

Uniwersytet Wrocławski  
Wydział Fizyki i Astronomii

Natalia Musiał

**Parametry atmosferyczne i skład chemiczny gwiazd w gromadzie  
otwartej NGC 6475**

Atmospheric parameters and chemical abundances of stars in open cluster NGC 6475

Praca licencjacka napisana pod kierunkiem  
dr Ewy Niemczury w Instytucie  
Astronomicznym UWr

Wrocław 2020

## Streszczenie

Niniejsza praca skupia się na wyznaczeniu parametrów atmosferycznych oraz składu chemicznego gwiazd w gromadzie otwartej NGC 6475. Badania zostały przeprowadzone na podstawie wysokiej rozdzielczości widm udostępnionych w projekcie UVES POP. Wykonano normowanie widm (program HANDY) oraz klasyfikację widmową gwiazd (MKCLASS, *xmk25*). Temperaturę efektywną oraz logarytm przyspieszenia grawitacyjnego gwiazd wyznaczono trzema sposobami – wstępne wartości dopasowano w programie HANDY, kolejne wyliczono za pomocą wskaźników fotometrii genewskiej oraz fotometrii Strömgrena. Skład chemiczny gwiazd wyznaczono za pomocą metody syntezy widma (*fitsun*). Do policzenia modeli atmosfer i widm syntetycznych wykorzystano oprogramowanie ATLAS9 i SYNTHE. Widma obserwowane zostały odpowiednio przygotowane, czyli podzielone na krótsze fragmenty za pomocą programu HANDY-extended. Jednocześnie ze składem chemicznym wyznaczone zostały także prędkości rotacji gwiazd. Dla danej gwiazdy uzyskane wartości obfitości pierwiastków zostały porównane z wartościami słonecznymi oraz, jeśli znaleziono takie informacje, skonfrontowane z literaturą. Zweryfikowano wykonaną wcześniej klasyfikację widmową. Zrobiono także przegląd literatury w celu zestawienia otrzymywanych wyznaczeń wieku oraz odległości do gromady na przestrzeni lat.

## Abstract

This thesis focuses on determination of atmospheric parameters and chemical abundances of stars in open cluster NGC 6475. Research was based on spectra released by UVES POP project. Spectral normalisation (HANDY) and classification (MKCLASS, *xmk25*) was done. Effective temperature and surface gravity was derived in three ways – initial values obtained in HANDY were followed by computations based on Geneva and Strömgren photometry color indices. Chemical abundances for each studied star were derived using spectrum synthesis method (*fitsun*). Atmospheric models and synthetic spectra were calculated with ATLAS9/SYNTHE codes. Spectra were prepared earlier by division on shorter parts in HANDY-extended. Program, which fitted chemical abundances determined also rotational velocity. Abundances of chemical elements for every star were compared with solar abundances. If possible, comparison was done also with literature values. Spectral classification results were verified. Cluster distance and age determinations made in literature were gathered.

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Projekt UVES POP</b>	<b>5</b>
2.1	Obiekty obserwowane w projekcie UVES POP . . . . .	5
2.2	Redukcja danych . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Gromada otwarta NGC 6475</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Normowanie widm: program HANDY</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Klasyfikacja widmowa</b>	<b>17</b>
5.1	Gwiazdy typu B . . . . .	18
5.2	Gwiazdy typu A . . . . .	21
5.3	Klasyfikacja widmowa: programy MKCLASS i xmk25 . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Wyznaczenie parametrów atmosferycznych</b>	<b>27</b>
6.1	Fotometria Strömgrena . . . . .	27
6.2	Fotometria Genewska . . . . .	29
<b>7</b>	<b>Skład chemiczny gwiazd gromady NGC 6475</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>53</b>

# 1 Wstęp

Gromady otwarte to grupy kilkuset, a nawet kilku tysięcy gwiazd, które oddziałują ze sobą poprzez siłę grawitacji. Gwiazdy należące do gromady różnią się między sobą pod względem mas, rozmiarów, jasności i etapów ewolucji. Jest to jeden z wielu powodów, dla których analiza gromad gwiazd jest tak ważnym i ciekawym zagadnieniem dla astrofizyków. Kolejnym powodem, o którym warto wspomnieć jest fakt, że gwiazdy gromady powstały w tym samym czasie oraz w tym samym miejscu w galaktyce. Badając je, można wyznaczyć zarówno wiek, jak i odległość do gromady o wiele precyzyjniej niż byłoby to możliwe w przypadku pojedynczej gwiazdy.

Skoro obiekty gromady powstały w tym samym czasie i tym samym miejscu to można przypuszczać, że ten sam obłok materii dał im początek. Prowadzi to do wniosku, że na samym początku skład chemiczny wszystkich gwiazd gromady był taki sam. Jedyna różnica tkwiła w ich masach, co zdeterminowało tempo oraz przebieg ewolucji konkretnych obiektów. Obserwując zatem gwiazdy w gromadzie, można zauważyć, że część z nich znajduje się jeszcze na ciągu głównym, podczas gdy pozostałe wyewoluowały już do gałęzi olbrzymów.

Wśród gwiazd gromady mogą znajdować się zarówno gwiazdy „chemicznie normalne”, jak i „chemicznie osobliwe” (*chemically peculiar*, CP), które mają nietypowe składy chemiczne. Z definicji, „normalny” skład chemiczny atmosfery gwiazdowej jest podobny do składu atmosfery Słońca. Porównywanie składu chemicznego tych obiektów, przy znanych parametrach atmosferycznych, wieku i etapie ewolucji może pomóc w znalezieniu odpowiedzi na pytania dotyczące gwiazd CP. Pytania te dotyczą przede wszystkim powodu, dla którego niektóre gwiazdy wykazują osobliwości chemiczne, mimo że ich początek był taki sam jak chemicznie normalnych gwiazd gromady. Następnym zagadnieniem jest etap ewolucji, na którym osobliwości chemiczne zaczynają się pojawiać. Zaobserwowanie obiektów w gromadzie, które są w momencie przejścia między jednym a drugim stanem, byłoby wyjątkowo cenną wskazówką w odpowiedzi na te pytania (Stütz et al., 2006).

NGC 6475 to stosunkowo jasna gromada otwarta, która znajduje się w konstelacji Skorpiona. Zawiera zarówno gwiazdy chemicznie normalne, jak i chemicznie osobliwe, przez co jest wartościowym obiektem badań. Obserwacje spektroskopowe gwiazd gromady NGC 6475 przeprowadzono przy użyciu spektrografu UVES w ramach projektu UVES POP. Zarejestrowane zostały widma wysokiej rozdzielczości dla 32 potencjalnych członków wspomnianej gromady. Widma te zostały następnie skalibrowane, zredukowane oraz udostępnione do publicznego użytku. Niniejsza praca skupia się przede wszystkim na badaniu obiektów CP w gromadzie NGC 6475, dlatego rozważane są tylko gwiazdy typów widmowych B i A, wśród których można znaleźć obiekty chemicznie osobliwe.

Analizę gwiazd gromady rozpoczęto od przeglądu odległości oraz wieku gromady wyznaczonych na przestrzeni lat. Sprawdzone również, czy gwiazdy obserwowane w ramach projektu UVES POP należą do gromady. Następnym krokiem było rozpoczęcie przygotowania widm do dalszych badań. Przy pomocy programu HANDY dokonano normowania oraz wyznaczono pierwsze przybliżone parametry atmosferyczne gwiazd, takie jak temperatura efektywna  $T_{\text{eff}}$ , logarytm przyspieszenia grawitacyjnego  $\log g$  oraz prędkość rotacji  $v \sin i$ . Po unormowaniu widm przeprowadzona została klasyfikacja widmowa gwiazd gromady NGC 6475, którą wykonano za pomocą programu MKCLASS. Obiekty sklasyfikowane jako chemicznie osobliwe stanowiły dużą część analizowanych gwiazd. Wyniki klasyfikacji zostały porównane z litera-

turą.

Kolejnym etapem analizy było dokładniejsze wyznaczenie parametrów atmosferycznych. Zarówno temperatura efektywna, jak i logarytm przyspieszenia grawitacyjnego zostały obliczone za pomocą wskaźników fotometrii Strömgrena oraz fotometrii genewskiej. W przypadku gwiazd chemicznie osobliwych konieczne okazało się wprowadzenie poprawek do wyznaczonych parametrów. Uzyskane wartości  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  posłużyły jako parametry wejściowe do obliczeń składu chemicznego badanych obiektów. Zaimplementowana metoda to synteza widma, która poprzez dopasowanie widma syntetycznego do obserwowanego daje informacje na temat zawartości pierwiastków w atmosferze gwiazdy. Oprócz składu chemicznego wyznaczana jest także mikroturbulencja  $v_{\text{mic}}$ , prędkość rotacji  $v \sin i$  oraz prędkość radialna  $v_{\text{rad}}$ . Przeprowadzono dyskusję otrzymanych wyników.

## 2 Projekt UVES POP

Badane widma gwiazd zostały zaczerpnięte z bazy UVES POP<sup>1</sup> (Bagnulo et al., 2003, *Paranal Observatory Project*). Jest to projekt, w ramach którego wykonano obserwacje spektroskopowe jasnych gwiazd za pomocą spektrografu UVES<sup>2</sup> (*Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph*), zainstalowanego na teleskopie VLT<sup>3</sup> (*Very Large Telescope*) w Chile. W ramach projektu widma te zostały skalibrowane, zredukowane i udostępnione do dalszej analizy.

Widma dostępne w bazie UVES POP są wysokiej rozdzielczości i charakteryzują się wysokim stosunkiem sygnału do szumu (S/N). Obserwowany zakres długości fali wynosi od około 300 do 1100 nm. Strumień światła, który wpada do teleskopu, zostaje podzielony na dwie części: niebieską i czerwoną. Część niebieska obejmuje zakres 300-500 nm, czyli od promieniowania w bliskim ultrafiolecie do części niebieskiej światła widzialnego, natomiast czerwona część obejmuje zakres 420-1100 nm, czyli promieniowanie widzialne i podczerwone. Dostępne są dwa mody obserwacji, w których zastosowane zostały różne filtry (DIC1 i DIC2), co skutkuje różnymi czasami ekspozycji, a także różnymi zakresami widm w części niebieskiej i czerwonej. Tabela 1 przedstawia obserwowane zakresy długości fal. Przerwa w detektorze CCD pomiędzy dwoma czipami skutkuje tym, że zakresy 577-584 nm oraz 854-866 nm nie są objęte obserwacjami. W widmach widoczna jest luka na tych długościach fal. W wyniku tego, że rzędy nie nachodzą na siebie, widoczne są także przerwy o szerokości około 1 nm w zakresie 866-1040 nm.

Z powodu wspomnianego podziału wiązki światła, rozdzielczość widmowa jest różna dla obydwu części: 80 000 dla niebieskiego przedziału i 110 000 dla czerwonego. Rozdzielczość przestrzenna spektrografu na piksel waha się od 0.16 arcsec dla niebieskiej części do 0.22 arcsec dla części czerwonej. Średnia wartość sygnału do szumu mieści się w przedziale 300-500. Wartości rozdzielczości i S/N dla wszystkich obserwowanych gwiazd gromady są podane w Tabeli 4.

Tablica 1: Obserwowane zakresy długości fal obserwacji UVES (Bagnulo et al., 2003).

Mod obserwacji	Nazwa	Zakres długości fali	Część optyczna
DIC1	346B	304 - 388 nm	niebieska
	580L	476 - 577 nm	czerwona
	580U	584 - 684 nm	czerwona
DIC2	437B	373 - 499 nm	niebieska
	860L	660 - 854 nm	czerwona
	860U	866 - 1040 nm	czerwona

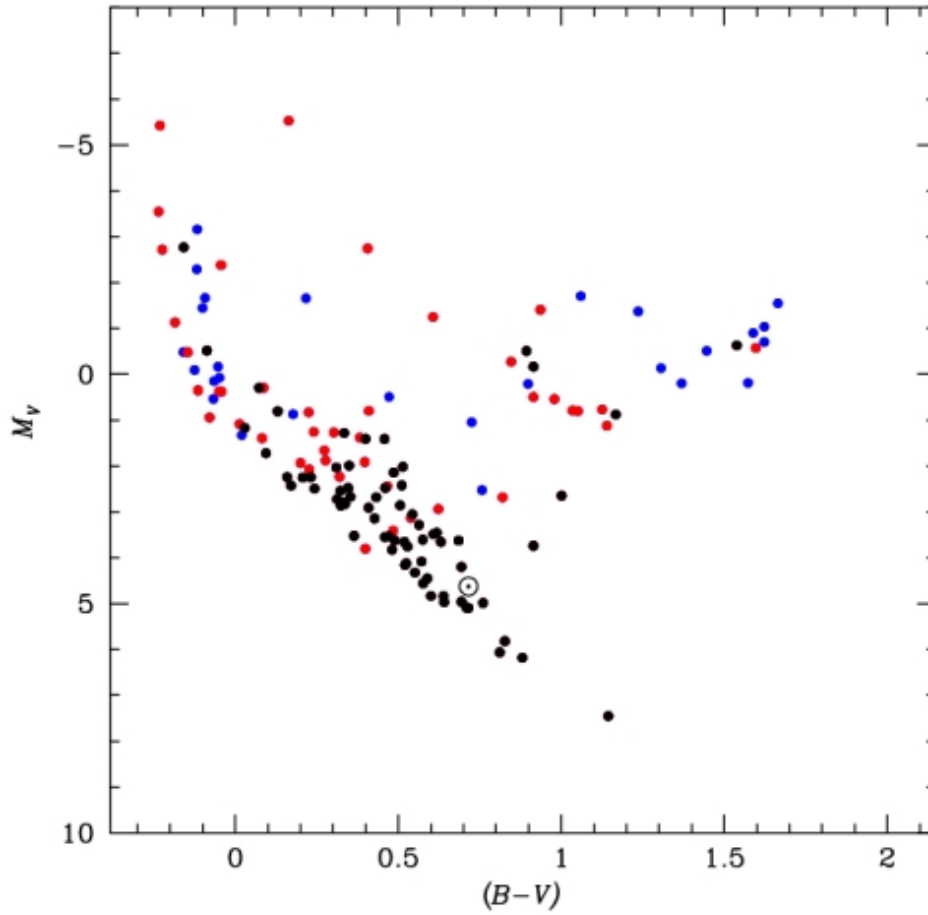
### 2.1 Obiekty obserwowane w projekcie UVES POP

Obiekty, które były celem obserwacji UVES POP, dzielą się na gwiazdy gromad otwartych oraz gwiazdy pola. W pierwszej z tych grup badano gromady IC 2391 (gromada Omikron

<sup>1</sup><http://www.eso.org/sci/observing/tools/uvespop.html>

<sup>2</sup><https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/uves.html>

<sup>3</sup><https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/ut.html>



Rysunek 1: Wykres barwa-jasność dla gwiazd pola obserwowanych w ramach projektu UVES POP.

Velorum) oraz NGC 6475 (Messier 7). Łączna liczba obserwowanych gwiazd w gromadach wynosi 79 (48 w IC 2391, 31 w NGC 6475).

Do obserwacji gwiazd pola wybrano 263 obiekty, które są na tyle zróżnicowane w rozmiarach, temperaturze oraz ewolucji, aby w znacznym stopniu pokryć diagram Hertzsprunga-Russella (Rysunek 1). Ograniczeniem w tej selekcji była jasność wynosząca 7.5 mag, która była spowodowana tym, że obserwacje gwiazd pola prowadzono w czasie zmierzchu. Obserwacje tej grupy gwiazd miały także inny cel. Zmierzch był dobrą porą na testowanie sprawności urządzenia.

Kolory, którymi oznaczone są gwiazdy na Rysunku 1, oznaczają dokładność, z jaką została dla nich wyznaczona paralaksa – są to wartości błędów wynoszące odpowiednio 20% (czerwony), 10% (niebieski) i 5% (czarny). Symbol okręgu z kropką oznacza położenie Słońca na wykresie.

## 2.2 Redukcja danych

W celu skalibrowania i zredukowania danych wykorzystano programy ESO-MIDAS<sup>4</sup> UVES. Cała procedura rozpoczynała się od wybrania obserwacji, które teleskop przeprowadził w pełni sprawnie (obserwacje przypadające podczas przerw technicznych bądź trzęsień ziemi były odrzucane). Następnie poprawiano obserwacje ze względu na bias i flat field oraz dodawano poprawki na defekty kamer CCD. W celu oczyszczenia widma z linii tellurycznych, od widma gwiazdy odejmowano widmo nieba. Zastosowano także poprawkę na ekstynkcję atmosferyczną. Urządzenie nie rejestruje jednego widma w całym przedziale 300-1000 nm, ale sześć oddzielnych widm, które są następnie łączone w całość. Tak uzyskane widma zostały na końcu sprawdzone pod względem jakości. Jeśli któreś widmo było przesaturowane bądź miało za niski poziom S/N, było odrzucane.

---

<sup>4</sup><https://www.eso.org/sci/software/esomidas/>



### 3 Gromada otwarta NGC 6475

Gwiazdy gromady otwartej NGC 6475 zostały wybrane jako obiekty badań w poniższej pracy. Dla tej gromady, zwanej także Gromadą Ptolemeusza (M7), ostatnia wyznaczona odległość to  $274^{+11}_{-10}$  pc (Reddy and Lambert, 2019). W Tabeli 2 zestawiono otrzymane na przestrzeni lat odległości dla NGC 6475. Pierwsza kolumna to odległość wyznaczona w parsekach, natomiast w drugiej kolumnie znajduje się moduł odległości. Odległości na przestrzeni lat wahają się między 260 a 302 pc. Moduł odległości dla NGC 6475 zmienia się w literaturze w zakresie od 7.08 do 7.65 mag. Metody, którymi wartości te były wyznaczane, są podane w kolumnie trzeciej. Można zauważyć, że głównie używane były dwa sposoby: pomiary astrometryczne oraz dopasowanie izochron. Jedno wyznaczenie zostało uzyskane za pomocą fotometrii. Pomiary astrometryczne zostały wykonane dzięki obserwacjom misji Gaia oraz Hipparcos. Ostatnia kolumna zawiera publikacje, w których przedstawiono podane odległości.

Wiek gromady szacowany jest na  $\log t = 8.54$  (Gaia Collaboration, 2018). Wyliczane wartości wieku gromady przedstawia Tabela 3. Pierwsza kolumna to wiek wyznaczony w milionach lat. Wartości wahają się od 166 do 347 Myr. W każdym przypadku wiek uzyskano dzięki metodzie dopasowania izochron. Ostatnia kolumna zawiera referencje do prac, w których opublikowano podany wiek gromady NGC 6475.

Tablica 2: Porównanie wyznaczonych odległości do gromady NGC 6475.

d [pc]	DM [mag]	Metoda	Referencje
260	7.25	dopasowanie izochron	Mermilliod (1981a)
	7.08	fotometria	Meynet et al. (1993)
$291.5^{+27.9}_{-23.4}$		astrometria (Hipparcos)	Robichon et al. (1997)
$280.1^{+25.7}_{-21.7}$	$7.24^{+0.19}_{-0.18}$	astrometria (Hipparcos)	Robichon et al. (1999)
	$7.547 \pm 0.109$	dopasowanie izochron	Loktin et al. (2001)
	$7.65 \pm 0.05$	dopasowanie izochron	Villanova et al. (2009)
302	$7.16 \pm 0.08$	astrometria (Gaia)	Silaj and Landstreet (2014)
	7.234	astrometria (Gaia)	Gaia Collaboration (2018)
$300.8 \pm 0.3$		dopasowanie izochron	Yen et al. (2018)
$274^{+11}_{-10}$		astrometria (Gaia)	Reddy and Lambert (2019)

Tablica 3: Porównanie wieku gromady NGC 6475 wyznaczonego metodą dopasowania izochron.

Wiek [Myr]	Referencje
224	Mermilliod (1981b)
224	Meynet et al. (1993)
$299 \pm 11$	Loktin et al. (2001)
166	Kharchenko et al. (2005)
$200 \pm 50$	Villanova et al. (2009)
$219 \pm 3$	Silaj and Landstreet (2014)
$220 \pm 100$	Netopil et al. (2016)
347	Gaia Collaboration (2018)
$195^{+4}_{-7}$	Yen et al. (2018)

Reddy and Lambert (2019) wyznaczył średnią prędkość radialną gromady jako  $-14.8 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$ . Według Gaia Collaboration (2018) wartość poczerwienienia  $E(B - V)$  wynosi 0.049. Wynik ten został otrzymany za pomocą fotometrii dostarczonej przez GAIA.

Listę gwiazd gromady NGC 6475 obserwowanych w projekcie UVES POP umieszczono w Tabeli 4. W pierwszej kolumnie znajdują się oznaczenia gwiazd z katalogu Henry’ego Drapera

(HD). Wyjątkiem są trzy ostatnie pozycje: Cl\* NGC 6475 JJ 22, JJ 10, JJ 8 – obiekty te nie mają swoich oznaczeń HD. Druga i trzecia kolumna pokazują typy widmowe oraz jasności badanych gwiazd w paśmie V przedstawione na stronie projektu UVES POP<sup>5</sup>.

Wśród gwiazd badanych w projekcie jest 8 gwiazd typu A, 15 typu B, w tym 2 gwiazdy osobiście chemicznie: HD 162586 (B9 SiCr) i HD 162725 (B9 SiCr) (zgodnie z informacjami UVES POP). W czwartej, piątej, szóstej i siódmej kolumnie umieszczono informacje dotyczące obserwowanych widm, zaczerpnięte z ESO Archive Science Portal<sup>6</sup> – są to obserwowane zakresy widma, średni stosunek sygnału do szumu, rozdzielczość oraz data obserwacji. W ósmej kolumnie znajdują się informacje dotyczące podwójności: n – nie ma informacji o podwójności, t – znaleziono źródło mówiące o podwójności obiektu (referencje podane w Tabeli 4) lub stwierdzono podwójność na podstawie klasyfikacji widmowej wykonanej w dalszej części pracy (brak referencji przy oznaczeniu „t”). Jako gwiazdy podwójne sklasyfikowano 16 spośród 23 gwiazd, w tym 14 gwiazd spektroskopowo podwójnych (Pourbaix et al., 2004; Mermilliod et al., 2009; Silaj and Landstreet, 2014) i 2 gwiazdy wizualnie podwójne (Worley and Heintz, 1983; Tokovinin et al., 2010).

W dwu ostatnich kolumnach przedstawiona jest przynależność badanych obiektów do gromady NGC 6475 na podstawie dwóch źródeł. Pierwszym z nich jest publikacja Cantat-Gaudin et al. (2018). Prawdopodobieństwo przynależności do gromady przedstawione jest tam w ułamkach – wartość 1.0 oznacza stuprocentowe prawdopodobieństwo członkostwa. W przypadku stwierdzenia braku informacji na temat przynależności obiektu do gromady, w tabeli wpisano oznaczenie „brak”. Prawdopodobieństwo przynależności w wyżej wspomnianej publikacji obliczono za pomocą kodu UPMASK (*Unsupervised Photometric Membership Assignment in Stellar Cluster*). Kod ten opiera się na szukaniu gwiazd o wspólnych ruchach własnych, które mogą potencjalnie przynależeć do jednej gromady, oraz określaniu rozkładu, który przedstawia sposób rozmieszczenia obserwowanych obiektów na niebie. W ostatniej kolumnie znajdują się informacje o przynależności konkretnej gwiazdy do gromady, jeśli w publikacji Cantat-Gaudin et al. (2018) nie było na ten temat informacji, a znaleziono ją w innym źródle. Taka sytuacja dotyczy czterech obiektów. Ich przynależność została stwierdzona przez Mermilliod et al. (2009) (HD 162587), Gaia Collaboration (2018) (HD 162630) oraz Silaj and Landstreet (2014) (HD 162678 i HD 162781) po analizie ruchów własnych tych gwiazd.

Dla pięciu gwiazd (HD 162306, HD 162585, HD 162724, HD 320868, JJ 10) nie znaleziono informacji o przynależności do gromady NGC 6475. Jedna gwiazda, HD 162514, ma stwierdzone niskie prawdopodobieństwo członkostwa – tylko 20%. Inny obiekt z niższym prawdopodobieństwem przynależności do gromady w porównaniu do pozostałych gwiazd to HD 162725 – 60%. Pozostałe gwiazdy wykazują przynależność co najmniej na 70% i więcej.

---

<sup>5</sup><http://www.eso.org/sci/observing/tools/uvespop.html#data>

<sup>6</sup><http://archive.eso.org/scienceportal/home>

Tablica 4: Gwiazdy gromady NGC 6475 w projekcie UVES POP.

