

AstroHUB

Základy astrofotografie

Praktický průvodce fotografováním noční oblohy,
planet a hlubokého vesmíru

AUTOR

David Pěkník

Datum vydání: 1. 10. 2026
Verze publikace: 1.0

www.astrohub.cz

OBSAH KNIHY

- Úvod a předmluva: Lovci fotonů – Od nočního úžasu k digitálnímu obrazu

ČÁST I: OPTIKA A ZÁKLADY SNÍMÁNÍ SVĚTLA V NOCI

Kapitola 1 Fyzika a optika astrofotografie

- 1.1 Ohnisková vzdálenost, světelnost (f-ratio) a obrazové měřítko (pixel scale)
- 1.2 Typy astrografů: Apochromáty, Newtony, Schmidt-Cassegrainy a R-C
- 1.3 Optické vady: Chromatická aberace, koma, astigmatismus a vinětace
- 1.4 Optické korektory: Rovnače pole (field flatteners), komakorektory a reduktory
- 1.5 Backfocus a správné zaostření: Bahtinova maska a motorové autofokusery
- 1.6 Kolimace optiky: Jak seřídít zrcadla pro dokonale bodové hvězdy

Kapitola 2 Anatomie moderního senzoru: CMOS versus CCD

- 2.1 Princip křemíkového detektoru a kvantová účinnost (QE)
- 2.2 Zdroje šumu: Vyčítací šum, temný proud (dark current) a fotonový šum
- 2.3 Chlazení senzoru Peltierovým článkem a kalibrační knihovny
- 2.4 Monochromatická kamera vs barevná (OSC): Bayerova maska a debayering
- 2.5 Dynamický rozsah, bitová hloubka a kapacita pixelu (Full Well)
- 2.6 Zisk (Gain), Offset a volba správného režimu (Unity Gain, HCG)

Kapitola 3 Filtry a krocení světelného znečištění

- 3.1 Světelné znečištění a Bortleova stupnice (Bortle 1 až Bortle 9)
- 3.2 Širokopásmové filtry (UV/IR Cut, CLS, L-Pro): Možnosti a limity
- 3.3 Úzkopásmové filtry: Vodík H-alfa (656 nm), Kyslík [OIII] a Síra [SII]
- 3.4 Palety zobrazení: Přirozené barvy LRGB vs Hubblova paleta (SHO) a bikolor
- 3.5 Duální filtry pro barevné kamery (Duo-Band, L-eXtreme)
- 3.6 Filtrová kola, šuplíky na filtry a mechanické adaptéry

ČÁST II: MONTÁŽE, TRACKING A PŘESNÁ NAVIGACE PO OBLOZE

Kapitola 4 Geometrie nebeského pohybu a typy montáží

- 4.1 Proč se hvězdy natahují: Rotační rychlost Země, pravidlo 500 a NPF
- 4.2 Azimutální (Alt-Az) vs paralaktická (EQ) montáž a stáčení pole
- 4.3 Německá rovníková montáž (GEM) a harmonická soukolí (Strain Wave)
- 4.4 Cestovní trackery (Star Adventurer, SkyGuider Pro)
- 4.5 Nosnost montáže, správné těžiště a vyvážení soustavy
- 4.6 Kabelový management a ochrana před zamotáním

Kapitola 5 Ustavení na polární osu a GoTo navádění

- 5.1 Princip polárního ustavení a proč nestačí kompas
- 5.2 Optický hledáček vs kamerové ustavení (Plate Solving Polar Align)
- 5.3 Nástroje pro bleskové ustavení: ASIAIR PA, N.I.N.A. TPPA, PoleMaster
- 5.4 Driftová metoda ustavení (Scheinerova metoda) pro pevné pilíře
- 5.5 GoTo navádění a kalibrace hvězdného modelu oblohy
- 5.6 Meridiánový obrat (Meridian Flip): Jak bezpečně otočit dalekohled v noci

Kapitola 6 Autoguiding: Dokonalé sledování hvězd na vteřiny přesně

- 6.1 Periodická chyba převodů montáže (PE) a její korekce (PEC)
- 6.2 Princip autoguidingu: Jak pointační kamera řídí montáž v reálném čase
- 6.3 Pointační dalekohled (Guidescope) vs mimotělní hranol (OAG)
- 6.4 Software PHD2: Kalibrace, agresivita a čtení grafu v RMS vteřinách
- 6.5 Dithering: Klíč k odstranění pruhového šumu (walking pattern noise)
- 6.6 Multi-star guiding a pokročilé adaptivní algoritmy

ČÁST III: NOČNÍ KRAJINÁŘSKÁ ASTROFOTOGRAFIE

Kapitola 7 Fotografování Mléčné dráhy a noční krajiny

- 7.1 Výběr techniky: Full-frame těla, světelné širokáče (f/1.4 až f/2.8)
- 7.2 Kompozice noční scény: Vedení linií a popředí v temnotě
- 7.3 Plánování expozice: Aplikace PhotoPills, Stellarium a fáze Měsíce
- 7.4 Noční panoramata: Nodal point, panoramatické hlavy a skládání
- 7.5 Sledovaná noční krajina: Spojení expozice trackeru s nehybnou zemí
- 7.6 Bojs rosením: Vyhřívací USB pásky v terénu

Kapitola 8 Cirkumpolární startrails a noční časosběry

- 8.1 Fyzika kruhových stop: Jak rotace Země kreslí kruhy kolem Polárky
- 8.2 Nastavení intervalometru a strategie stovek expozic
- 8.3 Skládání stop hvězd: Software StarStaX a vrstvy v Photoshopu
- 8.4 Noční časosběry (Timelapse): Holy Grail timelapse ze dne do noci
- 8.5 Fotografování meteorických rojů (Perseidy, Geminidy) a bolidů
- 8.6 Noční nasvícení popředí (Low-Level Lighting – LLL)

Kapitola 9 Polární záře, noční oblaka a atmosférické jevy

- 9.1 Polární záře (Aurora Borealis): Sluneční vítr a index Kp
- 9.2 Expoziční strategie pro polární záře: Rychlé časy pro dynamické záclony
- 9.3 Noční svítící oblaka (NLC): Ledové krystalky v mezoféře v létě
- 9.4 Zodiakální světlo a protisvit (Gegenschein): Meziplanetární prach
- 9.5 Vzdušné záření (Airlow): Chemiluminiscence atmosféry
- 9.6 Satelity Starlink a ISS: Jak je plánovaně zachytit či odstranit

ČÁST IV: SLUNEČNÍ SOUSTAVA – PLANETY, MĚSÍC A SLUNCE

Kapitola 10 Metoda Lucky Imaging a vysokorychlostní snímání

- 10.1 Proč selhává běžná expozice: Atmosférický seeing a vlnění vzduchu
- 10.2 Princip Lucky Imaging: Výběr nejostřejších zlomků vteřiny z videa
- 10.3 Planetární kamery a vysokorychlostní rozhraní USB 3.0
- 10.4 Záznam videa v bezztrátovém formátu SER vs AVI
- 10.5 Barlowovy čočky a vzorkování (pravidlo 5× velikost pixelu)
- 10.6 Atmosférická disperze a ADC korektor pro nízko položené planety

Kapitola 11 Fotografování Měsíce a planetárních detailů

- 11.1 Měsíc v detailu: Hra stínů na terminátoru a gigantické mozaiky
- 11.2 Jupiter: Velká rudá skvrna a derotace ve WinJUPOS
- 11.3 Saturn: Cassiniho dělení v prstencích a polární hexagon
- 11.4 Mars: Polární čepičky, prachové bouře a albedové útvary
- 11.5 Venuše a Merkur: Ultrafialové filtry pro mraky a fáze

11.6 Software pro planetární zpracování: AutoStakkert!, Registax a WinJUPOS

Kapitola 12 Naše nejbližší hvězda: Bezpečné fotografování Slunce

- 12.1 Zásady bezpečnosti: Proč pohled do Slunce znamená okamžité oslepnutí
- 12.2 Fotosféra v bílém světle: Fólie Baader, Herschelův hranol a granule
- 12.3 Chromosféra v H-alfa: Dalekohledy Lunt a Coronado s etalonem
- 12.4 Zachycení protuberancí, slunečních erupcí a filamentů
- 12.5 Zatmění Slunce: Koróna, Bailyho perly a diamantový prsten
- 12.6 Tvorba fascinujících časosběrů sluneční aktivity

ČÁST V: HLUBOKÝ VESMÍR (DEEP-SKY ASTROFOTOGRAFIE)

Kapitola 13 Plánování, expozice a sběr dat

- 13.1 Hledání cílů: Katalogy Messier (M), NGC, IC, Sharpless a Barnard
- 13.2 Optimální délka sub-expozice: Přebití vyčítacího šumu pozadím
- 13.3 Kumulativní integrační čas a poměr signál/šum (S/N)
- 13.4 Typy DSO: Emisní a reflexní mlhoviny, galaxie a planetární mlhoviny
- 13.5 Plánování mozaik velkých mlhovinových komplexů
- 13.6 Organizace souborů a archivace surových astrodat

Kapitola 14 Kalibrační snímky – Tajemství čistého signálu

- 14.1 Proč samotný snímek (Light frame) nestačí: Šum, prach a vinětace
- 14.2 Temné snímky (Dark frames): Odečtení tepelného šumu a hot-pixelů
- 14.3 Vyčítací snímky (Bias frames / Flat-Darks): Kalibrace elektroniky
- 14.4 Snímky plochého pole (Flat frames): Korekce vinětace a prachu
- 14.5 Techniky tvorby flatů: LED panely, tričko a soumrakové flaty
- 14.6 Kalibrační matematika: (Light - Dark) / (Flat - Bias) v praxi

Kapitola 15 Automatizace celé noci: ASIAIR, N.I.N.A. a KStars

- 15.1 Konec mrznutí u dalekohledu: Cesta k plně automatizované noci
- 15.2 ZWO ASIAIR: Kompletní řízení sestavy z tabletu přes Wi-Fi
- 15.3 N.I.N.A. (Nighttime Imaging 'N' Astronomy): Královna sekvencování
- 15.4 KStars / Ekos / INDI: Open-source platforma na Linuxu a Raspberry Pi
- 15.5 Automatické přeostrřování (Autofocus) při poklesu teploty
- 15.6 Bezpečnostní sensory, zatažení mraků a automatické zaparkování

ČÁST VI: DIGITÁLNÍ ZPRACOVÁNÍ DAT (POST-PROCESSING)

Kapitola 16 Registrace a skládání (Stacking)

- 16.1 Matematika stackingu: Zvyšování S/N a redukce náhodného šumu
- 16.2 Pixel Rejection: Kappa-Sigma ořezání stop družic a letadel
- 16.3 Software pro skládání: Siril, DeepSkyStacker a PixInsight (WBPP)
- 16.4 Astrometrická registrace a kanálové zarovnání (Plate Solving)
- 16.5 Drizzle integrace: Matematická obnova detailů při podvzorkování
- 16.6 Tvorba 32-bitových lineárních master FITS souborů

Kapitola 17 Zpracování v lineárním stavu

- 17.1 Co je to lineární stav a proč je surový snímek téměř černý
- 17.2 Ořez okrajů a extrakce světelného gradientu (GraXpert, DBE)
- 17.3 Fotometrická kalibrace barev (PCC): Barvy hvězd podle družice Gaia
- 17.4 Dekonvoluce: Zpětné zaostření rozptylu bodové funkce (PSF)

17.5 Lineární odšumění: Revoluce neuronových sítí (NoiseXTerminator)

17.6 Separace hvězd pomocí AI (StarXTerminator, StarNet++)

Kapitola 18 Nelineární roztažení a finální úpravy

18.1 Nelineární streč: HistogramTransformation, Asinh a GHS

18.2 Zpracování bezhvězdného obrazu: Zvýraznění jemných mlhovin

18.3 Práce s maskami (jasové, barevné a objektové)

18.4 Zpětné vložení a zmenšení hvězd (Star reduction)

18.5 Skládání úzkopásmových kanálů do Hubbleovy palety a bikoloru

18.6 Export pro tisk a web: Barevné profily sRGB vs AdobeRGB, doostření

PŘÍLOHY A PRAKTICKÉ DODATKY

Dodatek A Velký katalog 100 nejkrásnějších cílů pro astrofotografii

Dodatek B Astrofotografický tahák vzorců (vzorkování, backfocus, expoziční kalkulace)

Dodatek C Troubleshooting Guide: Řešení nejčastějších chyb a problémů v praxi

Dodatek D Encyklopedický slovník moderní astrofotografie

Úvod a předmluva: Lovci fotonů – Od nočního úžasu k digitálnímu obrazu

Když člověk poprvé stane v temné noci daleko od civilizace pod klenbou posypanou tisíci jiskřících hvězd a pohlédne na stříbřitý oblak Mléčné dráhy táhnoucí se od obzoru k obzoru, pocítí hluboký vnitřní záchvěv. Je to směs posvátného úžasu a zároveň uvědomění si vlastní nepatrnosti v nekonečném kosmickém oceánu. Lidské oko je zázračným biologickým orgánem, který nám umožňuje vnímat svět kolem nás v neuvěřitelném rozsahu jasů za denního světla. V noci však naráží na své nepřekročitelné fyzikální a evoluční limity.

Naše sítnice nedokáže světlo počítat v čase. Pracuje v reálném čase s expoziční dobou přibližně jedné desetiny sekundy. Fotony, které nedorazí v tomto nepatrném časovém okně, jsou pro náš mozek navždy ztraceny. Navíc naše noční vidění zprostředkovávají tyčinky, které sice reagují na jednotlivé kvanta světla, ale jsou zcela barvoslepé. Proto je pro nás noční vesmír pouhým černobílým světem duchů. Velkolepá mlhovina v Orionu, vzdálená patnáct set světelných let, se v běžném dalekohledu jeví jako drobný, nazelenale šedý závoj kouře.

Astrofotografie představuje technologické křídlo lidského zraku. Je to vědní a umělecká disciplína, která boří biologické hranice našeho oka. Moderní astronomická kamera či bezzrcadlovka má vlastnost, kterou příroda živým tvorům nedala: **dokáže fotony neúnavně střídat po celé minuty, hodiny, ba i desítky nocí.**

Každý foton, který opustil rozžhavený vodíkový oblak před miliony let, proletěl mrazivou prázdnotou mezigalaktického prostoru a po nepředstavitelné pouti dopadl na plochu křemíkového čipu o velikosti poštovní známky, je zaznamenán, přeměněn na elektron a uložen v podobě elektrického náboje. Když pak data zpracujeme matematickými algoritmy digitální obrazové vědy, vystoupí před námi vesmír v celé své monumentální kráse: v sytě rudých závojích ionizovaného vodíku, tyrkysových oblacích dvakrát ionizovaného kyslíku, zlatavých prachových pásích a safírově modrých spirálních ramenech vzdálených galaxií.

ZAJÍMAVOST

Definice a poslání astrofotografie Astrofotografie není pouhým mačkáním spouště v temnotě. Je to fascinující symbióza přesné aplikované optiky, nebeské mechaniky, polovodičové fyziky, elektrotechniky a pokročilé digitální signálové analýzy. Úkolem astrofotografa je extrahovat extrémně slabý signál z všudypřítomného šumu pozadí vesmíru i samotného detektoru.

Tato publikace si klade za cíl být vašim nekompromisním, detailním a praktickým průvodcem na této cestě. Nebudeme se vyhýbat fyzikálním principům, matematickým vztahům vzorkování a kalibračním rovnicím, protože právě pochopení fundamentálních základů odlišuje pouhého experimentátora od skutečného mistra, který dokáže z každé jasné noci vytěžit maximum.

Kniha vás provede logickým obloukem od optických soustav a fungování senzorů přes mechaniku montáží a autoguiding až po specifika fotografování noční krajiny, planetární vysokorychlostní snímání (*lucky imaging*), hloubkovou deep-sky astrofotografii a komplexní digitální post-processing v moderním softwaru jako PixInsight a Siril.

Vstupte do světa, kde se ticho noci setkává s chladnou přesností techniky a kde se z neviditelných fotonů rodí dechberoucí svědectví o řádu a kráse vesmíru.

Část I: Optika a základy snímání světla v noci

Základním kamenem každého astrofotografického pokusu je schopnost shromáždit co největší množství fotonů a soustředit je na detekční plochu s maximální možnou geometrickou a chromatickou věrností. V denní fotografii obvykle bojujeme s přebytkem světla, stíny a vysokým dynamickým kontrastem scény; v astrofotografii je situace diametrálně odlišná. Zde je světlo tou nejvzácnější komoditou ve vesmíru.

Fotony, které k nám přicházejí z hlubin kosmu, jsou nepatrnými posly dávných dějů. Dopadají na zemský povrch s frekvencí několika desítek až stovek kvant za sekundu na čtvereční centimetr. Abychom z těchto slabých záblesků dokázali poskládat ostrý, detailní a barevně věrný obraz, musíme dokonale ovládat dva klíčové nástroje: **optickou soustavu** (astrograf či objektiv) a **polovodičový detektor** (CMOS či CCD senzor).

V této první části knihy položíme neochvějně teoretické i praktické základy: *Prozkoumáme fyzikální zákony geometrické optiky, vliv ohniskové vzdálenosti a světelnosti (f -ratio) a definujeme klíčový koncept obrazového měřítká (pixel scale*), který rozhoduje o tom, zda bude váš systém podvzorkovaný, optimální, či převzorkovaný.*

- Seznámíme se s jednotlivými konstrukčními typy astrografů – od kompaktních apochromatických refraktorů s ED skly přes světelné zrcadlové Newtony až po katadioptrické systémy Schmidt-Cassegrain a špičkové soustavy Ritchey-Chrétien.
- Naučíme se diagnostikovat a korigovat optické vady: chromatickou aberaci, komu, astigmatismus a vinětaci, a pochopíme kritický význam milimetrové přesnosti vzdálenosti backfocusu.
- Ponoříme se do mikroskopického světa křemíkových senzorů, rozebereme podstatu vyčítacího šumu, temného proudu a kvantové účinnosti a vysvětlíme, proč je aktivní termoelektrické chlazení senzoru Peltierovým článkem tajnou zbraní astrofotografa.
- A konečně se naučíme krotit světelné znečištění měst pomocí širokopásmových i úzkopásmových filtrů v čarách $H\alpha$, $[OIII]$ a $[SII]$, které umožňují zachytit kosmické mlhoviny i z balkonu v centru velkoměsta.

Kapitola 1: Fyzika a optika astrofotografie

Každý fotografický snímek noční oblohy začíná u optické soustavy. Ať už se díváme přes teleobjektiv s pevnou ohniskovou vzdáleností, špičkový tříčlenný apochromát s fluoriotovými členy, nebo půlmetrové parabolické zrcadlo, fyzikální zákony lomu a odrazu světla jsou nemilosrdné a platí pro všechny bez výjimky.

V astrofotografii neexistuje pojem „průměrná optika“. Hvězda je pro pozemského pozorovatele ideálním, nekonečně vzdáleným bodovým zdrojem světla. Jakákoliv mikroskopická nepřesnost ve vybroušení optické plochy, nepatrné pnutí v objímce čočky, teplotní roztažnost tubusu nebo nesprávná vzdálenost senzoru od korektoru se okamžitě a neúprosně projeví na výsledném snímku: bodové hvězdy se promění v nafouknuté kotoučky, komické kapky, trojúhelníky či barevné duhové skvrny.



*Komplex mlhovin Koňská hlava (Barnard 33) a Plamínek (NGC 2024) v souhvězdí Orionu –
ultimátní test kresby astrografu, mikrokontrastu a eliminace reflexů jasné hvězdy Alnitak
(NASA / JPL / Spitzer)*

1.1 Ohnisková vzdálenost, světelnost (f -ratio) a obrazové měřítko (*pixel scale*)

Základní geometrii každé optické soustavy definují dva elementární parametry: **vstupní průměr (apertura) D** a **ohnisková vzdálenost f** .

Světelnost soustavy (též clonové číslo neboli f -ratio), označovaná jako N , je definována jako bezrozměrný poměr ohniskové vzdálenosti k účinnému průměru vstupní pupily:

$$N = \frac{f}{D}$$

Například dalekohled s průměrem objektivu $D = 100 \text{ mm}$ a ohniskovou vzdáleností $f = 600 \text{ mm}$ má světelnost $N = 600/100 = 6$, což zapisujeme jako $f/6$.

Fyzikální význam světelnosti v astrofotografii

V denní fotografii určuje světelnost hloubku ostrosti a expoziční čas. V astrofotografii plošných objektů (mlhovin a galaxií) určuje světelnost **hustotu fotonového toku na jednotku plochy senzoru**. Osvětlenost ohniskové roviny E je nepřímo úměrná čtverci světelnosti:

$$E \propto \frac{1}{N^2} = \left(\frac{D}{f} \right)^2$$

To znamená zásadní pravidlo: **Soustava se světelností $f/2.8$ soustředí na plochu pixelu čtyřikrát více fotonů za sekundu než soustava se světelností $f/5.6$!** K dosažení stejného poměru signálu k šumu na plošné mlhovině potřebujete s dalekohledem $f/5.6$ čtyřnásobně delší celkový expoziční čas než s rychlým astrografem $f/2.8$.

ZAJÍMAVOST

Bodové zdroje (hvězdy) vs. plošné zdroje (mlhoviny) Pozor na zásadní fyzikální rozdíl: Zatímco pro plošné objekty (mlhoviny, galaxie) rozhoduje výhradně světelnost f/D , pro bodové hvězdy rozhoduje **absolutní průměr apertury D !** Větší průměr zachytí z dané hvězdy více fotonů bez ohledu na ohnisko a vykreslí slabší mezní hvězdy.

Obrazové měřítko (Pixel Scale)

Obrazové měřítko udává, jak velký úhel na nebi pokrývá jediný pixel vašeho senzoru. Vyjadřuje se v **obloukových vteřinách na pixel** (arcsec/px) a je fundamentálním vzorcem pro párování kamery s dalekohledem:

$$\text{Pixel Scale} = \frac{p}{f} \times 206,265$$

Kde:

- p je fyzická velikost strany pixelu senzoru v mikrometrech (μm),
- f je ohnisková vzdálenost dalekohledu v milimetrech (mm),
- 206,265 je převodní konstanta (počet obloukových vteřin v jednom radiánu).

Zjednodušený praktický vzorec zní:

$$\text{Pixel Scale} \approx 206,3 \times \frac{p [\mu\text{m}]}{f [\text{mm}]}$$

Řešený příklad výpočtu vzorkování: Mějme oblíbenou chlazenou kameru se senzorem Sony IMX571 (velikost pixelu $p = 3,76 \mu\text{m}$) a refraktor o ohnisku $f = 500 \text{ mm}$:

$$\text{Pixel Scale} = 206,3 \times \frac{3,76}{500} = \frac{775,69}{500} \approx 1,55''/\text{pixel}$$

V podmínkách střední Evropy se typická atmosférická turbulence (**seeing**) pohybuje mezi $2,0''$ a $3,5''$. Podle **Nyquistova-Shannonova vzorkovacího teoremu** musí být nejmenší rozlišitelný detail (FWHM hvězdy) vzorkován alespoň 2 až 3 pixely:

$$\text{Optimální vzorkování: Pixel Scale} \approx \frac{\text{Seeing FWHM}}{2 \text{ až } 3}$$

- Pokud je hodnota obrazového měřítka vyšší než $2,5''/\text{px}$, jedná se o **podvzorkování (undersampling)** – hvězdy se jeví jako čtverečky složené z jednoho či dvou pixelů.
- Pokud je hodnota menší než $0,6''/\text{px}$, dochází k **převzorkování (oversampling)** – obraz hvězdy je rozmazán přes mnoho desítek pixelů, což dramaticky snižuje poměr signálu k šumu a neposkytuje žádné nové prostorové detaily.

1.2 Typy astrografů: Apochromáty, Newtony, Schmidt–Cassegrainy a Ritchey–Chrétieny

Žádný univerzální dalekohled neexistuje. Každá optická konstrukce představuje specifický kompromis mezi světelností, zorným polem, korekcí vad, mechanickou tuhostí a finanční náročností.

1. Refraktory (Čočkové dalekohledy)

Refraktory jsou králi širokoúhlé astrofotografie a cestovních sestav. Světlo prochází soustavou čoček v přední části tubusu.

- **Achromáty (dvoučlenné):** Zcela nevhodné pro astrofotografii. Vykazují masivní fialovou chromatickou aberaci kolem všech jasnějších hvězd. **ED Achromáty (Dublety / Triplet):** Využívají speciální nízkorozptylová skla (FPL-53, FPL-51, fluorit syntetický CaF_2). Tříčlenný triplet láme červenou, zelenou i modrou vlnovou délku do jediného společného ohniska. Poskytuje dokonale bodové hvězdy s vysokým kontrastem bez difrakčních paprsků. Vyžaduje však rovnač pole (field flattener*).
- **Petzvalovy čtyřčlenné astrografy (např. Askar FRA, RedCat):** Mají integrovanou korekční čočku přímo v tubusu. Obrovská výhoda: **nevyžadují složité ladění backfocusu**; jakmile je zaostřeno na nekonečno, pole je automaticky dokonale rovné až do rohů full-frame senzoru!

