D rendering of a square sensor chip, likely a CCD or CMOS sensor, shown at an angle. The top surface of the chip is illuminated with a rainbow spectrum of light, transitioning from red on the left to violet on the right. The chip is mounted on a dark base with visible pins or connections along its edges. The background is a light blue gradient with numerous small white dots representing stars.

# CCD a CMOS senzory v astronomické fotografii

# Senzory pro astrofotografii

**Barevné senzory**  
(OSC – One-Shot-Color)



**Monochromní senzory**  
(vyžadují použití filtrů)

**S barevnými filtry**

- Červená (Red)
- Zelená (Green)
- Modrá (Blue)

**RGB** nebo také  
„fotografické“  
filtry.

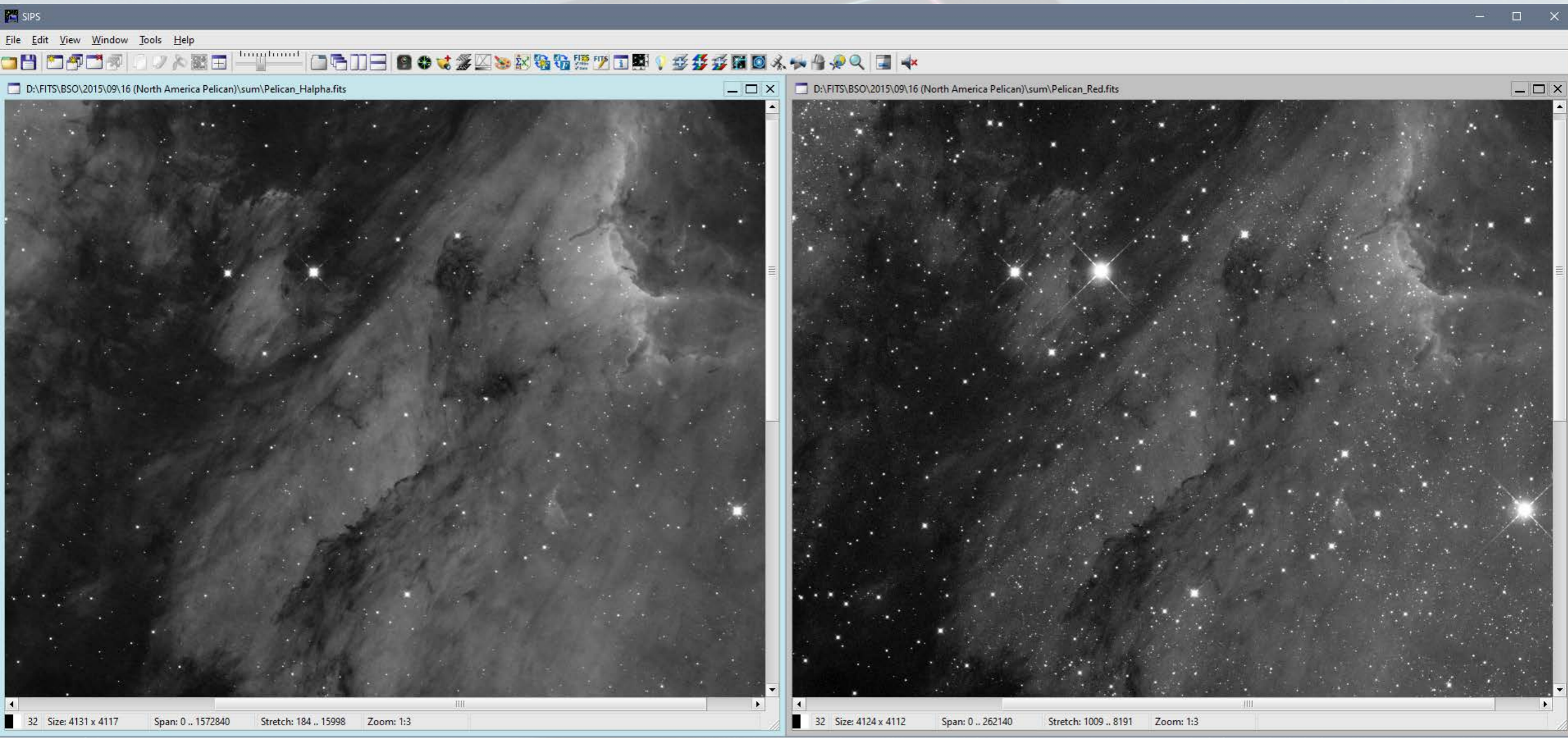
**S úzko-pásmovými filtry**

- H $\beta$  (486,1 nm)
- OIII (500,7 nm)
- H $\alpha$  (656,3 nm)
- NII (658,4 nm)
- SII (672,4 nm)

