

# Určení svítivosti OJ 287

F3190: Praktikum z astronomie 1  
Artem Gorodilov

22. června 2024

## 1. Abstrakt

V této práci jsme analyzovali pozorování OJ 287 ve filtru B. Analyzovali jsme jeden OBS-ID s dobou expozice 120 s. Pomocí Pogsonova zákona jsme zjistili svítivost objektu v magnitudách. A z počtu detekovaných fotonů z objektu jsme vypočítali světelný proud, ze kterého jsme získali svítivost v erg/s. Ze snímků jsme vybrali hvězdy 4, 10 a 11, viz. obr(1), pro které jsme provedli výpočty jasnosti, které byly následně použity k výpočtu zdánlivé hvězdné velikosti OJ 287.

Výpočty jsme se snažili provádět automatizovanou metodou pomocí pythonové pipeline.

## 2. Teorie

### 2.1. Pogsonův zákon

Pogsonův zákon je metoda používaná pro kalibraci magnitudy objektu na základě každého srovnávacího objektu je základní formou diferenciální fotometrie. Při diferenciální fotometrii se magnituda cílového objektu určuje vzhledem k jedné nebo více srovnávacím objektům se známou magnitudou. Tento přístup pomáhá zmírnit vliv atmosférických změn, změn citlivosti přístrojů a dalších faktorů, které mohou ovlivnit pozorovanou jasnost nebeských objektů. Vztah mezi jasností a hvězdnou velikostí je dán Pogsonovým zákonem:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \quad (1)$$

kde  $m_1$  a  $m_2$  jsou hvězdné velikosti dvou objektů a  $I_1$  a  $I_2$  jsou jejich jasnosti.

### 2.2. Tok a svítivost

Světelný tok je fyzikální veličina, která udává množství světla emitovaného nebo procházejícího plochou za jednotku času. Světelný tok se měří v jednotkách W/s nebo erg/s/m<sup>2</sup>

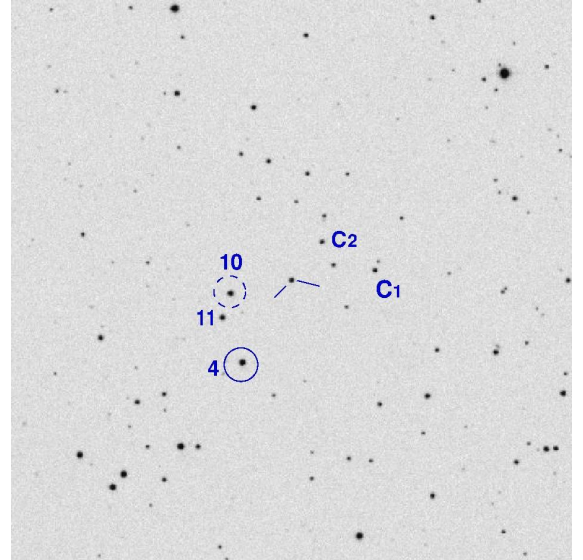


Figure (1) Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl 0851+203 (OJ 287)

Světelný tok lze vypočítat z počtu fotonů  $N$  detekovaných během expoziční doby  $T$ , průměru hlavního zrcadla dalekohledu  $d$  a vlnové délky  $\lambda$  odpovídající použitému filtru podle vzorce:

$$F = \frac{Nhc}{\lambda T 4\pi d^2} \quad (2)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta a  $c$  je rychlost světla. Svítivost je fyzikální veličina, která udává množství světla, které vydává nebo odráží těleso. Svítivost se měří v jednotkách W nebo erg/s ( $1 \text{ W} = 10^7 \text{ erg/s}$ ). Svítivost lze vypočítat z vztahu mezi svítivostí a světelným tokem:

$$L = 4\pi D^2 F \quad (3)$$

kde  $D$  je vzdálenost mezi pozorovatelem a objektem.

## 3. Zpracování dat

### 3.1. Popis paipelinu

Analyzovali jsme snímek oblohy v okolí OJ 287 pořízený 30.04.2024 v 19:51 UT. Pozorování bylo provedeno v observatoři v Vyškově.

