# Analiza ruchów własnych gwiazd w polach bliskich gromad kulistych

Kamil Złoczewski

Rozprawa doktorska z zakresu astrofizyki napisana pod kierownictwem prof. dra hab. Janusza Kałużnego

Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN, Warszawa

17 stycznia 2012

Rozprawę dedykuje mojej żonie Adriannie Złoczewskiej

# Podziękowania

Dziękuję za *zarażenie* pasją astronomii dr Markowi Mućkowi, zaś mgr Andrzejowi Pilskiemu – kierownikowi planetarium we Fromborku – za możliwość oglądania gwiazd z fromborskiego obserwatorium. Dziękuje nauczycielom i profesorom, którzy wspierali moją pasję w liceum ogólnokształcącym i na studiach. Podziękowania należą się również dr hab. Arkadiuszowi Olechowi za owocną współpracę naukową zarówno na polu astronomii miłośniczej (Pracownia Komet i Meteorów) oraz postawienia pierwszych kroków w astronomii zawodowej. Za wspaniałą atmosferę towarzyską dziękuję uczestnikom studiów doktoranckich Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika PAN zarówno tym studiującym w Warszawie jak i w Toruniu. Dziękuję pracownikom CAMK PAN w Warszawie za wszelką pomoc jaką uzyskałem w trakcie pracy i pobytu w hotelu asystenckim. Zarówno pracownikom naukowym, dyrekcji, ale również pracownikom sekretariatu, administracji, księgowości, ośrodka komputerowego, biblioteki oraz portierni. Podziękowania, za współną pracę i naukę kieruję także do moich bliskich współpracowników naukowych: mgr Radosława Poleskiego, prof. Michała Różyczki, dr Wojciecha Krzemińskiego, dr Beaty Mazur, dr Wojciecha Pycha, dr Iana Thompsona (Carnegie Observatories, Pasadena USA) i dr Krzysztofa Hełminiaka. Dziękuję mojemu promotorowi prof. Januszowi Kałużnemu za owocną współpracę i opiekę nad moją pracą naukową.

Za okazałą wyrozumiałość i pomoc dziękuję swojej żonie Adriannie Złoczewskiej.

# Spis treści

Sp	is rys	unków		14
Sp	is tab	lic		16
1	Wst	ęp		17
	1.1	Ruchy	własne gwiazd	17
	1.2	Astron	netria gromad gwiazdowych	20
	1.3	Astron	netria względna z użyciem detektorów CCD	22
		1.3.1	Transformacja lokalna	22
		1.3.2	Dystorsja pola	22
		1.3.3	Koherencja obrazu	23
		1.3.4	Różnicowa refrakcja atmosferyczna	24
		1.3.5	Detekcja ruchów własnych z użyciem metody odejmowania obrazów	25
	1.4	Cel pra	cy	26
	1.5	Bibliog	grafia – Rozdział 1	27
2	Dan	e observ	vacyjne, przedstawienie analizowanych gromad i metody redukcji danych	29
	2.1	Dane o	bserwacyjne	29
	2.2	Analize	owane gromady	29
		2.2.1	NGC 3201	31
		2.2.2	Messier 4	31
		2.2.3	Messier 12	32
		2.2.4	NGC 6362	32
		2.2.5	Messier 22	32
		2.2.6	NGC 6752	33
		2.2.7	Messier 55	33
	2.3	Opis de	okonywanych pomiarów	34
		2.3.1	Wybór i wstępna obróbka obrazów	34
		2.3.2	Fotometria i pomiar pozycji gwiazd	45
		2.3.3	Astrometria względna	45
		2.3.4	Przynależność gwiazd do gromady	47
		2.3.5	Jasności standardowe gwiazd	48
		2.3.6	Selekcja gwiazd pod względem jakości fotometrii	49
	2.4	Bibliog	grafia – Rozdział 2	50

Rezu	ultaty i ich dyskusja	53
3.1	Pole testowe – gromada $\omega$ Centauri	53
	3.1.1 Dane, metody i rezultaty	53
	3.1.2 Dyskusja	53
3.2	Gromada NGC 3201	57
	3.2.1 Rezultaty	57
	3.2.2 Dyskusja	59
3.3	Gromada Messier 4	68
	3.3.1 Rezultaty	68
	3.3.2 Dyskusja	70
3.4	Gromada Messier 12	78
	3.4.1 Rezultaty	78
	3.4.2 Dyskusja	79
3.5	Gromada NGC 6362	88
	3.5.1 Rezultaty	88
	3.5.2 Dyskusja	9(
3.6	Gromada Messier 22	98
	3.6.1 Rezultaty	98
	3.6.2 Dyskusja	99
3.7	Gromada NGC 6752	108
	3.7.1 Rezultaty	108
	3.7.2 Dyskusja	109
3.8	Gromada Messier 55	116
	3.8.1 Rezultaty	116
	3.8.2 Dyskusja	119
3.9	Katalog elektroniczny	120
3.10	Bibliografia – Rozdział 3	126