2. Newtonovy reflektory (Zrcadlové dalekohledy)

Klasický Newton využívá primární parabolické zrcadlo a šikmé rovinné sekundární zrcátko.

- **Výhody:** Bezkonkurenční poměr cena/výkon a vysoká světelnost ($f/4$ až $f/5$). Absence chromatické aberace (odraz světla na zrcadle je ze své fyzikální podstaty achromatický).
- **Nevýhody:** Parabolické zrcadlo trpí geometrickou vadou zvanou **koma** (mimo osu optiky se hvězdy mění v ocásky připomínající komety). Newton nutně vyžaduje kvalitní komakorektor. Vyžaduje pravidelnou kolimaci a pavouk sekundárního zrcátka vytváří kolem jasných hvězd charakteristické čtyři difrakční kříže.

3. Katadioptry: Schmidt–Cassegrain (SCT) a EdgeHD

Kombinují sférické primární zrcadlo, sekundární zrcátko a tenkou asférickou korekční desku (Schmidtovu desku) na vstupu.

- **Výhody:** Dlouhá ohnisková vzdálenost (1500 až 3000 mm) v extrémně krátkém a kompaktním tubusu. Ideální pro planety, Měsíc a malé galaxie. **Nevýhody:** *Nízká nativní světelnost ($f/10$), náchylnost k posunu primárního zrcadla při přetáčení dalekohledu (mirror shift*) a citlivost na rosení přední korekční desky.* Moderní systémy Celestron EdgeHD mají v tubusu vestavěné korekční čočky eliminující komu a křivost pole.

4. Systémy Ritchey–Chrétien (RC)

Optická soustava tvořená dvěma hyperbolickými zrcadly (stejnou koncepcí využívá Hubbleův vesmírný dalekohled).

- **Výhody:** Kompletně prosté komy i sférické vady v širokém poli. Nemá žádné čočky, které by pohlcovaly ultrafialové či infračervené světlo.
- **Nevýhody:** Velké centrální zastínění sekundárním zrcadlem (snižuje mikrokontrast) a extrémní náročnost na precizní kolimaci hyperbolických ploch.

1.3 Optické vady: Chromatická aberace, koma, astigmatismus a vinětace

Chcete-li dosáhnout špičkových výsledků, musíte umět na surovém snímku rozpoznat typické optické vady:

Vada	Projev na snímku	Korekční prvek
Barevná aberace	Barevné (fialové/modré) halo kolem hvězd	Apochromatický člen (ED sklo)
Koma	Hvězdy směrem k okraji mají tvar vějířku	Komakorektor (Newton)
Astigmatismus	Hvězdy v rozích jsou oválky tečně/radiálně	Lepší optika / mírné zaclonění
Křivost pole	Střed ostrý, rohy rozostřené (kruhové neostroty)	Rovnač pole (Field Flatteners)
Vinětace	Ztmavení rohů a okrajů snímku	Snímky plochého pole (Flat frames)

Křivost pole (Field Curvature)

Optická čočka ze své přirozené povahy nezobrazuje rovinný prostor na plochu, ale na zakřivenou miskovitou plochu (Petzvalův povrch). Plochy křemíkový čip kamery tuto křivku protíná. Pokud zaostříte na střed pole, rohy snímku budou nevyhnutelně rozostřené. K narovnání této plochy do dokonale ploché roviny slouží **rovnač pole (field flattener)**.

1.4 Optické korektory a kritická vzdálenost Backfocusu

Mnoho začínajících astrofotografů investuje do špičkového dalekohledu a komakorektoru, ale jejich výsledné snímky mají v rozích stále deformované hvězdy. V devadesáti devíti procentech případů je na vině **špatná vzdálenost senzoru od korektoru – tzv. Backfocus**.

Průmyslovým standardem pro většinu komakorektorů a rovnačů pole na trhu je vzdálenost 55 mm (měřeno od zadního závitu korektoru k rovině křemíkového čipu). Tato hodnota vychází z historické hloubky zrcadlovek Canon/Nikon s bajonetovým T2 adaptérem (44 mm + 11 mm = 55 mm).

❗ DŮLEŽITÉ

Pravidlo diagnostiky Backfocusu podle tvaru hvězd v rozích: * **Senzor je PŘÍLIŠ BLÍZKO (Backfocus < 55 mm):** Hvězdy v rozích se protahují **radiálně** (v paprscích směřujících ven ze středu). Řešení: Přidejte tenký distanční kroužek (0,5 až 1 mm). * **Senzor je PŘÍLIŠ DALEKO (Backfocus > 55 mm):** Hvězdy v rozích se protahují **tangenciálně** (v kruzích či tečnách opisujících střed). Řešení: Uberte distanční podložky.

Nezapomeňte započítat tloušťku filtrů! Skleněný filtr v optickém traktu láme paprsky a posouvá efektivní ohniskovou rovinu dále přibližně o **jednu třetinu své fyzické tloušťky**. Máte-li filtr o tloušťce **2 mm**, musíte k mechanickému backfocusu připočítat přibližně **+0,66 mm**!

1.5 Zaostření: Od Bahtinovy masky k automatickému zaostřování V–křivkou

Přesné zaostření je kritickým předpokladem každého snímku. Teplotní změna tubusu o pouhé 2 stupně Celsia během noci způsobí smrštění kovu tubusu o desítky mikrometrů, což spolehlivě vyhodí sestavu z tzv. **kritické zóny zaostření (CFZ – Critical Focus Zone)**:

$$CFZ \approx 4,88 \times \lambda \times N^2$$

U světelné soustavy $f/4$ v zeleném světle ($\lambda = 550 \text{ nm}$) činí hloubka kritické zóny pouhých **43 μm** (méně než tloušťka lidského vlasu!).

Bahtinova maska

Vynález ruského amatérského astronoma Pavla Bahtinova z roku 2005 představuje geniální využití difrakce světla. Plastová či kovová mřížka nasazená na tubus vytvoří na jasné hvězdě difrakční obrazec: pevný kříž písmene „X“ a středový pohyblivý difrakční paprsek. Když středový paprsek přesně protne střed kříže, je dalekohled dokonale zaostřen.

Automatické motorové zaostřování (Autofocus EAF)

V moderní plně automatizované astrofotografii ovládá mikrometrický posun výtahu krokový motor (např. ZWO EAF). Řídící software (N.I.N.A., ASIAIR) posouvá výtah v sérii kroků a měří průměrnou velikost hvězd (**HFD – Half Flux Diameter**). Naměřené body vytvoří dokonalou parabolickou **V–křivku (hyperbolu)**, jejíž minimum definuje matematicky nejpřesnější bod zaostření s přesností na jednotky kroků motoru.

1.6 Kolimace optiky: Jak seřídit zrcadla pro dokonale bodové hvězdy

U reflektorů (Newton) a katadioptrů (SCT) je kolimace – tedy seřízení optických os zrcadel do jedné společné přímky – pravidelnou rutinou. Nekolimovaný Newton trpí masivní asymetrickou komou i přímo v samotném středu zorného pole!

Nástroje a postup kolimace Newtona:

1. **Centrovací záslepka (Kolimační krytka / Cheshire okulár):** Pro hrubé nastavení pozice a rotace sekundárního zrcátka přímo pod středem okulárového výtahu.

2. **Kvalitní kolimační laser:** Laserový paprsek vyslaný z výtahu musí dopadnout přesně do středové značky (*donut*) primárního zrcadla (seřizuje se třemi šrouby na sekundáru).
3. **Odražený laserový terčík:** Paprsek odražený zpět z primáru musí zmizet přesně ve středu terčíku v kolimátoru (seřizuje se třemi stavěcími šrouby na zadní objímce primárního zrcadla).
4. **Finální kontrola na skutečné hvězdě (Star test):** Mírně rozostřená jasná hvězda při velkém zvětšení musí vykreslit dokonale soustředné difrakční Airyho kroužky se středovým stínem sekundárního zrcadla přesně uprostřed.

Kapitola 2: Anatomie moderního senzoru: CMOS versus CCD

Srdcem každého astrofotografického přístroje 21. století je polovodičový křemíkový čip. Zatímco ještě na přelomu tisíciletí vládly vědecké i pokročilé amatérské astrofotografii drahé senzory typu **CCD (Charge-Coupled Device)**, v posledním desetiletí došlo k totální technologické revoluci: masivní nástup vědeckých a průmyslových snímačů **CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)** se zadním osvětlem (Back-Illuminated neboli BSI) poslal technologii CCD do definitivního muzea.

V této kapitole detailně rozebereme mikrofyziku křemíkových detektorů, fundamentální zdroje šumu, se kterými musíme bojovat, a klíčové parametry, které rozhodují o volbě a optimálním nastavení vaší kamery.

2.1 Princip křemíkového detektoru: Foton-elektronová konverze a kvantová účinnost (QE)

Základem detekce světla v křemíku je **vnitřní fotoelektrický jev**. Křemík je polovodič s pásem zakázaných energií o šířce přibližně $E_g \approx 1,12$ eV při pokojové teplotě.

Když foton dopadajícího světla nese energii vyšší než E_g :

$$E_{foton} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq E_g$$

je v křemíkovém krystalu pohlcen a jeho energie excituje elektron z valenčního pásu do pásu vodivostního. Tím vznikne volný pár elektron-díra. Uvolněný elektron je elektrickým polem v pixelu přitážen do potenciálové jámy, kde se hromadí po celou dobu expozice.

Kvantová účinnost (Quantum Efficiency – QE)

Kvantová účinnost udává procentuální podíl dopadajících fotonů dané vlnové délky, které skutečně vygenerují zachycený elektron:

$$QE(\lambda) = \frac{N_{elektronů}}{N_{fotonů}(\lambda)} \times 100 \%$$

- **Klasické fotografické emulze (film):** Měly žalostnou $QE \approx 1$ až 2% . Drtivá většina světla prošla filmem bez povšimnutí.

- **Přední osvit (Front-Illuminated CMOS/CCD):** Světlo muselo před dopadem na křemík projít vrstvou kovových sběrnic a tranzistorů. Dosahovaly $QE \approx 50$ až 60% .
- **Moderní BSI CMOS senzory (např. Sony IMX455, IMX571, IMX533):** Křemíkový plátek je zbrousen na tloušťku pouhých několika mikrometrů a otočen tak, aby světlo dopadalo přímo na křemík bez jakéhokoliv stínění obvodu. Dosahují ohromující kvantové účinnosti $QE \geq 85$ až 91% ! To znamená, že téměř každý foton, který dorazí z dalekého vesmíru, je přeměněn na užitečný elektrický signál.

2.2 Zdroje šumu: Vyčítací šum, temný proud a fotonový šum

V astrofotografii není naším nepřítelem nedostatek světla, ale **šum**. Signál sám o sobě nemá žádný význam bez znalosti šumu, který jej doprovází. Celkový šum výsledného snímku σ_{tot} je dán kvadratickým součtem tří nezávislých složek:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{read}^2}$$

1. Fotonový šum (Shot Noise / Poissonův šum)

Světlo je kvantováno do jednotlivých fotonů. Vyzařování a dopad fotonů se řídí **Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti**. Dopadne-li na pixel v průměru S fotonů, skutečný počet zachycených fotonů v libovolné expozici kolísá se směrodatnou odchylkou rovnou odmocnině ze signálu:

$$\sigma_{shot} = \sqrt{S}$$

Fotonový šum není vadou kamery! Je to fundamentální fyzikální vlastnost samotného světla. Z tohoto vztahu plyne základní zákon astrofotografie pro poměr signálu k šumu (S/N):

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S}} = \sqrt{S}$$

Chcete-li zdvojnásobit poměr signálu k šumu, musíte nasbírat čtyřnásobné množství fotonů (čtyřnásobný expoziční čas)!

2. Temný proud (Dark Current Noise)

I v naprosté temnotě generuje tepelné kmitání krystalové mřížky křemíku volné elektrony. Tyto tepelné elektrony padají do potenciálové jámy pixelu stejně jako elektrony vyvolané světlem. Temný proud roste lineárně s časem expozice t a jeho šum činí:

$$\sigma_{dark} = \sqrt{D_c \cdot t}$$

Kde D_c je rychlost generování temného proudu v elektronech na pixel za sekundu ($e^-/\text{px}/s$).

3. Vyčítací šum (Readout Noise – R_n)

Šum vznikající v analogově-digitálním převodníku (ADC) a zesilovačích při převodu nahromaděného náboje na digitální číslo (ADU). Na rozdíl od temného proudu **nezávisí na délce expozice**; vzniká jednorázově při každém vyčtení snímku.

- Staré CCD senzory: $R_n \approx 6$ až $12 e^-$.
- Špičkové moderní CMOS kamery: $R_n \approx 0,8$ až $1,5 e^-$! Extrémně nízký vyčítací šum CMOS senzorů způsobil revoluci: umožňuje skládat stovky krátkých sub-expozic bez penalizace šumem.

2.3 Chlazení senzoru: Peltierův článek a kalibrační knihovny

Rychlost vzniku temného proudu exponenciálně závisí na teplotě senzoru podle Richardsonova-Dushmanova zákona. Pro křemík platí jednoduché empirické pravidlo:

❗ DŮLEŽITÉ

Pravidlo polovičního temného proudu: Každé snížení teploty křemíkového čipu o přibližně 6 až 7 °C srazí temný proud na polovinu!

Při pokojové teplotě (+20 °C) produkuje senzor Sony IMX571 přibližně $0,05 e^- / \text{px} / \text{s}$. Při expozici 600 sekund by to znamenalo 30 elektronů parazitního tepelného náboje v každém pixelu. Pokud však aktivujeme dvoustupňový termoelektrický **Peltierův článek** a zchladíme senzor na –10 °C, temný proud klesne na neuvěřitelných $0,0005 e^- / \text{px} / \text{s}$! Za celou desetiminutovou expozici se v pixelu vytvoří v průměru méně než třetina jednoho tepelného elektronu.

Výhoda stabilizovaného chlazení pro kalibraci

Zrcadlovky a běžné bezzrcadlovky nemají stabilizovanou teplotu čipu; během noci se čip zahřívá a ochlazuje podle okolí a provozu procesoru, což znemožňuje dokonalou kalibraci temnými snímky (Dark frames). Astronomická chlazená kamera udržuje nastavenou teplotu (např. přesně –10 °C) s přesností na $\pm 0,1$ °C pomocí PID regulace. Můžete si tak za deštivých dnů doma v pokoji vytvořit **univerzální knihovnu kalibračních Dark frames**, která zůstává platná po mnoho měsíců!

2.4 Monochromatická kamera versus barevná (OSC)

Volba mezi barevnou kamerou (One-Shot Color – OSC) a monochromatickou kamerou s filtrovým kolem je nejčastějším dilematem každého astrofotografa.

Vlastnost	Barevná kamera (OSC)	Monochromatická kamera (Mono)
Filtrová maska	Bayerova maska (RGGB na čipu)	Žádná (100 % pixelů pro každou barvu)
Světelná efektivita	Nižší (zelená 50 %, R/B po 25 %)	Maximální (100 % fotonů dopadá na křemík)
Složitost snímání	Nízká (barva z jediné expozice)	Vyšší (nutno snímat L, R, G, B, Ha, OIII...)
Investiční náročnost	Nižší	Vyšší (+ filtrové kolo a sada filtrů)
Úzkopásmové focení (SHO)	Omezené (duo-band filtry)	Dokonalé (čisté separátní kanály)
Rozlišení detailů	Mírně degradováno debayeringem	Maximální nativní rozlišení senzoru

Proč má Mono kamera obrovskou výhodu v mlhovinách:

Bayerova maska obsahuje na každou čtveřici pixelů dva zelené, jeden červený a jeden modrý filtr. Když fotografujete emisní mlhovinu svítící v čáře vodíku $H\alpha$ (656 nm – sytě červená barva):

- U barevné kamery světlo vodíku projde **pouze skrz červený pixel** (tedy skrz 1 ze 4 pixelů!). Zelené a modré pixely zůstanou prázdné a jejich signál je dopočítáván interpolací (debayeringem).
- U mono kamery s nasazeným filtrem $H\alpha$ dopadá světlo vodíku **na 100 % všech dostupných pixelů na čipu!** Mono kamera tak nabízí až čtyřnásobnou prostorovou a signálovou efektivitu při snímání slabých mlhovin.

2.5 Dynamický rozsah, hloubka bitů a kapacita pixelu (Full Well Capacity)

Každý pixel senzoru si můžeme představit jako mikroskopické vědro na elektrony. Maximální množství elektronů, které dokáže potenciálová jáma pixelu pojmout, než začne náboj přetékat do sousedních pixelů (tzv. blooming), se nazývá **kapacita pixelu neboli Full Well Capacity**.

Například pixel o velikosti $3,76 \mu\text{m}$ má kapacitu přibližně $50\,000 e^-$.

Analogově-digitální převodník (ADC) převádí nahromaděný náboj na celočíselnou digitální hodnotu zvanou **ADU (Analog-to-Digital Units)**:

- **12-bitový převodník:** Rozliší $2^{12} = 4\,096$ úrovní jasu.
- **14-bitový převodník:** Rozliší $2^{14} = 16\,384$ úrovní jasu.
- **16-bitový převodník:** Rozliší $2^{16} = 65\,536$ úrovní jasu.

Dynamický rozsah senzoru (Dynamic Range – DR) je definován jako poměr maximálního měřitelného signálu (kapacity pixelu) k nejmenšímu detekovatelnému signálu (vyčítacímu šumu R_n):

$$DR = \frac{\text{Full Well Capacity}}{R_n}$$

V decibelech:

$$DR_{[\text{dB}]} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Full Well}}{R_n} \right)$$

Vysoký dynamický rozsah (u moderních 16-bitových senzorů dosahuje **přes 14 EV / 84 dB**) je klíčový pro to, aby se vám na jednom snímku nepřepálila jasná jádra galaxií a trapéz v mlhovině v Orionu, zatímco v pozadí stále zřetelně zachytíte nejslabší plynná vlákna.

2.6 Zisk (Gain), Offset a volba správného režimu

U digitálních bezzrcadlovek volíte citlivost **ISO**. U dedikovaných astro kamer nastavujete dvě hodnoty: **Gain (zisk)** a **Offset**.

Gain (Zisk)

Zisk určuje, kolik elektronů odpovídá jednomu digitálnímu číslu ADU (tzv. konverzní faktor e^-/ADU):

- **Nízký Gain (Low Gain):** Kapacita pixelu je využita na maximum, dynamický rozsah je nejvyšší, ale vyčítací šum je vyšší. Vhodné pro jasné objekty, hvězdokupy a širokopásmovou fotometrii.
- **High Conversion Gain (HCG mód):** Moderní senzory Sony mají hardwarový přepínač HCG (např. u senzoru IMX571 při zisku Gain 100). V tomto bodě skokově klesne vyčítací šum z $3,5 e^-$ na pouhých $1,4 e^-$ při zachování téměř celého dynamického rozsahu! Pro většinu deep-sky objektů je právě hodnota HCG tím nejlepším výchozím nastavením.

Offset

Offset je malé umělé stejnosměrné kladné napětí přidané k signálu před převodem v ADC. Zajišťuje, aby žádný pixel vlivem náhodného statistického šumu neklesl na zápornou hodnotu, která by byla oříznuta na nulu. Správně nastavený Offset zajistí, že histogram vašeho temného snímku (Bias/Dark) má vrchol bezpečně oddělený od levého okraje grafu (typicky na hodnotě kolem 300 až 1 000 ADU v 16-bitovém měřítku).

Kapitola 3: Filtry a krocení světelného znečištění

S výjimkou několika málo odlehlých vysokohorských pouští na Zemi čelí moderní astrofotografové všudypřítomnému nepříteli: **umělému světelnému znečištění**. Světla městských lamp, průmyslových areálů a nákupních center se rozptylují v molekulách vzduchu a prachových částicích zemské atmosféry a vytvářejí zářící závoj, který spolehlivě přezáří slabé fotony přilétající ze vzdálených koutů kosmu.

Naštěstí fyzika a technologie tenkých dielektrických optických vrstev nabízí mocné zbraně. Touto zbraní jsou **astronomické interferenční filtry**.

3.1 Světelné znečištění a Bortleova stupnice

K objektivnímu popisu kvality noční oblohy slouží devítistupňová **Bortleova stupnice**, kterou v roce 2001 vytvořil americký amatérský astronom John E. Bortle:

- **Bortle 1 (Vynikající temná obloha):** Zodiakální světlo je oslnivé, Mléčná dráha vrhá zřetelné stíny na zem, mezní magnituda volným okem dosahuje $+7,6$ až $+8,0$. Typicky v chilské Atacamě či vnitrozemí Namíbie.
 - **Bortle 3 (Venkovská obloha):** Mléčná dráha vykazuje bohaté strukturní detaily, na obzoru jsou patrné slabé světelné kužely měst. Mezní magnituda kolem $+6,8$.
 - **Bortle 4–5 (Příměstská obloha):** Běžný stav v blízkosti menších měst v ČR. Mléčná dráha je v zenitu stále zřetelná, ale u obzoru zaniká ve světelném smogu.
 - **Bortle 7–8 (Městská obloha):** Velká města (Praha, Brno, Ostrava). Mléčná dráha je zcela neviditelná, obloha má bělavý či nažloutlý nádech, pouhým okem spatříte jen nejjasnější hvězdy a planety.
 - **Bortle 9 (Centrum velkoměsta):** Silně přesevícená obloha, viditelné pouze Měsíc a nejjasnější hvězdy (Vega, Sírius).
-

3.2 Širokopásmové filtry: Možnosti a limity v éře LED osvětlení

V minulosti dominovaly městskému osvětlení nízkotlaké a vysokotlaké sodíkové (*Na*) a rtuťové (*Hg*) výbojky. Tyto výbojky zářily na velmi specifických vlnových délkách: sodík na známém dubletu 589 nm a rtuť na několika diskrétních spektrálních čarách. Tehdejší **širokopásmové filtry**

proti světelnému znečištění (LPS / CLS / UHC) fungovaly jednoduše: měly zářezy přesně na těchto čarách, které vyřízly, zatímco zbytek spektra propustily.

Problém moderních bílých LED svítidel

V posledních deseti letech města masivně přešla na úsporné bílé LED osvětlení. Bílá LED dioda je ve skutečnosti modrá dioda potažená žlutým fosforem. Její emisní spektrum je **kontinuální** – svítí spojitě v celém rozsahu od 400 nm do 700 nm. Žádný širokopásmový filtr nedokáže odfiltrovat spojitě světlo LED diod, aniž by zároveň neodřízl stejnou část světla přicházejícího z galaxie či hvězdokupy!

ZAJÍMAVOST

Kdy má širokopásmový filtr smysl: Širokopásmové filtry (jako Optolong L-Pro či Baader Neodymium) mají stále význam na venkovské a příměstské obloze (Bortle 3 až 5) pro mírné zvýšení kontrastu a oříznutí přirozeného atmosférického záření oblohy (*Airglow*). Pro galaxie a reflexní mlhoviny ve městě (Bortle 6 až 8) je však nejlepším „filtrem“ plná nádrž auta a odjezd pod temnou oblohu.

3.3 Úzkopásmové filtry (Narrowband): Okno do vesmíru

Zatímco galaxie vyzařují spojitě světlo miliard svých hvězd, **emisní mlhoviny svítí zcela odlišným způsobem**. Jsou to obří mezihvězdné oblaky plynu ionizované ultrafialovým zářením blízkých horkých mladých hvězd.

Když se rekombinující elektrony v atomech plynu vracejí do nižších energetických hladin, vyzařují fotony na přísně definovaných kvantových vlnových délkách:

1. **Vodík $H\alpha$ (656,28 nm):** Dominantní červená emise tvořící 90 % hmoty většiny mlhovin ve vesmíru (přechod elektronu z 3. na 2. hladinu Bohrova modelu atomu vodíku).
2. **Kyslík $[OIII]$ (500,68 nm):** Zářivá modrozelená (tyrkysová) emise dvakrát ionizovaného atomu kyslíku. Typická pro horké planetární mlhoviny a expandující rázové vlny supernov.
3. **Síra $[SII]$ (671,64 nm a 673,08 nm):** Hluboká temně rudá emise ionizované síry, mapující husté rázové fronty v mlhovinách.
4. **Vodík $H\beta$ (486,13 nm):** Modrá emise vodíku (např. v mlhovině Koňská hlava).

Šířka pásma (Bandpass: 7 nm vs. 3 nm)

Moderní úzkopásmový filtr propouští pouze extrémně úzké spektrální okénko soustředěné kolem dané čáry. Šířka pásma v polovině maxima propustnosti (**FWHM – Full Width at Half Maximum**) se pohybuje od 7 nm u standardních filtrů až po špičkových 3 nm či 2,5 nm u ultra-úzkých filtrů.

Všechno ostatní světlo – včetně 99,5 % veškerého městského osvětlení a měsíčního svitu – je nekompromisně odraženo zpět do vesmíru! S úzkopásmovým filtrem **3 nm $H\alpha$** můžete z balkonu na Václavském náměstí v Praze pořídit špičkové, vysoce kontrastní snímky mlhoviny Roseta nebo Severní Amerika i při úplňku Měsíce.