Nazwa HD	Typ widmowy	Jasność V [mag]	Obserwowany zakres widma [nm]	S/N	Rozdzielczość obserwacji	Data obserwacji	Podwójność	Przynależność do gromady Cantat-Gaudin <sup>1</sup> Inne
162144	A0 III/IV	7.63	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	113.8 244.4 253.2	65030 65030 74450	19.08.2001 19.08.2001 19.08.2001	n	1.0
162187	A5 V	9.7	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	116.9 89.4 203.7 316.55	74450 65030 65030 74450	19.08.2001 25.08.2001 25.08.2001 25.08.2001	n	0.9
162305	A0 V	7.81	665 - 1043 302.3-388.4 373.1-499.9	113.8 226.3 310.1	74450 65030 65030	25.08.2001 4.09.2002 4.09.2002	t	0.9
162306	B8 IV	8.89	472.7-683.5 665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	489.2 254.2 288.7 251.9 315.9	74450 74450 65030 65030 74450	4.09.2002 4.09.2002 7.03.2003 7.03.2003 7.03.2003	n	brak
162374	B6 V	5.88	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9	107 212.7 293.8	74450 65030 65030	7.03.2003 15.08.2001 15.08.2001	t	0.9
162391	G8 III	5.85	472.7-683.5 665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	393.2 142.6 208.3 393.4	74450 74450 65030 74450	15.08.2001 15.08.2001 14.08.2001 14.08.2001	t <sup>2</sup>	0.8
162393	A0 V	8.04	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	203.4 65.3 114.3 216.6	74450 65030 65030 74450	14.08.2001 17.08.2001 17.08.2001 17.08.2001	n	0.9
162514	A7 V	8.87	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	51.5 49.8 114.9 215.6	74450 65030 65030 74450	17.08.2001 31.08.2001 31.08.2001 1.09.2001	t <sup>4</sup>	0.2
162515	B9.5 V	6.57	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	95.1 62.7 169.3 168.1	74450 65030 65030 74450	31.08.2001 21.08.2001 21.08.2001 21.08.2001	t <sup>2</sup>	0.9
162576	B9p	6.99	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9	80 118 254.1	74450 65030 65030	21.08.2001 16.08.2001 16.08.2001	t	0.9
162586	B8 V	6.17	472.7-683.5 665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	312.4 144 174.8 313.3 420.1	74450 74450 65030 65030 74450	16.08.2001 16.08.2001 15.08.2001 15.08.2001 15.08.2001	t <sup>5</sup>	brak

Nazwa HD	Typ widmowy	Jasność V [mag]	Obserwowany zakres widma [nm]	S/N	Rozdzielczość obserwacji	Data obserwacji	Podwójność	Przynależność do gromady Cantat-Gaudin <sup>1</sup> Inne
162587	K3 III	5.60	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	139.8 195.8 368.7	65030 65030 74450	20.08.2001 20.08.2001 20.08.2001	t <sup>2</sup>	brak  Mermilliod et al. (2008)
162630	B9 III ?	7.58	665 - 1043 373.1-499.9	104.8 250.9	74450 65030	20.08.2001 22.08.2001	t <sup>2</sup>	brak Gaia Collaboration (2018)
162631	B9.5 V	7.37	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	104.8 109.9 241.7 338.1	74450 65030 65030 74450	22.08.2001 23.08.2001 23.08.2001 23.08.2001	n	brak
162678	B9 V	6.38	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9	134 88 227.1	74450 65030 65030	23.08.2001 24.08.2001 24.08.2001	n	brak Silaj and Landstreet (2014)
162679	B9 V	7.16	472.7-683.5 665 - 1043 302.3-388.4 373.1-499.9 472.7-683.5	280.5 135.3 172 402.2 461.1	74450 74450 65030 65030 74450	24.08.2001 24.08.2001 6.09.2002 6.09.2002 6.09.2002	t <sup>2</sup>	0.7
162680	A1 V	7.76	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	208 99.1 177.1 319.2	74450 65030 65030 74450	6.09.2002 8.10.2001 8.10.2001 8.10.2001	n	0.9
162724	B9 IV/V	5.96	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	91 105 207 289.6	74450 65030 65030 74450	8.10.2001 18.08.2001 18.08.2001 18.08.2001	t <sup>2</sup>	brak
162725	B9p	6.42	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	109.6 147.9 323 448.1	74450 65030 65030 74450	18.08.2001 9.08.2001 9.08.2001 9.08.2001	t	0.6
162780	B9 V	6.91	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	157.4 90.3 192.2 281.6	74450 65030 65030 74450	9.08.2001 8.10.2001 6.10.2001 8.10.2001	t <sup>2</sup>	0.9
162781	B9.5 V	7.5	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	117.5 117.1 268.2 368	74450 65030 65030 74450	6.10.2001 17.09.2001 17.09.2001 17.09.2001	n	brak Silaj and Landstreet (2014)
162817	B9.5 V	6.11	665 - 1043 304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5	160.7 97.8 228.7 343.5	74450 65030 65030 74450	17.09.2001 13.08.2001 13.08.2001 13.08.2001	n	0.7

Nazwa HD	Typ widmowy	Jasność [mag]	Obserwowany zakres wida [nm]	S/N	Rozdzielczość obserwacji	Data obserwacji	Podwójność	Przynależność do gromady Cantat-Gaudin <sup>1</sup> Inne
162888	B9 V	6.98	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	130 281.5 425.1 168.5	65030 65030 74450 74450	9.08.2001 9.08.2001 9.08.2001 9.08.2001	n	0.8
162889	A0 V	8.44	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	150.2 334.1 463.6 160.5	65030 65030 74450 74450	8.08.2001 8.08.2001 8.08.2001 8.08.2001	t	0.8
320764	A0	8.93	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	126.5 276 420.8 160.5	65030 65030 74450 74450	1.09.2001 1.09.2001 1.09.2001 1.09.2001	n	0.6
320768	F0	9.22	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	142.5 107.3 210.4 373.4	74450 65030 65030 74450	1.09.2001 23.08.2001 23.08.2001 23.08.2001	n	0.8
320847	G0	9.4	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	95.9 249.7 384.2 202.7	65030 65030 74450 74450	2.09.2001 2.09.2001 2.09.2001 2.09.2001	t <sup>3</sup>	1.0
320865	F8	9.74	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	93.6 239.3 359.9 178.2	65030 65030 74450 74450	10.08.2001 10.08.2001 10.08.2001 10.08.2001	t <sup>6</sup>	0.8
320868	K5	8.7	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	38.3 117.6 250.8 144.5	65030 65030 74450 74450	14.08.2001 14.08.2001 14.08.2001 14.08.2001	n	brak
JJ 22	F5-G0 ?	11.11	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	90.7 216.9 332.9 162.4	65030 65030 74450 74450	9.08.2001 9.08.2001 9.08.2001 9.08.2001	n	0.7
JJ 10	K0 ?	12.53	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	29.4 86.1 151.7 83.1	65030 65030 74450 74450	10.08.2001 10.08.2001 10.08.2001 10.08.2001	n	brak
JJ 8	K5 ?	13.30	304.3-391.6 373.1-499.9 472.7-683.5 665 - 1043	19.6 59.9 126.8 65.8	65030 65030 74450 74450	8.08.2001 8.08.2001 8.08.2001 8.08.2001	n	0.8

<sup>1</sup> – Cantat-Gaudin et al. (2018)

<sup>2</sup> – Pourbaix et al. (2004); <sup>3</sup> – Merriliod et al. (2009);

<sup>4</sup> – Silaj and Landstreet (2014); <sup>5</sup> – Worley and Heintz (1983); <sup>6</sup> – Tokovinin et al. (2010).

## 4 Normowanie widm: program HANDY

HANDY<sup>7</sup> jest programem umożliwiającym normowanie widm gwiazd. Cała procedura normowania rozpoczyna się od wczytania wybranego widma gwiazdy oraz doboru odpowiedniej siatki obejmującej zakres temperatur, w którym znajduje się badany obiekt. Program oferuje nam siatki basicGrid dla temperatur efektywnych 15000 – 30000 K oraz lowTempGrid dla zakresu 8000 – 14900 K. Modele atmosfer i widma syntetyczne dla siatki basicGrid wyliczono przy użyciu programów TLUSTY i SYNSPEC<sup>8</sup> przy założeniu braku lokalnej równowagi termodynamicznej (NLTE) (Hubeny, 1988; Lanz and Hubeny, 2003a; Hubeny and Lanz, 2003; Lanz and Hubeny, 2003b), natomiast modele i widma dla lowTempGrid wyliczono programami ATLAS9/SYNTHETIC zakładając lokalną równowagę termodynamiczną (LTE) (Kurucz, 2005). Porównanie widma obserwowanego z widmami syntetycznymi daje możliwość wyznaczenia przybliżonych parametrów atmosferycznych. Porównanie widm obserwowanych i syntetycznych jest także pomocne w normowaniu.

Zasadniczą częścią całego procesu normowania jest zdefiniowanie fragmentów widma, które uznajemy za kontinuum. Fragmenty te są łączone w regiony poprzez dopasowanie wielomianu Czebyszewa dowolnego rzędu, natomiast regiony są łączone za pomocą interpolacji Akima. Przykładowe dopasowanie kontinuum przedstawia Rysunek 2. Na pierwszym panelu widać nieunormowane widmo z dopasowanym kontinuum, na drugim panelu pokazane jest unormowane widmo, na dolnym panelu pokazana jest różnica między unormowanym a nieunormowanym widmem.

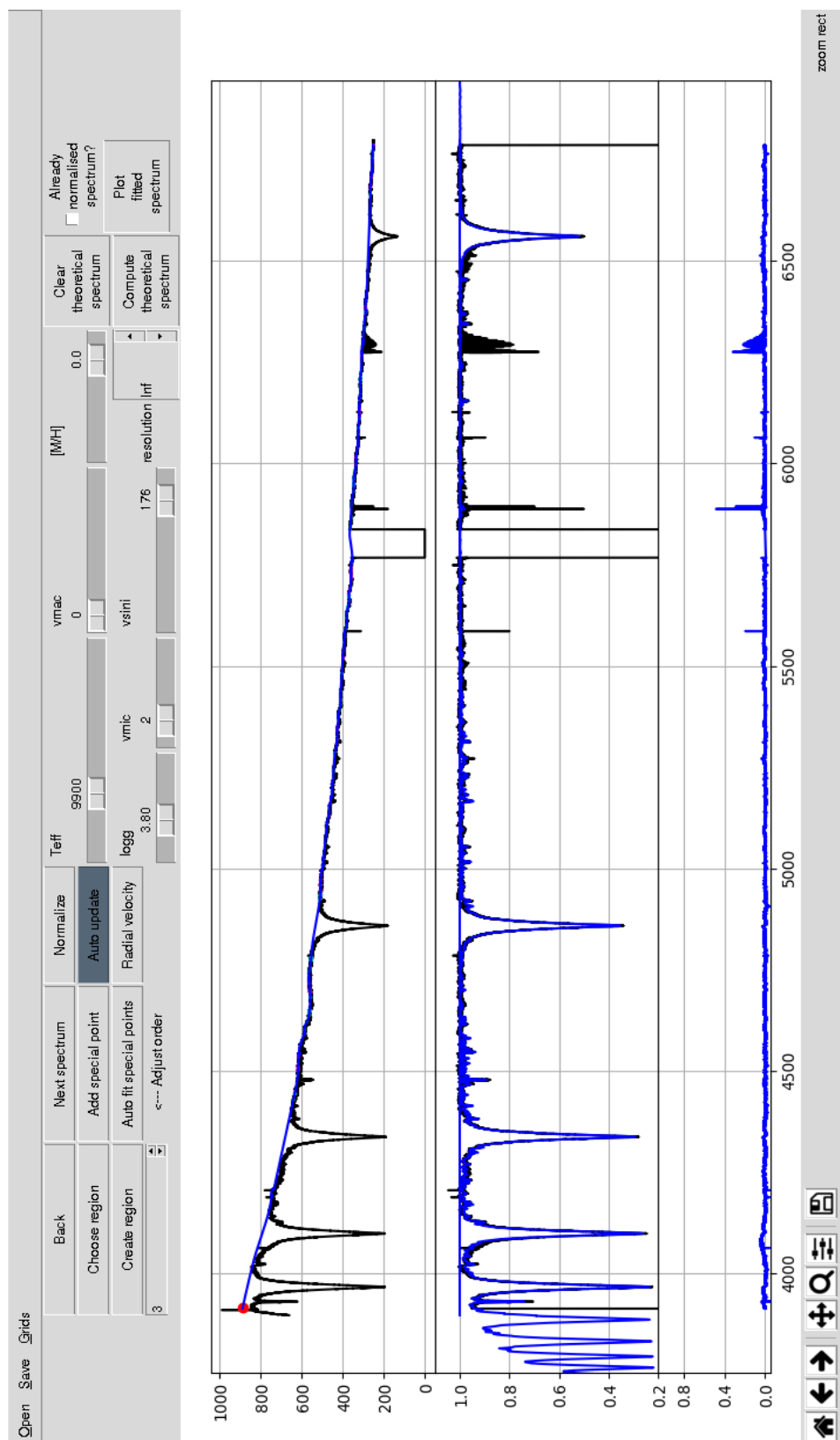
W trakcie procedury normowania wprowadza się także poprawkę na prędkość radialną, gdyż badane widmo może być przesunięte względem teoretycznego. Aby unormowane widmo obserwowane pokrywało się jak najbardziej z widmem wyliczonym, dopasowuje się trzy główne parametry atmosferyczne: temperaturę efektywną  $T_{\text{eff}}$ , logarytm przyspieszenia grawitacyjnego  $\log g$  oraz prędkość rotacji  $v \sin i$ . Parametry dopasowane na podstawie normowanych widm gwiazd są przedstawione w Tabeli 5. Rysunek 3 pokazuje przykładowe dopasowanie widma syntetycznego o zadanych parametrach do widma obserwowanego badanej gwiazdy. Metaliczność oraz prędkości mikro- i makroturbulencji zostały przyjęte jako  $[M/H] = 0.0$ ,  $v_{\text{mic}} = 0$  i  $v_{\text{mac}} = 2$ . W ten sposób unormowane widmo można wykorzystać do dalszej analizy.

Obecnie dostępna jest rozszerzona wersja programu HANDY. Oprócz normowania widma oraz wyznaczenia przybliżonych parametrów atmosferycznych, jak w przypadku wersji podstawowej, HANDY-extended umożliwia podzielenie widma na mniejsze fragmenty (co jest przydatne do dalszej analizy składu chemicznego) oraz daje informację na temat pierwiastków widocznych w konkretnym fragmencie widma. Przykładowy podział widma na części jest pokazany na Rysunku 4 – poszczególne fragmenty obrazują czerwone poziome linie. Nową, także przydatną opcją, jest możliwość sporządzania oraz zapisywania notatek dotyczących badanej gwiazdy, oraz parametrów atmosferycznych, według których został policzony model.

---

<sup>7</sup><https://github.com/RozanskiT/HANDY>

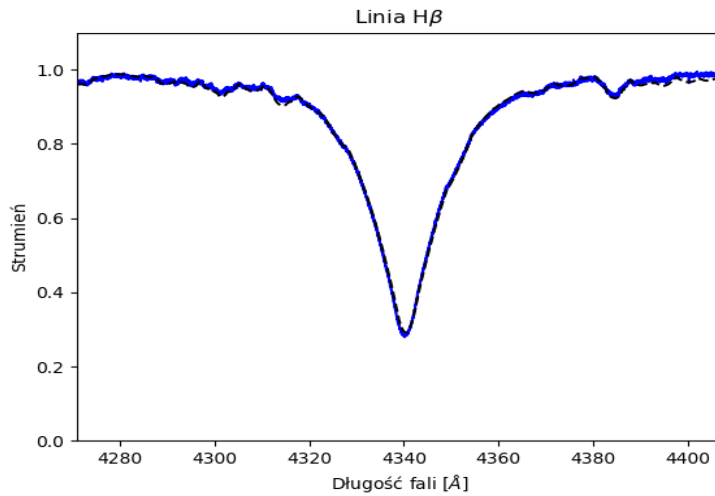
<sup>8</sup><http://tlusty.oca.eu/>



Rysunek 2: Dopasowanie kontinuum do widma w programie HANDY.

Tablica 5: Parametry atmosferyczne wyznaczone w programie HANDY dla gwiazd gromady NGC 6475.

HD	$T_{\text{eff}}$ [K]	$\log g$	$v \sin i$ [km s <sup>-1</sup> ]	$v_{\text{rad}}$ [km s <sup>-1</sup> ]
162144	9900	3.80	176	-13.2
162187	8250	4.10	200	15.1
320764	8150	3.85	185	21.8
162305	9850	3.70	105	21.0
162306	12850	3.65	37	-1.4
162374	14450	3.50	35	14.3
320768	8300	4.00	144	14.7
162393	9250	3.80	175	12.6
162515	10550	3.90	80	-26.5
162576	11150	3.80	27	-0.2
162586	11950	3.80	27	-0.6
162630	10450	3.80	64	-5.8
162631	9750	3.90	141	15.0
162678	10600	3.80	14	1.6
162679	10250	3.75	39	3.0
162680	9000	3.80	98	-33.3
162724	10650	3.70	88	-23.3
162725	11150	3.70	21	-1.3
162780	10850	3.60	200	9.5
162781	10450	4.05	144	13.8
162817	10200	3.70	51	-5.4
162888	8000	3.95	200	12.9
162889	9450	3.80	108	9.3



Rysunek 3: Przykładowe dopasowanie widma teoretycznego do obserwacji dla linii H $\beta$ .





## 5 Klasyfikacja widmowa

Przed rozpoczęciem szczegółowej analizy widma gwiazdy warto wykonać klasyfikację widmową. Klasyfikacja daje nam pierwsze przybliżenie parametrów danej gwiazdy, takich jak temperatura efektywna  $T_{\text{eff}}$  i logarytm przyspieszenia grawitacyjnego  $\log g$ . Klasyfikując widmo, można zauważyć pewne jego anomalne cechy, które mogą wskazywać na chemiczną osobliwość.

Procedura klasyfikacji polega na porównaniu widma badanej gwiazdy z widmami gwiazd standardowych, które reprezentują poszczególne typy widmowe. Obecnie najpopularniejszym używanym systemem klasyfikacji widmowej jest system Morgana-Keenana (MK). Jest on dwuwymiarowy i składa się z typu widmowego oraz klasy jasności. Typy widmowe, zaczerpnięte z klasyfikacji harwardzkiej, są skorelowane z temperaturą efektywną i oznaczone przez poszczególne litery alfabetu. Ponadto każdy typ jest podzielony na dziesięć podtypów oznaczonych cyframi od 0 do 9. Tabela 6 przedstawia typy widmowe wraz z odpowiadającymi im przedziałami temperatur efektywnych.

Tablica 6: Typy widmowe i odpowiadające im zakresy temperatur efektywnych.

Typ widmowy	$T_{\text{eff}}$ [K]
O	> 25 000
B	10 000 - 25 000
A	7 500 - 10 000
F	6 000 - 7 500
G	5 000 - 6 000
K	3 500 - 5 000
M	< 3 500

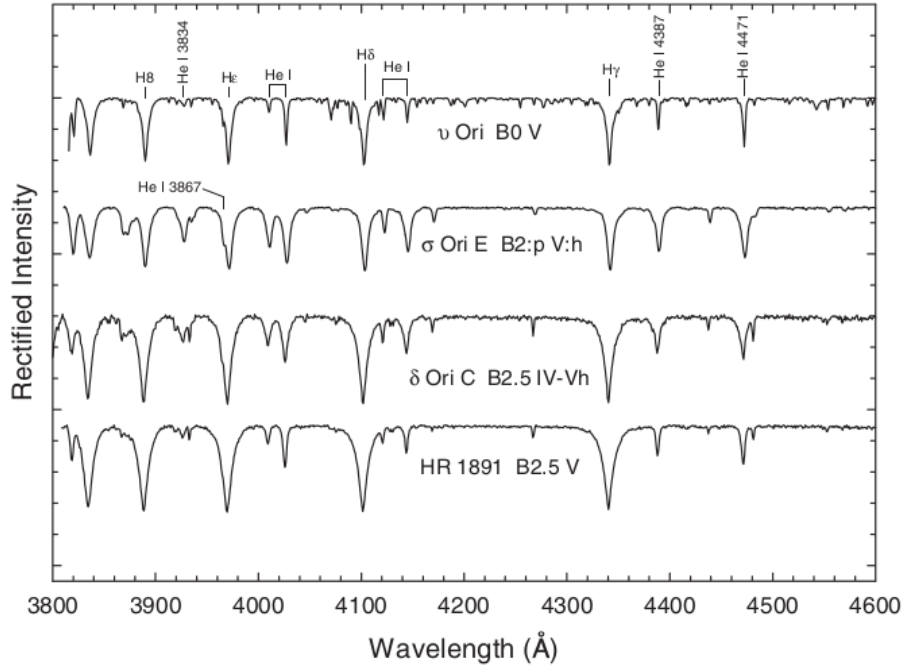
Klasy jasności pozwalają określić położenie gwiazdy na wykresie Hertsprunga-Russela (H-R). Są one skorelowane z mocą promieniowania badanego obiektu. Wyróżniamy pięć głównych klas, które są oznaczone cyframi rzymskimi od I do V (Tabela 7).

Tablica 7: Klasy jasności.

I	nadolbrzymy
II	jasne olbrzymy
III	olbrzymy
IV	podolbrzymy
V	karły

Przedstawiona klasyfikacja jest wystarczająca w przypadku gwiazd o „normalnych” składach chemicznych. Jeżeli gwiazda ma osobliwe widmo i nietypową zawartość jednego lub wielu pierwiastków, wówczas konieczne jest określenie tej osobliwości w typie widmowym. Klasyfikacja gwiazd chemicznie osobliwych opisana jest w Rozdziałach 5.1 i 5.2.

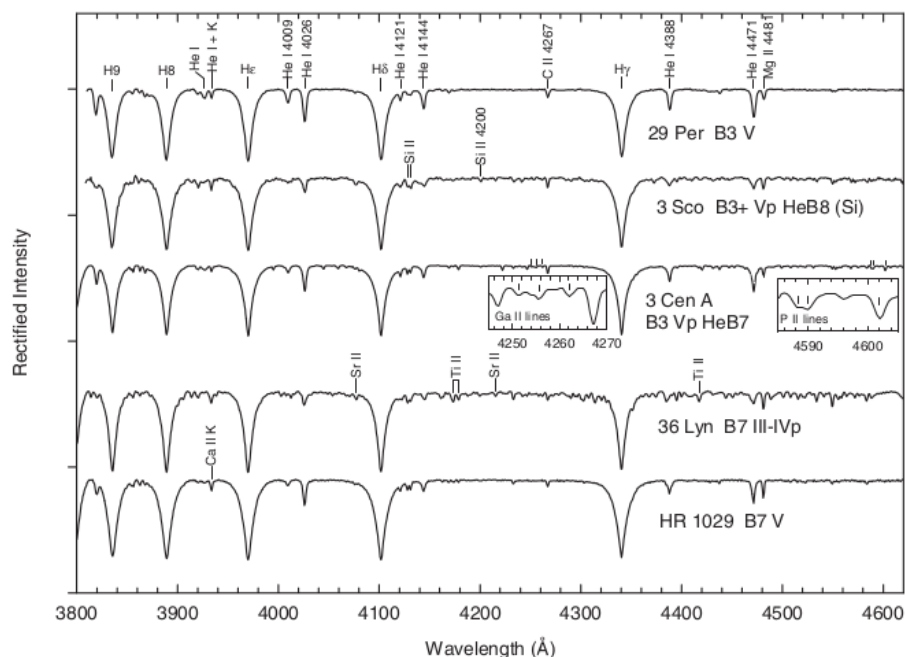
Badania gwiazd gromady NGC 6475 dotyczyły gwiazd B i A, dlatego poniżej omówiono dokładniej charakterystyczne cechy obiektów tych typów widmowych.



Rysunek 5: Porównanie widm gwiazd He-s ( $\sigma$  Ori E oraz  $\delta$  Ori C) z widmami gwiazd standardowych (Gray, 2005).