# 4 Podsumowanie

129

# Spis rysunków

1.1	Rozkład wektora prędkości gwiazdy.	17
1.2	Pomiar względny pozycji na obrazach wykonanych w dwóch momentach i różnych	
	orientacjach CCD. Źródło: Anderson i in. (2006)	23
1.3	Mapa poprawek związanych z dystorsją pola dla instrumentu Wide Field Imager,	
	kamery składającej się z 8 detektorów CCD. Kamera używana jest wraz z teleskopem	
	MPG/ESO 2.2-m, obserwatorium La Silla. Dla czytelności poprawki powiększono	
	100 razy. Źródło: Anderson i in. (2006)	24
1.4	Rysunek przedstawia fragment obrazu residualnego w polu gromady $\omega$ Centauri uzy-	
	skanego na podstawie dwóch obrazów wykonanych w odstępie 9 lat (1999 i 2008	
	r.). Zaznaczona została gwiazda HPM, gwiazda zmienna (VAR) oraz gwiazda, która	
	przesaturowała detektor (SAT). Źródło: praca własna	25
2.1	Analizowane obszary w gromadzie NGC 3201 zaznaczone na tle obrazu Digitized	
	Sky Survey (DSS) w filtrze R. Pola: NGC 3201-F1 i NGC 3201-F2. Szerokość obrazu	
	to 15 arcmin	41
2.2	Analizowany obszary w gromadzie M 4, pola M4-F1 i M4-F2 na tle obrazu DSS o	
	szerokości 15 arcmin.	41
2.3	Analizowany obszar w gromadzie M 12, pole M12-F1 na tle obrazu DSS o szerokości	
	15 arcmin	42
2.4	Analizowany obszar w gromadzie NGC 6362, pole NGC 6362-F1 na tle obrazu DSS	
	o szerokości 15 arcmin	42
2.5	Analizowany obszar w gromadzie, M 22, pole M22-F1 na tle obrazu DSS o szeroko-	
	ści 15 arcmin	43
2.6	Analizowany obszar w gromadzie NGC 6752, pole NGC 6752-F1 na tle obrazu DSS	
	o szerokości 15 arcmin	43
2.7	Analizowane obszary w gromadzie M 55, pola: M55-F1, M55-F2 na tle obrazu DSS	
	o szerokości 15 arcmin. Pola M55-F3 i M55-F4 nie są istotne	44
2.8	Przykład wyznaczenia ruchu własnego gwiazdy.	46
3.1	Wykresy ruchów własnych gwiazd dla pola testowego w polu gromady $\omega$ Cen. Po le-	
	wej wyznaczenia Bellini i in. (2009), zaś po prawej wyznaczenia PM dla tych samych	
	gwiazd w tej pracy.	55
3.2	Różnica wartości ruchów własnych tych samych gwiazd ( $\mu_{\alpha} cos\delta, \mu_{\delta}$ ) między pomia-	
	rami Bellini i in. (2009) oraz wykonanymi w tej pracy. Gromada $\omega$ Cen	56
3.3	Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady NGC 3201. Gwiazdy których war-	
	tości $\mu < \mu_l = 3$ mas/yr oznaczono punktami, zaś gwiazdy $\mu \ge \mu_l$ większymi punktami.	57

# SPIS RYSUNKÓW

3.4	Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w funkcji ich jasności dla gromady NGC3201.	58
3.5	Różnica ruchów własnych gwiazd zmierzonych w polach NGC 3201-F1 i NGC 3201- F2	59
3.6	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada NGC 3201.	59
3.7	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada NGC 3201	60
3.8	Rozkład $\mu_{\alpha} cos\delta$ oraz $\mu_{\delta}$ gwiazd w gromadzie NGC 3201 dla dwóch skrajnych (z sześciu) przedziałów jasności: V = 13-17 i V = 21-22. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 1.34 mas/yr (V = 13-17) oraz 2.46 mas/yr (V = 21-22).	61
3.9	Diagramy barwa-jasność $V/(V-I)$ dla gromady NGC 3201. Po lewej diagram zawie- rający gwiazdy dla, których zmierzono $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czer- wone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).	64
3.10	Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie $V/(V - I)$ . Gromada NGC 3201. Trójkąty – zmienne typu W UMa, okręgi – pulsujące typu SX Phe, romby – RR Lyr, czarnymi kołami – gwiazdy pulsujące, odwrócone trójkąty – gwiazdy z modulacją modulację lub układy ellipsoidalne, przekreślenia – obiekty, które nie przynależą do gromady na podstawie wyznaczonych w pracy ruchów własnych, kwadraty – układy podwójne rozdzielone (EA), które dodatkowo pazwano	65
3.11	Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie $V/(V - I)$ w obszarze gwiazd BSS oraz TO. Większe punkty oznaczają gwiazdy kandydatki na blue/yellow stragglers. Gromada NGC 3201	66
3.12	Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie $V/(V - I)$ . Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono większymi punktami, zaś po stronie czerwonej od ciągu głównego i podolbrzymów zaznaczno rombami. Gromada NGC 3201.	67
3.13	Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady M 4	68
3.14	Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada M 4	69
3.15	Różnica ruchów własnych zmierzonych w polach F1 i F2. Gromada M 4	69
3.16	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności.	
3 17	Gromada M 4	70
5.17	od centrum gromady. Gromada M 4	71

3.18	Rozkład $\mu_{\alpha} cos\delta$ oraz $\mu_{\delta}$ gwiazd w gromadzie Messier 4 dla dwóch skrajnych (z ogó- kom pieciu) przedzielów jesności V = 12.7.17 i V = 20.22. Okresi w przywym popelu	
	tem pięciu) przedziałów jasności $v = 12.7 \cdot 171$ v = 20-22. Okręgi w prawym panelu wyznaczona ca jako 2005 równa 2.41 mas/wr (N = 12.7.17) oraz 2.10 mas/wr (N =	
	wyznaczone są jako $3 \times 5$ fowne 2.41 mas/yr (v = 12.7-17) oraz 5.10 mas/yr (v = 20.22)	70
	20-22)	12
3.19	Diagramy barwa-jasność $V/(B-V)$ dla gromady Messier 4. Po lewej diagram zawie-	
	rający gwiazdy dla, których zmierzono $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czer-	
	wone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do	
	gromady (mem=1 lub mem=2)	74
3.20	Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie $V/(B - V)$ . Trójkąty – gwiazdy zaćmie-	
	niowe (W UMa i EA), romby – inne gwiazdy zmienne, przekreślenie – gwiazda nie	
	przynależna do gromady. Gromada Messier 4	75
3.21	Obszar gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie $V/(B-V)$ . Przedstawiono jedy-	
	nie gwiazdy należące do gromady (mem=1 lub mem=2). Większe punkty oznaczają	
	gwiazdy kandydatki BSS i yellow stragglers. Gromada Messier 4	76
3.22	Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2)	
	na wykresie $V/(V-I)$ . Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego i BSS zazna-	
	czono większymi punktami, zaś gwiazdę leżącą po stronie czerwonej od podolbrzy-	
	mów zaznaczno rombem. Gromada Messier 4	77
3.23	Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady M 12	78
3.24	Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada M 12	79
3.25	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności.	
	Gromada M 12	80
3.26	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości	
	od centrum gromady. Gromada M 12.	80
3.27	Rozkład $\mu_{\alpha} cos\delta$ oraz $\mu_{\delta}$ gwiazd w gromadzie Messier 12 w dwóch (z sześciu) prze-	
	działów jasności V = 13.4-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są	
	jako 3×S równe 1.85 mas/yr (V = 13.4-17) oraz 2.60 mas/yr (V = 20-21)	81
3.28	Diagramy barwa-jasność $V/(B - V)$ dla gromady Messier 12. Po lewej diagram za-	
	wierający gwiazdy dla, których zmierzono $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących	
	(czerwone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przyna-	
	leżne do gromady (mem=1 lub mem=2)	83
3.29	Gwiazdy zmienne zaznaczono trójkątami na wykresie $V/(B-V)$ . Zaznaczono jedynie	
	gwiazdy należące do gromady (mem=1 i mem=2). Gromada Messier 12	85
3.30	Obszar gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie $V/(B - V)$ . Większe punkty	
	oznaczają gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers. Gromada Messier 12	86

