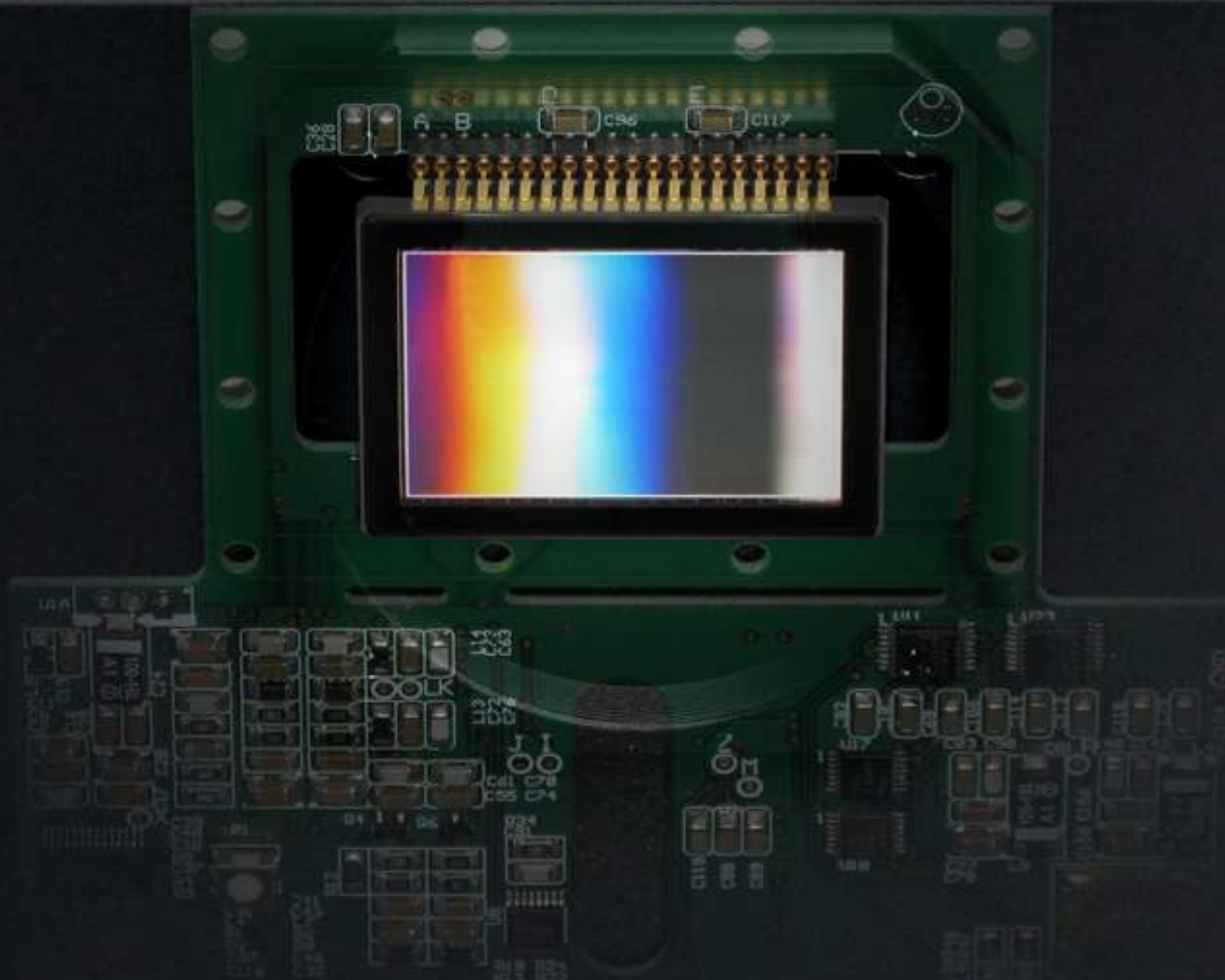


# CCD kamery v astronomii



Pavel Cagaš  
Moravské přístroje

(e-mail: [pc@gxccd.com](mailto:pc@gxccd.com))  
(<http://www.gxccd.com/>)



PROGRAM  
CEZHRANIČNEJ  
SPOLUPRÁCE  
SLOVENSKÁ REPUBLIKA  
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA  
EURÓPSKY FOND  
REGIONÁLNEHO ROZVOJA  
SPOLČNE BEZ HRANÍČ



FOND MIKROPROJEKTŮ

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



**PROGRAM  
CEZHRANIČNEJ  
SPOLUPRÁCE**  
SLOVENSKÁ REPUBLIKA  
ČESKÁ REPUBLIKA



**EURÓPSKA ÚNIA  
EURÓPSKY FOND  
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**  
SPOLOČNE BEZ HRANÍC



# 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 je Nobelovou cenou 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.

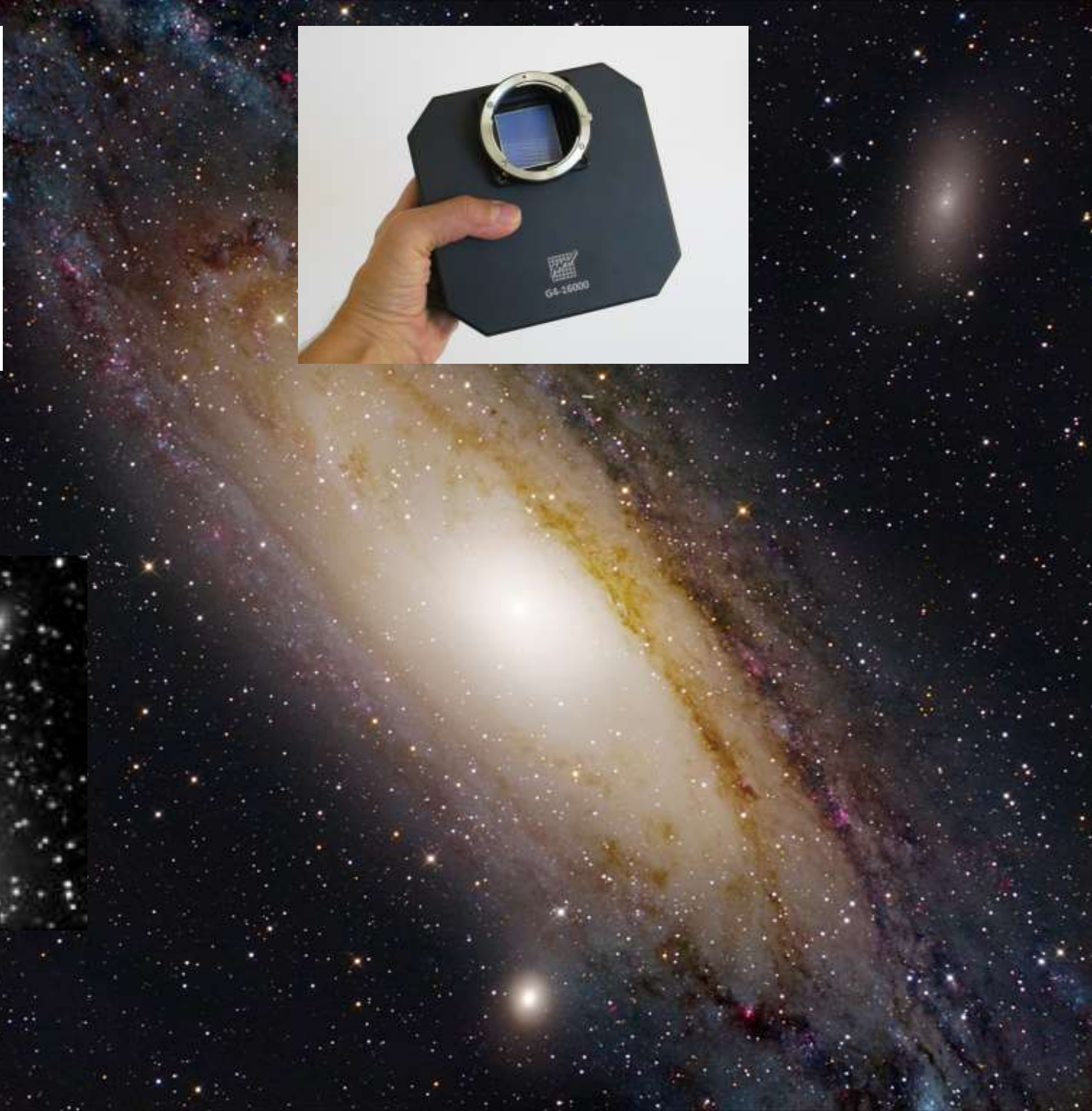


A negative voltage applied to the electrodes of the above structure causes a depletion region to form under the electrode. The band bending across section A-A when the voltage is first applied is shown below. As a result of generation-recombination centers in the depletion region and at

W. S. Boyle  
10/17/69

G. E. Smith 10/17/69

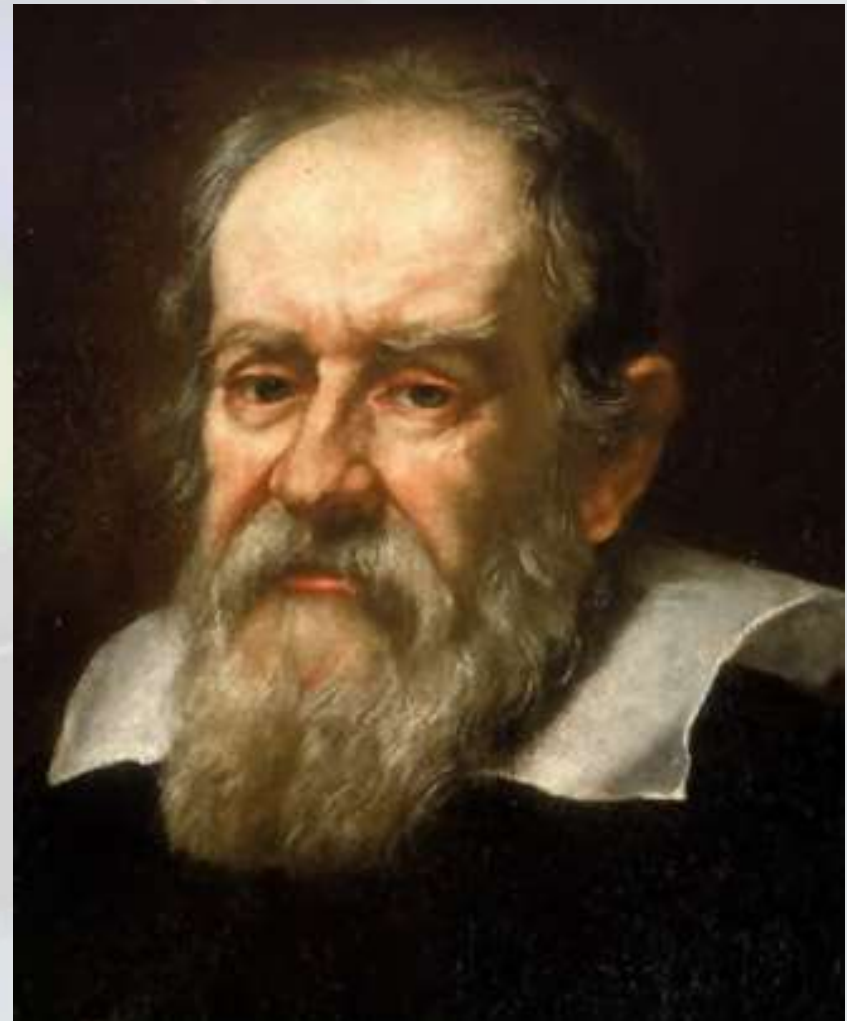
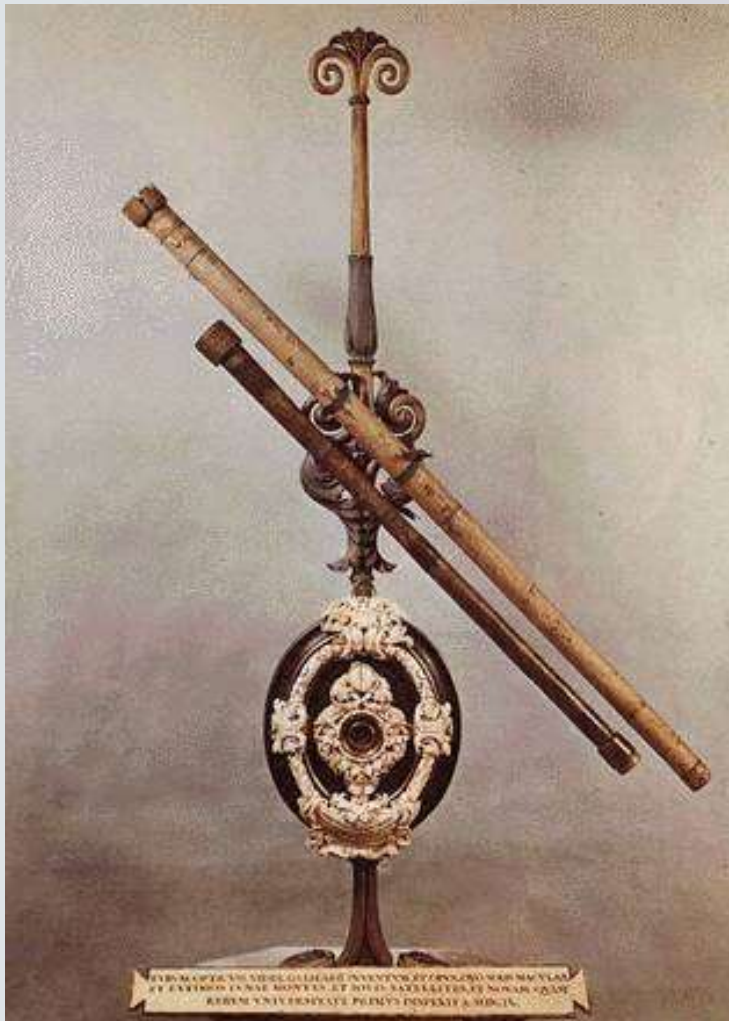






# Trocha historie

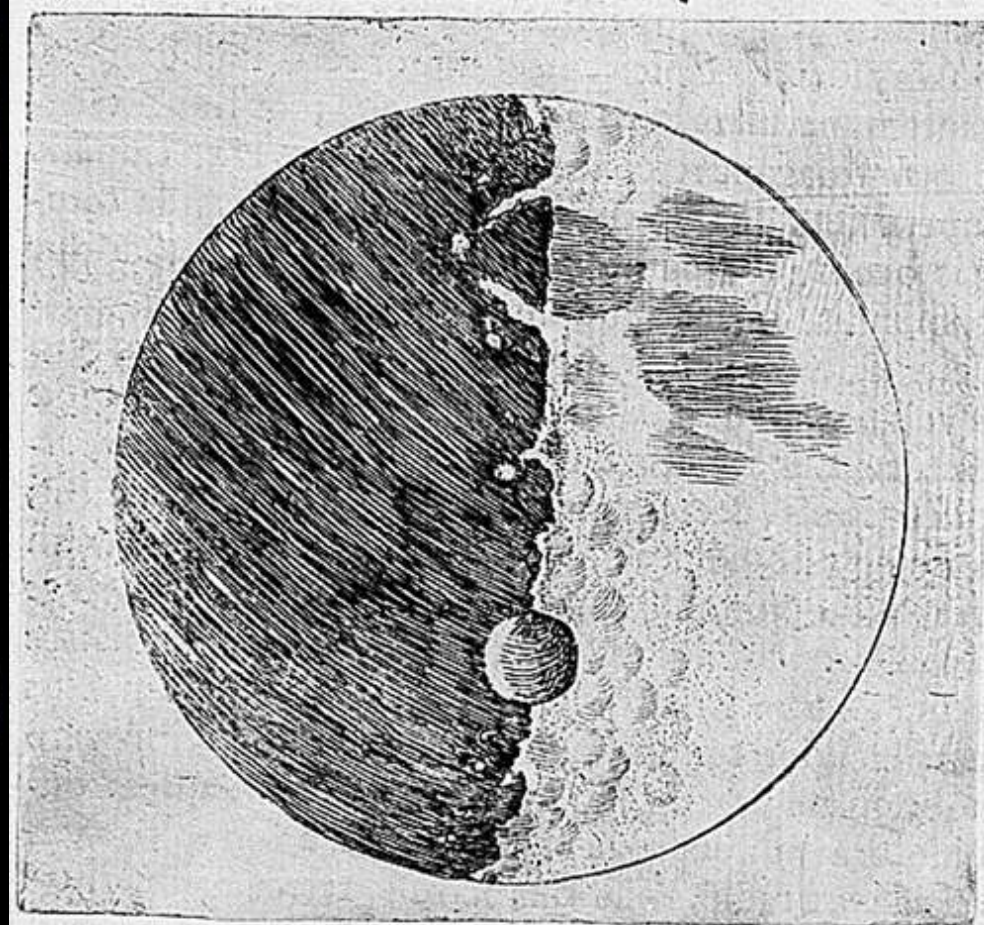
# 1. astronomická revoluce: dalekohled (Galileo Galilei, 1609)





2,8

- Měsíc je svět podobný Zemi.
- Jsou na něm pohoří i nížiny.





Sex<sup>mo</sup> Principe.

Galileo Galilei Humilis<sup>s</sup> Servo della Ser.<sup>a</sup> V.<sup>a</sup> inuigilante.  
Io assistiamo et io ogni spirito se bene ho solam satisfare  
alcaro che non della Lettera di Matematiche nelle Scu-  
ole di Padova,

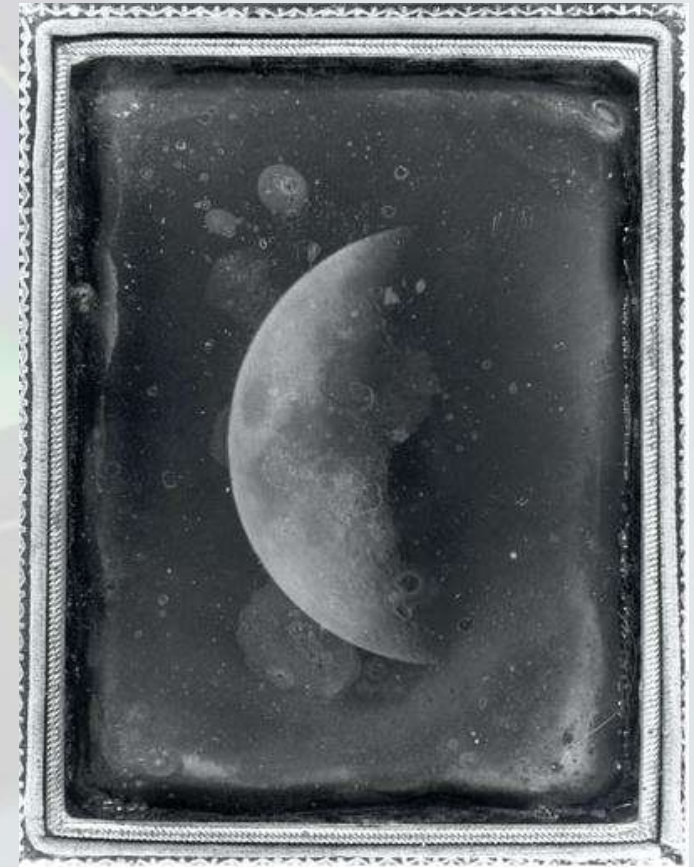
Inuenire d'auere determinato di presentare al Sex<sup>mo</sup> Principe  
l'occhio et il se essere di giuamento inestimabile se ogni  
ragione et in una marittima o terrestre stimo di tenere quel-  
lo nuovo artificio nel maggior segreto et solam a disposizione  
di S.<sup>a</sup> L. V. che l'auuto dalle piu di dite speculazioni di  
prospettiva ha l'vantaggio di scoprire Legni et Vele dell'inimico  
di piu hore et piu di tempo prima che egli se sopra noi et distinguendo  
il numero et la qualita dei Vasselli giudicare la sua forte  
pallarsi alla caccia al combattimento o alla fuga, o pure esser  
nella battaglia aperta uider et particolarmente distinguere ogni suo  
moto et propriamente.

Adi 7. di Gennaio  
Giorno si uede uero  
Adi 8. uero  
Adi 12. si uede in tale uisione  
Adi 13. si uede in uisione in Giorno 4 Stelle  
Adi 14. è angelo  
Adi 15. si uede la prima a 7 ore in uisione la 4<sup>a</sup> ora di-  
stante dalla 3<sup>a</sup> l'occhio Terra  
Lo spazio delle 3 uisioni ad ora  
maggiore del diametro di 7 et e  
uero in linea retta.

- Planety nejsou jen body, ale kotoučky.
  - Venuše mění fáze podobně jako Měsíc.
- Kolem planet obíhají satelity.
  - Galileo objevil 4 největší měsíce Jupitera.
- Mléčná dráha je složena z množství hvězd.
  - Bez dalekohledu je ale nelze rozlišit.