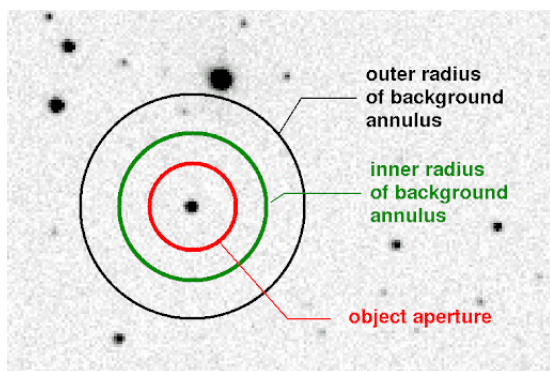


Figure (2) Vizualizace apertury a prstence pro výpočet jasnosti hvězdy.

K dispozici máme hvězdné velikosti tří hvězd (4, 10 a 11), se kterými budeme porovnávat změnu jasnosti proměnné hvězdy, viz. obr.(1).

Pro automatizaci analýzy jsme použili pipeline, která zpracovává data pomocí knihoven: photutils a astropy.

Algoritmus pipeline je rozdělen do tří kroků:

1. Kalibrace obrazu vytvořením master bias, master dark a master flat obrazů. Poté provedeme korekci analyzovaného snímku, abychom získali čistý světelný proud objektů.
2. Určení svítivosti na základě analýzy snímku .fits, kde na vybrané oblasti obrázku bude zkonstruována apertura a prstenec o určitých poloměrech viz. obr.(2), poté pomocí funkce `measure_brightness()` vypočítáme jasnost vybraných hvězd pro každý obrázek. Poté pomocí Pogsonova zákona vypočítáme hvězdnou velikost proměnné hvězdy a sestojíme její světelnou křivku pro případy porovnání se třemi hvězdami zvlášť.
3. Výpočet svítivosti objektu na základě počtu detekovaných fotonů z objektu a výpočtu světelného toku a svítivosti podle vzorců (2) a (3).

### 3.2. Kalibrace snímku

Pro fungování pipeline je třeba zadat název objektu, se kterým pracujete, a filtr, ve kterém bylo pozorování provedeno:

```

1 # Define the object and filter
2
3 object = 'OJ_287'
4 filter = 'B'

```

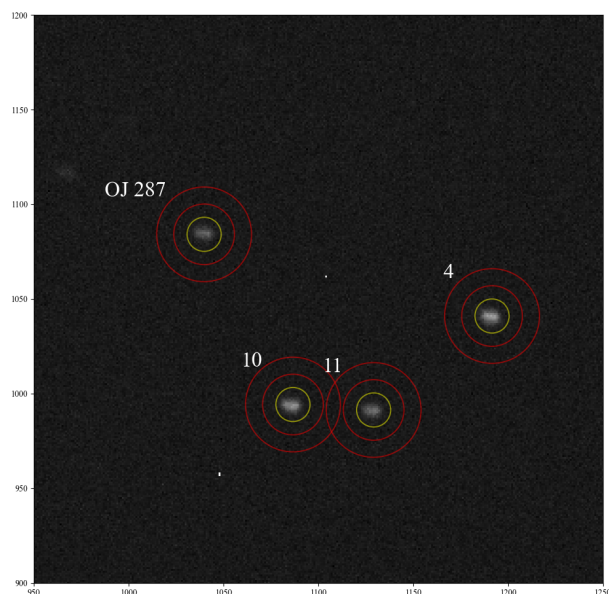


Figure (3) Apertura a prstenec pro výpočet jasnosti OJ 287.

Pro kalibraci snímku jsme vytvořili master bias, master dark a master flat obrazy. Master bias byl vytvořen z 30 bias snímků, master dark z 8 dark snímků a master flat z 13 flat snímků v B-filtru.

K vytvoření master snímku jsme použili funkci `create_master_frame()`. Pro bias a flat bereme střední hodnotu `np.mean()` a pro dark hodnotu bereme medián `np.median()`.