3.31	Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2)	
	na wykresie $V/(B - V)$ . Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono	
	większymi punktami, zaś gwiazdy leżące po stronie czerwonej ciągu głównego i od	
	podolbrzymów zaznaczno rombami. Gromada Messier 12	87
3.32	Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady NGC 6362	88
3.33	Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada NGC 6362	89
3.34	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada NGC 6362.	90
3.35	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada NGC 6362.	90
3.36	Rozkład $\mu_{\alpha} cos\delta$ oraz $\mu_{\delta}$ gwiazd w gromadzie NGC 6362 dla dwóch (z sześciu) prze- działów jasności V = 13.2-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 2.09 mas/yr (V = 12.7-17) oraz 4.63 mas/yr (V = 20-21)	92
3.37	Diagramy barwa-jasność $V/(B-V)$ dla gromady NGC 6362. Po lewej diagram zawie- rający gwiazdy dla, których zmierzono $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czer- wone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).	93
3.38	Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie $V/(B - V)$ . Gromada NGC 6362. Ozna- czenia: romby – RR Lyr, okręgi – inne gwiazdy pulsujące, kwadraty – gwiazdy za- ćmieniowe rozdzielone, pusty trójkąt – W UMa, odwrócone trójkąty – inne gwiazdy zmienne.	95
3.39	CMD $V/(B - V)$ dla obszaru gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie. Większe	
	punkty oznaczają gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers. Gromada NGC 6362.	96
3.40	Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie $V/(B - V)$ dla V<17.0. Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono większymi punktami, zaś gwiazdy leżące po stronie czerwonej ciągu głównego i od podolbrzymów zaznaczno rombami. Gromada NGC 6362.	97
3.41	Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady Messier 22. Gwiazdy których war-	
	tości $\mu < \mu_l = 4$ mas/yr oznaczono punktami, zaś gwiazdy $\mu \geq \mu_l$ większymi punktami.	98
3.42	Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w funkcji ich jasności dla gromady Mes- sier 22	99
3.43	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada Messier 22.	100
3.44	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada Messier 22.	100

3.45	Rozkład $\mu_{\alpha} cos\delta$ oraz $\mu_{\delta}$ gwiazd w gromadzie Messier 22 dla przedziałów jasności V
	= 12.3-17 i V = 19-20.7. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako $3 \times S$ równe
	2.47 mas/yr (V = 12.3-17) oraz 2.78 mas/yr (V = 19-20.7). $\dots \dots \dots$
3.46	Diagramy barwa-jasność $V/(V-I)$ dla gromady Messier 22. Po lewej diagram zawie-
	rający gwiazdy dla, których zmierzono $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czer-
	wone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do
	gromady (mem=1 lub mem=2)
3.47	Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie $V/(V - I)$ . Gromada Messier 22. trój-
	kąty – W UMa (EW), kwadraty – pozostałe gwiazdy zaćmieniowe, okręgi – gwiazdy
	pulsujące SX Phe, romby - RR Lyr i pozostałe gwiazdy pulsujące, pełne trójkąty -
	nieznany typ zmienności, przekreślone – gwiazdy nieprzynależne do gromady. $\ $ . $\ $ . 105
3.48	CMD $V/(V - I)$ dla obszaru gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie. Większe
	punkty oznaczają gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers. Gromada Messier 22. . $106$
3.49	Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2)
	na wykresie $V/(V - I)$ . Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono
	większymi punktami, zaś gwiazdy leżące po stronie czerwonej ciągu głównego za-
	znaczno rombami. Gromada Messier 22
3.50	Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady NGC 6752. Gwiazdy których war-
	tości $\mu < \mu_l = 3$ mas/yr oznaczono punktami, zaś gwiazd y $\mu \geq \mu_l$ większymi punktami. 108
3.51	Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w funkcji ich jasności dla gromady NGC
	6752
3.52	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności.
	Gromada NGC 6752
3.53	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości
	od centrum gromady. Gromada NGC 6752
3.54	Rozkład $\mu_{\alpha} cos\delta$ oraz $\mu_{\delta}$ gwiazd w gromadzie NGC 6752 dla dwóch (z pięciu) prze-
	działów jasności V = 12.6-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są
	jako 3×S równe 1.67 mas/yr (V = 12.6-17) oraz 2.78 mas/yr (V = 20-21) 111
3.55	Diagramy barwa-jasność $V/(B-V)$ dla gromady NGC 6752. Po lewej diagram zawie-
	rający gwiazdy dla, których zmierzono $\mu$ należących i nie należących do gromady. Po
	prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub
	mem=2)
3.56	Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie $V/(B-V)$ . Gromada NGC 6752. Kwadrat
	– układ EA, odwrócone trójkąty – zmienne na HB i EHB, okręgi – gwiazdy typu SX
	Phe, biały trójkąt – układ EW, ciemne koła – inne gwiazdy zmienne, przekreślenia –
	gwiazdy zmienne nie należące do gromady na podstawie $\mu$ 114