Důležitá je „šířka“ filtru  
(FWHM ~ 9 – 3,5 nm)



# Porovnání expozice v H $\alpha$ a červeném filtru

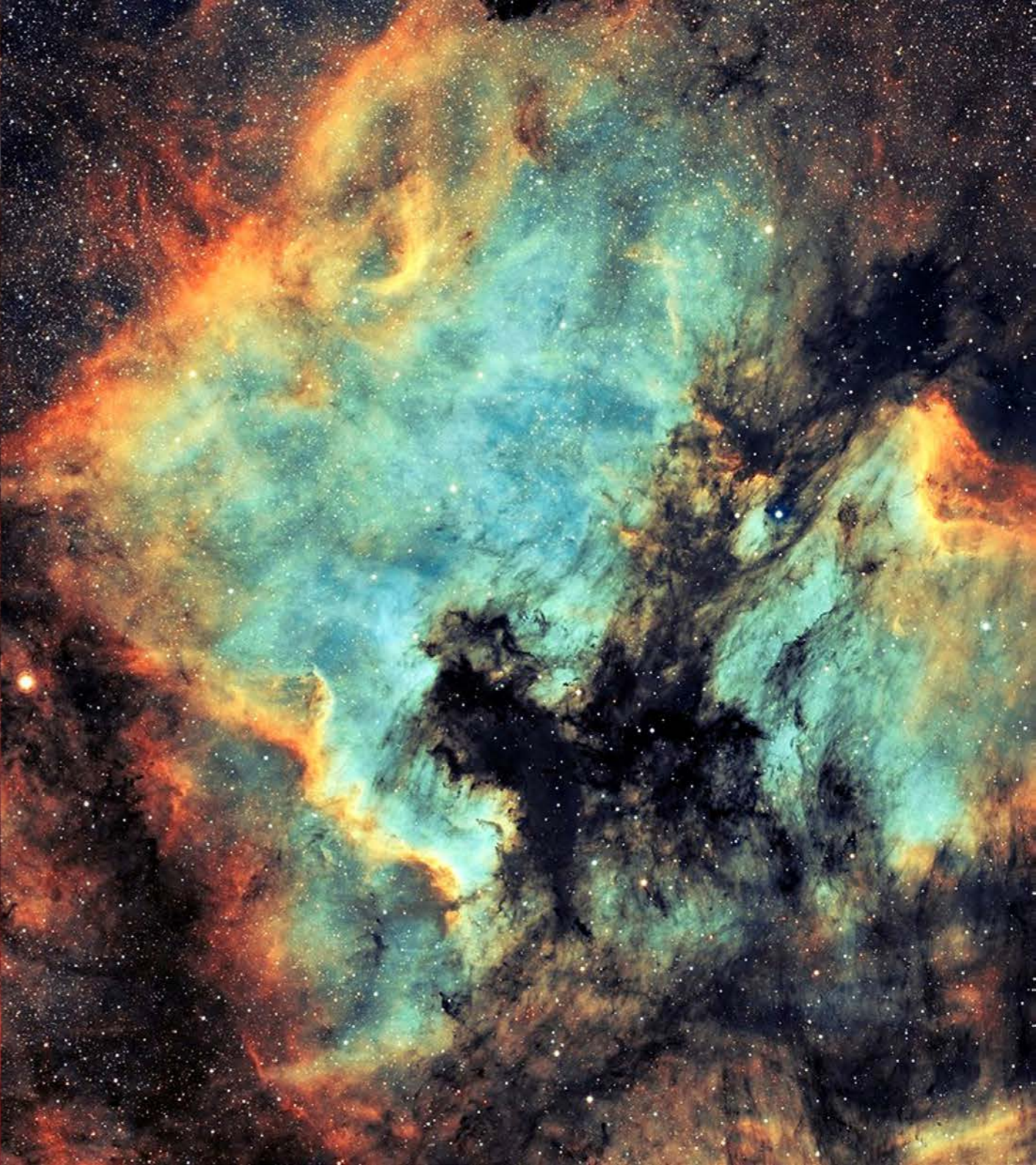
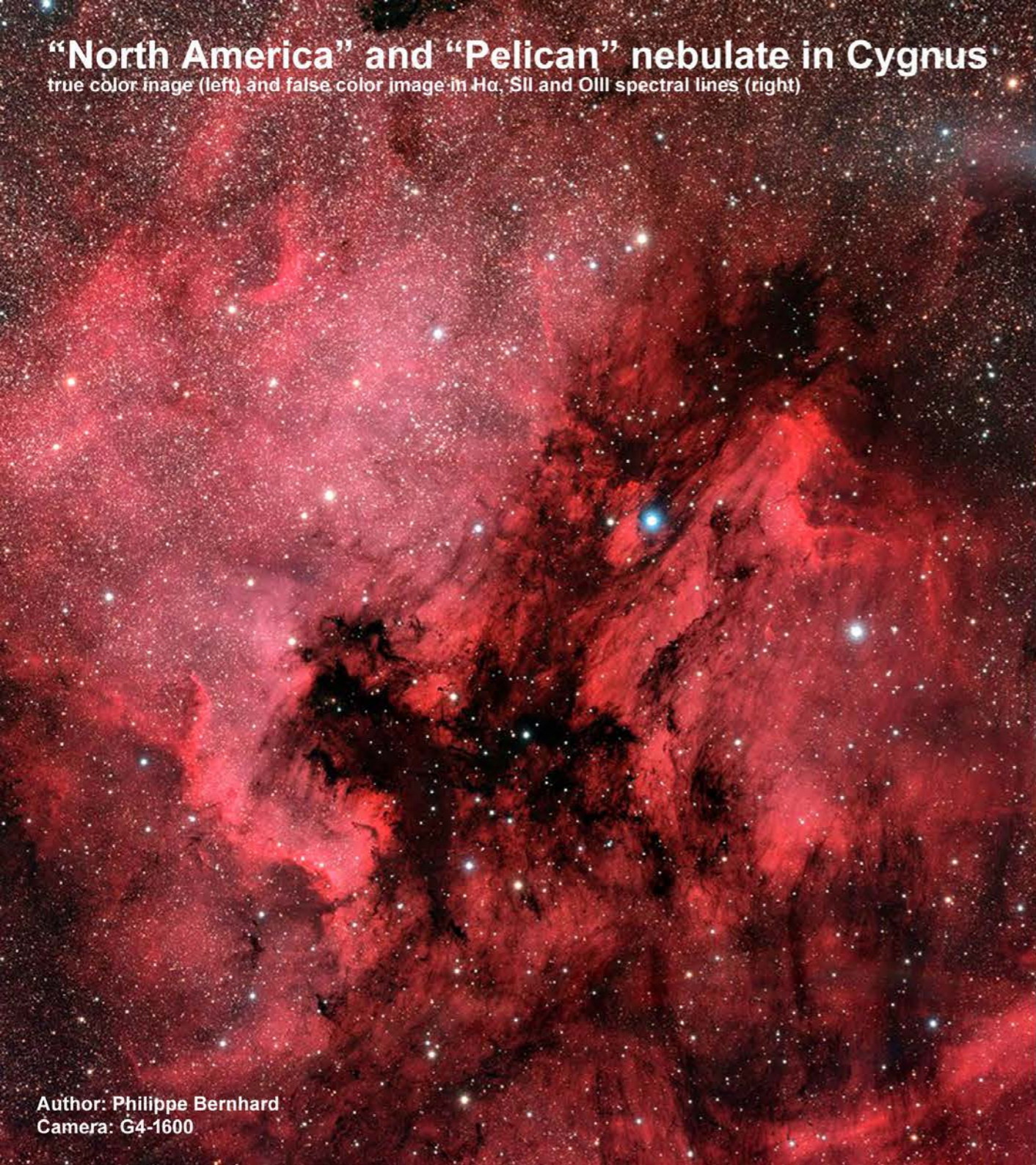