3.4 Palety zobrazení: LRGB versus Hubbleova paleta (SHO)

Zatímco lidské oko vidí emisní mlhoviny převážně v odstínech červené (protože emise $H\alpha$ je mnohonásobně silnější než síra [SII]), v monochromatické astrofotografii skládáme jednotlivé filtrové kanály do barevných syntéz:

1. Přirozená paleta LRGB

- **L (Luminance):** Širokopásmový filtr zachycující veškeré světlo (černobílý detail).
- **R, G, B:** Standardní barevné filtry (červená, zelená, modrá). Využívá se pro galaxie, hvězdokupy a reflexní mlhoviny.

2. Hubbleova paleta (SHO – Sulphur, Hydrogen, Oxygen)

Tuto paletu proslavil Hubbleův vesmírný dalekohled na slavném snímku „Sloupy stvoření“ v Orlí mlhovině (M16):

- **Kanál R (Červená):** Namapována Síra [SII] (672 nm).
- **Kanál G (Zelená):** Namapován Vodík $H\alpha$ (656 nm).
- **Kanál B (Modrá):** Namapován Kyslík [$OIII$] (501 nm).

Protože $H\alpha$ i [SII] jsou obě ve skutečnosti červené, jejich oddělení do zeleného a červeného kanálu umožní vědcům i astrofotografům odlišit různé ionizační zóny a prostorovou strukturu plynu v mlhovině. Výsledkem je ikonický obraz s tyrkysovým jádrem obklopeným zlatavými a jantarovými prachovými strukturami.

3.5 Duální úzkopásmové filtry pro barevné kamery (Duo-Band)

Majitelé barevných kamer (OSC) nemohli dříve klasické mono filtry efektivně využít. Řešením 21. století jsou **duální úzkopásmové filtry (Dual-Narrowband)**, jako jsou Optolong L-eXtreme, L-Ultimate, Askar Colour Magic či Antlia ALP-T.

Tyto filtry mají propustnost na **dvou různých místech spektra současně**:

1. Úzké okno na vlnové délce [$OIII$] (500,7 nm – v modrozelené části).
2. Úzké okno na vlnové délce $H\alpha$ (656,3 nm – v červené části).

Když toto světlo dopadne na barevný senzor s Bayerovou maskou:

- Světlo $H\alpha$ je zaznamenáno červenými pixely senzoru.
- Světlo $[OIII]$ je zaznamenáno zelenými a modrými pixely senzoru!

Jedinou expozicí barevnou kamerou tak získáte současně čistý signál vodíku i kyslíku v oddělených kanálech, které lze následně v softwaru separovat a zpracovat jako plnohodnotný bikolor snímek.

Část II: Montáže, tracking a přesná navigace po obloze

Zatímco optika soustředí světlo a senzor jej zaznamenává, **montáž je páteří a motorem celé astrofotografie**. Můžete vlastnit optiku za statisíce korun a nejcitlivější vědecký senzor na světě, ale pokud vaše montáž nedokáže udržet dalekohled namířený na vzdálenou hvězdu s přesností na zlomek tloušťky lidského vlasu po celých deset minut, vaše výsledky budou rozmazané a nepoužitelné.

Země se pod našima nohama neúprosně otáčí. Zemská rotace rychlostí 15 obloukových vteřin za sekundu způsobuje zdánlivý pohyb celé nebeské klenby od východu k západu.

V této druhé části knihy rozebereme: *Fyziku zdánlivého pohybu oblohy a geometrický rozdíl mezi azimutální montáží trpící stáčením pole (field rotation*) a paralaktickou rovníkovou montáží. Moderní revoluci v mechanice: nástup lehkých harmonických montáží (Strain Wave Gear*), které nepotřebují těžká protizávaží a lze je sbalit do příručního batohu. Metody dokonalého polárního ustavení – od optického hledáčku přes driftovou metodu až po bleskové kamerové ustavení pomocí plate solving* během jediné minuty.*

- Princip autoguidingu: jak malá pomocná pointační kamera s programem PHD2 v uzavřené smyčce neustále koriguje mechanické nepřesnosti a periodickou chybu šnekového převodu. *A nezbytné techniky jako dithering (náhodný mikroskopický posun mezi expozicemi), bezpečný meridiánový obrat (meridian flip*) a spolehlivý kabelový management.*

Kapitola 4: Geometrie nebeského pohybu a typy montáží

Když pohlédneme na noční nebe, zdá se nám, že se nad námi otáčí obrovská křišťálová koule posypaná hvězdami. Hvězdy vycházejí na východě, kulminují na jihu a zapadají na západě. Ve skutečnosti jsme to my, kdo se na povrchu planety Země řítí vesmírem.

Země se otočí kolem své osy jednou za **hvězdný (siderický) den**, který trvá přesně:

$$T_{sid} = 23^h 56^m 04,09^s \approx 86\,164,1\text{ s}$$

Úhlová rychlost zemské rotace ω proto činí:

$$\omega = \frac{360^\circ}{23^h 56^m 04^s} \approx 15,041'' \text{ za sekundu}$$

To je obrovská rychlost! Během pouhé jedné vteřiny se hvězda na nebeském rovníku posune o více než 15 obloukových vteřin. Máte-li dalekohled s obrazovým měřítkem $1,5''/\text{px}$, posune se obraz hvězdy za jedinou vteřinu o **deset celých pixelů**! Pokud montáž nepohybuje dalekohledem s naprosto shodnou rychlostí v opačném směru, z bodové hvězdy se okamžitě stane rozmazaná čára.

4.1 Pravidlo 500 a přesnější pravidlo NPF pro statické focení

Pokud fotografujete ze stativu bez motorického trackingu, jak dlouho můžete exponovat, než se hvězdy viditelně protáhnou?

Historické „Pravidlo 500“

V době kinofilmu vzniklo jednoduché empirické pravidlo:

$$t_{\max} \approx \frac{500}{f_{\text{ekv}}}$$

Kde f_{ekv} je ekvivalentní ohnisková vzdálenost objektivu pro kinofilm (Full-Frame). Pro širokoúhlý objektiv s ohniskem $f = 24\text{ mm}$ vychází čas $t_{\max} \approx 500/24 \approx 20\text{ sekund}$.

Proč pravidlo 500 dnes selhává a pravidlo NPF

Pravidlo 500 bylo navrženo pro zrnitý černobílý film a malé papírové fotky $10 \times 15\text{ cm}$. Dnešní digitální senzory mají 24 až 60 megapixelů s pixely o velikosti pod $4\text{ }\mu\text{m}$. Při 100% přiblížení na

monitoru zjistíte, že při dvacetisekundové expozici jsou hvězdy zřetelně oválné!

Přesné moderní **pravidlo NPF** (vyvinuté francouzskou Société Astronomique du Havre) zohledňuje tři reálné parametry: světelnost objektivu N , fyzickou velikost pixelu p v mikrometrech a ohniskovou vzdálenost f :

$$t_{\max} = \frac{35 \cdot N + 30 \cdot p}{f}$$

Kde:

- N je clonové číslo (např. 2.8),
- p je velikost pixelu v μm (např. 3,76 μm),
- f je ohnisková vzdálenost objektivu v milimetrech (např. 24 mm).

Pro objektiv 24 mm při $f/2.8$ a pixel 3,76 μm dává pravidlo NPF maximální čas pouhých 8,8 **sekundy!**

4.2 Azimutální (Alt–Az) versus paralaktická montáž a stáčení pole

Existují dva základní principy uspořádání mechanických os montáže:

1. Azimutální montáž (Alt–Az)

Má svislou osu (azimut) a vodorovnou osu (výšku nad obzorem). Je mechanicky přirozená, jednoduchá a stabilní (využívají ji např. dobsonovy dalekohledy či fotostativy). Pokud je motorizovaná, dokáže pomocí počítače udržet hvězdu ve středu pole současným pohybem v obou osách.

Trpí však fatální vadou pro dlouhé expozice: **stáčením pole (Field Rotation)**! Protože se osy montáže neshodují s osou zemské rotace, hvězda ve středu zůstává na místě, ale celé okolní hvězdné pole se kolem ní pomalu otáčí jako ručička na hodinách. Expozice delší než přibližně 15 až 30 sekund vedou k tomu, že hvězdy směrem k okrajům snímku vytvoří soustředné obloučky.

2. Paralaktická (rovníková / ekvatoriální) montáž

Jedna z os montáže – **polární osa (rektascenze – RA)** – je skloněna tak, že míří přesně do zemského nebeského pólu a je **dokonale rovnoběžná s osou rotace planety Země**. Druhá osa – **deklinace (DEC)** – je na ni kolmá.

Obrovská výhoda: K dokonalému sledování jakékoliv hvězdy na nebi po celou noc stačí montáž **otáčet se konstantní rychlostí pouze kolem jediné osy (polární osy RA)** rychlostí 1 otáčka za hvězdný den (15,041"/s)! Ke stáčení pole nikdy nedochází a expozice mohou trvat minuty i hodiny.

4.3 Moderní konstrukce: Německá paralaktika (GEM) vs. Harmonická soukolí (Strain Wave)

Klasická německá rovníková montáž (GEM – German Equatorial Mount)

Po více než dvě stě let představovala standard. Využívá přesné šnekové převody z bronzu a oceli.

- **Nutnost protizávaží:** Aby se vyrovnala váha těžkého dalekohledu na opačném konci deklinační hřídele, musíte nasadit masivní ocelová závaží (často 5 až 15 kg).
- **Váha celého systému:** Samotná hlava montáže (např. Sky-Watcher HEQ5 či EQ6–R) váží 10 až 18 kg, což ze sestavy činí robustní, ale těžkopádný monument.

Revoluce: Harmonické montáže (Strain Wave Mounts)

V posledních pěti letech vtrhla do amatérské astronomie technologie vyvinutá původně pro kosmické sondy a průmyslovou robotiku: **harmonická vlnová převodovka (Strain Wave Gear / Harmonic Drive)**. Známými představiteli jsou ZWO AM5/AM3, iOptron HAE či RainbowAstro. Jak to funguje? Flexibilní tenkostěnný ozubený válec z legované oceli s vnějším ozubením je deformován vnitřním eliptickým vačkovým ložiskem a zabírá do pevného kruhového prstence. V každém okamžiku zabírá až **30 % všech zubů najednou** (oproti jednomu či dvěma zubům u šnekového převodu)!

Výhody harmonických montáží:

1. **Neuvěřitelný krouticí moment:** Dokáže unést 10 až 15 kg astrograf bez jediného gramu protizávaží!
2. **Extrémní lehkost:** Hlava montáže ZWO AM5 váží pouhých 5 kg – můžete ji vzít v batohu jako příruční zavazadlo do letadla.
3. **Nulový backlash (vůle):** Převody nemají žádnou mechanickou vůli mezi zuby.
4. **Daň za harmonický převod:** Mají relativně vysokou periodickou chybu (PE), která je však velmi hladká a s moderním rychlým autoguidingem (expozice pointace 0,5 až 1 s) ji lze snadno stáhnout pod 0,5" RMS.

4.4 Cestovní hvězdné trackery (Star Trackers)

Pro širokoúhlou krajinářskou astrofotografii a teleobjektivy do 200 až 300 mm jsou ideální kompaktní **hvězdné trackery** (Sky-Watcher Star Adventurer 2i / GTi, iOptron SkyGuider Pro). Váží kolem 1 až 1,5 kg, fungují na tužkové baterie nebo powerbanku a upevní se na standardní pevný fotografický stativ. Umožňují prodloužit expozici širokoúhlého objektivu z 10 sekund na **2 až 5 minut při nízkém ISO**, což dramaticky sníží šum a odhalí temné mlhoviny Mléčné dráhy.

Kapitola 5: Ustavení na polární osu a GoTo navádění

Paralaktická montáž je jen tak přesná, jak přesně je její polární osa (RA) rovnoběžná se skutečnou rotační osou naší planety. Pokud je osa vychýlena o pouhý jeden stupeň, dojde během několika minut k masivnímu úletu fotografovaného objektu v ose deklinace (DEC), který nelze kompenzovat pouhým otáčením v rektascenzi.

V této kapitole si ukážeme, jak montáž ustavit s přesností na jednotky obloukových vteřin během několika málo minut.

5.1 Kde leží nebeský pól: Proč Polárka nestačí

Mnoho laiků se domnívá, že Polárka (α UMi) leží přesně v severním nebeském pólu (NCP). To je však omyl. V důsledku precese zemské osy leží Polárka v současné epoše přibližně $0,65^\circ$ (**asi 39 obloukových minut**) od skutečného pólu – což je více než zdánlivý průměr měsíčního úplňku!

Polárka během 24 hodin opisuje kolem neviditelného matematického pólu kružnici. Pokud byste polární osu montáže namířili přímo na Polárku, montáž by byla vychýlena o více než 2 300 obloukových vteřin! V optickém hledáčku proto musíte vědět, na jaké pozici (hodinovém úhlu) se Polárka vůči pólu právě nachází.

Na jižní polokouli je situace ještě dramatičtější: jižní nebeský pól (SCP) nemá žádnou jasnou hvězdu; nachází se v nevýrazném souhvězdí Oktantu u slabé hvězdy σ Octantis (5,4 mag), kterou lze v hledáčku sotva zahlédnout.

5.2 Moderní kamerové ustavení pomocí Plate Solvingu

Zatímco v minulosti musel astronom klečet v trávě a mžourat do malého optického hledáčku s podsvícenou osnou, moderní digitální éra přinesla technologii **Plate Solvingu (astrometrické identifikace pole)**.

Plate solving funguje následovně:

1. Hlavní nebo pointační kamera pořídí krátkou 2sekundovou expozici oblohy.
2. Algoritmus během půl sekundy změří vzájemné úhly a vzdálenosti mezi desítkami detekovaných hvězd a porovná je s vestavěnou hvězdnou databází (katalogy Gaia či Tycho-2).

3. Software okamžitě zná naprosto přesné nebeské souřadnice (α , δ) středu snímku a přesný úhel natočení kamery s přesností na desetiny obloukové vteřiny!

Nástroje pro bleskové ustavení:

- **ASIAIR Polar Alignment:** Kamera pořídí snímek u Polárky, montáž se automaticky pootočí o 60° v ose RA a pořídí druhý snímek. Z geometrie rotace software vypočítá skutečný střed otáčení osy a na displeji tabletu vám ukáže virtuální terčik a šipky: otočte výškovým šroubem nahoru o 2 otáčky, azimutálním šroubem doleva... Během 90 sekund máte ustaveno s chybou pod $30''$!
- **N.I.N.A. Three Point Polar Alignment (TPPA):** Zásadní výhoda – **nevyžaduje přímou viditelnost Polárky!** Pokud máte sever zakrytý domem či stromy, N.I.N.A. pořídí tři snímky na jihu či východě a vypočítá polární odchylku montáže z libovolné části oblohy.

5.3 Driftová metoda ustavení (Scheinerova metoda)

Pro stálé pilíře a hvězdárny zůstává zlatým etalonem klasická geometrická **driftová metoda (Scheiner)**. Spočívá v pozorování driftu (ujíždění) hvězdy v deklinaci při vypnutém autoguidingu:

1. **Azimutální seřízení:** Zaměřte hvězdu na **nebeském rovníku** ($\delta \approx 0^\circ$) **blízko jižního meridiánu**. * Pokud hvězda ujíždí k **jihu**, polární osa míří příliš na **východ**. * Pokud hvězda ujíždí k **severu**, polární osa míří příliš na **západ**.
2. **Výškové seřízení (Elevace):** Zaměřte hvězdu na nebeském rovníku nízko nad **východním obzorem** (cca 20° až 30° nad horizontem). * Pokud hvězda ujíždí k **jihu**, polární osa je skloněna **příliš nízko**. * Pokud hvězda ujíždí k **severu**, polární osa je nastavena **příliš vysoko**.

5.4 GoTo navádění a kalibrace hvězdného modelu

Jakmile je montáž ustavena na pól, potřebuje vědět, kam na obloze právě míří. K tomu slouží **hvězdná kalibrace (Star Alignment)**. U moderních systémů spojených s počítačem je kalibrace hvězd opět plně automatizována plate solvingem: Zadáte v řídicím programu název cíle (např. galaxie M31). Montáž se hrubě otočí přibližným směrem. Kamera pořídí snímek, provede bleskový plate solve, zjistí, že cíl je posunut o $1,2^\circ$, montáž provede mikro-korekci a za 5 sekund máte galaxii vycentrovanou přesně na střed čipu s přesností na několik pixelů.

5.5 Meridiánový obrat (Meridian Flip)

U německé rovníkové montáže (GEM) nastává v průběhu noci kritický geometrický moment: **průchod objektu místním poledníkem (meridiánem)**.

Objekt stoupá na východě, dosáhne své maximální výšky na jihu (kulminuje) a začíná klesat na západ. Když dalekohled sleduje objekt za meridián, dostává se tubus nebezpečně blízko stativu. Pokud by montáž pokračovala ve sledování dál, hrozí katastrofa: **kamera či tělo dalekohledu fyzicky narazí do nohy stativu**, což může zničit převody montáže nebo rozbít optiku!

K zabránění kolizi slouží **Meridiánový obrat (Meridian Flip)**:

1. Montáž zastaví expozici, když objekt překročí meridián o nastavený úhel (např. 5 minut za meridiánem).
2. Provede kompletní otočku o 180° v rektascenzi a překllopí deklinační osu na opačnou stranu pilíře.
3. Obraz na kameře se otočí vzhůru nohama o 180° .
4. Řídící software (N.I.N.A., ASIAIR) automaticky provede plate solve k opětovnému přesnému vycentrování cíle, zkalibruje autoguiding a pokračuje v sekvenci expozic.

Kapitola 6: Autoguiding: Dokonalé sledování hvězd na vteřiny přesně

I ta nejdokonaleji ustavená paralaktická montáž na světě má své mechanické limity. Šneková kola a pastorky jsou vyrobeny lidskou rukou a obráběcími stroji; mají mikroskopické nerovnosti v řádu mikrometrů, drobnou excentricitu a proměnlivé tření.

Když se šnek montáže otáčí (typicky jedna otáčka trvá 8 až 10 minut), dalekohled se periodicky mírně zrychluje a zpomaluje. Tento jev se nazývá **periodická chyba převodů (Periodic Error – PE)**. U běžných montáží činí periodická chyba $\pm 10''$ až $\pm 30''$. Při expozici delší než 30 sekund při ohnisku nad 500 mm tato chyba spolehlivě způsobí protáhlé hvězdy.

Řešením, které umožňuje provádět 10minutové i 20minutové expozice s dokonale bodovými hvězdami, je **Autoguiding (aktivní pointace)**.

6.1 Princip Autoguidingu: Uzavřená regulační smyčka

Autoguiding je klasický automatizovaný regulační systém s uzavřenou zpětnou vazbou:

1. Pomocná malá digitální kamera (pointační kamera) sleduje v reálném čase vybranou hvězdu (nebo pole hvězd) s krátkými expozicemi (typicky 1 až 2 sekundy).
2. Pointační software (standardem je open-source program **PHD2 – Push Here Dummy**) změří matematický střed jasu hvězdy (**centroid**) s přesností na **setiny pixelu**!
3. Pokud se hvězda pohne od své původní referenční polohy o pouhých $0,2''$, software okamžitě vypočítá potřebnou korekci a vyšle do řídicí jednotky montáže korekční pulz (např. v ose RA zrychlí motor o 45 milisekund).
4. Montáž chybu vyrovná ještě dříve, než se stihne projevit na dlouhé expozici hlavní kamery!

6.2 Hardwarová řešení: Guidescope versus Off-Axis Guider (OAG)

Existují dvě hlavní metody, jak dostat obraz pointační hvězdy na pointační kameru:

1. Pointační dalekohled (Guidescope)

Malý, vysoce světelný refraktorek (např. průměr 30 až 50 mm, ohnisko 120 až 200 mm) upevněný v hledáčkové botce nebo na kruhách na těle hlavního dalekohledu.

- **Výhody:** Velmi snadné zaostření, obrovské zorné pole (vždy najde desítky jasných pointačních hvězd), nízká cena.
- **Nevýhody:** Trpí zákeřným jevem zvaným **diferenciální průhyb (Differential Flexure)**. Během noci se upevnění guidescopu, tubus či okulárový výtah vlivem gravitace nepatrně mechanicky prohne o několik mikrometrů. Pointační kamera hlásí, že hvězda stojí dokonale na místě, ale hlavní dalekohled se mezitím mírně pohnul a snímek je rozmazaný! Vhodné pro ohniska do cca 800 mm.

2. Mimotělní hranol (Off-Axis Guider – OAG)

OAG je tenký kovový prstenec zařazený přímo do hlavního optického traktu před hlavní kameru. Na jeho okraji (těsně mimo plochu hlavního senzoru) je umístěn malý optický hranolek, který odrazí světlo z okraje zorného pole nahoru do pointační kamery.

- **Výhody: Absolutní eliminace diferenciálního průhybu!** Pointační kamera se dívá přes naprosto stejnou optiku jako hlavní senzor. Pokud se prohne zrcadlo či tubus, OAG to okamžitě vidí a vyrovná. Nezbytnost pro zrcadlové teleskopy Schmidt-Cassegrain (SCT), Ritchey-Chrétien (RC) a dlouhá ohniska nad 1000 mm.
- **Nevýhody:** Menší zorné pole hranolu (vyžaduje citlivou pointační kameru s velkým čipem, např. ZWO ASI220MM s vysokou citlivostí v IR) a náročnější souběžné zaostření s hlavní kamerou.

6.3 Software PHD2: Nastavení parametrů a čtení grafu odchylek

Program PHD2 zobrazuje během noci graf odchylek sledování v reálném čase. Vodorovná osa představuje čas, svislá osa představuje odchylku v **obloukových vteřinách (")**:

- Modrá křivka: Osa rektascenze (RA).
- Červená křivka: Osa deklinace (DEC).

Klíčovým údajem je **celková hodnota RMS (Root Mean Square)**:

$$\text{RMS}_{\text{tot}} = \sqrt{\text{RMS}_{\text{RA}}^2 + \text{RMS}_{\text{DEC}}^2}$$

❗ DŮLEŽITÉ

Zlaté pravidlo autoguidingu: Celková hodnota RMS chyby pointace musí být menší než polovina obrazového měřítka vaší hlavní snímací sestavy! Pokud máte obrazové měřítko hlavní kamery 1,5"/px, potřebujete celkovou chybu pointace $\text{RMS} \leq 0,75''$. V tom případě zůstanou veškeré odchylky montáže skryty uvnitř jediného pixelu a vaše hvězdy budou dokonale kulaté.

Hlavní parametry ladění v PHD2:

- **Agresivita (Aggressiveness – typicky 50–70 %):** Určuje, jaké procento naměřené odchylky se montáž pokusí v jednom pulzu opravit. Pokud nastavíte agresivitu příliš vysoko (90–100 %), montáž začne **překmitávat (over-correcting)** – začne lovit atmosférický seeing a lítat ze strany na stranu.
- **Hystereze (Hysteresis – typicky 10–15 %):** Vyhlazuje korekce zprůměrováním s předchozími kroky, což brání prudkým trhnutím.
- **Min-Move (Minimální pohyb – typicky 0,1 až 0,2 px):** Prahová hodnota; odchylky menší než tento limit jsou ignorovány jako turbulence vzduchu (seeing).

6.4 Dithering: Klíč k eliminaci pruhového šumu (*walking pattern noise*)

Všechny křemíkové senzory mají mikroskopické lokální nerovnoměrnosti v citlivosti jednotlivých pixelů (tzv. Fixed Pattern Noise – FPN) a náhodné vadné pixely. Pokud dalekohled sleduje oblohu po celou noc s naprostou přesností na stejný pixel, tyto mikroskopické vady se při finálním skládání desítek expozic seřadí vlivem mírného driftu do nevzhledných **šikmých šmouh a pruhů v pozadí (tzv. Walking Pattern Noise nebo dešťový šum)**.

Řešením je **Dithering (náhodný posun)**: Po každé dokončené sub-expozici (nebo každých 2 až 3 expozicích) dá řídicí software montáži příkaz:

- Pohni dalekohledem o náhodný směr o 5 až 15 pixelů.
- Počkej 5 sekund na ustálení montáže (settling).
- Spusť další expozici.

Na surových snímcích je obraz mlhoviny pokaždé posunut o několik pixelů jinam. Když pak snímky v softwaru (PixInsight, Siril) zaregistrujete a složíte pomocí algoritmu **Kappa-Sigma Rejection**, skutečné hvězdy a mlhovina se sečtou, zatímco pruhový šum a hot-pixely padnou pokaždé na jiné místo a algoritmus je **do jednoho dokonale vymaže!** Pozadí vašeho snímku bude sametově hladké a čisté. ""

```
(content_dir / "06_autoguiding_dokonale sledovani_hvezd.md").write_text(ch06, encoding="utf-8") print("[OK] Kapitola 6 vytvorena.")
```

Část III: Noční krajinářská astrofotografie

Zatímco teleskopická astrofotografie proniká hluboko do nepatrných výřezů vesmíru, **noční krajinářská astrofotografie (Nightscape / TWAN – The World at Night)** propojuje nekonečno kosmu s pozemským světem kolem nás. Je to vizuálně nejpůsobivější a pro veřejnost nejvíce srozumitelná větev astrofotografie, kde vedle sebe na jediném obraze stojí majestátní oblouk Mléčné dráhy, tiché siluety horských štítů, zříceniny středověkých hradů či osamělé stromy v krajině.

