

Rada Dyscypliny Astronomia  
Instytut Astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i  
Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja  
Kopernika w Toruniu  
ul. Grudziądzka 5  
87-100 Toruń  
(nazwa i dane adresowe podmiotu habilitującego,  
wybranego do przeprowadzenia postępowania)  
za pośrednictwem:  
**Rady Doskonałości Naukowej**  
pl. Defilad 1  
00-901 Warszawa  
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

Marcin Hajduk  
(imię i nazwisko wnioskodawcy)

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Centrum Diagnostyki Radiowej Środowiska Kosmicznego  
(miejsce pracy/jednostka naukowa)

### Wniosek

z dnia 27.11.2020.....

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego  
w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie<sup>1</sup> astronomia.

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora  
habilitowanego:

### Obserwacyjna weryfikacja ścieżek ewolucyjnych gwiazd post-AGB

Wnioskuje – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie  
wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała  
uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu **tajnym/jawnym**\*<sup>2</sup>

Zostałem poinformowany, że:

*Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w  
sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości  
Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).*

*Kontakt za pośrednictwem e-mail: [kancelaria@rdn.gov.pl](mailto:kancelaria@rdn.gov.pl), tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie  
organu. Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c)  
Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art.  
232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu  
przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i  
obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.*

*Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest  
na stronie [www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html](http://www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html)*

.....*Marcin Hajduk*.....  
(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

- Dane wnioskodawcy
- Kopia dokumentu potwierdzającego posiadanie stopnia doktora
- Autoreferat w języku polskim
- Autoreferat w języku angielskim
- Wykaz osiągnięć naukowych w języku polskim
- Wykaz osiągnięć naukowych w języku angielskim
- Oświadczenia współautorów (8 sztuk)
- Kopie dokumentów zapisane na pendrive (2 sztuki)

---

1. Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

2. \* Niepotrzebne skreślić.

## Autoreferat

### 1. Imię i nazwisko.

Marcin Hajduk

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Doktor nauk fizycznych w dziedzinie astronomii, „Obserwacje kandydatów i obiektów bardzo późnego rozbłysku helowego”, promotor: dr Krzysztof Gęszicki, Centrum Astronomii UMK, Toruń, 12/01/2009

Magister astronomii, „Spektrofotometria CH Cygni Kanadyjskim Spektrografem Kopernikańskim”, opiekun: dr Maciej Mikołajewski, Centrum Astronomii UMK, Toruń, 02/09/2003

Licencjat na kierunku astronomia, „Literaturowe studium wybranych mgławic planetarnych”, opiekun: dr Krzysztof Gęszicki, Centrum Astronomii UMK, Toruń, 21/09/2001

### 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

Od 1/12/2016, adiunkt, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

1/09/2009 – 31/08/2012, adiunkt, CAMK PAN, Toruń

1/01/2009 – 30/09/2010, asystent, Centrum Astronomii UMK, Toruń

### 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

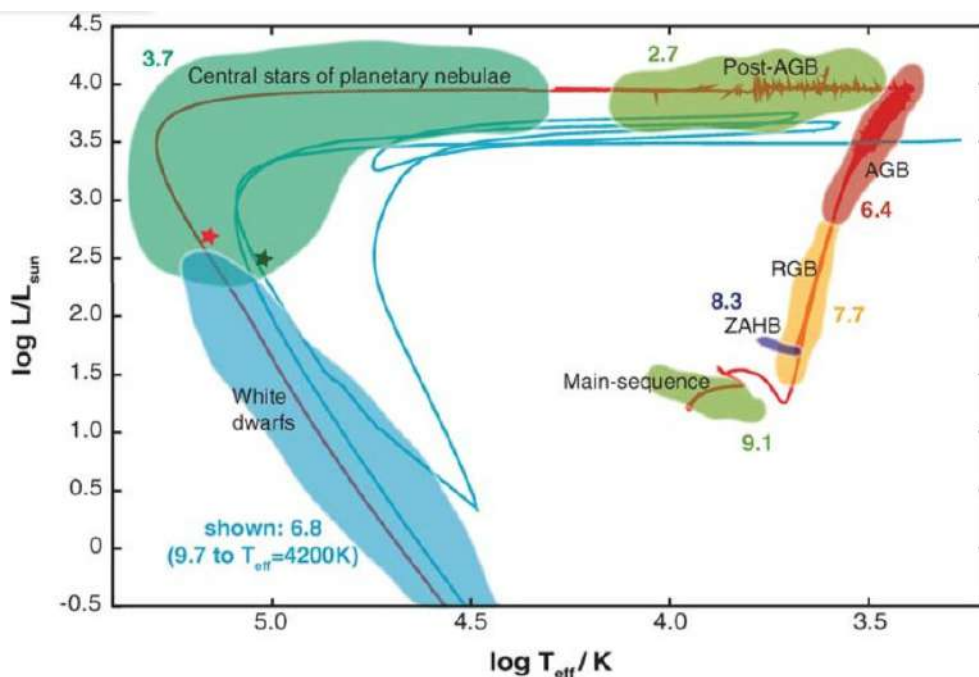
**Tytuł cyklu: Obserwacyjna weryfikacja ścieżek ewolucyjnych gwiazd post-AGB**

**Prace wchodzące w skład cyklu:**

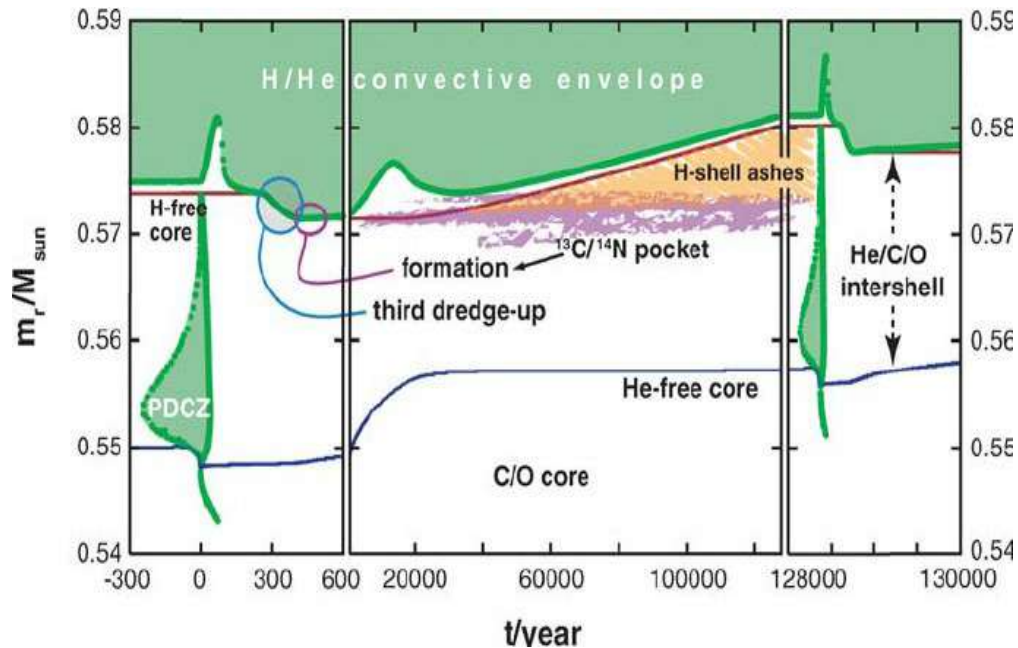
1. **Hajduk, M.**; Zijlstra, A. A.; Gęszicki, K., *Binary [WR] and wels central stars of planetary nebulae*, 2010, MNRAS, 406, 626
2. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Gęszicki, K.; Zijlstra, A. A.; Gorny, S. K.; Gładkowski, M., *The evolving spectrum of the planetary nebula Hen 2-260*, 2014, A&A, 567A, 15
3. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A. A., *Evolution of the central stars of young planetary nebulae*, 2015, A&A, 573A, 65
4. **Hajduk, M.**, *Rapid evolution of [WC] stars in the Magellanic Clouds*, 2020, A&A, 642, A71
5. **Hajduk, M.**; Todt, H.; Hamann, W.-R.; Borek, K.; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A.A., *The cooling-down central star of the planetary nebula SwSt 1: a late thermal pulse in a massive post-AGB star?* 2020, MNRAS, 498, 1205

## Wstęp

Gwiazdy centralne mgławic planetarnych ewoluują z gwiazd o masach początkowych od około 1 do  $8 M_{\odot}$  (Herwig, 2005). Gwiazdy te najwięcej czasu spędzają na ciągu głównym. W tym najdłuższym etapie ewolucji gwiazdy źródłem energii jest synteza helu z wodoru w jądrze. Gdy zapas wodoru w jądrze się kończy, wodór spala się w otoczkę wokół jądra. Wiąże się to z większą ilością produkowanej energii i większą jasnością. Zmienia się konfiguracja gwiazdy, która wstępuje na tzw. gałąź olbrzymów (z ang. red giant branch - RGB) na diagramie Hertzsprunga-Russela (rys. 1). W następnym etapie następuje synteza helu w węgiel. Po wyczerpaniu helu w jądrze, reakcje termojądrowe postępują w dwóch powłokach, helowej i wodorowej. Gwiazda wstępuje na asymptotyczną gałąź olbrzymów (z ang. asymptotic giant branch – AGB). Reakcje w powłoce helowej postępują szybciej niż w wodorowej. Powłoka helowa wygasa gdy zużywa całą dostępną materię. Nowa materia jest dostarczana do powłoki helowej dzięki reakcjom postępującym w powłoce wodorowej. Gdy nagromadzi się wystarczająca ilość helu, warstwa helowa wznowia aktywność. Przez około 10% czasu głównym źródłem energii gwiazdy AGB jest spalanie helu a przez pozostały czas - spalanie wodoru.



**Rys. 1.** Tor ewolucyjny gwiazdy o masie  $2 M_{\odot}$  na diagramie H-R (Herwig, 2005). Cyfry oznaczają logarytm czasu życia gwiazdy w latach na danym etapie ewolucji. Niebieski tor, przesunięty dla czytelności o  $-0.5$  w  $\log(L/L_{\odot})$  i  $-0.2$  w  $\log(T_{\text{eff}}/K)$ , pokazuje ewolucję gwiazdy przechodzącej przez bardzo późny rozbłysk helowy.



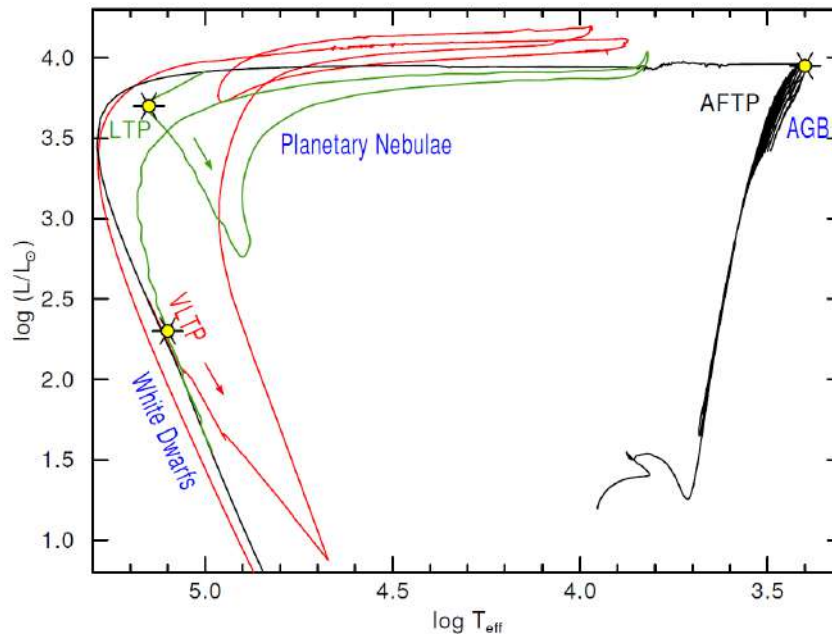
**Rys. 2.** *Ewolucja struktury gwiazdy AGB podczas rozbłysku helowego (promień jest zastąpiony współrzędną masy; Herwig, 2005).*

Cykl powtarzającej się aktywności warstwy helowej nazywany jest rozbłyskiem helowym na AGB lub pulsem termicznym (rys. 2). Rozbłyskom helowym towarzyszy wzmożona utrata masy. Pod koniec życia gwiazdy AGB w wietrze gwiazdowym formuje się duża ilość pyłu, który całkowicie zasłania gwiazdę w świetle widzialnym.