## 5.1 Gwiazdy typu B

Gwiazdy typu widmowego B, jak definiuje Gray (2005), są gwiazdami, w których widmach są widoczne silne linie wodorowe serii Balmera oraz linie He I, natomiast nie występują linie He II. Głębokość linii helowych oraz wodorowych zmienia się wraz z podtypami gwiazd B. Maksimum głębokości linii wodoru można zaobserwować dopiero w gwiazdach typu A, natomiast hel wykazuje maksimum głębokości w okolicach typu B2. Linie obu tych pierwiastków są dobrymi wskaźnikami temperatury w przypadku gwiazd B, dlatego są używane do precyzyjnego wyznaczenia typu widmowego. Część gwiazd B pokazuje nietypową zawartość helu, w takim wypadku używa się linii krzemu do wyznaczenia dokładnego typu widmowego. Innymi użytecznymi liniami są linie Mg II, które stają się głębsze dla późniejszych typów B. Klasy jasności gwiazd typu B wyznacza się często również za pomocą linii Balmera. Innymi użytecznymi liniami są linie tlenu O II, He I czy krzemu Si III/IV. W gwiazdach typu B mogą występować silne anomalie składu chemicznego, które mogą prowadzić do błędnej klasyfikacji widmowej. Gwiazdy chemicznie osobliwe typu B dzielimy na następujące grupy:

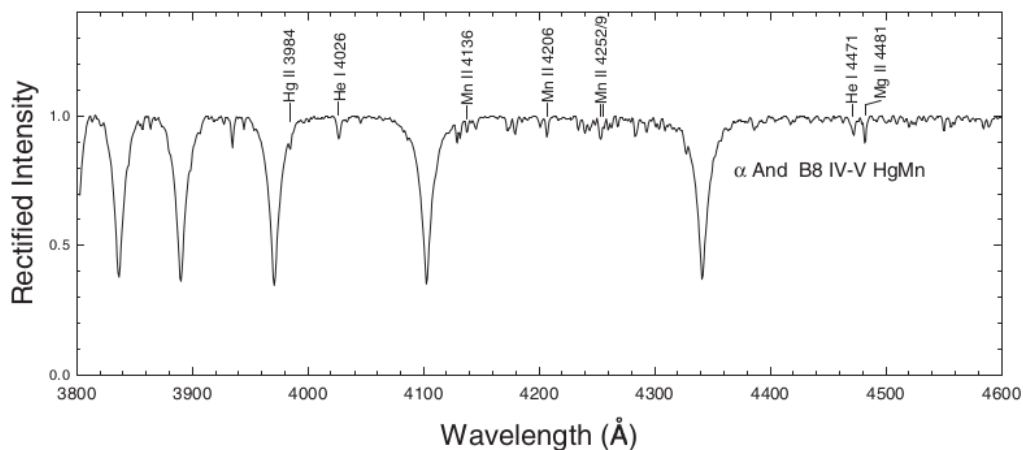


Rysunek 6: Porównanie widm gwiazd He-w (3 Sco, 3 Cen A oraz 36 Lyn) z widmami gwiazd standardowych MK (Gray, 2005).

- **Gwiazdy He-s.** Gwiazdami He-s (*helium-strong*) nazywa się gwiazdy, w których widmach są widoczne wyjątkowo silne linie helu He I (Rysunek 5). Najczęściej są to gwiazdy wczesnych typów widmowych, takich jak B3 i wcześniejsze. Wśród tej grupy gwiazd można także zaobserwować zmienność fotometryczną i spektroskopową oraz silne pola magnetyczne – zjawiska te nie są regułami, jednakże są często obserwowane dla gwiazd He-s.
- **Gwiazdy He-w.** Gwiazdy He-w (*helium-weak*), w przeciwieństwie do gwiazd He-s, charakteryzują się widmami z wyjątkowo słabymi liniami helu He I. Występują najczęściej dla typów widmowych B3 i późniejszych (Rysunek 6). W widmach tej grupy gwiazd można zaobserwować dodatkowe osobliwości, co pozwala na podział gwiazd He-w na trzy podgrupy:
  - gwiazdy krzemowe (Si) – silne linie krzemu Si II
  - gwiazdy fosforowo-galowe (PGa) – silne linie fosforu oraz galu
  - gwiazdy strontowo-tytanowe (SrTi) – silne linie strontu oraz tytanu

Tak jak w przypadku gwiazd He-s, wśród grupy gwiazd He-w często obserwowane jest pole magnetyczne, jest ono jednak słabsze i, znowu, nie jest cechą charakterystyczną dotyczącą wszystkich gwiazd He-w.

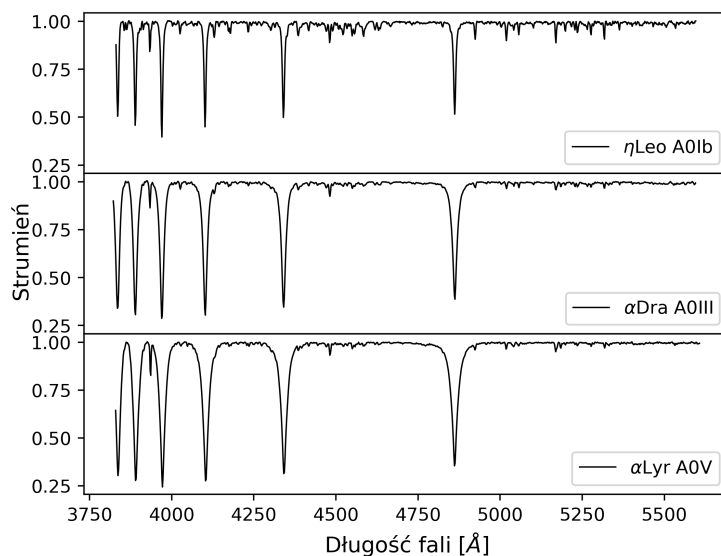
- **Gwiazdy HgMn.** Gwiazdy, w których widmach obserwuje się niezwykle silne linie rtęci Hg II oraz manganu Mn II (Rysunek 7) nazywamy gwiazdami rtęciowo-manganowymi



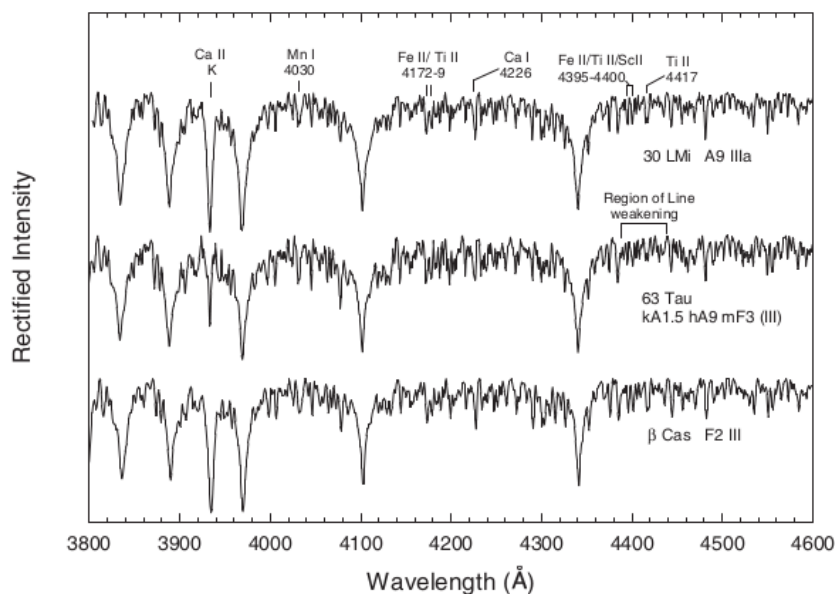
Rysunek 7: Widmo gwiazdy rtęciowo manganowej ( $\alpha$  And) (Gray, 2005).

(HgMn). Nie zawsze oba te pierwiastki wykazują zwiększoną obfitość, w takim wypadku gwiazdę nazywa się odpowiednio rtęciową lub manganową. Często gwiazdom HgMn towarzyszą osobliwe obfitości innych pierwiastków oraz izotopów. Typy widmowe, dla których obserwuje się te gwiazdy, należą zazwyczaj do przedziału B7-B9, przy klasach jasności V-III. Pola magnetyczne gwiazd HgMn nie są raczej obserwowane, natomiast w przypadku niektórych gwiazd obserwuje się zmienność spektroskopową.

### Gwiazdy typu A



Rysunek 8: Przykładowe widma gwiazd typu A dla różnych klas jasności. Widma gwiazd standardowych zostały wzięte z biblioteki *libnor36*.



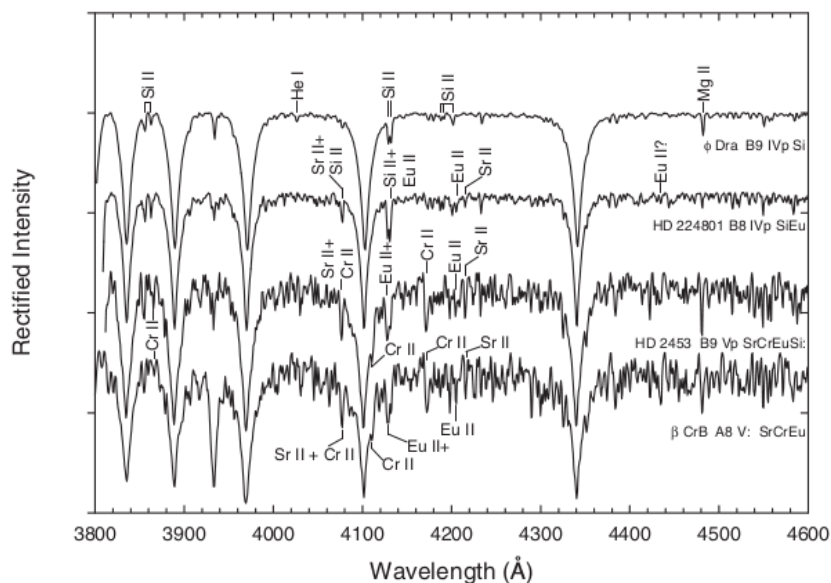
Rysunek 9: Porównanie widma gwiazdy Am, 63 Tau z widmami gwiazd standardowych MK (Gray, 2005).

## 5.2 Gwiazdy typu A

Za gwiazdy o typie widmowym A są uznawane obiekty, w których widmach linie He I nie występują lub są bardzo słabe, natomiast szczególnie widoczne są silne linie serii Balmera, które osiągają maksimum głębokości dla typu widmowego A2 (Gray, 2005). Inne linie, które można zaobserwować w widmach gwiazd A, to linie wapnia Ca II K oraz linie metali. Zarówno linie wapnia, jak i metali zwiększają natężenie wraz z późniejszymi podtypami gwiazd A. Precyzyjne wyznaczenie typu widmowego opiera się na wyznaczeniu typu z osobna dla każdej z trzech wyżej wymienionych cech – wodoru, wapnia i metali. Skrzydła linii Balmera są kryterium, którego używa się w celu wyznaczenia klasy jasności dla gwiazd A. Rysunek 8 pokazuje, jak szerokość skrzydeł w liniach wodorowych zmienia się w zależności od klasy jasności. Wrażliwość linii Balmera na klasę jasności staje się coraz słabsza dla późniejszych typów A. Dla gwiazd A7 oraz późniejszych konieczne jest wzięcie pod uwagę linii zjonizowanego żelaza Fe II oraz tytanu Ti II do wyznaczenia klasy jasności.

Typ widmowy wyznaczony za pomocą linii wapnia, wodoru i metali nie zawsze jest zgodny. Taka rozbieżność świadczy o osobliwości widma badanej gwiazdy. Gwiazdy chemicznie osobliwe stanowią sporą grupę gwiazd typu A. Jak twierdzi Gray (2005), stanowią one 30% całej populacji gwiazd A. Obiekty te dzielimy na trzy główne typy: gwiazdy osobliwe Ap, gwiazdy metaliczne Am oraz gwiazdy  $\lambda$  Bootis:

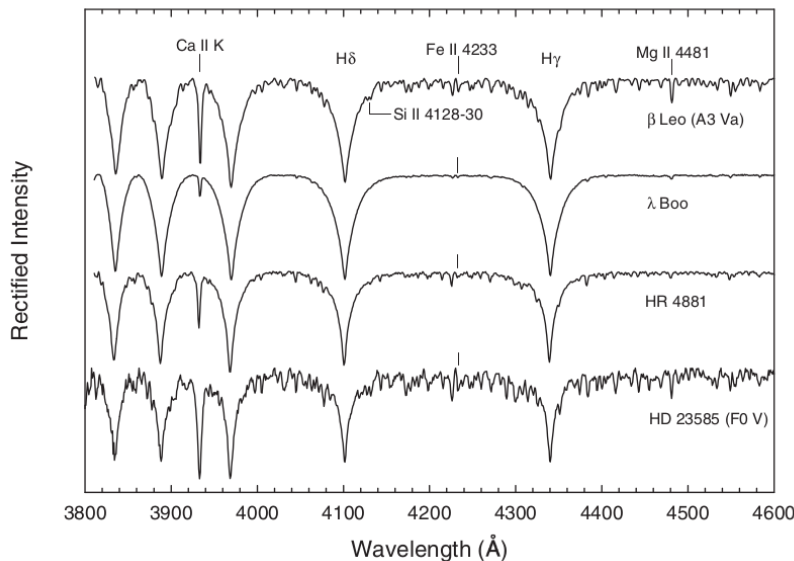
- **Gwiazdy Am.** Gwiazdy metaliczne Am mają typy widmowe A i wczesne F. W przypadku tych gwiazd typ widmowy wyznaczony z linii wapnia Ca II K różni się o kilka podtypów od typu wyznaczonego za pomocą linii metali (Rysunek 9). Jeśli ta różnica jest mniejsza, to gwiazdę klasyfikuje się jako Am-mild. Typy widmowe obiektów charakteryzujących się osobliwością Am są zapisywane w specjalnej notacji, gdzie podaje się kolejno typ wyznaczony przy użyciu linii wapnia (k), wodoru (h) i metali (m), a na



Rysunek 10: Widma gwiazd Ap o zwiększonej obfitości krzemu, strontu, europu oraz chromu (Gray, 2005).

końcu podaje się klasę jasności. Osobliwości chemiczne gwiazd Am powstają w wyniku segregacji pierwiastków chemicznych w atmosferach pod wpływem procesów transportu atomów (przyspieszeniem promieniste oraz osiadanie grawitacyjne).

- Gwiazdy Ap.** Jako gwiazdy osobliwe typu Ap klasyfikuje się obiekty, w których widmach zauważalne jest zwiększenie obfitości poszczególnych pierwiastków (Rysunek 10). Ta właśnie cecha odróżnia gwiazdy Ap od gwiazd Am, w których to obserwuje się anomalną zawartość ogólnie metali. Wśród gwiazd Ap znajdują się nie tylko gwiazdy A czy wczesne F, ale również gwiazdy późnych typów B. Klasyfikację gwiazd Ap przeprowadza się podobnie jak dla normalnych gwiazd A. Początkowo wyznacza się typ widmowy oraz klasę jasności bazując na profilach linii wapnia Ca II K oraz linii serii Balmera. Następnie przechodzi się do określenia osobliwości przez znalezienie pierwiastków występujących w zwiększonej obfitości. Z reguły osobliwości te są zdeterminowane przez cztery pierwiastki: krzem Si II (linie widmowe można znaleźć między innymi na długościach fali 4128, 4131, 3856, 3862 Å, chrom Cr II (4172, 4111 i 3866 Å), stront Sr II (4077 i 4216 Å), europ Eu II (4205, i 4130 Å). Po potwierdzeniu osobliwości przez detekcję silnych linii widmowych charakterystycznych dla danego pierwiastka, do zapisu wcześniej wyznaczonego typu widmowego oraz klasy jasności dodaje się na końcu nazwę pierwiastka, którego linie pokazują osobliwość. Wśród obiektów Ap obserwuje się tendencję do zmienności spektroskopowej, wynikającej z rotacji gwiazdy i obecności plam na powierzchni. Plamy te to obszary zwiększonej koncentracji danego pierwiastka, wynikające z działania pola magnetycznego.
- Gwiazdy  $\lambda$  Bootis.** Widma gwiazd  $\lambda$  Bootis charakteryzują się słabymi liniami metali (Rysunek 11). Prototypem tej grupy gwiazd CP jest gwiazda  $\lambda$  Boo. Jak twierdzi Morgan et al. (1943), gwiazda  $\lambda$  Boo jest opisana typem widmowym A0, jej widmo



Rysunek 11: Porównanie widm gwiazd typu  $\lambda$  Bootis ( $\lambda$  Boo oraz HR 4881) z widmami gwiazd standardowych (Gray, 2005).

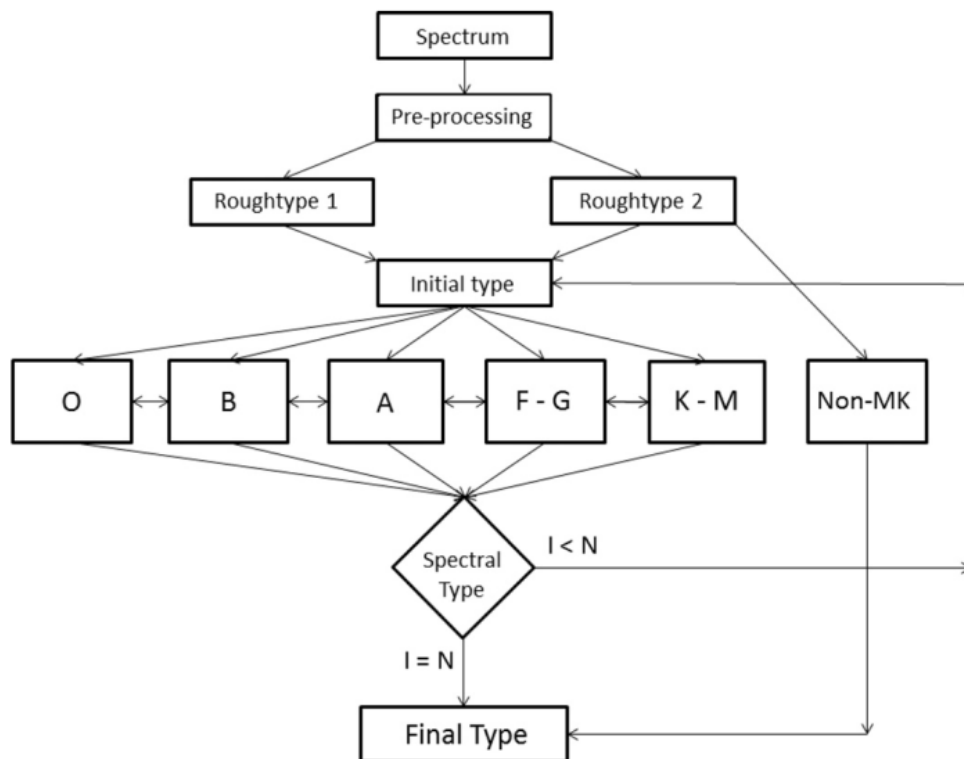
pokazuje słabe linie wapnia Ca II K oraz wodorowe, natomiast linie metali są bardzo słabo widoczne, w szczególności linie magnezu Mg II ( $\lambda 4481 \text{ \AA}$ ). Jednakże opis gwiazd  $\lambda$  Bootis jest na tyle nieściśły, że grupa ta jest bardzo zróżnicowana. W celu rozwiązania zagadnienia nieprecyzyjnej definicji zaproponowano zawężenie cech przypisywanych gwiazdom  $\lambda$  Bootis, (Gray, 1997). Po pierwsze, gwiazdy  $\lambda$  Bootis mają typy widmowe od wczesnego A do wczesnego F. Po drugie, widma gwiazd  $\lambda$  Bootis charakteryzują się ogólnie słabymi liniami metali, wyjątkowo słabą linią magnezu Mg II ( $\lambda 4481 \text{ \AA}$ ) oraz szerokimi liniami serii Balmera. Wymagana jest także standardowa prędkość rotacji, z jaką rotują gwiazdy A (mogą to być gwiazdy szybkorotujące). Fenomenem gwiazd  $\lambda$  Bootis jest fakt, że należą one do gwiazd populacji I, a co za tym idzie, powinny wykazywać dużą obfitość metali, jednak w rzeczywistości tak się nie dzieje.

### 5.3 Klasyfikacja widmowa: programy MKCLASS i xmk25

Do klasyfikacji gwiazd gromady NGC 6475 wykorzystano oprogramowanie MKCLASS. Jak twierdzą jego twórcy, Gray and Corbally (2014), działa on „w sposób podobny do człowieka”, na zasadzie porównania widma badanej gwiazdy z widmami gwiazd standardowych systemu klasyfikacji MK. Program dzieli się na dwie zasadnicze części. Pierwszą z nich jest *knowledge base*, która zawiera biblioteki standardów systemu MK, *libr18* i *libnor36*. Biblioteki te różnią się rozdzielczością widm (odpowiednio  $1.8 \text{ \AA}$  i  $3.6 \text{ \AA}$ ) i dostępnymi przedziałami długości fali (odpowiednio  $3800\text{--}4600 \text{ \AA}$  i  $3800\text{--}5600 \text{ \AA}$ ). Druga część MKCLASS to *inference engine*, którego celem jest przeprowadzenie klasyfikacji według zamysłu autorów oprogramowania.

Przed samym procesem klasyfikacji odpowiednio przygotowano badane widma (wcześniej unormowane). W pierwszym kroku zawężono zakres długości fali widma do  $3800\text{--}5600 \text{ \AA}$ , ponieważ MKCLASS dokonuje porównania ze standardami MK jedynie w tym przedziale.





Rysunek 12: Schemat działania oprogramowania MKCLASS (Gray and Corbally, 2014).

Następnie użyto programów *srebin0* i *smooth2* dostarczonych przez autorów oprogramowania, aby zmienić i dopasować rozdzielczość widma badanej gwiazdy otrzymanego za pomocą UVES do rozdzielczości widm standardów MK z biblioteki *libnor36*. W tym celu stosuje się dopasowanie funkcji Gaussa o odpowiedniej szerokości połówkowej.

Po wczytaniu do MKCLASS wyprostowanego widma następuje wyliczenie prędkości radialnej przez program *mkprelim* (dostarczony przez autorów oprogramowania). W następnym kroku wyznacza się pierwsze przybliżenie typu widmowego oraz klasy jasności za pomocą procedur ROUGHTYPE1 lub ROUGHTYPE2 dostępnych w programie MKCLASS. Pierwsza z nich jest szybsza, ale dobrze radzi sobie jedynie przy klasyfikacji gwiazd chemicznie normalnych. Natomiast ROUGHTYPE2 dobrze klasyfikuje nietypowe gwiazdy, takie jak białe karły, gwiazdy osobliwe chemicznie czy gwiazdy Wolfa-Rayeta.

Jeśli przybliżony typ widmowy znajduje się w systemie MK, następuje pierwsza iteracja szczegółowego procesu klasyfikacji. Badane widmo zostaje przekazane do jednego z pięciu modułów: O, B, A, F-G, K-M, gdzie jest ono porównywane ze standardami MK znajdującymi się w bibliotece *libnor36*. Początkowo program wysuwa przypuszczenie o chemicznej osobliwości danej gwiazdy. W tym celu wyznacza poszczególne typy widmowe osobno dla linii Ca II K, wodoru oraz metali. W przypadku, gdy te trzy typy są zgodne, gwiazda jest określana jako normalna. W przeciwnym razie program sugeruje gwiazdę osobliwą, na przykład Am czy  $\lambda$  Boo. Pod uwagę są również brane linie widmowe charakterystyczne dla gwiazd Ap, takie jak Sr II ( $\lambda$  4077 Å) czy Sr II ( $\lambda$  4128-30 Å). Po wyznaczeniu dokładniejszego typu widmowego następuje kolejna iteracja i powtórzenie szczegółowej klasyfikacji, jednak teraz

Tablica 8: Typy widmowe i klasy jasności gwiazd gromady NGC 6475.