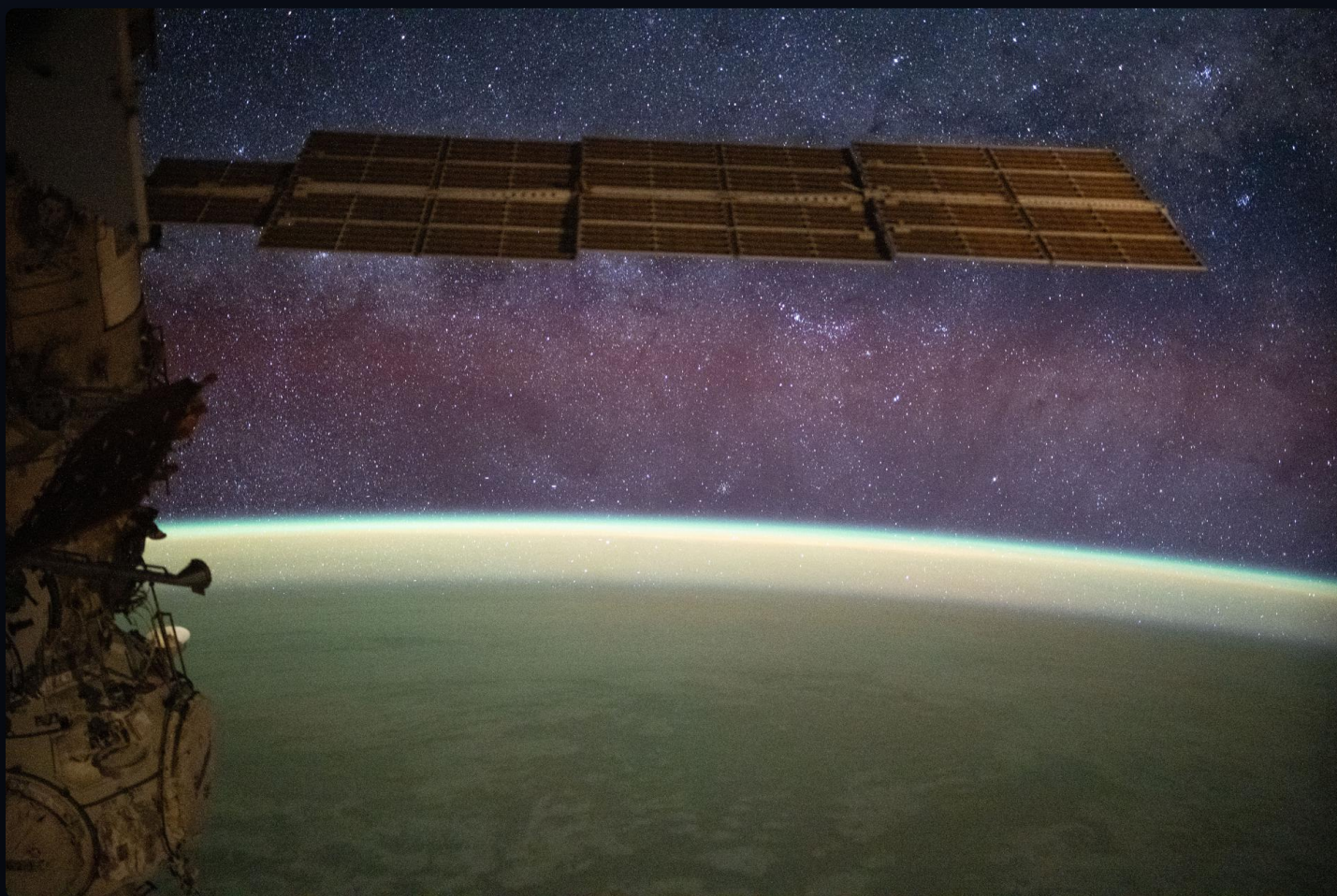
V této třetí části knihy opustíme těžké dalekohledy a vydáme se do terénu s fotoaparátem, stativem a širokoúhlým objektivem:

- Naučíme se umění noční kompozice, plánování expozice podle fází Měsíce pomocí aplikací PhotoPills a Stellarium a techniku tvorby vícesnímkových nočních panoramat bez paralaktické chyby. *Prozkoumáme fenomén sledované krajiny (Tracked Nightscape*)*, kdy spojíme dokonale prokreslenou expozici oblohy z lehkého trackeru s nehybnou pozemní krajinou v modré hodince. *Ponoříme se do geometrie a estetiky cirkumpolárních kruhových stop hvězd (startrails)*, *nočních časosběrů (Holy Grail timelapse*)* a zachycení meteorických rojů. *A zaměříme se na fascinující světelné úkazy zemské atmosféry: polární záře (Aurora Borealis), noční svítící oblaka (NLC) v mezoféře, tajemné zodiakální světlo a jemné vzdušné záření (Airglow*)*.

Kapitola 7: Fotografování Mléčné dráhy a noční krajiny

Srdce naší Galaxie – zářící oblak ve Střelci a Štíru – je nejkrásnějším a nejkomplexnějším širokoúhlým motivem letní noční oblohy. Prolínají se v něm zářící emisní mlhoviny, hustá pole stovek milionů hvězd a neproniknutelné temné prachové řeky mezihvězdného kouře.

Zachytit tento nebeský zázrak tak, aby přirozeně a plasticky doplňoval zemskou krajinu pod ním, vyžaduje zvládnutí specifické fotografické techniky, precizního plánování a respektu k fyzikálním limitům senzoru.



Oblouk Mléčné dráhy zářící nad zemským horizontem obklopený smaragdově zeleným pásem atmosférického vzdušného záření (Airglow) – pohled z paluby Mezinárodní vesmírné stanice ISS (NASA)

7.1 Výběr techniky: Snímače, objektivy a stabilní stativy

V noční krajině je každé zachycené fotonové kvantum drahocenné. Proto má výběr fotografické techniky zcela zásadní vliv na kvalitu obrazu:

1. Formát snímače (Full-Frame vs. APS-C a Micro 4/3)

- **Full-Frame (36 × 24 mm):** Zlatý standard noční krajiny. Velká fyzická plocha senzoru zachytí při stejném zorném poli mnohem více celkového světla než menší čipy. Pixely jsou větší, což přináší vyšší odstup signálu od šumu při vysokých citlivostech (ISO 1600 až 6400) a širší dynamický rozsah.
- **APS-C:** Lze dosáhnout velmi pěkných výsledků, ale vlivem crop faktoru (1,5×) musíte použít kratší ohniska a vyšší ISO produkuje více šumu, což vyžaduje pečlivější skládání expozic (stacking).

2. Volba objektivu: Světelnost a koma

- **Světelnost:** Vybírejte objektivy se světelností $f/1.4$, $f/1.8$ až **maximálně $f/2.8$** . Rozdíl mezi objektivem $f/2.8$ a $f/1.4$ jsou rovné **dvě expoziční clony (čtyřnásobek světla!)**. S objektivem $f/1.4$ můžete fotografovat na ISO 1600 namísto ISO 6400, což přináší nesrovnatelně čistší data.
- **Koma a astigmatismus v rozích:** Běžné denní objektivy bývají při plně otevřené cloně v rozích neostré a bodové hvězdy mění v „létající racky“ (sagitální koma). Pro noční krajinu jsou proslulé specializované manuální i automatické objektivy s potlačenou komou: např. Samyang/Rokinon 14mm $f/2.8$, Sigma 14mm $f/1.4$ Art, Sigma 20mm $f/1.4$ Art či Sony 14mm $f/1.8$ GM.

3. Masivní stativ a kulová hlava

Statické noční snímání s dlouhými expozicemi na větrném horském hřebeni nesnese levné plastové stativy. Investujte do robustního karbonového stativu bez středového sloupku (který bývá hlavním zdrojem torzních vibrací) a kvalitní kulové hlavy s nosností alespoň 10 až 15 kg.

7.2 Kompozice noční scény: Vedení linií a popředí v temnotě

Častou chybou začátečníků je namířit fotoaparát přímo nahoru do nebe a cvaknout samotnou Mléčnou dráhu. Výsledkem je sice hezká změť hvězd, ale obrazu chybí měřítko, příběh a prostorová hloubka.

Skvělá noční krajinářská fotografie stojí na **pevném, zajímavém a silném popředí**:

- **Siluety a linie:** Hledejte skály, kapličky, stromy tvarované větrem, zrcadlení hvězd na hladině horského jezera či klikatící se cesty, které divákovy oko přirozeně navedou od spodní hrany snímku vzhůru k zářícímu jádru Galaxie.
- **Pravidlo třetin v noci:** Umístěte horizont přibližně do spodní třetiny obrazu (pokud je dominantou dramatické nebe) nebo do horní třetiny (pokud máte fascinující popředí se zrcadlením).
- **Vertikální kompozice:** V jarních a časně letních měsících (duben až červen) se Mléčná dráha v našich zeměpisných šířkách klene nízko nad jižním obzorem v poloze ležícího oblouku (ideální pro panoramata). Na konci léta a na podzim (srpen až říjen) se naopak staví **téměř svisle** od jihu k zenitu – to je ideální chvíle pro dramatickou vertikální kompozici na výšku.

7.3 Plánování expozice: Aplikace PhotoPills a fáze Měsíce

Noční obloha je neustále v pohybu. Fotografování Mléčné dráhy nelze podniknout naslepo bez důkladné přípravy:

1. **Fáze Měsíce:** Galaktické jádro vyžaduje absolutní temnotu. Ideální období pro snímání začíná **několik dní po úplňku (v poslední čtvrti)**, kdy Měsíc vychází až v pozdních nočních hodinách, a trvá do **novoluní** a prvních dnů dorůstajícího srpku.
2. **Aplikace PhotoPills / Planit Pro:** Neocenitelní společníci moderního krajináře. Pomocí rozšířené reality (AR) namíříte telefon na krajinu ve dne a na displeji přímo vidíte, v kolik hodin a pod jakým úhlem se přesně nad danou skálou či stromem objeví jádro Mléčné dráhy.
3. **Předpověď počasí a oblačnosti:** Běžná předpověď v televizi nestačí; sledujte specializované modely vysoké, střední a nízké oblačnosti (Meteoblue, Windy, Ventusky). I tenká, okem sotva patrná vysoká cirrovitá oblačnost spolehlivě rozmaže hvězdy do mlžných kruhů.

7.4 Noční panoramata: Nodal point a skládání

Zorné pole běžného ultra-širokoúhlého objektivu (14 až 20 mm) nestačí k zachycení celého gigantického oblouku Mléčné dráhy klenoucího se přes 180° horizontu. Jediným řešením je **vícesnímkové noční panorama**.

Zásady úspěšného nočního panoramatu:

1. **Fotografujte na výšku (Portrait orientation):** Získáte mnohem větší vertikální úhel záběru pro popředí i zenit.
2. **Překryv snímků alespoň 35 až 50 %:** Hvězdy na okrajích pole trpí vinětací a zkreslením; software pro skládání (PTGui, Hugin) potřebuje velký překryv k nalezení identických

kontrolních bodů.

3. **Nodální bod (No-Parallax Point):** Pokud máte v popředí blízké skály či stromy (do vzdálenosti několika metrů), musíte fotoaparát otáčet kolem optického středu objektivu (vstupní pupily) pomocí panoramatické lišty, jinak v popředí vznikne paralaktická chyba a snímky nepůjdou beze švů spojit.
4. **Manuální expoziční zámek:** Manuální expoziční čas, clona, ISO i vyvážení bílé (White Balance – doporučeno pevně 3800 až 4200 K) musí být pro všechny dílčí snímky striktně identické!

7.5 Sledovaná noční krajina (Tracked Nightscape)

Chcete-li posunout kvalitu noční krajiny na profesionální galerijní úroveň, využijte techniku **sledované krajiny**:

1. Fotoaparát upevníte na lehký hvězdný tracker (Sky-Watcher Star Adventurer).
2. Oblohu exponujete se zapnutým trackerem: namísto krátkých 15 sekund můžete použít **expoziční 2 až 4 minuty při ISO 800 a cloně $f/2.8$** . Hvězdy zůstanou dokonale bodové, šum zmizí a v Mléčné dráze vystoupí sytě červené mlhoviny a jemná prachová vlákna. Pozemní krajina je samozřejmě na tomto snímku rozmazaná pohybem trackeru.
3. Vypnete tracker a bez pohnutí stativem pořídíte expozici popředí – buď dlouhou expozicí v temnotě (např. 4 minuty), nebo ještě lépe v závěru **modré hodinky (Blue Hour)** těsně po západu či před východem slunce, kdy má krajina přirozené měkké světlo a čisté barvy.
4. V programu Photoshop obě vrstvy spojíte pomocí přesné masky podél linie horizontu. Získáte dokonalou kombinaci: čistou, detailní pozemskou krajinu a hlubokou, nehnutou hvězdnou oblohu bez šumu.

Kapitola 8: Cirkumpolární startrails a noční časosběry (Timelapse)

Pohyb hvězd po noční obloze nemusíme pouze pracně kompenzovat a eliminovat montážemi. Můžeme jej naopak povýšit na ústřední umělecký a vizuální motiv!

Snímky cirkumpolárních hvězdných stop (**Startrails**) a noční časosběrná videa (**Timelapse**) zachycují plynutí kosmického času v fascinujících křivkách a hypnotickém tanci světél.

8.1 Fyzika cirkumpolárních stop: Kruhy kolem nebeského pólu

Každá hvězda na nebi opisuje kružnici kolem nebeského pólu. Pokud namíříte fotoaparát k severu (na severní polokouli), stane se středem kružnic **severní nebeský pól v těsné blízkosti Polárky**:

- Hvězdy, jejichž úhlová vzdálenost od pólu je menší než zeměpisná šířka pozorovacího stanoviště ($\theta \leq \phi$), nikdy nezapadají pod obzor – nazýváme je **cirkumpolárními hvězdami** (např. souhvězdí Velkého a Malého vozu, Kasiopėja).
- Pokud naopak namíříte objektiv na **východ nebo západ**, hvězdy opisují rovné, šikmé linie protínající horizont.
- A pokud namíříte k **jihu**, spatříte obří ploché oblouky klenoucí se nízko nad obzorem.

8.2 Expoziční strategie: Proč nejedna dlouhá expozice, ale stovky krátkých

V éře klasického filmu fotografové otevřeli mechanickou závěrku na dvě až tři hodiny v režimu Bulb. U moderních digitálních fotoaparátů je však jediná dvouhodinová expozice naprostým nesmyslem:

1. **Tepelný šum čipu:** Senzor bez chlazení se po několika minutách kontinuálního napájení zahřeje a snímek by byl znehodnocen masivním šumem a stovkami svítících barevných hot-pixelů.
2. **Přepálení pozadí světelným smogem:** I slabé světelné znečištění by za dvě hodiny zcela přepálilo histogram do čistě bílé plochy.
3. **Riziko zničení:** Pokud po hodině a půl projede kolem auto se zapnutými dálkovými světly nebo se v záběru objeví satelit, celý snímek by byl nevratně ztracen.

Správná digitální metoda: Sekvence expozic

Nastavte fotoaparát na sérii **stovek navazujících kratších expozic**:

- Expoziční čas: **20 až 30 sekund**.
- Clona: $f/2.8$ až $f/4$ (mírné zaclonění zlepší kresbu v rozích a zvýrazní barvy hvězd).
- Citlivost: **ISO 800 až 1600** (pro zachování dynamického rozsahu barev hvězd, aby se bíle nepřepálily).
- Prodleva mezi snímky: **Pouze 1 sekunda** (aby ve stopách hvězd nevznikly přerušované mezery).
- Celkový čas snímání: **2 až 4 hodiny** (pro dosažení působivých dlouhých oblouků).

8.3 Boj s nočním rosením optiky

Největším nepřítelem startrails a nočních časosběrů je **rosný bod**. V průběhu noci vyzařuje přední čočka objektivu teplo do chladného vesmíru a její teplota rychle klesne pod teplotu okolního vzduchu. Během několika minut se na skle vysráží neprostupná vrstva mikroskopických kapiček rosy – a zbytek noci je ztracen.

❗ DŮLEŽITÉ

Ochrana před rosením: Používejte **elektrické vyhřívací pásky (Dew Heaters)** s napájením z USB powerbanky. Pásek ovinutý kolem přední části objektivu dodává výkon pouhých **2 až 5 W**, což stačí k tomu, aby byla optika trvale udržována o 1 až 2 stupně nad rosným bodem. Rosnice (sluneční clona) navíc brání bočnímu větru a vyzařování tepla.

8.4 Skládání stop: Software StarStaX a techniky v Photoshopu

Ke složení stovek dílčích snímků do jediné výsledné fotografie slouží vynikající bezplatný software **StarStaX** (pro Windows i Mac):

1. **Režim Blending: Lighten (Zesvětlit):** Program porovnává každý pixel napříč všemi snímky a zachovává vždy nejjasnější hodnotu. Hvězdy se plynule spojí do nepřerušovaných kružnic, zatímco popředí zůstává nehybné.
2. **Efekt kometárního ocasu (Comet Mode):** StarStaX nabízí možnost plynulého zeslabování stop směrem do minulosti – hvězdy vypadají jako letící komety s jasnou hlavou a mizejícím závojem.
3. **Odstranění stop letadel:** Pokud vám oblohu prořála záblesková světla letadla, můžete daný snímek buď vyřadit, nebo v Photoshopu letadlo na dané vrstvě jednoduše vygumovat černým štětcem.

8.5 Noční časosběry (Timelapse) a technika „Holy Grail“

Když stejné stovky snímků namísto statického sloučení poskládáte do videa rychlostí 24 nebo 30 snímků za sekundu, získáte dechberoucí časosběrný film rotujícího vesmíru.

Holy Grail Timelapse (Svatý grál časosběru)

Nejvyšší metou časosběrné fotografie je **plynulý přechod z jasného dne přes zlatou a modrou hodinku západu slunce až do temné hluboké noci**. Obrovská výzva: Světelné podmínky scény se během dvou hodin změni o více než **15 až 18 expozičních stupňů (EV)**!

- Nemůžete nechat nastavení beze změny.
- Manuální otáčení kolečkem času a ISO během snímání způsobí na videu ošklivé skokové blikání (**flicker**).

Řešením je specializovaný software **LRTimelapse** ve spojení s fotoaparátem řízeným automatickým expozičním modulem (např. qDslrDashboard / Unleashed). Software plynule a neznatelně mění expoziční čas a ISO v zlomcích clonových čísel a matematicky vyhladí veškeré světelné přechody do dokonale plynulého, filmového zážitku.

8.6 Fotografování meteorických rojů

Při každoročních maximech bohatých rojů – zejména **Perseid** (kolem 12. srpna) a **Geminid** (kolem 14. prosince) – vstupují do zemské atmosféry prachová zrnka z komet a asteroidů rychlostí desítek kilometrů za sekundu a září jako „padající hvězdy“.

Taktika lovu meteorů:

- Použijte nejširší a nejsvětelnější objektiv, jaký máte (14 až 20 mm, $f/1.4$ až $f/2.8$).
- Nastavte kontinuální snímání s expozicemi 15 až 25 sekund po celou noc.
- Meteory vylétají z jediného zdánlivého bodu na nebi – **radiantu**. Nemiřte přímo do radiantu; nejdelší a nejjasnější stopy meteorů létají ve vzdálenosti 30° až 60° od něj!
- Ve finálním zpracování vyberte všechny snímky, na kterých byl zachycen jasný meteor, zarovnejte hvězdné pozadí na jednu referenční expozici a meteory maskou vložte do jediného velkolepého kompozitního obrazu.

Kapitola 9: Polární záře, noční oblaka a atmosférické jevy

Zemská atmosféra není pouhým pasivním optickým filtrem, který nám zhoršuje seeing a pohlcuje světlo. Je to dynamický, živý fyzikální systém plný fascinujících optických a elektromagnetických jevů.

Pro astrofotografa představují tyto jevy mimořádnou příležitost zachytit prchavé okamžiky kosmického počasí a interakce naší planety s okolním vesmírem.

9.1 Polární záře (Aurora Borealis / Australis)

Polární záře jsou jedním z nejúchvatnějších přírodních divadel na Zemi. Jejich prapůvod leží 150 milionů kilometrů daleko – v dynamických procesech na povrchu našeho Slunce.

Fyzikální mechanismus vzniku

1. Sluneční erupce nebo výron koronální hmoty (CME) vymrští do meziplanetárního prostoru mračno vysoce energetických nabitých částic (elektronů a protonů) slunečního větru.
2. Když toto plazma po dvou až třech dnech dorazí k Zemi a jeho magnetické pole má jižní orientaci ($B_z < 0$), propojí se se zemským dipólovým magnetickým polem (magnetosférou).
3. Částice jsou magnetickými siločarami urychleny do polárních oblastí, kde ve výškách **80 až 500 kilometrů** narážejí do atomů a molekul horních vrstev atmosféry: * **Zelená emise** (557,7 nm): Excitace atomárního kyslíku ve výškách 100 až 250 km (nejčastější a lidským okem nejlépe vnímatelná barva). * **Červená emise** (630,0 nm a 636,4 nm): Excitace kyslíku ve velkých výškách (nad 250 až 400 km). Při silných geomagnetických bouřích je tato červená záře viditelná i z území České republiky a Slovenska nízko nad severním obzorem! * **Fialová a purpurová emise**: Ionizace molekulárního dusíku (N_2^+) na spodním okraji záclon ve výškách kolem 80 až 100 km.

Sledování aktivity a index Kp

Úroveň geomagnetické bouře měří globální **index Kp** (stupnice 0 až 9):

- V polárních oblastech (Norsko, Island) stačí pro bohaté záře $Kp = 2$ až 3 .
- Ve střední Evropě (zeměpisná šířka $\approx 50^\circ$ N) je polární záře fotograficky zachytitelná při $Kp \geq 6$ a pro silné vizuální záře pouhým okem je zapotřebí silná geomagnetická bouře s

$Kp \geq 7$ až 8 (jako při historické bouři v květnu 2024). Sledujte weby NOAA Space Weather Prediction Center a specializované mobilní aplikace (Aurora Alerts).

Fotografická strategie:

- **Rychlost expozice je klíčová:** Záclony polární záře se rychle vlní a tančí. Příliš dlouhá expozice (nad 6 až 8 sekund) rozmaže jemné paprsky a vertikální sloupy do beztvaré zelené či červené kaše!
- Nastavte světelný objektiv na plnou díru ($f/1.4$ až $f/2$), zkratke čas na 1 až 4 sekundy a zvýšte citlivost na **ISO 3200 až 6400**.

9.2 Noční svítící oblaka (NLC – Noctilucent Clouds)

Noční svítící oblaka jsou nejvyššími mraky na naší planetě. Zatímco běžné dešťové mraky (troposférické) leží ve výškách do 12 km, NLC se vznášejí v mrazivé **mezosféře ve výšce 80 až 85 kilometrů** – na samé hranici vesmíru, kde teplota klesá k minus 130 stupňům Celsia.

Jsou tvořena mikroskopickými krystalky vodního ledu nabalenými na prachové částice z shořelých meteorů.

Kdy a jak NLC pozorovat:

- Objevují se výhradně v letních měsících (v ČR a SR od konce května do konce července) v zeměpisných šířkách mezi 50° a 65° .
- Pozorují se na severním obzoru **kolem půlnoci**, když je Slunce pod obzorem v hloubce 6° až 16° . V této geometrii je pozemská krajina a nízká atmosféra ponořena v temném stínu Země, ale paprsky Slunce zpoza horizontu stále osvětlují vysokou mezosféru!
- Na fotografiích mají NLC nezaměnitelnou **stříbřitě modrou, perleťovou či elektricky tyrkysovou barvu** s jemnou vláknitou strukturou vln, vírů a hřebenů.
- **Expozice:** Obvykle stačí nižší citlivost (ISO 200 až 800) a expoziční časy 1 až 4 sekundy při cloně $f/2.8$ až $f/4$.

9.3 Zodiakální světlo a protisvit (Gegenschein)

V dokonale temných oblastech (Bortle 1 až 2) můžete spatřit tajemný světelný kužel vystupující z obzoru podél ekliptiky – **zodiakální světlo**.

Není to atmosférický jev; díváte se do meziplanetárního prostoru! Zodiakální světlo vzniká rozptylem slunečního záření na miliardách mikroskopických prachových zrněk rozestých v rovině sluneční soustavy, která pocházejí z rozpadajících se komet a srážek asteroidů.

- Na jaře je nejlépe viditelné na západě po západu slunce, na podzim na východě před úsvitem.
- V bodě ležícím přesně naproti Slunci (180° od Slunce) dochází k jevu zpětného rozptylu – vzniká extrémně slabá, difúzní oválná záře zvaná **protisvit (Gegenschein)**. Její zachycení na fotografii je důkazem excelentní temnoty vaší oblohy.

