
ROYGBIV¹

F4191: Praktikum z astronomie 2

Artem Gorodilov

13. února 2025



Obrázek (1) Sombrero Galaxy (M104).
Source: Messier 104

1. Abstrakt

V této práci jsem zkombinoval metody ze svých dvou předchozích prací: Určení svítivosti OJ 287 a Pink Floyd, pro vytvoření barevných snímků objektů: M51, M57, M97 a M104.

Výpočty byly provedeny pomocí skriptu v Pythonu PoruchikRzhevsky.

2. Fyzika záření

2.1. M104 (Sombrero Galaxy)

Galaxie M104 (Sombrero) vykazuje v optickém spektru emisní čáry charakteristické pro nízkoionizované atomy, což naznačuje přítomnost nízkoionizující oblasti v jejím jádru (LINER). Tento typ spektra je často spojován s aktivitou slabých aktivních galaktických jader (AGN) nebo s procesy spo-

jenými se vznikem hvězd.

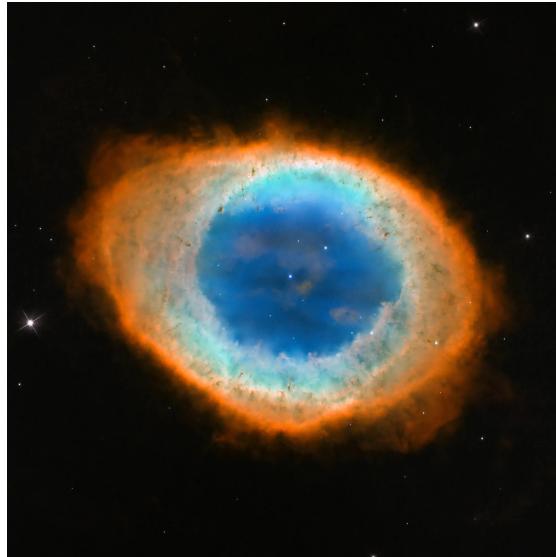
Analýza dat z přístroje MUSE na dalekohledu VLT odhalila přítomnost molekulárního prstence v M104, který je detekován prostřednictvím emisí čar H α a [CII] Sutter and Fadda [2022]. Tyto emise jsou distribuovány v uzlech podél prstence, což naznačuje omezenou aktivní tvorbu hvězd v této oblasti. Poměr [CII]/FIR v M104 je výrazně nižší než u typických hvězdotvorných galaxií a spíše odpovídá hodnotám pozorovaným u raných typů galaxií. To naznačuje, že většina emisí [CII] pochází z ionizovaného a neutrálního atomárního plynu spíše než z molekulárního plynu.

V blízkosti jádra galaxie byla identifikována prachová struktura interpretovaná jako torus nebo disk, který může kolimovat emise z aktivního galaktického jádra Meñezes et al. [2013]. Tato struktura je orientována přibližně hranou k pozorovateli, což naznačuje, že pozorované emise mohou být ovlivněny jak kolimací, tak rozptylem světla v okolí jádra.

Kromě optických emisí M104 vykazuje také emise v infračerveném spektru, které jsou spojeny s přítomností prachových částic v galaxii. Modelování těchto emisí naznačuje, že část prachu je distribuována v klastrech bez přítomnosti embedded zdrojů, což může přispívat k pozorovanému spektru v infračervené oblasti De Looze et al. [2012].



Obrázek (2) Owl Nebula (M97). Source: Messier 97: Owl Nebula



Obrázek (3) Ring Nebula (M57). Source: Messier 57

Celkově lze říci, že emise v galaxii M104 jsou výsledkem kombinace procesů spojených s aktivním galaktickým jádrem, omezenou tvorbou hvězd v molekulárním prstenci a přítomností prachových struktur, které ovlivňují pozorované spektrum v různých vlnových délkách.

2.2. M97 (Owl Nebula)

Mlhovina M97 (Sova) je planetární mlhovina v souhvězdí Velké medvědice, známá svým charakteristickým kruhovým tvarom a komplexní strukturou. Její optická emise je primárně výsledkem rekombinace ionizovaného vodíku, což vede k výrazné H α emisní linii. Tento proces nastává, když ultrafialové záření z centrální hvězdy ionizuje okolní plyn; následná rekombinace protonů a elektronů pak vyzařuje fotony v optickém spektru.