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

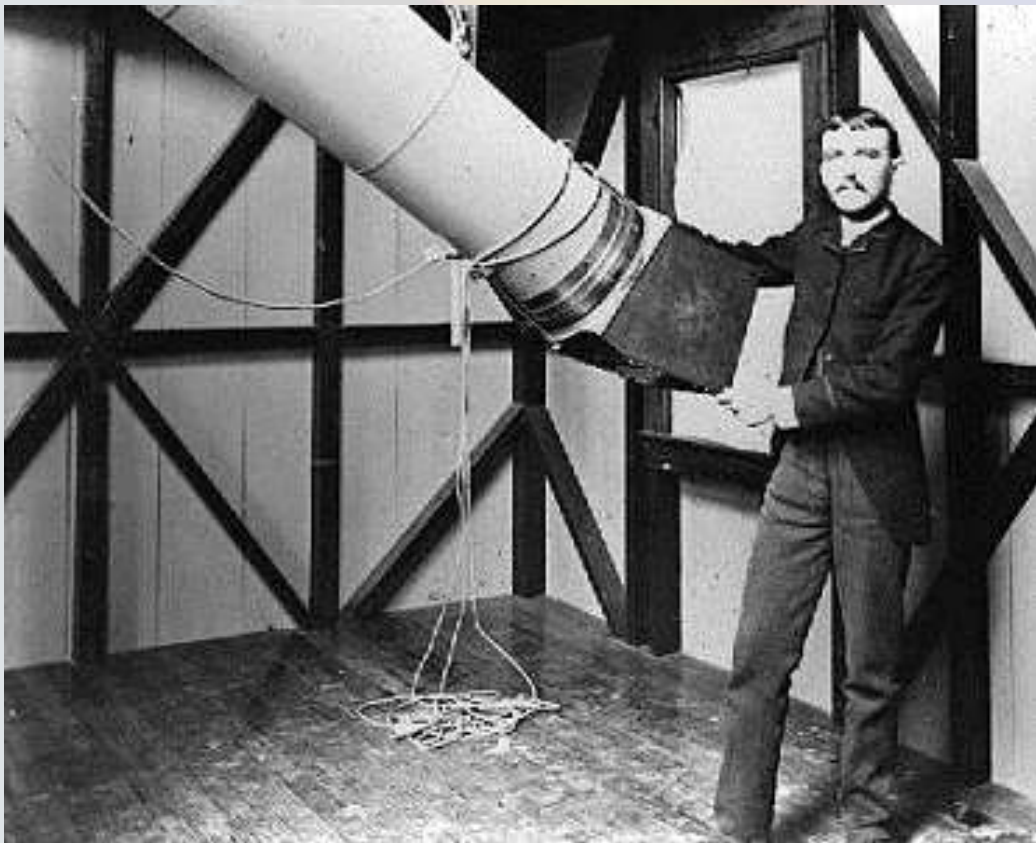
- V lednu 1839 Daguerre ohlásil vynález procesu zaznamenání světelného obrazu.
- Oznámení o několik měsíců předcházel snímek Měsíce pořízený Daguerrovým zastáncem Francoisem Aragem.
  - Zdá se tedy, že astrofotografie předešla obecnou fotografii.





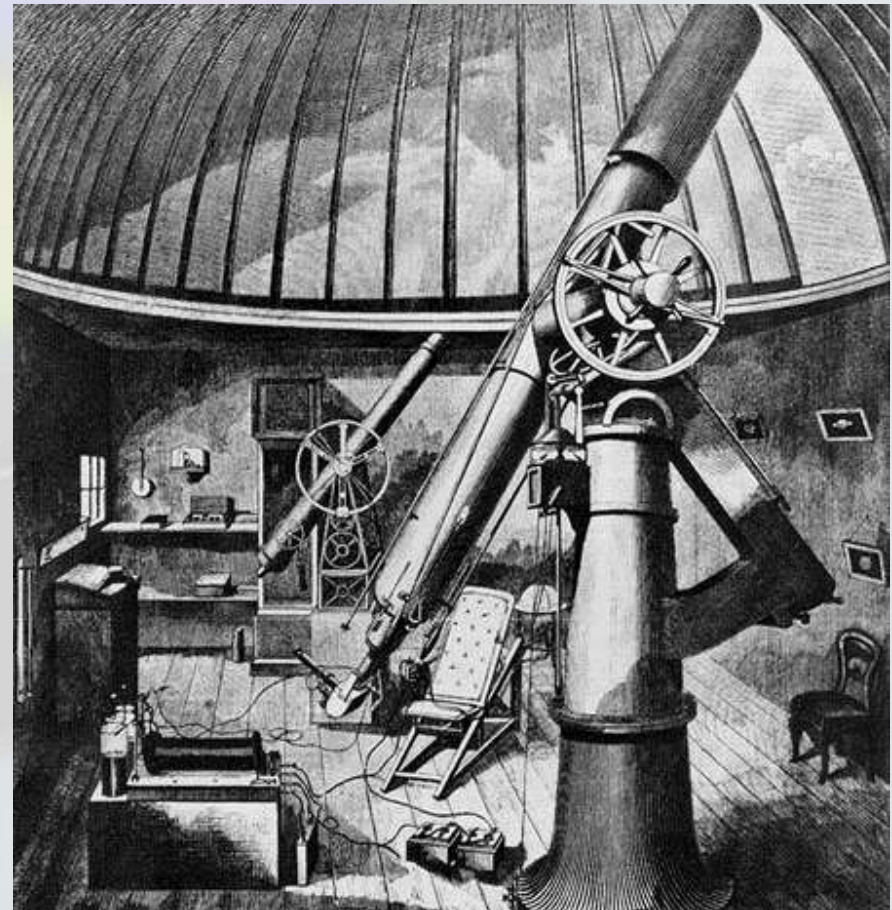
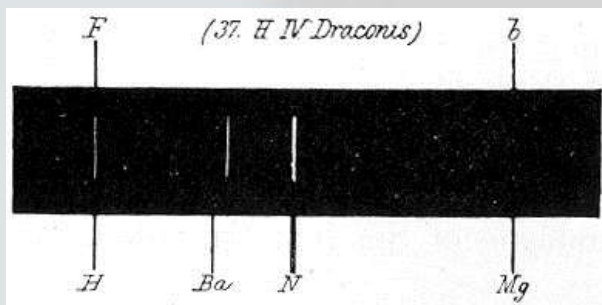
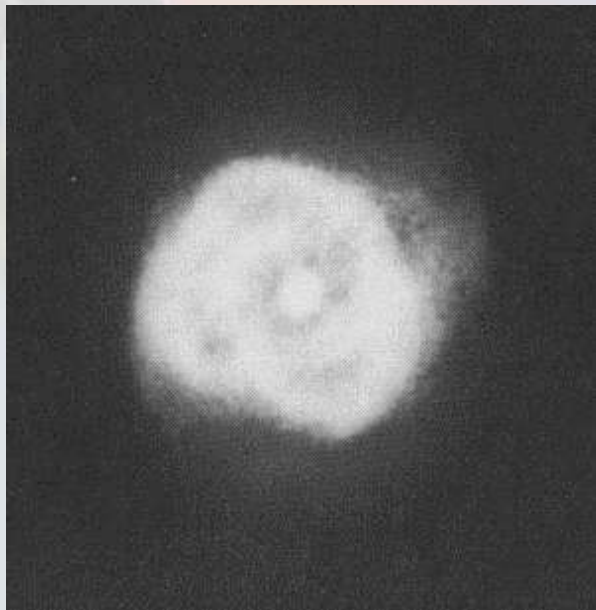
# Henry Draper

- První fotografoval Velkou Mlhovinu v Orionu
- Portrét Měsíce z roku 1880



# William Huggins

- První fotografie spekter
  - Spektrum H IV Draconis (NGC 6543)



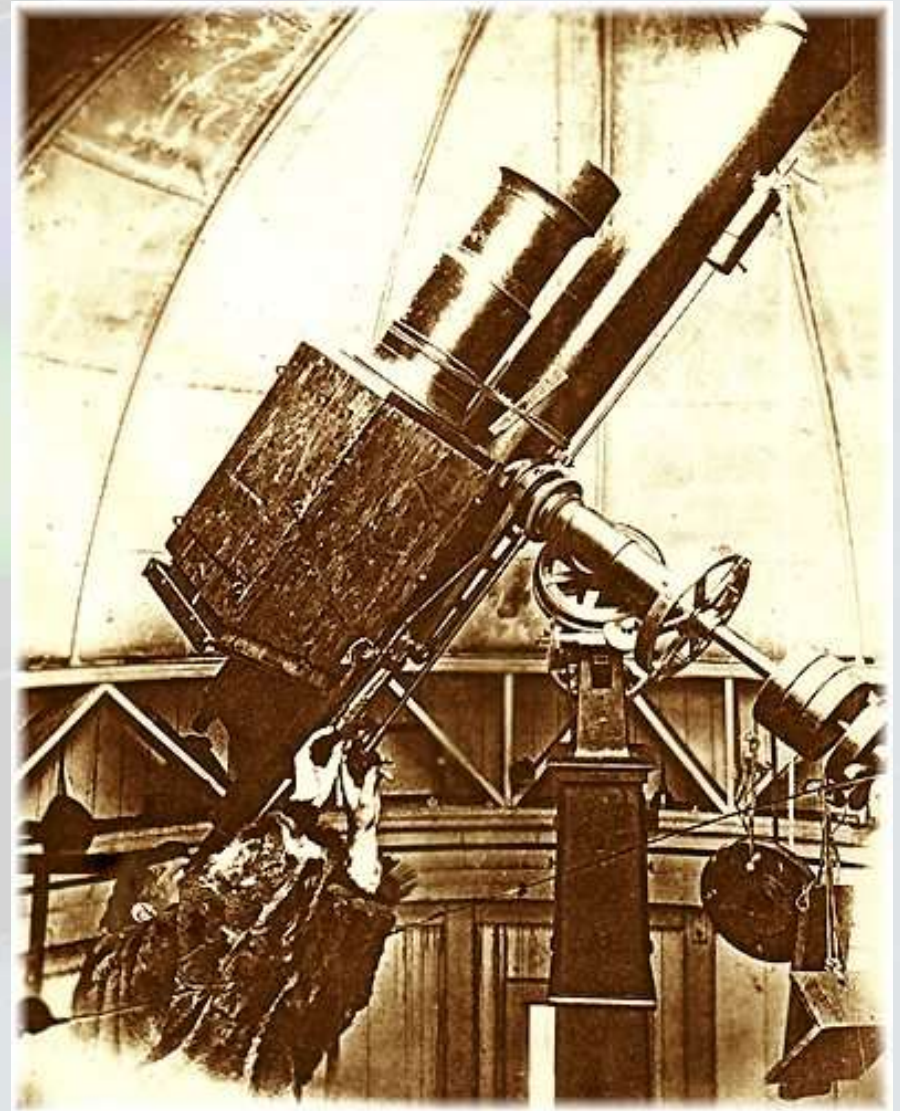


# Fotografie dokáže střídat světlo

- 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.
- Fotografická deska navíc nabízí další možnosti zpracování
  - změření pozic hvězd mikrometrem, změření jasnosti hvězd fotometrem apod.

# 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.

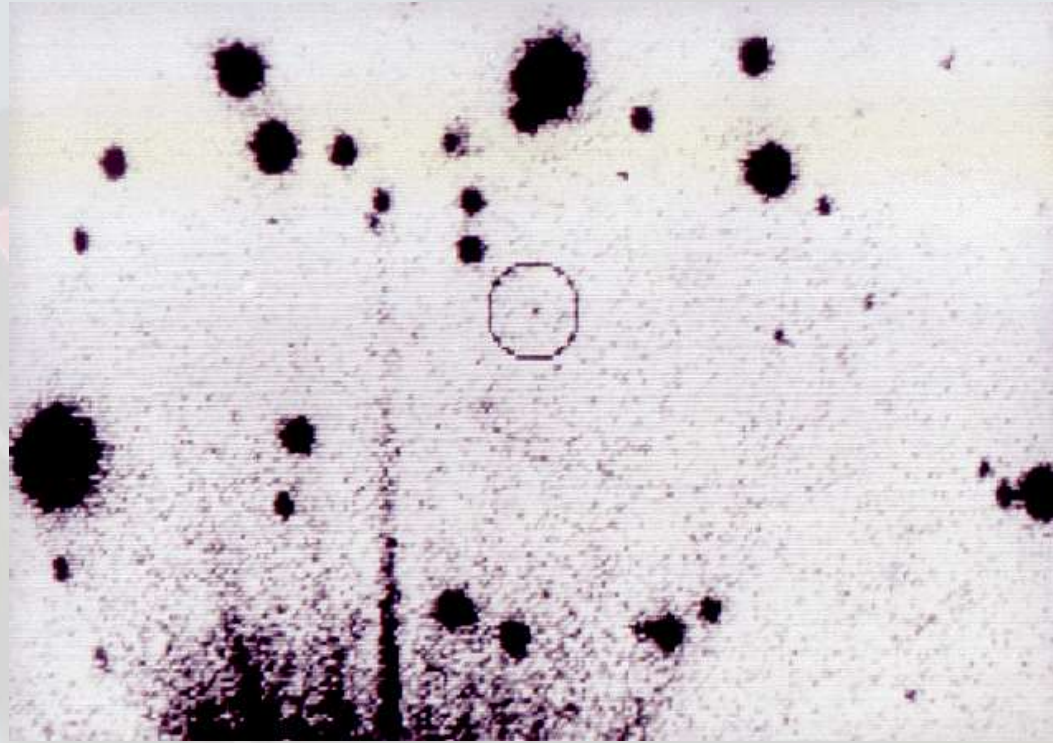




# Fotografie na vrcholu

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

### 3. astronomická revoluce: CCD a digitální zpracování obrazu



- 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. Předchůdci této sondy včetně sond Voyager, Mariner apod. nesly klasické televizní kamery nebo jen jednodušší skenovací fotometry. Rozlišení CCD kamer sondy Galileo bylo pouhých  $800 \times 800$  bodů - s takovým rozlišením by se dnes nespokojil ani začínající amatérský astronom.





# Principy práce CCD

# Jak funguje CCD

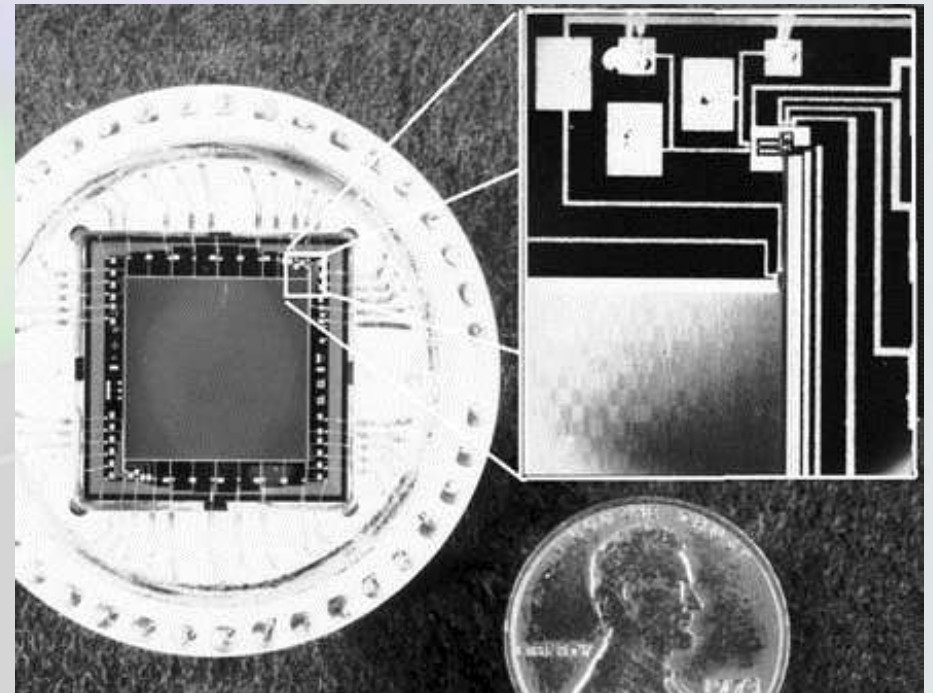
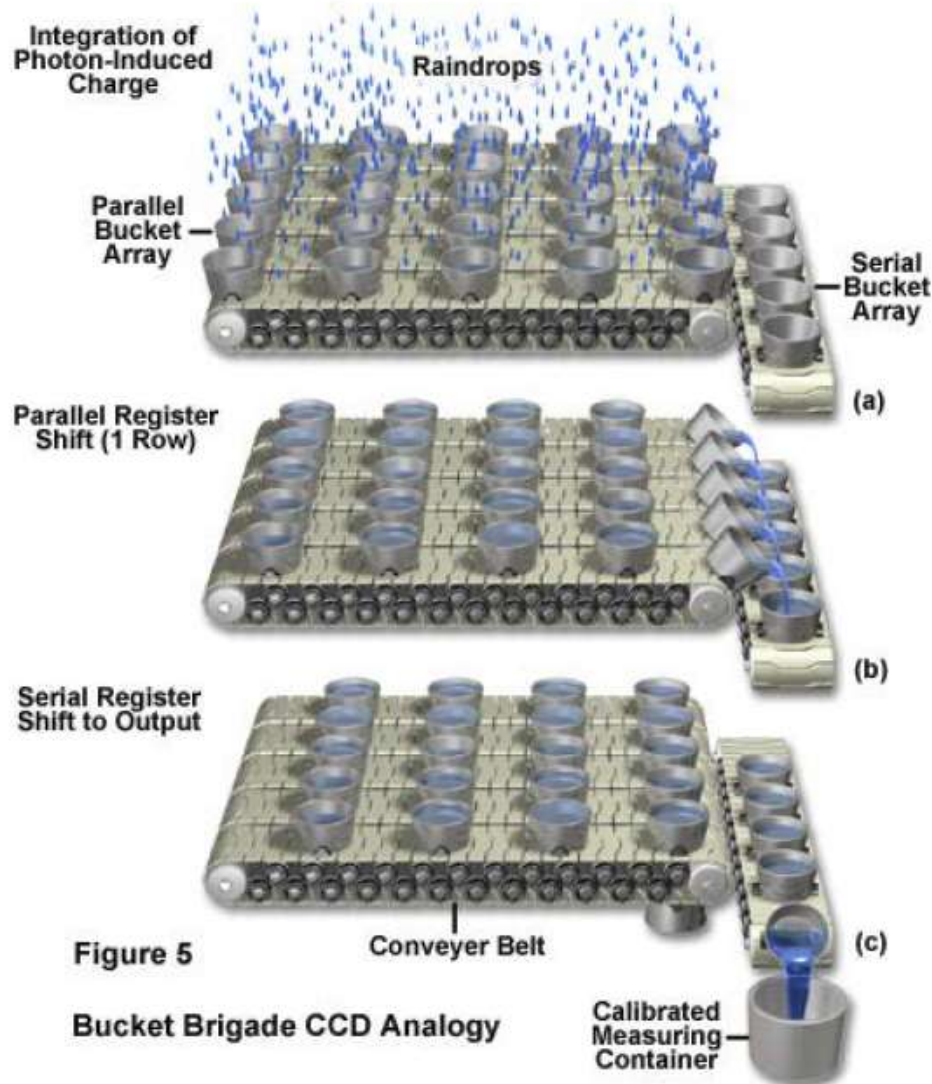
- Základní princip práce CCD je poměrně jednoduchý – přicházející světlo vytváří v polovodiči elektrický náboj (elektrony).
- Elektrony se nemohou volně pohybovat po čipu, neboť na čipu jsou vytvořeny svislé negativní potenciálové vlny (odpuzující elektrony).
- Systém vodorovných elektrod, rovněž s negativním 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