HD	SIMBAD	MKCLASS	WIZUALNE	INNE
162144	A0 III/IV	B9.5 V	B9.5 V	B9 <sup>7</sup>
162187	A8 V/F0 V	A3 Vn	A5 Vn	A0 <sup>7</sup>
162305	A0 V	A8 mA0 V $\lambda$ Boo	kB8.5 hB9 mA1 V met wk	B9p <sup>4</sup>
162306	B8 IV	B8 IV Si	B8 V Si He-w	B9 Si <sup>5</sup>
162393	A0 V	–	–	A0 <sup>7</sup>
162515	B9 III	B9 IV	B9 V Mg4481	Ap/Bp <sup>3</sup>
162576	B8/9 III	B9 IV Si	B9 IV-V Si	B9 SiCr <sup>4</sup> , Ap/Bp <sup>2</sup>
162586	B3/5 III	B8 IV-V	B8 V He-s (?)	B9 <sup>7</sup>
162630	B9 III sb	A3 mA0 III-IV metal-weak	A0 III	B6-A0m? <sup>1</sup>
162631	A0 III	A0 IV-V	A0 V	A0 <sup>7</sup>
162678	B9/A0 II/III	–	–	A0 <sup>7</sup>
162679	B9/A0 (V)	B9.5 IV	kA0 hB9 V Si $\lambda$ Boo?	–
162680	A0 V	A0 V Si	kA0.5 hA0 V Si	A0 <sup>7</sup>
162724	B9 V+B9 V	kB9hA9mA1 Eu	B9 V Mg4481	B9 <sup>7</sup>
162725	kB6 hA0V HeA0 pSiCr	B9 III-IV Si	B8.5 V Si He-w	B9 SiCr <sup>4</sup> , Ap/Bp <sup>2</sup>
162780	A0 IV	kB9hA9mG2 Eu	kA0 hB9 IV	B9 <sup>8</sup>
162781	A0 IV	A1 III-IV	kA0 hA1 IV	A0 <sup>7</sup>
162817	B9.5/A0 III	A0 III	kA1 hA0 mA1 III	B9-A1m <sup>1</sup>
162888	B9/A0 III	–	–	A0 <sup>7</sup>
162889	A0 V	–	–	A0 <sup>7</sup>
320764	A0	kA2hF5mK0	kA2.5 hA2 mA3 V	Ap? <sup>4</sup> , $\lambda$ Boo <sup>6</sup>
320768	F0	A7 Vn	kA7 hA8 V	–

Referencje: <sup>1</sup> – Renson et al. (1991); <sup>2</sup> – Catalano and Renson (1998); <sup>3</sup> – Manfroid et al. (1998); <sup>4</sup> – Folsom et al. (2007); <sup>5</sup> – Renson (1990); <sup>6</sup> – Paunzen et al. (2001); <sup>7</sup> – Cannon and Pickering (1993); <sup>8</sup> – Renson and Manfroid (2009)

przybliżonym typem wejściowym do kolejnej iteracji jest typ wynikowy poprzedniej iteracji. Dzieje się tak w celu otrzymania jak najlepszej precyzji końcowego typu widmowego badanej gwiazdy. Gdy program uzna, że znalazł ostateczne dopasowanie typu i klasy jasności, iteracje zostają zakończone, a MKCLASS ocenia swój wybór jako „excellent”, „very good”, „good”, „fair” lub „poor”. Ocena ta polega na określeniu różnicy pomiędzy widmem gwiazdy badanej a widmem wybranym z biblioteki standardów. Schemat działania oprogramowania MKCLASS jest przedstawiony na Rysunku 12.

Po klasyfikacji wykonanej przez MKCLASS dokonano w programie *xmk25* (również dostarczonego przez autorów oprogramowania MKCLASS) wizualnego sprawdzenia, czy badanym gwiazdom gromady NGC 6475 program dopasował odpowiednie typy widmowe oraz klasy jasności. Tabela 8 przedstawia wyniki klasyfikacji MKCLASS, wizualnej, klasyfikację dostępną w bazie danych SIMBAD oraz zaczerpniętą z innych źródeł.

Dla czterech gwiazd nie wyznaczono żadnego typu widmowego. Wynika to z faktu, że gwiazdy te nie posiadają widm w zakresie, który wymaga MKCLASS. Wizualna klasyfikacja pokazuje, że większość gwiazd badanej gromady wykazuje różne chemiczne osobiwości. Można zauważyć, że zgodnie z bazą danych SIMBAD, tylko jedna gwiazda (HD 162725) została sklasyfikowana jako chemicznie osobiwa. Klasyfikacja widmowa dostępna w bazie danych SIMBAD pochodzi głównie z Houk (1982). Wyjątki to HD 320764 i HD 320768 (Nesterov et al., 1995) oraz HD 162724 (Abt, 1975)). Jednak sięgając do innych publikacji, można zauważyć, że większość badanych gwiazd gromady NGC 6475 posiada adnotacje dotyczące osobiwości chemicznych. Wyjątkami tutaj są HD 162679 i HD 162680, które w tej pracy sklasyfikowano jako gwiazdy ze zwiększoną obfitością krzemu oraz podejrzeniem  $\lambda$  Boo. HD 162586 wykazuje w widmie anomalnie silne linie helu i została tutaj sklasyfikowana jako He-s. HD 162724 posiada bardzo silną linię Mg 4481 Å. Dla tych czterech gwiazd nie znaleziono w literaturze informacji o osobiwościach.

Klasyfikacja wykonana w poniższej pracy różni się nieco od klasyfikacji we wspomnianych wyżej źródłach. Różnice polegają głównie na stwierdzeniu osobliwości. Może to wynikać z faktu, że widma dla tych gwiazd badane w literaturze były gorszej jakości lub nie przeprowadzono później badań czy obserwacji tych gwiazd. Natomiast UVES POP dostarcza widma wysokiej rozdzielczości, a więc możliwa jest dokładniejsza analiza i zaobserwowanie chemicznych anomalii. Można także zauważyć, że w nowszych publikacjach osobliwości dla badanych gwiazd już się pojawiają.

Porównanie wyników MKCLASS i klasyfikacji wizualnej pokazuje, że dla czterech obiektów zachodzi zgodność między tymi sposobami (HD 162144, HD 162187, HD 162576, HD 162631). Klasyfikacja dla siedmiu obiektów różni się nieznacznie: dla HD 162306 wizualnie zauważono zbyt małą obfitość helu, HD 162515 wykazuje silną linię magnezu  $Mg\lambda 4481\text{\AA}$ , w przypadku HD 162586 występuje podwyższona zawartość helu, HD 162725 uznano za gwiazdę He-w, natomiast przy HD 162781 oraz HD 320768 zauważono, że linia wapnia Ca II K wskazuje jeden typ wcześniej niż pozostałe linie w widmie. Może to być wynikiem błędnego normowania szerokich linii serii Balmera. W przypadku ośmiu gwiazd różnice między klasyfikacją wizualną a wyznaczeniami MKCLASS są bardziej znaczące. HD 162305 została uznana przez program jako  $\lambda$  Boo, dla której linie metali są charakterystyczne dla gwiazd o siedem podtypów wcześniejszych. Wizualnie nie stwierdzono tak dużej różnicy, mimo że gwiazdę uznano za metal-weak. Dla HD 162630 MKCLASS zauważył słabe linie metali, czego nie stwierdzono wizualnie. Gwiazdy HD 162679 i HD 162680 były sklasyfikowane przez MKCLASS jako chemicznie normalne obiekty, natomiast wizualnie dostrzeżono różnicę między liniami wapnia i wodoru, nadwyżkę krzemu oraz wysunięto podejrzenie, że gwiazda HD 162679 może być typu  $\lambda$  Boo. Ponownie, różnica między typami widmowymi wyznaczonymi z linii wapnia i z linii wodoru może być wynikiem błędów normowania. Analiza widma gwiazdy HD 162724 przez oprogramowanie wskazała, że gwiazda ta jest obiektem Am. Wizualnie dostrzeżono podwójność w widmie, co mogło być przyczyną błędnego wyniku uzyskanego przez kod, oraz wyznaczono typ widmowy dla pierwszego składnika. Dla HD 162780 oraz HD 320764 MKCLASS także zdecydował, że są to gwiazdy Am, jednakże wizualnie nie zauważono takiej różnicy między typami widmowymi uzyskanymi z linii wapnia i wodoru. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku HD 162817, którą oprogramowanie sklasyfikowało jako chemicznie normalną, podczas gdy klasyfikacja wizualna wskazuje, że linie wapnia, wodoru i metali nieznacznie się między sobą różnią.

## 6 Wyznaczenie parametrów atmosferycznych

### 6.1 Fotometria Strömgrena

Pierwszego dopasowania parametrów atmosferycznych gwiazd gromady NGC 6475 dokonano za pomocą programu HANDY. Kolejnym sposobem wyznaczenia tych parametrów było użycie fotometrii  $uvby\beta$  Strömgrena zaczerpniętej z katalogu Paunzen (2015). W tym celu wykorzystano programy UVBYBETA oraz TEFFLOGG autorstwa Moon (1985b) napisane w języku Fortran 77.

Program UVBYBETA jest przeznaczony do obliczania wskaźników barwy wolnych od poczerwienienia. Jego działanie opiera się o kalibracje fotometrii Strömgrena dostępne w literaturze (Balona and Shobbrook, 1984; Strömgren, 1966; Crawford, 1975, 1978, 1979; Zhang, 1983; Olsen, 1984; Hilditch et al., 1983).

Cała procedura rozpoczyna się od dostarczenia programowi obserwowanych wartości  $(b - y)$ ,  $m_1$ ,  $c_1$ ,  $\beta$ . Jeśli  $\beta$  nie jest znana, należy podać jej wartość jako 0. Następnie zadaniem użytkownika jest wybranie jednej z ośmiu grup, do których należy badana gwiazda. Grupy te są określone przez zakres typów widmowych, klas jasności oraz wskaźników barwy w następujący sposób:

1. B0-A0, III-V;  $2.59 < \beta < 2.88$  ;  $-0.20 < c_0 < 1.00$
2. B0-A0, Ia;  $2.52 < \beta < 2.59$  ;  $-0.15 < c_0 < 0.40$
3. B0-A0, Ib;  $2.56 < \beta < 2.61$  ;  $-0.10 < c_0 < 0.50$
4. B0-A0, II;  $2.58 < \beta < 2.63$  ;  $-0.10 < c_0 < 0.10$
5. A0-A3, III-V;  $2.87 < \beta < 2.93$  ;  $-0.01 < (b - y)_0 < 0.06$
6. A3-F0, III-V;  $2.72 < \beta < 2.88$  ;  $0.05 < (b - y)_0 < 0.22$
7. F1-G2, III-V;  $2.60 < \beta < 2.72$  ;  $0.22 < (b - y)_0 < 0.39$
8. G2-M2, IV-V;  $0.20 < m_0 < 0.76$  ;  $0.39 < (b - y)_0 < 1.00$

Po wyborze odpowiedniej dla gwiazdy grupy program oblicza odpoczerwienione wskaźniki barwy  $(b - y)_0$ ,  $m_0$ ,  $c_0$  oraz wyliczoną wartość  $\beta$  (jeśli początkowo podano jej wartość jako 0), jasność absolutną  $M_V$ , poczerwienienie  $E(b - y)$ , promień  $R/R_{sun}$ , metaliczność  $\delta m_0$  oraz przybliżoną temperaturę efektywną  $T_{eff}$ . Wyniki te zapisywane są do pliku UVBYOUT oraz wypisywane na terminalu. Fotometria oraz wyniki obliczeń UVBYBETA znajdują się w Tabeli 9.

Drugi program, TEFFLOGG, oblicza temperaturę efektywną  $T_{eff}$  oraz logarytm przyspieszenia grawitacyjnego  $\log g$  korzystając z uzyskanych wcześniej wartości  $(b - y)_0$ ,  $m_0$ ,  $c_0$  i  $\beta$ . Program wymaga także podania przybliżonej wartości temperatury efektywnej obliczonej przez UVBYBETA. Działanie zaimplementowanych procedur opierało się o dwuwymiarowe siatki wskaźników  $(\beta, c_0)$  oraz  $(a_0, r^*)$ , z których odczytywane były wartości  $T_{eff}$  i  $\log g$  poprzez dopasowanie wielomianu, (Moon, 1985a). Wielkości  $a_0, r^*$  to parametry liczone według wzorów:

Tablica 9: Poczerwienione i odpoczerwienione wskaźniki fotometrii Strömgrena badanych gwiazd gromady oraz pierwsze przybliżenie temperatury efektywnej wyliczone za pomocą programu UVBYBETA.

HD	Paunzen (2015)				UVBYBETA				
	$(b - y)$	$m_1$	$c_1$	$\beta$	$(b - y)_0$	$m_0$	$c_0$	$E(b - y)$	$T_{\text{eff}} [\text{K}]$
162144	0.006	0.145	1.043	2.784	-0.011	0.151	1.040	0.017	10010
162187	0.178	0.183	0.928	2.746*	0.174	0.184	0.927	0.004	7400
320764	0.101	0.199	0.972	2.877	-0.004	0.234	0.952	0.105	10550
320768	0.187	0.198	0.797	2.803	0.146	0.212	0.789	0.041	7650
162586	0.000	0.109	0.671	2.768	-0.048	0.125	0.662	0.048	12820
162630	0.040	0.132	0.991	2.813	-0.016	0.150	0.980	0.056	10370
162631	0.045	0.139	1.035	2.867	-0.011	0.157	1.024	0.056	10100
162678	0.045	0.103	1.108	2.816	-0.011	0.121	1.097	0.056	9690
162679	0.041	0.101	0.967	2.807	-0.023	0.122	0.955	0.064	10530
162680	0.054	0.141	1.031	2.883	-0.002	0.160	1.020	0.056	9900
162780	0.053	0.116	1.067	2.776	-0.012	0.137	1.055	0.065	9930
162781	0.079	0.122	1.007	2.837	-0.010	0.152	0.990	0.089	10230
162817	0.066	0.099	1.188	2.815	-0.004	0.122	1.175	0.070	9290
162888	0.073	0.106	1.101	2.799	-0.010	0.133	1.085	0.083	9760

\* – wartość została wyliczona przez UVBYBETA

$$a_0 = 1.36(b - y)_0 + 0.36m_0 + 0.18c_0 - 0.2448$$

$$r^* = 0.35c_1 - 0.07(b - y) - \beta + 2.565$$

Napiwotzki et al. (1993) zmodyfikował opisany powyżej program. Powodem było to, że otrzymywane wartości  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  odczytywane z siatek odbiegały od tych, które były wynikiem dopasowania wielomianu w programie. Procedury dopasowania wielomianu zostały zastąpione przez funkcje sklepane. Kolejną modyfikacją było poprawienie kalibracji siatek, aby obejmowały gwiazdy o temperaturach wyższych od 20000 K. Rozszerzono także zakres siatki ( $a_0, r^*$ ) do wartości  $\log g = 3.0$ .

Wyliczone wartości parametrów wraz z ich błędami są wypisywane w terminalu oraz zapisywane do pliku TGOUT.

Parametry atmosferyczne wyznaczone dla badanych gwiazd gromady NGC 6475 są pokazane w Tabeli 10. Brane są tutaj pod uwagę jedynie gwiazdy, w których widmach nie zaobserwowano drugiego składnika, a więc jest możliwa ich dalsza analiza. Wybór grupy konieczny w programie UVBYBETA został określony przez typ widmowy wyznaczony wcześniej w pracy. W przypadku gwiazd Am wzięto pod uwagę typ wyznaczony dla linii wodoru. Jeśli gwiazda nie została w pracy sklasyfikowana, zasugerowano się typem widmowym dostępnym w literaturze.

Temperatury efektywne gwiazd sklasyfikowanych jako chemicznie osobiwe zostały poprawione zgodnie z Netopil et al. (2008). Należało to zrobić dla: HD 162586 (CP4), HD 162680 (CP2), HD 162780 (CP2) – wartości pierwotnie obliczone są pokazane w tabeli jako pierwsza wartość, natomiast wartości poprawione znajdują się poniżej. Korekta temperatury wyznaczonej na podstawie fotometrii Strömgrena zależy od rodzaju osobiwości obiektu i jest liczona

Tablica 10: Wyznaczone parametry atmosferyczne gwiazd gromady NGC 6475 z fotometrii Strömgrena. Dla trzech gwiazd pokazane są parametry uzyskane przed i po uwzględnieniu poprawki (druga wartość dla danej gwiazdy Netopil et al., 2016). Wartości podane w tabeli są wynikiem działania programu. Nie są zaokrąglone do cyfr znaczących, aby nie wprowadzać błędów zaokrągleń w dalszych obliczeniach, w których są używane.

HD	$T_{\text{eff}}$ [K]	$\log g$
162144	10310±130	3.31±0.05
162187	7170±30	3.28±0.06
162586	12670±40	4.11±0.02
	12480±378	
162630	10230±20	3.66±0.03
162631	9930±20	3.95±0.03
162678	10030±20	3.51±0.03
162679	10670±20	3.69±0.03
162680	9720±20	4.10±0.03
	9438±386	
162780	10290±130	3.23±0.05
	9869±407	
162781	10040±20	3.81±0.03
162817	9610±130	3.28±0.05
162888	10050±30	3.34±0.05
320764	8380±30	4.12±0.06
320768	7740±30	4.23±0.06

w następujący sposób:

**CP1 (Am)** : nie wymaga poprawek

**CP2 (Ap/Bp)** : nie wymaga poprawek dla  $T_{\text{eff}} < 9000$  K

**CP2 (Ap/Bp)** :  $T_{\text{eff}} = 2090 + 0.756T_{\text{eff}}(uvby\beta)$  dla  $T_{\text{eff}} \geq 9000$  K

**CP3 (HgMn)/CP4 (He-w/He-s)** :  $T_{\text{eff}} = 2230 + 0.809T_{\text{eff}}(uvby\beta)$

Można zauważyć, że wartości temperatury po korekcie są niższe w stosunku do pierwotnych wartości temperatury.

## 6.2 Fotometria Genewska

Dla porównania wyznaczono  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  przy użyciu fotometrii genewskiej dostępnej w bazie danych WEBDA<sup>9</sup>. W tym celu wykorzystano oprogramowanie CALIB napisane w języku Fortran77 przez Kunzli et al. (1997).

Na początku program wymaga od użytkownika podania jasności w filtrach  $U$ ,  $V$ ,  $B1$ ,  $B2$ ,  $V1$  i  $G$ . Następnym krokiem jest podanie wartości poczerwienienia  $E(B2 - V1)$  oraz metaliczności

<sup>9</sup><https://webda.physics.muni.cz/>

rozpatrywanej gwiazdy – tutaj są do wyboru trzy wartości metaliczności  $[M/H] = -1, 0, 1$ . Ostatni etap to wybór siatek, według których zostaną obliczone parametry. Program oferuje cztery opcje:

1. Siatki  $(d, B2 - V1)$  oraz  $(m_2, B2 - V1)$  – wskaźniki czułe na metaliczność ( $m_2$ ), przyspieszenie grawitacyjne ( $d$ ) oraz na temperaturę efektywną ( $B2 - V1$ ). Siatka służy do analizy gwiazd chłodniejszych – późny typ widmowy A, F oraz wczesny typ G ( $T_{\text{eff}} < 8000$  K). Wskaźniki  $d$  i  $m_2$  są wyliczane następująco:  

$$d = (U - B1) - 1.430(B1 - B2)$$

$$m_2 = (B1 - B2) - 0.457(B2 - V1)$$
2. Siatka  $(pT, pG)$  – wskaźniki czułe na temperaturę efektywną ( $pT$ ) oraz na przyspieszenie grawitacyjne ( $pG$ ). Przeznaczona jest dla gwiazd o późnym typie B i wczesnym A ( $11000 < T_{\text{eff}} < 8000$  K). Wskaźniki  $pT$  i  $pG$  są liczone według wzorów:  

$$pT = -0.2075 + 0.1455U - 0.2383B1 + 1.0452B2 - 0.9676V1 + 0.0155G$$

$$pG = -0.4771 + 0.2749U - 1.9706B1 + 3.0568B2 - 0.3676V1 - 0.9935G$$
3. Siatka  $(X, Y)$  – opiera się na parametrach  $X$  i  $Y$ , które są wolne od poczerwienienia. Siatka ta jest odpowiednia dla gorących gwiazd B ( $T_{\text{eff}} > 11000$  K). Wartości  $X$  i  $Y$  są zdefiniowane następująco:  

$$X = 0.3788 + 1.3764U - 1.2162B1 - 0.8498B2 - 0.1554V1 + 0.8450G$$

$$Y = -0.8288 + 0.3235U - 2.3228B1 + 2.3363B2 + 0.7495V1 - 1.0865G$$
4. Siatka wybierana automatycznie przez program.

Przy wyborze siatek sugerowano się temperaturą efektywną uzyskaną wcześniej z fotometrii Strömgrena. Według tego kryterium  $T_{\text{eff}}$  prawie wszystkich gwiazd mieściła się w przedziale temperatur dla siatki  $(pT, pG)$ . Wyjątki stanowiły trzy gwiazdy: HD 162586, której  $T_{\text{eff}}$  była na tyle wysoka, że odpowiadającą jej siatką była siatka  $(X, Y)$ , natomiast dla HD 162187 oraz HD 320768 wybrano siatki  $(d, B2 - V1)$  oraz  $(m_2, (B2 - V1))$  dla gwiazd chłodniejszych.

Podane programowi wartości jasności w filtrach fotometrii genewskiej dla gwiazd gromady NGC 6475 są umieszczone w Tabeli 11. Dla każdej gwiazdy została obliczona  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  dla metaliczności  $[M/H] = 0$ . Wartości wskaźnika poczerwienienia  $E(B2 - V1)$  zostały obliczone za pomocą zależności między wskaźnikami w systemie Johnsona, Strömgrena i genewskim, które wyglądają następująco:

$$E(b - y) = 0.74E(B - V)_{\text{John}}, \text{ Kubiak (1994)}$$

$$E(B - V)_{\text{John}} = 0.843E(B - V)_{\text{Gen}}, \text{ Cramer (1999)}$$

$$E(B2 - V1)/E(B - V)_{\text{Gen}} = 0.75, \text{ Cramer (1999)}$$

Wyliczono zatem wartość  $E(B - V)_{\text{John}}$  za pomocą wartości  $E(b - y)$  uzyskanej w programie UVBYBETA. Następnie otrzymano  $E(B - V)_{\text{Gen}}$  oraz  $E(B2 - V1)$  za pomocą związków przedstawionych powyżej. Wyniki są przedstawione w Tabeli 12. Parametry  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  uzyskane dla przyjętych wartości poczerwienienia oraz metaliczności dla analizowanych gwiazd są zawarte w Tabeli 13.

Tablica 11: Fotometria genewska dla badanych gwiazd gromady NGC 6475.

HD	$U$	$V$	$B1$	$B2$	$V1$	$G$
162144	8.043	7.584	7.500	8.142	8.278	8.764
162187	10.367	9.494	9.753	10.234	10.203	10.611
162586	6.137	6.121	5.939	6.642	6.811	7.305
162630	7.922	7.543	7.439	8.093	8.234	8.728
162631	7.920	7.358	7.348	7.951	8.053	8.531
162678	6.884	6.336	6.255	6.912	7.028	7.515
162679	7.512	7.140	7.033	7.695	7.833	8.318
162680	8.308	7.733	7.728	8.320	8.425	8.905
162780	7.374	6.866	6.787	7.442	7.557	8.030
162781	8.058	7.471	7.495	8.099	8.166	8.630
162817	6.770	6.085	6.051	6.694	6.781	7.251
162888	7.536	6.928	6.901	7.538	7.622	8.090
320764	9.697	8.905	9.048	9.575	9.606	10.055
320768	10.050	9.186	9.534	9.984	9.896	10.293

Podobnie jak było to w przypadku fotometrii Strömgrena, po wyznaczeniu  $T_{\text{eff}}$  za pomocą fotometrii genewskiej, trzeba wprowadzić poprawki dla gwiazd CP. Mają one następującą postać:

**CP1 (Am)** : nie wymaga poprawek (  $(B2-V1)_0 < -0.160$  )  
 $: \theta_{\text{eff}} = 0.632 + 0.64(B2-V1)_0$  (  $(B2-V1)_0 \geq -0.160$  ) , gdzie  $\theta_{\text{eff}} = 5040/T_{\text{eff}}$

**CP2 (Ap/Bp)** :  $\theta_{\text{eff}} = 0.835 + 0.458(B2-G)_0$  ( $T_{\text{eff}} < 9000$  K)  
 $: T_{\text{eff}} = 1420 + 0.815T_{XY}$  ( $T_{\text{eff}} \geq 9000$  K)

**CP3 (HgMn)/CP4 (He-w/He-s)** :  $T_{\text{eff}} = 1120 + 0.892T_{XY}$

Konieczna była korekta temperatury dla gwiazd CP1 – HD 320764 i HD 162817, CP2 – HD 162679 i HD 162680, CP4 – HD 162586. Wartości poprawione są napisane w tabeli jako druga wartość, natomiast wartości pierwotnie obliczone znajdują się powyżej. Podobnie, jak w przypadku fotometrii Strömgrena, wartości poprawione są niższe od tych pierwotnych.