# Jak obarvit snímky pořízené přes úzkopásmové filtry?

- Čára OIII je modro-zelená barva (501 nm).
- Čára H $\alpha$  je „červenější než červená“ (656 nm).
  - Červená LED nebo červený luminofor v TV má vlnovou délku  $\sim$ 630 nm.
- Čára SII je už pro lidské oko neviditelná (672 nm).
- Při skládání výsledného barevného snímku se jednotlivým základním barvám přidělí snímky pořízené v úzkopásmových filtrech.
  - Vznikne snímek ve **falešných barvách** – barvy na snímku neodpovídají skutečnosti.
- Jeden způsob takového zpracování proslavily zejména snímky z Hubblova kosmického dalekohledu – **HST paleta** (SHO  $\rightarrow$  RGB).

# “North America” and “Pelican” nebulae in Cygnus

true color image (left) and false color image in H $\alpha$ , SII and OIII spectral lines (right)



# Způsobů přiřazení základních barev (RGB) snímekům v úzkopásmových filtrech je celá řada

**HOS** ( $H\alpha \rightarrow R$ ,  $OIII \rightarrow G$ ,  $SII \rightarrow B$ )

**SHO** ( $SII \rightarrow R$ ,  $H\alpha \rightarrow G$ ,  $OIII \rightarrow B$ )  
(Hubble palette)

**HaOHb** ( $H\alpha \rightarrow R$ ,  $OIII \rightarrow G$ ,  $H\beta \rightarrow B$ )

**HOO** ( $H\alpha \rightarrow R$ ,  $OIII \rightarrow G$ ,  $OIII \rightarrow B$ )  
(Bi-color)



# Zvýraznění detailů v RGB snímku s pomocí H $\alpha$ filtru (vodíková mračna) – H $\alpha$ RGB



# Amatérská astrofotografie

- Amatéři dnes disponují špičkovou technikou.
  - Precizní **montáže** dalekohledů sledují oblohu s přesností zlomků úhlových vteřin.
  - Širokoúhlá **optika** vykreslí obrazové pole bez vad a deformací po celém senzoru.
  - CCD/CMOS **kamery** nabízejí vysokou citlivost, nízký šum a uniformní pole.
- Amatéři pracují pro radost (nejsou financováni z veřejných peněz).
  - Techniku mají k dispozici bez omezení pozorovacího času.
  - Nemusí vykazovat výsledky (publikace).
- Výsledkem je, že ty **nejlepší snímky vesmíru dnes pochází od amatérů.**
  - Konkuruje jim jen Hubbleův kosmický dalekohled a nepřekonatelným rozlišením a hloubkou snímků, které jsou ale plošně velmi omezené.

# IC1396 "Elephant trunk" nebula in Cygnus

false color image in H $\alpha$ , SII and OIII spectral lines



# IC443 "Jellyfish" nebula in Gemini

False color image in H $\alpha$ , SII and OIII spectral lines



Authors: Laurent Bourgon, Philippe Bernhardt, Didier Chaplain, Jean Claude Canonne  
Camera: G4-16000



$\rho$  Ophiuchi



Authors: Laurent Bourgon, Jean-Claude Canonne, Nicolas Outters, Philippe Bernhard and Didier Chaplain  
Camera: G4-16000

**NGC6188 nebula in the constellation Ara**



Authors: Laurent Bourgon, Philippe Bernhard, Didier Chaplain, Jean Claude Canonne  
Camera: G4-16000