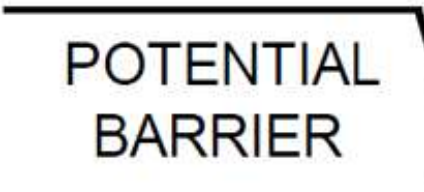
$-V$

$+V$

$-V$



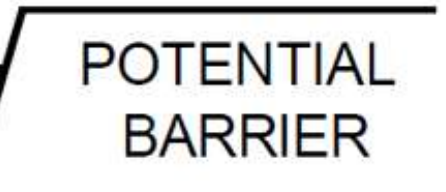
POLYSILICON  
SILICON DIOXIDE



POTENTIAL  
BARRIER



POTENTIAL  
WELL

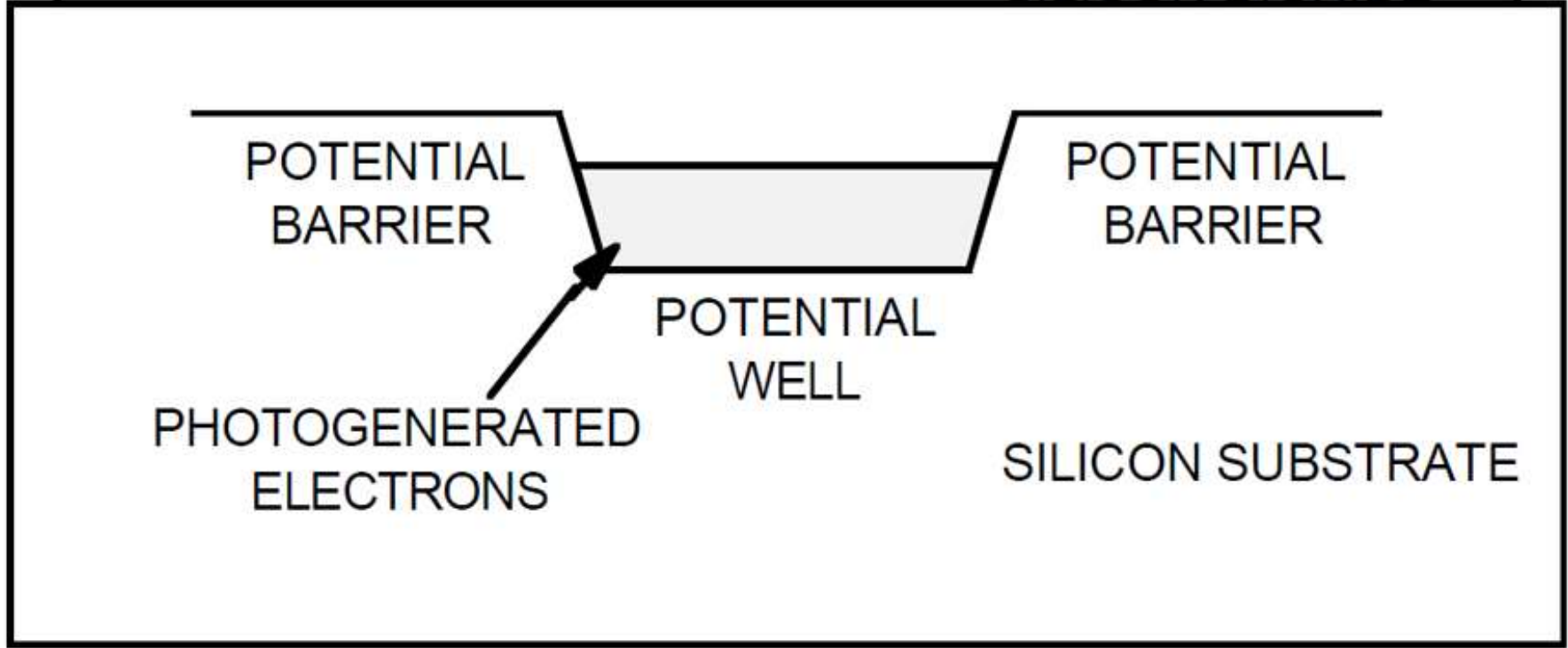


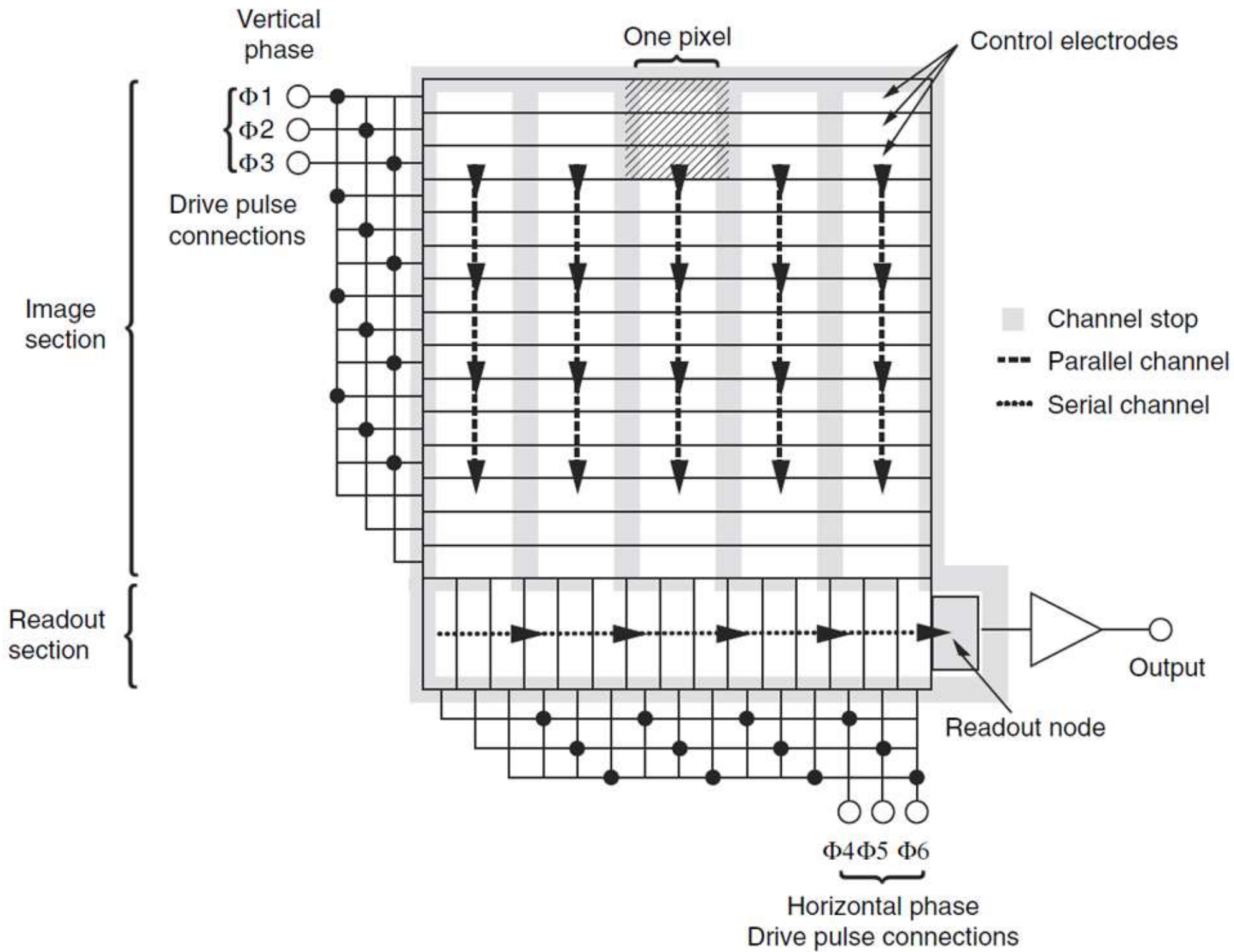
POTENTIAL  
BARRIER

PHOTOGENERATED  
ELECTRONS



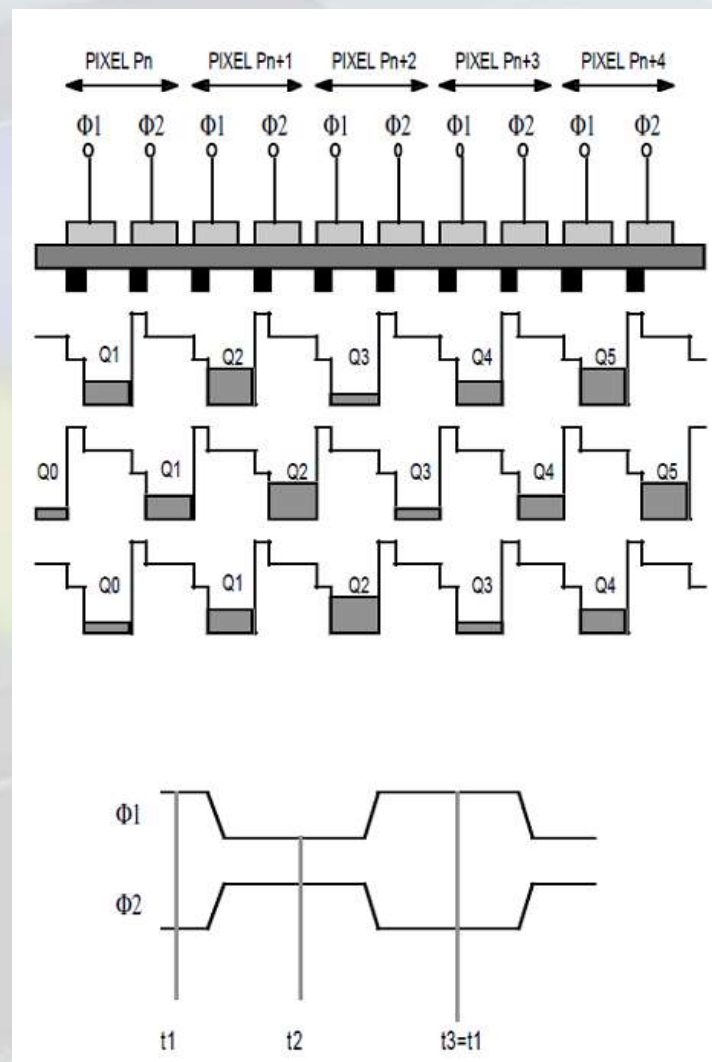
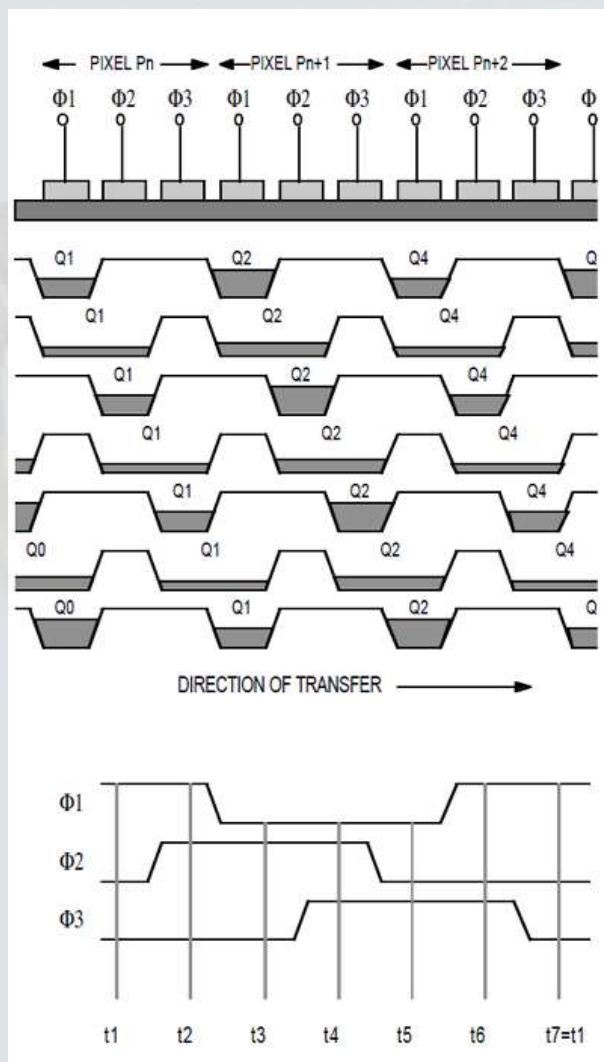
SILICON SUBSTRATE





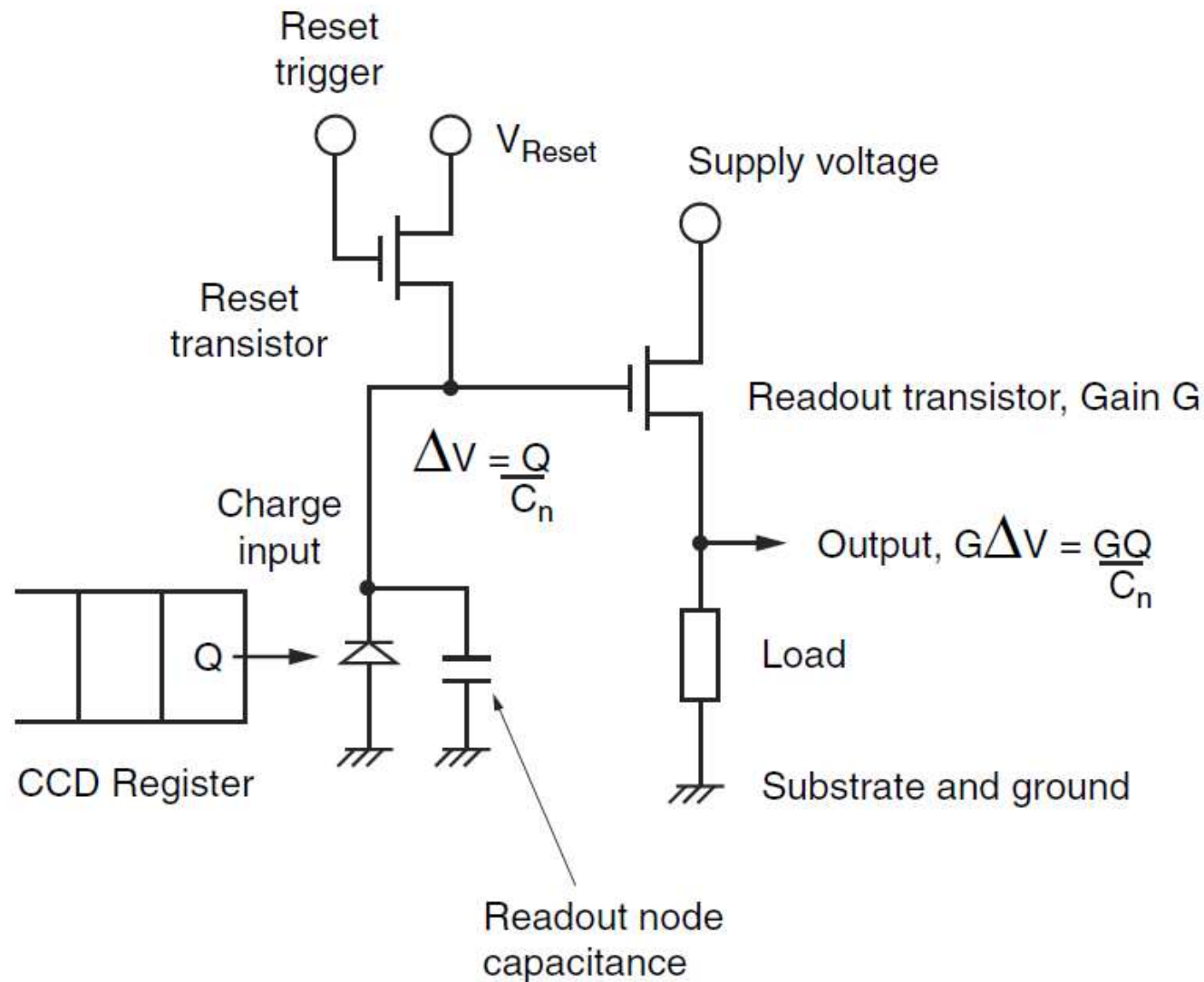


# Posun náboje (charge coupling)

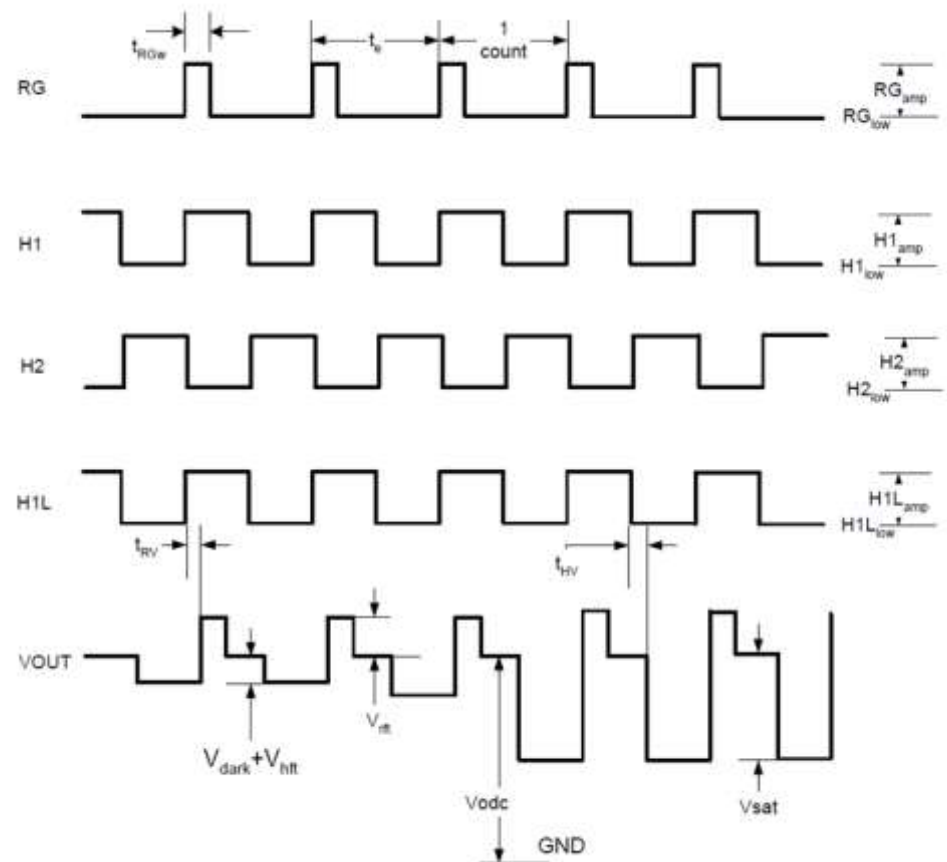
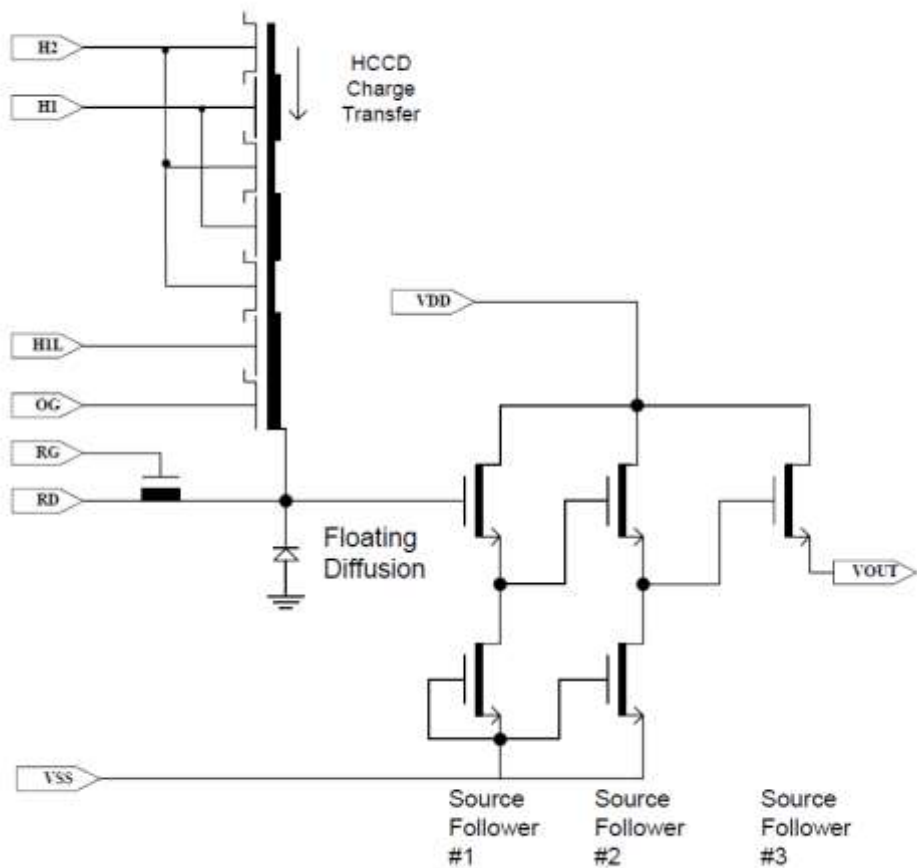


Základní třífázový a pravý dvoufázový, využívající schodového potenciálu pod řídicími elektrodami