Kromě H α linie jsou v optickém spektru M97 přítomny i emisní linie dalších prvků, jako je kyslík a dusík. Zejména dvojitě ionizovaný kyslík (O III) produkuje výrazné emisní linie při 4959 \AA a 5007 \AA , které jsou běžné v planetárních mlhovinách a indikují

přítomnost oblastí s vyššími teplotami a hustotami Fesen et al. [2024].

V jiných vlnových délkách, jako je infracervené a rádiové spektrum, může M97 vyzkakovat emise spojené s chladnějším prachem a molekulárním plymem. Studium těchto emisí poskytuje komplexnější pohled na fyzikální podmínky a chemické složení mlhoviny.

2.3. M57 (Ring Nebula)

M57 (Prstencová mlhovina) je klasickým příkladem planetární mlhoviny, která vznikla v závěrečných fázích vývoje hvězdy podobné Slunci. Centrální hvězda odvrhla své vnější vrstvy, čímž vytvořila expandující obálku ionizovaného plynu. Optické záření mlhoviny je primárně výsledkem rekombinace a následné emise fotonů z ionizovaných prvků, jako je vodík, helium, kyslík a dusík. Například dvojitě ionizovaný kyslík (O III) emituje charakteristické zelené světlo o vlnové délce 5007 \AA , což je vý-

znamný rys ve spektru mnoha planetárních mlhovin Barker [1987].

Kromě optického záření byla v M57 detekována i emise molekulárního vodíku (H_2) v infračervené oblasti spektra van Hoof et al. [2010]. Tato emise pochází z fotodissociacních oblastí (PDR), kde ultrafialové záření centrální hvězdy interaguje s neutrálním plynem, což vede k excitaci a následné emisi H_2 . Pozorování pomocí Herschelova vesmírného dalekohledu odhalila, že distribuce prachu v mlhovině úzce souvisí s emisí H_2 , což naznačuje, že molekulární vodík se formuje na povrchu prachových částic.

Studie středně infračervené spektroskopie pomocí Spitzerova vesmírného dalekohledu identifikovaly v M57 rotační přechody H_2 , což umožnilo odhadnout excitační teplotu molekulárního vodíku kolem 900K Mata et al. [2016]. Tyto výsledky poskytují důležité informace o fyzikálních podmínkách v mlhovině a o procesech formování molekul v pozdních fázích hvězdného vývoje.

2.4. M51 (Whirlpool Galaxy)

V optickém spektru je emise v galaxii M51 (známé též jako Vírová galaxie) dominována zářením mladých, hmotných hvězd, které se nacházejí především ve spirálních ramenech. Tyto oblasti jsou bohaté na mladé hvězdokupy a oblasti ionizovaného vodíku (H II regiony), kde intenzivní ultrafialové záření z nově vzniklých hvězd ionizuje okolní mezihvězdný plyn, což vede k následné rekombinaci a emisi ve viditelném spektru. Studie mladých masivních hvězdokup v M51 ukazují na významnou populaci těchto objektů, které přispívají k celkové optické svítivosti galaxie Larsen [2000].

V rádiové oblasti spektra je emise M51 charakterizována synchrotronovým zářením, které vzniká při pohybu relativistic-



Obrázek (4) Whirlpool Galaxy (M51).
Source: M51 Hubble Remix

kých elektronů v magnetickém poli galaxie. Polarizované rádiové emise byly detekovány napříč celým diskem M51, přičemž vzor magnetických siločar sleduje optická spirální ramena. Pozorování na frekvencích 1.47 a 1.67GHz odhalila, že distribuce polarizované emise je silně ovlivněna Faradayovou depolarizací, což naznačuje, že polarizovaná emise pochází z horní vrstvy disku, jelikož galaxie není na těchto frekvencích pro polarizovanou emisi transparentní Mulcahy et al. [2014].

V rentgenovém spektru byla v centrální oblasti M51 detekována emise, která je spojována s aktivním galaktickým jádrem (AGN). Pozorování odhalila bipolární výtoky, které interagují s okolním mezihvězdým médiem a vedou k jeho ohřevu na teploty emitující rentgenové záření Liu and Mao [2015]. Spektrální analýzy naznačují, že v těchto oblastech může docházet k procesům, jako je rekombinující plazma nebo nárazová excitace, což přispívá k pozorované rentgenové emisi.