Dodatkowo obliczono  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  dla czterech wartości poczerwienienia  $E(B2 - V1) = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$  oraz dla trzech wartości metaliczności  $[M/H] = -1, 0, +1$ . Wyniki są pokazane w Tabeli 14. Rysunki 13 i 14 pokazują, jak zmienia się  $T_{\text{eff}}$  i  $\log g$  w zależności od wartości wybranego poczerwienienia (przy założonej metaliczności  $[M/H] = 0$ ). Zależność  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  od metaliczności dla założonej wartości poczerwienienia  $E(B2 - V1) = 0.0$  pokazują odpowiednio Rysunek 15 i 16. Można zauważyć, że występują większe różnice w wyznaczonych wartościach temperatury efektywnej i logarytmu przyspieszenia grawitacyjnego dla tej samej gwiazdy przy różnych wartościach poczerwienienia i ustalonej metaliczności niż w przypadku, gdy metaliczność się zmienia, natomiast poczerwienienie jest stałe. W pierwszej wskazanej sytuacji różnice są małe dla gwiazd gorących  $T_{\text{eff}} > 11000$  K, natomiast w drugim przypadku różnice między parametrami wyznaczonymi dla różnych metaliczności są znikome



Tablica 12: Wskaźniki poczerwienienia dla badanych gwiazd.

HD	$E(b - y)$	$E(B - V)_{\text{John}}$	$E(B - V)_{\text{Gen}}$	$E(B2 - V1)$
162144	0.017	0.023	0.027	0.020
162187	0.004	0.005	0.006	0.005
162586	0.048	0.065	0.077	0.058
162630	0.056	0.076	0.090	0.067
162631	0.056	0.076	0.090	0.067
162678	0.056	0.076	0.090	0.067
162679	0.064	0.086	0.103	0.077
162680	0.056	0.076	0.090	0.067
162780	0.065	0.088	0.104	0.078
162781	0.089	0.120	0.143	0.107
162817	0.070	0.095	0.112	0.084
162888	0.083	0.112	0.133	0.100
320764	0.105	0.142	0.168	0.126
320768	0.041	0.055	0.066	0.049

dla chłodniejszych gwiazd  $T_{\text{eff}} \sim 7000$  K. Dodatkowo  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  rosną gdy ekstynkcja rośnie. Inaczej dzieje się przy rosnącej metaliczności – wartości  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  spadają. Można zatem wywnioskować, że wybór odpowiedniej wartości poczerwienienia jest istotniejszy niż wybór odpowiedniej zawartości metali. Jednakże nie oznacza to, że wartość  $[M/H]$  może być zaniedbana – źle dobrana wartość metaliczności może zaniżyć lub podwyższyć  $T_{\text{eff}}$  lub  $\log g$ .

Porównanie wyznaczonej temperatury efektywnej oraz logarytmu przyspieszenia grawitacyjnego wyliczonych z genewskiego systemu fotometrycznego, jak i systemu Strömgrena, jest przedstawione na Rysunkach 17 oraz 18. Porównując wartości  $T_{\text{eff}}$  uzyskane tymi dwoma narzędziami można zauważyć, że średnio temperatura obliczona ze wskaźników fotometrii genewskiej jest wyższa niż ta wyznaczona z fotometrii Strömgrena. Średnia różnica wynosi 298 K. Największe różnice otrzymano dla HD 320764 oraz HD 162630. Dla pierwszego obiektu ta różnica wynosi aż 1102 K. Gwiazda ta jest sklasyfikowana jako Am, co może być powodem tych dysproporcji. Różnica temperatur w przypadku HD 162630 wynosi 785 K, a powodem tego może być jej podwójność (Pourbaix et al., 2004). Są cztery gwiazdy, dla których zachodzi odwrotna sytuacja, czyli wyznaczona  $T_{\text{eff}}$  w systemie genewskim jest niższa niż ta w systemie Strömgrena – są to HD 162144, HD 320768, HD 162586 i HD 162679. Dwie z nich (HD 162586 i HD 162679) to gwiazdy chemicznie osobliwe oraz podwójne, (Pourbaix et al., 2004; Worley and Heintz, 1983). Pozostałe dwie są gwiazdami chemicznie normalnymi, dla których nie stwierdzono podwójności.

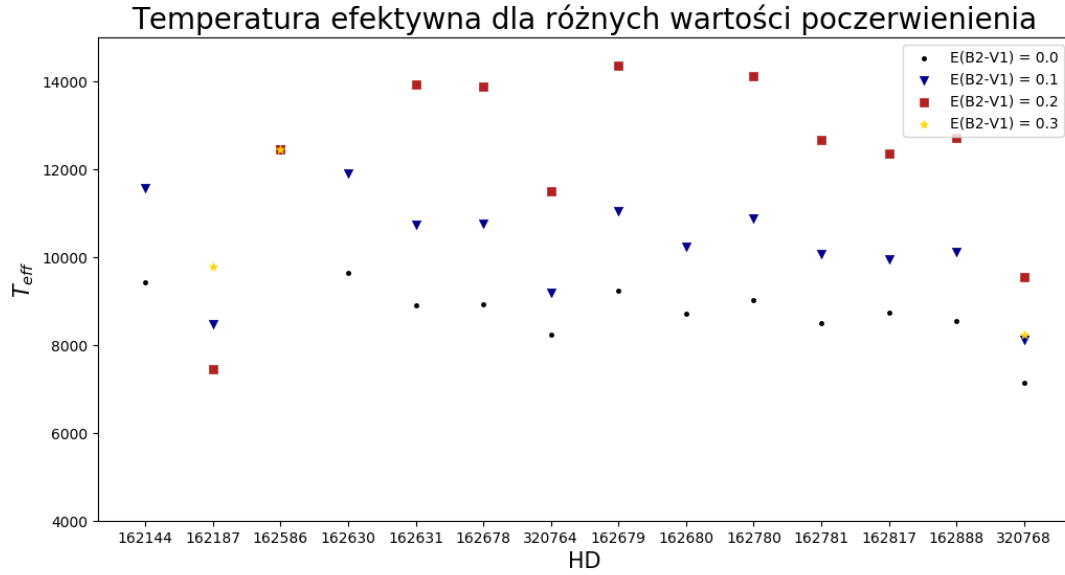
Podobnie jak w przypadku temperatury efektywnej,  $\log g$  obliczony z fotometrii genewskiej ma średnio wyższe wartości niż ten wyliczony z fotometrii Strömgrena. Średnia różnica wynosi 0.30 dex. Jedynym wyjątkiem jest HD 162586, dla której jest odwrotnie. Najbardziej różne wyniki otrzymano dla HD 162144 oraz HD 162187, dla których różnice te wynoszą odpowiednio 0.5 oraz 0.8. Żadna z tych gwiazd nie jest sklasyfikowana jako CP, jak również nie ma informacji o ich podwójności.

Mając wyznaczoną temperaturę efektywną oraz logarytm przyspieszenia grawitacyjnego zarówno z fotometrii Strömgrena, jak i genewskiej, obliczono ich średnie wartości, aby uzyskać

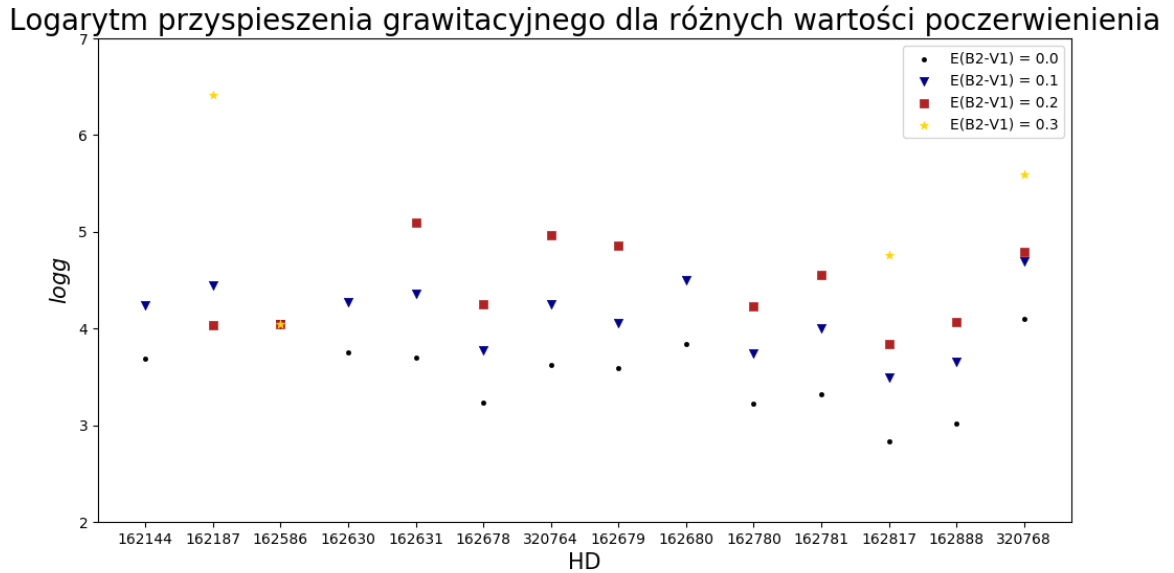
Tablica 13: Parametry atmosferyczne gwiazd gromady NGC 6475 wyznaczone na podstawie fotometrii genewskiej. Wartości podane w tabeli są wynikiem działania programu. Nie są zaokrąglone do cyfr znaczących, aby nie wprowadzać błędów zaokrągleń w dalszych obliczeniach, w których są używane.

HD	$T_{\text{eff}} [K]$	$\log g$
162144	9789±118	3.81±0.10
162187	7505±67	4.08±0.07
162586	12707±61	4.05±0.12
	12455±419	
162630	11015±157	4.12±0.11
162631	10023±121	4.15±0.09
162678	10059±114	3.63±0.11
162679	11182±164	3.97±0.11
	10533±394	
162680	10088±149	4.28±0.10
	9642±377	
162780	10386±133	3.66±0.10
162781	10206±125	4.04±0.09
162817	9658±123	3.41±0.11
	9645±148	
162888	10127±114	3.66±0.11
320764	9792±128	4.42±0.10
	9482±143	
320768	7590±70	4.46±0.07

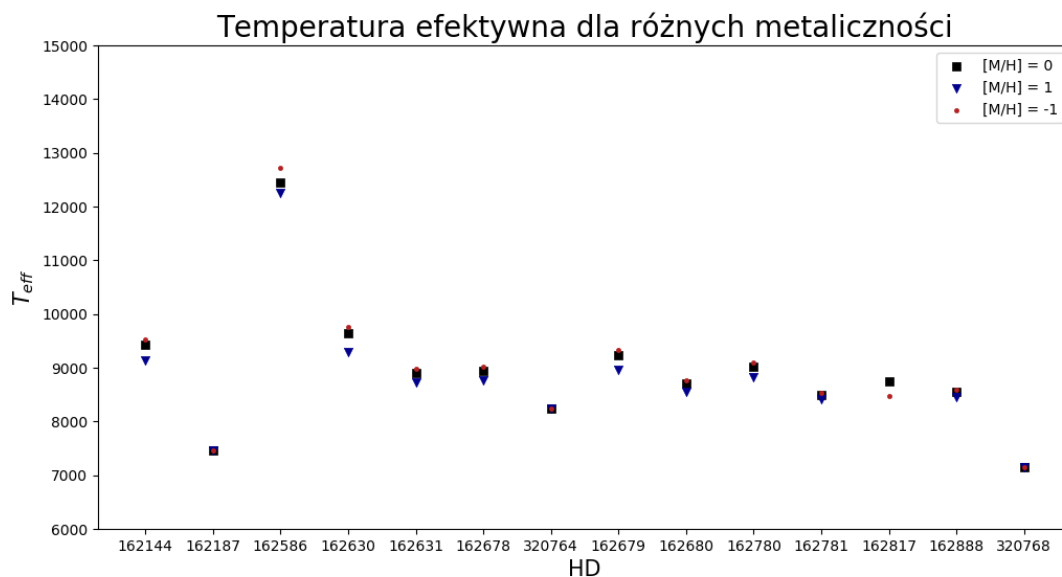
jedno wyznaczenie  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  do dalszej analizy. Wyniki są zaprezentowane w Tabeli 15.



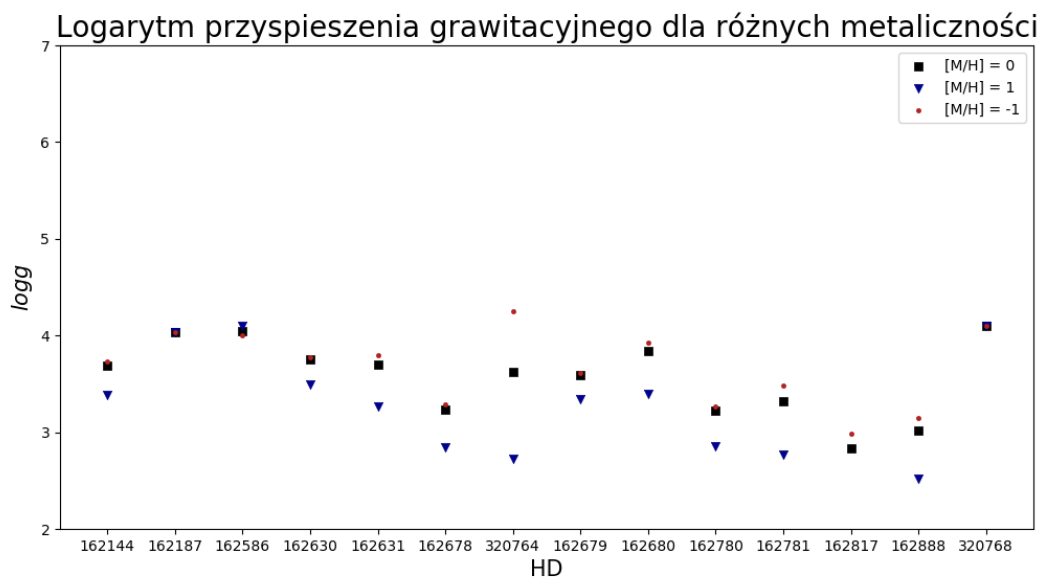
Rysunek 13: Temperatura efektywna policzona z fotometrii genewskiej dla różnych wartości poczerwienienia i założonej metaliczności  $[M/H] = 0$ .



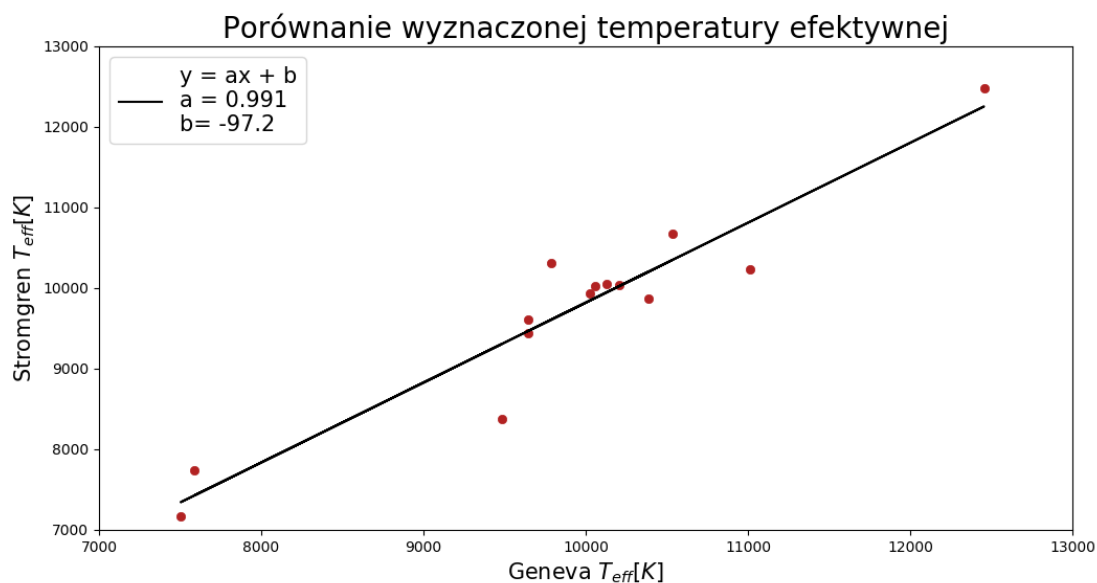
Rysunek 14: Logarytm przyspieszenia grawitacyjnego wyliczony z fotometrii genewskiej dla różnych wartości poczerwienienia i  $[M/H] = 0$ .



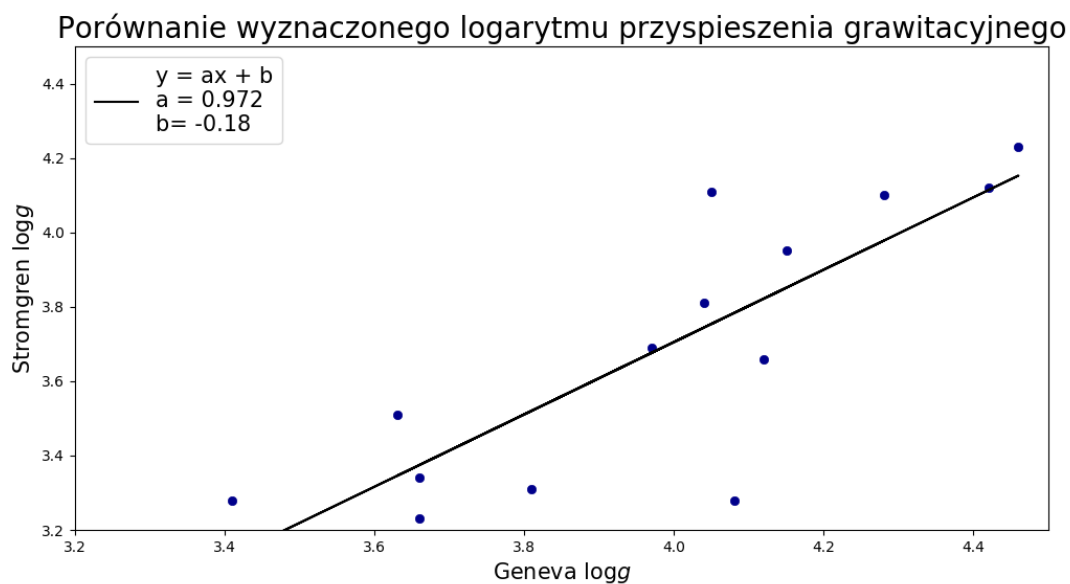
Rysunek 15: Temperatura efektywna wyliczona z fotometrii genewskiej dla różnych wartości metaliczności i  $E(B2 - V1) = 0.0$ .



Rysunek 16: Logarytm przyspieszenia grawitacyjnego wyliczony z fotometrii genewskiej dla różnych wartości metaliczności i  $E(B2 - V1) = 0.0$ .



Rysunek 17: Porównanie temperatury efektywnej wyznaczonej na podstawie fotometrii genewskiej oraz fotometrii Strömgrena.



Rysunek 18: Porównanie przyspieszenia grawitacyjnego wyznaczonego na podstawie fotometrii genewskiej oraz Strömgrena.

Tablica 14: Wartości  $T_{\text{eff}}$  oraz  $\log g$  wyznaczone z fotometrii genewskiej dla różnych wartości poczerwienienia i metaliczności. Wartości podane w tabeli są wynikiem działania programu i nie są zaokrąglone do cyfr znaczących.

HD	$E(B2 - V1)_0$ [mag]	$[M/H] = 0$		$[M/H] = 1$		$[M/H] = -1$	
		$T_{\text{eff}}$ [K]	$\log g$	$T_{\text{eff}}$ [K]	$\log g$	$T_{\text{eff}}$ [K]	$\log g$
162144	0.0	9422±113	3.69±0.1	9136±85	3.39±0.11	9527±115	3.73±0.1
	0.1	11568±166	4.24±0.11	10853±133	4.13±0.11	11908±195	4.23±0.11
	0.2	-	-	13833±355	4.81±0.21	-	-
	0.3	-	-	-	-	-	-
162187	0.0	7456±67	4.04±0.07	7456±67	4.04±0.07	7456±67	4.04±0.07
	0.1	8468±90	4.45±0.04	8468±90	4.45±0.04	8468±90	4.45±0.04
	0.2	7456±67	4.04±0.07	10421±144	4.22±0.04	10421±144	4.22±0.04
	0.3	9787±258	6.42±0.28	9787±258	6.42±0.28	9787±258	6.42±0.28
162586	0.0	12455±419	4.05±0.12	12255±416	4.10±0.11	12715±422	4.00±0.12
	0.1	12455±419	4.05±0.12	12255±416	4.10±0.11	12715±422	4.00±0.12
	0.2	12455±419	4.05±0.12	12255±416	4.10±0.11	12715±422	4.00±0.12
	0.3	12455±419	4.05±0.12	12255±416	4.10±0.11	12715±422	4.00±0.12
162630	0.0	9645±121	3.75±0.1	9300±89	3.49±0.11	9757±123	3.78±0.09
	0.1	11895±175	4.27±0.12	11128±161	4.18±0.1	12294±208	4.27±0.13
	0.2	-	-	14348±14348±894	4.93±0.47	-	-
	0.3	-	-	-	-	-	-
162631	0.0	8902±89	3.7±0.1	8731±62	3.27±0.11	8980±91	3.8±0.1
	0.1	10738±145	4.36±0.1	10220±132	4.18±0.1	10940±169	4.37±0.1
	0.2	13917±1478	5.09±1.05	12746±1325	4.88±0.81	-	-
	0.3	-	-	-	-	-	-
162678	0.0	8933±87	3.23±0.11	8757±69	2.84±0.12	9015±95	3.29±0.1
	0.1	10752±137	3.77±0.11	10196±123	3.66±0.1	10963±171	3.75±0.12
	0.2	13877±284	4.25±0.17	12548±204	4.13±0.14	14484±498	4.29±0.25
	0.3	-	-	-	-	-	-
320764	0.0	8233±108	3.62±0.12	8233±108	2.72±0.13	8233±108	4.25±0.34
	0.1	9194±134	4.25±0.09	9194±134	3.88±0.11	9194±134	4.31±0.08
	0.2	11506±1378	4.96±0.86	10836±271	4.78±0.21	11755±1279	5.00±0.87
	0.3	-	-	-	-	-	-
162679	0.0	9242±362	3.59±0.1	8966±355	3.34±0.1	9330±364	3.61±0.1
	0.1	11054±405	4.06±0.13	10422±386	3.98±0.11	11364±419	4.05±0.13
	0.2	14365±1668	4.86±1.2	12927±1635	4.6±1.1	-	-
	0.3	-	-	-	-	-	-
162680	0.0	8709±353	3.84±0.1	8556±348	3.40±0.1	8766±365	3.93±0.09
	0.1	10235±386	4.5±0.1	9789±373	4.32±0.11	10369±394	4.52±0.1
	0.2	-	-	11938±1506	5.06±0.99	-	-
	0.3	-	-	-	-	-	-
162780	0.0	9019±90	3.22±0.11	8820±74	2.86±0.12	9103±91	3.27±0.1
	0.1	10880±136	3.74±0.12	10293±129	3.64±0.11	11112±178	3.71±0.12
	0.2	14127±295	4.23±0.17	12721±204	4.1±0.15	14753±748	4.27±0.37
	0.3	-	-	-	-	-	-
162781	0.0	8500±69	3.32±0.1	8407±97	2.77±0.18	8534±94	3.48±0.1
	0.1	10068±122	4.0±0.1	9645±107	3.78±0.1	10190±126	4.01 $\mu$ m0.1
	0.2	12655±240	4.55±0.14	11719±171	4.43±0.12	13102±247	4.57±0.14
	0.3	-	-	4552±47	9.37±0.62	-	-
162817	0.0	8745±121	2.83±0.12	-	-	8475±90	2.98±0.1
	0.1	9951±118	3.49±0.1	9531±100	3.30±0.11	10089±128	3.48±0.11
	0.2	12366±204	3.84±0.15	11421±157	3.81±0.12	12851±243	3.84±0.15
	0.3	17000±4496	4.76±2.48	14807±4994	4.5±2.8	-	-
162888	0.0	8551±71	3.02±0.2	8461±159	2.52±0.32	8598±82	3.15±0.11
	0.1	10127±114	3.66±0.11	9686±101	3.49±0.11	10273±132	3.66±0.11
	0.2	12705±246	4.07±0.14	11718±178	4.0±0.12	13201±241	4.07±0.15
	0.3	-	-	15377±633	4.86±0.33	-	-
320768	0.0	7141±59	4.1±0.08	7141±59	4.1±0.08	7141±59	4.1±0.08
	0.1	8108±77	4.7±0.05	8108±77	4.7±0.05	8108±77	4.7±0.05
	0.2	9559±148	4.79±0.03	9559±148	4.79±0.03	9559±148	4.79±0.03
	0.3	8236±503	5.59±0.19	8236±503	5.59±0.19	8236±503	5.59±0.19

Tablica 15: Średnia wartość temperatury efektywnej oraz logarytmu przyspieszenia grawitacyjnego dla badanych gwiazd gromady NGC 6475.