Ke kalibraci obrazu jsme použili funkci `apply_calibration()`. Tato funkce provede kalibraci původního (znečištěného) snímku podle vzorce:

$$\text{calib} = \frac{\text{orig} - \text{bias} - \text{dark}}{\text{flat}} \times \text{flat\_median} \quad (4)$$

kde orig je původní snímek, bias je master bias, dark je master dark, flat je master flat a flat\_median je medián master flat.

Výsledkem bude kalibrovaný snímek a tři master snímky. Výsledek je vidět na obrázku (5).

### 3.3. Určení svítivosti v magnitudách

Pro určení svítivosti objektu použijeme funkci `measure_brightness()`, která vytvoří apertury a prstenec kolem vybraných hvězd a vypočítá jejich jasnost.

Určete polohy [x,y] v px pro tři hvězdy se známou hvězdnou velikostí (4, 10, 11) a polohu objektu (OJ 287) a poté tyto hodnoty vložte do proměnné position. Nastavte poloměr apertury, vnitřní poloměr prstence a vnější poloměr prstence tak, že je vložíte do proměnných, `aperture_radius`, `annulus_inner_radius` a `annulus_outer_radius`.

V našem případě jsme zvolili hodnoty 9, 16 a 25 resp. Do proměnné `mag_comparisons` zapíšeme magnitudy nám známých hvězd ve stejném pořadí jako v `position`.

Z LHK<sup>[1]</sup> jsme zjistili svítivosti srovnávacích hvězd:

Hvězda	B [mag]
4	15.01(6)
10	15.01(5)
11	15.47(7)

Dále pro každý snímek určíme jasnost těchto hvězd pomocí funkce `measure_brightness()`, která kolem vybraných hvězd sestaví apertury a anuly a pomocí fotometrických výpočtů vrátí jasnosti těchto hvězd, viz. obr.(3).

Posledním krokem bude výpočet magnitudy objektu pomocí Pogsonova zákona podle vzorce (1), kde  $m_1$  bude náš objekt a  $m_2$  hvězda se známou hvězdnou velikostí.

### 3.4. Určení svítivosti v erg/s

Pro výpočet svítivosti  $L$  jsme použili funkci `luminosity()`, která vypočítá svítivý proud podle vzorce (2) a poté vypočítá svítivost podle vzorce (3). Počet detekovaných fotonů je uložen v prvku seznamu `net_brightness[-1]`.

Pro výpočty potřebujeme hodnoty průměru hlavního zrcadla dalekohledu  $d = 0.5$  [m], vzdálenost k objektu  $D$ , kterou získáme ze známého červeného posuvu  $z = 0.306$ <sup>[5]</sup> pomocí funkce `redshift_to_distance()` pro převod červeného posuvu na [m], a vlnovou délku filtru, kterou použijeme  $\lambda_B = 440$  [nm].

## 4. Výsledky

Po výpočtech jsme získali následující hodnotu svítivosti OJ 287:

$$m_B = 15.6(2) \text{ [mag]}$$

Pro porovnání našich výsledků s literaturou jsme použili práci (M.-P. Véron-Cetty - P. Véron, 2010)<sup>[2]</sup>. V ní byla svítivost ve filtru B odhadnuta na 15.91 [mag]. Námi získaná hodnota se tedy odchyluje o 0.3(2) [mag]. Získali jsme také velikost zářivého toku:

$$F = 1.2(1) \times 10^{-9} \text{ [erg/s/cm}^2\text{]}$$

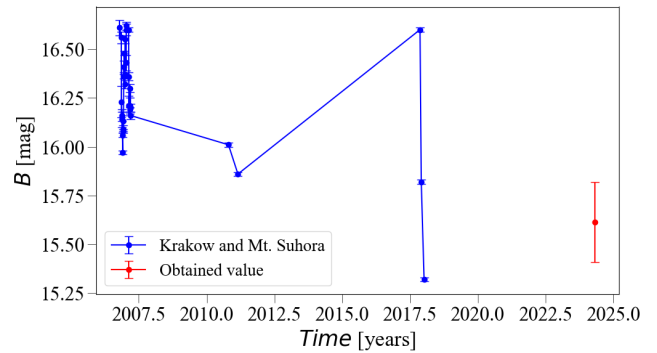


Figure (4) Světelná křivka OJ 287 ve filtru B.