3. Zpracování dat

V práci (Určení svítivosti OJ 287) jsem testoval algoritmus pro čištění fits snímku s použitím bias, dark a flat snímků (pro BVR filtry). V práci (Pink Floyd) jsem testoval algoritmus pro korekci barev a kombinaci několika snímků ve filtroch BVR pro jejich převod na snímky sRGB. Části kódu provádějící tyto funkce byly převzaty z příslušných prací a převedeny na funkce zpracování obrazu pro tuto úlohu.

Jediným podstatným rozdílem je přidání metody pro určení bílého bodu. V práci (Pink Floyd) byl zahrnut proces korekce bílého bodu, který vyžadoval nalezení bodu v obraze, který je v případě původního (pravého) obrazu skutečně bílý. V případě pla-

kátu Pink Floyd to byla část světla, která vstupuje do hranolu. V případě obrázků neseských objektů je situace o něco složitější. Nelze jednoznačně říci, co považovat za bílou barvu, a to ani u původního barevného obrázku. Proto jsem použil následující automatizovaný algoritmus pro určení bodu (hvězdy) s barvou, kterou lze na snímku brát jako bílou.

Algoritmus funguje takto:

1. V původních snímcích BVR jsou všechny hvězdy nad určitou úrovní thresholdu nalezeny pomocí funkce `find_stars()`.
2. Hvězdy jsou porovnány podle souřadnic pro každý snímek pomocí funkce `match_stars()`, aby bylo zajištěno, že nalezená hvězda je viditelná na všech třech snímcích a nachází se na stejném místě.
3. Následuje výpočet indexu $B - V$ pro každou hvězdu. To se provede spuštěním funkce `colour_images()`.
4. Poté je nalezena hvězda s indexem $B - V$ blízkým nule, která odpovídá bílé barvě.

Jde o to, že hvězdy třídy A0V mají $B - V \approx 0$, které lze považovat za bílé. Magnitudy v odpovídajících filtroch se vypočítají jako:

$$m_{\text{filter}} = -2.5 \log_{10}(F_{\text{filter}}) \quad (1)$$

Instrumentální index $(B - V)_{\text{inst}}$ se vypočítá jako:

$$(B - V)_{\text{inst}} = m_B - m_V \quad (2)$$

Pro dosažení lepších výsledků je také nutná korekce Zero-Point:

$$(B - V)_{\text{corr}} = (B - V)_{\text{inst}} + ZP \quad (3)$$

Pro svá data však nemám k dispozici údaje o přesné hodnotě korekce Zero-Point, takže používám pouze index $(B - V)_{\text{inst}}$.

4. Vysledky

Pozorování byla provedena v noci z 30.4.2024 na 1.5.2024. Snímky byly získány z²

Celková doba pozorování jednotlivých objektů byla:

M104 :	2490s
M97 :	2010s
M57 :	115s
M51 :	840s

4.1. M104 (Sombrero Galaxy)

Snímky M104 ve filtroch B, V, R jsou zobrazeny na obrázku (5). Výsledné BVR, XYZ a sRGB snímky jsou zobrazeny na obrázku (6).

4.2. M97 (Owl Nebula)

Snímky M97 ve filtroch B, V, R jsou zobrazeny na obrázku (7). Výsledné BVR, XYZ a sRGB snímky jsou zobrazeny na obrázku (8).

4.3. M57 (Ring Nebula)

Snímky M57 ve filtroch B, V, R jsou zobrazeny na obrázku (9). Výsledné BVR, XYZ a sRGB snímky jsou zobrazeny na obrázku (10).

4.4. M51 (Whirlpool Galaxy)

Snímky M51 ve filtroch B, V, R jsou zobrazeny na obrázku (11). Výsledné BVR, XYZ a sRGB snímky jsou zobrazeny na obrázku (12).

5. Závěr

Nejlepší barevný snímek byl získán pro galaxii M104 (Sobmrero). Ze snímku je však patrné, že je zřetelně namodralejší než původní snímek. U ostatních objektů (M97, M57, M51) je to ještě patrnější.