HD	$T_{\text{eff}} [K]$	$\log g$
162144	10050±90	3.56±0.06
162187	7340±40	3.68±0.05
162586	12500±300	4.08±0.06
162630	10620±80	3.89±0.06
162631	9980±60	4.05±0.05
162678	10050±60	3.57±0.06
162679	10600±200	3.83±0.06
162680	9500±300	4.19±0.05
162780	10100±200	3.45±0.06
162781	10120±60	3.93±0.05
162817	9600±100	3.35±0.06
162888	10090±90	3.50±0.06
320764	8930±70	4.27±0.06
320768	7670±40	4.35±0.05

## 7 Skład chemiczny gwiazd gromady NGC 6475

Skład chemiczny gwiazd gromady NGC 6475 policzono, korzystając z metody syntezy widma. Polega ona na dopasowywaniu widma syntetycznego, wyliczonego dla modelu atmosfery o zadanych parametrach atmosfery i składzie chemicznym, do widma obserwowanego, w taki sposób aby profile linii jak najlepiej odwzorowały wygląd obserwowanego widma badanej gwiazdy. Modele atmosfer LTE zostały wyliczone programem ATLAS9 a widma syntetyczne programem SYNTHE<sup>10</sup> (Kurucz, 2005).

Algorytm dopasowujący widmo syntetyczne wyliczane dla modelu atmosfery, w którym zmieniane były obfitości pierwiastków, opierał się na metodzie najmniejszych kwadratów (program fitsun, Niemczura et al., 2009). Parametrami początkowymi, które były konieczne do obliczenia modelu atmosfery, była temperatura efektywna  $T_{\text{eff}}$  oraz logarytm przyspieszenia grawitacyjnego  $\log g$ . Wartości tych parametrów wyznaczono wcześniej za pomocą metod fotometrycznych. Pozostałe parametry zostały albo wyliczone razem ze składem chemicznym (prędkość rotacji  $v \sin i$ , prędkość radialna  $v_{\text{rad}}$ ), albo ich wartości zostały przyjęte (mikroturbulencja  $v_{\text{mic}}$  zależna od temperatury gwiazdy i makroturbulencja  $v_{\text{mac}} = 0.0$ ).

Dopasowanie widma syntetycznego nie odbywa się równocześnie dla całego widma gwiazdy – byłoby to zbyt czasochłonne. Widmo jest podzielone na mniejsze fragmenty, które zawierają po kilka linii widmowych lub ich blend. Do podziału widm na fragmenty oraz identyfikacji linii w tych fragmentach wykorzystano opisany wcześniej program HANDY-extended. W zależności od prędkości rotacji gwiazdy, widmo wykazuje węższe lub szersze linie, które są zblendowane. Typ widmowy gwiazdy determinuje wygląd widma. W części optycznej widma chłodniejszych gwiazd posiadają wiele linii absorpcyjnych, które ciężko od siebie oddzielić. Z tych powodów fragmenty podzielonego widma mogą być krótsze lub dłuższe, w zależności od tego, w jakim stopniu linie są ze sobą zblendowane. Krótsze fragmenty są wystarczające dla gwiazd z małą lub średnią prędkością rotacji  $v \sin i < 80 \text{ km s}^{-1}$ , natomiast powyżej tej wartości konieczne jest dzielenie widma na dłuższe części (Niemczura et al., 2009).

Pierwiastki chemiczne wpływające na kształt widma w analizowanych fragmentach zostały zidentyfikowane na podstawie listy linii przygotowanej przez Fiorellę Castelli i dostępnej na jej stronie internetowej<sup>11</sup>. Wyznaczane są tylko obfitości pierwiastków mających znaczący wpływ na dany fragment widma. Obfitości pozostałych pierwiastków są zakładane jako słowneczne. Niewątpliwie dużym atutem metody syntezy widma jest jej sprawne działanie właśnie w przypadku zblendowanych linii. Jednakże ten sposób analizy chemicznej ma także swoje minusy a przede wszystkim jest to metoda czasochłonna.

Program fitsun, opierający się o opisaną powyżej metodę dopasował obfitości pierwiastków we wszystkich fragmentach widma dla każdej badanej gwiazdy. Następnie wyliczono średnią obfitość każdego analizowanego pierwiastka dla tych obiektów. Program wyznaczył także wartość  $v \sin i$ . Wartości mikroturbulencji zostały wybrane na podstawie wyników przedstawionych przez Niemczura et al. (2017), pokazujących zmiany  $v_{\text{mic}}$  w zależności od temperatury efektywnej. Dla  $T_{\text{eff}} < 6800 \text{ K}$  mikroturbulencja zmienia się w przedziale od 1 do 2  $\text{km s}^{-1}$ , dla  $6800 < T_{\text{eff}} < 9000 \text{ K}$   $v_{\text{mic}}$  zwykle przyjmuje wartości między 2 a 4  $\text{km s}^{-1}$ , natomiast dla  $T_{\text{eff}} > 9000 \text{ K}$   $v_{\text{mic}}$  przyjmuje wartości z przedziału 1-2  $\text{km s}^{-1}$ . Dla każdej gwiazdy policzone zostały obfitości pierwiastków dla mikroturbulencji z przedziału od 0.5 do 4.0 z krokiem 0.5.

<sup>10</sup><http://kurucz.harvard.edu/>

<sup>11</sup><http://wwwuser.oats.inaf.it/castelli/>



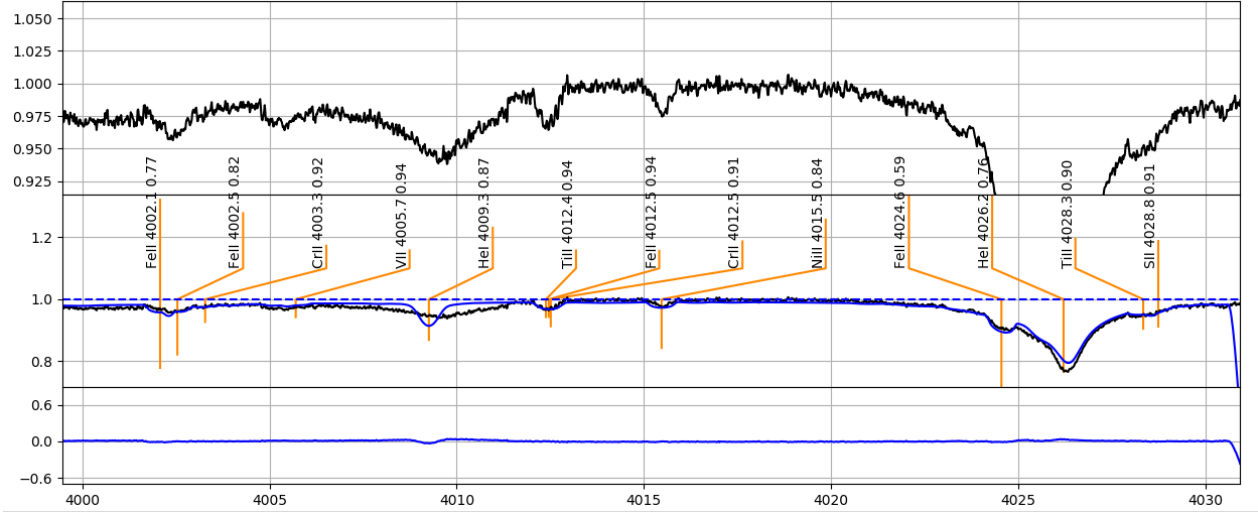
Następnie dla każdej gwiazdy sprawdzono, dla której wartości  $v_{\text{mic}}$  obfitości żelaza wyliczane z różnych fragmentów jej widma dają najbardziej zgodne wyniki. Wynikające stąd najlepsze wartości mikroturbulencji są przedstawione w Tabeli 16. Wykorzystane zostały linie żelaza, ponieważ są to linie występujące najbardziej licznie w widmach wszystkich badanych w tej pracy gwiazd.

Wyniki obliczeń umieszczone są w Tabeli 16. Pierwsza kolumna zawiera nazwę gwiazdy. Kolejne cztery kolumny przedstawiają wartości parametrów atmosferycznych:  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  i  $v_{\text{mic}}$ . Temperatura efektywna i przyspieszenie grawitacyjne, dla których wyliczane były widma syntetyczne, zostały wybrane jako wartości bliskie średniej temperatury efektywnej i przyspieszenia grawitacyjnego wyznaczonych z fotometrii. Rzut prędkości rotacji  $v \sin i$  był dopasowywany razem z obfitościami pierwiastków (w tabeli odchylenie standardowe tego wyznaczenia podane jest poniżej wartości). Kolejne kolumny to obfitości poszczególnych pierwiastków. Analizowano w sumie 25 pierwiastków wśród wszystkich badanych gwiazd (C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ar, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Sr, Y, Zr, Ba) i w tabeli zostały one ułożone w kolejności według liczby atomowej. Każda kolumna, jeśli tylko dla danej gwiazdy znaleziono dany pierwiastek, zawiera jego zlogarytmowaną średnią obfitość, wyliczoną na podstawie wartości uzyskanych w różnych analizowanych fragmentach widma. Poniżej obfitości znajduje się odchylenie standardowe tej wartości, jeśli liczba przedziałów, z których obliczano obfitość pierwiastka była większa od dwu. Poniżej odchylenia standardowego umieszczono w nawiasie wspomnianą liczbę przedziałów. Puste komórki oznaczają, że dla gwiazdy nie zidentyfikowano danego pierwiastka. Pierwszą pozycję w tabeli stanowią zlogarytmowane wartości obfitości słonecznej (Asplund et al., 2009).

Rysunki 20 - 33 przedstawiają dla każdej badanej gwiazdy różnicę między wyznaczonymi obfitościami pierwiastków a obfitościami słonecznymi (wartości zlogarytmowane) wraz z błędami (odchylenia standardowe wspomniane wcześniej). Otrzymane wyniki zostały skonfrontowane z przeprowadzoną wcześniej klasyfikacją widmową oraz z wartościami wyznaczonymi w literaturze.

*HD 162144.* Dla tej gwiazdy widmo syntetyczne obliczono dla parametrów  $T_{\text{eff}} = 10000$  K,  $\log g = 3.6$ . Wyznaczono  $v \sin i = 180 \pm 18 \text{ km s}^{-1}$  oraz przyjęto mikroturbulencję  $v_{\text{mic}} = 2.00 \text{ km s}^{-1}$ . Otrzymano obfitości piętnastu pierwiastków. Po porównaniu ze składem chemicznym Słońca zauważono spory niedobór Sr (różnica między wartością gwiazdową i słoneczną  $-0.71$  na podstawie jednego fragmentu) oraz dość dużą nadwyżkę N (0.44, 2 fragmenty), Al (0.35, 1), Ca (0.57, 3), Ni (0.54, 2) a szczególnie Y (1.01, 1). Różnice między obfitościami badanej gwiazdy i Słońca mogą wskazywać na prawdziwe różnice między składem chemicznym ich atmosfer, ale też mogą wynikać z faktu, że wszystkie wymienione pierwiastki nie tworzyły indywidualnych linii, ale były widoczne w postaci słabych blend, najczęściej tylko w jednym lub dwu fragmentach widma. Dlatego wyznaczone wartości mogą być obciążone dużym błędem. Gwiazda została sklasyfikowana jako chemicznie normalna, z obfitościami pierwiastków podobnymi do obfitości słonecznych. Wyznaczone obfitości nie wskazują na żaden typ gwiazdy chemicznie osobiwej. W literaturze nie znaleziono informacji na temat analizy składu chemicznego tego obiektu.

*HD 162187.* Przyjęto  $T_{\text{eff}} = 7300$  K,  $\log g = 3.7$ ,  $v_{\text{mic}} = 3.00 \text{ km s}^{-1}$  oraz wyliczono  $v \sin i = 223 \pm 9 \text{ km s}^{-1}$ . Zidentyfikowano 13 pierwiastków. Występuje spory niedobór Sc ( $-0.81$ , 2 fragmenty) oraz Ni ( $-1.03$ , 2). Przy klasyfikacji nie zauważono osobiwości, co zgadza się z wyznaczonym składem chemicznym. Brak informacji o składzie chemicznym w literaturze.



Rysunek 19: Dopasowanie widma syntetycznego o parametrach  $T_{\text{eff}} = 12500$  K,  $\log g = 4.10$ ,  $v_{\text{mic}} = 2.00$ ,  $v \sin i = 28 \text{ km s}^{-1}$  do widma gwiazdy HD 162586.

*HD 162586.* Parametry przyjęte bądź wyliczone dla tej gwiazdy wynosiły:  $T_{\text{eff}} = 12500$  K,  $\log g = 4.10$ ,  $v_{\text{mic}} = 2.00 \text{ km s}^{-1}$  oraz  $v \sin i = 28 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$ . Wyliczono obfitości 20 pierwiastków i są one bliskie wartościom słonecznym. Analiza Saffe and Levato (2014) dała ten sam wynik i nie zaobserwowano anomalii, które wskazywałyby na chemiczną osobliwość. Wnioski te zostały wyciągnięte dla  $T_{\text{eff}} = 12503$  K,  $\log g = 4.11$  oraz  $v \sin i = 27 \text{ km s}^{-1}$ . Podczas klasyfikacji w poniższej pracy zasugerowano, że gwiazda ma anomalnie wysoką zawartość helu, co jest pokazane na Rysunku 19. Obfitość He nie została wyznaczona w trakcie analizy. Na kształt linii helu duży wpływ mają efekty braku równowagi termodynamicznej (NLTE), które nie są uwzględnione w programach ATLAS9 i SYNTHE.

*HD 162630.* Obfitości były wyznaczane dla parametrów  $T_{\text{eff}} = 10600$  K,  $\log g = 3.9$ ,  $v_{\text{mic}} = 1.00 \text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 51 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$ . Znalaziono obfitości 15 pierwiastków. Niewielką nadobfitością charakteryzują się C, Ni, Sr i Y, natomiast obfitości Ti, V, Cr, Fe mają obfitości mniejsze niż słoneczne. Większą nadobfitość wykazuje Ba (0.54). Spory deficyt występuje w przypadku Ca ( $-1.03$ ) i Sc ( $-1.04$ ). Wyniki te zostały uzyskane na podstawie analizy pojedynczych fragmentów. Gwiazda została sklasyfikowana jako AO III (klasyfikacja wizualna) lub A3 mA0 III-IV metal-weak (klasyfikacja MKCLASS). Skład chemiczny potwierdza klasyfikację gwiazdy jako „metal-weak”. Dla tej gwiazdy Saffe and Levato (2014) przeprowadził badania, przyjmując  $T_{\text{eff}} = 10625$  K,  $\log g = 3.72$  i  $v \sin i = 49 \text{ km s}^{-1}$ . Autorzy sklasyfikowali HD 162630 jako obiekt Am lub mild-Am z powodu nadwyżki Cr, Fe, Al, Ni, Sr. Nie pokrywa się to z wartościami otrzymanymi w poniższej pracy. W przypadku niklu oraz strontu występuje zgodność, jednak nie jest tak w przypadku żelaza, glinu i chromu.

*HD 162631.* Przyjęte parametry wynoszą  $T_{\text{eff}} = 10000$  K,  $\log g = 4.0$ ,  $v_{\text{mic}} = 2.00 \text{ km s}^{-1}$  i  $v \sin i = 182 \pm 11 \text{ km s}^{-1}$ . Zidentyfikowano 15 pierwiastków, z czego 7 pokazuje nadobfitości – N (0.52, 2 fragmenty), Ca (0.97, 6), V (0.66, 2), Ni (0.71, 2), Sr (2.04, 1) i Zr (1.67, 1). Obiekt sklasyfikowano jako A0 V, a skład chemiczny nie wskazuje na osobliwości charakterystycznych dla żadnej grupy gwiazd CP.

*HD 162678.* Skład chemiczny został wyznaczony dla parametrów atmosferycznych  $T_{\text{eff}} =$

10000 K,  $\log g = 3.6$ ,  $v_{\text{mic}} = 1.50 \text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 40 \pm 3 \text{ km s}^{-1}$ . Przeanalizowano 15 pierwiastków, których obfitości są bliskie wartościom słonecznym. Nie dokonano klasyfikacji tej gwiazdy, jednak literaturowy typ widmowy nie wskazuje na istnienie osobliwości. Wyniki analizy Saffe and Levato (2014) doprowadziły do tego samego wniosku.

*HD 162679.* Przyjęte parametry to  $T_{\text{eff}} = 10600 \text{ K}$ ,  $\log g = 3.8$ ,  $v_{\text{mic}} = 2.00 \text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 41 \pm 3 \text{ km s}^{-1}$ . Liczba zidentyfikowanych pierwiastków wyniosła 19. Zauważono niedobór N ( $-0.57$ , 1 fragment) oraz nadobfitość V ( $0.71$ , 2) i P ( $0.79$ , 2). Obfitości pozostałych pierwiastków są bliskie wartości słonecznych. Jest to zgodne z analizą przedstawioną przez Saffe and Levato (2014) oraz Villanova et al. (2009). W procesie klasyfikacji widmowej znaleziono osobliwą zawartość krzemu oraz podejrzenie, że gwiazda może być typu  $\lambda \text{ Boo}$  (klasyfikacja wizualna). Analiza składu chemicznego nie potwierdza tego – zawartość Si jest podobna do słonecznej, a pozostałe metale nie mają obniżonej obfitości.

*HD 162680.* Widma syntetyczne były obliczane dla parametrów  $T_{\text{eff}} = 9500 \text{ K}$ ,  $\log g = 4.2$ ,  $v_{\text{mic}} = 1.50 \text{ km s}^{-1}$  i otrzymano  $v \sin i = 101 \pm 9 \text{ km s}^{-1}$ . Obliczono średnie obfitości 18 pierwiastków. Nadobfitość została wyznaczona dla V ( $0.74$ , 3 fragmenty), Y ( $0.54$ , 1), Zr ( $0.50$ , 1) i Ba ( $0.57$ , 2). Gwiazda została sklasyfikowana jako A0 V Si (MKCLASS) lub kA0.5 hA0 V Si (wizualnie). Krzem jest rzeczywiście bardziej obfity niż w atmosferze Słońca, jednak różnica nie jest duża. W granicach błędu obie wartości są takie same. Można także zauważyć obniżoną zawartość Sc przy nadwyżce Cr co może świadczyć o tym, że gwiazda to obiekt typu Am. Nie znaleziono analizy składu chemicznego w literaturze.

*HD 162780.* Przyjęte parametry atmosfery tej gwiazdy to  $T_{\text{eff}} = 10100 \text{ K}$ ,  $\log g = 3.5$ ,  $v_{\text{mic}} = 3.00 \text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 272 \pm 28 \text{ km s}^{-1}$ . Wśród obfitości 12 znalezionych pierwiastków widać spory niedobór Ca ( $-1.13$ , 1 fragment) oraz nadwyżkę C ( $0.66$ , 1), Ne ( $1.11$ , 1), Al ( $0.44$ , 1), S ( $1.41$ , 2). Tak duże różnice wynikają głównie z bardzo dużej prędkości rotacji tej gwiazdy, która powoduje, że wszystkie wymienione pierwiastki występują w widmie tylko jako słabe blendy. W przypadku Ne może to wynikać również z braku efektów NLTE w analizie. Efekty te są istotne dla tego pierwiastka. Przy klasyfikacji widmowej nie zauważono osobliwości, potwierdza to skład chemiczny. Nie znaleziono analizy składu chemicznego w literaturze.

*HD 162781.* Przyjęto parametry  $T_{\text{eff}} = 10100 \text{ K}$ ,  $\log g = 3.9$ ,  $v_{\text{mic}} = 1.00 \text{ km s}^{-1}$ ,  $v \sin i = 203 \pm 12 \text{ km s}^{-1}$ . Analiza 13 zidentyfikowanych pierwiastków pokazuje, że wszystkie oprócz magnezu mają obfitości wyższe niż słoneczne. Gwiazda ta nie została sklasyfikowana jako osobliwie chemiczna, dlatego taki wynik analizy może świadczyć o błędnie przyjętych wartościach parametrów atmosferycznych. Kolejną przyczyną rozbieżności mogą być błędy normowania, które jest problematyczne dla gwiazd szybkrotujących. Literatura nie podaje informacji o składzie chemicznym HD 162781.

*HD 162817.* Skład chemiczny obliczano dla  $T_{\text{eff}} = 9600 \text{ K}$ ,  $\log g = 3.4$ ,  $v_{\text{mic}} = 2.00 \text{ km s}^{-1}$  i  $v \sin i = 77 \pm 6 \text{ km s}^{-1}$ . Pośród 18 wyliczonych pierwiastków występuje niedobór Sc ( $-0.51$ , 2 fragmenty) oraz Sr ( $-0.5$ , 1), natomiast nadobfitość wykazuje Ne ( $1.03$ , 3), co może być skutkiem braku przyjęcia NLTE. Gwiazdę sklasyfikowano jako kA1 hA0 mA1 III, a według klasyfikacji dostępnej w literaturze może to być gwiazda typu Am. Skład chemiczny pokazuje obniżoną obfitość skandiu i podwyższoną obfitość chromu, co może wskazywać na gwiazdę Am. Chemiczną osobliwość obiektu proponuje Saffe and Levato (2014), określając HD 162817 jako Ap z powodu nadwyżki Ca, Sc, Ti, Cr, Fe. Nie zaobserwowano tego w poniższej pracy. Natomiast Folsom et al. (2007) oraz Villanova et al. (2009) twierdzą, że gwiazda ta ma

„normalny” skład chemiczny.

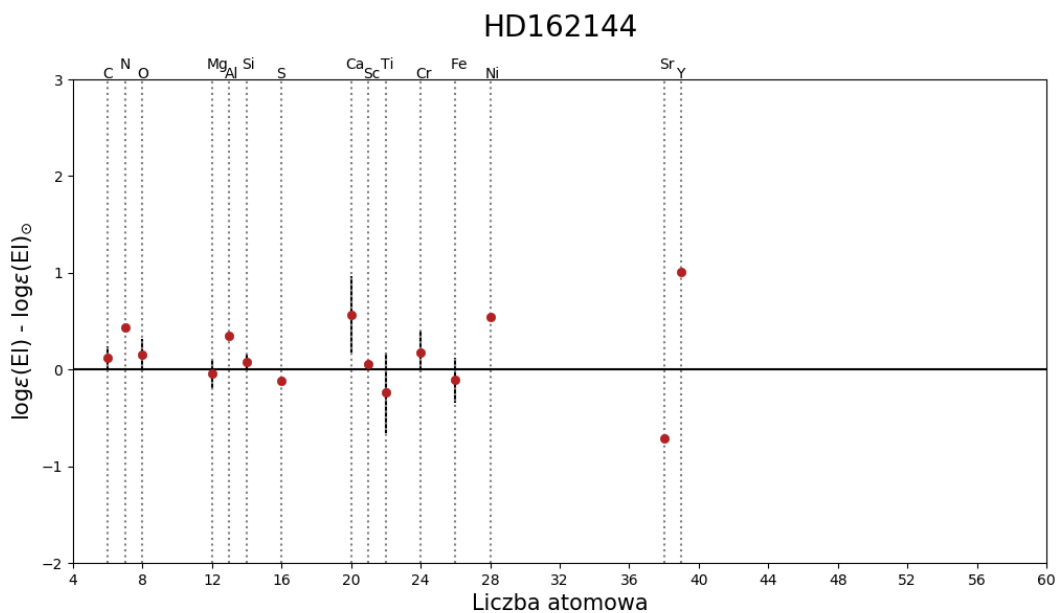
*HD 162888.* Synteza widma została przeprowadzona dla parametrów  $T_{\text{eff}} = 10100 \text{ K}$ ,  $\log g = 3.5$ ,  $v_{\text{mic}} = 1.50 \text{ km s}^{-1}$  oraz  $v \sin i = 260 \pm 26 \text{ km s}^{-1}$ . Zidentyfikowano jedynie 7 pierwiastków, co było spowodowane dużą prędkością rotacji gwiazdy i małą liczbą przedziałów nadających się do analizy (ze względu na krótszy zakres dobrej jakości widma). Wyliczone obfitości są zbliżone do słonecznych. Nie wyznaczono typu widmowego badanej gwiazdy, jednak potwierdzony jest brak osobliwości: gwiazda jest sklasyfikowana jako A0 V. Brak jest jednak innych informacji w literaturze na temat składu chemicznego HD 162888.