# Výstupní zesilovač (převodník náboje na napětí)

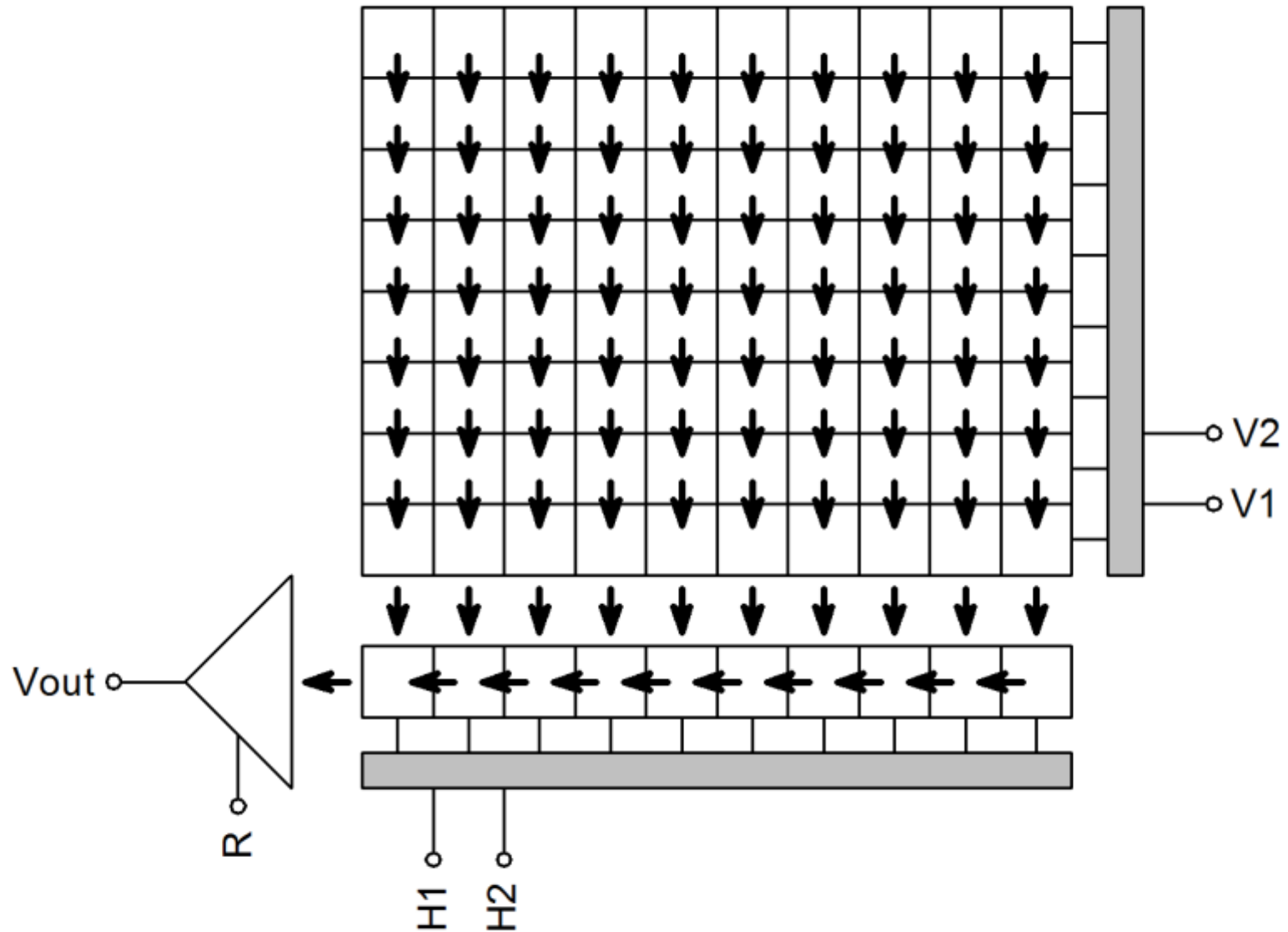


# Výstupní signál

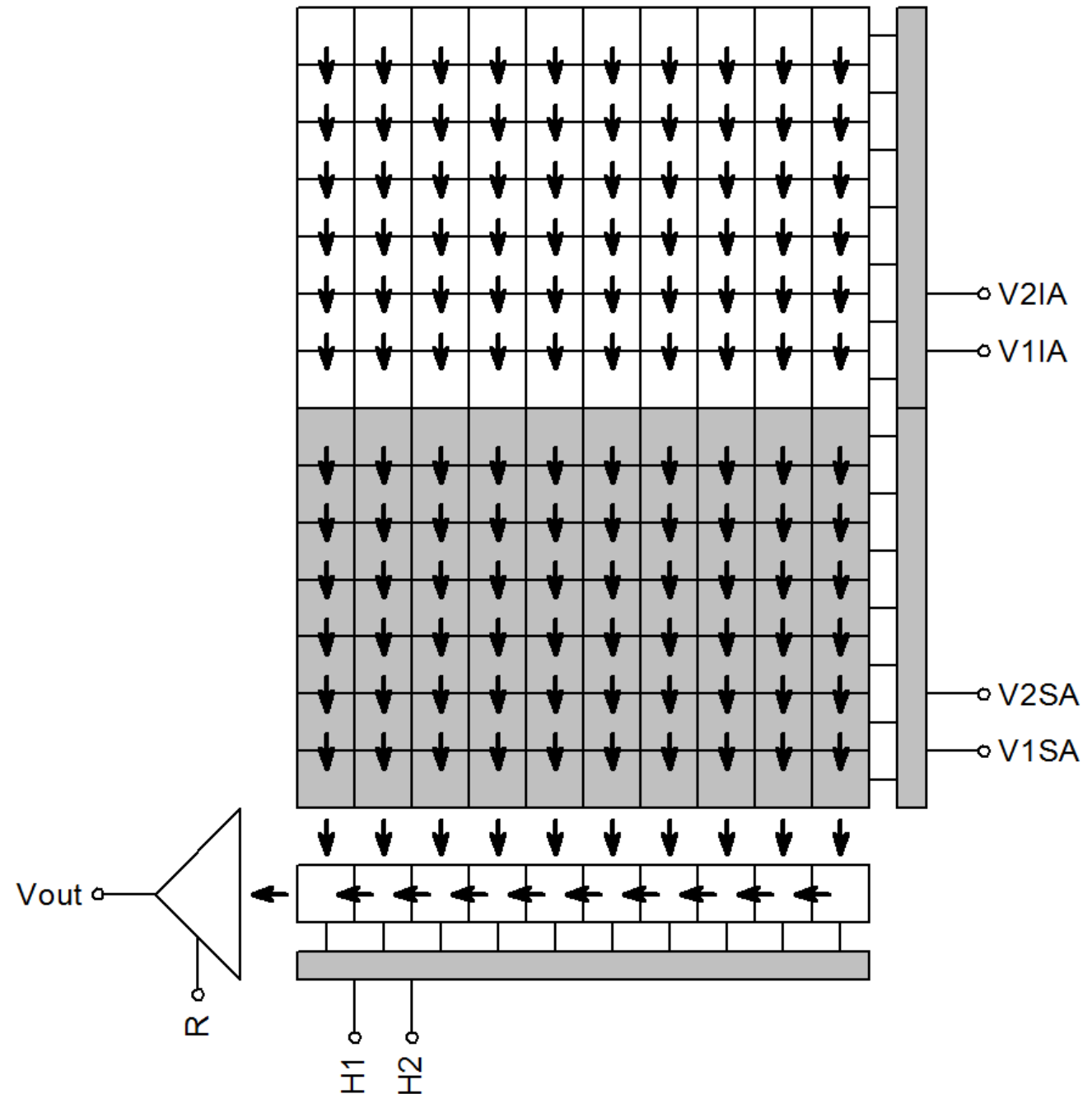
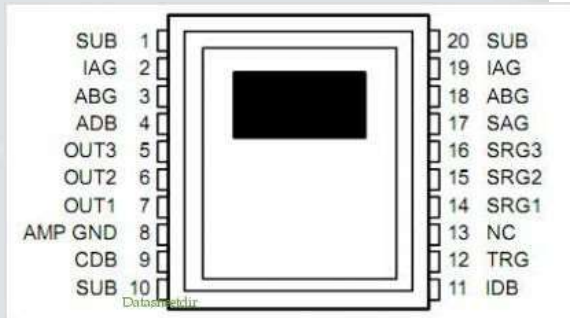




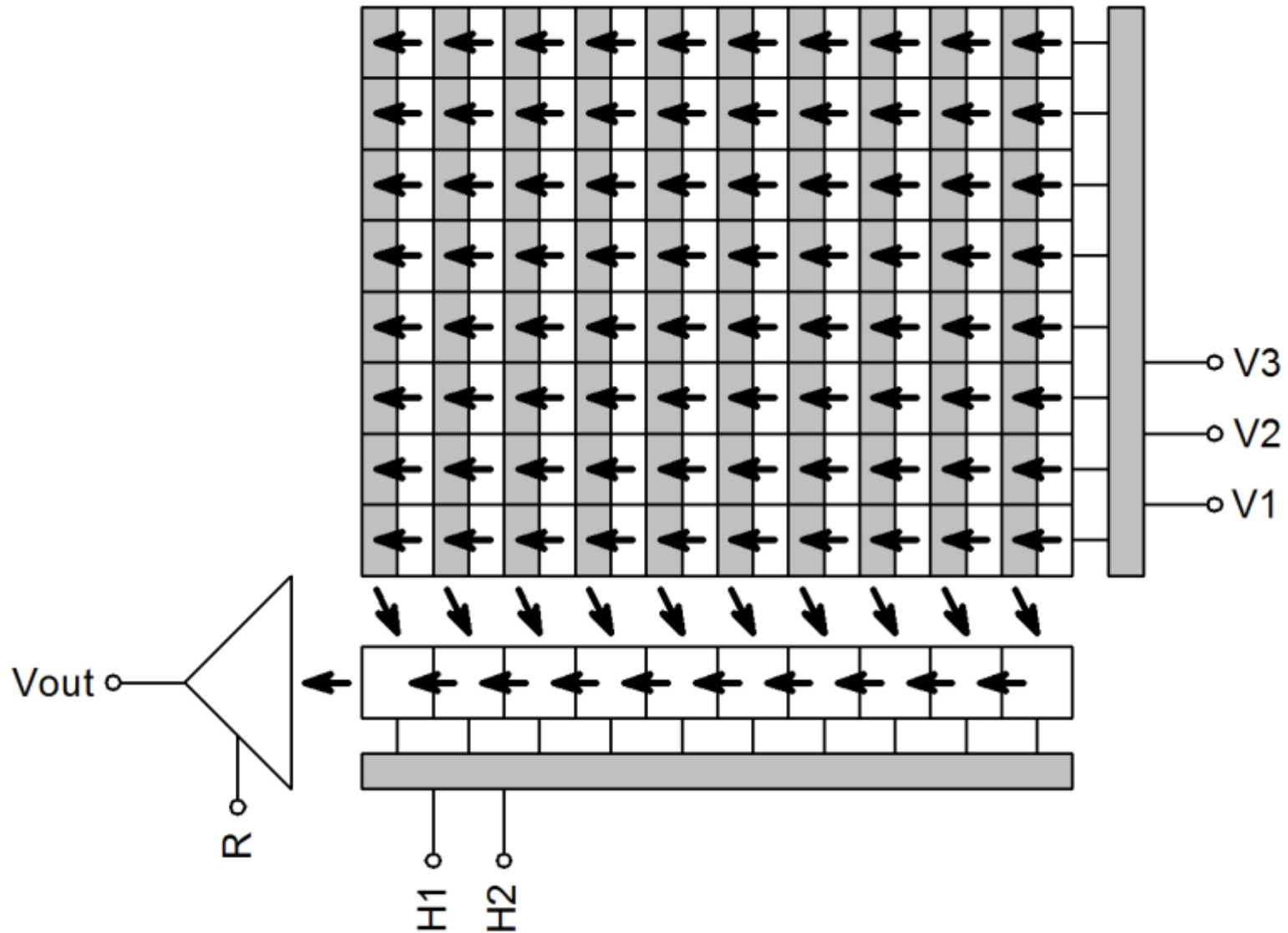
# Full Frame (FF)



# Frame Transfer (FT)



# Interline Transfer (IT)

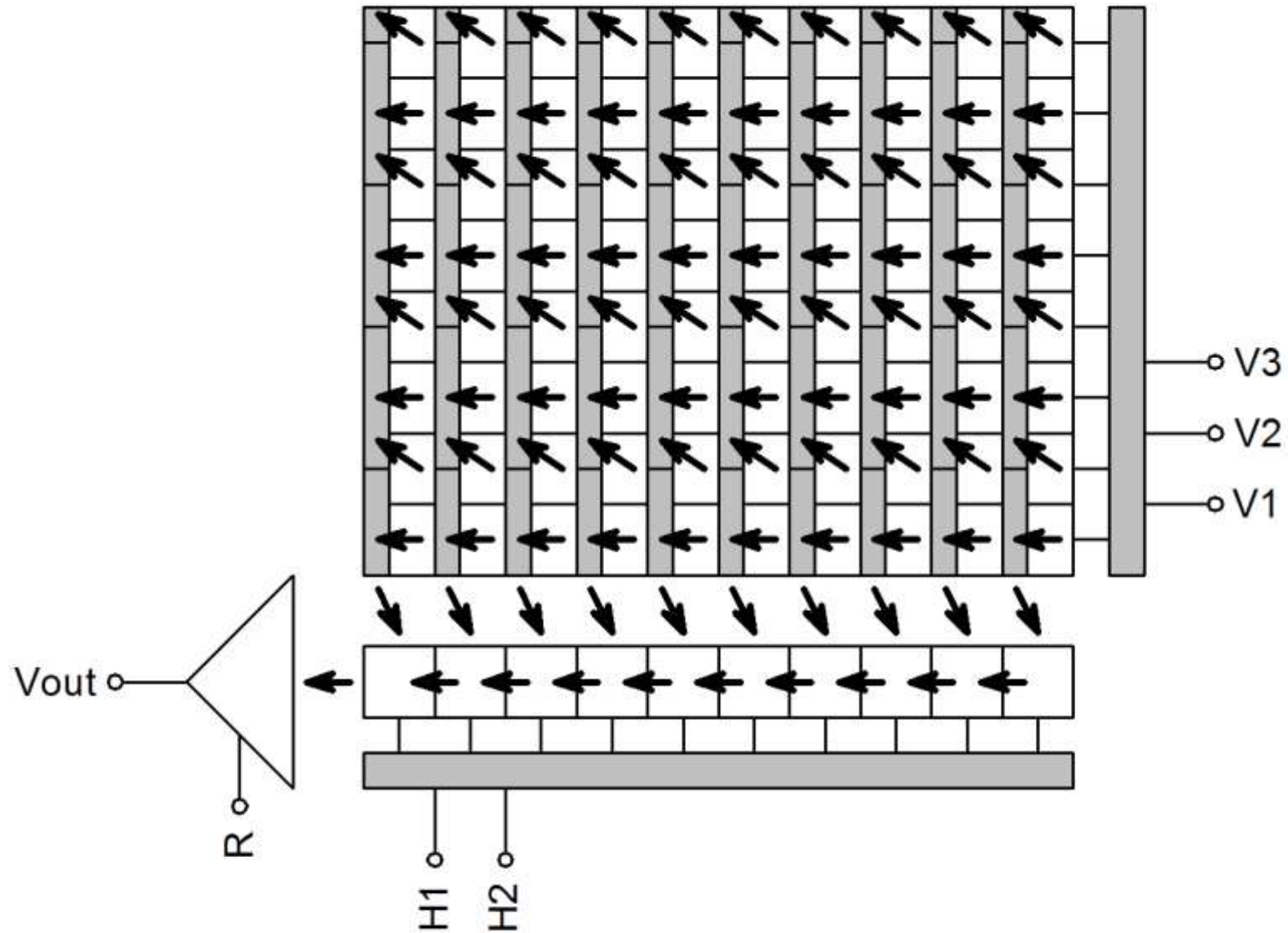




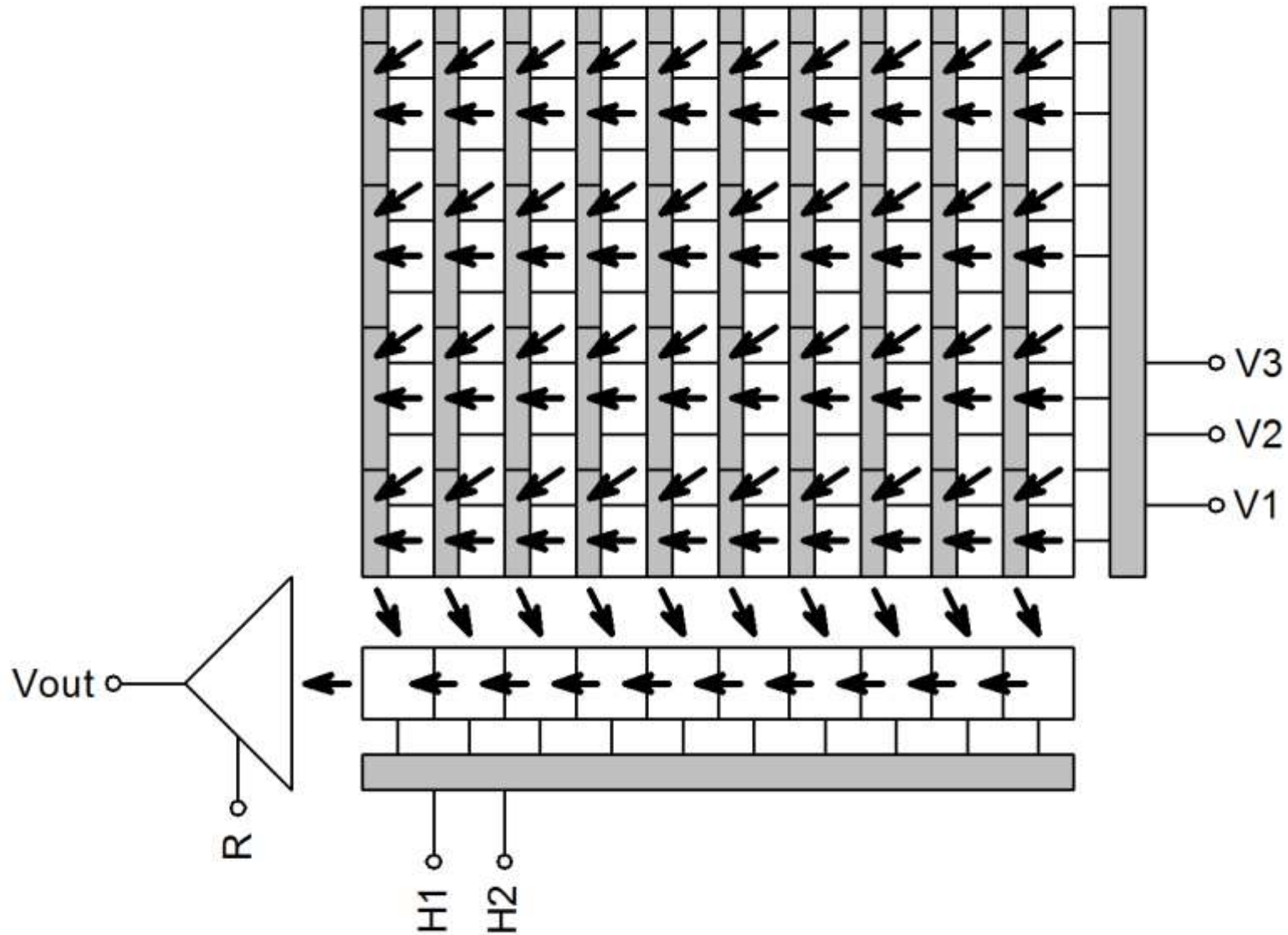
# CCD čipy pro TV kamery (analogové)

- Z historických důvodů je televizní signál tvořen střídajícími se snímky o polovičním počtu řádků (půlsnímký). Lichý půlsnímek tak obsahuje řádky 1, 3, 5 atd., sudý půlsnímek pak řádky 2, 4, 6, atd. Těmto konvencím se přizpůsobili i výrobci CCD čipů a pozměnili architekturu snímačů používaných v televizní technice.
- Ovšem pokud by byl vyčítán vždy pouze každý druhý řádek, citlivost snímače by značně utrpěla (50% informace by se zahodilo). Proto u „televizních“ CCD čipů jsou exponované řádky elektronicky sečteny (viz. binning) tak, že lichý půlsnímek obsahuje samotný první řádek, následovaný součtem 2. a 3. řádku, součtem 4. a 5. řádku atd. Sudý půlsnímek pak sečte 1. a 2. řádek, 3. a 4. řádek atd.

# Interlaced, Interline Transfer (odd)



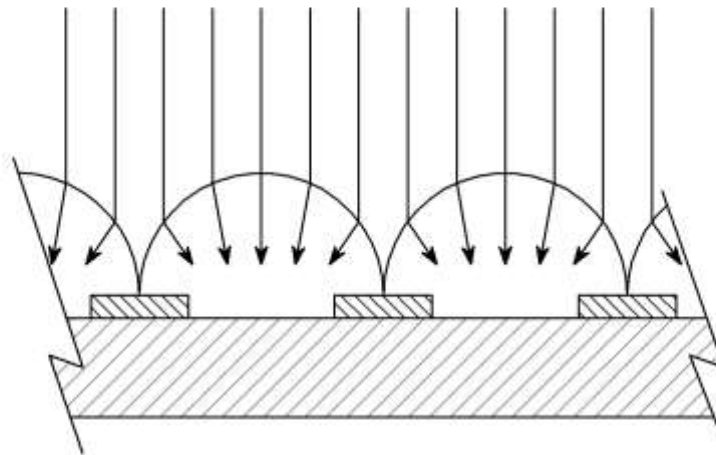
# Interlaced, Interline Transfer (even)





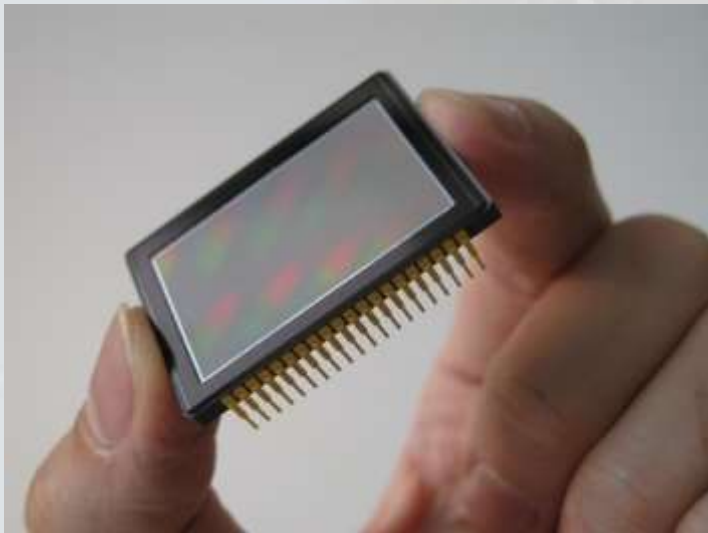
# Boj o kvantovou účinnost (mikročočky)

- Prokládání aktivních a neaktivních sloupců omezuje plochu, kterou čip shromažďuje světlo. Tento efekt může být částečně kompenzován pokročilými výrobními postupy, např. aplikací tzv. mikročoček. Ty soustředí světlo s 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

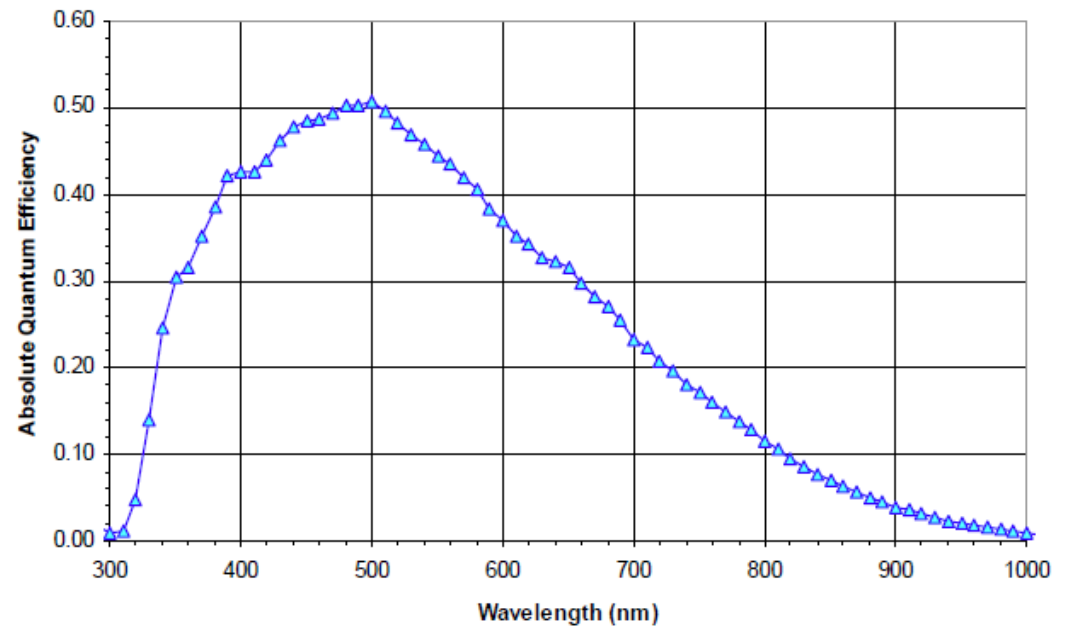


Figure 12: Monochrome with Microlens Quantum Efficiency

Monochrome without Microlens Quantum Efficiency

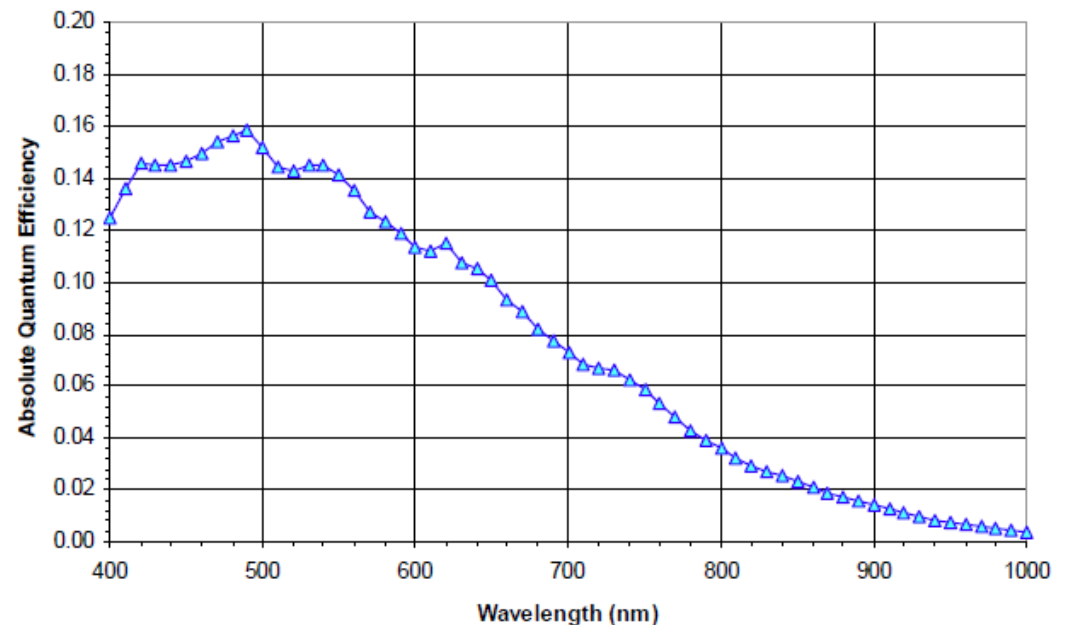
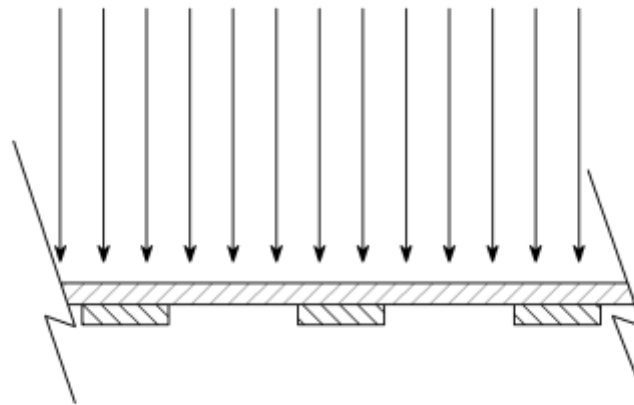