9.4 Vzdušné záření (Airglow)

Když na širokouhlém nočním snímku s vysokou citlivostí pohlédnete na obzor, často si všimnete, že obloha není černá, ale září jemnými smaragdově zelenými, žlutými či vínově červenými pruhy a vlnami připomínajícími mořskou hladinu. To je **Airglow (přirozené záření atmosféry)**.

Vzniká chemiluminiscencí – chemickými reakcemi v horních vrstvách atmosféry (ve výškách 90 až 300 km), kde molekuly kyslíku a hydroxylové radikály (OH^-), excitované přes den slunečním ultrafialovým zářením, v noci pomalu rekombinují a vyzařují fotony. Atmosférické gravitační vlny v ovzduší toto záření modulují do překrásných vlnových vzorů, které dodávají nočním krajinářským fotografiím nezaměnitelnou plasticitu.

Část IV: Sluneční soustava – Planety, Měsíc a Slunce

Fotografování těles naší vlastní sluneční soustavy představuje ve srovnání s deep-sky astrofotografií naprosto odlišný svět. Zatímco u vzdálených mlhovin a galaxií bojujeme s nedostatkem světla a provádíme mnohaminutové expozice s chlazenými senzory, planety a Měsíc naopak září oslnivým jasem.

Jejich největším nepřítelem není šum senzoru, ale **zemská atmosféra**.

Vzduch nad námi není homogenní; neustále se v něm mísí teplé a studené vrstvy vzduchu různé hustoty, což způsobuje divoké vlnění obrazu – jev, kterému astronomové říkají **seeing**. Při dlouhé expozici se jemné detaily Jupiterových pásů nebo kráterů na Měsíci spolehlivě rozmažou do neostrého kotoučku.

V této čtvrté části knihy si osvojíme technologii, která umožnila amatérským astronomům pořádit z pozemských dvorů a zahrad snímky, které svou ostrostí konkurují fotografiím z Hubbleova teleskopu:

- Zvládneme revoluční metodu **vysokorychlostního snímání (Lucky Imaging)**: snímání nekomprimovaného bezeztrátového videa v surovém formátu SER rychlostí stovek snímků za sekundu.
- Vypočítáme optimální vzorkování pro planety pomocí Barlowových čoček ($5 \times \text{velikost pixelu}$) a seznámíme se s atmosférickým disperzním korektorem (ADC), který eliminuje barevné rozštěpení způsobené lomem světla v atmosféře.
- Prozkoumáme fotografování Měsíce, derotaci snímků rychle rotujícího Jupitera v programu WinJUPOS, prstence Saturnu a polární čepičky Marsu.
- A položíme důraz na bezpečné a fascinující fotografování naší nejbližší hvězdy – Slunce: v bílém fotosférickém světle s Herschelovým hranolem i v úzké chromosférické čáře vodíku $H\alpha$ odhalující gigantické protuberance a sluneční erupce.

Kapitola 10: Metoda Lucky Imaging a vysokorychlostní snímání

Když se podíváte do okuláru velkého dalekohledu namířeného na Jupiter nebo Saturn při velkém zvětšení, spatříte obraz, který vypadá, jako by ležel na dně dívoce tekoucí řeky. Kotouček planety pulzuje, chvěje se, ztrácí ostrost a na zlomky vteřin se znovu zaostří. Tento optický jev nazýváme **atmosférickým seeingem**.

Pokud byste na planetu namířili fotoaparát a exponovali jedinou půlsekundovou expozicí, integrovali byste veškeré toto chvění dohromady – výsledkem by byl rozmazaný kotouček bez jediného detailu.

Řešením, které na přelomu 20. a 21. století způsobilo naprostou revoluci v planetární astronomii, je **metoda Lucky Imaging (šťastné snímkování)**.

10.1 Princip metody Lucky Imaging

Atmosférická turbulence má statistický charakter. Mezi chaotickými víry teplého a studeného vzduchu se tu a tam na nepatrný zlomek času – typicky **5 až 20 milisekund** – vytvoří stabilní vzduchová čočka, kdy je sloupec atmosféry nad dalekohledem dokonale klidný.

Princip Lucky Imaging spočívá v následujícím:

1. Pomocí vysokorychlostní digitální kamery zaznamenáme **video s tisíci snímky (typicky 5 000 až 20 000 snímků)** s extrémně krátkými expozičními časy (např. 2 až 15 milisekund na snímek).
2. Tímto bleskovým časem doslova „zmrazíme“ atmosférickou turbulenci v každém jednotlivém framu.
3. Specializovaný software (např. **AutoStakkert!**) následně analyzuje všech 10 000 snímků, matematicky změří jejich ostrost a vybere **pouze ta nejostřejší „šťastná“ procenta (např. 5 až 15 % nejlepších snímků)**.
4. Tyto nejostřejší snímky jsou zarovnány na sub-pixelové úrovni pomocí stovek referenčních bodů (Alignment Points – AP) a složeny dohromady.
5. Výsledný složený obraz má dramaticky redukováný šum, což umožní v dalším kroku pomocí matematických vlnkových transformací (waveletů v Registaxu či Astra Image) vytáhnout neuvěřitelně jemné, ostré mikroskopické detaily!

10.2 Planetární kamery a vysokorychlostní rozhraní USB 3.0

Planetární kamera se zásadně liší od deep-sky chlazené kamery:

- **Nepotřebuje aktivní Peltierovo chlazení:** Expozice trvají milisekundy, takže temný proud je zanedbatelný.
- **Malé pixely:** Typicky 2,0 až 2,9 μm (např. senzory Sony IMX585, IMX678, IMX662), které umožňují dosáhnout vysokého zvětšení i bez extrémně dlouhých optických nástavců.
- **Vysoká snímková frekvence (FPS – Frames Per Second):** Přenos dat přes rychlé rozhraní **USB 3.0**. Při zmenšení snímaného výřezu (Region of Interest – ROI) na velikost např. 640×480 px dokáže kamera chrlit **150 až 300 snímků za sekundu!** ***Globální vs. Rolling shutter:** Většina moderních CMOS kamer využívá rychlou elektronickou závěrku Rolling shutter*, která je pro vysoké snímkové frekvence plně postačující.*

10.3 Formát videa SER versus komprimované AVI

Zásadní pravidlo planetární astrofotografie: **Nikdy nenahrávejte video ve formátu MP4, MOV nebo komprimovaném AVI!** Kompresní algoritmy (H.264, H.265) fungují tak, že zprůměrují jemné změny jasu mezi sousedními pixely a zahodí vysoké prostorové frekvence – tím nenávratně zničí právě ty mikroskopické planetární detaily, kvůli kterým u dalekohledu stojíte.

Standardem v planetární astronomii je surový formát **SER**:

- Ukládá každý jednotlivý snímek jako **čistá nekomprimovaná surová data (RAW)** přímo z analogově-digitálního převodníku čipu.
- Podporuje 8-bitový i 16-bitový záznam a přesný časový otisk (timestamp) pro každý frame.
- K záznamu se používá specializovaný software **FireCapture** nebo **SharpCap**.

10.4 Barlowovy čočky a optimální vzorkování pro planety

V planetární fotografii neplatí Nyquistovo vzorkování pro seeing, protože seeing bleskovými expozicemi obcházíme! Limitujícím faktorem rozlišení je zde **difrakční mez samotného objektivu (Airyho disk)**:

$$\theta_{\text{Airy}} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Aby byl Airyho disk planety optimálně vzorkován na pixelech senzoru, platí v planetární astrofotografii známé **pravidlo 5 $\times$** :

$$\text{Optimální světelnost soustavy: } N_{\text{opt}} \approx 5 \times p [\mu\text{m}]$$

Kde p je fyzická velikost pixelu vaší kamery v mikrometrech.

Řešený příklad výpočtu optimálního f -ratio: Máte kameru se senzorem s velikostí pixelu $p = 2,9 \mu\text{m}$ (např. populární ZWO ASI462MC):

$$N_{\text{opt}} = 5 \times 2,9 = 14,5 \approx f/15$$

- Máte-li dalekohled Schmidt-Cassegrain s nativní světelností $f/10$, stačí vám kvalitní $1,5\times$ **Barlowova čočka** k dosažení optimálního $f/15$.
- Máte-li zrcadlový Newton se světelností $f/5$, potřebujete $3\times$ **telecentrickou Barlowovu čočku** k dosažení $f/15$. Použití silnější Barlowovy čočky (např. $5\times$) by vedlo k prázdnému převzorkování: obraz planety by byl příliš tmavý, expoziční čas by musel vzrůst, klesla by snímková frekvence (FPS) a seeing by obraz rozmazal bez zisku jakýchkoliv nových detailů.

10.5 Atmosférická disperze a korektor ADC

Když světlo planety vstupuje šikmo do zemské atmosféry, vzduch funguje jako obří **optický hranol**. Modré světlo se láme pod větším úhlem než světlo červené. Tento jev se nazývá **atmosférická disperze**.

Pokud planeta neleží přímo v zenitu, ale nachází se nízko nad obzorem (což je v našich zeměpisných šířkách častý případ Marsu či Saturnu ve výškách pod 30° nad horizontem), disperze způsobí, že kotouček planety má **nahoře modrý a dole červený lem**. To zásadně degraduje rozlišení i v černobílé fotografii.

Atmosférický disperzní korektor (ADC – Atmospheric Dispersion Corrector)

ADC je malý optický prvek zařazený před kameru. Obsahuje **dva proti sobě se otáčející klínové hranoly**. Pohybem dvou páček nastavíte lámavý účinek hranolů přesně tak, aby vytvořily stejnou disperzi jako atmosféra, ale v **opačném směru**! Barevný posun se dokonale vyruší, červená a modrá složka splynou v jeden bod a obraz planety získá zpět svou krystalickou ostrost.

Kapitola 11: Fotografování Měsíce a planetárních detailů

Náš nejbližší nebeský souputník – Měsíc – a plynní obři naší sluneční soustavy představují pro planetárního fotografa nevyčerpatelnou studnici motivů. Každá noc přináší jiné nasvícení, jiné geometrické konfigurace měsíců a proměnlivé atmosférické víry.

V této kapitole si ukážeme, jak z techniky Lucky Imaging vytěžit maximum při snímání Měsíce, Jupitera, Saturnu a terestrických planet.



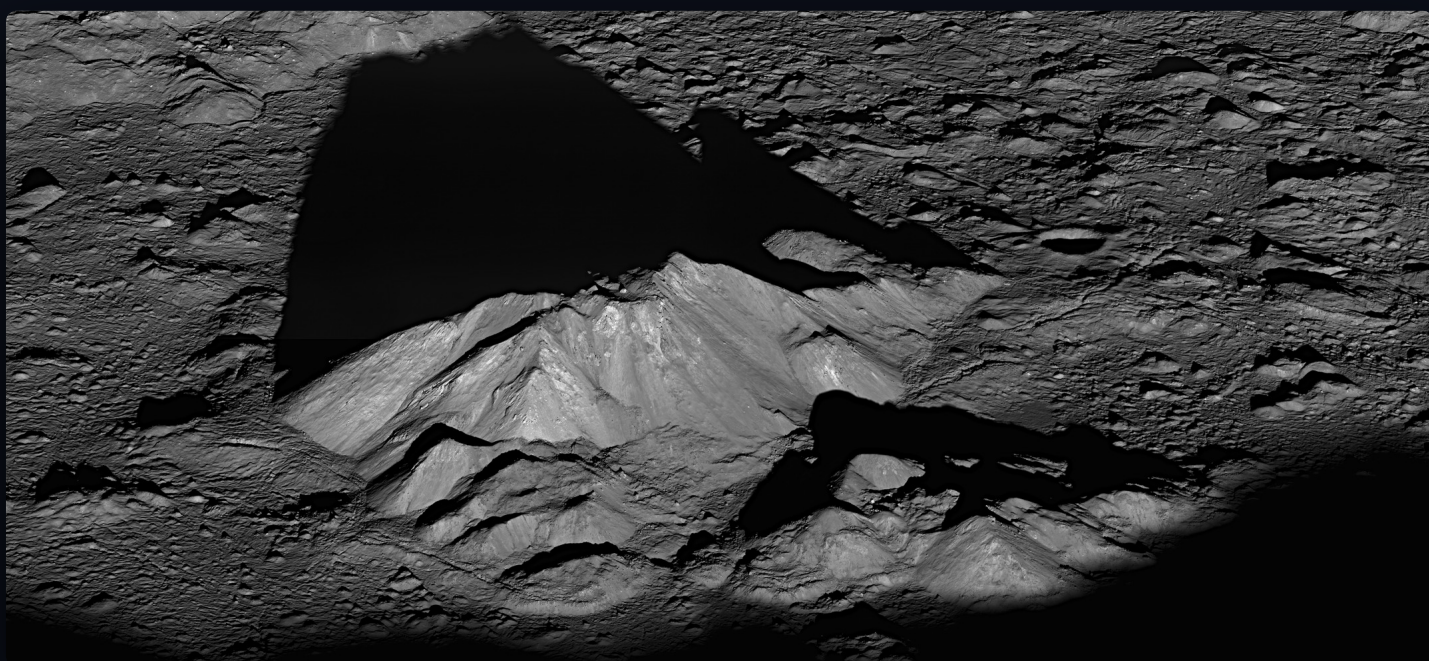
Planetární portrét Jupitera v opozici – Velká rudá skvrna, turbulentní pásy a vířící bouře v atmosféře největšího plynného obra naší sluneční soustavy (NASA / ESA / Hubble)

11.1 Měsíc v detailu: Hra stínů na terminátoru a gigantické mozaiky

Mnoho laiků se domnívá, že nejlepším časem pro fotografování Měsíce je úplněk. Opak je pravdou. Během úplňku dopadá sluneční světlo na povrch Měsíce kolmo shora; nevznikají žádné stíny a lunární povrch vypadá plochý, slitý a nevýrazný.

Nejúchvatnější snímky pořídíte podél **terminátoru** – rozhraní mezi měsíčním dnem a nocí. Zde dopadají sluneční paprsky pod extrémně nízkým, tečným úhlem:

- Valy impaktních kráterů vrhají kilometry dlouhé inkoustově černé stíny přes pláně lávových moří.
- Centrální vrcholky velkých kráterů (jako jsou Tycho, Koperník či Theophilus) vystupují jako zářící jehly z temnoty. *Vyniknou jemné zlomové linie, lunární brázdy (rimae*) a lávové dómy.*



Centrální vrcholek impaktního kráteru Tycho na Měsíci – dramatické stíny a balvany o velikosti domů zachycené sondou Lunar Reconnaissance Orbiter (NASA / GSFC / Arizona State Univ.)

Tvorba lunárních mozaik:

Protože snímače planetárních kamer mají malé rozměry, pokrývají při dlouhém ohnisku dalekohledu (např. 2000 až 3000 mm) pouze malý výřez Měsíce. K zachycení celého disku se snímá **vícesnímková mozaika**:

1. Postupně nasnímate 10 až 30 videozáznamů jednotlivých sektorů s překryvem alespoň 20 %.
2. Každé video složíte a doostříte v AutoStakkertu a Registaxu.
3. Výsledné dílčí TIF panely spojíte dohromady v programu **Microsoft ICE (Image Composite Editor)** nebo Photoshopu. Získáte gigantický obraz o rozlišení desítek megapixelů, na němž lze rozeznat krátery o průměru pod jeden kilometr!

11.2 Jupiter: Velká rudá skvrna a limit rotace planety

Jupiter je králem planetární astrofotografie. Jeho dynamická atmosféra tvořená vodíkem a heliem s mraky z amoniaku a sirovodíku je plná pestrobarevných pásů (rovníkové pásy NEB a SEB), bílých oválů a především gigantické anticyklóny – **Velké rudé skvrny (GRS)**, do níž by se celá planeta Země vešla více než jednou.

Zrádná past: Rychlá rotace planety

Jupiter je nejrychleji rotující planetou sluneční soustavy. Kolem své osy se otočí za neuvěřitelných **9 hodin a 55 minut!** Obvodová rychlost na rovníku dosahuje téměř 45 000 km/h. To znamená tvrdý fyzikální limit pro délku videozáznamu:

DŮLEŽITÉ

Maximální čas záznamu Jupitera: Při ohnisku nad 2000 mm nesmí délka jednoho videozáznamu překročit **90 až 120 sekund!** Po dvou minutách se planeta pootočí natolik, že rotace sama o sobě rozmáže jemné detaily mraků.

Kouzlo programu WinJUPOS: Derotace obrazu

Pokud chcete dramaticky snížit šum, potřebujete složit data ne ze dvou minut, ale z deseti až patnácti minut snímání. Zde přichází na řadu geniální software **WinJUPOS**:

1. Pořídíte sérii 5 navazujících dvouminutových videí.
2. Každé video složíte v AutoStakkertu na referenční TIF snímek.
3. Ve WinJUPOSu na každý snímek napasujete přesnou geometrickou elipsu planety a zadáte přesný čas.

4. WinJUPOS na základě přesného matematického modelu rotace **derotuje povrchové mapy planety na jeden společný časový okamžik** a složí je dohromady! Získáte křišťálově čistý obraz s obrovským odstupem signálu od šumu.
-

11.3 Saturn a jeho prstence

Saturn je bezesporu vizuálně nejelegantnějším objektem naší oblohy. Jeho systém prstenců složený z miliard ledových úlomků o tloušťce pouhých desítek metrů obíhá planetu ve vzdálenosti desítek tisíc kilometrů.



Majestátní plynný obr Saturn se svými prstenci v přirozených barvách – zřetelné Cassiniho dělení a atmosférické pásy (NASA / JPL / Space Science Institute)

Klíčové cíle při snímání Saturnu:

- **Cassiniho dělení:** Hlavní tmavá mezera o šířce 4 800 km oddělující vnější prstenec A od vnitřního prstence B. Její ostrost je hlavním testem kvality vašeho seeingu a kolimace.
- **Prstenec C (Krepový prstenec):** Poloprůsvitný tmavý vnitřní prstenec těsně nad povrchem planety.
- **Severní polární hexagon:** Obří šestihranný proudící atmosférický vír na severním pólu planety.
- **Měsíce Saturnu:** Titan, Rhea, Dione a Tethys.

Protože je Saturn dále od Slunce než Jupiter, odráží méně světla. Budete muset použít delší expoziční časy (typicky 15 až 30 ms) a vyšší Gain, což klade vyšší nároky na počet nasnímaných snímků (vhodné nahrávat videa o délce 3 až 4 minuty).

11.4 Mars a jeho polární čepičky

Mars je nejobtížnější z velkých planet kvůli svým malým rozměrům. Většinu času je jeho zdánlivý úhlový průměr na obloze menší než 6". Pouze v období **opozice se Sluncem** (která nastává jednou za přibližně 26 měsíců) se k Zemi přiblíží a jeho kotouček naroste na 15" až 25".

Při příznivém seeingu můžete zachytit:

- Zářivě bílé **polární čepičky** tvořené zmrzlým oxidem uhličitým a vodním ledem, které v průběhu marsovského jara tají a zmenšují se.
- Tmavé albedové útvary (planina Syrtis Major, Sinus Sabaeus), které v 19. století vedly Schiaparelliho k mylné domněnce o existenci marsovských „kanálů“.
- Bílé ranní mraky a orografickou oblačnost nad obřími sopkami Olympus Mons a Tharsis Montes.

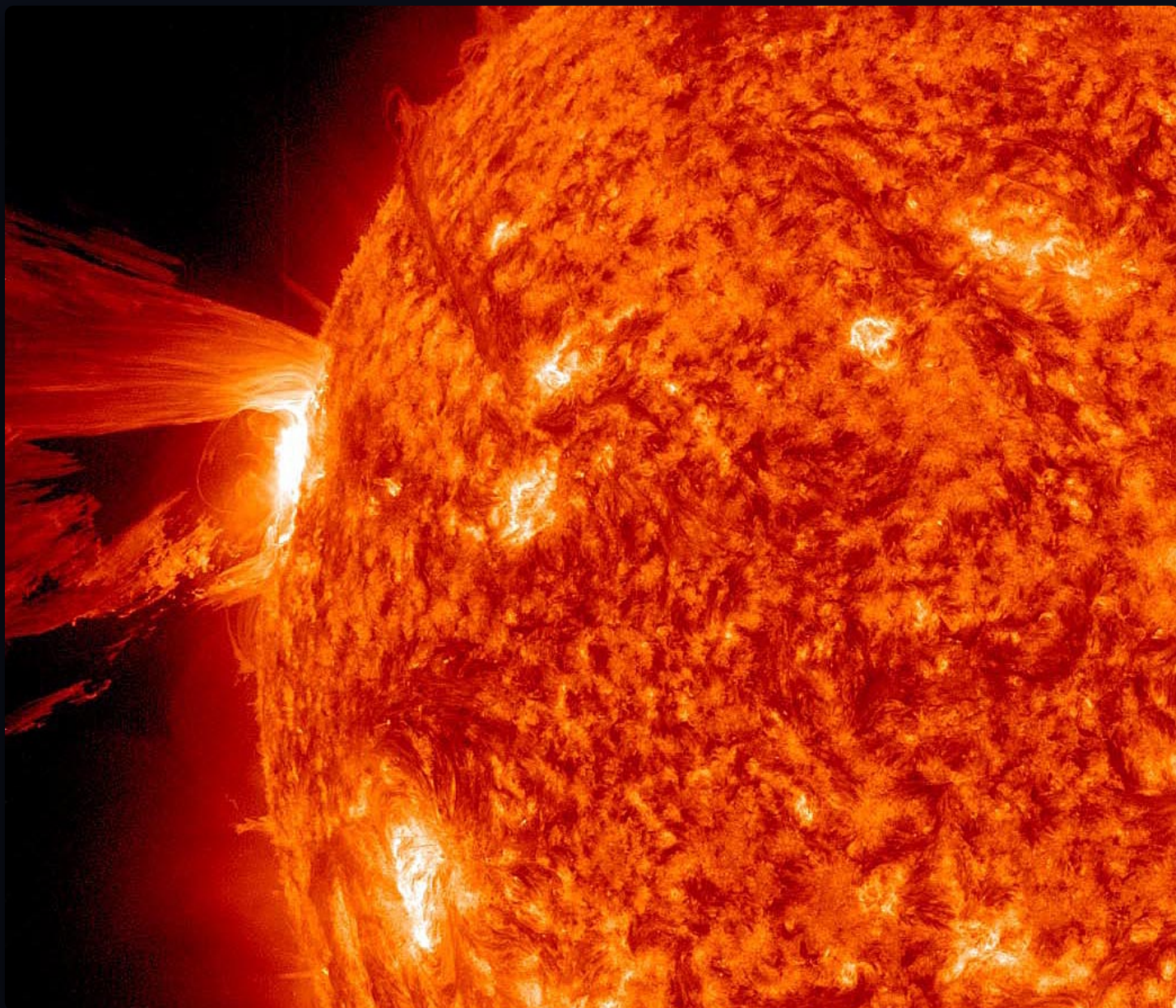
11.5 Venuše v ultrafialovém spektru

Venuše je zahalena do neprostupné vrstvy mraků z kyseliny sírové. Ve viditelném světle spatříte v dalekohledu pouze oslnivě bílý, beztvárý srpek připomínající zmenšený Měsíc. Pokud však před monochromatickou kameru zařadíte specializovaný **ultrafialový filtr (UV-pass kolem 350 až 380 nm)**, stane se zázrak: v atmosféře Venuše vystoupí dramatické tmavé struktury mraků ve tvaru písmene „Y“, poháněné superrotací atmosféry rychlostí přes 360 km/h!

Kapitola 12: Naše nejbližší hvězda: Bezpečné fotografování Slunce

Slunce je jediná hvězda ve vesmíru, kterou můžeme zkoumat a fotografovat s neuvěřitelným prostorovým detailem. Zatímco všechny ostatní hvězdy na noční obloze zůstávají pouhými bezrozměrnými body, na povrchu naší mateřské hvězdy se odehrává divoký termonukleární a magnetohydrodynamický tanec o rozměrech desítek tisíc kilometrů.

Slunce je však zároveň tím nejnebezpečnějším objektem na obloze. Každý krok v solární astrofotografii musí začínat absolutním respektem k bezpečnosti zraku i přístrojů.



Gigantická erupce a oblouk žhavého plazmatu v chromosféře Slunce zachycený ve vlnové délce extrémního ultrafialového záření družicí Solar Dynamics Observatory (NASA / SDO)

12.1 Zásady bezpečnosti: Proč pohled do Slunce znamená okamžité oslepnutí

Dalekohled funguje jako obří soustředná lupa. Koncentruje veškerou energii dopadajícího slunečního záření do nepatrného ohniskového bodu:

- V ohnisku dalekohledu o průměru 100 mm dosahuje teplota stovek stupňů Celsia.
- Papír či dřevo vložené do ohniska okamžitě vzplanou plamenem během jediné vteřiny.
- **Přímý pohled do nechráněného okuláru způsobí nevratné vypálení sítnice za zlomek sekundy! Sítnice nemá žádné receptory bolesti; člověk neucítí nic, ale v zorném poli mu zůstane trvalá černá slepá skvrna.**
- Stejně tak nechráněný sluneční paprsek okamžitě roztaví vnitřní lamely závěrky fotoaparátu a spálí křemíkový čip kamery.