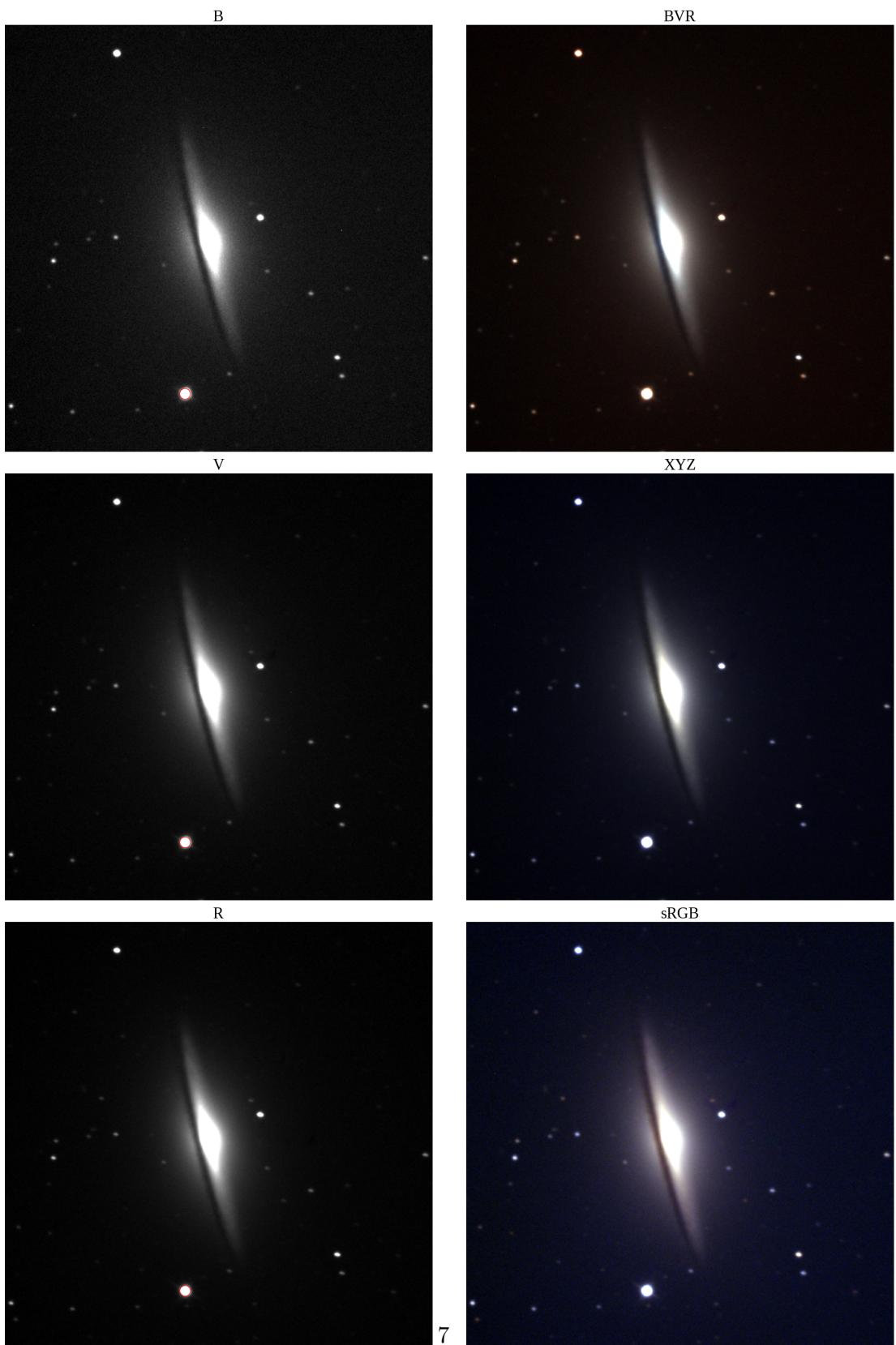
Důvodem systematického posunu barevného vyvážení výsledného sRGB snímku do modré oblasti spektra může být použití přístrojového $B - V$ indexu bez Zero Point korekce. V procesu White Spot korekce byla jako referenční bílá bod brána hvězda s $B - V \approx 0$, ale instrumentální hodnoty se mohou lišit od standardních fotometrických hodnot v důsledku kalibračních chyb, vlastností detektoru a atmosféry. Pokud má instrumentální index $B - V$ systematickou odchylku oproti standardním hodnotám, vede to k nesprávné barevné kalibraci, což může vysvětlovat přílišnou modrost výsledného snímku. Kromě toho mohou toto zkreslení zesílit možné rozdíly v citlivosti filtrů a CCD detektoru. Systematický posun barev do modré oblasti tuto hypotézu potvrzuje.