a svítivost:

$$L = 2.2(2) \times 10^{43} \text{ [erg/s]} = 5.8(6) \times 10^9 L_{\odot}$$

Je však třeba vzít v úvahu, že zdroj OJ 287 je proměnlivý vzhledem ke konfiguraci systému<sup>[3]</sup>. Ve filtru B je pozorována proměnlivost v intervalu 30 h<sup>[4]</sup>. Jiné práce<sup>[5]</sup> vykazují variabilitu v delším časovém intervalu. To je patrné z obrázku (4).

## 5. Závěr

Námi odvozená hodnota svítivosti objektu OJ 287 15.6(2) [mag] souhlasí s literárními údaji 15.91 [mag] a má odchylku 0.3(2) mag. Tato odlišnost může být způsobena jednak nepříliš přesnými měřeními, protože byla prováděna za ne zrovna ideálních povětrnostních podmínek, a také tím, že místo pozorování bylo nevýznamně vzdáleno od civilizace. Je třeba si uvědomit, že údaje z literatury nejsou aktuální, protože se nepodařilo najít žádné novější pozorování OJ 287 ve filtru B.

Svítivost OJ 287 byla určena na  $L = 2.2(2) \times 10^{43}$  [erg/s] =  $5.8(6) \times 10^9 L_{\odot}$ . Tato hodnota je v souladu s (Sillanpää., Haarala., et al. 1988)<sup>[6]</sup>, které uvádějí hodnoty v rozmezí  $10^{44}$  [erg/s] -  $10^{47}$  [erg/s]. Tento rozdíl je opět způsoben zvláštnostmi systému a jeho proměnlivostí v důsledku procesů, které v něm probíhají.

K výpočtu veličin a jejich nejistot byla použita knihovna `Uncertainties` pro Python<sup>[7]</sup>. Chyby byly rozšířeny o Studentův koeficient (2-Tail Confidence Level) s ohledem na stupně volnosti pro každou hodnotu, pro interval spolehlivosti 68.27%.

Script je dostupný na [github.com/PoruchikRzhevsky/photometry\\_pipeline](https://github.com/PoruchikRzhevsky/photometry_pipeline).

## Odkazy

- [1] Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl OJ287. Available online: <https://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/jheidt/spm/target/oj287/oj287.html>
- [2] M.-P. Véron-Cetty - P. Véron, A Catalogue of Quasars and Active Nuclei: 13th edition, *Astronomy & Astrophysics* 518, A10 (2010) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014188>
- [3] Britzen, Silke, Zajaček M., et al. Precession-induced Variability in AGN Jets and OJ 287. *The Astrophysical Journal*, Volume 951, Issue 2, id.106, 38 pp. (2023) [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2023ApJ...951..106B/doi:10.3847/1538-4357/acbbbc](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023ApJ...951..106B/doi:10.3847/1538-4357/acbbbc)
- [4] Prince, Raj, et al. Multiwavelength analysis and modeling of OJ 287 during 2017-2020. *Astronomy Astrophysics*, Volume 654, id.A38, 14 pp. (2021) [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2021A&A...654A..38P/doi:10.1051/0004-6361/202140708](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2021A&A...654A..38P/doi:10.1051/0004-6361/202140708)
- [5] Valtonen, Mauri J., et al. Host galaxy magnitude of OJ 287 from its colours at minimum light. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 514, Issue 2, pp.3017-3023 (2022) [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2022MNRAS.514.3017V/doi:10.1093/mnras/stac1522](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2022MNRAS.514.3017V/doi:10.1093/mnras/stac1522)
- [6] Sillanpää, A., Haara, S., et al. OJ 287: Binary Pair of Supermassive Black Holes. *Astrophysical Journal* v.325, p.628 (1988) [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/1988ApJ...325..628S/doi:10.1086/166033](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1988ApJ...325..628S/doi:10.1086/166033)
- [7] Uncertainties, Dostupné online: <https://pypi.org/project/uncertainties>