Po rozpoczęciu rozbłysku helowego, konwektywna otoczka gwiazdy penetruje obszar, w którym znajdują się produkty syntezy helu w węgiel (intershell; rys. 2). Powoduje to wyniesienie na powierzchnię produktów reakcji zachodzących podczas rozbłysku helowego (trzeci dredge-up).

Gdy masa otoczki jest bardzo mała, promień gwiazdy maleje i gwiazda wstępuje w fazę post-AGB. Ewolucja gwiazdy postępuje na diagramie H-R horyzontalnie w stronę wysokich temperatur, powyżej 100 kK. Gdy gwiazda staje się wystarczająco gorąca, jonizuje wcześniej wyrzuconą materię, która formuje mgławicę planetarną. Po osiągnięciu maksimum temperatury reakcje termojądrowe zaczynają wygasać i gwiazda kontynuuje ewolucję na torze stygnących białych karłów.

Zgodnie z modelami ewolucyjnymi, około 90% gwiazd powinno opuszczać gałąź AGB spalając wodór, a 10% - spalając hel. Wszystkie modele, nawet te palące hel, są bogate w wodór na powierzchni. Cienka warstwa radiacyjna chroni wodorową atmosferę gwiazdy przed wymieszaniem i spalaniem w powłoce helowej podczas pulsu termicznego.



**Rys.**

**3. Tor ewolucyjny gwiazdy post-AGB z rozbłyskami helowymi na diagramie H-R (Todt i Hamann, 2015).**

Rozbłysk helowy może nastąpić już po opuszczeniu gałęzi AGB, gdy warstwa wodorowa jest nadal aktywna, ale przed osiągnięciem przez gwiazdę maksimum temperatury (rys. 3). Określany jest wówczas jako późny puls termiczny (late thermal pulse – LTP). LTP powoduje ekspansję gwiazdy i powrót do obszaru olbrzymów na diagramie H-R. Podobnie jak podczas pulsów termicznych na AGB, konwektywna otoczka gwiazdy penetruje „intershell”. Masa wodorowej otoczki gwiazdy jest na tyle mała, że wymieszanie z materią z intershell powoduje obniżenie zawartości wodoru w atmosferze gwiazdy do kilku procent.

Schönberner (1979) przewidział, że do rozbłysku helowego może dojść nawet na torze stygnących białych karłów. Wówczas mamy do czynienia z bardzo późnym pulsem termicznym (very late thermal pulse – VLTP). Warstwa konwektywna obejmująca intershell podczas VLTP (pulse driven convective zone – PDCZ) sięga powierzchni gwiazdy. Otoczka wodorowa zostaje całkowicie wchłonięta. Towarzyszy temu nagłe pojaśnienie, tzw. hydrogen ingestion flash (HIF; Herwig, 2005). Na skutek uwolnienia się znacznej ilości energii, gwiazda powraca do obszaru AGB na diagramie H-R. W krótkim czasie jednak znów następuje kontrakcja i powrót gwiazdy na tor post-AGB. Synteza helu w węgiel zapewnia energię do kolejnego, wolniejszego powrotu do AGB. W ten sposób gwiazda wykonuje dwie pętle na diagramie H-R (rys. 1, 3).

Modele ewolucyjne dla końcowych etapów AGB są stosunkowo niepewne. Obliczenia utrudniają porównywalne skale czasowe różnych procesów: ekspansji, utraty masy, reakcji termojądrowych, procesów konwekcji i mieszania. Niektóre z tych procesów, np. mieszanie czy utrata masy, są opisywane za pomocą parametrów empirycznych lub pół-empirycznych, które trudno dokładnie wyznaczyć. Szczególna trudność wiąże się z modelowaniem masywnych gwiazd AGB. Jasność u podnóża powłoki konwektywnej podczas błysku helowego przekracza jasność Eddingtona, co prowadzi do niestabilności (Lau i in., 2012). Nie jest pewne, jakie są tego konsekwencje. Niektóre modele sugerują nawet natychmiastowe odrzucenie otoczki gwiazdy (Wood i Faulkner, 1986).

Ostatnie lata przyniosły istotne poprawki do modeli ewolucyjnych post-AGB. Modele Blöckera (1995) oraz Vassiliadis i Wooda (1994) nie korzystały z dostępnego kodu OPAL do wyznaczania nieprzezroczystości. Modele Miller-Bertolami (2016), które wykorzystują najnowsze dane atomowe, ewoluują 3 do 10 razy szybciej i są jaśniejsze niż modele Blöckera oraz Vassiliadis i Wooda. Nowe modele są zgodne z masami pulsujących białych karłów otrzymanymi z astrosejsmologii (Althaus i in., 2010).

Wiele problemów dotyczących ewolucji gwiazd post-AGB pozostaje wciąż nierozwiązanych. Należy do nich status ewolucyjny gwiazd centralnych mgławic planetarnych posiadających atmosfery ubogie w wodór (Weidmann i in., 2020). Ich najliczniejszą grupę stanowią gwiazdy [WC], których widma są bardzo podobne do ich masywnych odpowiedników – gwiazd WC I populacji. Zaproponowane scenariusze ewolucyjne powstawania gwiazd [WC] to bardzo późny puls termiczny, gwiazdowy merger oraz wybuch przypominający nową.

Najbardziej prawdopodobną hipotezą wyjaśniającą powstanie gwiazd [WC] jest VLTP. Została ona potwierdzona obserwacyjnie dzięki odkryciu Obiektu Sakuraia (V4334 Sgr). Gwiazda nagle pojaśniała i w krótkim czasie powróciła z obszaru białych karłów do AGB na diagramie H-R (Duerbeck i Benetti, 1996). Asplund i in. (1997) w ciągu kilku miesięcy zaobserwowali kilkukrotny spadek zawartości wodoru i wzrost zawartości pierwiastków s-process w atmosferze gwiazdy. Obserwowana ewolucja temperatury i składu chemicznego była znacznie szybsza niż w dostępnych modelach VLTP, na co wpływ miał zbyt mała rozdzielczość czasowa stosowana we wcześniejszych obliczeniach (Miller-Bertolami i in., 2006). Na skutek kondensacji pyłu w wietrze gwiazdowym obiekt po niedługim czasie przestał być widoczny w świetle widzialnym. Śledzenie jego dalszej ewolucji jest bardzo utrudnione.

Skład chemiczny atmosfer gwiazd [WC] jest zbliżony do składu chemicznego otrzymanego w modelach VLTP. Atmosfery gwiazd [WC] składają się z helu i węgla, przy niewielkiej domieszce innych pierwiastków (Werner i Herwig, 2006). Gdyby jednak większość gwiazd [WC] powstała w wyniku VLTP, ich mgławice planetarne, wyrzucone na etapie AGB, byłyby starsze niż mgławice wokół pozostałych gwiazd centralnych. VLTP ma miejsce tysiące lat po opuszczeniu przez gwiazdę AGB, gdyż tyle czasu upływa pomiędzy kolejnymi pulsami termicznymi. VLTP powinien też pozostawić ślad w postaci młodego kinematycznie, ubogiego w wodór składnika mgławicy planetarnej, powstałego z wiatru gwiazdowego w powtórnej fazie AGB. Taki składnik jest widoczny w kilku mgławicach, np. Abell 30 albo Abell 78, jednak jest on nieobecny w większości mgławic z gwiazdami [WC].

Badania mgławic planetarnych wokół gwiazd [WC] sugerują, że gwiazdy te uformowały się bezpośrednio po odejściu z AGB (Górny i Tylenda, 2000). W tym przypadku mielibyśmy do czynienia z błyskiem helowym na końcu AGB (AGB final thermal pulse – AFTP; rys. 3). AFTP pozostawia jednak znaczną ilość wodoru w atmosferze gwiazdy, co nie jest obserwowane w gwiazdach [WC].

Alternatywne scenariusze powstawania gwiazd [WC] łączone są z ewolucją w układzie podwójnym. Główną motywacją dla powstania takich scenariuszy są wysokie obfitości tlenu i neonu w ubogim w wodór składniku mgławic Abell 30 oraz Abell 54 (V605 Aql). Wyznaczony stosunek C/O jest mniejszy od 1, podczas gdy modele teoretyczne VLTP przewidują tylko kilka procent tlenu i około 50% węgla. Wesson i in. (2003, 2008) zaproponowali, że ubogie w wodór gwiazdy centralne mgławic planetarnych powstają w układach podwójnych a ich natura jest zbliżona do nowych. W przypadku, gdyby ta hipoteza była prawdziwa, odsetek podwójnych gwiazd centralnych ubogich w wodór byłby wysoki. Z drugiej strony, De Marco i Soker (2002) zaproponowali, że gwiazdy [WC] powstają w wyniku mergera. Wówczas gwiazdy [WC] nie występowałyby w ciasnych układach podwójnych. Nikt jednak nie wyznaczył odsetka gwiazd [WC] w układach podwójnych aby zweryfikować te hipotezy.

Większość gwiazd w Galaktyce występuje w układach podwójnych i wielokrotnych. Kształty niesferycznych mgławic planetarnych często są tłumaczone interakcją gwiazdy AGB z towarzyszem. Soker (1997) ocenił, że jedynie około 10% mgławic planetarnych powstało z gwiazd pojedynczych. Wg niego, nie da się wyjaśnić obserwowanych kształtów 90% mgławic ewolucją pojedynczej gwiazdy. Nawet



mgławice, których obrazy sugerują sferyczny lub eliptyczny kształt, mogą być w rzeczywistości bipolarnymi mgławicami obserwowanymi wzdłuż osi symetrii (np. NGC 3132 – Monteiro i in., 2000). Jones i Boffin (2017) oraz inne prace potwierdzają silny związek podwójności z występowaniem bipolarnej morfologii i różnych struktur w mgławicach planetarnych.

Niektóre planety mogą przetrwać fazę RGB i mieć wpływ na kształtowanie się mgławic planetarnych (Hegazi i in., 2020). Pośrednim dowodem na akrecję materii planetarnej jest obecność ciężkich metali w atmosferach białych karłów typu DZ (na skutek sedymentacji metale nie powinny być widoczne) oraz dysków wokół tych gwiazd. Vanderburg i in. (2020) w ostatnim czasie odkryli planetę krążącą wokół białego karła.

Miszalski i in. (2009) wyznaczyli na podstawie obserwacji fotometrycznych OGLE, że około 12-21% gwiazd centralnych mgławic planetarnych w Galaktyce znajduje się w ciasnych układach podwójnych. Komplementarne metody poszukiwań, np. przez poszukiwanie nadwyżki w podczerwieni (De Marco i in., 2013), czy za pomocą spektroskopii (De Marco i in., 2004) nie wykryły tak dużego odsetka podwójnych gwiazd centralnych jak postulował Soker (1997). Czułość metody spektroskopowej i fotometrycznej jest ograniczona do bliskich towarzyszy. Odlegli towarzysze mogą być obserwowani za pomocą obrazów (Ciardullo i in., 1999), jednak nie mają wpływu na ewolucję gwiazdy centralnej.

Podwójność ma duży wpływ na ewolucję gwiazdy AGB. Gwiazda AGB traci otoczkę w fazie wspólnej otoczki dużo szybciej niż pojedyncza gwiazda. Prowadzi to do innej struktury i pola prędkości mgławicy (wypływ Hubble'a). Szybsza utrata otoczki może skutkować mniejszą liczbą pulsów termicznych i mniej masywnym jądrem oraz inną grubością atmosfery po opuszczeniu AGB niż w przypadku gwiazdy pojedynczej. Wynikiem tego może być inna jasność i tempo ewolucji post-AGB niż w przypadku gwiazdy pojedynczej.

Do badania ewolucji gwiazd tradycyjnie wykorzystuje się pomiary jasności (w znaczeniu luminosity) i temperatury, lokujące je na diagramie H-R. Gwiazdy post-AGB ewoluują horyzontalnie. Ich jasność, mieszcząca się w zakresie około  $10^3$ – $10^4$   $L_{\odot}$ , zależy od masy końcowej gwiazdy, mieszczącej się w zakresie 0.55–0.85  $M_{\odot}$ . Jasność pozostaje w przybliżeniu stała od momentu opuszczenia gałęzi AGB prawie do osiągnięcia maksimum temperatury, gdy reakcje termojądrowe zaczynają wygasać.