Reference

- T. Barker. The Ionization Structure of Planetary Nebulae. VII. New Observations of the Ring Nebula. *ApJ*, 322:922, Nov. 1987. doi: 10.1086/165787.
- I. De Looze, M. Baes, J. Fritz, and J. Verstappen. Panchromatic radiative transfer

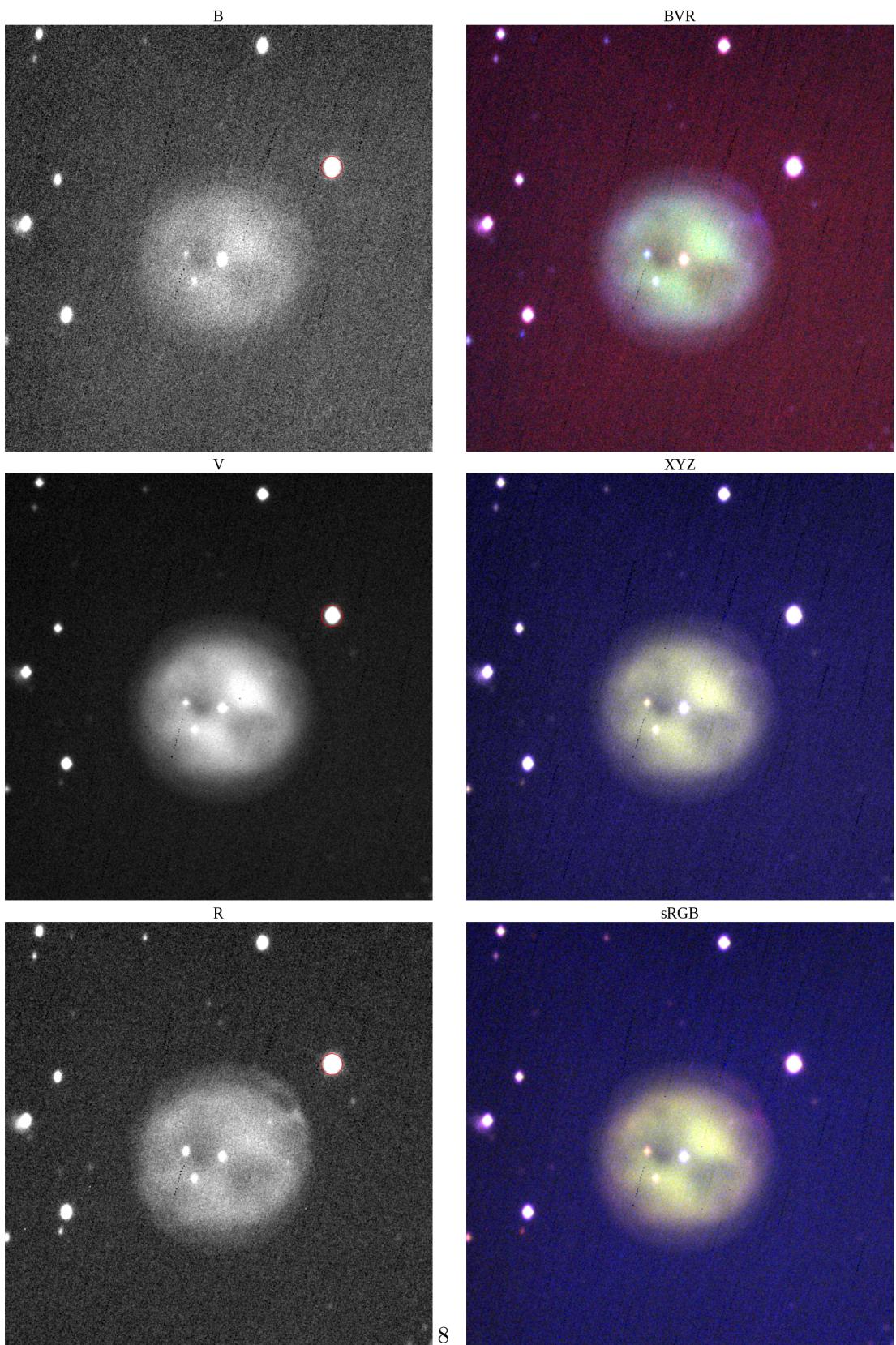
²<https://integral.physics.muni.cz/ftp/praktikum/20240430/>