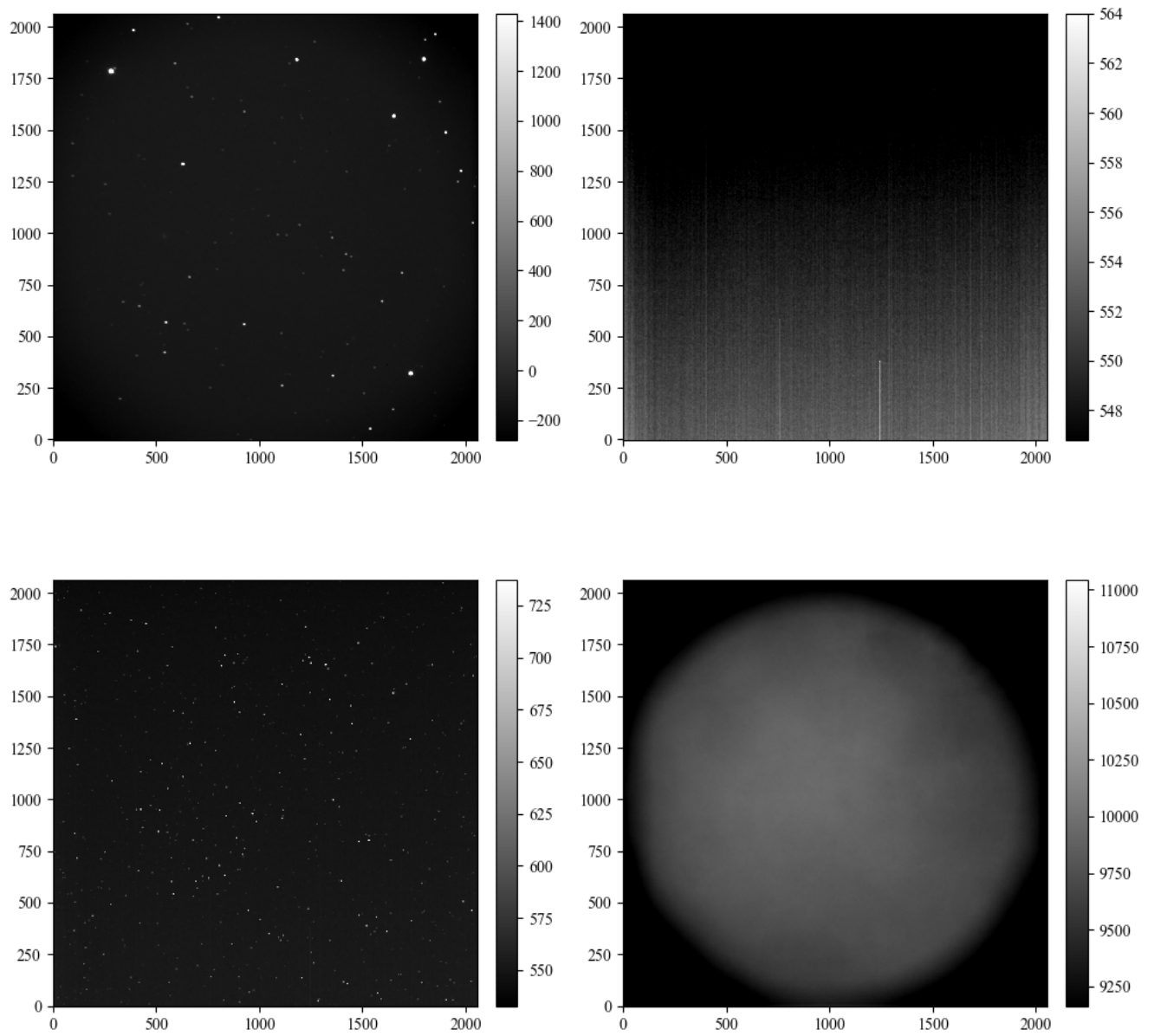


Figure (5) Kalibrovaný snímek (vlevo nahoře), master bias (vpravo nahoře), master dark (vlevo dole), master flat (vpravo dole).