Wyznaczone jasności gwiazd centralnych są obarczone stosunkowo dużymi niepewnościami. Pomiary odległości różnymi metodami - poza populacjami w centrum Galaktyki, Obłokach Magellana czy innych układach gwiazdowych - często dają różne wyniki o czynnik 2 do 3, co propaguje się na rozrzut jasności o czynnik 4 do 9. Jest to dużo, zważywszy na fakt, że jasności najmniej i najbardziej masywnych gwiazd post-AGB różnią się o czynnik 10. Precyzyjne pomiary odległości dzięki misji GAIA są możliwe tylko dla przypadków, gdy dobrze rozdzielona mgławica nie zakłóca pomiaru dostatecznie jasnej gwiazdy centralnej, a więc przede wszystkim dla mgławic położonych najbliżej i o stosunkowo dużych rozmiarach kątowych.

Wyznaczenie jasności dodatkowo utrudnia to, że gwiazdy centralne mgławic planetarnych emitują większość promieniowania w ultrafiolecie, a więc w zakresie niedostępnym z powierzchni Ziemi. Obserwowane strumienie należy poprawić na ekstynkcję międzygwiazdową. Tymczasem różne metody wyznaczenia ekstynkcji do mgławic planetarnych dają różne wyniki (Stasińska i in., 1992).

Przy założeniu, że mgławica jest optycznie gruba dla promieniowania jonizującego wodór, można wyznaczyć temperaturę i jasność gwiazdy metodą Zanstry, mierząc całkowity strumień w liniach H lub He. Metoda ta również nie jest wolna od założeń i niepewności. W szczególności, nie uwzględnia ona istotnej części promieniowania gwiazdy centralnej, która jest absorbowana i re-emitowana w podczerwieni przez pył wokółgwiazdowy.

Tempo zmiany temperatury jest dużo bardziej precyzyjnym wskaźnikiem ewolucji gwiazd centralnych mgławic planetarnych niż ich jasność. Skala czasowa ewolucji jest proporcjonalna do różnicy pomiędzy masą otoczki na początku i na końcu fazy post-AGB i odwrotnie proporcjonalna do tempa utraty masy na skutek reakcji termojądrowych i wiatru gwiazdowego (Gęsiński i in., 2014):

$$t \approx \frac{(M_{env}^{pAGB} - M_{env}^{Tmax})}{(\dot{M}_H + \dot{M}_w)}$$

Jak zauważył już Paczyński (1970), tempo ewolucji gwiazd post-AGB jest bardzo czułą funkcją ich masy. Jest to spowodowane tym, że u coraz bardziej masywnych gwiazd otoczka wodorowa w momencie opuszczania gałęzi AGB jest coraz cieńsza. Masywniejsze gwiazdy mają dodatkowo większe tempo konsumpcji otoczki ze względu na większą jasność i szybszą utratę masy przez wiatr gwiazdowy niż mniej masywne gwiazdy post-AGB.

Masy końcowe gwiazd centralnych obejmują niewielki przedział wartości około 0.55–0.85  $M_{\odot}$ . Skrajne wartości mas z tego przedziału różnią się tylko o czynnik około 1.5. Skale czasowe ewolucji w tym wąskim zakresie mas różnią się o około trzy rzędy wielkości: od kilkudziesięciu lat do dziesiątków tysięcy lat.

Gęsicki i in. (2014) wykorzystali do badania ewolucji gwiazd centralnych dynamiczny wiek mgławic oraz temperaturę gwiazd. Z nich otrzymali tempo zmian temperatury. Z kolei Tylenda i Stasińska (1989) korzystali z niezależnego od odległości parametru  $f$ , będącego kombinacją mierzonej średnicy mgławicy oraz jasności gwiazdy centralnej.

Wykorzystanie pomiarów rozmiarów mgławic jako wyznacznika ewolucji gwiazd centralnych niesie ze sobą kilka istotnych niepewności. Znaczna część mgławicy może pozostawać neutralna zwłaszcza dla młodych obiektów. Dla starszych mgławic istotne staje się oddziaływanie z ośrodkiem międzygwiazdowym. Mgławice są niesferyczne i różne składniki mogą mieć różny wiek. W końcu, ewolucja gwiazdy post-AGB nie musi przebiegać jednostajnie od momentu wyrzucenia mgławicy.

Szybka ewolucja gwiazd centralnych przechodzących przez VLTP lub LTP umożliwia śledzenie zmian temperatury, jasności i składu chemicznego w „czasie rzeczywistym”. Badania V4334 Sgr (Asplund i in., 1999; Hajduk i in., 2005), V605 Aql (Clayton i De Marco, 1997), czy FG Sge (Jeffery i Schönberner, 2006) potwierdziły istnienie i pozwoliły poprawić modele rozbłysków helowych po opuszczeniu AGB.

Swój cykl habilitacyjny poświęciłem w znacznej części badaniu ewolucji w „czasie rzeczywistym” pozostałych gwiazd centralnych. Takie badania mogą wnieść istotny wkład w rozumienie ewolucji gwiazd post-AGB. W szczególności umożliwiają porównanie obserwowanego tempa i kierunku ewolucji gwiazd post-AGB z torami ewolucyjnymi, które obarczone są niepewnościami wynikającymi ze stosowanych przybliżeń i ograniczeń numerycznych. Jeśli większość gwiazd centralnych jest w ciasnych układach podwójnych, ich ewolucja może różnić się od torów ewolucyjnych gwiazd post-AGB.

Dotychczas ta tematyka była rzadko podejmowana. Kondratyeva (2005) zbadała kilka mgławic planetarnych i odkryła rosnącą ekscytację w mgławicach M 1-11 oraz M 1-6. Arkhipova i in. (2000) odkryli zmiany w IC 4997. Zijlstra i in. (2008) analizowali ewolucję radiowej emisji NGC 7027, będącej jednym ze standardów kalibracyjnych.

## Omówienie cyklu

1. **Hajduk, M.;** Zijlstra, A. A.; Gęsiński, K., *Binary [WR] and wels central stars of planetary nebulae*, 2010, MNRAS, 406, 626

Pierwsza z prac w prezentowanym cyklu miała na celu weryfikację, jaki wpływ na powstawanie gwiazd typu [WC] ma ewolucja w układach podwójnych. W tym celu wyznaczyłem odsetek gwiazd typu [WC] występujących w ciasnych układach podwójnych. Odsetek podwójnych gwiazd centralnych w Galaktyce za pomocą danych z OGLE został wyznaczony przez Miszalskiego i in. (2009). Nikt jednak nie badał odsetka gwiazd centralnych ubogich w wodór w układach podwójnych ani nie odkrył gwiazdy centralnej typu [WC] w układzie podwójnym.

Fotometrię 15 gwiazd centralnych wykonałem za pomocą teleskopu Elizabeth w Południowoafrykańskim Obserwatorium Astronomicznym między 28 stycznia i 10 lutego 2009 roku w filtrze *I*. Filtr ten w swoim zakresie nie zawiera silnych linii emisyjnych pochodzących od mgławicy. Linie H $\alpha$  oraz [NII] 6548 i 6584 Å występują w zakresie spektralnym filtru *R* a linie [OIII] 4959/5007 Å i H $\beta$  w zakresie filtru *V*.

Najważniejszym rezultatem pracy jest odkrycie pierwszej gwiazdy typu [WC] w układzie podwójnym GLMP 160. Wyznaczyłem okres orbitalny układu na 0.63 lub 1.26 dnia, w zależności od tego, czy obserwujemy zmienność elipsoidalną czy irradację towarzysza gwiazdy centralnej. Oprócz zmienności fotometrycznej zaobserwowałem też zmiany w prędkościach radialnych w archiwalnych widmach NTT. Nie wystarczyły one jednak do weryfikacji, który z okresów jest właściwy. Późniejsze obserwacje spektroskopowe pozwoliły stwierdzić, że wynosi on 1.26 dnia.

Odkrycie dowiodło, że nie wszystkie gwiazdy typu [WC] są efektem mergera. Okres orbitalny układu podwójnego 1.26 dnia jest znacznie dłuższy niż maksimum rozkładu okresów dla wszystkich gwiazd centralnych w układach podwójnych (około 0.3 dnia). Może to być związane z intensywną utratą masy przez gwiazdę [WC] lub z odmienną ewolucją układu podczas fazy wspólnej otoczki. Ewolucja w fazie wspólnej otoczki zależy od energii związania otoczki i parametru  $\alpha_{CE}$ , która może być inna z uwagi na odmienną budowę gwiazd [WC] (Ivanova i in., 2011). Manick i in. (2015) odkrył drugą gwiazdę [WC] znajdującą się w układzie podwójnym. Gwiazda centralna mgławicy NGC 5189 ma okres orbitalny aż 4 dni. Niedawno Jacoby i in. (2020) odkryli, że gwiazda centralna mgławicy Abell 30 znajduje się w układzie podwójnym o okresie 1.06 dnia, jednak nie zostało to potwierdzone z użyciem spektroskopii.

Wyzaczyłem odsetek gwiazd [WC] w układach podwójnych między 4 a 27%. Nie jest on istotnie różny od odsetka 12-21% gwiazd podwójnych dla wszystkich gwiazd centralnych (Miszalski i in., 2009). Większy rozrzut wartości spowodowany jest mniejszą próbką badanych obiektów. Praca sugeruje, że podwójność nie ma istotnego wpływu na ewolucję gwiazd [WC], t.j. nie wyklucza ani nie implikuje formowania się takich gwiazd. Dla porównania, odsetek potwierdzonych gwiazd WR w układach podwójnych wynosi 39% (van der Hucht, 2001). Jest jednak możliwe, że wszystkie gwiazdy WR występują w układach podwójnych i podwójność jest konieczna do powstania gwiazd WR.

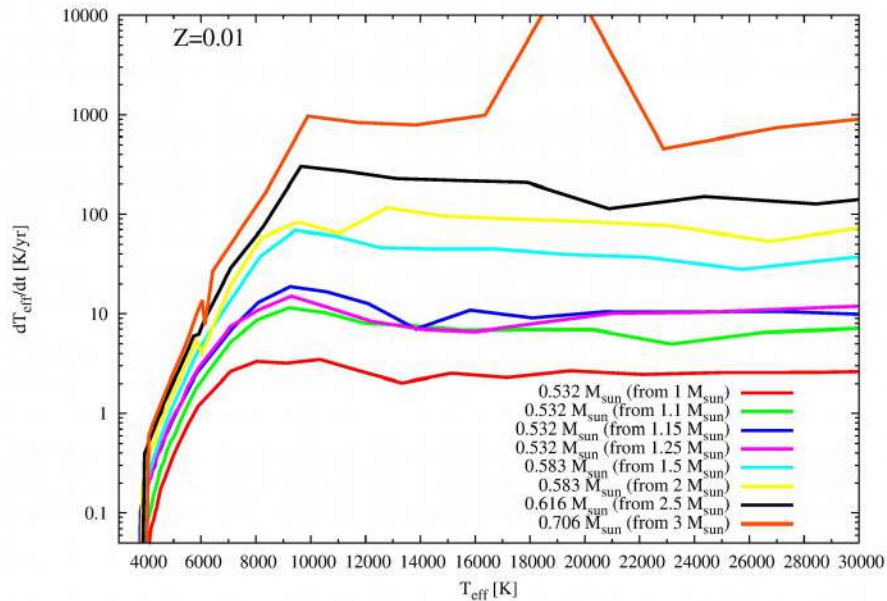
Inną badaną przeze mnie grupą były gwiazdy typu *wels* (weak emission line central stars; Tylenda i in., 1993). Nowsze prace wskazują na to, że gwiazdy typu *wels* nie stanowią osobnej grupy gwiazd centralnych. Do ich klasyfikacji korzystano z widm niskiej rozdzielczości, często zbyt małej do wiarygodnego wyznaczania składu chemicznego atmosfery (Weidmann i in., 2015).

W połączonej próbce gwiazd centralnych z liniami emisyjnymi odsetek gwiazd w układach podwójnych wynosi 2-11%. Jest on więc niższy niż wśród gwiazd bogatych w wodór. Być może większe separacje takich układów mają wpływ na niższą amplitudę zmian jasności i prędkości radialnych i niższą wykrywalność w stosunku do gwiazd centralnych bez linii emisyjnych.

2. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A. A., *Evolution of the central stars of young planetary nebulae*, 2015, A&A, 573A, 65

W kolejnych pracach cyklu obserwacyjnie badałem zmiany temperatury gwiazd post-AGB. Gwiazdy post-AGB ewoluują na tyle szybko, że zmiany temperatury można zaobserwować na przestrzeni kilku dekad. Stanowi to niewielką część czasu życia gwiazdy post-AGB, jednak tempo zmian temperatury wyznaczone w tak krótkim odcinku czasu dobrze opisuje ewolucję gwiazdy. Wynika to stąd, że tempo zmian temperatury jest niemal stałe po przekroczeniu temperatury 10 kK przez gwiazdę post-AGB (rys. 4). Tempo to bardzo silnie zależy od masy końcowej gwiazdy post-AGB.

Tempo zmiany temperatury lepiej nadaje się do badania ewolucji gwiazd post-AGB niż ich jasność. W przestrzeni parametrów  $T_{\text{eff}} - dT_{\text{eff}}/dt$  tory ewolucyjne gwiazd post-AGB są bardziej odseparowane od siebie niż w przestrzeni  $T_{\text{eff}} - L_*$  (diagram H-R). Dodatkowo, tempo zmiany temperatury można zmierzyć z większą względną dokładnością niż jasność gwiazdy.



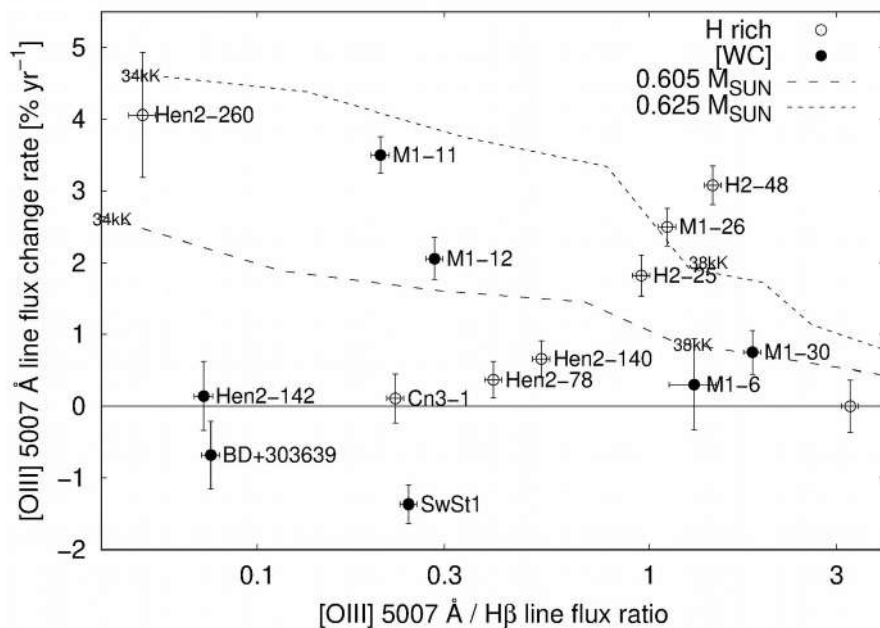
**Rys. 4.** Tempo zmian temperatury modeli gwiazd post-AGB. Tory ewolucyjne dla różnych mas oznaczone są różnymi kolorami (Miller-Bertolami, 2019).

Stosunki linii mgławicowych zmieniają się na skutek rosnącej temperatury gwiazdy centralnej. W swoich pracach do badania zmian temperatury wykorzystywałem przede wszystkim stosunek strumienia linii [OIII] 5007Å/Hβ. O<sup>+</sup> oraz H mają różne energie jonizacji, odpowiednio 35.0 oraz 13.6 eV. Zmiana temperatury stosunkowo chłodnej gwiazdy centralnej o kilkadziesiąt czy kilkaset K prowadzi do znaczącej zmiany stosunku strumieni mgławicowych linii [OIII] 5007Å/Hβ. Dla coraz gorętszych gwiazd centralnych ten stosunek strumieni zmienia się coraz wolniej. Dwie obserwacje wykonane w wystarczająco długim odstępie czasu mogą pozwolić wyznaczyć zmianę temperatury gwiazdy centralnej.

Aby wyznaczyć tempo zmiany stosunku strumieni wykonałem nowe widma 19 młodych mgławic planetarnych. Wszystkie mgławice były wcześniej obserwowane przez Acker i in. (1992) i innych autorów. Nowe widma wykonałem w Południowoafrykańskim Obserwatorium Astronomicznym za pomocą teleskopu Radcliffe 1.9m w 2013 roku i teleskopu SALT w latach 2012-13 oraz w Toruniu za pomocą teleskopu Schmidta-Cassegraine'a 0.9m w roku 2009 i 2013.

W mgławicach, które są rozdzielone przestrzennie, na mierzony stosunek linii mogą mieć wpływ rozmiary mgławicy i apertury spektrografu, umiejscowienie na szczelinie czy seeing. Wynika to ze stratyfikacji jonów w mgławicy. W mgławicach z chłodnymi gwiazdami centralnymi obszar O<sup>++</sup> jest mniejszy niż H<sup>+</sup>. Z kolei w pobliżu gorącej

gwiazdy centralnej powstaje strefa  $O^{+++}$ . Aby zminimalizować wpływ wielkości apertury na obserwowane stosunki linii wybrałem młode mgławice o niewielkich rozmiarach kątowych oraz korzystałem ze stosunkowo szerokiej szczeliny, 2 sekundy łuku. Dla niewielkich mgławic obserwowany stosunek  $[OIII] 5007\text{\AA}/H\beta$  może różnić się o 10-20% na skutek zastosowania różnych rozmiarów apertur w spektrografie (Hajduk i in., 2015). Większe zmiany, zwłaszcza te potwierdzone kilkoma obserwacjami wykonanymi na przestrzeni kilku dekad, należy uznać za fizyczne.



**Rys. 5.** Obserwowana zmiana stosunku strumienia  $[OIII] 5007\text{\AA}/H\beta$  w mgławicach planetarnych. Mgławice z gwiazdami centralnymi typu  $[WC]$  i pozostałe oznaczone są różnymi symbolami. Linie pokazują zmiany stosunku strumienia  $[OIII] 5007\text{\AA}/H\beta$  dla modeli gwiazd post-AGB o różnych masach. Na podstawie Hajduk i in. (2015).

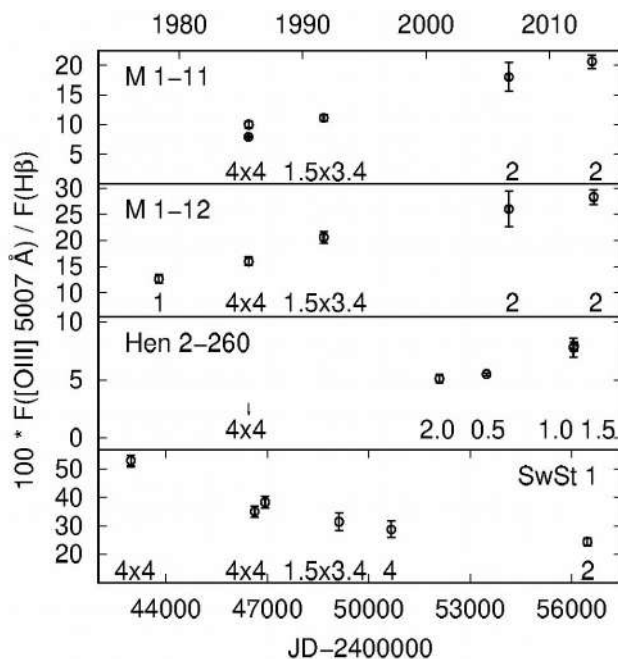
Wykonałem sferycznie symetryczne modele mgławic planetarnych za pomocą kodu fotojonizacyjnego Cloudy dla zmieniającej się w czasie temperatury gwiazd centralnych. Korzystałem z torów ewolucyjnych Blöckera (1995) dla różnych mas gwiazd. Przy wolnym tempie zmian temperatury gwiazdy i dużej gęstości mgławicy pozostaje ona w równowadze jonizacyjnej z polem promieniowania gwiazdy.

Moje modele zakładały, że mgławice są optycznie grube dla promieniowania jonizującego H. Jest to uzasadnione założenie dla młodych mgławic z chłodnymi gwiazdami centralnymi. Tempo ewolucji stosunku  $[OIII] 5007\text{\AA}/H\beta$  jest mniejsze dla mgławic optycznie cienkich. Zależność tempa zmian stosunku strumieni linii  $[OIII]$

5007Å/Hβ od temperatury gwiazdy centralnej, wyrażonej jako stosunek [OIII] 5007Å/Hβ, jest przedstawiona na rys. 5 dla torów ewolucyjnych o różnych masach.

Zmiana stosunku linii jest szybka dla stosunkowo chłodnych gwiazd centralnych ok. 34-40 kK. W tym zakresie temperatur strumień jonizacyjny O<sup>+</sup> gwiazdy centralnej rośnie o czynnik około 20 powodując szybką ewolucję stosunku strumieni [OIII] 5007Å/Hβ. Dla niższych temperatur linia [OIII] 5007Å jest zbyt słaba aby można ją było zaobserwować. Dla temperatury 34 kK tempo zmian stosunku strumienia [OIII] 5007Å/Hβ wynosi ok. 2.5 i 4.5% rocznie dla gwiazd post-AGB o masach odpowiednio 0.605 i 0.625 M<sub>⊙</sub>. Można wykryć taką zmianę porównując obserwacje spektroskopowe wykonane na przestrzeni kilku lat. Dla coraz wyższych temperatur gwiazdy centralnej tempo zmian stosunku strumienia [OIII] 5007Å/Hβ maleje.

Porównanie tempa zmian stosunku [OIII] 5007Å/Hβ otrzymanego modeli z obserwacjami pokazane jest na rys. 5. Około połowa stosunkowo chłodnych gwiazd centralnych mgławic, które mają stosunek strumieni [OIII] 5007Å/Hβ mniejszy niż 3, ulokowana jest powyżej ciągu ewolucyjnego dla 0.605 M<sub>⊙</sub>, a druga połowa poniżej. Jest to zgodne z wcześniejszymi wynikami. Gęsicki i Zijlstra (2007) otrzymali średnią masę gwiazd centralnych mgławic planetarnych około 0.61 M<sub>⊙</sub>.



**Rys. 6.** Ewolucja stosunku strumienia [OIII] 5007Å/Hβ w wybranych mgławicach planetarnych. Liczby podają rozmiary apertury lub szerokość szczeliny w sekundach łuku dla każdej z obserwacji (na podstawie pracy Hajduk i in., 2015).



Dla mgławic planetarnych, które mają stosunek strumieni [OIII] 5007Å/Hβ powyżej 3, zmiany nie są widoczne poza kilkoma wyjątkami. Metoda przestaje być czuła dla gorących gwiazd centralnych.

Kilka mgławic o niskiej ekscytacji było obserwowanych wielokrotnie. Przedstawione są one na rys. 6. Stosunek strumienia linii [OIII] 5007Å/Hβ w M 1-11, M 1-12 oraz Hen 2-260 (szczegółowo przebadana w kolejnej pracy cyklu) rośnie liniowo w czasie. Mierzone stosunki zmieniają się o czynnik 2-3 w badanym okresie. Skala tego wzrostu, jego liniowość oraz brak zależności od apertur spektrografów potwierdza, że jest to rzeczywista zmiana, za którą jest odpowiedzialna rosnąca temperatura gwiazdy centralnej. Mgławica planetarna SwSt 1 pokazuje z kolei malejący stosunek strumieni linii [OIII] 5007Å/Hβ. Spadek temperatury gwiazdy w części horyzontalnej ewolucji post-AGB występuje jedynie w modelach z rozbłyskiem helowym. Szczegółowe badania tego obiektu przedstawione są w ostatniej pracy cyklu.

3. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Gęsiński, K.; Zijlstra, A. A.; Gorny, S. K.; Gładkowski, M., *The evolving spectrum of the planetary nebula Hen 2-260*, 2014, A&A, 567A, 15

W kolejnej pracy cyklu wyznaczyłem tempo zmian temperatury gwiazdy centralnej mgławicy planetarnej Hen 2-260. Motywacją dla prowadzonych badań była odkryta zmienność fotometryczna, którą początkowo przypisywałem układowi podwójnemu. Jak się później okazało, zmienność ta związana jest z pulsacjami młodej gwiazdy centralnej (Handler, 2003).