UPOZORNĚNÍ

Základní bezpečnostní pravidla solární astrofotografie: 1. Sluneční filtr **MUSÍ** být **VŽDY** upevněn **PEVNĚ NA PŘEDNÍM VSTUPNÍM OTVORU (objektivu) dalekohledu!** 2. Nikdy nepoužívejte staré malé šroubovací „sluneční filtry na okulár“ z levných dětských dalekohledů – v koncentrovaném žáru prasknou! 3. Optický hledáček na tubusu dalekohledu buď předem odmontujte, nebo jej pevně a bezpečně zakryjte neprůhlednou krytkou!

12.2 Fotosféra v bílém světle: Sluneční skvrny a granulace

Fotosféra je viditelný „povrch“ Slunce – plynná vrstva o tloušťce pouhých cca 400 km a teplotě kolem 5 780 K.

K jejímu fotografování se využívají dvě metody:

1. Sluneční fólie Baader AstroSolar Safety Film

Speciální metalizovaná fólie, která se nasazuje před objektiv v pevném rámečku.

- Pro vizuální pozorování i fotografii se používá verze s optickou hustotou **ND 5.0 (propouští pouze 1/100 000 světla, tedy 0,001 %)**.
- Pro pokročilou vysokorychlostní digitální fotografii s úzkými filtry existuje verze **ND 3.8 (propouští 1/6 300 světla)**, která umožňuje zkrátit expoziční časy na zlomky milisekund.
- Poskytuje přirozený, neutrálně bílý obraz Slunce.

2. Herschelův hranol (Herschel Wedge)

Optický hranol zařazený za refraktor (čočkový dalekohled). Využívá zákon lomu skla: **95,4 % slunečního světla a tepla projde hranolem přímo ven do keramického lapače tepla na zadní straně**, a pouze zbývajících 4,6 % odraženého světla putuje přes doplňkový ND filtr do kamery.

- Nabízí bezkonkurenční kontrast a ostrost detailů, nepřekonatelnou jakoukoliv fólií.
- **POZOR:** Lze použít výhradně s refraktory! V zrcadlovém Newtonu či SCT by nefiltrovaný žár v tubusu rozlepil sekundární zrcátko.

Co na fotosféře spatříte:

- **Sluneční skvrny:** Oblasti se silným magnetickým polem, které potlačuje proudění horkého plazmatu z nitra. Jsou chladnější (kolem 4 000 K) než okolí, a proto se jeví jako tmavá umbra obklopená světlejší penumbrou.
- **Sluneční granule:** Vroucí buňky vystupujícího horkého plazmatu o průměru kolem 1 000 km pokrývající celý povrch Slunce jako zrnka rýže.
- **Fakule:** Zářivá jasná magnetická pole, nejlépe patrná u okrajů slunečního disku v důsledku okrajového ztemnění.

12.3 Chromosféra v čáře $H\alpha$: Svět protuberancí a erupcí

Nad fotosférou leží tenká, dynamická vrstva atmosféry zvaná **chromosféra**. V bílém světle je neviditelná, protože fotosféra pod ní je milionkrát jasnější.

Pokud však Slunce pozorujeme přes specializovaný chromosférický dalekohled (např. **Coronado SolarMax**, **Lunt Solar Systems**), otevře se před námi zcela jiný, mimozemský svět. Srdcem takového dalekohledu je **Fabry-Pérotův etalon** – optický rezonátor tvořený dvěma dokonale rovnoběžnými polopropustnými křemennými deskami oddělenými vakuem či vzduchovou mezerou.

Etalon má šířku pásma neuvěřitelných **pod 0,7 až 0,5 Ångströmu (0,07 až 0,05 nm)** soustředěnou přesně na čáru vodíku $H\alpha$ (656,28 nm)!

Fascinující úkazy v chromosféře:

1. **Protuberance (Prominences):** Gigantické oblouky zářícího horkého plazmatu drženého magnetickými siločarami vysoko nad okrajem slunečního kotouče. Často dosahují výšky desítek až stovek tisíc kilometrů (mnohonásobek průměru Země!).
2. **Filamenty:** Protuberance promítnuté proti zářícímu slunečnímu disku – jeví se jako temné, klikatící se hadi chladnějšího plynu.
3. **Sluneční erupce (Flares):** Náhlá explozivní přepojení magnetických polí, která na několik minut rozzáří chromosféru oslnivým zábleskem energie odpovídající milionům vodíkových

bomb současně.

4. **Spikule:** Miliardy štíhlých plazmatických jehlic vystřelujících z chromosféry rychlostí přes 20 km/s, které lemují okraj Slunce jako hořící trávník.
-

12.4 Sluneční časosběry: Dynamika plazmatu v čase

Slunce je jediným objektem na nebi, na němž můžete sledovat dramatické prostorové změny **v reálném čase během několika desítek minut!**

Složením série snímků pořízených v intervalech 15 až 30 sekund po dobu dvou hodin vytvoříte fascinující časosběrný film: spatříte, jak se gigantické oblouky plazmatu pomalu zvedají, víří v magnetických spirálách a následně padají zpět k povrchu v podobě takzvaného koronálního deště.

Část V: Hluboký vesmír (Deep–Sky Astrofotografie)

Vstupujeme do královské disciplíny moderní astrofotografie. **Deep–sky astrofotografie (DSO)** míří za hranice naší sluneční soustavy do nepředstavitelných propastí mezihvězdného a mezigalaktického prostoru.

Zde již nefotografujeme světlo planet odražené od Slunce. Zde zaznamenáváme fotony, které opustily explodující supernovy, hvězdné školky mladých hvězdokup a rotující víry miliard hvězd ve vzdálených ostrovních vesmírech před tisíci, miliony či desítkami milionů let.

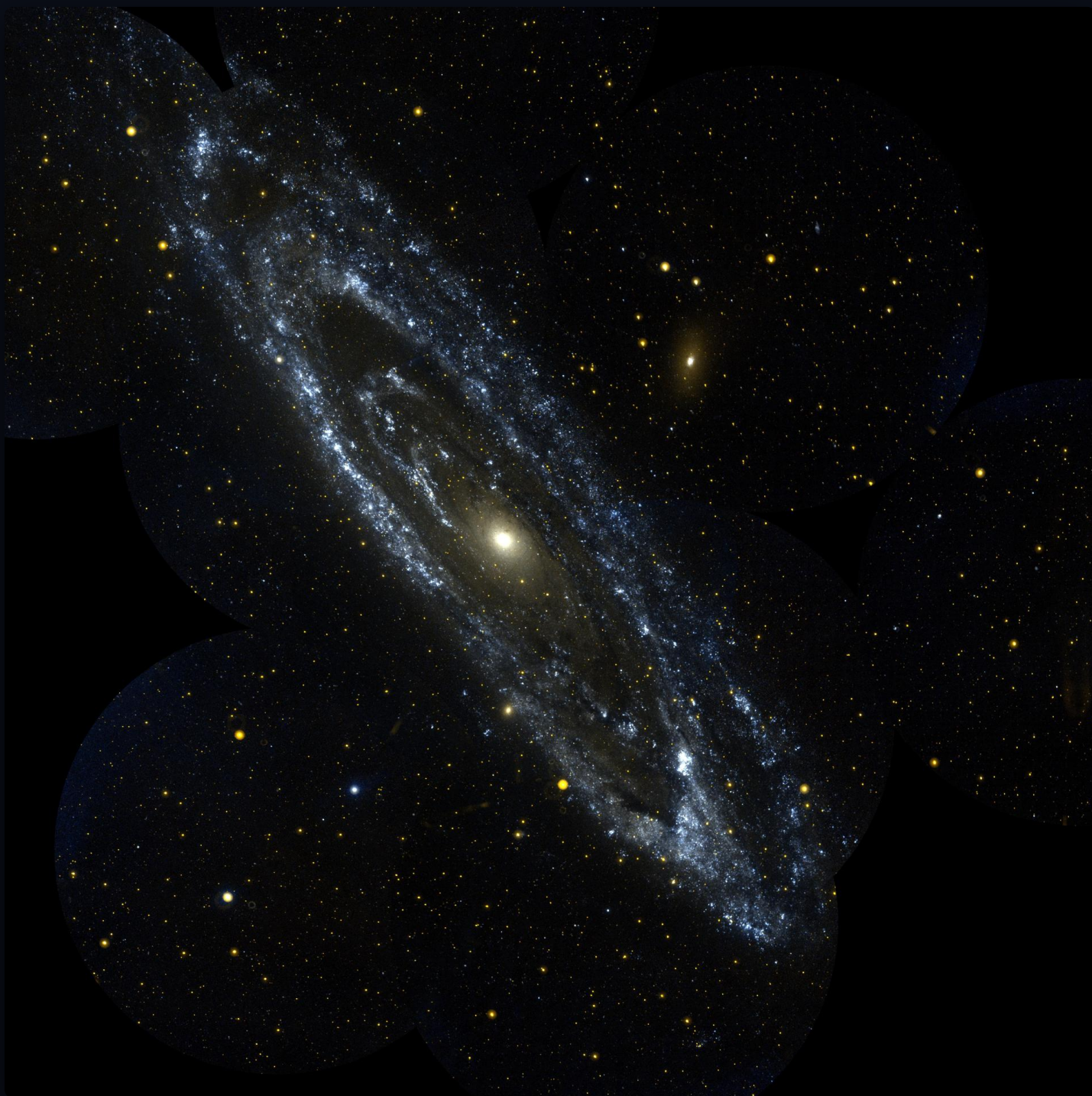
Tato část knihy je věnována umění a vědě sběru čistých fotonových dat: *Naučíme se matematicky stanovit optimální délku dílčí sub–expozice tak, aby přirozený šum pozadí oblohy bezpečně přebil vyčítací šum kamery (swamping read noise*)*.

- Pochopíme fundamentální zákon kumulativního integračního času: proč 10 hodin dat znamená propastný skok v kvalitě oproti jedné hodině ($S/N \propto \sqrt{N}$).
- Pronikneme do tajemství kalibračních snímků: Dark frames, Bias/Dark–Flats a Flat frames – proč je kalibrační rovnice $(\text{Light} - \text{Dark})/(\text{Flat} - \text{Bias})$ absolutní podmínkou pro získání čistého signálu.
- A seznámíme se s moderními automatizačními platformami N.I.N.A., ZWO ASI AIR a KStars/Ekos, které umožňují celou fotografickou noc řídit plně roboticky z tepla obývacího pokoje včetně automatického přeastřování, plate solvingu, meridiánového obratu a parkování při dešti.

Kapitola 13: Plánování, expozice a sběr dat (Sub-expozice)

Základem každé skvělé astrofotografie je trpělivost. Zatímco denní fotografie trvá tisícinu sekundy, deep-sky astrofotografie je maratónem. Špičkový snímek vzdálené galaxie či mlhoviny nevzniká jednorázovým stiskem spouště; skládá se ze stovek dílčích expozic zvaných **sub-expozice (Light frames)**, které dohromady tvoří kumulativní integrační čas desítek hodin.

Jak však určit, jak dlouho má trvat jedna jediná sub-expozice? Máme snímat 60sekundové expozice, 300sekundové, nebo 1200sekundové?



Gigantická spirální galaxie v Andromedě (Messier 31) se svými satelitními galaxiemi M32 a M110 vzdálená 2,5 milionu světelných let – královský cíl širokoúhlých astrografů (NASA / JPL – Caltech)

13.1 Výpočet optimální sub–expozice: Swamping Read Noise

Častým mýtem začátečníků je přesvědčení, že „čím delší expozice, tím lépe“. To platilo v éře starých CCD kamer s vysokým vyčítacím šumem ($10 e^-$). U moderních CMOS kamer s vyčítacím šumem kolem $1,2 e^-$ je však situace zcela jiná.

Klíčovým konceptem je **přebití vyčítacího šumu šumem pozadí oblohy (Swamping Read Noise)**. I na té nejtemnější obloze v Chile obloha mírně svítí přirozeným vzdušným zářením (*Airglow*) a rozptýleným hvězdným světlem. V městských podmínkách září světelné znečištění. Tento signál pozadí oblohy S_{sky} nese svůj vlastní fotonový šum $\sigma_{sky} = \sqrt{S_{sky}}$.

Matematické pravidlo říká: **Jakmile fotonový šum pozadí oblohy σ_{sky} překročí vyčítací šum kamery R_n troj- až pětinasobně, stává se vliv vyčítacího šumu na výsledný složený snímek naprosto zanedbatelným (ztráta dynamiky je pod 2 až 5 %)!**

$$\sigma_{sky} \geq 3 \cdot R_n \implies \sqrt{S_{sky}} \geq 3 \cdot R_n \implies S_{sky} \geq 9 \cdot R_n^2$$

Praktický test délky expozice na vašem dalekohledu:

1. Poříd'te zkušební snímek (např. 120 sekund).
2. Otevřete snímek a změřte průměrnou hodnotu jasu v temné části oblohy bez hvězd (Sky Background ADU).
3. Odečtete hodnotu Offsetu (jas Biasu).
4. Pokud je čistý signál pozadí oblohy alespoň $10 \times R_n^2$ (v elektronech), je vaše sub–expozice **plně dostatečná!**

Proč neexponovat zbytečně déle? Prodloužení expozice z 3 minut na 10 minut vám nepřinese ani o píd' více detailů slabých mlhovin, pokud je celkový čas integrace stejný (např. 10 hodin)! Přináší však obrovská rizika:

- Přepálíte jádra jasných hvězd a ztratíte jejich barvy (hvězdy přetečou kapacitu pixelu Full Well).
- Hrozí větší riziko, že expozici zničí projíždějící satelit, záblesk letadla, náraz větru nebo drobná chyba pointace.

13.2 Kumulativní integrační čas a zákon odmocniny ($S/N \propto \sqrt{N}$)

Proč astronomové integrují desítky hodin? Odpověď dává fundamentální statistický zákon pro skládání N nezávislých snímků:

- Užitečný signál z mlhoviny se sčítá **lineárně** s počtem snímků: $S_{tot} = N \cdot S$.
- Náhodný šum se sčítá **geometricky (kvadraticky)**: $\sigma_{tot} = \sqrt{N} \cdot \sigma$.

Poměr signálu k šumu výsledného složeného snímku proto roste **pouze s odmocninou z počtu snímků**:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{slozeno} = \frac{N \cdot S}{\sqrt{N} \cdot \sigma} = \sqrt{N} \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{jednotlivy}$$

Celkový integrační čas	Zisk poměru S/N	Vizuální kvalita a prokreslení
1 hodina	1,0× (referenční)	Viditelné pouze jasnější struktury, silně zrnité pozadí
4 hodiny	2,0×	Pozadí se znatelně vyhlazuje, objevují se slabší spirální ramena
16 hodin	4,0×	Křišťálově čisté, sametové pozadí s nejjemnějšími prachovými závoji (IFN)

Zde vidíme neúprosnou matematiku: **K dosažení dvojnásobného zlepšení čistoty obrazu musíte nasbírat ČTYŘNÁSOBEK celkového expozičního času!**



Kosmické útesy v mlhovině Carina (NGC 3324) – hvězdná porodnice zachycená v infračerveném spektru teleskopem Jamese Webba. Příklad toho, co dokáže masivní integrace v prachových oblacích (NASA / ESA / CSA / STScI)

13.3 Hledání a výběr cílů: Katalogy DSO

Noční obloha je rozdělena mezi několik klíčových astronomických katalogů:

- **Messierův katalog (M1 až M110):** Sestaven Charlesem Messierem v 18. století. Obsahuje nejjasnější a vizuálně nejkrásnější deep-sky objekty severní oblohy (M31 Andromeda, M42 Orion, M45 Plejády, M13 kulová hvězdokupa v Herkulovi, M51 Vírová galaxie). Ideální pro začátečníky.
- **NGC (New General Catalogue) a IC (Index Catalogue):** Obsahuje téměř 15 000 galaxií, mlhovin a hvězdokup (např. NGC 7000 Severní Amerika, NGC 6960 mlhovina Závoj).
- **Sharpless katalog (Sh2):** Katalog 313 rozsáhlých vodíkových $H\alpha$ emisních mlhovin v Mléčné dráze. Zlatý důl pro úzkopásmovou astrofotografii (např. Sh2–240 Mlhovina Špageta, Sh2–155 Jeskyně).
- **Barnardův katalog temných mlhovin (B):** Neprůhledné oblaky prachu a molekulárního plynu stínící zářící pozadí Mléčné dráhy (B33 Koňská hlava, B142–143 Temné E v Orlu).

13.4 Plánování nočního focení a rotace pole

Před spuštěním expozic zkontrolujte:

1. **Výška objektu nad obzorem (Altitude):** Nikdy nefotografujte objekty níže než 30° nad obzorem! U horizontu musíte překonat trojnásobnou tloušťku zemské atmosféry, což přináší masivní extinkci světla, horší seeing a silné světelné znečištění.
2. **Kulatost hvězd a rotace pole:** Ujistěte se, že těžiště a kabely nekladou odpor, který by přetěžoval motory montáže.

Kapitola 14: Kalibrační snímky – Tajemství čistého signálu

Mnoho začínajících astrofotografů je po své první noci u dalekohledu zklamáno. Složí dohromady třicet pořízených snímků mlhoviny, roztáhnou histogram a na obrazovce se objeví ošklivý výsledek: tmavé rohy snímku, desítky černých či zářících kroužků od prachových zrněk, šikmé barevné pruhy a tisíce svítících červených a zelených bodů (hot-pixelů).

Důvodem je vynechání nejdůležitějšího kroku vědecké i estetické astrofotografie: **kalibrace surových dat**.

Surový snímek z kamery (**Light frame**) totiž kromě světla z vesmíru obsahuje celou řadu systematických chyb samotného přístroje a optiky. K jejich dokonalému matematickému odstranění slouží trojice kalibračních snímků: **Dark frames, Flat frames a Bias frames**.

14.1 Anatomie kalibračních souborů

Typ snímku	Krytka optiky	Čas expozice	Teplota a Gain	Co měří a odstraňuje
Light frame	Otevřená (na oblohu)	Dlouhý (např. 120–600 s)	Nastaveno pro focení	Užitečný fotonový signál + vady
Dark frame	Zavřená (absolutní tma)	Přesně stejný jako Light	Identické jako Light	Tepelný šum čipu, hot-pixely
Flat frame	Otevřená (rovnoměrné světlo)	Krátký (1 až 5 s)	Identické jako Light	Vinětaci objektivu, stíny prachu
Bias frame	Zavřená (absolutní tma)	Nejkratší možný (mikrosekundy)	Identické jako Light	Základní vyčítací šum a offset ADC

1. Temné snímky (Dark frames)

Pořizují se s dokonale zakrytým objektivem (v absolutní temnotě) při **naprosto stejné délce expozice, zisku (Gain), offsetu a teplotě senzoru** jako vědecké snímky Light.

- Měří čistý tepelný náboj (temný proud) generovaný krystalovou mřížkou čipu a mapují fixní pozice defektních **hot-pixelů** (pixelů, které mají vysoký svodový proud a svítí naplno bíle).
- Složením 20 až 50 Dark snímků vznikne **Master Dark**, který se následně jednoduše odečte od každého Light snímku.

2. Vyčítací snímky (Bias frames / Flat-Darks)

Pořizují se v temnotě s nejkratším možným expozičním časem, jaký kamera zvládne (typicky $1/10\,000$ až $1/32\,000$ sekundy, u astro kamer $32\,\mu\text{s}$).

- Zaznamenávají fixní vzor vyčítacího šumu a elektronického Offsetu v okamžiku převodu v analogově-digitálním převodníku.
- **Poznámka pro moderní CMOS senzory (např. Panasonic MN34230 v kameře ASI1600):** Některé senzory mají nelineární chování při ultra-krátkých časech. U nich se namísto Biasu používá **Flat-Dark** (temný snímek pořízený se stejným časem jako Flat frame, např. 2 sekundy).

3. Snímky plochého pole (Flat frames)

Snímky rovnoměrně osvětlené bílé plochy. Jsou naprosto nepostradatelné pro odstranění dvou zásadních optických jevů:

- **Vinětace:** Přirozený úbytek světla v rozích senzoru daný geometrií tubusu a korektorů.
- **Prachové stíny (Dust donuts):** Mikroskopická zrnka prachu usazená na krycím skle senzoru nebo na filtrech vrhají na čip kruhové stíny.

❗ DŮLEŽITÉ

Zlaté pravidlo pro pořizování Flatů: NIKDY neotáčejte kamerou, nerozostřujte výtah ani nerozebírejte optický trakt před pořízením Flatů! Prachové zrnko na skle senzoru o tloušťce setiny milimetru se při pootočení kamery o jediný stupeň posune na jiné pixely a Flat frame by vady neodstranil, ale naopak vytvořil nové, inverzní stíny!

14.2 Techniky pořízení Flat frames

K pořízení kvalitního Flat framu potřebujete dokonale difúzní, spektrálně vyvážené a rovnoměrné bílé světlo:

1. **Elektroluminiscenční nebo LED panel:** Speciální stmívatelný rovnoměrně svítící panel položený na vstupní tubus dalekohledu. Nejrychlejší a nej pohodlnější metoda.
2. **Metoda bílého trička (T-Shirt Flat):** Na přední část tubusu napnete čisté bílé bavlněné tričko (bez záhybů) upevněné gumičkou a dalekohled namíříte proti rovnoměrně jasné ranní obloze bez přímého slunce.
3. **Správná expozice Flatu:** Histogram Flat snímku musí mít svůj vrchol přesně v **polovině dynamického rozsahu čipu** (kolem 45 až 55 % kapacity, tedy cca 30 000 až 35 000 ADU u 16-bitové kamery). Nesmí být ani podexponovaný, ani satureovaný!

14.3 Fundamentální kalibrační rovnice

Při digitálním zpracování v programech PixInsight, Siril či Astro Pixel Processor prochází každý jednotlivý pixel vašeho snímku exaktní kalibrační rovnicí:

$$\text{Calibrated Light} = \frac{\text{Raw Light} - \text{Master Dark}}{\text{Master Flat} - \text{Master Bias}} \times \text{střední hodnota}$$

Podívejme se na matematickou krásu tohoto vztahu:

1. **Čitateľ (Light – Dark):** Odečte od surového signálu veškerý tepelný šum senzoru, hot-pixely a elektronický offset.
2. **Jmenovatel (Flat – Bias):** Změří čistou relativní propustnost optického systému pro každý pixel v rozsahu 0,0 až 1,0 (kde 1,0 je nevinětovaný střed a např. 0,7 je ztmavený roh či prachové zrnko).
3. **Dělení čitatele jmenovatelem:** V místech, kde optika ztmavila obraz na 70 %, dojde k vydělení číslem 0,7 – což signál přesně a exaktně **vynásobí koeficientem** $1/0,7 \approx 1,43$!

Výsledek? Vinětace zcela zmizí, prachové kroužky se beze stopy rozpustí a vaše obrazové pole bude dokonale matematicky ploché od rohu k rohu.

Kapitola 15: Automatizace celé noci: ASIAIR, N.I.N.A. a KStars

Doby, kdy musel astrofotograf stát po celou mrazivou zimní noc vedle dalekohledu v minus deseti stupních, mačkat ruční ovladač, kontrolovat zaostření okulárem a ručně otáčet montáž při meridiánu, jsou definitivně pryč.

Dnešní astrofotografie je světem **plně robotických systémů**. Můžete sestavu postavit na zahradě nebo vyjet na louku za město, v teple auta či obývacího pokoje na tabletu zvolit cíl z katalogu, stisknout tlačítko „Start“ a jít v klidu spát. Ráno se probudíte k desítkám gigabajtů perfektně zkalibrovaných a zaostřených dat a dalekohled najdete bezpečně zaparkovaný v základní poloze.

15.1 ZWO ASIAIR: Revoluce v jednoduchosti ovládání

Zařízení **ASIAIR** od čínského výrobce ZWO způsobilo v amatérské komunitě obrovský boom. Jedná se o miniaturní počítač na bázi Raspberry Pi v robustním hliníkovém šasi, který se připevňuje přímo na tělo dalekohledu.

Klíčové vlastnosti ASIAIR:

- **Vše v jedné krabičce:** Obsahuje 4 porty USB pro kamery, montáž, autofokuser a filtrové kolo, 4 regulovatelné napájecí výstupy 12 V (pro chlazení kamer a vyhřívací pásy) a vlastní dvoupásmovou Wi-Fi anténu.
 - **Intuitivní ovládání přes mobil či tablet (iOS / Android):** Žádné ovladače pro Windows, žádné složité konfigurační soubory. Aplikace nabízí bleskový plate solving, automatické polární ustavení, ovládání pointace i plánování noční sekvence v elegantním grafickém rozhraní.
 - **Uzavřený ekosystém:** Hlavní omezení ASIAIR spočívá v tom, že **podporuje výhradně kamery, autofokusery a filtrová kola od společnosti ZWO** (s výjimkou zrcadlovek Canon/Nikon/Sony a montáží třetích stran).
-

15.2 N.I.N.A. (Nighttime Imaging 'N' Astronomy): Královna svobody a pokročilého sekvencování

Pokud používáte techniku různých výrobců (kamery QHY, Moravian Instruments, motorové výtahy Pegasus Astro, filtry PrimaLuceLab) nebo chcete neomezené možnosti přizpůsobení, je volbou číslo jedna open-source program **N.I.N.A.** pro operační systém Windows.