Figure 13: Monochrome without Microlens Quantum Efficiency

# Boj o kvantovou účinnost (Back-illuminated CCDs)

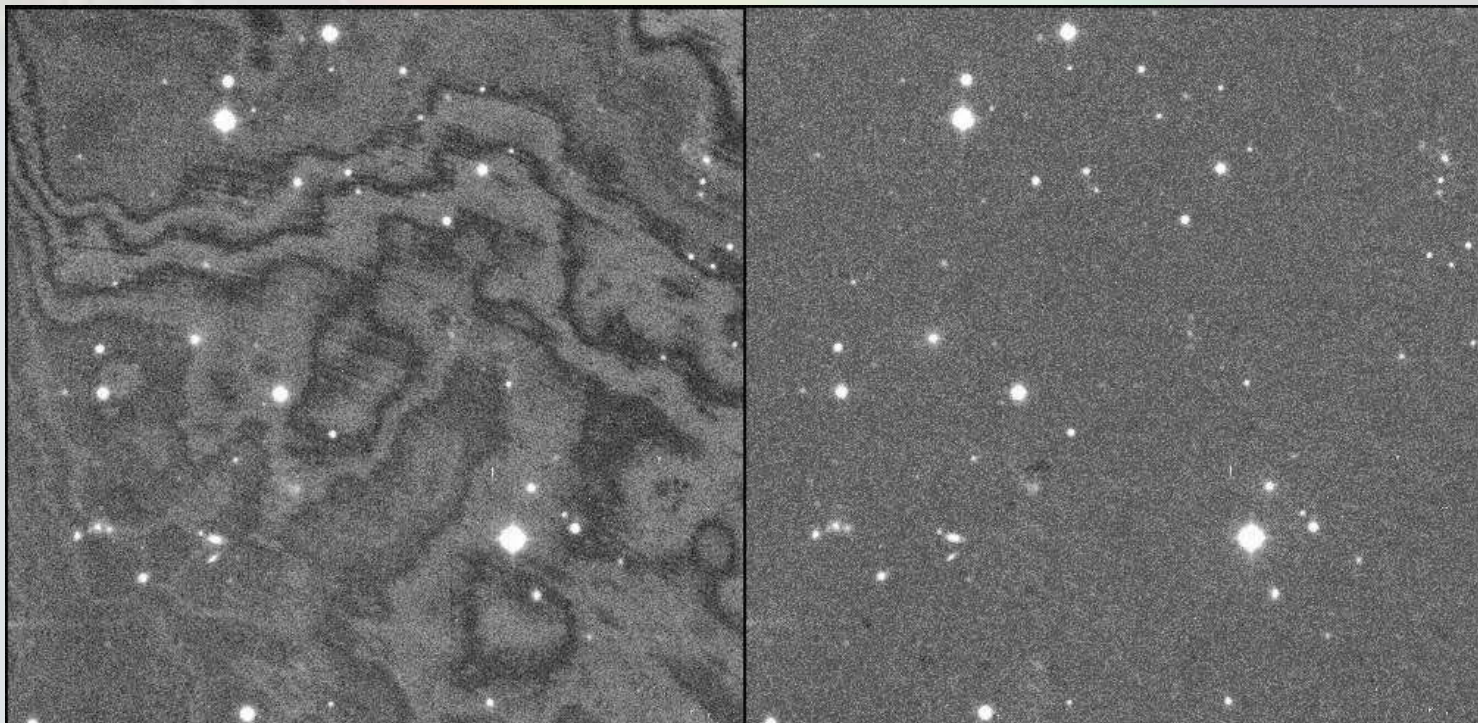
- Nejvyšší možné QE lze dosáhnout použitím tenčených čipů osvětlovaných zezadu (anglicky back-illuminated CCD). Tyto čipy jsou zapouzdřeny „vzhůru nohama“, takže elektrody jsou na spodní straně čipu a neblokují přicházející světlo. Samotný čip je velmi ztenčen až na tloušťku několika mikrometrů. Prakticky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





# Back-illuminated 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).



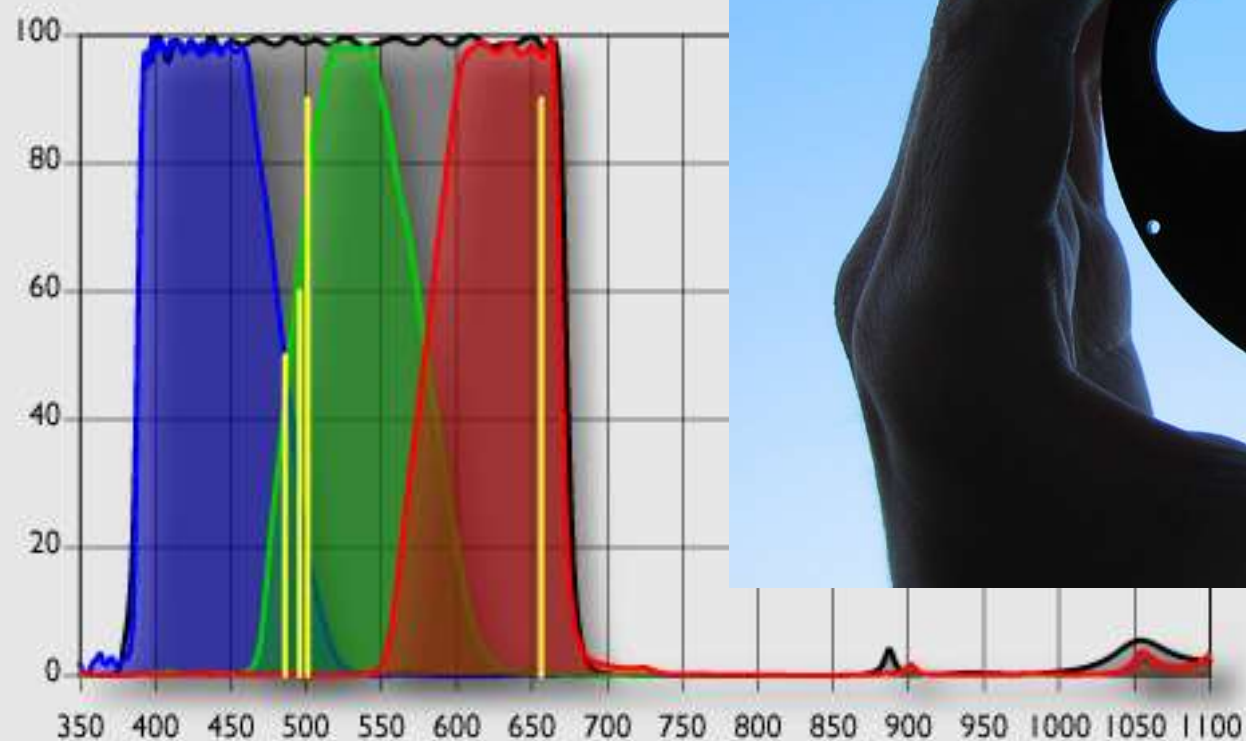


# Barevné CCD snímače

# Barevné snímky

- Abychom vytvořili barevný obraz, potřebujeme snímat zvlášť ve třech barvách - v červené, zelené a modré. Ale CCD snímač je citlivý na všechny barvy a dokonce zasahuje i mimo viditelné spektrum do blízké infračervené oblasti. K detekci pouze požadované barvy je tedy zapotřebí světlo filtrovat.
- 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.

# RGB filtry pro monochromní CCD







Červená



Zelená



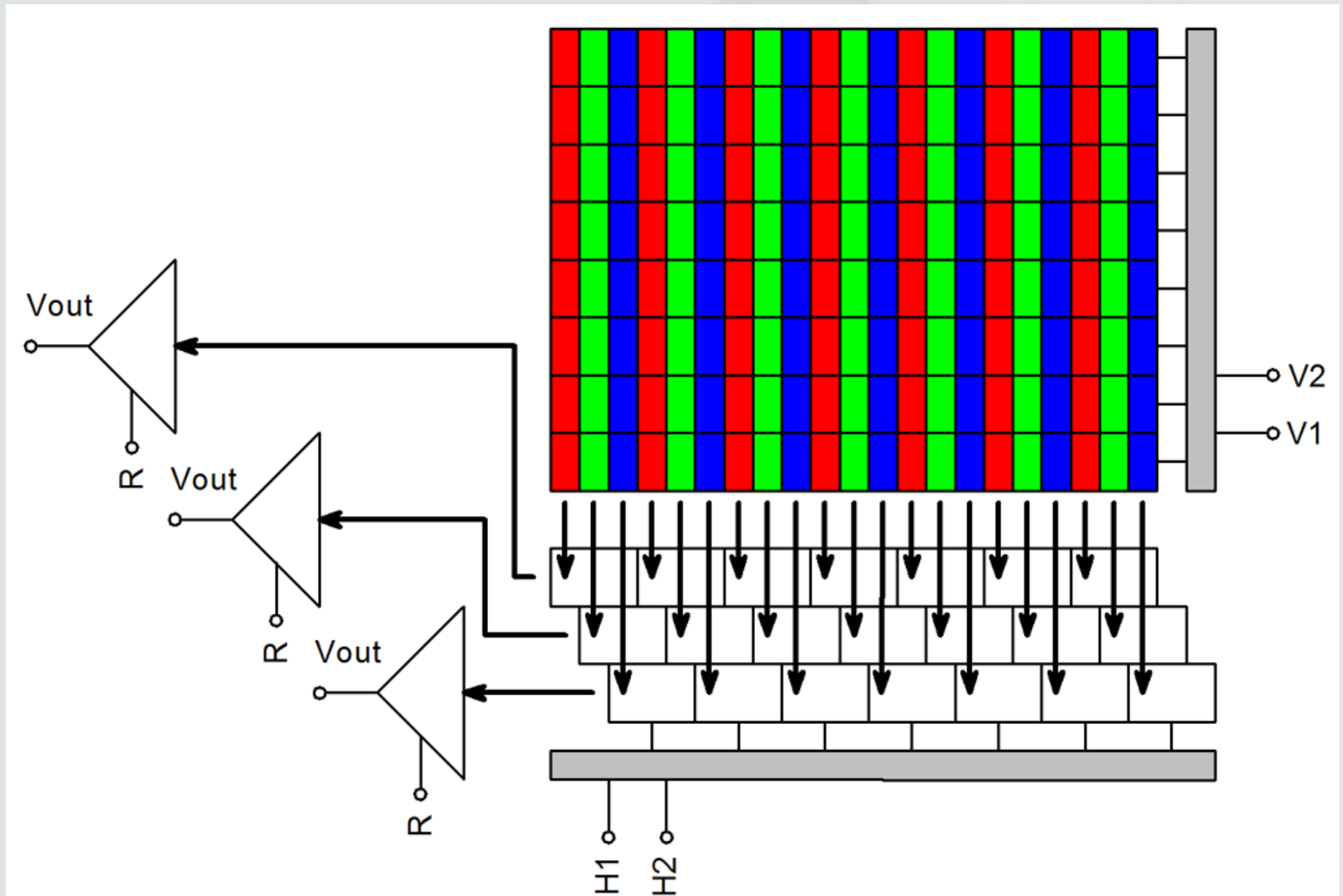
Modrá



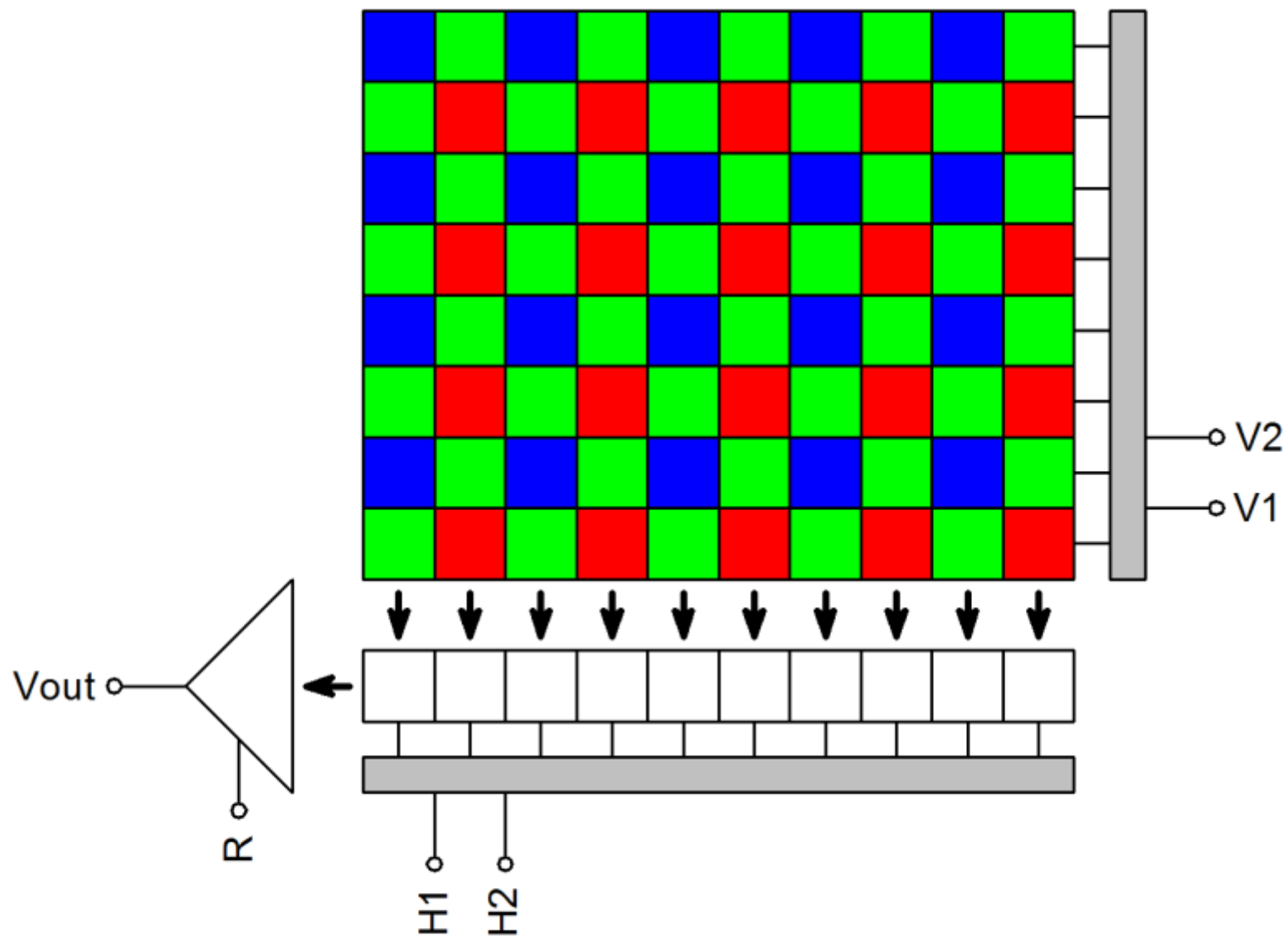
# Barevné CCD snímače

- První barevné CCD snímače pracovaly s celým sloupcem pixelů zakrytým jednou barevnou maskou - první sloupec byl červený, druhý zelený, třetí modrý, čtvrtý opět červený atd. Obrazový bod s úplnou barevnou informací byl vytvořen ze tří sousedních pixelů. Ačkoliv pixely u takových čipů byly protáhlé do výšky, přeci jen bylo vodorovné rozlišení takového čipu omezeno.
- Dnešní barevné CCD čipy používají tzv. „Bayerovy masky“. Pan Bayer, coby zaměstnanec firmy Kodak, přišel s ideou barevné masky, která je dnes používána u prakticky všech barevných CCD a CMOS snímačů.

# RGB CCD

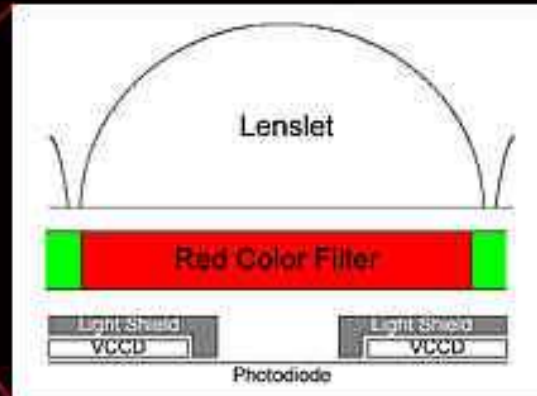
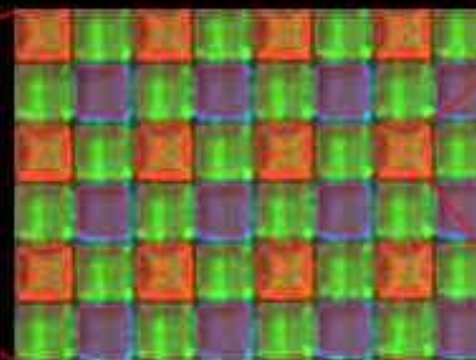
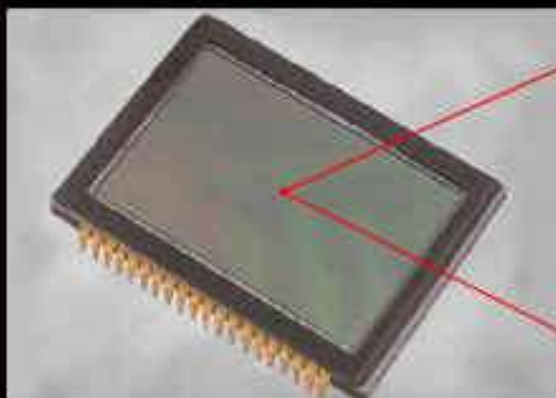
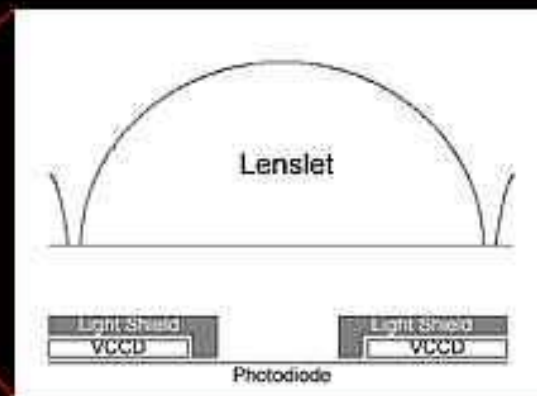
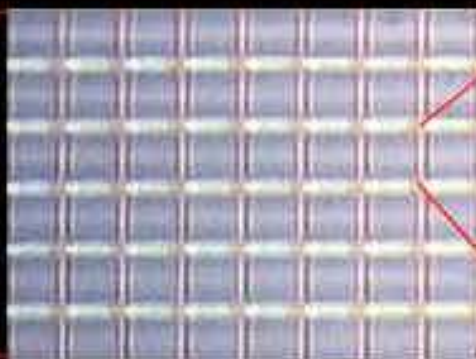
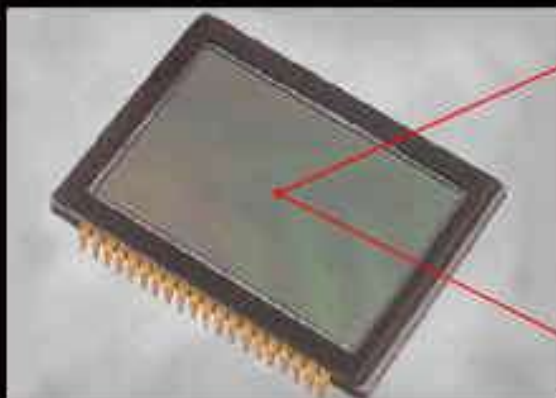