3.57	CMD $V/(B - V)$ dla obszaru gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie. większe	
	punkty – gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers, romby – gwiazdy kandydatki	
	red stragglers. Gromada NGC 6752	115
3.58	Ilość gwiazd w okolicach ciągu głównego na CMD w kolejnych przedziałach jasności	
	od lewej do prawej. Gromada NGC 6752.	115
3.59	Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady M 55	116
3.60	Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada M 55	117
3.61	Różnica ruchów własnych gwiazd zmierzonych w polach M55-F1 i M55-F2. Gro-	
	mada M 55	118
3.62	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności.	
	Gromada M 55	119
3.63	Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości	
	od centrum gromady. Gromada M 55	120
3.64	Rozkład $\mu_{\alpha} cos\delta$ oraz $\mu_{\delta}$ gwiazd w gromadzie M 55 dla przedziałów jasności V =	
	12.7-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako $3 \times S$ równe 1.34	
	mas/yr (V = 13-17) oraz 2.76 mas/yr (V = 20-21)	122
3.65	Wyznaczenie względnych ( $\mu_{\alpha} cos\delta$ , $\mu_{\delta}$ ) dla 10 galaktyk zmierzonych w tle gromady	
	M 55	123
3.66	Lewy panel - CMD $V/(B - V)$ gromady M 55 na podstawie fotometrii z pracy JK10.	
	Gwiazdy zaznaczone kwadratami najpewniej należą do galaktyki Sgr dSph. Prawy	
	panel - CMD z gwiazdami najprawodpodobniej należącymi do gromady (mem=1	
	lub mem=2). Większymi punktami oznaczono blue/yellow/red stragglers	124
3.67	CMD $V/(B - V)$ w okolicach punktu odejścia od ciągu głównego oraz obszaru blue	
	stragglers. Okręgami zaznaczono gwiazdy zmienne pulsujące typu SX Phe, kwadra-	
	tami gwiazdy zaćmieniowe. Na rysunku wykreślono jedynie gwiazdy najpewniej na-	
	leżące do gromady (mem=1 lub mem=2)	125
3.68	Ilość gwiazd w okolicach ciągu głównego na CMD w kolejnych przedziałach jasności	
	od lewej do prawej. Gromada Messier 55	125

# Spis tablic

1.1	Typowa dokładność astrometrii – jednego pomiaru – uzyskiwana różnymi technikami.	19
2.1	Podstawowe informacje o analizowanych gromadach (Harris 1996).	30
2.2	Statystyki odległości zenitalnych obrazów, które posłużyły do obliczenia obrazów	
	uśrednionych. <z> oznacza średnią masę powietrza obrazów składowych obrazu</z>	
	uśrednionego.	34
2.3	Uśrednione obrazy dla gromady NGC 3201. Obrazy referencyjne NGC 3201-F1 =	
	c_02, NGC 3201-F2 = c_32. $\Delta T$ = <hjd-2450000.0></hjd-2450000.0>	36
2.4	Uśrednione obrazy dla gromady M 4. Obrazy referencyjne M4-F1 = cb_1, M4-F2 =	
	brl_10. $\Delta T = \langle HJD-2450000.0 \rangle$	37
2.5	Uśrednione obrazy dla gromady M 12. Obraz referencyjny M 12-F1 = c_19. $\Delta T$ =	
	<hjd-2450000.0></hjd-2450000.0>	38
2.6	Uśrednione obrazy dla gromady NGC 6362. Obraz referencyjny NGC 6362-F1 =	
	$c_10. \Delta T = \langle HJD-2450000.0 \rangle$ .	38
2.7	Uśrednione obrazy dla gromady M 22. Obraz referencyjny M22-F1 = c_11. $\Delta T$ =	
	<hjd-2450000.0></hjd-2450000.0>	39
2.8	Uśrednione obrazy dla gromady NGC 6752. Obraz referencyjny NGC 6752-F1 =	
	$c_05. \Delta T = \langle HJD-2450000.0 \rangle$ .	39
2.9	Uśrednione obrazy dla gromady M 55. Obrazy referencyjne M55-F1 = F1-1997,	
	$M55-F2 = F2-1999. \Delta T = \langle HJD-2450000.0 \rangle$	40
2.10	Informacje dotyczące jakości wyznaczenia współrzędnych równonocnych. Gdzie N	
	– ilość użytych gwiazd, $\sigma$ – odchylenie standardowe położenia od średniej	47
31	Uśrednione obrazy dla gromady () Centauri Obraz referencyjny V1 1999 AT =	
011	HJD-2450000.0>	54
3.2	Statystyki $\mu$ dla przedziałów jasności w gromadzie NGC 3201	60
3.3	Oznaczenia gwiazd zmiennych użytych w Tab. 3.4 w kolumnie: 2, 5 i 8	62
3.4	Przynależności gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w NGC 3201	63
3.5	Statystyki $\mu$ dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 4	71
3.6	Przynależność gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w Messier 4	73
3.7	Statystyki $\mu$ dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 12	82
3.8	Przynależność gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w Messier 12	82
3.9	Statystyki $\mu$ dla przedziałów jasności w gromadzie NGC 6362	91
3.10	Przynależności gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w NGC 6362	94
3.11	Statystyki $\mu$ dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 22	101
3.12	Przynależność gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w gromadzie M 22.	102

3.13	Statystyki $\mu$ dla przedziałów jasności w gromadzie NGC 6752	111
3.14	Przynależność gwiazd zmiennych w gromadzie NGC 6752. Adnotacje (*), (1), (2) i	
	(3) opisano w tekście	113
3.15	Statystyki dla gwiazd podwójnych ciągu głównego w gromadzie NGC 6752	113
3.16	Statystyki $\mu$ dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 55	118
3.17	Przynależności gwiazd zmiennych i BSS z pracy Lanzoni i in. (2007; ID <sub>L</sub> )	121
3.18	Statystyki dla gwiazd podwójnych ciągu głównego w gromadzie Messier 55	122
3.19	Nazwy plików katalogu elektronicznego ruchów własnych gwiazd gromad analizo-	
	wanych w tej pracy	126
3.20	Przykładowe wiersze elektronicznego katalogu ruchów własnych gwiazd. Oznacze-	
	nie kolumn: (1) ID – numer gwiazdy (zaczyna się od cyfry 1 dla pól xxx-F1 i 2 dla	
	pól xxx-F2); (2) & (3) współrzędne równonocne $(\alpha, \delta)_{2000.0}$ dla epoki obrazów refe-	
	rencyjnych; (4) & (5) współrzędne X, Y na obrazach referencyjnych; (6)-(9) ruchy	
	własne i ich niepewności; (10) N – ilość epok użytych do wyliczenia $\mu$ ; (11) dT –	
	długość bazy czasowej; (12) mem - przynależność do gromady; (13) V - jasność	
	standardowa;	127
4.1	Podsumowanie wyników pomiarów ruchów własnych gwiazd	130

# Wstęp

### 1.1 Ruchy własne gwiazd

Prędkość gwiazd w przestrzeni przedstawiana jest jako wektor  $V_S$ , który rozkłada się na dwie składowe: prędkość transwersalną  $V_T$ , czyli prostopadłą do kierunku na gwiazdę oraz prędkość radialną  $V_R$ , która jest równoległa do kierunku w stronę gwiazdy (Rys. 1.1). Prędkość transwersalną można wyznaczyć znając prędkość własną gwiazdy zrzutowaną na sferę niebieską oraz odległość – d – do obiektu.