- modelling of stars and dust in the Sombrero galaxy. *MNRAS*, 419(1):895–903, Jan. 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19759.x.
- R. A. Fesen, M. Drechsler, X. Strottner, B. Falls, Y. Sainty, N. Martino, R. Galli, M. Ludgate, M. Blauensteiner, W. Reich, S. Walker, D. di Cicco, D. Mittelman, C. Morgan, A. E. Kaeouach, J. Rupert, and Z. Benkhaldoun. Deep optical emission-line images of nine known and three new galactic supernova remnants, 2024. URL <https://arxiv.org/abs/2403.00317>.
- S. S. Larsen. Young massive star clusters in M51. *MNRAS*, 319(3):893–901, Dec. 2000. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03913.x.
- J.-R. Liu and S.-D. Mao. On the diffuse soft x-ray emission from the nuclear region of m51. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15(12):2164–2172, Dec. 2015. ISSN 1674-4527. doi: 10.1088/1674-4527/15/12/004. URL <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/15/12/004>.
- H. Mata, G. Ramos-Larios, M. A. Guerrero, A. Nigoche-Netro, J. A. Toalá, X. Fang, G. Rubio, S. N. Kemp, S. G. Navarro, and L. J. Corral. Spitzer mid-infrared spectroscopic observations of planetary nebulae. *MNRAS*, 459(1):841–853, June 2016. doi: 10.1093/mnras/stw646.
- R. B. Menezes, J. E. Steiner, and T. V. Ricci. Collimation and Scattering of the Active Galactic Nucleus Emission in the Sombrero Galaxy. *ApJ*, 765(2):L40, Mar. 2013. doi: 10.1088/2041-8205/765/2/L40.
- D. D. Mulcahy, A. Horneffer, R. Beck, G. Heald, A. Fletcher, A. Scaife, B. Adegbahr, J. M. Anderson, A. Bonafede, M. Brüggen, G. Brunetti, K. T. Chyží, J. Conway, R.-J. Dettmar, T. Enßlin, M. Haverkorn, C. Horellou, M. Iacobelli, F. P. Israel, H. Junklewitz, W. Jurusik, J. Köhler, M. Kuniyoshi, E. Orrú, R. Paladino, R. Pizzo, W. Reich, and H. J. A. Röttgering. The nature of the low-frequency emission of m51: First observations of a nearby galaxy with lofar. *Astronomy & Astrophysics*, 568:A74, Aug. 2014. ISSN 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/201424187. URL <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201424187>.
- PoruchikRzhevsky. Praktikum-z-astronomie. <https://github.com/PoruchikRzhevsky/Praktikum-z-astronomie>.
- J. Sutter and D. Fadda. A Molecular Gas Ring Hidden in the Sombrero Galaxy. *ApJ*, 941(1):47, Dec. 2022. doi: 10.3847/1538-4357/ac9d8f.
- P. A. M. van Hoof, G. C. van de Steene, M. J. Barlow, K. M. Exter, B. Sibthorpe, T. Ueta, V. Peris, M. A. T. Groenewegen, J. A. D. L. Blommaert, M. Cohen, W. De Meester, G. J. Ferland, W. K. Gear, H. L. Gomez, P. C. Hargrave, E. Huygen, R. J. Ivison, C. Jean, S. J. Leeks, T. L. Lim, G. Olofsson, E. T. Polehampton, S. Regibo, P. Royer, B. M. Swinyard, B. Vandenbussche, H. van Winckel, C. Waelkens, H. J. Walker, and R. Wesson. Herschel images of NGC 6720: H₂ formation on dust grains. *A&A*, 518:L137, July 2010. doi: 10.1051/0004-6361/201014590.