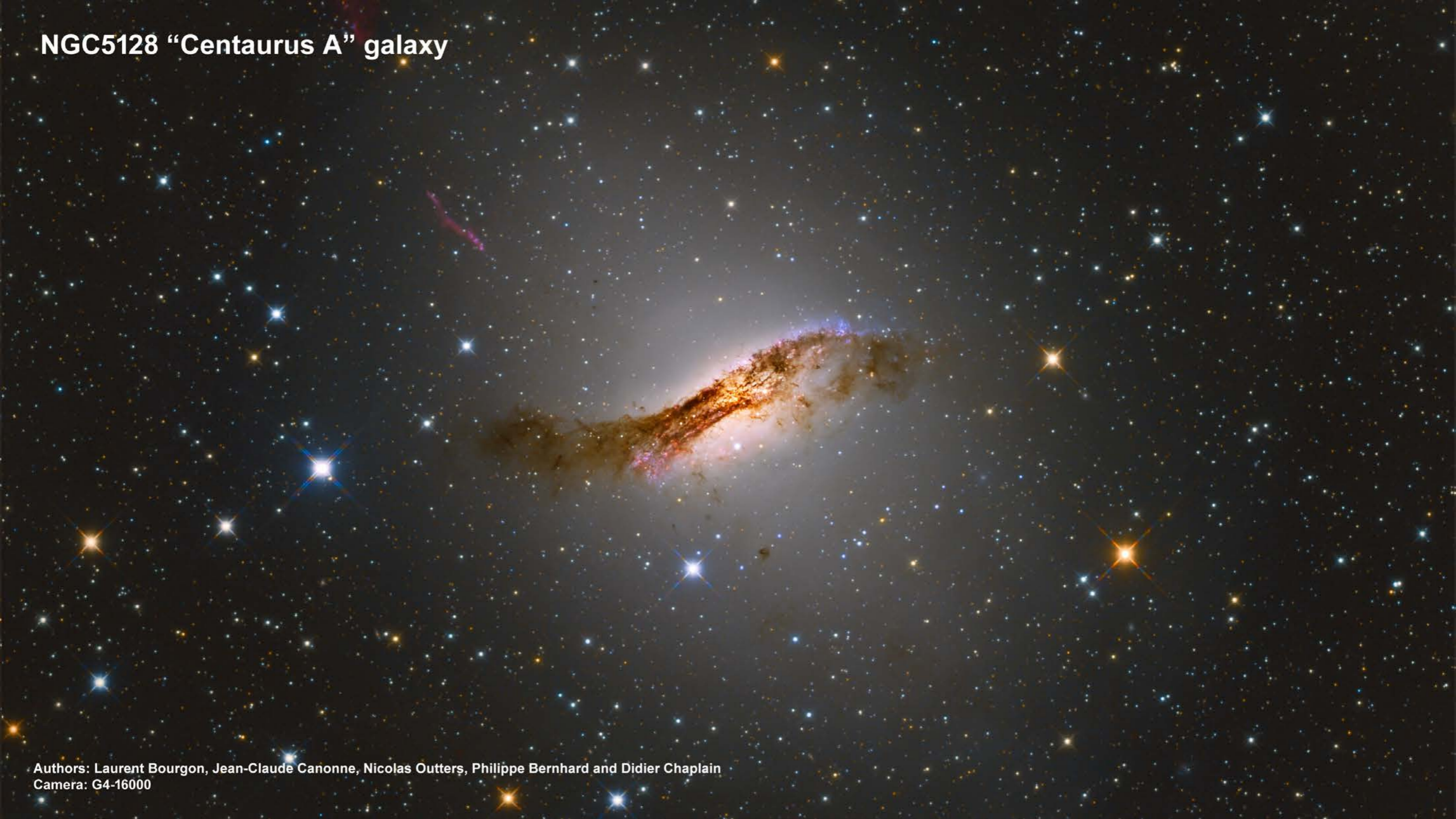
# NGC6188 nebula in the constellation Ara

false color image in H $\alpha$ , SII and OIII spectral lines



Authors: Laurent Bourgon, Philippe Bernhard, Didier Chaplain, Jean Claude Canonne  
Camera: G4-16000

**NGC5128 “Centaurus A” galaxy**



Authors: Laurent Bourgon, Jean-Claude Canonne, Nicolas Outters, Philippe Bernhard and Didier Chaplain  
Camera: G4-16000

**M83 “Southern Pinwheel” galaxy**



Authors: Laurent Bourgon, Jean-Claude Canonne, Nicolas Outters, Philippe Bernhard and Didier Chaplain  
Camera: G4-16000