# Bayerova maska



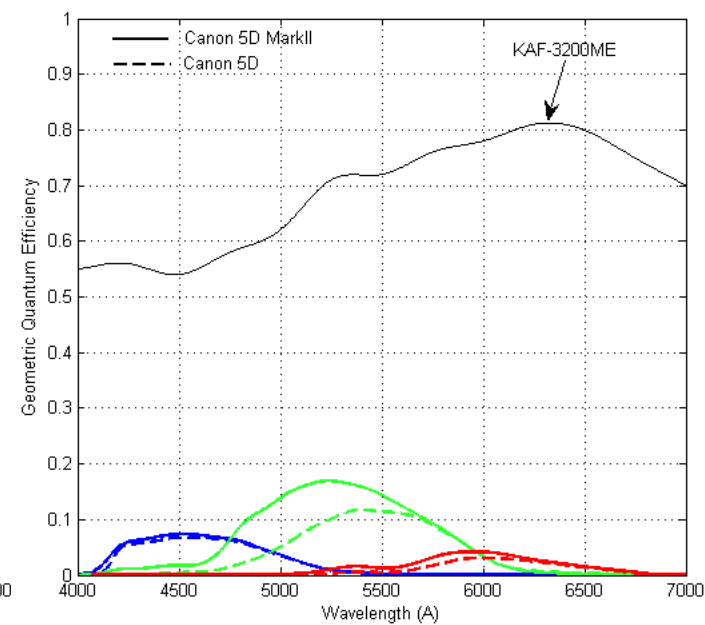
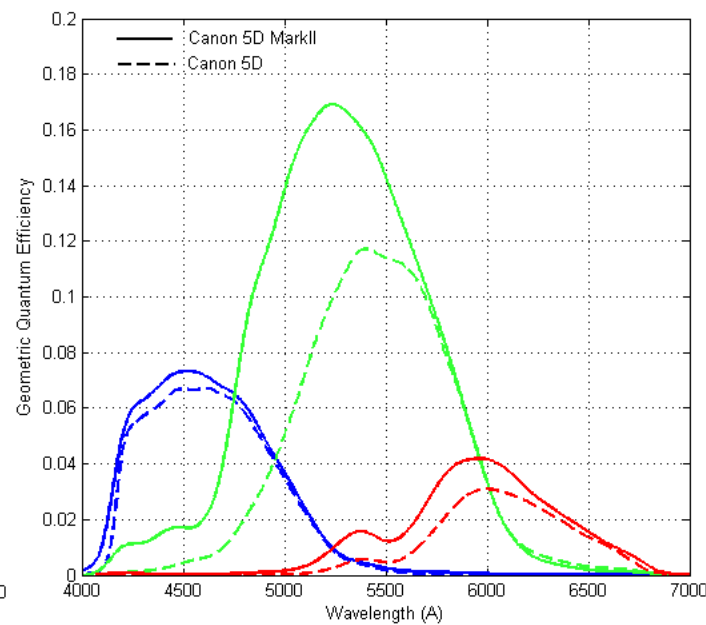
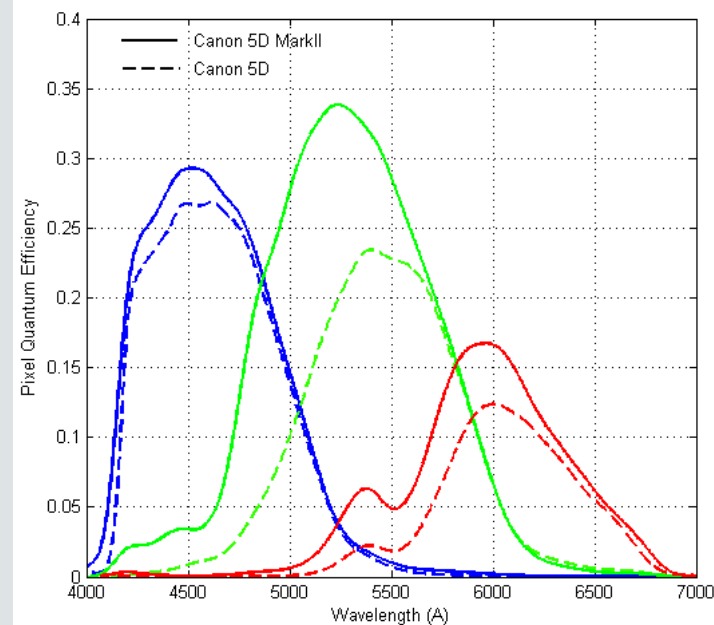


# Monochromní a barevná verze čipu KAI-11002

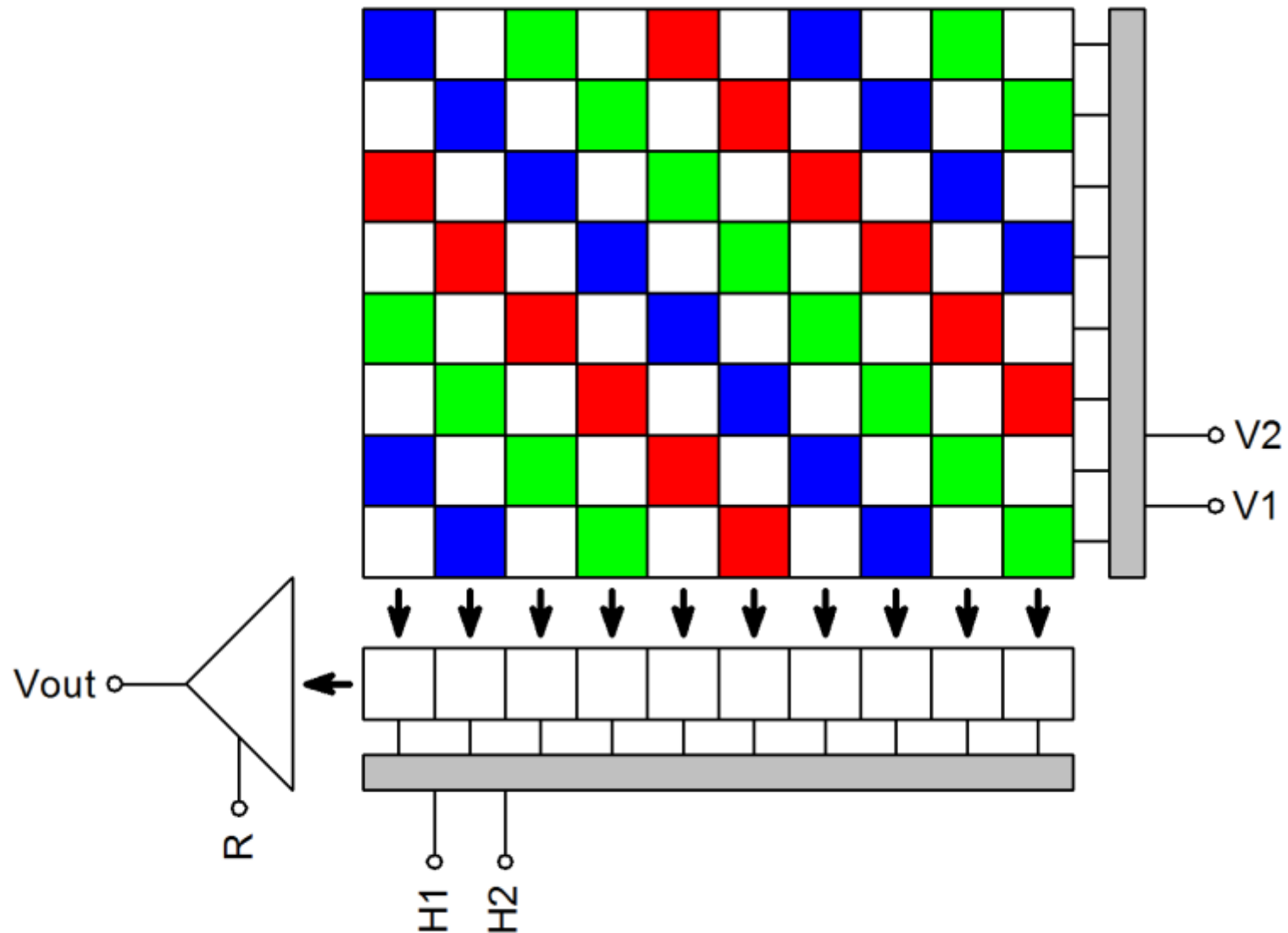


# Omezení rozlišení a citlivosti

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



# 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 (stejně jako běžný televizní signál, který přenáší barevnou informaci s pouhou  $\frac{1}{4}$  šířky pásma ve srovnání s jasovou informací).
- 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.



# Surový snímek z barevného CCD (Bayerova maska)



# Rekonstrukce barevného snímku

- Existuje řada způsobů jako dopočítat chybějící barvy jednotlivých pixelů - od jednoduchého rozšíření barev do okolních pixelů přes přesnější metody bilineární nebo bikubické interpolace okolních pixelů až po sofistikované víceprůchodové metody.
  - 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, zabývající 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. Ale barevný čip může vytvořit monochromní obraz jen za cenu ztráty rozlišení a omezení citlivosti.

- Barevný CCD čip má jedno 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. 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 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.
- Objektivy kompaktních digitálních fotoaparátů jsou zpravidla vyrobeny tak, že nejmenší zobrazené detaily zabírají na použitých CCD čipech několik pixelů. Jediný pixel tedy není příliš důležitý, nejmenší detaily jich tak jako tak zaberou několik. To v astronomii neplatí. Hvězda vykreslená na CCD čipu zabírá jen několik pixelů. Interpolace barev a jasu z okolních pixelů tak zavádí významnou chybu a zabraňuje preciznímu měření polohy a jasnosti.

- Barevné CCD čipy nedovolují požit binning. Binning by pomíchal pixely různých barev barevná informace by byla ztracena.
  - Existují snímače dovolující binning i u barevných variant, skutečně jsou slučovány jen pixely odpovídajících barev, to jsou ale spíše výjimky.
- Barevné čipy nedovolují tzv. Time Delay Integration (nebo Drift-Scan Integration). Obraz putuje po vertikálních linkách CCD čipu synchronizovaně s vertikálním posunem obrazu v čipu. Obraz je pak vyčítán v přesných intervalech řádek po řádku. TDI dovoluje snímat dlouhé pruhy oblohy o šířce dané šířkou CCD čipu a délkou danou jen dobou expozice. Posun obrazu zpravidla zajišťuje rotace Země.
- Monochromní čipy mohou snímat barevné obrazy nejen snímáním přes barevné RGB filtry. Je možné kombinovat vysoce kvalitní jasový snímek pořízený bez filtru s kratšími barevnými expozicemi poskytujícími jen barevnou informaci (taková technika se označuje LRGB). Je možné zvýšit citlivost čipu při snímání barevných částí binningem za cenu ztráty rozlišení a pouze jasovou složku snímat při plném rozlišení.



# Mlhovina „Rosette“ v úzkopásmových filtrech OIII, H $\alpha$ a SII



Autor: Ondřej Podlucky



# Slunce v čáře $H\alpha$ (falešné barvy)



Autor: Martin Myslivec



Temný proud, kvantová účinnost,  
čtecí šum a A/D jednotky

# Temný proud (dark current)

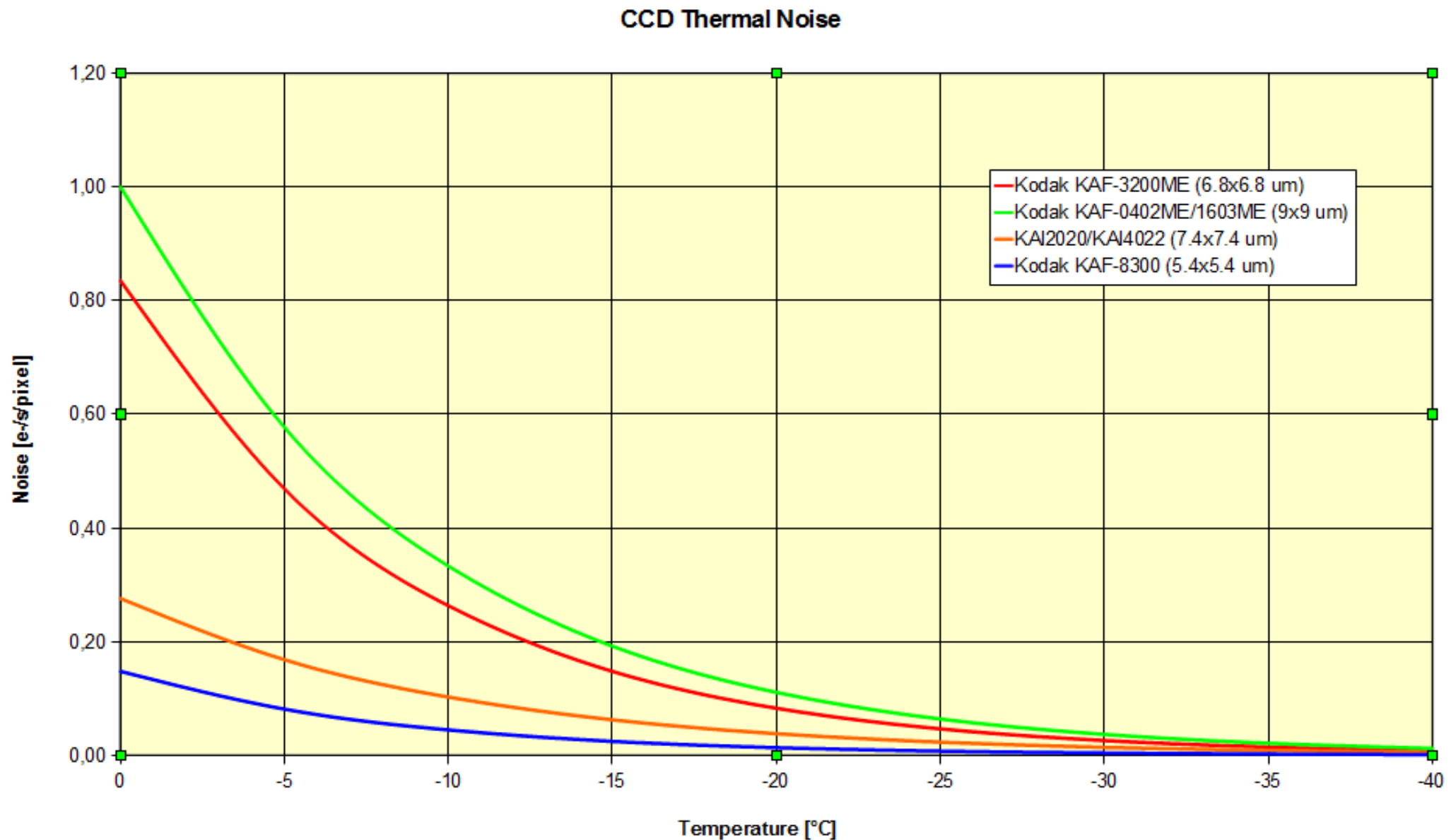
- Nevýhoda CCD technologie je fakt, že elektrony vznikají v pixelech nejen v důsledku dopadajícího světla, ale také náhodně v závislosti na okolní teplotě, velikosti pixelu, architektuře čipu a výrobní technologii. Tento tepelně generovaný náboj bývá nazýván „temný proud“ (generuje signál, i když čip je zcela ve tmě).
- Temný proud je obvykle vyjádřen v elektronech za sekundu na pixel při definované teplotě. Např. CCD detektor Truesense Imaging (Kodak) KAF-1603 produkuje 1 e<sup>-</sup>/s na pixel při 0°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 prostě odečíst a tím obraz generovaný temným proudem vyrušit. Tomuto postupu se budeme věnovat později v kapitole o kalibraci.

# Temný proud některých CCD



# Další zdroje šumu v CCD

- Temný proud není jediným zdrojem nežádoucího signálu u CCD snímačů.
- Žádná elektronika nepracuje zcela bez šumu. Tento čtecí šum je charakteristický pro daný čip a je vyjádřen v elektronech.
  - Např. čtecí šum zmíněného čipu Kodak KAF-1603 CCD je 15 e-RMS (zkratka RMS značí Root-Mean-Square, tedy směrodatnou odchylku). Jednoduše řečeno, z čipu není možné vyčíst obraz s menší úrovní šumu než 15 e- RMS, bez ohledu na teplotu. Je také potřeba zdůraznit, že výstupní napětí čipu je digitalizováno elektronikou kamery, která taktéž zavádí určitou úroveň šumu. Velmi dobrá elektronika generuje natolik malý šum, že čtecí šumem CCD čipu převládá a čtecí šum celého systému zhruba odpovídá čtecímu šumu CCD čipu samotného.

# Elektrony, voly a „ADU“ jednotky

- Čtecí šum elektroniky je vyjádřen v elektronech. Ale šum elektroniky je obvykle vyjadřován jako směrodatná odchylka ve voltech.
  - Vztah je velmi jednoduchý: každý CCD čip (tedy jeho výstupní uzel) je charakterizován převodním poměrem „volty/elektron“. Například Kodak KAF-1603 má výstupní uzel, který 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.
  - 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  $e^- / \text{ADU}$  pro hypotetickou kameru:
  - Předpokládejme, že 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  $2 \text{ V} / 65\,536 = 30,5 \mu\text{V}$ .
  - Předpokládejme že výstupní uzel použitého CCD snímače generuje napětí  $10 \mu\text{V}$  na elektron.
  - Výsledný poměr je  $(30,5 \mu\text{V} / \text{ADU}) / (10 \mu\text{V} / e^-) = 3 e^- / \text{ADU}$ . To znamená že každé 3 elektrony v potenciálové jámě pixelu způsobí jeden inkrement čísla ve výsledném obrazu.
  - Je důležité zdůraznit, že tyto výpočty platí jen statisticky, pro velké množství pixelů a elektronů. Často se lze setkat s kamerami s převodním poměrem třeba  $2,3 e^- / \text{ADU}$  nebo  $0,6 e^- / \text{ADU}$ .

# Dynamický rozsah detektoru (kapacita pixelu)

- Každá potenciálová studna reprezentující CCD pixel má nějakou maximální kapacitu, zpravidla závislou na velikosti pixelu.
  - Malé pixely (o straně kolem  $7\ \mu\text{m}$ ) mohou typicky uchovat okolo 50 000  $e^-$ .
  - Střední pixely (o straně kolem  $10\ \mu\text{m}$ ) uchovají asi 100 000  $e^-$ .
  - Velké pixely (o straně asi  $25\ \mu\text{m}$ ) pojmu až 300 000  $e^-$ .
- CCD kamery zpravidla používají 16 bitový A/D převodník s rozlišením 65 536 jednotek.
  - Je zřejmé že převádět 50 000  $e^-$  na 65 536 úrovní je nadbytečné rozlišení a 15 nebo dokonce 14 bitový převodník vyhoví.
  - Na druhá straně převedení 300 000  $e^-$  na 65 536 úrovní vyžaduje zesílení 4 až 5  $e^- / \text{ADU}$ , což je docela vhodné.

# Kapacita výstupního uzlu

- Ne jen každý pixel, ale také horizontální posuvný registr a výstupní uzel má limitovanou kapacitu. Tuto skutečnost musíme brát do úvahy zejména pokud používáme binning.
  - Vezměme jako příklad CCD čip Kodak KAF-1603: kapacita pixelu je 100 000 e<sup>-</sup>, kapacita pixelů v horizontálním registru je 200 000 e<sup>-</sup> a kapacita výstupního uzlu je 220 000 e<sup>-</sup>.
  - Zřejmě je tedy možné použít  $2 \times 2$  binning pokud v každém pixelu není více jak asi 50 000 e<sup>-</sup>. Ale pokud jsou pixely zaplněny téměř na maximum kapacity, vertikální binning spojí pixely nad sebou do pixelů s nábojem až 200 000 e<sup>-</sup>, což ještě horizontální registr zvládne. Ale následný horizontální binning spojí dva pixely do výstupního uzlu, čímž ale přesáhne jeho kapacitu a výstupní uzel bude saturován.

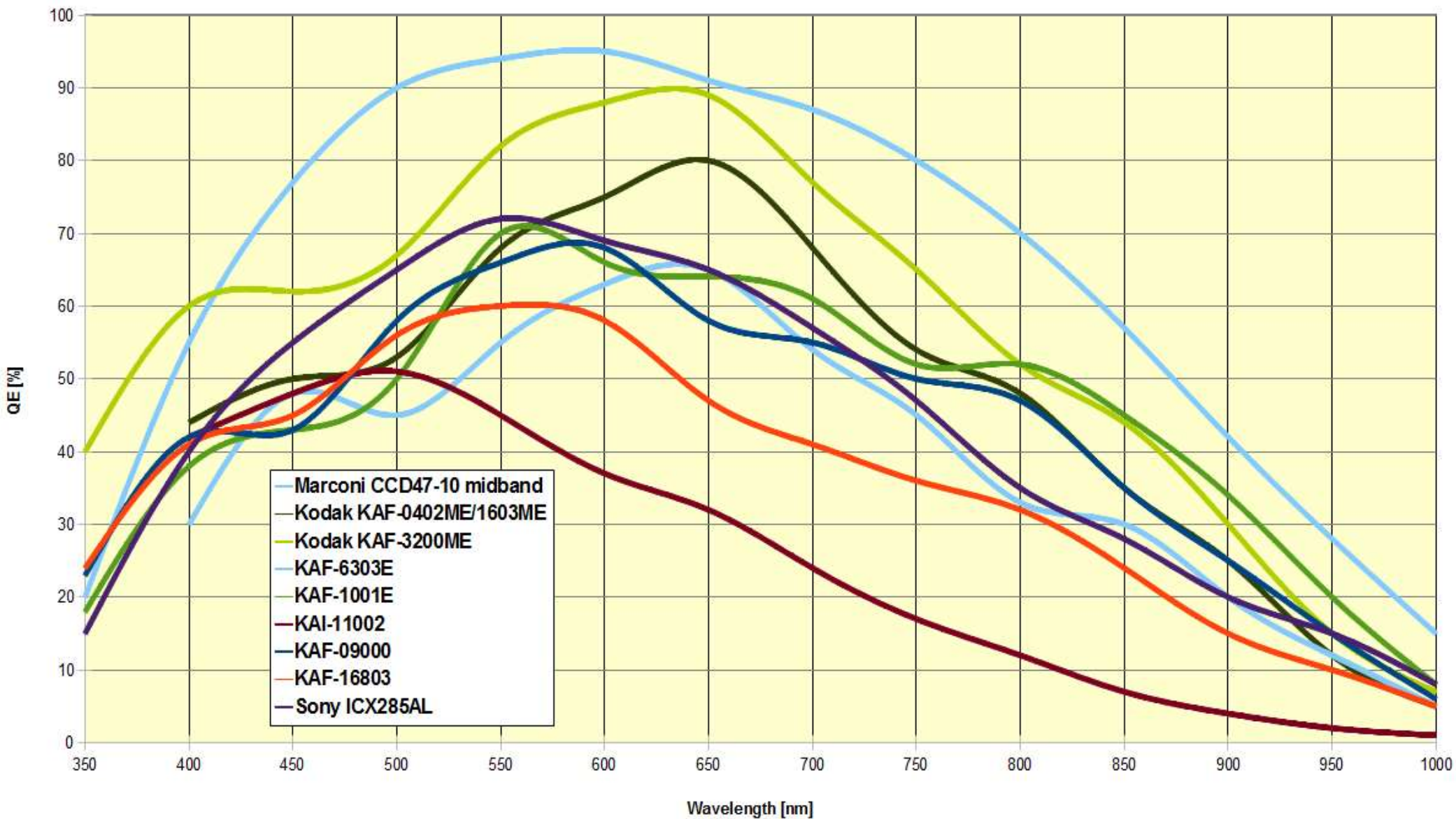
# Kvantová účinnost (QE)

- 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 CCD, ale i jas oblohy - rozptyl signálu odpovídá  $\sqrt{\text{signál}}$ .
  - Jasná obloha (např. od Měsíce) tak generuje šum, kterého se z principu nelze zbavit, zhoršující přesnost.