*HD 320764.* Przyjęte parametry atmosferyczne to  $T_{\text{eff}} = 8900 \text{ K}$ ,  $\log g = 4.3$ ,  $v_{\text{mic}} = 1.50 \text{ km s}^{-1}$  i  $v \sin i = 260 \pm 11 \text{ km s}^{-1}$ . Większość z 17 zidentyfikowanych pierwiastków wykazuje nadobfitość względem wartości słonecznych. Wyznaczony typ widmowy kA2.5 hA2 mA3 V (wizualnie) może być potwierdzony przez niedobór skandu i nadwyżkę chromu, które mogą świadczyć o tym, że gwiazda jest typu mild-Am. Jednak przyczyną obserwowanych anomalii Sc i Cr może być bardzo szybka rotacja gwiazdy i związane z tym problemy z normowaniem i analizą składu chemicznego. Według *Folsomet al.* (2007) skład chemiczny gwiazdy nie wskazuje na obiekt CP.

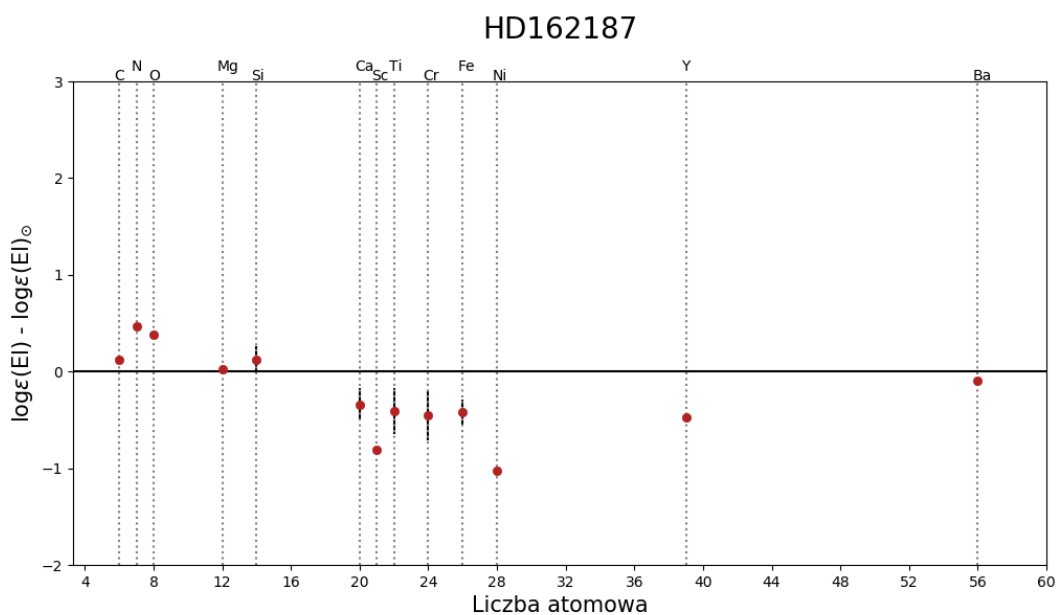
*HD 320768.* Parametry atmosferyczne tej gwiazdy mają wartości  $T_{\text{eff}} = 7700 \text{ K}$ ,  $\log g = 4.3$ ,  $v_{\text{mic}} = 2.00 \text{ km s}^{-1}$  oraz  $v \sin i = 138 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ . Zidentyfikowano 17 pierwiastków, 3 z nich wykazują nadobfitości: N (0.7, 1 fragment), O (0.67, 2) i S (0.94, 2). Pozostałe pierwiastki mają wartości podobne do słonecznych, co potwierdza klasyfikację gwiazdy jako chemicznie normalną. Literatura nie podaje analizy składu chemicznego.

Analiza składu chemicznego dla czternastu gwiazd gromady NGC 6475 w większości przypadków potwierdza przeprowadzoną wcześniej klasyfikację widmową. Wyjątkiem są HD 162679 i HD 162680, wobec których wysunięto przypuszczenie osobliwości  $\lambda$  Boo i nadobfitości Si, czego nie potwierdziła szczegółowa analiza składu chemicznego. Badanie składu HD 162680 wskazało, że gwiazda może być typu Am lub mild-Am, co nie było zauważone przy wyznaczaniu typu widmowego.

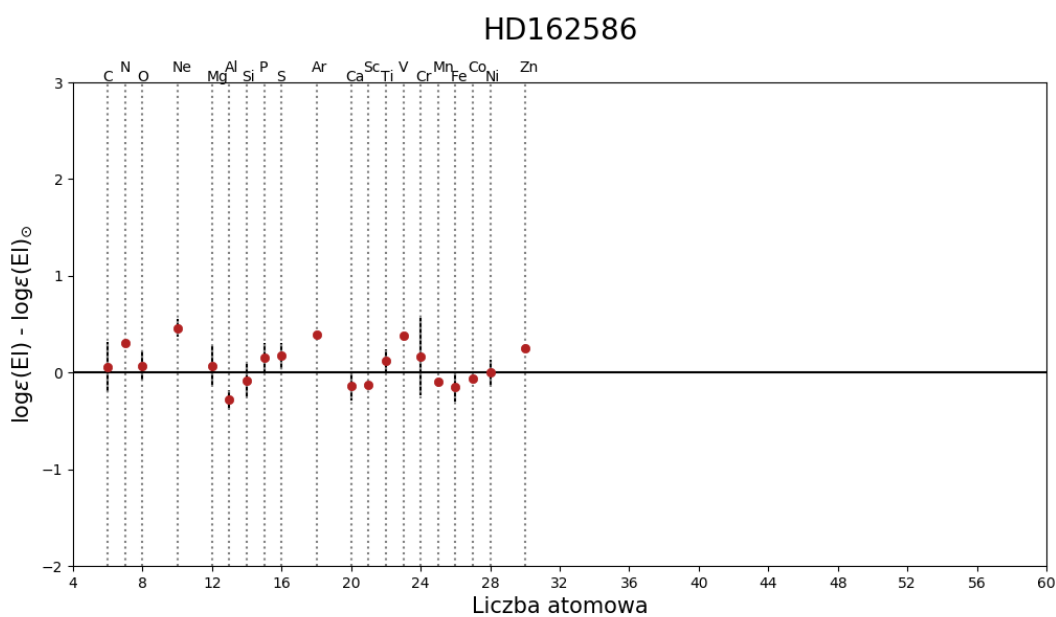
Spośród 14 badanych gwiazd 12 określono jako chemicznie normalne. W przypadku 2 gwiazd (HD 162680, HD 162817) są podstawy do rozważenia chemicznej osobliwości pod kątem anomalnej zawartości metali. Obiekty te charakteryzują się niższymi wartościami temperatury efektywnej, w porównaniu z innymi badanymi gwiazdami. Prędkości ich rotacji nie są małe, wynoszą  $101 \text{ km s}^{-1}$  (HD 162680) i  $77 \text{ km s}^{-1}$  (HD 162817).



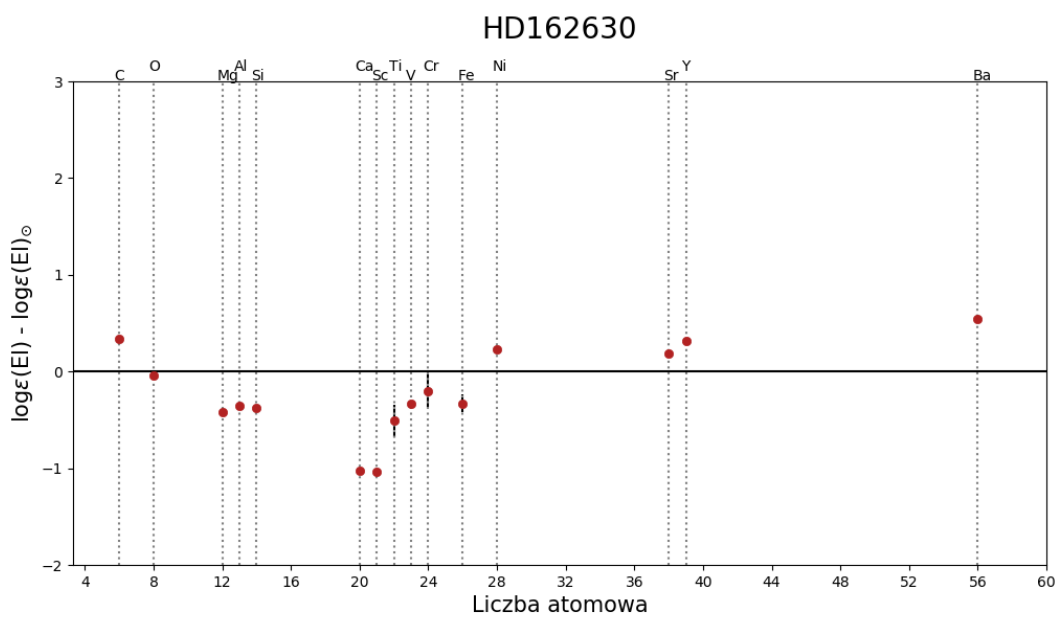
Rysunek 20: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162144 z obfitościami słonecznymi.



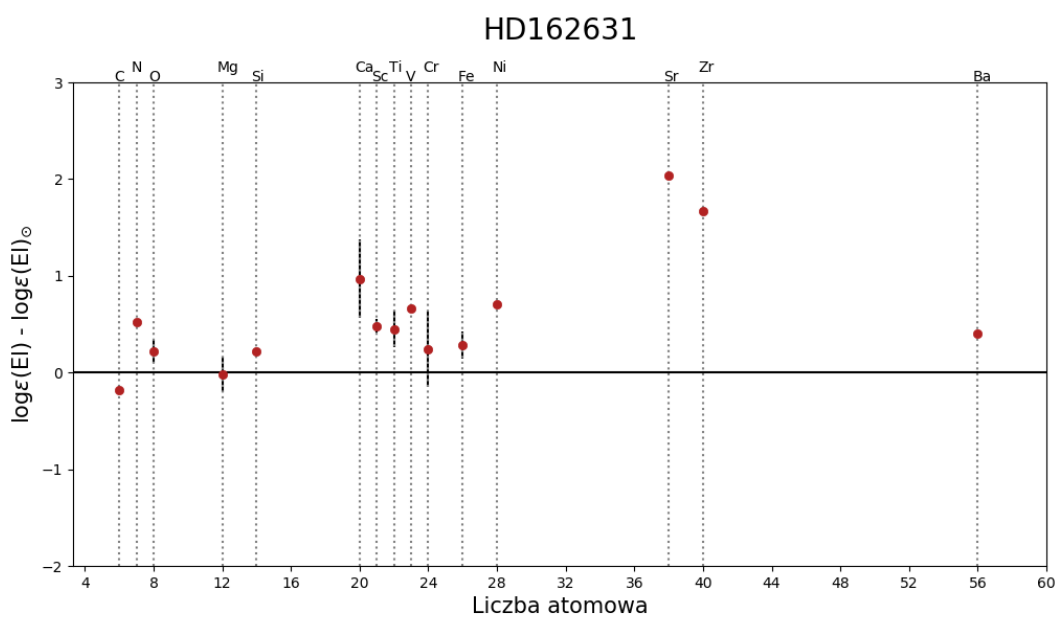
Rysunek 21: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162187 z obfitościami słonecznymi.



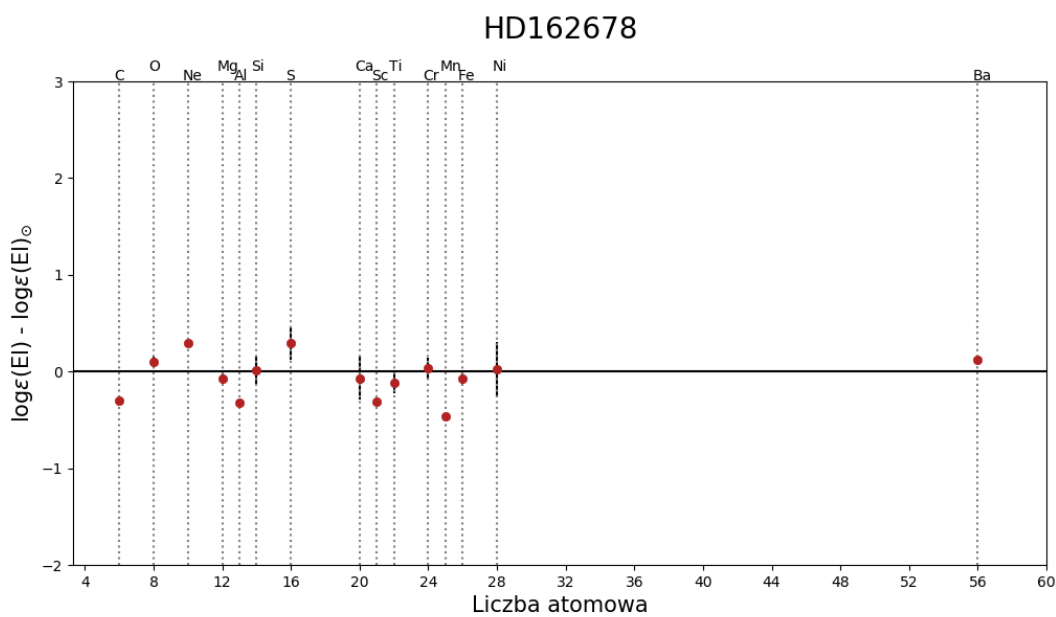
Rysunek 22: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162187 z obfitościami słonecznymi.



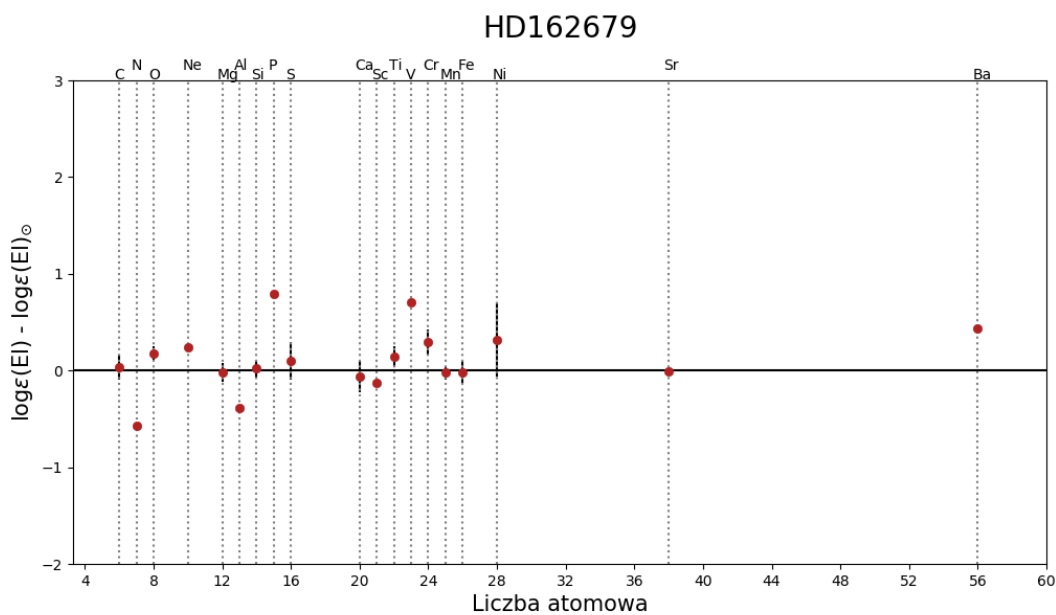
Rysunek 23: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162630 z obfitościami słonecznymi.



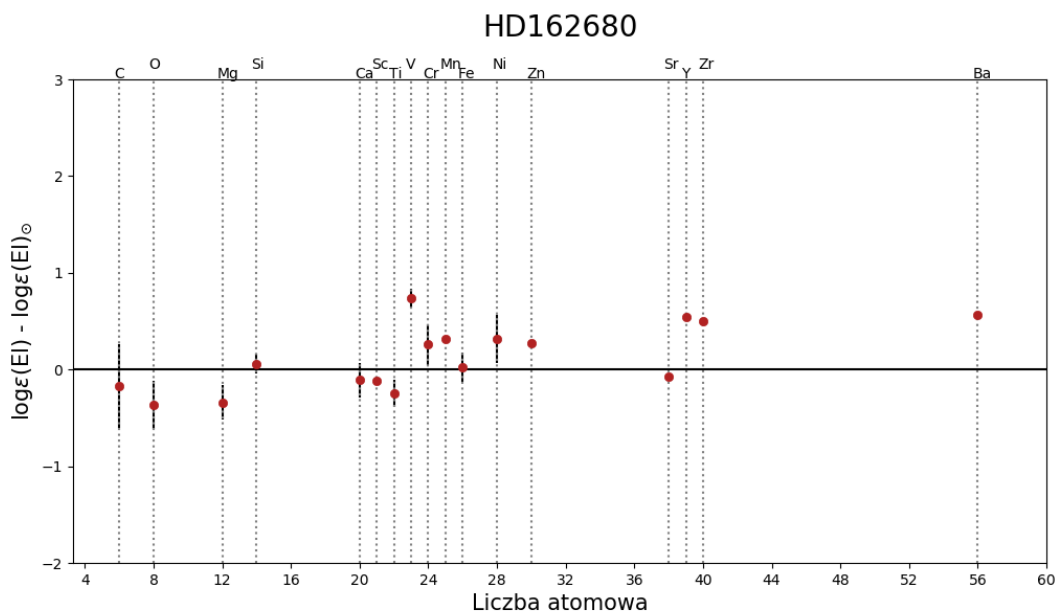
Rysunek 24: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162631 z obfitościami słonecznymi.



Rysunek 25: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162678 z obfitościami słonecznymi.

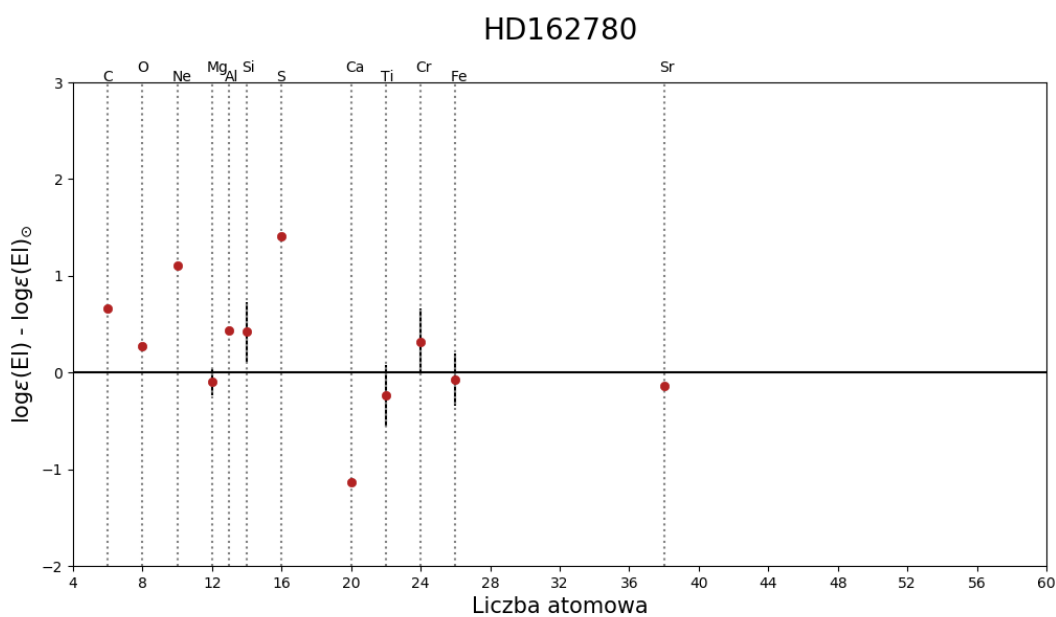


Rysunek 26: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162679 z obfitościami słonecznymi.

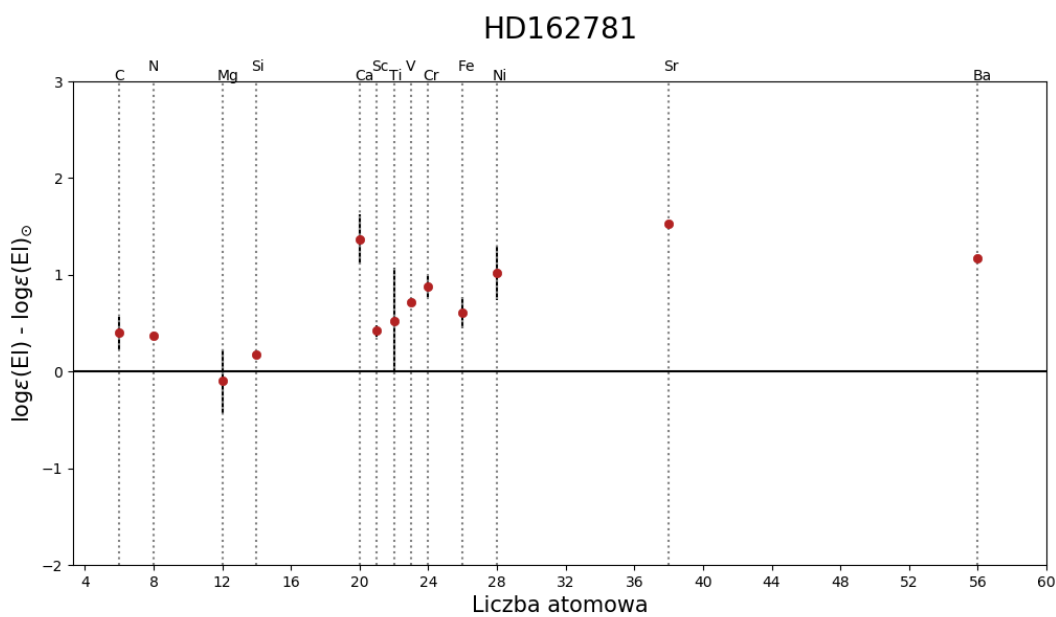


Rysunek 27: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162679 z obfitościami słonecznymi.

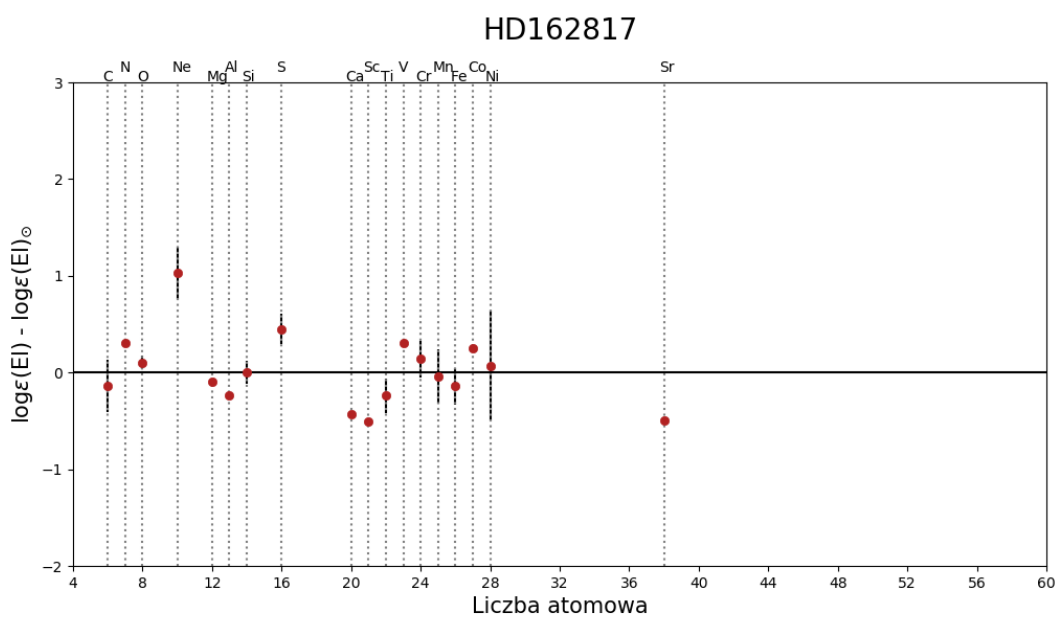




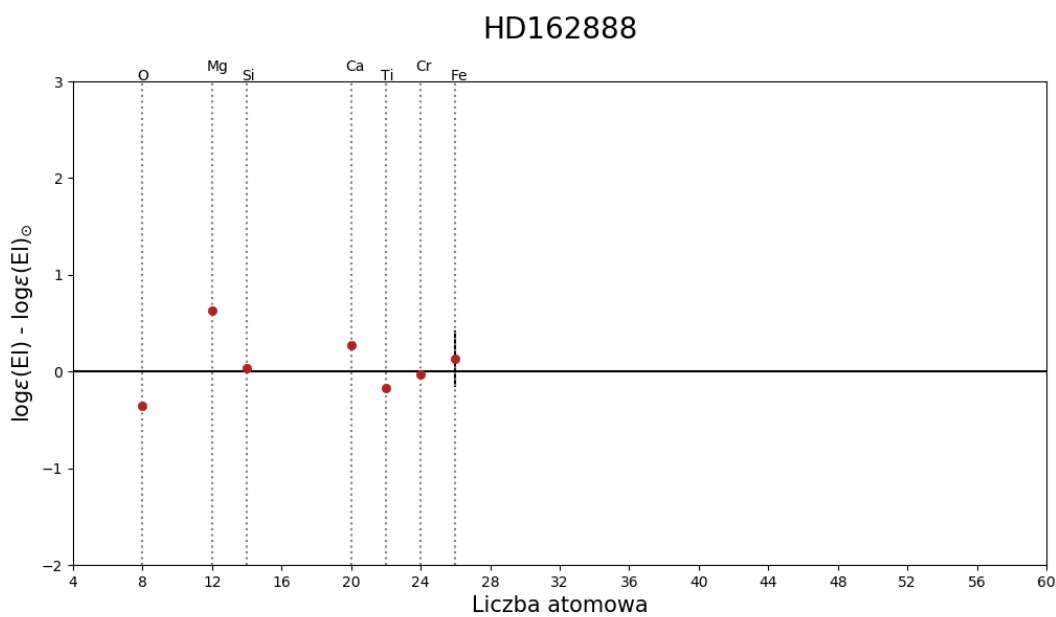
Rysunek 28: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162780 z obfitościami słonecznymi.