Obserwacje fotometryczne wykonałem w paśmie *I* za pomocą teleskopu Elizabeth podczas czterech wyjazdów w latach 2011-2012 do Południowoafrykańskiego Obserwatorium Astronomicznego. W 2012 roku otrzymałem również widmo obiektu teleskopem SALT, natomiast mój ówczesny student, Marcin Gładkowski, wykonał w tym samym roku widmo za pomocą teleskopu Radcliffe 1.9m. Widmo to było gorszej jakości ale obejmowało większy zakres spektralny niż widmo z teleskopu SALT. Miałem również do dyspozycji widmo VLT wykonane w 2005 roku (obiekt był w próbie badanej przez Gęsińskiego i in., 2014). Acker i in. (1992) podają jedynie górne oszacowanie na strumień linii [OIII] 5007Å.

Porównanie nowych i archiwalnych obserwacji wskazuje na wzrost stosunku strumieni linii emisyjnych [OIII] 5007Å/Hβ w czasie (rys. 6). Korzystając z modeli fotojonizacyjnych mgławicy planetarnej otrzymałem temperaturę gwiazdy centralnej

dla trzech epok oraz tempo zmian temperatury. Tempo zmian temperatury  $45 \pm 7$  K/rok odpowiada masie gwiazdy centralnej  $0.626 \pm 0.010 M_{\odot}$  z interpolowanych torów ewolucyjnych Blöckera (1995). Geşicki i in. (2014) otrzymali wartość  $0.613 M_{\odot}$  na podstawie zmierzonego wieku mgławicy i temperatury gwiazdy stosując te same tory ewolucyjne. Tory ewolucyjne Blöckera przeszacowują masę gwiazdy o około  $0.04 M_{\odot}$  (Miller-Bertolami, 2016), poprawione wyniki są więc odpowiednio niższe.

Opierałem się przede wszystkim o bardzo silną linię tlenu [OIII]  $5007\text{\AA}$ . Pozostałe linie wysoko wzbudzonych jonów były dużo słabsze. Dodatkową zaletą linii [OIII]  $5007\text{\AA}$  jest to, że jest położona w pobliżu linii  $H\beta$ . Ogranicza to wpływ błędów kalibracyjnych zależnych od długości fali oraz błędu w wyznaczeniu ekstynkcji w interpretacji wyników.

4. **Hajduk, M.**, *Rapid evolution of [WC] stars in the Magellanic Clouds*, 2020, A&A, 642, A71

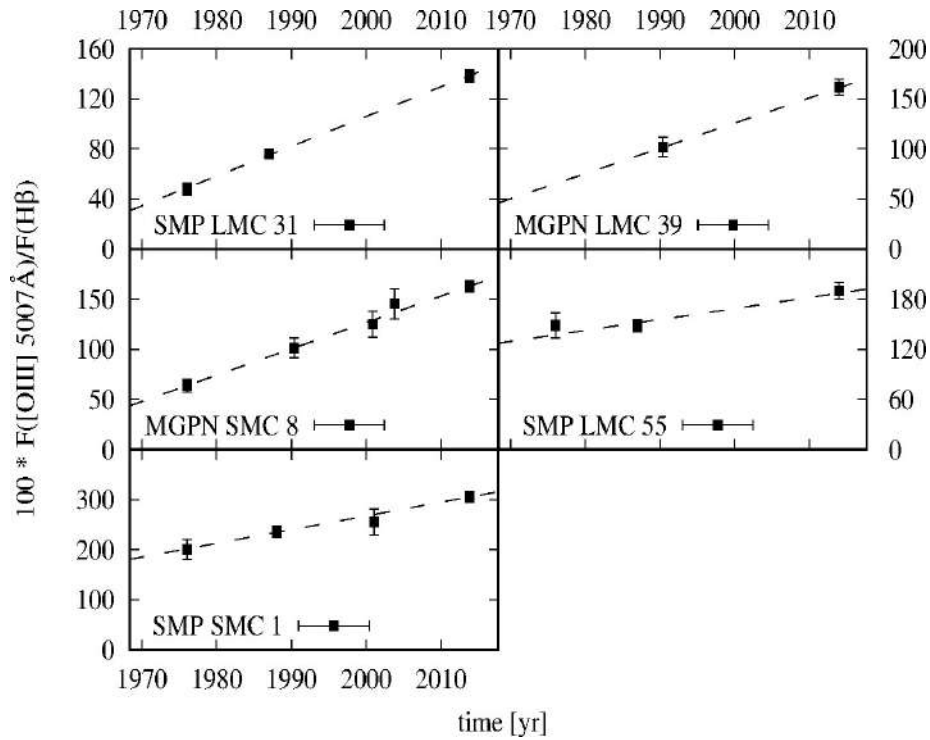
W kolejnej pracy badałem zmiany stosunku strumienia linii [OIII]  $5007\text{\AA}/H\beta$  w mgławicach planetarnych w Obłokach Magellana. Otrzymałem widma 14 mgławic o niskim stosunku [OIII]  $5007\text{\AA}/H\beta$  za pomocą teleskopu SALT w 2013 roku. Większość z mgławic miała rozmiary poniżej 1 sekundy łuku. Użyłem szczeliny o szerokości 2 sekundy łuku aby objąć również większe mgławice.

Dla pięciu mgławic zaobserwowałem liniowy wzrost stosunku strumieni linii [OIII]  $5007\text{\AA}/H\beta$  z czasem (rys. 7). Prawdopodobnie są to mgławice z najbardziej masywnymi gwiazdami centralnymi w obserwowanej próbce. Pozostałe gwiazdy ewoluują zbyt wolno aby można było zaobserwować zmianę stosunku linii [OIII]  $5007\text{\AA}/H\beta$ .

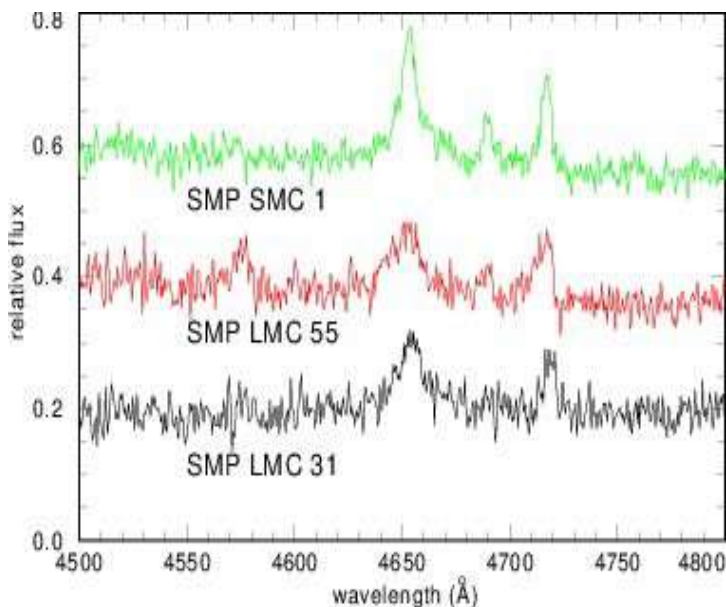
Wykonałem modele fotojonizacyjne Cloudy pięciu mgławic, aby dopasować obserwowaną ewolucję stosunku linii [OIII]  $5007\text{\AA}/H\beta$  i wyznaczyć tempo zmiany temperatury gwiazd centralnych. Korzystałem z modeli Vassiliadis i Wooda (1994) dla gwiazd post-AGB palących hel i Miller-Bertolamiego (2016) dla gwiazd palących wodór. Miller-Bertolami otrzymał tylko dwa modele palące hel, których nie opublikował w formie numerycznej.

Do gwiazd palących hel zaliczyłem gwiazdy typu [WC]. W obserwowanej próbce znajdowała się jedna znana gwiazda typu [WC], MGP N SMC 8. Okazało się, że trzy kolejne obiekty pokazują linie emisyjne charakterystyczne dla gwiazd [WC]: SMP LMC 31, SMP LMC 55 oraz SMP SMC 1 (rys. 8). Zgodnie z klasyfikacją podaną

przez Acker i Neiner (2003), określiłem ich typ jako [WC11]. Łączna liczba gwiazd typu [WC] w Obłokach Magellana wzrosła do 10. Rozkład typów gwiazd [WC] dzięki temu znacząco się zmienił, przypomina w chwili obecnej rozkład typów obserwowany w centrum Galaktyki (Górny, 2008).



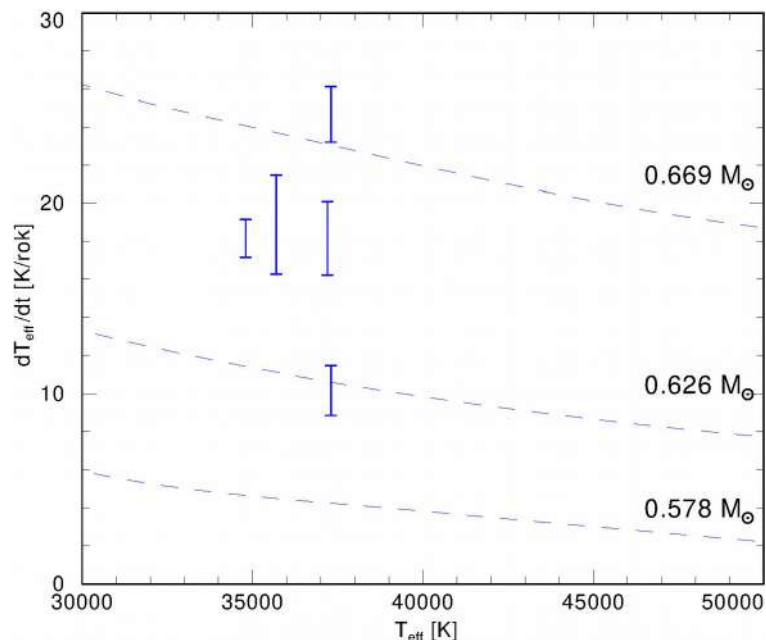
**Rys. 7.** Ewolucja stosunku strumienia  $[OIII] 5007\text{\AA}/H\beta$  w mgławicach planetarnych w Obłokach Magellana (na podstawie pracy Hajduk, 2020).



**Rys. 8.** Widma nowych gwiazd typu [WC] w okolicy gwiazdowej linii CIV 4650 Å. Na podstawie Hajduk (2020).

W wyjściowych modelach wykorzystałem zawartości pierwiastków w mgławicach wyznaczone przez Leisy i Dennefeld (2006). W kilku przypadkach nie byłem w stanie wymodelować stosunku strumieni  $[\text{OIII}] 5007\text{\AA}/\text{H}\beta$  otrzymanego przez mnie z nowych obserwacji, który był kilkakrotnie wyższy niż otrzymany przez Leisy i Dennefelda, nawet znacznie zwiększając temperaturę gwiazdy centralnej. Stosunek linii  $[\text{OIII}] 5007\text{\AA}/\text{H}\beta$  zależy liniowo od obfitości O/H w mgławicach o niskich metaliczościach (Stasińska, 2007). W tych przypadkach musiałem więc zwiększyć obfitości O/H, aby wymodelować wyższy stosunek  $[\text{OIII}] 5007\text{\AA}/\text{H}\beta$ .

Wśród pięciu gwiazd, których mgławice pokazują ewolucję stosunku strumienia  $[\text{OIII}] 5007\text{\AA}/\text{H}\beta$ , znajdują się cztery gwiazdy [WC]. Wyznaczone tempo zmian temperatury dla tych gwiazd zawiera się między 10 a 25 K/rok. Masy gwiazd [WC] wyznaczone za pomocą interpolacji torów ewolucyjnych mieszczą się w zakresie 0.613-0.693  $M_{\odot}$  (rys. 9). Masa gwiazdy, która nie pokazuje linii emisyjnych, wynosi 0.57  $M_{\odot}$ . Górne oszacowanie mas pozostałych gwiazd centralnych, dla których nie zaobserwowałem zmian stosunków strumieni, wynosi 0.53  $M_{\odot}$ . Są one mniej masywne niż gwiazdy centralne w Galaktyce, których maksimum rozkładu wynosi 0.58  $M_{\odot}$  (Gęsicki i in., 2014).