Rysunek 1.1: Rozkład wektora prędkości gwiazdy.

Prędkość radialną wyznacza się zazwyczaj z pomoca przesunięcia dopplerowskiego:  $V_{\rm R} = c(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$  gdzie  $\lambda$  jest obserwowaną długością fali linii widmowej, zaś  $\lambda_0$  jest mierzoną długością fali w układzie odniesienia. Wzór ten jest prawdziwy w przypadku nierelatywistycznym, tzn.  $V_{\rm R} \ll c$ . Mierzona prędkość  $V_{\rm R}$  mierzona jest zazwyczaj z pomocą instrumentu na Ziemi obracającej się wokół własnej osi i obiegającej Słońce. Prędkość liniowa na równiku ziemskim wynosi około 0.5 km/s zaś prędkość obiegowa Ziemi wokół Słońca około 30 km/s. W związku z tym wprowadza się barycentryczną prędkość radialną, co pozwala uwzględnić oba te ruchy. W badaniach dotyczących dynamiki obiektów w Drodze Mlecznej używa się również prędkości względem lokalnego układu spoczynku (ang. *local standard of rest, LSR*). Jest ona zdefiniowana jako prędkość Słońca względem prędkości LSR nie jest dobrze ustalona i wynosi około ( $U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$ )  $\approx (-10, +5, +7)$  km/s. Przykładowe wyznaczenia tej wartości podają Coskunoglu i in. (2011) – projekt RAVE, prekursor obserwatorium GAIA; Bobylev & Bajkova (2010) – dane z użyciem maserów; Schonrich i in. (2010) – sonda Hipparcos czy też Dehen & Binney (1998) – sonda Hipparcos. Z wartości ( $U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$ ) odczytujemy, że Słońce porusza się do środka Galaktyki, szybciej niż LSR i w kierunku północnym od płaszczyzny dysku. W analizie prędkości radialnej obiektów w Galaktyce można uwzględniać ruch Słońca względem LSR. Można również zdefiniować prędkość jaką mierzyłby nieruchomy obserwator w centrum Galaktyki (ang. galactic standard of rest; GSR). Jest to prędkość uwzględniająca ruch LSR po orbicie kołowej z prędkością  $\Theta_{LSR} = 220$  km/s w odległości  $R_{\odot} = 8.5$  kpc od centrum Drogi Mlecznej (Kerr & Lynden-Bell 1986). W praktyce prędkość  $V_{GSR}$  używa się przy analizie ruchu obiektów w Galaktyce a  $V_{LSR}$  do badania ruchów obiektów w pobliżu Słońca. Z względu na niedostateczną precyzję wyznaczenia prędkości własnej Słońca względem LSR dla gwiazd powszechnie podaje się heliocentryczne lub barycentryczne prędkości radialne.

Prędkości transwersalnej obiektu  $V_{\rm T}$  nie można zmierzyć bezpośrednio. Można natomiast zaobserwować zmianę jego pozycji kątowej w czasie, czyli ruch własny ( $\mu$  lub PM z ang. proper motion). Gdy znamy odległości do obiektu *d* i jego ruch własny na niebie – liczony w mierze łuku na jednostkę czasu – możemy wyznaczyć jego prędkość transwersalną  $V_{\rm T}$  mierzoną w km/s. W jego wyznaczeniu posługujemy się zależnością:  $\mu("/rok) = V_{\rm T}/4.74 \, d$ , gdzie odległośc *d* jest liczona w parsekach. Zazwyczaj ruchy własne wyznaczna są w milisekundach łuku na rok (ang. *miliarcsec per year*; w skrócie *mas/yr*) lub sekundy na wiek (ang. *arcseconds per century*; w skrócie "/*cent*). Znacze wartości  $\mu$  są obserwowane dla gwiazd znajdujących się w relatywnie małej odległości od Słońca lub sporej prędkości 500-700 km/s i przekraczają prędkość ucieczki gwiazd z Drogi Mlecznej (np. Brown 2008). Średnie prędkości gwiazd w pobliżu Słońca wynoszą około 10 km/s (wg. tabeli 3.6.2. The Hipparcos and Tycho Catalogues Vol 1, ESA, 1997). Jedynie około 150 gwiazd posiada ruchy własne większe niż 1.2 "/rok , z których największą prędkość własną  $\mu = 10.25$  "/rok posiada słynna Gwiazda Barnarda czyli Gliese 699 (Perryman i in. 1997).

Pomiar  $\mu$  obiektu jest konieczny do wyznaczenia jego aktualnej pozycji i skierowaniu przyrządu obserwacyjnego na odpowiednią część nieba. Podczas prowadzenia badań nad obiektami o znacznym ruchu własnym konieczne jest podanie zarówno epoki w jakiej podawane są współrzędne równonocne (zmieniające się ze względu na zjawisko precesji osi ziemskiej), epokę pomiaru pozycji obiektu oraz jego ruch własny. Wymienione epoki nie muszą być a prori identyczne. Ruch własny mierzony jest zarówno w rektascencji i deklinacji, skąd mamy informację dotyczącą jego wielkości  $\mu$  i kąta pozycjnego  $\theta$ . Kąt pozycyjny  $\theta$  mierzony jest jako kąt zawarty między kierunkiem na północny biegun nieba a kierunkiem ruchu obiektu. Kąt ten liczony jest od północy w kierunku wschodnim. Ruch własny możemy również podać jako ruch w rektascencji i deklinacji tj.  $\mu_{\delta} = \mu cos\theta$  i  $\mu_{\alpha}cos\delta = \mu sin\theta$ . Dla bliskich gwiazd trzeba uwzględnić zmianę pozycji ze względu na zjawisko paralaksy. Efekt ten pozwala na zmierzenie odległości – z pomocą astrometrii CCD – dla gwiazd

instrument lub katalog	dokładność		
ludzkie oko	$\sim 1 \operatorname{arcmin}$		
optyczne – klisze	kilkaset mas		
Hipparcos/Tycho-2	60 mas		
optyczne – CCD	kilka mas		
Teleskop Kosmiczny Hubble'a	0.2-1 mas		
sonda GAIA	0.020 mas		
VLBA	0.010 mas		