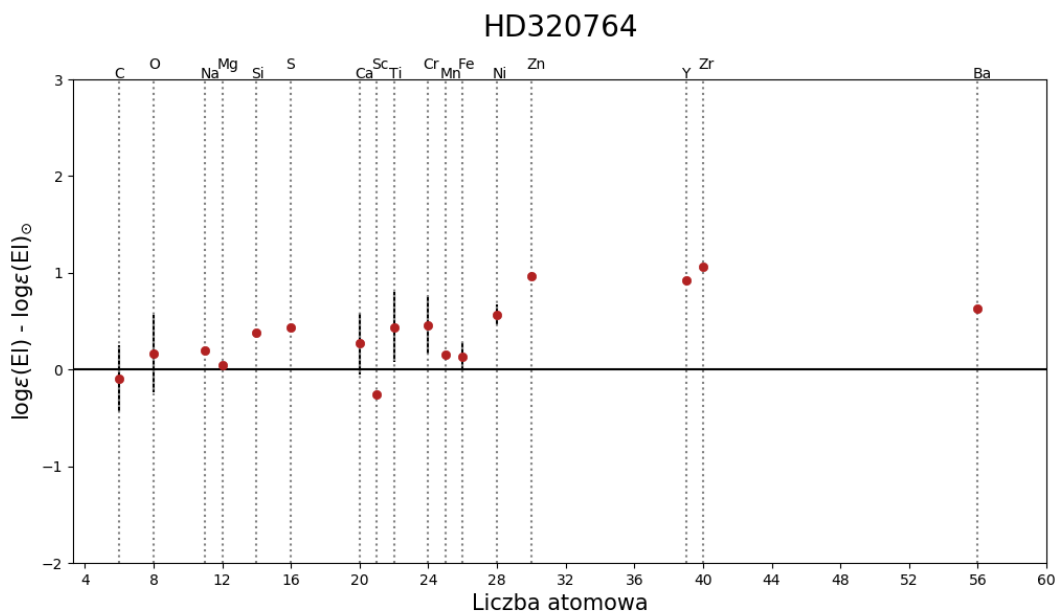
Rysunek 29: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162781 z obfitościami słonecznymi.



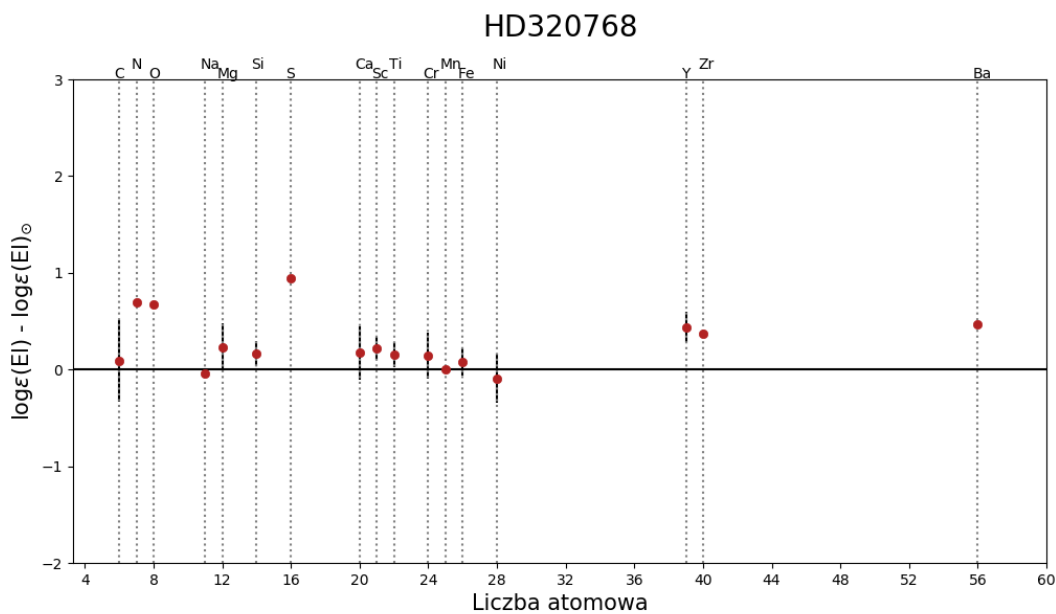
Rysunek 30: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162817 z obfitościami słonecznymi.



Rysunek 31: Porównanie obfitości pierwiastków HD 162888 z obfitościami słonecznymi.



Rysunek 32: Porównanie obfitości pierwiastków HD 320764 z obfitościami słonecznymi.



Rysunek 33: Porównanie obfitości pierwiastków HD 320768 z obfitościami słonecznymi.

Tablica 16: Otrzymane obfitości pierwiastków dla gwiazd gromady NGC 6475. Obfitości słoneczne zostały wyznaczone przez Asplund et al. (2009).

HD	$T_{\text{eff}}$ [K]	$\log g$	$v_{\text{mic}}$	$v \sin i$	C	N	O	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Ar	Ca	Sc	Ti	V	Cr
Słońce					8.43	7.83	8.69	7.93	6.24	7.60	6.45	7.51	5.41	7.12	6.40	6.34	3.15	4.95	3.93	5.64
162144	10000	3.6	2.0	180	8.55	8.27	8.84			7.56	6.80	7.59		7.00		6.91	3.21	4.71		5.82
				18	0.12	-	0.17			0.15	-	0.08		-		0.39	-	0.42		0.21
					(3)	(2)	(4)			(7)	(1)	(6)		(2)		(3)	(1)	(14)		(9)
162187	7300	3.70	3.00	223	8.55	8.30	9.07			7.62		7.63				6.00	2.34	4.54		5.19
				9	-	-	-			-		0.14				0.17	-	0.24		0.26
					(2)	(1)	(1)			(2)		(3)				(5)	(2)	(5)		(4)
162586	12500	4.10	2.00	28	8.49	8.13	8.76	8.39		7.67	6.17	7.43	5.56	7.29	6.79	6.20	3.02	5.07	4.31	5.80
				2	0.26	-	0.15	0.09		0.20	0.10	0.17	0.16	0.13	-	0.15	-	0.12	-	0.40
					(4)	(1)	(8)	(11)		(11)	(4)	(29)	(6)	(39)	(1)	(8)	(2)	(26)	(2)	(50)
162630	10600	3.9	1.00	51	8.77	8.65				7.18	6.09	7.13				5.31	2.11	4.44	3.60	5.44
				4	-	-				-	-	-				-	-	0.17	-	0.17
					(2)	(1)				(2)	(1)	(2)				(1)	(1)	(16)	(2)	(14)
162631	10000	4.0	2.00	182	8.25	8.35	8.91			7.58		7.73				7.31	3.63	5.40	4.59	5.88
				11	-	-	0.12			0.18		-				0.41	0.07	0.19	-	0.39
					(2)	(2)	(3)			(4)		(2)				(6)	(3)	(9)	(2)	(8)
162678	10000	3.6	1.50	40	8.13	8.79		8.22		7.53	6.13	7.52		7.41		6.27	2.84	4.83		5.67
				3	-	0.06		-		0.06		0.14		0.17		0.22	-	0.11		0.11
					(2)	(6)		(1)		(5)	(2)	(7)		(7)		(7)	(2)	(14)		(18)
162679	10600	3.8	2.00	41	8.46	7.26	8.87	8.17		7.58	6.06	7.53	6.20	7.22		6.28	3.02	5.09	4.64	5.93
				3	0.13	-	0.07	-		0.10	-	0.09	-	0.19		0.16	-	0.11	-	0.13
					(6)	(1)	(10)	(1)		(9)	(2)	(14)	(2)	(16)		(7)	(2)	(39)	(2)	(39)
162680	9500	4.2	1.5	101	8.26		8.32			7.26	1.08	7.57				6.23	3.03	4.70	4.67	5.90
				9	0.43		0.25			0.18	-	0.10				0.18	-	0.14	0.10	0.21
					(5)		(3)			(6)	(2)	(3)				(6)	(2)	(12)	(3)	(12)
162780	10100	3.5	3.00	272	9.09		8.96	9.04		7.50	6.89	7.93		8.53		5.21		4.71		5.96
				28	-		-	-		0.14	-	0.31		-		-		0.32		0.34
					(1)		(2)	(1)		(3)	(1)	(3)		(2)		(1)		(7)		(4)
162781	10100	3.9	1.00	201	8.83	9.06				7.50		7.68				7.71	3.57	5.47	4.65	6.52
				12	0.17	-				0.33		-				0.26	0.06	0.55	-	0.11
					(3)	(2)				(6)	(2)	(2)				(3)	(3)	(10)	(2)	(7)
162817	9600	3.4	2.00	77	8.29	8.14	8.79	8.96		7.50	6.21	7.51		7.57		5.91	2.64	4.71	4.24	5.78
				6	0.27	-	0.07	0.27		0.04	-	0.12		0.16		-	-	0.18	-	0.19
					(3)	(2)	(8)	(3)		(6)	(2)	(7)		(8)		(3)	(2)	(28)	(1)	(25)
162888	10100	3.5	1.50	260			8.34			8.23		7.54				6.61		4.78		5.61
				26			-			-		-				-		-		-
							(1)			(2)		(2)				(1)		(2)		(2)
320764	8900	4.3	1.5	260	8.34		8.85		6.44	7.65		7.89		7.56		6.61	2.89	5.39		6.10
				11	0.34		0.40		-	-		-		-		0.32	-	0.36		0.30
					(5)		(3)		(1)	(2)		(2)		(1)		(4)	(2)	(7)		(8)
320768	7700	4.3	2.00	138	8.52	8.53	9.36		6.20	7.83		7.67		8.06		6.51	3.37	5.10		5.78
				10	0.42	-	-	-	-	0.25		0.13		-		0.28	0.12	0.13		0.24
					(11)	(1)	(2)		(1)	(5)		(9)		(2)		(15)	(6)	(13)		(12)

Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Sr	Y	Zr	Ba
5.43	7.50	4.99	6.22	4.56	2.87	2.21	2.58	2.18
	7.39		6.76		2.16	3.22		
	0.23 (32)		- (2)		- (1)	- (1)		
	7.08		5.19			1.74		2.09
	0.13 (19)		- (2)			- (1)		- (2)
5.34	7.35	4.93	6.22	4.81				
- (2)	0.15 (171)	- (2)	0.13 (18)	- (1)				
	7.17		6.45		3.06	2.53		2.72
	0.09 (3)		- (2)		- (1)	- (1)		- (1)
	7.78		6.93		4.91		4.25	2.58
	0.14 (22)		- (2)		- (1)		- (1)	- (2)
4.97	7.43		6.24					2.30
- (1)	0.08 (83)		0.29 (5)					- (1)
5.41	7.48		6.54		2.86			2.62
0.07 (5)	0.12 (147)		0.38 (17)		- (1)			- (2)
5.75	7.52		6.54	4.83	2.80	2.75	3.08	2.75
- (2)	0.15 (33)		0.25 (12)	- (1)	- (1)	- (1)	- (1)	- (2)
	7.43				2.73			
	0.27 (15)				- (1)			
	8.11		7.24					3.35
	0.16 (20)		0.28 (5)		4.40 (1)			- (2)
5.39	7.36	5.24	6.29					
0.28 (3)	0.19 (116)	- (1)	0.57 (9)		2.37 (1)			
	7.63							
	0.29 (12)							
5.58	7.63		6.79	5.53		3.13	3.64	2.81
- (1)	0.15 (16)		0.10 (4)	- (1)		- (2)	- (1)	- (2)
5.43	7.58		6.13			2.65	2.95	2.65
- (2)	0.14 (41)		0.25 (13)			0.16 (3)	- (1)	- (2)

## 8 Podsumowanie

Dla 32 gwiazd gromady NGC 6475 (M7) obserwowanych w projekcie UVES POP zebrano informacje dotyczące ich podwójności oraz przynależności do gromady. Zrobiono także przegląd literatury i zestawiono otrzymane dotychczas wyznaczenia wieku oraz odległości do gromady.

Do dalszej analizy wybrano obiekty, które zostały sklasyfikowane jako gwiazdy typu B lub A. Ich widma zostały unormowane oraz wyznaczono wstępne parametry atmosferyczne ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ ,  $v \sin i$ ) przy użyciu programu HANDY. Następnie przeprowadzono klasyfikację widmową, najpierw za pomocą programu MKCLASS, a następnie wizualnie. Wyniki klasyfikacji skonfrontowano z literaturą. Spośród 22 badanych gwiazd, w widmach 9 obiektów zauważono osobliwości chemiczne. Dla czterech gwiazd nie wyznaczono typu widmowego ze względu na brak widma w wymaganym zakresie długości fali.

Jednym z celów pracy było wyznaczenie parametrów atmosferycznych gwiazd gromady NGC 6475. Na tym etapie badań skupiono się na 14 gwiazdach, gdyż są one pojedynczymi gwiazdami lub w ich widmach nie zaobserwowano linii widmowych drugiego składnika. Początkowo wyliczono temperaturę efektywną oraz logarytm przyspieszenia grawitacyjnego za pomocą fotometrii Strömgrena. Wykorzystano w tym celu programy UVBYBETA oraz TEF-FLOGG. Wprowadzono poprawki temperatury efektywnej dla gwiazd chemicznie osobliwych. Kolejny sposób wyznaczenia parametrów atmosferycznych polegał na wykorzystaniu wskaźników fotometrii genewskiej. Korzystano z programu CALIB. Parametry obliczono dla różnych wartości metaliczności i poczerwienienia, a wyniki przedyskutowano. Także wprowadzono poprawki do  $T_{\text{eff}}$  konieczne dla gwiazd CP. Porównano ze sobą wartości wyznaczone tymi dwoma sposobami i wyznaczono ostateczne wartości parametrów dla każdej gwiazdy jako średnie wartości uzyskane z fotometrii Strömgrena i z fotometrii genewskiej.

Mając wyznaczone parametry atmosferyczne, wyliczono skład chemiczny. Użyta w tym celu metoda to synteza widma. Widma zostały wcześniej podzielone na krótsze fragmenty za pomocą oprogramowania HANDY-extended. Obliczenia obfitości pierwiastków z tych fragmentów dokonano za pomocą programu fitsun oraz programów ATLAS9 i SYNTHE przy założeniu LTE. Poprzez dopasowywanie widm syntetycznych do obserwowanych w wybranych zakresach widma, wyznaczone zostały obfitości pierwiastków chemicznych i jednocześnie wartości prędkości rotacji. Następnie dla każdej gwiazdy obliczono średnie obfitości wyznaczonych pierwiastków i porównano z wartościami słonecznymi. Dokonano także porównań z wartościami uzyskanymi we wcześniejszych publikacjach. W przypadku ośmiu gwiazd w literaturze nie znaleziono informacji o przeprowadzonej analizie składu chemicznego. Wyniki skonfrontowano z wykonaną wcześniej klasyfikacją widmową. Większość badanych gwiazd została uznana za gwiazdy chemicznie normalne.

Przyszłe badania gromady NGC 6475 to przede wszystkim wyznaczenie parametrów atmosferycznych gwiazd na podstawie linii serii Balmera, a także linii żelaza Fe I i Fe II. Przeanalizowane zostaną również gwiazdy o późniejszych typach widmowych. Następnie przeprowadzona zostanie analiza zmienności tych gwiazd gromady NGC 6475, dla których dostępne są dobrej jakości dane z satelity TESS<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup><https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite>

# Literatura

- Abt, H. A. (1975). *PASP*, 87:417–419.
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., and Scott, P. (2009). *ARAA*, 47(1):481–522.
- Bagnulo, S., Jehin, E., Ledoux, C., Cabanac, R., Melo, C., Gilmozzi, R., and ESO Paranal Science Operations Team (2003). *The Messenger*, 114:10–14.
- Balona, L. A. and Shobbrook, R. R. (1984). *MNRAS*, 211:375–390.
- Cannon, A. J. and Pickering, E. C. (1993). VizieR Online Data Catalog: Henry Draper Catalogue and Extension (Cannon+ 1918-1924; ADC 1989). *VizieR Online Data Catalog*, page III/135A.
- Cantat-Gaudin, T., Jordi, C., Vallenari, A., Bragaglia, A., Balaguer-Núñez, L., Soubiran, C., Bossini, D., Moitinho, A., Castro-Ginard, A., Krone-Martins, A., Casamiquela, L., Sordo, R., and Carrera, R. (2018). *AAP*, 618:A93.
- Catalano, F. A. and Renson, P. (1998). *AAPS*, 127:421–422.
- Cramer, N. (1999). *NAR*, 43(5):343–387.
- Crawford, D. L. (1975). *AJ*, 80:955–971.
- Crawford, D. L. (1978). *AJ*, 83:48–63.
- Crawford, D. L. (1979). *AJ*, 84:1858–1865.
- Folsom, C. P., Wade, G. A., Bagnulo, S., and Land street, J. D. (2007). *MNRAS*, 376(1):361–370.
- Gaia Collaboration (2018). *AAP*, 616:A10.
- Gray, D. F. (2005). *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*. Cambridge University Press, 3 edition.
- Gray, R. O. (1997). In Philip, A. G. D., Liebert, J., Saffer, R., and Hayes, D. S., editors, *The Third Conference on Faint Blue Stars*, page 237.
- Gray, R. O. and Corbally, C. J. (2014). *AJ*, 147(4):80.
- Hilditch, R. W., Hill, G., and Barnes, J. V. (1983). *MNRAS*, 204:241–247.
- Houk, N. (1982). *Michigan Catalogue of Two-dimensional Spectral Types for the HD stars. Volume-3. Declinations -40-f0 to -26-f0*.
- Hubeny, I. (1988). *Computer Physics Communications*, 52(1):103–132.
- Hubeny, I. and Lanz, T. (2003). In Hubeny, I., Mihalas, D., and Werner, K., editors, *Stellar Atmosphere Modeling*, volume 288 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 51.

- Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Röser, S., Schilbach, E., and Scholz, R. D. (2005). *AAP*, 438(3):1163–1173.
- Kubiak, M. (1994). *Gwiazdy i materia międzygwiazdowa*. Wydaw. Naukowe PWN.
- Kunzli, M., North, P., Kurucz, R. L., and Nicolet, B. (1997). *AAPS*, 122:51–77.
- Kurucz, R. L. (2005). *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 8:14.
- Lanz, T. and Hubeny, I. (2003a). *APJS*, 146(2):417–441.
- Lanz, T. and Hubeny, I. (2003b). In Hubeny, I., Mihalas, D., and Werner, K., editors, *Stellar Atmosphere Modeling*, volume 288 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 117.
- Loktin, A. V., Gerasimenko, T. P., and Malysheva, L. K. (2001). *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 20(4):607–633.
- Manfroid, J., Burnet, M., and Renson, P. (1998). *AAPS*, 127:201–206.
- Mermilliod, J. C. (1981a). *AAPS*, 44:467–500.
- Mermilliod, J. C. (1981b). *AAP*, 97:235–244.
- Mermilliod, J. C., Mayor, M., and Udry, S. (2008). *AAP*, 485(1):303–314.
- Mermilliod, J. C., Mayor, M., and Udry, S. (2009). *AAP*, 498(3):949–960.
- Meynet, G., Mermilliod, J. C., and Maeder, A. (1993). *AAPS*, 98:477–504.
- Moon, T. (1985a). *AAPS*, 117(2):261–270.
- Moon, T. (1985b). *Stellar Parameters from Stroemgren Photometry: Fortran Programs*. Number 78 in University of London. Observatory Communications.
- Morgan, W. W., Keenan, P. C., and Kellman, E. (1943).
- Napiwotzki, R., Schoenberger, D., and Wenske, V. (1993). *AAP*, 268:653–666.
- Nesterov, V. V., Kuzmin, A. V., Ashimbaeva, N. T., Volchkov, A. A., Röser, S., and Bastian, U. (1995). *AAPS*, 110:367.
- Netopil, M., Paunzen, E., Heiter, U., and Soubiran, C. (2016). *AAP*, 585:A150.
- Netopil, M., Paunzen, E., Maitzen, H. M., North, P., and Hubrig, S. (2008). *AAP*, 491(2):545–554.
- Niemczura, E., Morel, T., and Aerts, C. (2009). *AAP*, 506(1):213–233.
- Niemczura, E., Polńska, M., Murphy, S. J., Smalley, B., Kołaczowski, Z., Jessen-Hansen, J., Uytterhoeven, K., Lykke, J. M., Triviño Hage, A., and Michalska, G. (2017). *MNRAS*, 470(3):2870–2889.



- Olsen, E. H. (1984). *AAPS*, 57:443–466.
- Paunzen, E. (2015). *AAP*, 580:A23.
- Paunzen, E., Duffee, B., Heiter, U., Kuschnig, R., and Weiss, W. W. (2001). *AAP*, 373:625–632.
- Pourbaix, D., Tokovinin, A. A., Batten, A. H., Fekel, F. C., Hartkopf, W. I., Levato, H., Morrell, N. I., Torres, G., and Udry, S. (2004). *AAP*, 424:727–732.
- Reddy, A. B. S. and Lambert, D. L. (2019). *MNRAS*, 485(3):3623–3641.
- Renson, P. (1990). *Bulletin d’Information du Centre de Donnees Stellaires*, 38:151.
- Renson, P., Gerbaldi, M., and Catalano, F. A. (1991). *AAPS*, 89:429.
- Renson, P. and Manfroid, J. (2009). *AAP*, 498(3):961–966.
- Robichon, N., Arenou, F., Mermilliod, J. C., and Turon, C. (1999). *AAP*, 345:471–484.
- Robichon, N., Arenou, F., Turon, C., Mermilliod, J. C., and Lebreton, Y. (1997). In Bonnet, R. M., Høg, E., Bernacca, P. L., Emiliani, L., Blaauw, A., Turon, C., Kovalevsky, J., Lindegren, L., Hassan, H., Bouffard, M., Strim, B., Heger, D., Perryman, M. A. C., and Woltjer, L., editors, *Hipparcos - Venice ’97*, volume 402 of *ESA Special Publication*, pages 567–570.
- Saffe, C. and Levato, H. (2014). *AAP*, 562:A128.
- Silaj, J. and Landstreet, J. D. (2014). *AAP*, 566:A132.
- Strömgren, B. (1966). *ARAA*, 4:433.
- Stütz, C., Bagnulo, S., Jehin, E., Ledoux, C., Cabanac, R., Melo, C., and Smoker, J. V. (2006). *AAP*, 451(1):285–291.
- Tokovinin, A., Mason, B. D., and Hartkopf, W. I. (2010). *AJ*, 139(2):743–756.
- Villanova, S., Carraro, G., and Saviane, I. (2009). *Astronomy & Astrophysics*, 504(3):845–852.
- Worley, C. E. and Heintz, W. D. (1983). *Publications of the U.S. Naval Observatory Second Series*, 24:1.
- Yen, S. X., Reffert, S., Schilbach, E., Röser, S., Kharchenko, N. V., and Piskunov, A. E. (2018). *AAP*, 615:A12.
- Zhang, E. H. (1983). *AJ*, 88:825–834.