Obrázek (5) Snímky M104 ve filtroch B, V, R (zhora dolů).

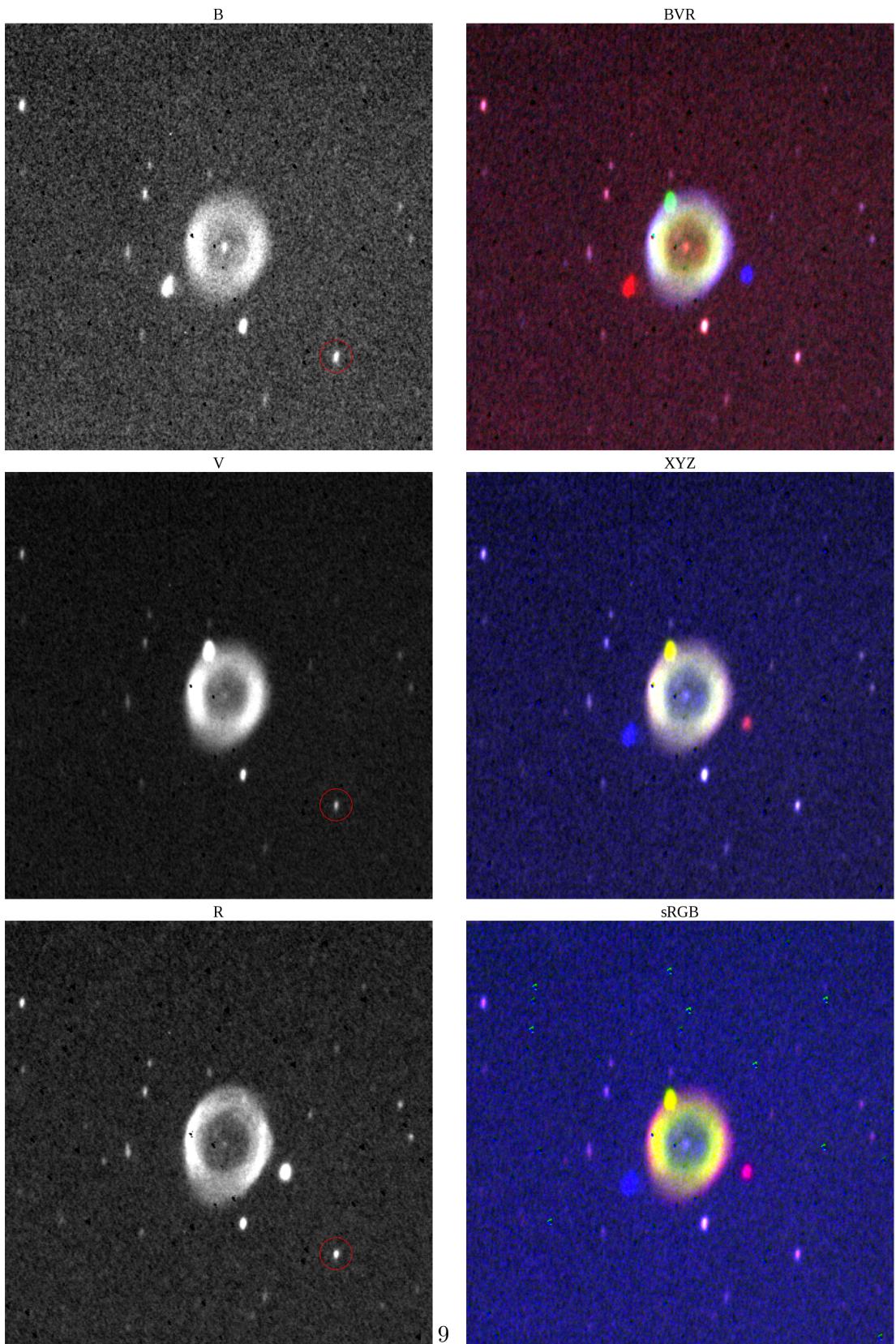
Obrázek (6) Snímky M104 v barevných systémech BVR, XYZ a sRGB (zhora dolů).
7



8

Obrázek (7) Snímky M97 ve filtroch B, V, R (zhora dolů).