# Kvantová účinnost (QE)

CCD Quantum Efficiency





# CCD v astronomii

# Co přináší CCD astronomům?

- Už první CCD čipy nabízely nesrovnatelně vyšší citlivost na světlo ve srovnání s filmem, ale trpěly malou obrazovou plochou, vysokým šumem, vysokou cenou a malým rozlišením. Dnes jsou všechny tyto nevýhody eliminovány - CCD nabízí lepší rozlišení, obrazové pole větší než 35 mm film, nízký šum a jejich cena se stále snižuje. Zůstávají jen významné výhody:
  - CCD 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% a tenčené, zezadu osvětlované čipy mohou dosáhnout QE přes 90 %. Velmi citlivý film dosáhne QE kolem 3 nebo 5%.

- CCD mají (na rozdíl od filmů) lineární odezvu na světlo. Proč je to důležité? Lineární odezva je klíčová pro precizní fotometrická měření. Pokud srovnáváme signál (hodnotu pixelů) dvou hvězd na CCD snímku, můžeme se spolehnout, že jejich tok záření je ve stejném poměru jako jsou hodnoty pixelů. Tento poměr nebude stejný, pokud by detektor převádějící světelný tok na signál nebyl lineární a měření jasnosti by bylo postiženo značnou chybou.
- Křemíkový čip, na němž je CCD vyroben, má velice stále mechanické rozměry. Precizně definované a stále rozměry dovolují provádět precizní astrometrická měření. Na CCD snímku lze měřit polohu hvězdy (nebo planety, komety, supernovy apod.) s přesností asi  $1/10$  úhlového rozměru jednoho pixelu. Každý amatér tak může provádět astrometrická pozorování s rozlišením zlomků úhlové vteřiny. Taková přesnost byla před pár desítkami let vyhrazena pouze několika profesionálním pracovištím.



- Obrazy pořízené CCD kamerou jsou datové soubory, bezprostředně zpracovatelné pomocí počítačů. To je skutečně nedocenitelná výhoda. Astronomové oceňují digitální podobu snímků od okamžiku jejich stažení z kamery do počítače až po jejich finální zpracování a uchování. Snímek je možné prohlédnout jen několik sekund poté co se zavře závěrka kamery. Je snadné se ubezpečit, že objekt je ve středu pole a že dalekohled je správně zaostřen.

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.

# Pixely a velikost obrazu

- Úhlové rozlišení dalekohledu závisí na vlnové délce přijímaného záření a na průměru objektivu. Rozlišení roste, když se vlnová délka zkracuje a průměr objektivu roste.
  - Z těchto důvodů je úhlové rozlišení malého refraktoru s 5 cm objektivem  $1\,000\times$  lepší než rozlišení rádiové antény o průměru 100 m přijímající rádiové vlny s vlnovou délkou 1 m (průměr přijímače je sice  $2\,000\times$  větší, ale vlnová délka  $2\,000\,000\times$  větší).
  - Vlnová délka viditelného světla je mezi 400 a 700 nm. Průměr dalekohledu se může lišit velmi významně a závisí především na finančním rozpočtu, který má astronom k dispozici.

# Rozlišení dalekohledu

- V praxi je ale úhlové rozlišení ovlivněno ještě dalším jevem - turbulencí vzduchu. Teplejší vzduch má menší hustotu a také menší index lomu než chladnější vzduch. Proudění v naší atmosféře tedy pokrívuje obraz hvězd.
- Kvalita obrazu bývá označována anglickým slovem „seeing“ a zpravidla je udávána v minimálním úhlovém průměru zobrazení hvězdy.
- Typicky je obraz hvězdy rozmazán neklidem vzduchu na disk o průměru 3" nebo 4". Pokud má obraz hvězdy úhlový průměr 2" nebo méně, seeing je velice dobrý. Na druhé straně velmi špatný seeing rozmaže obraz hvězdy na 6" nebo až 8".

- Pokud vezmeme do úvahy seeing, zjistíme, že typický amatérský dalekohled o průměru 25 až 30 cm dosáhne rozlišení limitovaného neklidem vzduchu, takže nárůst průměru již nepřináší lepší rozlišení, pouze umožní zkrátit expozice.
  - To samozřejmě platí v podmínkách střední Evropy, astronomicky atraktivní místa (Mauna Kea, Chilské Andy, ...) nabídnou často seeing lepší než 1".
- Za „ideální“ je považován obraz hvězdy o průměru alespoň 2 pixely.
  - Obraz soustředěný do pouhého 1 pixelu limituje možnost určení polohy hvězdy (není možné určit těžiště obrazu) - obraz je podvzorkován.
  - Obraz hvězdy přes příliš mnoho pixelů na druhé straně plýtvá světlem. Světlo hvězdy je rozloženo na příliš mnoho částí - obraz je převzorkován.



# Ohnisková vzdálenost pro různě velké pixely

Velikost pixelu	Ohnisko zobrazující 2"/px	Ohnisko zobrazující 1"/px
4,4 $\mu\text{m}$	45 cm	90 cm
5,4 $\mu\text{m}$	56 cm	112 cm
6,8 $\mu\text{m}$	70 cm	140 cm
7,4 $\mu\text{m}$	76 cm	152 cm
9 $\mu\text{m}$	93 cm	186 cm
13 $\mu\text{m}$	134 cm	268 cm
24 $\mu\text{m}$	247 cm	494 cm

- V době, kdy byla plocha CCD snímačů velice omezená, bylo převzorkování skutečně problémem.
- Dnes nabízí snímače velkou plochu (limitem je optika) a vysoká rozlišení a převzorkování ( $<1''/\text{px}$ ) není tak velký problém.

# 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.  $2 \times 2$ ).
- Binning tak efektivně zvyšuje velikost pixelů (a snižuje rozlišení CCD čipu).

- Zvětšení pixelů pomocí binningu ale neposkytne S/N shodný s detektorem s patřičně většími pixely.
  - Menší pixely, i když binované, stále zastiňují větší část plochy čipu elektrodami v porovnání s kamerou s většími pixely.
  - Operace slučování pixelů zanáší ro signálu další rozptyl (šum).
- Binning zvyšuje nároky na kapacitu pixelů horizontálního registru a výstupního uzlu.
  - Kapacita H registru a výstupního uzlu bývá maximálně  $2 \times$  větší jak obrazové pixely, už při binningu  $2 \times 2$  tak může snadno dojít k saturaci a tím ke znehodnocení signálu.
- Binning je možno realizovat i programově.
  - Pokud zvětšíme dynamiku obrazu (např. ze 16 na 32 bitů/pixel), nehrozí saturace snímku.
  - Výsledný poměr S/N je ale ještě horší (pixely jsou samostatně digitalizovány a u všech se uplatní např. čtecí šum detektoru).

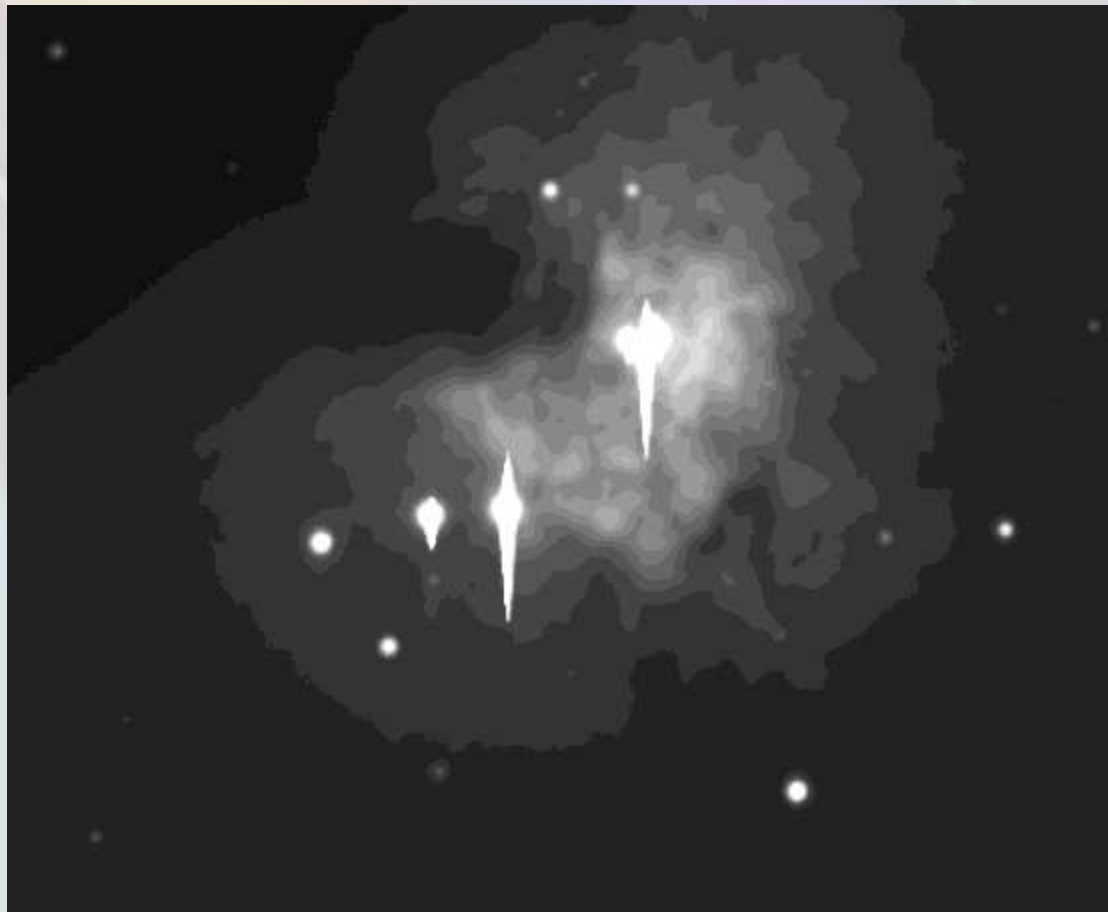
# Binning a ohnisková vzdálenost

- Pokud je ohnisková vzdálenost příliš velká vzhledem k velikosti pixelu (např. úhlová velikost pixelu je výrazně menší než 1"), je možné použít binning (slučování pixelů) ke zvětšení pixelů nebo ohniskový reduktor ke zmenšení ohniskové vzdálenosti.
- Použití binningu bylo poněkud problematické dokud CCD čipy měly jen desítky nebo stovky tisíc pixelů. S dnešními čipy s miliony pixelů použití binningu a redukce rozlišení nepřináší podstatné problémy. Multi-megapixelové kamery s relativně malými pixely se stávají velmi populární, i když úhlová velikost pixelu je menší než 1" při použití typických Schmidt-Cassegrain nebo Ritchey-Chretien dalekohledů.



# Blooming a ABG

- 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

- 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.

# ABG u moderních CCD

- V dnešní době jsou argumenty proti ABG u CCD detektorů prakticky neplatné.
  - Výjimku tvoří opravdu high-end tenčené detektory, používající vskutku pouze velice základní struktury k dosažení maximální QE a minimálního čtecího šumu, např. detektory E2V.
- Např. CCD KAF-16803 s pixely  $9 \times 9 \mu\text{m}$  a ABG dosahuje maximální QE 60%, zatímco KAF-1603ME se stejnými pixely 75-80% (tedy nikoliv dvojnásobek).
- Při vhodné konstrukci kamery (volba zisku tak, aby úroveň saturace 65 535 ADU byla spolehlivě pod saturační hodnotou všech pixelů) je linearita ABG čipů lepší než 1%.

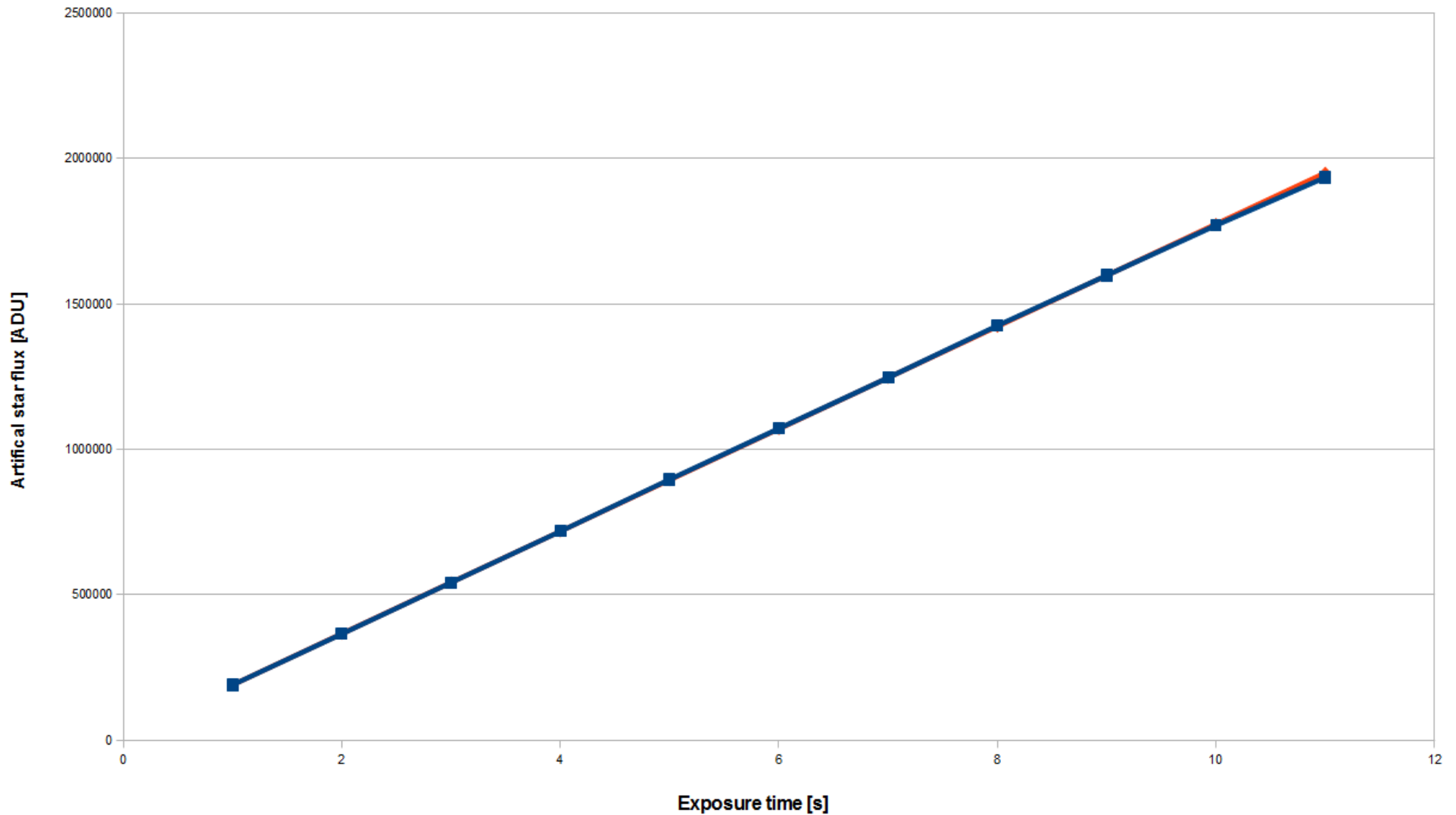
# Linearita CCD

- Pro přesná fotometrická měření potřebujeme, aby závislost mezi množstvím dopadajícího světla a velikostí signálu přečteného z CCD byla lineární s co možná nejvyšší přesností.
  - Poznamenejme, že 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.
  - I ABG má různou intenzitu, počínaje  $100\times$  u KAF-16803 po  $1000\times$  u KAF-8300.