Tablica 1.1: Typowa dokładność astrometrii – jednego pomiaru – uzyskiwana różnymi technikami.

w odległości do około 130 pc z niepewnościami mniejszymi niż 20% (np. Soszyński i in. 2002). Znajomość paralaksy obiektu, jego prędkości radialnej oraz absolutnego ruchu własnego pozwala na wyznaczenie prędkości w układzie galaktycznym (U, V, W).

Wartości ruchów własnych gwiazd mierzy się zazwyczaj względem pozycji gwiazd o znanych położeniach i ruchach – gwiazd referencyjnych. Ruchy względne mogą być następnie przeliczone na ruchy absolutne po uwzględnieniu średniego ruchu gwiazd referencyjnych. Można również zmierzyć prędkości gwiazd względem obiektów pozagalaktycznych np. z użyciem kwazarów i galaktyk zwartych (ang. compact galaxies). W praktyce często używa się zestawu gwiazd referencyjnych o znanych ruchach własnych względem galaktyk. Ilość obiektów na niebie, z pomocą których można wyznaczyć ruch absolutny gwiazd jest ograniczona. Dla jasności granicznej  $R \approx 21^{mag}$  przypada około 3 tysięcy galaktyk na stopień kwadratowy. Tylko około 10% są to galaktyki zwarte i tylko około 100 kwazarów przypada na stopień kwadratowy (SDSS DR7, Abazajian i in. 2009). Pomiary astrometryczne względne są łatwiejsze do przeprowadzenia ponieważ minimalizują efekty związane z m. in. refrakcją atmosferyczną, gięciem instrumentu czy błędami prowadzenia teleskopu. Wyznaczenie pozycji względem absolutnego układu odniesienia wymaga zdefiniowania katalogów gwiazd referencyjnych o znanych ruchach własnych. Przykładowe katalogi astrometryczne będące współcześnie w użyciu to: Astrographic Catalogue of Reference Stars (ACRS), Fudamental Catalogue (FK5), International Reference Stars (IRS), Positions and Proper Motions Star Catalogue, USNO-B<sup>1</sup> czy UCAC3<sup>2</sup>. Tablica 1.1 przedstawia szacunkową precyzję różnych technik astrometrycznych.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>USNO-B, http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/ucac
<sup>2</sup>UCAC3, http://ad.usno.navy.mil/ucac/overview.html

## 1.2 Astrometria gromad gwiazdowych

Intensywne pomiary ruchów własnych gwiazd w gromadach gwiazdowych zostały zapoczątkowane w połowie lat 50. XX wieku przez S. Vasilevskisa. W roku 1954 został on kierownikiem projektu obserwacji ruchów własnych gwiazd w obserwatorium Licka (Lick Northern Proper Motion Program). Wchodziły wówczas do użytku pierwsze maszyny cyfrowe. Dzięki aktywnym staraniom Vasilevskisa zbudowany został pierwszy automat do mierzenia pozycji gwiazd na płytach fotograficznych (Vasilevskis, 1957). Już w drugiej połowie lat 60. wraz ze współpracownikami opublikował pierwsze prace dotyczące gromad gwiazdowych (np. Vasilevskis i in. 1965a; Vasilevskis i in. 1965b). Wyznaczył prawdopodobieństwa przynależności gwiazd do gromady (np. Vasilevskis i in. 1958). Ówczesne obserwacje fotograficzne umożliwiały pomiary ruchów własnych 200-400 gwiazd na gromadę do jasności granicznej V  $\approx$  14.5-15.0. Używane były bazy czasowe rzędu 30-50 lat, co pozwalało na wykrycie gwiazd tła o znacznych ruchach własnych. Dlatego do wyznaczania ruchów własnych posługiwano się zazwyczaj zdjęciami archiwalnymi wykonanymi w pierwszej połowie XX wieku a czasem nawet na przełomie XIX i XX wieku. Uzyskiwane niepewności  $\mu$  szacowano typowo na 2-3 mas/yr. Rozdzielenie gwiazd tła od gromady pozwalały na: uwzględnienie kontaminacji gwiazd tła na diagramy barwa-jasność (ang. colour magnitude diagram; CMD), analizę rozkładu jasności gwiazd i dyskusję pojedynczych, nietypowych gwiazd znajdujących się w obserwowanych polach.

W latach 60. i 70. działały także inne projekty poświęcone pomiarom astrometrycznym, w tym również PM gwiazd np. Palomar Schmidt PM Survey, Lowell PM Survey, obserwatorium w Pułkowie, obserwatorium Yerkesa czy też w Hamburgu. W raz z tymi projektami pojawiły się liczne maszyny mierzące pozycje gwiazd na płytach fotograficznych np. w Herstmonceux (Wielka Brytania), U.S. Naval Observatory (USA), Observatorium McCormick'a (USA) oraz komputery, które znacznie przyśpieszyły żmudne obliczenia towarzyszące analizie danych astrometrycznych. Naukowcy zajmujący się astrometrią gwiazdową zauważyli konieczność poszerzenia obserwacji o niebo południowe. Prace nad ruchami własnymi w gromadach rozpoczęli w tym czasie uczniowie S. Vasilevskisa: K. Cudworth i W. van Altena. Pierwszy z nich korzystając z archiwum zdjęć z obserwatorium Yerkesa z poczatku XX wieku wykonał analize ruchów własnych w gromadach kulistych dla bazy czasowej dochodzącej nawet do 75-80 lat. W latach 1976-1988 ukazały się prace jego autorstwa, z analizą m.in. gromad kulistych Messier 15, Messier 92, Messier 3, Messier 5, Messier 71, Messier 22, Messier 2 i Messier 4. Cudworth wykorzystywał wykrywane gwiazdy tła do szacowania absolutnego ruchu gromady zakładając: odległości do nich, ruch wokół centrum Galaktyki i wartości stałych Oorta. Z wyznaczonej dyspersji  $\mu$  dla gwiazd gromady wyznaczał dyspersje predkości ( $\sigma_{\rm V}$ ) gwiazd w gromadach kulistych, a stąd ich masy. Cudworth najpewniej jednak uzyskiwał pomiar niepewności statystycznych  $\mu$  np. dla Messier 92 Drukier i in. (2007) podaje  $\sigma_{\rm V}$  = 6.3 km/s, co dla 8.2 kpc daje  $\mu$  = 0.16 mas/yr a Cudworth (1976) uzyskał około ( $\mu_x, \mu_y$ ) = (0.34, 0.30) mas/yr.