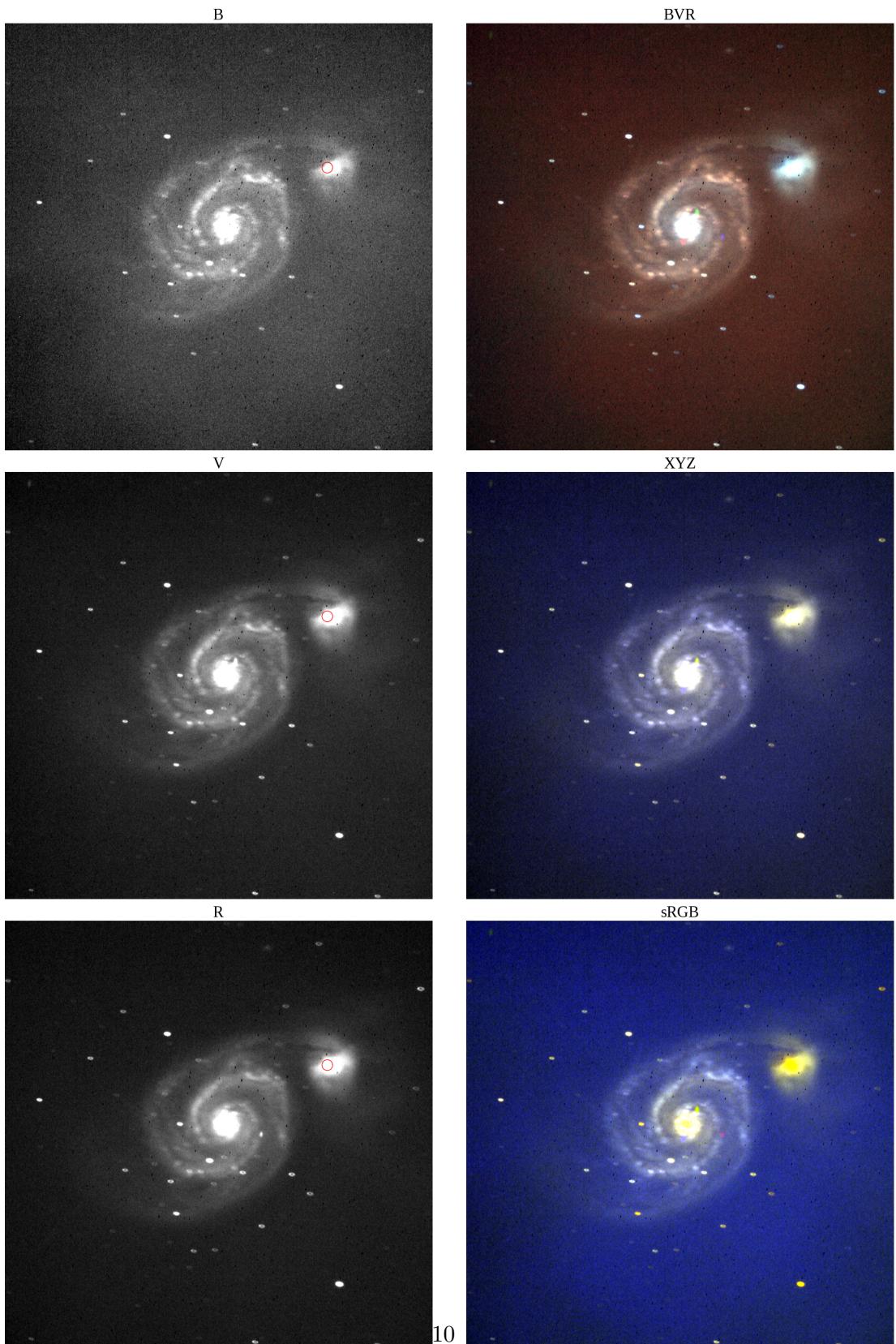
Obrázek (8) Snímky M97 v barevných systémech BVR, XYZ a sRGB (zhora dolů).



Obrázek (9) Snímky M57 ve filtroch B, V, R (zhora dolů).

9

Obrázek (10) Snímky M57 v barevných systémech BVR, XYZ a sRGB (zhora dolů).



Obrázek (11) Snímky M51 ve filtroch B, V, R (zhora dolů).

Obrázek (12) Snímky M51 v barevných systémech BVR, XYZ a sRGB (zhora dolů).