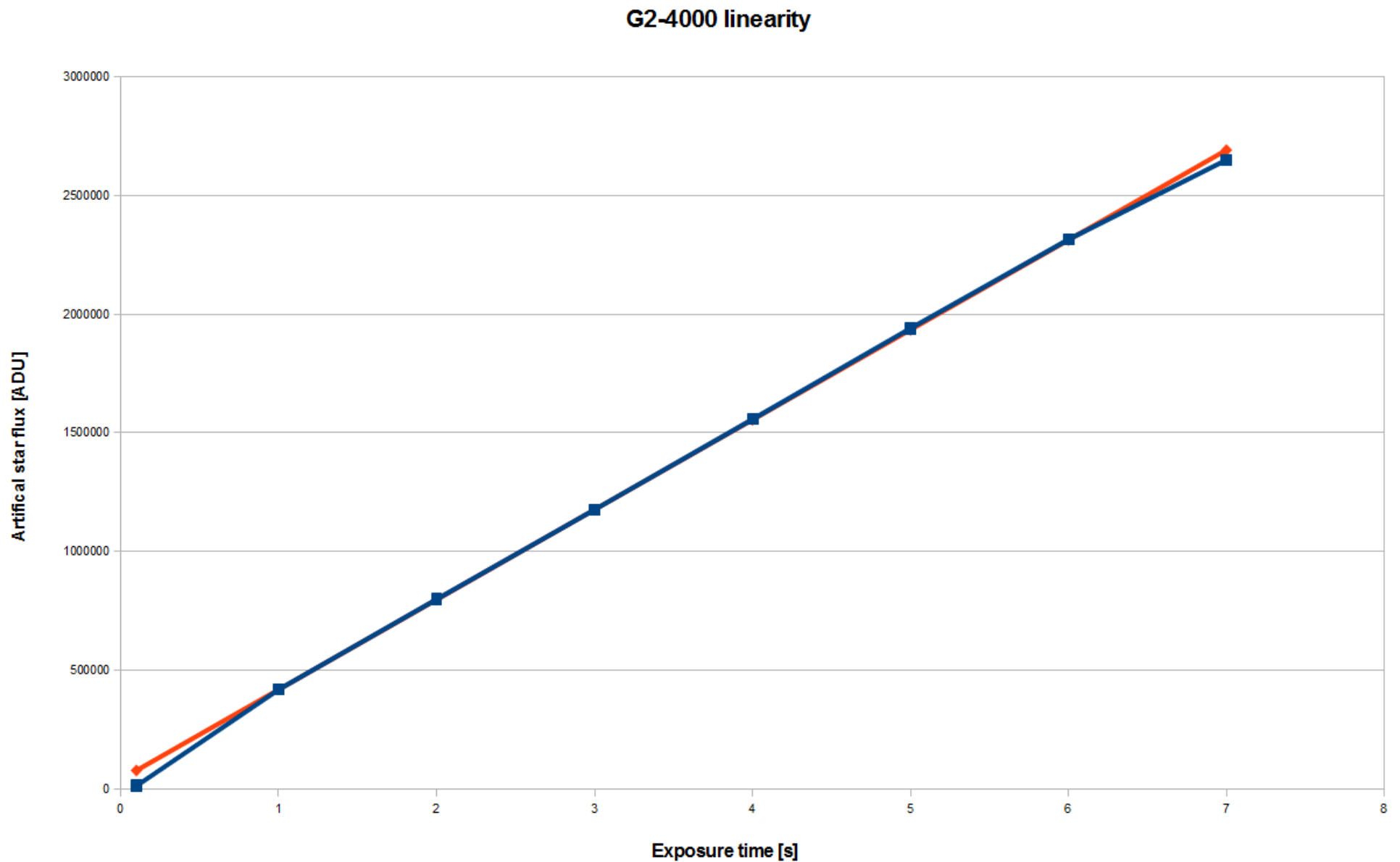


# G2-3200 (NABG KAF-3200ME)

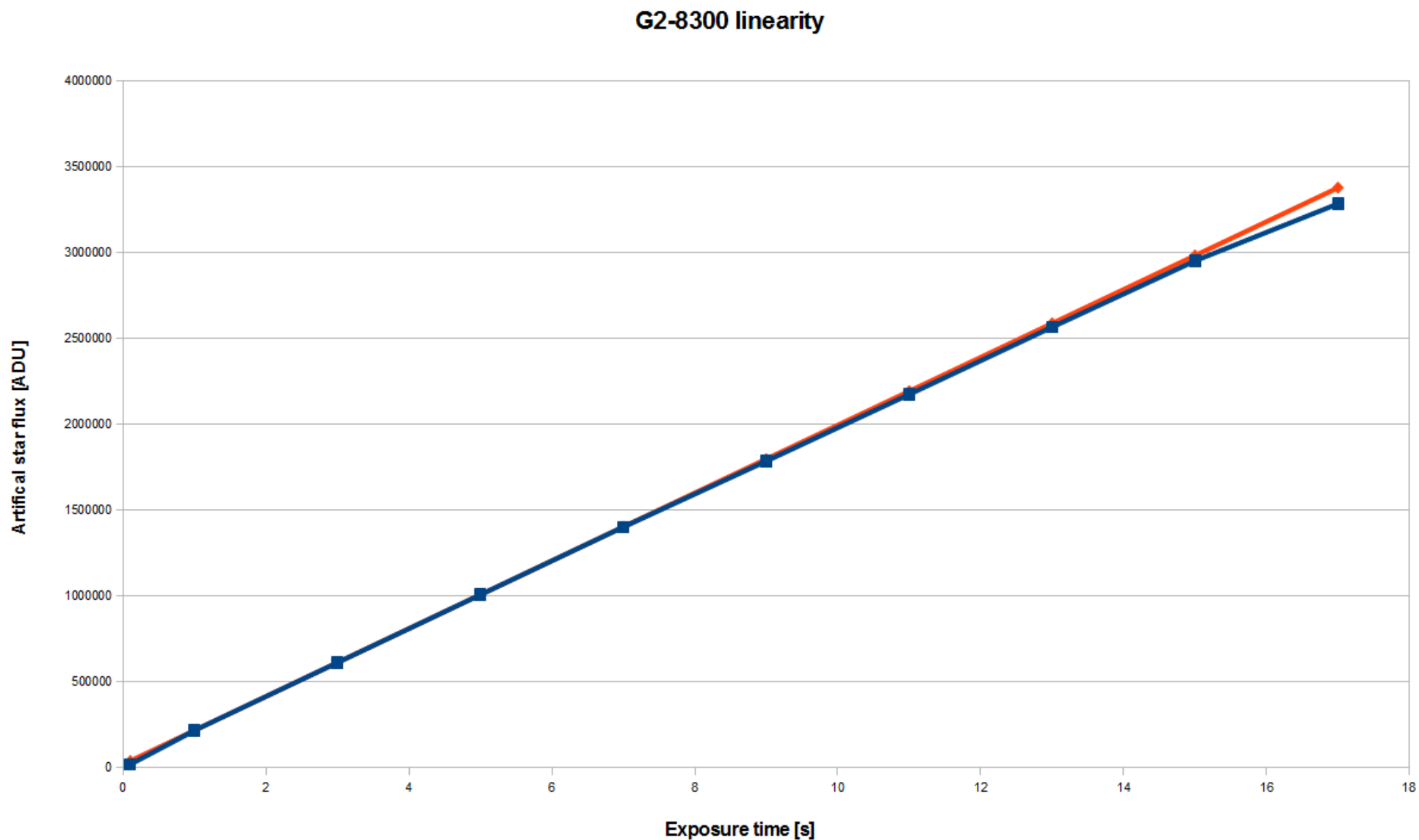
G2-3200 linearity



# G2-4000 (ABG 300× KAI-4022)



# G2-8300 (ABG 1000× KAF-8300)





# Kalibrace astronomických snímků



# Syrový obraz

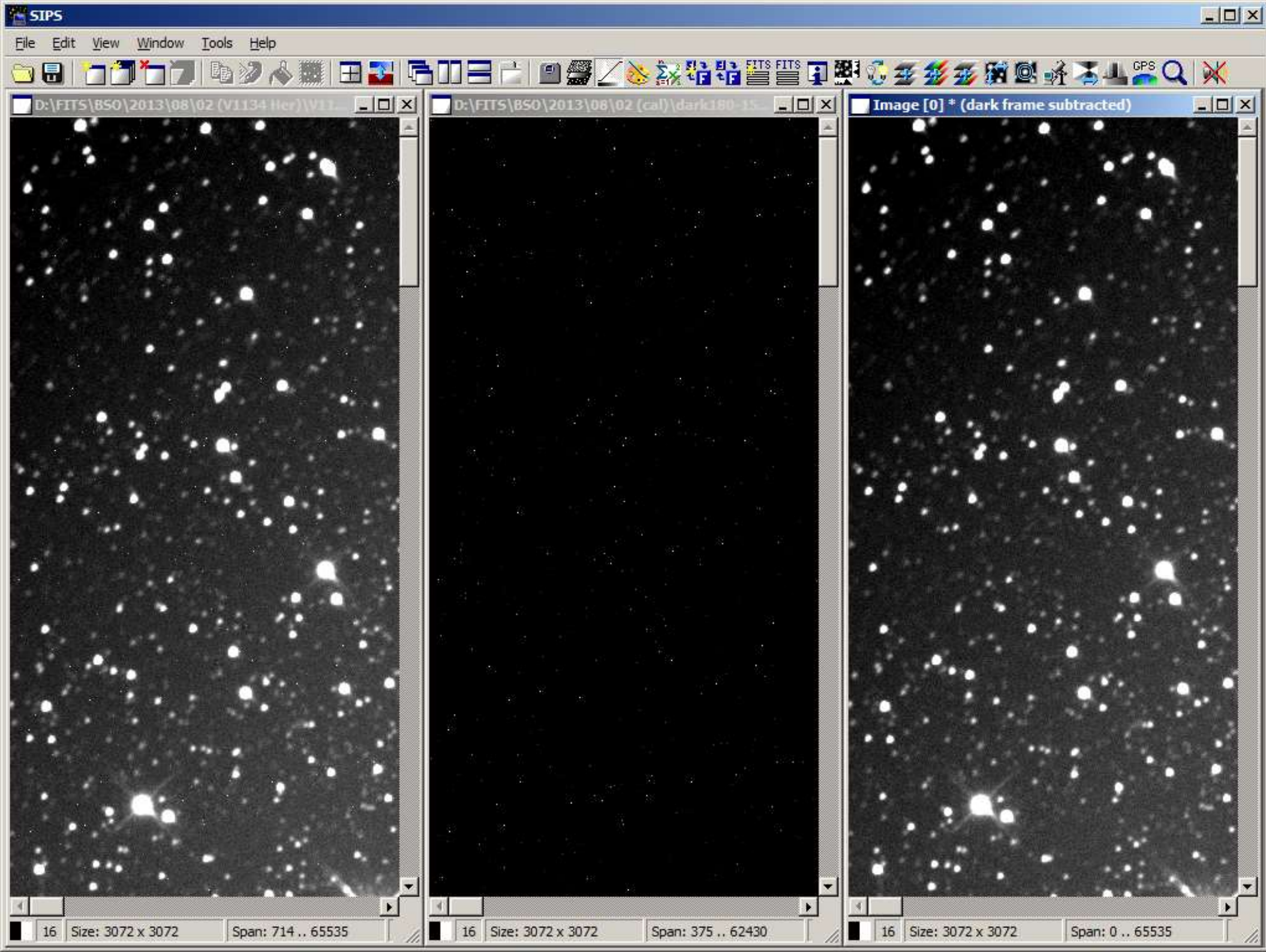
- Obraz bezprostředně stažený z kamery je označován jako syrový (anglicky „raw image“). Často je překvapivě nehezky, zejména ve srovnání s plně zpracovanými snímky, které se objevují v časopisech nebo na [www stránkách](#).
  - Zpracování obrazu dokáže odstranit temné nebo horké pixely, nechtěné gradienty pozadí, redukovat šum, obraz zaostřit, zkomprimovat dynamiku a zdůraznit detaily apod.
  - Takové zpracování obrazu jej zkrášlí, ale také pozmění informaci v obrazu obsaženou. Může být prováděno pouze s obrazy zamýšlenými pro publikaci, protože znemožní získat ze snímků věrohodné informace (polohy a jasnosti objektů).

# Kalibrace obrazů

- Kalibrace je zpracování obrazu, které sice také zlepšuje jejich vzhled, ale současně zvyšuje jejich vědeckou hodnotu na místo aby ji snižovalo.
  - V závislosti na CCD kameře, dalekohledu (nebo objektivu) a objektu může být kalibrace složitější nebo jednodušší. V některých případech se dokonce lze bez kalibrace obejít. V podstatě by ale každý CCD snímek měl být zkalibrován.
- Kalibrace obsahuje dva kroky:
  1. odečtení temného snímku
  2. aplikace flat field

# Temný snímek (dark frame)

- Smyslem odečtení temného snímku je eliminace (nebo aspoň redukce) temného proudu CCD snímače.
- Temný proud je závislý na teplotě. Zdvojuje se přibližně s každými 6 až 7°C, v závislosti na architektuře čipu.
  - Například Kodak KAF-1603 zdvojnásobí tepelný šum s každými 6,3°C.
- Náboj akumulovaný v pixelech je také lineárně závislý na expoziční době (temný proud je vyjádřen v elektronech na pixel za sekundu při definované teplotě).
- Aby se tepelný šum obrazu redukoval, temný snímek musí být pořízen po stejnou dobu a za stejné teploty, jako vlastní syrový snímek.





# Tvorba kalibračních snímků

- Temný proud většiny pixelů je zpravidla blízký hodnotě udávané výrobcem, u některých pixelů je ale výrazně větší (až mnoho řádů). Tyto pixely se nazývají „horké“ („hot pixels“) a v obraze se objevují jako světlé body.
- Protože rozptyl signálu odpovídá  $\sqrt{\text{velikosti signálu}}$ , u horkých pixelů je i jejich rozptyl velmi vysoký.
- Z těchto důvodů kvalitu kalibrace velmi zvýší, pokud je kalibrační snímek pořízen z více jednotlivých snímků.
  - Empirické pravidlo říká, že celková expoziční doba kalibračních snímků by měla být alespoň  $5 \times$  expoziční doba pořizovaných snímků.



# Tvorba kalibračních snímků (2)

- Kalibrační snímky je možné zkombinovat do výsledného snímku dvěma operacemi:
  - Průměr jednotlivých snímků - nevýhoda je, že případné extrémní pixely (např. stopy částic) ovlivní výsledný snímek.
  - Medián jednotlivých snímků - z principu eliminuje extrémy a vybere vždy prostřední hodnotu.
- Problém mediánu je, pokud se střední hodnota snímků navzájem liší (to nebývá případ temných snímků, bývá to ale časté flat field snímky).
  - V takovém případě je před tvorbou mediánu nutné srovnat střední hodnoty jednotlivých snímků.
  - Srovnání střední hodnoty může být aditivní nebo multiplikativní.

# „Flat field“

- Obrazové pole je dalekohledem (objektivem) často osvětleno nerovnoměrně - intenzita snímku na okrajích bývá menší než u středu, např. kvůli menšímu sekundárnímu zrcátku apod.
- Prachové částice na filtrech nebo na krycích sklech kamery či samotném CCD čipu vrhají typické prstencovité stíny. Všechny tyto efekty mění intenzitu osvětlení čipu a způsobují nejen estetické kazy, ale také redukuje přesnost měření.
- Jejich vliv je možné eliminovat aplikací tzv. „flat field“ obrazu.

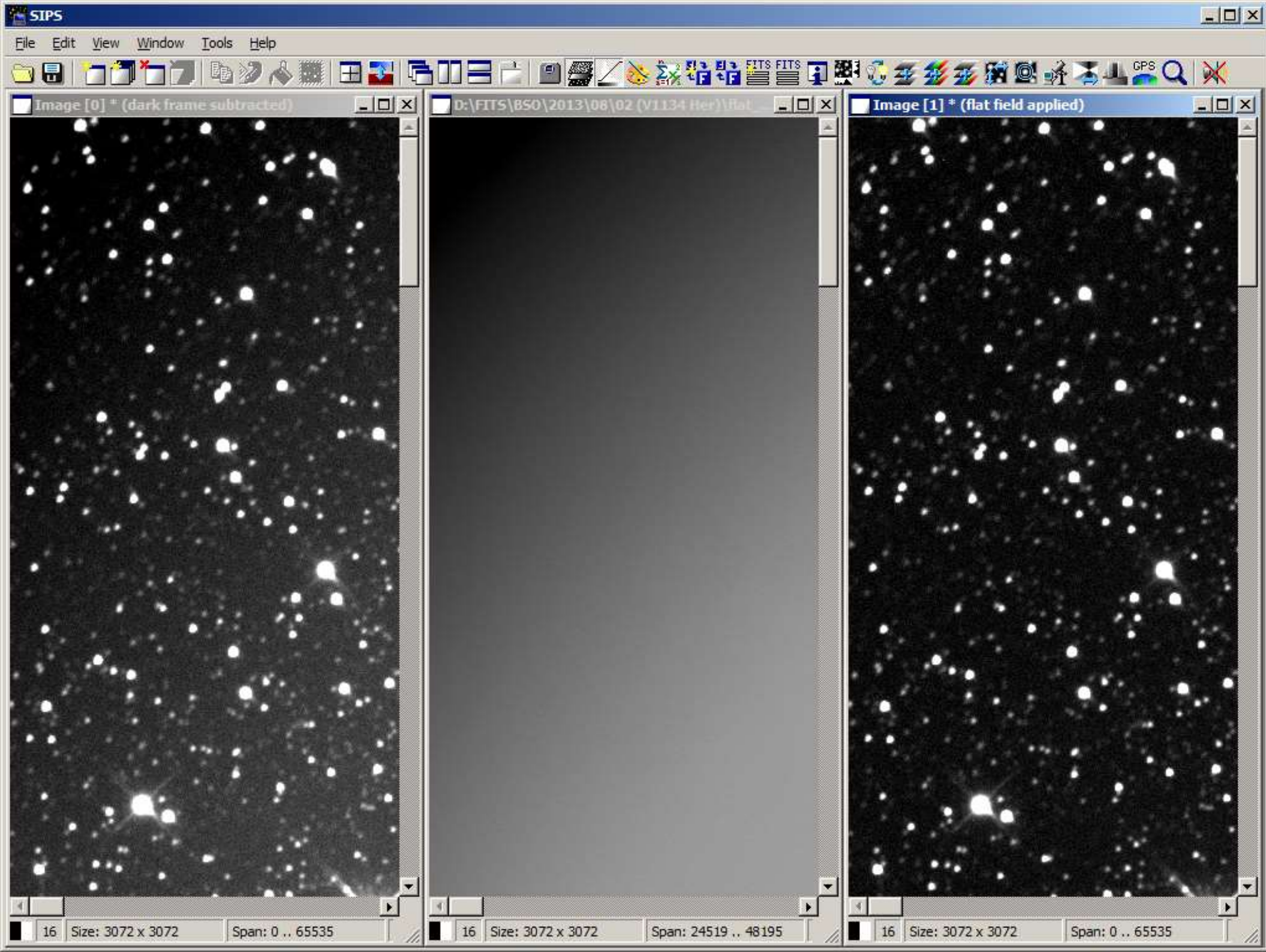
# Aplikace „flat field“

- „Flat field“ je obraz rovnoměrně osvětleného pozadí. Veškeré variace rovnoměrnosti osvětlení jsou způsobené dalekohledem nebo kamerou, nikoliv obrazem samým.
  - Hodnoty ideálního „flat field“ snímku jsou kolem poloviny celého rozsahu (kolem 33 000 ADU u 16 bitových kamer).
- Způsobů jak získat „flat field“ je řada.
  - Snímání blízké, rovnoměrně osvětlené plochy je poměrně pohodlné, potíží ale je takovou plochu získat (rovnoměrně osvětlit). Rovněž geometrická blízkost takové plochy vede na odchylky od ideálního „flat field“ snímku.
  - „Flat field“ získaný snímáním oblohy za soumraku nebo za úsvitu je mnohem obtížnější pořídit a zpracovat, je ale vždy přesnější.

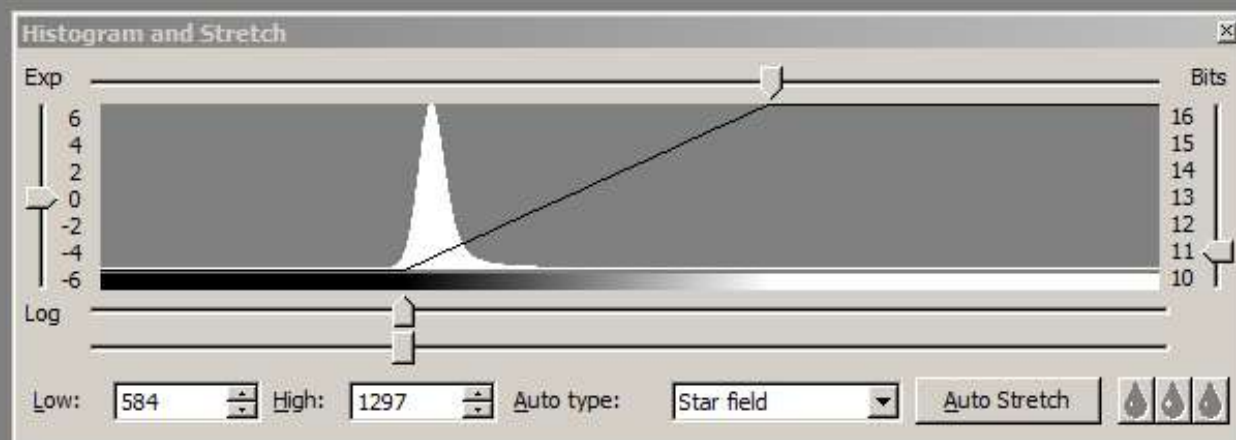
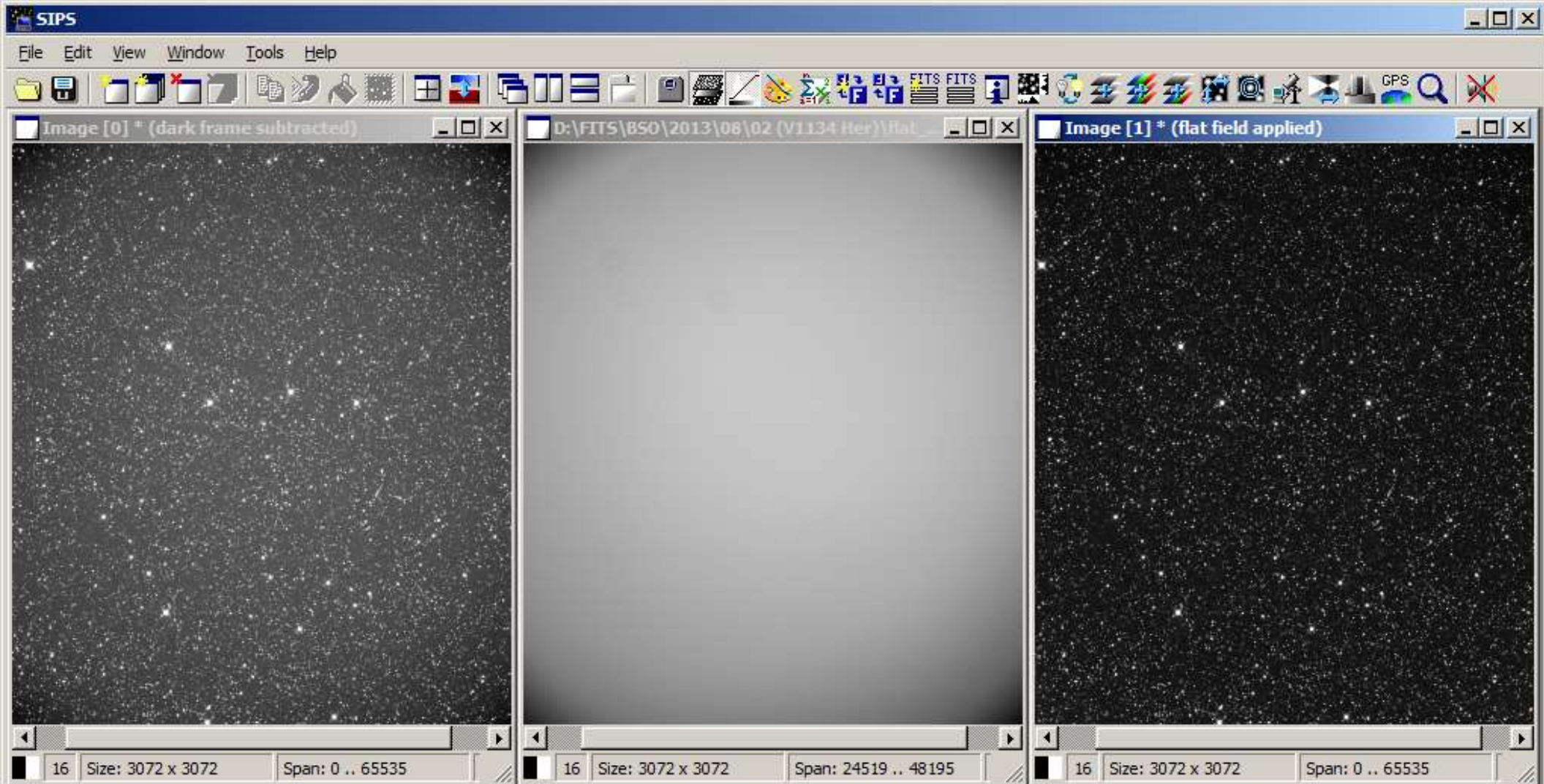
# Aplikace „flat field“

- 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.









- Zdroje Informací:

- Kodak CCD Primer (#KCP-001), parts 1 and 2
- Solid State Image Sensors Terminology, Kodak Application Note (DS 00-001)
- CCD Image Sensor Noise Sources, Kodak Application Note (MTD/PS-0233)
- J.B.Pawley, Handbook of Biological Confocal Microscopy, Springer (ISBN: 978-0-387-25921-2)
- <http://www.truesenseimaging.com/>
- [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2009/smith-photo.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/smith-photo.html)
- <http://www.astro.caltech.edu/palomar/>
- <http://www.astro.uni-bonn.de/>
- <http://www.gxccd.com/>

- Autoři použitých snímků:

- Ondřej Podlucky (mlhovina Rosetta)
- Martin Myslivec (Slunce v čáře  $H\alpha$ )
- Pavel Cagaš, Moravské přístroje a.s.

Děkuji za pozornost

Otázky?