Już pod koniec lat 60. Vasilevskis (1967) podkreślił konieczność wyznaczania wartości absolutnych ruchów własnych gwiazd i gromad gwiazdowych w oparciu o źródła pozagalaktyczne w tym kwazary. Kwazi-absolutne wyznaczenia  $\mu$  można było uzyskać dla niektórych gromad posługując sie gwiazdami galaktyk karłowatych z Grupy Lokalnej. Takie pomiary dokonano dla gromad 47 Tucana oraz NGC 362 w oparciu o gwiazdy tła należące do Małego Obłoku Magellana (Tucholke, 1988). Jednak niewiele było prób wyliczenia absolutnych ruchów systemów gwiazdowych - gromad, galaktyk dSph, składowych Galaktyki – względem odległych galaktyk. Przyczyną była mała ilość dostatecznie głęboko siegających obserwacji fotograficznych. Jasność graniczna, konieczna do uzyskania ich astrometrii powinna wynosić co najmniej  $B \approx 19.0 - 20.0$  mag (Majewski, 1992, str. 90; Dinescu i in. 1997). Sytuacja zmieniła się w latach 90. XX wieku. Rozpoczał wówczas działalność projekt Yale/San Juan Southern Proper Motion Program, który kompletował obserwacje drugiej epoki dla gromad nieba południowego. Ponadto coraz powszechniej w astrometrii używane były teleskopy naziemne wyposażone w detektory CCD. Na orbitę okołoziemską został wyniesiony Teleskop Kosmiczny Hubble'a (ang. HST), którego przyrządy pozwalają na precyzyjną astrometrię. Umożliwiło to uzyskać wysokiej jakości pomiarów pozycji i zaowocowało pomiarami ruchów absolutnych w oparciu o galaktyki m.in. gromad kulistych: Messier 3 (Scholz i in. 1993), Pal 15 (Schweitzer i in. 1993), NGC 288, NGC 1851, NGC 6362, NGC 6584, NGC 6752 (Dinescu i in. 1997), Messier 79, NGC 2298, Messier 68,  $\omega$  Cen, NGC 5897, Messier 80, Messier 4, NGC 6144, Messier 55, Messier 30 (Dinescu i in. 1999), Pal 12 (Dinescu i in. 2000), galaktyk karłowatych: w Rzeźbiarzu - Sculptor dSph (Schweitzer i in. 1995), Fornax dSph (Dinescu i in. 2004) czy też okolice północnego bieguna Galaktyki (Majewski 1992). Przewodnim celem tych prac jest opisanie historii dynamicznej Drogi Mlecznej na podstawie ruchu gromad kulistych, towarzyszących jej galaktyk karłowatych (oraz ich struktur) oraz składowych Galaktyki. Dane dynamiczne tych obiektów powiązane z ich właściwościami chemicznymi (tj. [Fe/H],  $[\alpha/H]$ ) pozwoliły na otrzymanie jaśniejszego obrazu historii Drogi Mlecznej oraz jej satelitów (Majewski i in. 2005).

W ciągu ostatniej dekady znacznie udoskonalono metody analiz danych astrometrycznych uzyskanych z pomocą instrumentów HST: ACS/WF, WFPC2 oraz z użyciem zamontowanej zamiast niej – w 2009 roku – kamery WFC3. Dzięki tym osiągnięciom powstały liczne prace dotyczące wielu aspektów astrometrii w gromadach gwiazdowych np. dynamiki ruchów własnych w gromadzie ( $\omega$ Centauri; Anderson i in. 2010), pomiaru odległości do gromad w oparciu o ruchy własne i prędkości radialne (dla Messier 4; Bedin i in. 2003), względne PM z obserwacji naziemnych w bazach czasowych kilku lat (Messier 4 i NGC 6397, Anderson i in. 2006; Messier 67, Yadav i in. 2008;  $\omega$  Centauri, Bellini i in. 2009), wyznaczenie wieku gromady w oparciu o granicę stygnięcia na ciągu białych karłów (Messier 67, Bellini i in. 2010) lub badań populacji bulge'a Galaktyki dzięki odseparowaniu jej od populacji dysku (Clarkson i in. 2008; Clarkson i in. 2011).