**Rys. 9.** Tempo zmian temperatury pięciu gwiazd centralnych w Obłokach Magellana oraz trzy tory ewolucyjne gwiazd post-AGB palących hel. Na podstawie Hajduk (2020).

Badane gwiazdy [WC] cechuje większa jasność od gwiazd bez linii emisyjnych, wyznaczona zarówno z modelowania obserwowanego rozkładu energii w widmie (van Aarle i in., 2011; Kamath i in., 2014), jak i metody Zanstry (Villaver i in. 2003, 2004). Stanowi to niezależne potwierdzenie, że gwiazdy [WC] w Obłokach Magellana są bardziej masywne niż gwiazdy centralne bogate w wodór.

Kleinmann i in. (2013) otrzymali maksimum rozkładu mas dla białych karłów typu DA  $0.598 M_{\odot}$ , natomiast dla karłów typu DB, które mogą stanowić produkt końcowy ewolucji gwiazd [WC],  $0.651 M_{\odot}$ . Bardzo dobrze zgadza się to z otrzymanymi przeze mnie masami dla czterech gwiazd [WC] w Obłokach Magellana. Weidmann i Gamen (2011) pokazują, że gwiazdy typu [WC] są położone bliżej płaszczyzny Galaktyki, co również sugeruje ich większą masę, w zgodzie z moimi wynikami. Z kolei masy gwiazd centralnych bogatych w wodór są znacząco niższe niż masy karłów typu DA.

Miller-Bertolami i Althaus (2007) wykazali, że masywne gwiazdy post-AGB (masa końcowa  $M_f > 0.6 M_{\odot}$ ) nie ekspandują znacząco na skutek HIF. Energia uwolniona podczas spalania warstwy wodorowej jest niższa niż energia wiązania otoczki. VLTP w masywnych gwiazdach powinny powrócić tylko raz do obszaru AGB. Ten proces mógłby być odpowiedzialny za powstanie większości gwiazd [WC].

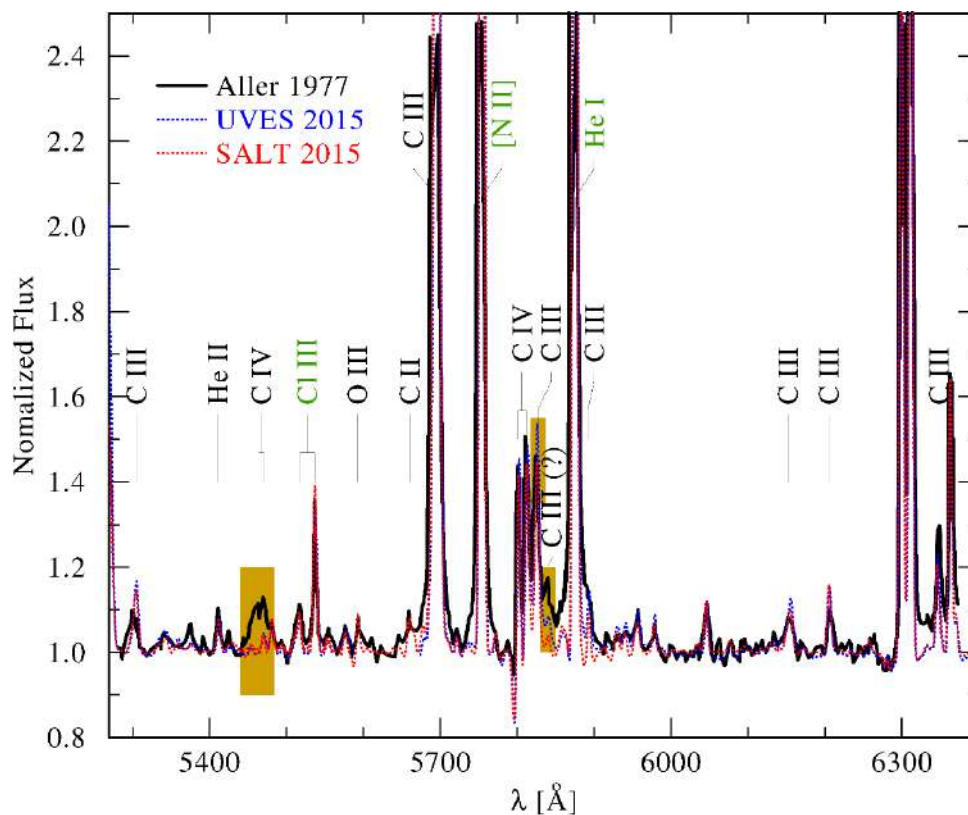
5. **Hajduk, M.**; Todt, H.; Hamann, W.-R.; Borek, K.; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A.A., *The cooling-down central star of the planetary nebula SwSt 1: a late thermal pulse in a massive post-AGB star?* 2020, MNRAS, 498, 1205

W ostatniej pracy zająłem się szczegółowymi badaniami gwiazdy centralnej mgławicy SwSt 1 typu [WC]. Jej mgławica jako jedyna w próbie badanej w pracy 2 cyklu charakteryzuje się spadkiem stosunku strumieni [OIII]  $5007\text{\AA}/H\beta$  z czasem. Oprócz tego zaobserwowałem zmiany w liniach gwiazdowych. Wiek kinematyczny bogatej w wodór mgławicy SwSt 1 wynosi zaledwie 190 lat. Wcześniej gwiazda centralna musiała być bogata w wodór. Zmiana składu chemicznego musiała mieć miejsce w przeciągu ostatnich dwóch wieków.

Otrzymałem widma obiektu z teleskopów VLT oraz SALT w 2015 roku. Widma te służyły do badania ewolucji mgławicy oraz gwiazdy centralnej. Porównując pomiary stosunków strumieni z różnych obserwacji wykonanych na przestrzeni czterech dekad widoczny jest spadek stosunku strumieni [OIII]  $5007\text{\AA}/H\beta$  oraz linii helu. Zmiany te są spowodowane spadkiem temperatury gwiazdy centralnej. Skala czasowa rekombinacji jonów  $O^{++}$  oraz  $He^+$  w mgławicy wynosi około rok, dzięki czemu linie

tych jonów reagują na zmianę temperatury gwiazdy centralnej. Nie zaobserwowałem zmian stosunku strumieni linii [NII] czy [SII].

Zauważyłem osłabienie linii CIV 5470 Å oraz wzmocnienie gwiazdowych linii CII 7231 i 7236 Å pomiędzy 1977 a 2015 rokiem (rys. 10). Podczas dwóch wyjazdów do Poczdamu, finansowanych przez program współpracy MNiSW i DAAD, wykonałem modele atmosfer gwiazdy za pomocą kodów PoWR (Hamann i Gräfener, 2004). Pokazują one, że temperatura gwiazdy zmniejszyła się z 42 kK do 40.5 kK pomiędzy 1977 a 2015. Następnie temperatura gwiazdy utrzymuje się na stałym poziomie, lub osiągnęła minimum i zaczyna wzrastać.



**Rys. 10.** Porównanie widm gwiazdy centralnej SwSt 1 wykonanych w 2015 i 1977 roku (Hajduk i in., 2020). Pomarańczowe obszary oznaczają miejsca w widmie, w których widoczne są zmiany.

Spadek temperatury gwiazdy centralnej SwSt 1 został najprawdopodobniej wywołany przez aktywowanie się powłoki helowej na skutek późnego rozbłysku helowego. Trudno przyjąć, że mógł tu nastąpić bardzo późny rozbłysk helowy. Wówczas, w czasie zaledwie ok. 190 lat gwiazda z AGB musiałaby stać się białym karłem a następnie wrócić do obszaru AGB. Nie ma dowodów na to, że na obserwowane zmiany ma wpływ ewolucja w układzie podwójnym. W pierwszej pracy cyklu nie

wykryłem zmienności fotometrycznej, natomiast porównanie zebranych widm nie wykazało żadnej zmienności w prędkościach radialnych.

Zaproponowałem, że badany obiekt jest stosunkowo masywną gwiazdą, przechodzącą przez późny rozbłysk helowy. Paczyński (1970) pokazał, że takie gwiazdy nie wracają do obszaru AGB w wyniku LTP. Zamiast tego gwiazda przechodzi przez małą pętlę na diagramie H-R. Co więcej, Wood i Faulkner (1986) dowodzą, że dla gwiazd o masie końcowej większej niż  $0.86 M_{\odot}$  rozbłysk helowy prowadzi do zupełnego odrzucenia otoczki bogatej w wodór. Byłoby to w zgodzie z górnym oszacowaniem zawartości wodoru  $<5\%$  w atmosferze gwiazdy, otrzymanym z modeli atmosfery.

### **Podsumowanie i perspektywa dalszych badań**

Udało mi się odkryć pierwszą gwiazdę typu [WC] w układzie podwójnym. Odkrycie to wyklucza hipotezę gwiazdowego mergera jako jedyny scenariusz powstawania gwiazd typu [WC]. Podwójność prawdopodobnie nie gra kluczowej roli w powstawaniu tego typu gwiazd. Wyjaśnienia gwiazd [WC] należy szukać na gruncie ewolucji gwiazd pojedynczych.

Zaobserwowałem zmienność czasową stosunków strumieni linii młodych mgławic planetarnych i wykorzystałem ją do wyznaczenia mas gwiazd centralnych. Podejście to uzupełnia inne metody wykorzystujące właściwości mgławic do badania ewolucji gwiazd post-AGB. Jej zaletą jest to, że wyniki słabo zależą od odległości i pomiarów rozmiarów mgławic, które są szczególnie niepewne dla małych lub złożonych obiektów. Nowa metoda nie zakłada jednostajnej ewolucji temperatury gwiazdy od opuszczenia gałęzi AGB i pozwala w szczególności zaobserwować zmianę tempa czy kierunku ewolucji. Wykorzystanie razem z innymi metodami pozwoli na lepsze zbadanie historii ewolucji gwiazdy post-AGB. Nowa metoda ogranicza się jednak do stosunkowo małej próbki stosunkowo chłodnych gwiazd centralnych z młodymi mgławicami, gdzie zmiany strumienia są najlepiej widoczne.

Odkryłem trzy nowe gwiazdy typu [WC] w Obłokach Magellana. Szybka ewolucja tych gwiazd prawdopodobnie wynika z ich stosunkowo dużych mas początkowych, co potwierdzają ich wysokie jasności. Z kolei gwiazdy nie pokazujące linii emisyjnych są mniej masywne niż gwiazdy centralne mgławic planetarnych w Galaktyce.

Zaproponowałem nowego kandydata na późny rozbłysk helowy, gwiazdę centralną mgławicy SwSt 1, analizując ewolucję linii mgławicowych oraz gwiazdowych.

Temperatura gwiazdy spadła w latach 1977-2015. Gwiazda jest prawdopodobnie bardziej masywna niż odkryte do tej pory kandydatki na LTP czy VLTP.

Planuję kontynuację badań w szerszej współpracy. Doktorantka, zatrudniona w realizowanym grantie OPUS, zajmuje się wyznaczaniem tempa zmiany temperatury i mas gwiazd centralnych mgławic planetarnych w Galaktyce na podstawie obserwacji spektroskopowych wykonanych przeze mnie teleskopem NTT w latach 2014-2015. Badania pozwolą na wyznaczenie rozkładu mas tych gwiazd i porównanie tempa ewolucji różnych grup gwiazd centralnych w Galaktyce na podstawie większej próbki. W próbce znajduje się między innymi mgławica z gwiazdą centralną typu [WN] oraz gwiazdą centralną w układzie podwójnym.

Chcę zmierzyć tempo zmian temperatury za pomocą modelowania widm gwiazd [WC] w różnych epokach korzystając z nowych obserwacji. Takie badania mogą być prowadzone dla gorących gwiazd centralnych mgławic planetarnych, dla których stosunek strumieni [OIII]  $5007\text{\AA}/\text{H}\beta$  nie jest dobrym wyznacznikiem zmian temperatury. Modelowanie pozwoli na ilościowe oszacowanie tempa utraty masy na skutek wiatru gwiazdowego oraz jego wpływu na ewolucję post-AGB. Dotychczas wykonałem to tylko dla gwiazdy centralnej SwSt 1 ze względu na niewielką ilość dostępnych widm gwiazd [WC] w wysokiej rozdzielczości. Na zbadanie ewolucji pierwszych trzech obiektów został przyznany czas obserwacyjny na teleskopie SALT we współpracy m.in. z prof. Wolfem-Rainerem Hamannem i dr Marcelo Miller-Bertolamim.