N.I.N.A. komunikuje se všemi zařízeními prostřednictvím otevřeného průmyslového standardu **ASCOM** a nabízí funkce, které dříve patřily pouze profesionálním observatořím:

Pokročilý Sequencer (Advanced Sequencer)

Umožňuje vytvářet komplexní logické skripty a větvené podmínky pro celou noc:

```
KDYŽ nastane astronomický soumrak:
1. Zapni chlazení kamery na -10 °C.
2. Najed' na cíl 1 (mlhovina M42).
3. Proveď Plate Solve a vycentruj cíl s tolerancí do 10 pixelů.
4. Proveď automatické zaostření (Autofocus).
5. Spust' autoguiding v PHD2.
6. Snímej expozice filtru H-alfa (300 s) DOKUD cíl neklesne pod 30° nad obzor.
7. PŘI změně teploty o více než 1,5 °C:
    Přeruš expozici -> Přeostři V-křivkou -> Pokračuj v expozici.
8. PŘI průchodu meridiánem:
    Pozastav guider -> Proveď Meridian Flip -> Znovu vycentruj cíl -> Spust' guider.
KDYŽ nastane astronomické svítání (nebo senzor ohlásí déšť):
Zastav expozice -> Zaparkuj montáž -> Ohřej kameru -> Vypni napájení.
```

15.3 KStars / Ekos / INDI: Profesionální svět Linuxu a Macu

Pro uživatele systémů Linux, macOS nebo mikropočítačů Raspberry Pi bez operačního systému Windows představuje absolutní špičku platforma **KStars s modulem Ekos** postavená na protokolu **INDI**.

Ekos nabízí plnohodnotný planetární i deep-sky modul, vestavěný interní guidingový algoritmus, analýzu optických vad v reálném čase a podporu pro plně robotické kopule a posuvné střechy hvězdáren.

15.4 Automatické přeostřování (Autofocus) během noci

Pokles venkovní teploty v průběhu noci o pouhé 2 až 3 stupně Celsia způsobí smrštění hliníkového nebo ocelového tubusu dalekohledu. U světelných astrografů ($f/4$ až $f/2$) to

znamená okamžitý posun ohniskové roviny mimo kritickou zónu zaostření (CFZ).

Moderní software proto monitoruje stav zaostření dvěma způsoby:

1. **Teplotní kompenzace:** Teplotní čidlo na tubusu měří teplotu; motor výtahu se po každém poklesu o $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ automaticky posune o předem zkalibrovaný počet kroků.
2. **HFD Trigger (přeostření podle velikosti hvězd):** Software po každé sub-expozici změří průměrnou hodnotu **HFD (Half Flux Diameter)** všech hvězd v poli. Pokud se hodnota HFD zvýší o více než 10 % oproti optimální hodnotě po posledním zaostření, software automaticky pozastaví sekvenci, provede rychlé zaostření V-křivkou a pokračuje ve snímání. Výsledkem jsou krystalicky ostré snímky po celých osm hodin noci.

Část VI: Digitální zpracování dat (Post-Processing)

Pořízením surových expozic pod hvězdným nebem je polovina práce hotova. Nyní přichází druhá, neméně fascinující a tvořivá fáze: **digitální zpracování obrazu (Post-Processing)**.

Mnoho laiků se mylně domnívá, že post-processing v astrofotografii je jakýmsi „vymýšlením barev v Photoshopu“. Opak je pravdou. Astrofotografický post-processing je přísně exaktní matematická a fyzikální věda. Jeho cílem není falšovat realitu, ale odhalit a zviditelnit skutečné fyzikální signály, které jsou v surových datech skryty hluboko pod úrovní lidského vnímání a zašuměného pozadí.

V této závěrečné hlavní části knihy si osvojíme kompletní moderní pracovní postup (*workflow*):

- Pochopíme matematické principy registrace a integrace snímků (Stacking) s pokročilým odmítáním vadných pixelů metodou Kappa-Sigma.
- Naučíme se pracovat v posvátném **lineárním stavu dat**, kde jas pixelu přímo odpovídá počtu dopadlých fotonů: provedeme extrakci světelného znečištění (GraXpert, DBE), fotometrickou kalibraci barev podle družice Gaia (PCC) a zaostření dekonvolucí.
- Zvládneme revoluční technologie moderních neuronových sítí a umělé inteligence: oddělení hvězd od mlhoviny (StarXTerminator, StarNet++) a hloubkové lineární odšumění bez ztráty mikroskopických detailů.
- A prozkoumáme umění nelineárního roztažení histogramu (Stretching) pomocí moderního hyperbolického roztažení (GHS), práci s maskami a finální barevnou syntézu pro tisk i web.

Kapitola 16: Registrace a skládání (Stacking)

Když otevřete složku s daty z úspěšné jasné noci, najdete v ní desítky či stovky souborů ve vědeckém formátu **FITS** (Flexible Image Transport System) nebo v surovém formátu **RAW/DNG**.

Každý jednotlivý snímek je mírně posunut vlivem ditheringu a periodické chyby montáže, v pozadí je zašuměný a přes několik snímků vám nevyhnutelně proletěla družice Starlink nebo dopravní letadlo s blikajícími světly.

Úkolem procesu **registrace a skládání (Stackingu)** je tyto stovky souborů prostorově zarovnat s přesností na zlomky pixelu, odstranit stopy satelitů a sečíst užitečný signál do jediného, neobyčejně hladkého 32-bitového master snímku.

16.1 Fyzika a statistika stackingu: Zvyšování poměru signálu k šumu

Jak jsme si ukázali v teoretických kapitolách, užitečný fotonový signál přicházející z mlhoviny má v každém pixelu v čase konstantní střední hodnotu. Naopak náhodný šum (fotonový šum pozadí a vyčítací šum) je v čase i prostoru proměnlivý – má Gaussovo/Poissonovo rozdělení s nulovou střední hodnotou odchylky.

Když sečteme a zprůměrujeme N registrovaných snímků:

- **Užitečný signál:** $S_{\text{průměr}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i = S$. Signál zůstává zachován.
- **Náhodný šum:** $\sigma_{\text{průměr}} = \frac{\sqrt{N \cdot \sigma^2}}{N} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$.

Výsledný poměr signálu k šumu roste přímo úměrně **odmocnině z počtu snímků**:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{výsledek}} = \sqrt{N} \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{sub}}$$

Složením **100 dílčích snímků** získáte **desetinásobně čistší obraz** ($S/N = 10\times$), na němž vystoupí i ty nejslabší prachové struktury, které na jednotlivém surovém snímku ležely hluboko pod hladinou šumu!

16.2 Odmítání vadných pixelů (Pixel Rejection: Kappa-Sigma Clipping)

Co se stane, když přes dvacet vašich snímků proletí jasná družice? Pokud byste snímky pouze prostě zprůměrovali, zůstala by stopa družice na výsledném snímku viditelná jako slabší, ale stále rušivá bílá čára.

K jejímu dokonalému vymazání slouží statistický algoritmus **Kappa-Sigma Clipping**:

1. Software vezme hodnoty jasu pro **jeden konkrétní pixel napříč všemi N snímky** (vytvoří z nich statistický sloupec čísel).
2. Spočítá medián M a směrodatnou odchylku σ tohoto souboru.
3. Stanoví prahové hranice: $[M - \kappa \cdot \sigma, M + \kappa \cdot \sigma]$ (kde parametr κ bývá typicky nastaven na hodnotu kolem 2,5 až 3,0).
4. Každý pixel, jehož hodnota leží mimo tento interval – ať už je to stopa jasného satelitu, letadla, kosmické záření, nebo temný vadný pixel –, je algoritmem **nemilosrdně zahozen (odmítnut)** jako statistická anomálie!
5. Zbývající "čisté" pixely jsou následně zprůměrovány.

Výsledek hraničí s magií: Můžete mít v datech stovky stop satelitů, ale po složení metodou Kappa-Sigma je výsledný snímek **dokonale čistý, jako by žádná družice po obloze nikdy neletěla!**

16.3 Software pro stacking: Siril versus PixInsight (WBPP)

Pro proces kalibrace, registrace a stackingu existují dvě hlavní platformy:

1. Siril (Open-Source a blesková rychlost)

Siril je bezplatný, neuvěřitelně rychlý open-source program pro Windows, Mac i Linux. *Využívá automatické skripty (např. OSC_Preprocessing*)*, které jedním kliknutím načtou složky s Lights, Darks, Flats a Biases, provedou kompletní kalibraci, debayering, registraci a Kappa-Sigma stacking.

- Vyniká bezkonkurenční rychlostí zpracování díky optimalizovanému vícevláknovému kódu pro vícejádrové moderní procesory.

2. PixInsight – WeightedBatchPreprocessing (WBPP)

PixInsight je profesionálním zlatým standardem světové astrofotografie. Skript **WBPP** je vrcholným dílem automatizace:

- Automaticky změří kvalitu každého dílčího snímku podle tří parametrů: ostrosti hvězd (FWHM), váženého šumu a excentricity (kulatosti) hvězd.
- Každému snímku přiřadí matematickou váhu (**Weight**). Snímky s vynikajícím seeingem mají při skládání větší vliv na ostrost detailů než snímky pořízené v horších podmínkách.
- Provádí pokročilou lokální normalizaci pozadí (Local Normalization), která eliminuje rozdíly v jasu způsobené průchodem slabé oblačnosti nebo svitem Měsíce.

16.4 Drizzle integrace: Obnova detailů z podvzorkovaných dat

Pokud používáte sestavu s krátkým ohniskem (např. širokouhlý refraktor $f = 250$ až 400 mm) a kameru s většími pixely, jsou vaše data **podvzorkovaná (undersampled)**: hvězdy jsou malé a hranaté a jemné detaily jsou ztraceny.

Algoritmus **Drizzle** (vyvinutý původně v NASA pro snímky z Hubbleova teleskopu):

1. Využívá náhodného sub-pixelového posunu mezi expozicemi (který vzniká přirozeným ditheringem).
2. Zmenší velikost každého pixelu na virtuální mikroskopický bod (tzv. *drop*) a promítne jej do jemnější výstupní mřížky (např. $2\times$ Drizzle zdvojnásobí rozlišení obrazu).
3. Hvězdy získají zpět svůj přirozený kulatý tvar a rozlišení detailů v galaxiích a mlhovinách se viditelně zvýší!

Výstupem stackingu je **32-bitový lineární soubor FITS**, který v sobě nese obrovský dynamický rozsah informací připravený pro další zpracování.

Kapitola 17: Zpracování v lineárním stavu

Když čerstvě složený 32-bitový master snímek poprvé otevřete v programu, zažijete šok: **obrazovka je téměř úplně černá**. Spatříte jen několik nejjasnějších bílých teček (nejjasnější hvězdy) a všude kolem zdánlivě prázdnou temnotu. Kde je ta velkolepá mlhovina? Byla celá noc ztracena?

Nebyla. Snímek se nachází ve svém přirozeném, fyzikálně čistém **lineárním stavu**.

17.1 Co je to lineární stav a Screen Transfer Function (STF)

Lineární stav znamená, že **hodnota pixelu je přímo úměrná počtu fotonů**, které na dané místo dopadly. Pokud z jádra hvězdy dopadlo 10 000 fotonů a z jemného závoje mlhoviny v pozadí pouze 10 fotonů, má pixel hvězdy v souboru přesně tisícinásobně vyšší digitální hodnotu než pixel mlhoviny!

Lidské oko však nevnímá světlo lineárně; náš zrak se řídí **Weberovým–Fechnerovým logaritmickým zákonem**. Pokud bychom lineární data zobrazili přímo na běžném monitoru (který má gama korekci), veškeré slabé signály mlhoviny by se smrskly do prvních několika málo nejnižších úrovní černé barvy.

K tomu, abychom viděli, co v datech je, aniž bychom data fyzicky změnili, slouží **virtuální zobrazení – Screen Transfer Function (STF)**:

- Funkce STF (v PixInsight či Sirilu) aplikuje na zobrazení na monitoru dočasnou, nedestruktivní křivku.
- Na monitoru okamžitě spatříte zářící mlhovinu, ale samotné hodnoty pixelů v souboru zůstávají **stále 100% lineární!**

i DŮLEŽITÉ

Proč musíme klíčové úpravy provádět výhradně v lineárním stavu: Fyzikální operace – jako je odečtení světelného gradientu, kalibrace barev podle astrometrie a dekonvoluce – jsou matematicky definovány pouze pro lineární signál! Pokud byste snímek nejprve nelineárně roztáhli křivkami v Photoshopu a pak se pokusili odečíst gradient, vytvoříte v datech ošklivé artefakty a zničíte přirozené barvy hvězd.

17.2 Extrakce světelného gradientu: GraXpert a DBE

I po dokonalé kalibraci Flat framy trpí snímek **gradientem světelného znečištění**. Světelný smog měst má směr: směrem k obzoru či k blízkému městu je obloha světlejší, v opačném rohu tmavší. Navíc se na gradientu podepisuje svit Měsíce či přirozené vzdušné záření.

Nástroje pro odstranění gradientu:

1. **GraXpert (AI / RBF model)**: Moderní bezplatný open-source software (využitelný samostatně i jako modul v PixInsight a Sirilu). Využívá předtrénovanou **konvoluční neuronovou síť (AI model)**, která dokáže okamžitě rozeznat, co je skutečná mlhovina či galaxie a co je pouhý hladký gradient pozadí! Během 3 sekund vytvoří dokonalý 32-bitový model gradientu a odečte jej ze snímku.
2. **DynamicBackgroundExtraction (DBE v PixInsight)**: Klasický nástroj, kde uživatel ručně rozmístí vzorkovací body do prázdných míst oblohy bez mlhovin a hvězd. Matematický model (spline křivka) následně vygeneruje mapu pozadí a provede její odečtení (*Subtraction*).

Po tomto kroku se šikmý nažloutlý či nazelenalý závoj rozplyne a pozadí vesmíru získá dokonale rovnoměrný, plochý temný tón.

17.3 Fotometrická kalibrace barev (Photometric Color Calibration – PCC / SPCC)

Jak víme, jakou barvu má mít vzdálená galaxie či hvězda? Má být pozadí neutrální šedé, modravé, nebo hnědé? V minulosti astronomové vyvažovali barvy ručním odhadem podle oka. Dnes vládne nekompromisní vědecká metoda: **Spektrofotometrická kalibrace barev (SPCC)**.

Postup SPCC v PixInsight / Sirilu:

1. Program provede plate solving snímku a přesně identifikuje každou jednotlivou hvězdu v zorném poli.
2. Tyto hvězdy porovná s oficiální vědeckou databází evropské družice **Gaia (Gaia DR3 / SPCC database)**, která změřila přesná spektra a barevné indexy stovek milionů hvězd.
3. Vynese graf: skutečná změřená barva z družice Gaia vs. barva zaznamenaná vaší kamerou.
4. Lineární regresí spočítá přesné korekční koeficienty pro červený, zelený a modrý kanál. Každá hvězda na vašem snímku získá svou **fyzikálně a astrofyzikálně přesnou barvu** odpovídající její spektrální třídě (od chladných oranžových obrů po horké modré veleobry) a galaxie získají svůj autentický odstín!

17.4 Dekonvoluce a BlurXTerminator: Zpětné zaostření atmosféry

I v té nejlepší optice rozmaže zemská atmosféra bodovou hvězdu do malého rozptylového kotoučku popsaného **bodovou rozptylovou funkcí (PSF – Point Spread Function)**. Výsledný obraz je matematickým součinem (konvolucí) skutečného vesmíru a této rozptylové funkce:

$$\text{Obraz} = \text{Objekt} \otimes \text{PSF} + \text{Šum}$$

Dekonvoluce je reverzní matematický proces, který se pokouší vliv PSF zpětně odpočítat a zaostřit rozmazané detaily. V minulosti byla klasická Richardsonova-Lucyho dekonvoluce extrémně náročná na tvorbu ochranných masek hvězd, jinak kolem hvězd vytvářela ošklivá černá „oka“ (*dark rings*).

Dnes vládne revoluční nástroj **BlurXTerminator** (od Russella Cromana):

- Využívá pokročilou hlubokou neuronovou síť (AI), která změří lokální PSF v každé části zorného pole.
- Dokáže nejen dokonale zaostřit jemná prachová vlákna v jádru galaxie, ale zároveň **opravit drobné optické vady v rozích (komu, mírný astigmatismus) a vrátit hvězdám dokonale kruhový tvar!**

17.5 Separace hvězd pomocí AI (StarNet++ a StarXTerminator)

Jedním z největších milníků v dějinách digitální astrofotografie byl vznik algoritmů pro **odstranění hvězd z obrazu (Star Removal)**.

V plném hvězdném poli leží přes jemnou mlhovinu statisíce jasných hvězd. Pokud byste chtěli agresivně zvýšit kontrast a saturaci slabého plynu, jasné hvězdy by se nafoukly do obřích bílých koláčů a přezářily celou scénu.

Moderní neuronové sítě (**StarXTerminator, StarNet++ v2**):

1. Analyzují snímek a během několika sekund **vyjmou všechny hvězdy do samostatného obrazu (Stars)**.
2. Zůstane vám dokonale čistý, hladký obraz samotné mlhoviny či galaxie (**Starless**), na němž není ani jediná hvězda!
3. Nyní můžete mlhovinu v nelineárním stavu zpracovávat, doostřovat a saturovat zcela svobodně, aniž byste se museli bát poškození hvězd!
4. Na samém konci zpracování hvězdy jednoduše matematicky přičtete zpět.

Kapitola 18: Nelineární roztažení a finální úpravy

Nyní přichází klíčový transformační okamžik celého procesu: **přechod z lineárního stavu do stavu nelineárního**.

V tomto kroku vezmeme data, která jsou sice fyzikálně lineární, ale pro lidské oko příliš temná, a aplikujeme na ně matematickou křivku roztažení histogramu (**Stretching**), která zviditelní nejslabší závoje mlhovin a přizpůsobí jasový profil lidskému vnímání a možnostem tiskáren a monitorů.

18.1 Metody roztažení histogramu (Stretching)

Historicky se roztažení provádělo v Photoshopu opakovaným taháním za táhla v nástroji *Křivky* (*Curves*) a *Úrovně* (*Levels*). Tento postup byl však hrubý, neexaktní a často vedl k přepálení jader galaxií a ztrátě barevnosti hvězd.

Moderní astrofotografie využívá matematicky sofistikované algoritmy:

1. HistogramTransformation (HT) a ScreenTransferFunction (STF)

Klasická metoda v PixInsight. Spočívá v nalezení bodu středních tónů (**Midtones Balance**) a posunu černého bodu (**Shadows Clipping**) těsně k úpatí histogramu.

- Riziko: Při agresivním vytažení slabého pozadí se snadno přepálí jádra jasných objektů (např. trapez v M42 nebo jádro galaxie v Andromedě).

2. ArcsinhStretch (Inverzní hyperbolický sinus)

Vychází z funkce $\operatorname{arsinh}(x)$.

- **Obrovská výhoda:** Z principu své matematické definice **striktně zachovává barevné poměry (Chrominanci)**! Při roztažení běžnou křivkou se hvězdy vlivem nasycení jednotlivých kanálů mění na čistě bílé tečky; ArcsinhStretch udrží syté safírové barvy mladých hvězd i zlatavé tóny chladných obrů.

3. Generalized Hyperbolic Stretch (GHS) – Současný král streče

Skript a nástroj **GHS** vyvinutý v posledních letech amatérskými astrofotografy představuje absolutní špičku nelineárního roztažení.

- Umožňuje umístit bod symetrie (ohnisko roztažení) **přesně do té specifické jasové zóny, kterou chcete vytáhnout** (např. do nejslabších prachových vláken IFN), aniž byste se dotkli středních tónů galaxie nebo přepálili hvězdy!
- Poskytuje plnou matematickou kontrolu nad linearitou ramen křivky a zabraňuje nafouknutí hvězdného pole.

18.2 Zpracování bezhvězdného obrazu (Starless Processing)

Máme-li díky předchozímu kroku obraz rozdělen na **Starless (mlhovinu bez hvězd)** a **Stars (samotné hvězdy)**, můžeme na bezhvězdném obraze provádět úpravy, které by jinak hvězdy zcela zničily:

1. **Lokální ekvalizace histogramu (LocalHistogramEqualization – LHE):** Nástroj, který analyzuje obraz v poloměru desítek až stovek pixelů a dramaticky zvyšuje lokální mikrokontrast. Zvýrazní prostorovou hloubku plyných filamentů a temných prachových zlomů.
2. **Saturace a ladění barev (CurvesTransformation):** Zvýšení sytosti barev (křivka S) pouze v místech se signálem mlhoviny.
3. **Selektivní barevné masky:** Pomocí nástroje *ColorMask* můžete vytvořit masku izolující pouze tyrkysový kyslík *[OIII]* a mírně posunout jeho odstín směrem k modré, nebo zvýraznit zlaté tóny síry *[SII]* v Hubbleově paletě.

18.3 Zpětné vložení a zmenšení hvězd (Star Reduction)

Když je bezhvězdná mlhovina hotová, přichází čas vrátit hvězdy na jejich původní místa. Zde máme plnou kontrolu nad tím, jak budou hvězdy vypadat:

Matematické složení pomocí PixelMath:

V programu PixInsight / Siril spojíme vrstvy pomocí vzorce **Screen (Závoj)**, který zabraňuje přepálení v místech překryvu:

$$\text{Final} = \sim (\sim \text{Starless} \cdot \sim \text{Stars}) = 1 - (1 - \text{Starless}) \cdot (1 - \text{Stars})$$

Zmenšení hvězd (Star Reduction)

Pokud je hvězdné pole příliš husté (např. v Mléčné dráze v Labuti) a miliony drobných hvězdiček odvádějí pozornost od samotné mlhoviny, můžeme samotný obraz hvězd (Stars) **před sloučením mírně zmenšit a ztlumit**:

- Pomocí křivek snížíme jas nejslabších hvězd. *Nebo použijeme nástroj MorphologicalTransformation (s operátorem Erosion / Minimum*), který zmenší průměr hvězd o 1 až 2 pixely.*

Po sloučení vystoupí mlhovina v celé své plastické kráse a hvězdy tvoří pouhý jemný, přirozený a decentní třpytivý diamantový prach v pozadí.

18.4 Finální export pro tisk a web: Barevné prostory a profily

Před exportem finálního obrazu nezapomeňte na správu barev (Color Management):

Výstupní médium	Barevný prostor (Color Profile)	Bitová hloubka	Doporučený formát
Web a sociální sítě	sRGB IEC61966-2.1	8-bit	JPEG / PNG (vysoká kvalita)
Profesionální fototisk	AdobeRGB (1998) nebo ProPhoto RGB	16-bit	TIFF (bezeztrátový)
Archiv mistrovských dat	Nativní lineární profil	32-bit float	FITS / XISF

UPOZORNĚNÍ

Zrádný posun barev na webu: Pokud exportujete snímek pro Instagram, Facebook či web v barevném prostoru AdobeRGB nebo ProPhoto RGB, většina webových prohlížečů a mobilních telefonů jej zobrazí **zcela vybledlý, zašedlý a bez barevné sytosti!** Pro jakékoliv zobrazení na internetu musíte obraz v softwaru **převést na profil sRGB** (Convert to Profile -> sRGB).

Váš snímek je hotov. Z neviditelných fotonů, které putovaly miliony let chladnou prázdnotou vesmíru, jste vytvořili trvalé vědecké a umělecké svědectví o řádu, kráse a velkoleposti kosmu.

Dodatek A: Velký katalog 100 nejkrásnějších cílů pro astrofotografii

Tento katalog slouží jako praktický celoroční průvodce pro plánování vašich fotografických nocí. Cíle jsou rozděleny podle ročních období (podle doby jejich optimální kulminace kolem půlnoci) a doplněny o doporučený typ optiky a filtru.

1. Jarní obloha (Sezóna galaxií)

Jarní noční obloha míří ven z roviny Mléčné dráhy do hlubokého mezigalaktického prostoru. Je to království spirálních a eliptických galaxií:

1. **Messier 51 (Vírová galaxie / Whirlpool) v Honících psech:** Nádherná interagující spirální galaxie s průvodcem NGC 5195. Ideální pro střední a delší ohniska (700 až 1500 mm).
2. **Messier 81 (Bodeova galaxie) a Messier 82 (Doutník) ve Velké medvědi:** Slavná dvojice galaxií. M81 je elegantní spirála, M82 je překotná *starburst* galaxie s rudými vodíkovými výtrysky z jádra (skvělé pro doplnění $H\alpha$ dat).
3. **Messier 101 (Větrník / Pinwheel):** Obrovská spirální galaxie viděná přímo zvrchu s desítkami zářících růžových HII oblastí ve spirálních ramenech.
4. **Messier 104 (Sombrero) v Panně:** Ikonická galaxie s obřím centrálním výdutím a temným prachovým pásem připomínající mexický klobouk.
5. **Kupa galaxií v Panně (Markarianův řetěz):** Monumentální řetěz osmi galaxií klenoucí se přes široké zorné pole (ideální pro ohniska 300 až 500 mm).
6. **Messier 65, 66 a NGC 3628 (Leo Triplet / Lví trojče):** Tři různé galaxie v jednom zorném poli. NGC 3628 má fascinující dlouhý slapový ohon.
7. **Messier 63 (Slunečnice):** Spirála s hustou strukturou jemných ramen.
8. **Messier 97 (Soví mlhovina) a M108:** Planetární mlhovina se dvěma temnými „oky“ ležící v těsné blízkosti spirální galaxie M108.
9. **Messier 3 v Honících psech:** Jedna z nejjasnějších a nejkrásnějších kulových hvězdokup severní oblohy složená z půl milionu hvězd.
10. **NGC 4565 (Jehla) ve Vlasech Bereniky:** Nejkrásnější spirální galaxie viděná přesně z boku s tenkou prachovou linkou.