**“Horse head” nebula in Orion**

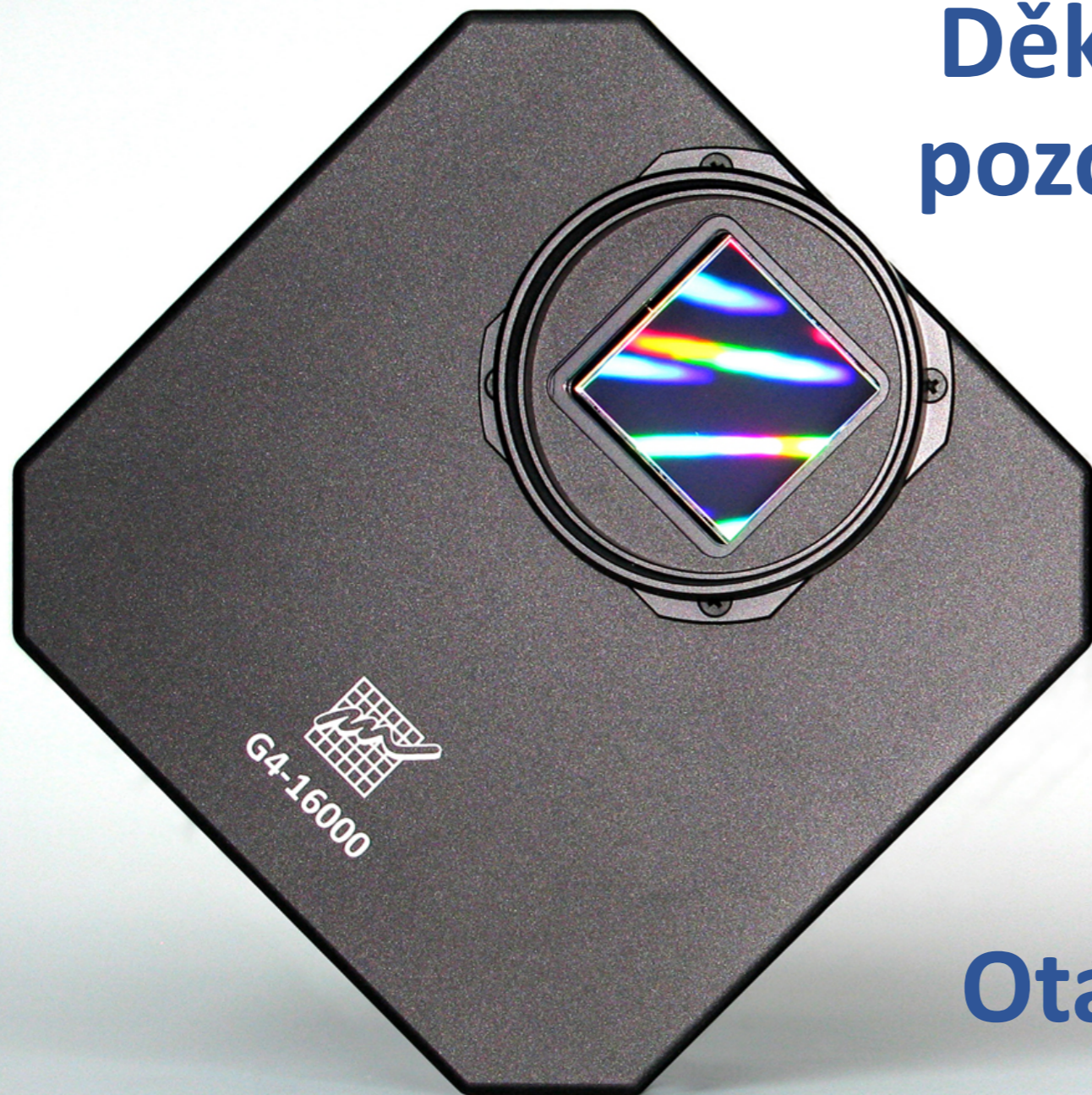


Authors: Laurent Bourgon, Jean-Claude Canonne, Nicolas Outters, Philippe Bernhard and Didier Chaplain  
Camera: G4-16000

# SH2 308 nebula in Canis Major



**Děkuji za  
pozornost**



**Otázky?**