### **Bibliografia:**

Acker, A.; Neiner, C. 2003, A&A, 403, 659

Acker, A., Marcout, J., Ochsenbein, F., et al. 1992, The Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae, Parts I, II

Althaus, L. G.; Córscico, A. H.; Isern, J.; García-Berro, E. 2010, A&AR, 18, 471

Arhipova, V. P.; Burlak, M. A.; Ikonnikova, N. P.; Komissarova, G. V.; Esipov, V. F.; Shenavrin, V. I. 2020, Astronomy Letters, 46, 100

Asplund, M.; Gustafsson, B.; Lambert, D. L.; Kameswara Rao, N. 1997, A&A, 321L, 17

Asplund, M.; Lambert, D. L.; Kipper, T.; Pollacco, D.; Shetrone, M. D. 1999, A&A, 343, 507



Blöcker, T. 1995, *A&A*, 299, 755

Ciardullo, R.; Bond, H. E.; Sipior, M. S.; Fullton, L. K.; Zhang, C.-Y.; Schaefer, K. G. 1999, *AJ*, 118, 488

Clayton, G. C.; De Marco, O. 1997, *AJ*, 114, 2679

De Marco O., Soker N. 2002, *PASP*, 114, 602

De Marco, O., Passy, J.-C., Frew, D. J., Moe, M., Jacoby, G. H. 2013, *MNRAS*, 428, 2118

Duerbeck, H. W.; Benetti, S. 1996, *ApJ*, 468L, 111

Geşicki, K.; Zijlstra, A. A.; Hajduk, M.; Szyszka, C. 2014, *A&A*, 566A, 48

Geşicki, K.; Zijlstra, A. A. 2007, *A&A*, 451, 925

Górny, S. K.; Tylenda, R. 2000, *A&A*, 362, 1008

Górny, S. K. 2008, *ASPC*, 391, 165

Hajduk, M.; Zijlstra, A. A.; Herwig, F. i in. 2005, *Science*, 308, 231

Hajduk, M.; Zijlstra, A. A.; Geşicki, K. 2010, *MNRAS*, 406, 626

Hajduk, M.; van Hoof, P. A. M.; Geşicki, K.; Zijlstra, A. A.; Gorny, S. K.; Gładkowski, M. 2014, *A&A*, 567A, 15

Hajduk, M.; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A. A. 2015, *A&A*, 573A, 65

Hajduk, M. 2020, *A&A*, 642, 71

Hajduk, M.; Todt, H.; Hamann, W.-R.; Borek, K.; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A.A. 2020, *MNRAS*, 498, 1205

Hamann, W.-R.; Gräfener, G. 2004, *A&A*, 427, 697

Handler, G. 2003, *ASPC*, 292, 183

Hegazi, A.; Bear, E.; Soker, N. 2020, *MNRAS*, 496, 612H

Herwig, F. 2005, *ARA&A*, 43, 435

Ivanova, N., et al. 2013, *A&AR*, 21, 59

Jacoby, G. H.; Hillwig, T. C.; Jones, D. 2020, *MNRAS*, tmpL.149

Jeffery, C. S.; Schönberner, D. 2006, *A&A*, 459, 885

Jones, David; Boffin, Henri M. J. 2017, *Nature Astronomy*, 1, 117

Kamath, D., Wood, P. R., & Van Winckel, H. 2014, *MNRAS*, 439, 2211

Kleinman, S. J.; Kepler, S. O.; Koester, D., et al. 2013, *ApJS*, 204, 5

Kondratyeva, L. N. 2005, *A&AT*, 24, 291

Lau, H. H. B.; Gil-Pons, P.; Doherty, C.; Lattanzio, J. 2012, *A&A*, 542, 1

Leisy, P.; Dennefeld, M. 2006, *A&A*, 456, 451

Manick, R.; Miszalski, B.; McBride, V. 2015, *MNRAS*, 448, 1789

Monteiro, H.; Morisset, C.; Gruenwald, R.; Viegas, S. M. 2000, *ApJ*, 537, 853

Miller Bertolami, M. M.; Althaus, L. G. 2007, *MNRAS*, 380, 763

Miller Bertolami, M. M. 2016, *A&A*, 588, 25

Miller Bertolami, M. M. 2019, *IAUS*, 343, 36

Miszalski, B.; Acker, A.; Moffat, A. F. J.; Parker, Q. A.; Udalski, A. 2009, *A&A*, 496, 813

Miszalski, B.; Acker, A.; Parker, Q. A.; Moffat, A. F. J. 2009, *A&A*, 505, 249

Paczyński, B. 1970, *AcA*, 20, 47

Schönberner, D. 1979, *A&A*, 79, 108

Soker, N. 1997, *ApJS*, 112, 487

Stasińska, G.; Tylenda, R.; Acker, A.; Stenholm, B. 1992, *A&A*, 266, 486

Stasińska, G. 2007, arXiv e-prints, arXiv:0704.0348

Todt, H.; Hamann, W.-R. 2015, in Hamann W.-R., Sander A., Todt H., eds, *Proc. Wolf-Rayet Stars Workshop*. Univ. Potsdam, Potsdam, Germany, p. 253

Tylenda, R.; Acker, A.; Stenholm, B. 1993, *A&AS*, 102, 595

Tylenda, R.; Stasińska, G. 1989, *A&A*, 217, 209

Wood, P. R.; Faulkner, D. J. 1986, *ApJ*, 307, 659

van Aarle i in., 2011, *A&A*, 530, A90

Vassiliadis, E.; Wood, P. R. 1994, *ApJS*, 92, 125

Vanderburg, A.; Rappaport, S. A.; Xu, S. 2020, *Nature*, 585, 363

van der Hucht, K. A. 2001, *New Astronomy Reviews*, 45, 135

Weidmann, W. A.; Gamen, R. 2011, *A&A*, 526, A6

Weidmann, W. A.; Mari, M. B.; Schmidt, E. O. et al. 2020, *A&A*, 640A, 10

Werner, K.; Herwig, F. 2006, *PASP*, 118, 183

Wesson, R.; Liu, X. -W.; Barlow, M. J. 2003, *MNRAS*, 340, 253

Wesson, R.; Barlow, M. J.; Liu, X. -W.; Storey, P. J.; Ercolano, B.; De Marco, O.  
2008, MNRAS, 383, 1639

Villaver, E., Stanghellini, L., & Shaw, R. A. 2003, ApJ, 597, 298

Villaver, E., Stanghellini, L., & Shaw, R. A. 2004, ApJ, 614, 716

Wood, P. R., Faulkner, D. J., 1986, ApJ, 307, 659

Zijlstra, A. A.; van Hoof, P. A. M.; Perley, R. A. 2008, ApJ, 681, 1296

**5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

Niemal wszystkie prace w moim dorobku są wieloautorskie, wykonane wraz z naukowcami z kraju i zagranicy. Do zagranicznych współpracowników należą m.in. Prof. Albert Zijlstra (University of Manchester) oraz dr Peter van Hoof (Royal Observatory of Belgium). Dzięki otrzymaniu grantu na wymianę naukową z University of Potsdam (DAAD-MNiSW) na lata 2018-2019 nawiązałem współpracę naukową z prof. Wolfem-Rainerem Hamannem oraz dr Helge Todtem. Współpraca owocowała już pierwszą publikacją oraz zaakceptowanym wnioskiem obserwacyjnym na teleskop SALT. Rozpocząłem również współpracę z prof. Marijke Haverkorn i jej grupą z Radboud University (Nijmegen, Holandia) dzięki otrzymaniu stypendium NAWA na realizację stażu naukowego w programie im. Bekkera. Uczestniczyłem w ponad czterdziestu wnioskach obserwacyjnych na duże instrumenty, przygotowanych w większości w międzynarodowych zespołach. W ponad dwudziestu wnioskach występuję jako PI, a w dalszych dziesięciu jako autor korespondencyjny.

**6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.**

1. Ćwiczenia dla studentów: fizyka ogólna, analiza matematyczna, wstęp do astrofizyki, pracownia fizyczna, pracownia astrofizyczna (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).
2. Opiekun pracy licencjackiej (2010) i współopiekun pracy magisterskiej (2012) dra Marcina Gładkowskiego (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).
3. Przygotowanie i przeprowadzenie programu 40 godzin zajęć (dwa semestry) (wykład i ćwiczenia) w 2009/2010 „Światło – nasz przewodnik po Wszechświecie” (Gimnazjum i Liceum w Golubiu-Dobrzyniu i I Liceum

Ogólnokształcące w Inowrocławiu), w ramach programu „Kółka fizyczne i matematyczne”, finansowanego z Human Capital Programme, European Funds.

4. Przygotowywanie imprez na Festiwalu Nauki i Sztuki w Toruniu: w 2007 „Zjawisko rezonansu w muzyce i astronomii” (PI), w 2014 „Kolory dźwięków” (PI), w 2009 „Odkryj Wszechświat dla siebie” i 2010 „Niebo światłem malowane” (CoI).
5. Przygotowanie i przeprowadzenie warsztatów z fizyki i astronomii w obserwatorium w Piwnicach pod Toruniem 15-16.05.2010, oraz warsztatów dla Krajowego Funduszu na rzecz Dzieci, lato 2008.
6. Popularne wykłady w planetarium w Olsztynie 02.12.2011 „Współczesne obserwatoria astronomiczne” i 17.10.2008 „Narodziny na nowo”, w Uniwersytecie Trzeciego Wieku w Szczecinku 16.04.2009 „Planety pozasłoneczne”, podczas Zlotu Astronomów w Toruniu 4.08.2011 „Mgławice planetarne”.
7. Popularny artykuł w Uranii 2/2009 “Bardzo późny rozbłysk helowy”, popularny artykuł w czasopiśmie Delta 06/2015 “CK Vul – pierwsza czerwona nowa”.
8. Wywiad dla Rzeczpospolitej 29/04/2005 „Nowe życie starego karła”, wywiad w Radiu UWM FM 11/08/2020.
9. Orowadzanie wycieczek po obserwatorium UMK w Piwnicach pod Toruniem.
10. Kierowanie dwoma grantami NCN, programem wymiany MNiSW-DAAD oraz NAWA, rola wykonawcy w czterech grantach NCN/MNiSW oraz w projekcie Marie Curie International Research Staff Exchange Scheme (IRSES).

**7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

W okresie 2012-2014 byłem zatrudniony w Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika PAN na podstawie umów o dzieło.

W okresie 15/05/2015 – 30/11/2016 pracowałem na stanowisku koordynatora dyscyplin w Narodowym Centrum Nauki w Krakowie. Do moich zadań należało m.in. organizowanie i przeprowadzanie konkursów na projekty badawcze, ocena formalna złożonych wniosków oraz ocena rzetelności i bezstronności opinii przygotowanych przez ekspertów.

**Wnioski obserwacyjne (PI):**

**VLT:** 093.D-0918 (GIRAFFE)

**SALT:** 2011-3-POL-003, 2012-1-POL-010, 2012-2-POL-006, 2013-2-POL\_OTH-001 (RSS), 2013-2-POL-007, 2015-1-SCI-029, 2015-1-SCI-031, 2020-2-SCI-012 (HRS)

**Gemini:** GN-2019B-Q-216 (GMOS)

**VLA:** 17B-117, 19A-174, 19A-175, 20B-046

**SUBARU:** S15A-215S (IRC+AO188)

**NTT:** 093.D-0182 (EFOSC2)

**LOFAR:** LC9\_035, LC10\_005, LC10\_006, LC12\_028

**William Herschel Telescope (ING):** SW2014a41

**Elizabeth & Radcliffe Telescope (SAAO):** (7 and 2 proposals, respectively)

**Wnioski obserwacyjne (autor korespondencyjny):**

**VLT:** 291.D-5044 (XSHOOTER); 095.D-0953 (UVES)

**SALT:** 2012-1-POL-002 (RSS)

**Gemini:** GS-2011B-Q-90, GN-2010A-Q-62 (GMOS)

**VLA:** AZ0155, AZ0167, AZ0171, 12B-225, 13A-186

**NTT:** 095.D-0614 (EFOSC2)

**Wnioski obserwacyjne (CoI):**

**VLT:** 095.D-0248; 105.206H, 106.20YN (XSHOOTER); 381.D-0117, 383.D-0427, 385.D-0292, 087.D-0223, 089.D-0080, 091.D-0209, 093.D-0195, 095.D-0113 (FORS)

**SALT:** 2011-3-POL-002, 2013-POL-006

**ALMA:** 2013.1.00516.S

.....*Marian Hajduk*.....