2. Letní obloha (Srdce Mléčné dráhy a mlhovinový ráj)

V létě kulminuje stříbřitý pás Mléčné dráhy. Obloha hýří obřími emisními komplexy a zářícími plynnými závoji:

1. **Messier 8 (mlhovina Laguna) ve Střelci:** Obří emisní mlhovina s otevřenou hvězdokupou a temnými prachovými zářezy. Skvělá i pro začátečníky.
2. **Messier 20 (mlhovina Trifid) ve Střelci:** Unikátní kombinace červené emisní mlhoviny rozdělené třemi temnými rýhami a modré reflexní mlhoviny na severním okraji.
3. **Messier 16 (Orlí mlhovina) v Hadu:** Domov slavných „Sloupů stvoření“ – prstovitých prachových věží, kde se rodí nové hvězdy.
4. **Messier 17 (mlhovina Omega / Labuť):** Mimořádně jasná emisní mlhovina s vysokou povrchovou jasností.
5. **NGC 7000 (mlhovina Severní Amerika) a IC 5070 (Pelikán) v Labuti:** Gigantický komplex ionizovaného vodíku klenoucí se přes několik stupňů na obloze (ideální pro širokouhlé astrografy a duo-band filtry).
6. **Komplex Závoj (Veil Nebula – NGC 6960, 6992, Pickeringův trojúhelník):** Pozůstatek po explozi supernovy před 20 000 lety. Zářící vlákna kyslíku $[OIII]$ a vodíku $H\alpha$ tvoří fascinující kosmickou krajku.
7. **Messier 27 (Činka / Dumbbell) v Lištičce:** Nejjasnější planetární mlhovina na obloze, snadno zachytitelná i z města.
8. **Messier 57 (Prstenec v Lyře):** Klasický dýmkový prstýnek odhozeného plynu umírajícího bílého trpaslíka.
9. **IC 1396 (mlhovina Chobot slona) v Cefeji:** Obří cirkulární vodíkový mrak s temným prachovým globulem připomínajícím chobot.
10. **NGC 6888 (Srpková mlhovina / Crescent):** Horká Wolfova-Rayetova hvězda odvrhuje obálky plynu, které září jako kosmický mozek v obklopení kyslíkového závoje.

3. Podzimní obloha (Ostrovní vesmíry a prachová pole)

1. **Messier 31 (Velká galaxie v Andromedě) a M32/M110:** Naše nejbližší velká sousední galaxie. Rozpíná se přes šest zdánlivých průměrů Měsíce!
2. **Messier 33 (Galaxie v Trojúhelníku):** Třetí největší člen Místní skupiny galaxií s obřími zářícími vodíkovými oblaky (NGC 604).
3. **IC 1805 (mlhovina Srdce) a IC 1848 (Duše) v Kasiopěji:** Ikonická dvojice gigantických emisních mlhovin, ráj pro úzkopásmovou astrofotografii (SHO).
4. **NGC 869 a NGC 884 (Dvojitá hvězdokupa v Perseu – χ a h Persei):** Dvě oslnivé otevřené hvězdokupy jiskřící jako diamanty na černém sametu.

5. **Messier 45 (Plejády / Kuřátka) v Býku:** Otevřená hvězdokupa obklopená dechberoucími safírově modrými prachovými reflexními závoji.
 6. **NGC 7635 (mlhovina Bublina) v Kasiopeji:** Dokonalá sférická plynná bublina nafouknutá větrem masivní mladé hvězdy.
 7. **NGC 7331 a Stephanův kvintet v Pegasu:** Skupina pěti interagujících galaxií pro dlouhá ohniska.
 8. **IC 5146 (mlhovina Zámek / Kokon) v Labuti:** Červená emisní mlhovina na konci dlouhé temné prachové řeky Barnard 168.
 9. **Sh2-155 (Jeskynní mlhovina) v Cefeu:** Komplex prachu, reflexních a emisních mlhovin.
 10. **NGC 281 (mlhovina Pacman) v Kasiopeji:** Zářící vodíková bublina s temnými prachovými zářezy a Bokovými globulemi.
-

4. Zimní obloha (Monstrózní molekulární oblaky)

1. **Messier 42 a 43 (Velká mlhovina v Orionu):** Královna noční oblohy. Nejjasnější hvězdná porodnice viditelná i pouhým okem.
2. **Barnard 33 (mlhovina Koňská hlava) a NGC 2024 (Plamínek):** Slavná temná silueta koňské hlavy rýsující se proti zářící červené vodíkové stěně IC 434 u hvězdy Alnitak.
3. **NGC 2237 (mlhovina Roseta) v Jednorožci:** Kruhová mlhovina připomínající rozkvetlou růži s otevřenou hvězdokupou NGC 2244 uprostřed.
4. **Messier 1 (Krabí mlhovina) v Býku:** Expandující trosky po explozi supernovy zaznamenané čínskými astronomy v roce 1054 s pulzarem v srdci.
5. **IC 443 (mlhovina Medúza) v Blížencích:** Vlákňitý pozůstatek supernovy pro úzkopásmové filtry.
6. **NGC 2264 (Vánoční stromeček a Kuželová mlhovina) v Jednorožci.**
7. **Messier 78 v Orionu:** Nejjasnější difúzní reflexní mlhovina na obloze.
8. **Sh2-240 (mlhovina Špageta / Simeis 147) na pomezí Býka a Vozky:** Obrovský pozůstatek supernovy o průměru 3° tvořený extrémně slabými vlákny.
9. **NGC 1499 (mlhovina Kalifornie) v Perseu:** Obří červený vodíkový oblak ionizovaný nedalekou zářící hvězdou Menkhib.
10. **IC 2118 (mlhovina Hlava čarodějnice) v Eridanu:** Slabá modrá reflexní prachová mlhovina osvětlovaná nedalekým modrým veleobrem Rigelem.

Dodatek B: Astrofotografický tahák vzorců

Tento dodatek shrnuje nejdůležitější matematické a optické vztahy moderní astrofotografie na jednom místě pro rychlou referenci v terénu i u počítače.

1. Optické vztahy a geometrie zobrazení

Světelnost (f-ratio)

$$N = \frac{f}{D}$$

- f : ohnisková vzdálenost [mm]
- D : průměr apertury (vstupní pupily) [mm]

Osvětlenost ohniskové roviny pro plošné objekty

$$E \propto \left(\frac{D}{f}\right)^2 = \frac{1}{N^2}$$

Obrazové měřítko (Pixel Scale)

$$\text{Pixel Scale} \approx 206,265 \times \frac{p}{f} \approx 206,3 \times \frac{p [\mu\text{m}]}{f [\text{mm}]} \quad ["/\text{pixel}]$$

- p : fyzická velikost pixelu senzoru [μm]
- f : ohnisková vzdálenost [mm]

Zorné pole senzoru (Field of View – FOV)

$$\text{FOV} \approx 57,3 \times \frac{d}{f} \quad [^\circ]$$

nebo v minutách:

$$\text{FOV} \approx 3438 \times \frac{d}{f} \quad [']$$

- d : lineární rozměr senzoru (šířka, výška nebo úhlopříčka) [mm]

Difrakční mez rozlišení (Rayleighovo kritérium)

$$\theta_{\text{Rayleigh}} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad [\text{rad}] \approx \frac{138}{D [\text{mm}]} \quad ["] \quad (\text{pro } \lambda = 550 \text{ nm})$$

Dawesův limit (rozlišení těsných dvojhvězd)

$$\theta_{\text{Dawes}} \approx \frac{116}{D [\text{mm}]} \quad ["]$$

Hloubka kritické zóny zaostření (Critical Focus Zone – CFZ)

$$\text{CFZ} \approx 4,88 \times \lambda \times N^2$$

- Pro zelené světlo ($\lambda = 550 \text{ nm}$):

$$\text{CFZ} [\mu\text{m}] \approx 2,7 \times N^2$$

(Např. pro $f/4$ je $\text{CFZ} \approx 2,7 \times 16 \approx 43 \mu\text{m}$).

2. Senzory, vzorkování a šumová statistika**Vzorkovací kritérium (Nyquist–Shannon pro DSO)**

$$\text{Optimální Pixel Scale} \approx \frac{\text{Seeing FWHM}}{2 \text{ až } 3}$$

- Typický středoevropský seeing: $2,5'' \implies$ optimální měřítko $0,8''$ až $1,3''/\text{px}$.

Optimální světelnost pro planetární Lucky Imaging

$$N_{\text{opt}} \approx 5 \times p [\mu\text{m}]$$

(Např. pro $\text{pixel}/2,9 \mu\text{m}$ je $N_{\text{opt}} \approx f/14,5$).

Celkový šum surového snímku

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{read}}^2} = \sqrt{S + D_c \cdot t + R_n^2}$$

- S : signál světla [elektrony e^-]
- D_c : temný proud [$e^-/\text{px}/\text{s}$]
- t : expoziční čas [s]

- R_n : vyčítací šum [e^-]

Růst poměru signálu k šumu při integraci N snímků

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{tot} = \sqrt{N} \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{jednotlivý}$$

Dynamický rozsah senzoru (Dynamic Range)

$$DR = \frac{\text{Full Well Capacity}}{R_n}$$

$$DR_{[\text{dB}]} = 20 \cdot \log_{10}(DR)$$

$$DR_{[\text{EV}]} = \log_2(DR) \approx \frac{DR_{[\text{dB}]}}{6,02}$$

3. Expoziční časy v terénu

Moderní pravidlo NPF pro statické noční focení bez montáže

$$t_{\max} = \frac{35 \cdot N + 30 \cdot p [\mu\text{m}]}{f [\text{mm}]} \quad [\text{s}]$$

Posun ohniska tloušťkou filtru (Backfocus shift)

$$\Delta f \approx t_{\text{filtr}} \cdot \frac{n-1}{n} \approx \frac{1}{3} \cdot t_{\text{filtr}}$$

- Pro běžné sklo s indexem lomu $n \approx 1,5$ posouvá filtr o tloušťce 2 mm ohniskovou rovinu o +0,66 mm směrem ven.

Dodatek C: Troubleshooting Guide: Řešení nejčastějších chyb v praxi

Každý astrofotograf prochází fázemi, kdy věci nefungují podle plánu. Tento průvodce přináší okamžitou diagnostiku a řešení nejčastějších technických problémů, které vás mohou pod noční oblohou potkat.

1. Problémy s tvarem a ostrostí hvězd

Symptom: Hvězdy jsou ve středu ostré, ale ve všech čtyřech rozích se protahují radiálně (ven ze středu jako paprsky).

- **Příčina:** Vzdálenost senzoru od korektoru (Backfocus) je **příliš malá (senzor je příliš blízko)**.
- **Řešení:** Přidejte tenký distanční kroužek (0,5 až 1,0 mm) mezi korektor a kameru.

Symptom: Hvězdy v rozích tvoří soustředné obloučky (tangenciální protažení opisující střed).

- **Příčina:** Vzdálenost senzoru od korektoru je **příliš velká (senzor je příliš daleko)**.
- **Řešení:** Uberte podložky či distanční kroužky (zkrátte vzdálenost o 0,5 až 1,0 mm).

Symptom: Hvězdy jsou v jednom nebo dvou rozích perfektní, ale v protilehlých rozích jsou ošklivě rozmazané a protáhlé.

- **Příčina:** **Senzorový tilt (náklon čipu)** nebo vůle v okulárovém výtahu. Rovina senzoru není kolmá k optické ose.
- **Řešení:** Zkontrolujte dotažení všech šroubovaných spojů (vyhněte se levným pérovým přítlakům výtahu a používejte celozávitové M48/M54 redukce). Pokud je tilt v samotném uchycení čipu v kameře, použijte stavitelný kolimační přípravek (Tilter) s třemi páry stavěcích šroubků a software ASTAP pro změření úhlu náklonu.

Symptom: Všechny hvězdy v celém poli jsou rovnoměrně protáhlé v jednom směru (čárky).

- **Příčina:** Selhání sledování montáže nebo vypnutý autoguiding: * Pokud je protažení v **ose RA (východ–západ)**: Chyba periodického chodu montáže, příliš nízká agresivita guidingu, prokluzující řemínek. * Pokud je protažení v **ose DEC (sever–jih)**: Hrubá chyba polárního ustavení montáže.

2. Problémy s kalibrací a obrazovým pozadím

Symptom: Po aplikaci Flat snímků jsou rohy obrazu naopak extrémně přesvětlené (bílé) nebo jsou na místě prachových kroužků zářící bílé pupínky (překalibrování – overcorrection).

- **Příčina:** Špatný nebo chybějící **Bias (případně Flat-Dark)**! Z Flat snímku nebyl před dělením odečten elektronický offset, což způsobilo, že jmenovatel v kalibrační rovnici byl uměle příliš velký.
- **Řešení:** Zkontrolujte, zda proces kalibrace odečítá Master Bias od Master Flatu před aplikací na Light snímky.

Symptom: V pozadí snímku se objevují pravidelné šikmé pruhy a barevný „déšť“ (Walking Pattern Noise).

- **Příčina: Absence ditheringu!** Během noci montáž nepatrně driftovala a fixní šum pixelů senzoru vytvořil pruhy.
- **Řešení:** V řídicím softwaru (N.I.N.A., ASIAIR, PHD2) zapněte **Dithering** (náhodný posun o 5 až 10 pixelů každé 1 až 2 expozice).

Symptom: Kolem jasných hvězd vznikají obří duhová či tmavá kruhová hala.

- **Příčina:** Vnitřní odraz světla mezi krycím sklem senzoru a úzkopásmovým filtrem (častý problém starších levných filtrů, např. na emisní čáře kyslíku [*OIII*]).
- **Řešení:** Používejte moderní filtry s antireflexními vrstvami nanesenými až k samému okraji skla bez kovové objímky (např. Antlia Pro, Chroma, Baader CMOS-Optimized).

3. Problémy s hardwarem a softwarem v terénu

Symptom: PHD2 hlásí chybu „Star lost“ a ztrácí pointační hvězdu.

- **Příčina:** Rosení pointačního objektivu, přechod vysoké oblačnosti, nebo příliš krátká expozice pointace (0,5 s v turbulentním seeingu způsobuje prudké skoky centroidu).
- **Řešení:** Nasad'te vyhřívací pásek i na pointační dalekohled a prodlužte expoziční čas pointace na **1,5 až 2,5 sekundy**.

Symptom: Po meridiánovém obratu (Meridian Flip) se autoguiding zblázní a montáž ujede nekontrolovaně pryč.

- **Příčina:** V nastavení programu PHD2 chybí zaškrtnutí volby „**Reverse Dec output after meridian flip**“ (Otočit směr deklinace po meridiánovém obratu). Po překlopení dalekohledu míří osa deklinace opačným směrem, takže montáž namísto opravy chybu naopak zvětšovala!

Dodatek D: Encyklopedický slovník moderní astrofotografie

Tento slovník definuje více než 50 stěžejních pojmů, zkratk a technologií, se kterými se v moderní astrofotografii a digitálním zpracování obrazu setkáte.

A

- **ADC (Atmospheric Dispersion Corrector):** Optický prvek se dvěma otočnými klínovými hranoly eliminující barevné rozštěpení světla planet způsobené lomem v zemské atmosféře.
- **ADU (Analog-to-Digital Units):** Digitální celočíselná jednotka reprezentující kvantovanou hodnotu elektrického náboje pixelu po průchodu A/D převodníkem.
- **Airglow (Vzdušné záření):** Přirozená slabá chemiluminiscence zemské atmosféry (ve výškách 90 až 300 km) způsobující nazelenalé či načervenalé vlnění na širokoúhlých nočních snímcích.
- **Airyho disk:** Centrální kruhová světelná ploška difrakčního obrazce bodové hvězdy vytvořená kruhovou aperturou dalekohledu. Její úhlový poloměr činí $\theta = 1,22 \lambda / D$.
- **Apochromát (APO):** Čočkový objektiv složený ze 3 a více členů s nízkým rozptylem světla (ED skla), který soustředí uje tři různé vlnové délky (červenou, zelenou, modrou) do jediného společného ohniska.
- **Arcsinh Stretch:** Nelineární matematické roztažení histogramu založené na funkci inverzního hyperbolického sinu, které striktně zachovává barevné poměry (saturaci) hvězd a mlhovin.
- **Autoguiding (Pointace):** Uzavřená regulační smyčka, v níž pomocná kamera sleduje referenční hvězdu a v reálném čase vysílá korekční pulzy do motorů montáže k eliminaci mechanických chyb chodu.

B

- **Backfocus:** Přesná mechanická vzdálenost od zadního závitu korektoru (rovnače pole, reduktoru) k rovině křemíkového senzoru kamery (průmyslovým standardem je typicky 55 mm).
- **Bahtinova maska:** Mřížka s přesnými štěrbinami nasazovaná na tubus objektivu, která na jasné hvězdě vytvoří difrakční kříž pro dokonalé manuální zaostření.
- **Bayerova maska (CFA):** Mozaika mikroskopických barevných filtrů (typicky v uspořádání RGGB) nanesená přímo na pixely barevného senzoru.
- **Bias frame (Offset frame):** Kalibrační snímek pořízený v naprosté temnotě s nejkratším možným expozičním časem, měřící základní vyčítací šum elektroniky.

- **Binning:** Hardwarové nebo softwarové sloučení náboje sousedních pixelů (např. 2×2 binning spojí 4 pixely do jednoho), zvyšující citlivost a S/N za cenu ztráty prostorového rozlišení.
- **Bortleova stupnice:** Devítistupňová škála kvality noční oblohy od Bortle 1 (dokonalá temnota) po Bortle 9 (silně přesevěcené centrum velkoměsta).
- **BSI (Back-Illuminated):** Konstrukce CMOS senzoru se zadním osvitem, kde světlo dopadá na křemíkový plátek přímo bez stínění kovovými sběrnými, dosahující kvantové účinnosti přes 90 %.

C

- **CFZ (Critical Focus Zone):** Hloubka ostrosti optické soustavy, uvnitř níž je rozostření menší než difrakční Airyho disk.
- **Cirkumpolární hvězdy:** Hvězdy, které v důsledku své blízkosti k nebeskému pólu nikdy nezapadají pod obzor daného pozorovacího místa.
- **CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor):** Moderní polovodičová technologie obrazových snímačů s aktivními tranzistory a A/D převodníky přímo v každém pixelu.
- **Collimation (Kolimace):** Mechanické a optické seřízení os všech zrcadel a čoček v dalekohledu do jedné společné přímky.
- **Coma (Koma):** Asymetrická geometrická optická vada parabolických zrcadel, která mění bodové hvězdy mimo optickou osu na tvary připomínající vějířky či komety.

D

- **Dark frame (Temný snímek):** Kalibrační snímek pořízený se zakrytou optikou se stejným časem, ziskem a teplotou jako vědecké snímky Light, sloužící k odečtení tepelného šumu a hot-pixelů.
- **Debayering (Demosaicing):** Matematický algoritmus převádějící surová mozaiková data z Bayerovy masky na plnohodnotný tříkanálový barevný RGB obraz.
- **Deconvolution (Dekonvoluce):** Reverzní matematická operace odstraňující rozptyl způsobený optikou a atmosférou (PSF) pro zaostření detailů.
- **Dithering:** Záměrný náhodný mikroskopický posun dalekohledu o několik pixelů mezi expozicemi, který umožňuje při skládání zcela vymazat pruhový šum a defektní pixely.
- **Drizzle:** Algoritmus obnovy prostorového rozlišení z podvzorkovaných dat promítnutím zmenšených pixelů do jemnější výsledné mřížky.
- **Dynamic Range (Dynamický rozsah):** Poměr mezi maximálním měřitelným signálem (kapacitou pixelu) a nejmenším detekovatelným signálem (vyčítacím šumem).

E

- **Etalon (Fabry–Pérot):** Vysoce přesný optický rezonátor tvořený dvěma rovnoběžnými polopropustnými deskami, využívaný v solárních dalekohledech pro zúžení propustnosti na zlomky Ångströmu v čáře $H\alpha$.

F

- **Flat frame (Snímek plochého pole):** Kalibrační snímek rovnoměrně osvětlené bílé plochy sloužící k matematickému odstranění vinětace objektivu a prachových stínů na optice.
- **FWHM (Full Width at Half Maximum):** Šířka profilu jasu hvězdy v polovině jeho maximální výšky, vyjádřená v pixelech nebo obloukových vteřinách; základní měřítko ostrosti a seeingu.

G

- **Gain (Zisk):** Zesílení analogového signálu před digitalizací, udávající konverzní faktor mezi počtem zachycených elektronů a digitální jednotkou ADU (e^- / ADU).
- **GHS (Generalized Hyperbolic Stretch):** Pokročilý matematický algoritmus nelineárního roztažení histogramu umožňující precizní zacílení na specifické tónové úrovně bez přepálení hvězd.

H

- **H-alfa ($H\alpha$):** Dominantní červená emisní čára neutrálního atomu vodíku na vlnové délce 656,28 nm (přechod elektronu z 3. na 2. hladinu).
- **HFD (Half Flux Diameter):** Průměr kruhu soustředěujícího přesně 50 % celkového světelného toku hvězdy; základní metrika pro automatické motorové zaostřování.
- **Hubbleova paleta (SHO):** Úzkopásmová barevná syntéza mapující Síru [SII] do červené, Vodík $H\alpha$ do zelené a Kyslík [$OIII$] do modré barvy.

K

- **Kappa-Sigma Clipping:** Statistická metoda odmítání vadných pixelů při skládání, která vylučuje hodnoty ležící mimo násobek směrodatné odchylky od mediánu (odstraňuje stopy satelitů a kosmického záření).

L

- **Light frame:** Surový vědecký snímek zachycující světlo fotografovaného nebeského objektu.
- **Lucky Imaging:** Technika vysokorychlostního snímání tisíců expozic za sekundu (pro planety a Měsíc) s následným výběrem a složením pouze těch nejostřejších zlomků času nepostížených seeingem.

M

- **Meridian Flip (Meridiánový obrat):** Přetočení německé paralaktické montáže o 180° při průchodu objektu místním poledníkem (meridiánem), které brání mechanické kolizi dalekohledu se stativem.

N

- **Nyquistův teorém:** Teorie vzorkování stanovující, že pro zachování plného prostorového rozlišení musí být nejmenší optický detail vzorkován alespoň dvěma až třemi pixely.

O

- **OAG (Off-Axis Guider):** Zařízení s malým hranolkem na okraji optického traktu před hlavní kamerou, umožňující pointaci přes stejný dalekohled bez diferenciálního průhybu.
- **OIII ([OIII]):** Tyrkysová emisní čára dvakrát ionizovaného atomu kyslíku na vlnové délce 500,68 nm.

P

- **PCC / SPCC:** Fotometrická / Spektrofotometrická kalibrace barev korigující vyvážení bílé na základě reálných astrometrických databází hvězd (družice Gaia).
- **Peltierův článek:** Polovodičový termoelektrický chladič, který na základě Peltierova jevu odvádí teplo z křemíkového čipu kamery na vnější chladič.
- **Pixel Scale (Obrazové měřítko):** Úhlová velikost oblohy promítnutá na jeden pixel senzoru, vyjádřená v obloukových vteřinách na pixel ($''/\text{px}$).
- **Plate Solving:** Blesková astrometrická identifikace hvězdného pole porovnáním snímku s katalogem hvězd pro určení přesných nebeských souřadnic středu pole.

Q

- **QE (Quantum Efficiency – Kvantová účinnost):** Procentuální podíl dopadajících fotonů dané vlnové délky, které vygenerují zachycený elektron v křemíkovém pixelu.

R

- **Readout Noise (Vyčítací šum):** Šum vznikající v zesilovačích a A/D převodníku při čtení elektrického náboje z pixelu, nezávislý na délce expozice.

S

- **Seeing:** Rychlá časová a prostorová proměnlivost indexu lomu zemské atmosféry v důsledku tepelných turbulencí, způsobující chvění a rozmazání obrazu hvězd.
- **SER:** Bezeztrátový surový formát videozáznamu používaný v planetární a solární astronomii.

- **SII** ($[SII]$): Emisní čára ionizované síry na vlnových délkách **671,6 nm** a **673,1 nm**.
- **Starless**: Obraz, z něhož byly pomocí umělé inteligence (neuronových sítí) kompletně odstraněny všechny hvězdy, což umožňuje nezávislé zpracování mlhoviny.

T

- **Tilt (Senzorový náklon)**: Odchylka roviny čipu kamery od kolmice k optické ose dalekohledu, projevující se asymetrickou neostrostí v protilehlých rozích snímku.