(podpis wnioskodawcy)

## Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

### I. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych

1. **Hajduk, M.**; Zijlstra, A. A.; Gęszicki, K., *Binary [WR] and wels central stars of planetary nebulae*, 2010, MNRAS, 406, 626
2. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Gęszicki, K.; Zijlstra, A. A.; Gorny, S. K.; Gładkowski, M., *The evolving spectrum of the planetary nebula Hen 2-260*, 2014, A&A, 567A, 15
3. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A. A., *Evolution of the central stars of young planetary nebulae*, 2015, A&A, 573A, 65
4. **Hajduk, M.**, *Rapid evolution of [WC] stars in the Magellanic Clouds*, 2020, A&A, 642, A71
5. **Hajduk, M.**; Todt, H.; Hamann, W.-R.; Borek, K.; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A.A., *The cooling-down central star of the planetary nebula SwSt 1: a late thermal pulse in a massive post-AGB star?* 2020, MNRAS, 498, 1205

### II. INFORMACJA O AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ

1. Wykaz opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych.

#### **Po obronie pracy doktorskiej:**

1. Gęszicki, K.; Zijlstra, A. A.; Szyszka, C.; **Hajduk, M.**; Lagadec, E.; Guzman Ramirez, L., *Disk evaporation in a planetary nebula*, **2010**, A&A, 514, 54
2. Tylenda, R.; **Hajduk, M.**; Kaminski, T.; Udalski, A.; Soszynski, I.; Szymanski, M. K.; Kubiak, M.; Pietrzynski, G.; Poleski, R.; Wyrzykowski, L.; Ulaczyk, K., *V1309 Scorpii: merger of a contact binary*, **2011**, A&A, 528, 114
3. Galan, C., i in., *International observational campaigns of the last two eclipses in EE Cephei: 2003 and 2008/9*, **2012**, A&A, 544, 53
4. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Zijlstra, A., *CK Vul: evolving nebula and three curious background stars*, **2013**, MNRAS, 432, 167
5. Gęszicki, K.; Zijlstra, A. A.; **Hajduk, M.**; Szyszka, C., *Accelerated post-AGB evolution, initial-final mass relations, and the star-formation history of the Galactic bulge*, **2014**, A&A, 566A, 48

6. Zhekov, S. A.; Tomov, T.; Gawronski, M. P.; Georgiev, L. N.; Borissova, J.; Kurtev, R.; Gagné, M.; **Hajduk, M.**, *A multiwavelength view on the dusty Wolf-Rayet star WR 48a*, **2014**, MNRAS, 445, 1663
7. **Hajduk, M.**; Gładkowski, M.; Soszyński, I., *Search for binary central stars of the SMC PNe*, **2014**, A&A, 561A, 8
8. Kamiński, T.; Menten, K. M.; Tylenda, R.; **Hajduk, M.**; Patel, N. A.; Kraus, A., *Nuclear ashes and outflow in the eruptive star Nova Vul 1670*, **2015**, Nature, 520, 322
9. Hrivnak, B. J.; Lu, Wenxian; Volk, K.; Szczerba, R.; Soszyński, I.; **Hajduk, M.**, *Variability in Proto-planetary Nebulae. III. Light Curve Studies of Magellanic Cloud Carbon-rich Objects*, **2015**, ApJ, 805, 78
10. **Hajduk, M.**; Gromadzki, M.; Mikołajewska, J.; Miszalski, B.; Soszyński, I. *An X-Shooter View of the Symbiotic Star [JD2002] 11* **2015**, AcA, 65, 139
11. **Hajduk, M.**; van Hoof, P. A. M.; Śniadkowska, K.; Krankowski, A.; Błaszczewicz, L.; Dąbrowski, B.; Zijlstra, A. A. *Radio observations of planetary nebulae: no evidence for strong radial density gradients*, **2018**, MNRAS, 479, 5657
12. Eyres, S. P. S.; Evans, A.; Zijlstra, A.; Avison, A.; Gehrz, R. D.; **Hajduk, M.**; Starrfield, S.; Mohamed, S.; Woodward, C. E.; Wagner, R. M., *ALMA reveals the aftermath of a white dwarf-brown dwarf merger in CK Vulpeculae*, **2018**, MNRAS, 481, 4931
13. Szczerba, R.; **Hajduk, M.**; Pavlenko, Ya. V. i in., *Validating post-AGB candidates in LMC and SMC using SALT spectra*, **2020**, A&A, 641, 142

**Przed obroną pracy doktorskiej:**

1. **Hajduk, M.**; Zijlstra, A. A.; Gesicki, K., *An occultation event in the nucleus of the planetary nebula M 2-29*, **2008**, A&A, 490L, 7
2. van Hoof, P. A. M.; **Hajduk, M.**; Zijlstra, Albert A., i in., *The onset of photoionization in Sakurai's Object (V4334 Sagittarii)*, **2007**, A&A, 471L, 9
3. **Hajduk, M.**; Zijlstra, Albert A.; van Hoof, P. A. M., i in., *The enigma of the oldest 'nova': the central star and nebula of CK Vul*, **2007**, MNRAS, 378, 1298
4. **Hajduk, M.**; Zijlstra, A. A.; Herwig, F., i in., *The Real-Time Stellar Evolution of Sakurai's Object*, **2005**, Science, 308, 231

2. Informacja o wystąpieniach na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.
  1. IAUS 357: *White Dwarfs as probes of fundamental physics and tracers of planetary, stellar & galactic evolution*, Hilo, Big Island, Hawaje, USA 21-25.10.2019 (zgłoszony wykład)
  2. *Asymmetric Planetary Nebulae VII*, Hong Kong, Chiny, 4-8.12.2017 (zgłoszony wykład)
  3. *19th European White Dwarf Workshop*, Montreal, Kanada, 11-15.08.2014 (zgłoszony wykład)
  4. *Workshop on symbiotic stars, binary post-AGB and related objects*, Wierzba, Polska, 18-23.08.2013 (zgłoszony wykład)
  5. *35 Zjazd Polskiego Towarzystwa Astronomicznego*, Gdańsk, Polska, 11-15.09.2011 (zaproszony wykład)
  6. *Asymmetric Planetary Nebulae V*, Bowness-on-Windermere, UK, 20-25.06.2010 (zgłoszony wykład)
  7. *Planetary Nebulae: an Eye to the Future*, Puerto de la Cruz, Hiszpania, 25-29.07.2011 (2 plakaty)
  8. *Planetary Nebulae Near and Far*, Sasek, Polska, 24.09-4.10.2008 (zgłoszony wykład)
  9. *Hydrogen-Deficient Stars*, Tubingen, Niemcy, 17-21.09.2007 (zgłoszony wykład + plakat)
  10. *Evolution and chemistry of symbiotic stars, binary post-AGB and related objects*, Wierzba, Polska, 28-30.08.2006 (zgłoszony wykład)
  11. *Why Galaxies Care About AGB Stars*, Wiedeń, Austria, 7-11.08.2006 (zgłoszony wykład)
  12. *Planetary nebulae as astronomical tools*, Gdańsk, Polska, 28.06-2.07.2005
  13. *Evolved Stars Workshop*, Belfast, UK, 6-7.09.2004 (zgłoszony wykład)
  14. *Zdenek Kopal's Binary Star Legacy*, Litomyśl, Czechy, 31.03-3.04.2004 (plakat)
3. Informacja o udziale w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji
  - Beacon Satellite Symposium**, 2019, Olsztyn, Polska (LOC)
  - 39th Zjazd Polskiego Towarzystwa Astronomicznego**, 2019, Olsztyn, Polska (LOC)



4. Informacja o uczestnictwie w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów.

**Program im. Bekkera NAWA:** *Radio observations of planetary nebulae - an insight to physics of ionised plasma*, 141,000 PLN (2019) - kierownik

**Bilateralny program DAAD (Niemcy) oraz MNiSW** *Observational verification of the evolutionary paths leading to the formation of hydrogen-deficient central stars of planetary nebulae*, 3 458 EUR (2018-2019) - kierownik

**NCN OPUS** *The observed changes of fluxes in planetary nebulae as an indicator of the evolution of their central stars*, 294 300 PLN (2017-2021) - kierownik

**NCN SONATA** *Planetary Nebulae with Binary Central Stars*, 171 600 PLN, (2011-2014) - kierownik

**Stypendium Marszałka Województwa Kujawsko-Pomorskiego Krok w przyszłość - stypendia dla doktorantów:** *The study of the Very Late Thermal Pulse objects and candidates* 21,412 PLN (2007) - stypendysta

**NCN OPUS** 2011/01/B/ST9/02031: *Post-AGB objects in the Magellanic Clouds* 402,740 PLN – PI prof. Ryszard Szczerba

**MNiSW** N203 024 31/3879: *Planetary Nebulae in the Galactic Centre* 142,200 PLN – PI dr hab. Krzysztof Gęsiński

**MNiSW** N203 511838: *The study of V838 Mon and related objects* 388,000 PLN – PI prof. Romuald Tylenda

**MNiSW** N203 403939: *The study of planetary nebulae in the environments of different metallicities* 399,600 PLN – PI dr hab. Sławomir Górny

5. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach.

**Międzynarodowa Unia Astronomiczna** – członek od 2018

**Polskie Towarzystwo Astronomiczne** – członek od 2011

6. Informacja o odbytych stażach w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru.
  - University of Manchester**, UK, 04-09/2004 (5 miesięcy)
  - University of Manchester**, UK, 07/2006 (2 tygodnie)
  - ESO**, Garching, Niemcy, 09/2008 (2 tygodnie)
  - Valparaiso University**, USA, 04/2012 (3 tygodnie)
  - Yunnan Astronomical Observatory**, Chiny, 09/2012 (3 tygodnie)
  - Royal Observatory of Belgium**, Bruksela, 01/2013 (4 tygodnie)
  - University of Potsdam**, Niemcy, 03/2018 (3 tygodnie)
  - NRAO**, Socorro, USA, 07/2018 (10 dni)
  - University of Potsdam**, Germany, 05/2019 (1 tydzień)
  - ASTRON**, Holandia, 09/2019 (1 tydzień)
  - Radboud University**, Holandia, 03/2020 (2 tygodnie, pozostałe 8 miesięcy przełożone 2021 rok)
7. Informacja o recenzowanych pracach naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych.
  - Galaxies** – dwie recenzje
8. Informacja o uczestnictwie w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych.
  - EU Marie Curie Training Site for Radioastronomy** under contract HPMT-CT-2000-00069 (2004) opiekun dr Myfanwy Bryce, University of Manchester
  - Marie Curie International Research Staff Exchange Scheme (IRSES)**: Evolved stars: clues to the chemical evolution of galaxies 85,500 EUR (2012-2015) PI dr Laimons Začs, University of Latvia
9. Informacja o uczestnictwie w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny.
  - Recenzje wniosków dla **Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej**.

### III. INFORMACJE NAUKOMETRYCZNE

1. Informacja o punktacji Impact Factor (w dziedzinach i dyscyplinach, w których parametr ten jest powszechnie używany jako wskaźnik naukometryczny).

**A&A** (12 prac) IF 5.636

**MNRAS** (6 prac) IF 5.356

**AcA** (1 praca) IF 2.640

**ApJ** (1 praca) IF 5.580

**Nature** (1 praca) 42.778

**Science** (1 praca) 41.845

2. Informacja o liczbie cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.

**ADS**: 718 cytowania (w tym 67 autocytowań)

**WoS**: 568 cytowania (w tym 48 autocytowań)

**Scopus**: 522 cytowań

3. Informacja o posiadanym indeksie Hirscha.

h-index = 14 (**ADS**), 12 (**WoS, Scopus**)

4. Informacja o liczbie punktów MNiSW.

Suma punktów MNiSW prac wymienionych w pkt 1.

3200

.....*Marian Hajduk*.....

(podpis wnioskodawcy)