# 1.3 Astrometria względna z użyciem detektorów CCD

#### 1.3.1 Transformacja lokalna

W celu zmierzenia ruchu gwiazdy w czasie należy oprzeć się o pozycje obiektów wyznaczone na obrazie z wybranej epoki odniesienia – obraz referencyjny. Jeśli mamy wykonane obserwacje tego samego pola w kolejnych epokach to możemy pomierzyć zmiany położenia obiektów w funkcji czasu względem obrazu referencyjnego. Dla obrazów CCD o relatywnie małych polach widzenia szansa na znalezienie w polu obserwacji standardu astrometrycznego jest niewielka. W związku z tym wyznaczenie ruchu własnego gwiazd można oprzeć o lokalny układ współrzędnych. W tym celu używa się grupy gwiazd o znanych ruchach własnych. Dzięki znacznej odległość do gwiazd w gromadach kulistych i małych wartościach dyspersji predkości ich współrzędne można użyć do wyznaczenia ruchów własnych gwiazd nie należących do danej gromady. Te ostatnie znajdują się w kierunku na gromadę ale nie są z nią fizycznie związane - położone są przed lub za gromadą. Do zgrubnego wyznaczenie ruchów tych gwiazd względem gromady używa się położeń gwiazd należących do gromady. Ich wstępnego wyboru dokonuje się na podstawie diagramu barwa-jasność gromady. Gdy baza czasowa jest odpowiednio długa konieczne jest również uwzglednienie ruchów własnych gwiazd we wnetrzu gromady. Z kolei aby zminimalizować efekty dystorsji pola i koherencji obrazu, związanego zarówno z optyka instrumentu jak i detektorem CCD, używa się gwiazd należacych do gromady najbliższych analizowami obiektowi na samym obrazie CCD. Metodę tę będziemy dalej nazywać metodą lokalnej transformacji. Ideę tej metody przedstawia Rys. 1.2 zaczerpnięty z pracy Anderson i in. 2006 (Fig. 10).

#### 1.3.2 Dystorsja pola

Problemem w dokładnych pomiarach astrometrycznych jest dystorsja obrazu pola wywołana przez układ optyczny oraz detektor CCD. Najlepszym rozwiązaniem, byłoby wykonanie obserwacji obszaru nieba z gwiazdami z relatywnie dokładnie wyznaczonymi pozycjami. Takie pole powinno mieć rozmiary kilku-kilkunastu minut kątowych i dokładność wyznaczenia pozycji lepszą niż 5 mas. Niestety pola z takimi pomiarami pozycji nie są obecnie dostępne. W związku z tym wyznaczanie poprawek na dystorsję pola zazwyczaj wykonywane jest metodą auto-kalibracji. W tej metodzie wybierany jest obszar nieba, na którym gwiazdy rozmieszczone są równomiernie, dość gęsto ale nie za bardzo, tak aby fotometria – zatem i astrometria – nie przysparzała problemów. Dla naziemnych obserwacji CCD może to być obszar tzw. okna Baade'go (Anderson i in. 2006), natomiast dla obserwacji z pomocą Teleskopu Kosmicznego Hubble'a pola w gromadach kulistych (Bellini i in. 2011). Auto-kalibracja polega na wykonaniu wielu ekspozycji tego obszaru nieba, z każdą ekspozycją przesuwając centrum pola widzenia tak aby te same gwiazdy zostały zobrazowane w różnych częściach detektora CCD. Poprawki na dystorsję obrazu wyliczane są iteracyjnie z pomocą zmian



Rysunek 1.2: Pomiar względny pozycji na obrazach wykonanych w dwóch momentach i różnych orientacjach CCD. Źródło: Anderson i in. (2006)

w pozycji tych samych gwiazd w obrębie detektora CCD. Poprawki – patrz Rys. 1.3 – mają za zadanie zminimalizować niepewności pomiaru związane odstępstwami od użytego stopnia wielomianu transformacji geometrycznej. Wyznaczenie dystorsji pola jest istotne przy pomiarach astrometrycznych z pomocą mozaikowych detektorów CCD. Jej wpływ na wyznaczone pozycje minimalizuje się posługując się metodą lokalnej transformacji.

### 1.3.3 Koherencja obrazu

Efekty atmosferyczne powodują, że światło dochodzące do układu optycznego przechodzi najpierw przez masy powietrza o nieustannie zmieniających się parametrach fizycznych (głównie ciśnienia i temperatury). Przy krótkich ekspozycjach, rzędu kilku do kilkudziesięciu sekund, małego obszaru nieba uzyskamy obrazy mniej rozmyte kosztem zebranej ilości fotonów. Dzieje się tak ponieważ podczas krótkiej ekspozycji te fotony przechodzą przez niemal identyczną masę powietrza. Inaczej jest w wypadku długich czasów ekspozycji obrazu lub relatywnie dużego pola widzenia. Obrazy gwiazd przesuwają się w przypadkowych kierunkach, zmniejsza się koherencja fali świetlnej, obraz jest bardziej rozmyty niż przy krótkich ekspozycjach ale jednocześnie zbierana jest większa ilość fotonów oraz uśredniają się przypadkowe ugięcia światła w atmosferze. Prosty model rozmycia obrazu zaproponowany przez Lindergen (1980) uwzględnia rozmiar obserwowanego pola i czas ekspozycji. Wyliczona z tego modelu dyspersja obrazu dla typowych pól o rozmiarach kilku minut



Rysunek 1.3: Mapa poprawek związanych z dystorsją pola dla instrumentu Wide Field Imager, kamery składającej się z 8 detektorów CCD. Kamera używana jest wraz z teleskopem MPG/ESO 2.2m, obserwatorium La Silla. Dla czytelności poprawki powiększono 100 razy. Źródło: Anderson i in. (2006)

kątowych i czasach ekspozycji do 500 sekund wynosi  $\approx 5 \div 14.3$  mas. W praktyce wielkość ta jest zależna od kierunku ruchu powietrza, a także od stopnia użytej transformacji geometrycznej. Ponadto przesunięcia obrazów obiektów w mniejszych skalach obrazu są o co najmniej rząd wielkości mniejsze. Z tego powodu używając metody lokalnej transformacji oraz długich czasów ekspozycji (lub je uśredniając) można pominąć systematyczne przesunięcia związane z koherencją obrazu.

#### 1.3.4 Różnicowa refrakcja atmosferyczna

Przesunięcia związane z rozmyciem obrazu uśredniają się w czasie. Natomiast efekt różnicowej refrakcji atmosferycznej (ang. *differential chromatic refraction*; DCR) jest systematyczny. Powoduje on większe przesunięcie w kierunku zenitu gwiazd o kolorze niebieskim niż gwiazd o kolorze czerwonym. Gdy użyjemy filtrów o mniejszym zakresie długości fali to efekt DCR jest mniejszy, tym niemniej nadal mierzalny w astrometrii CCD. Dzięki liniowości przetworników CCD można ten efekt łatwiej usunąć niż przy astrometrii na kliszach fotograficznych. Aby go uwzględnić należy wykonać obserwacje tego samego pola dla różnych wartości kąta zenitalnego dla gwiazd o różnych barwach

(Monet i in. 1992). Uzyskaną zależność odchyłki DCR w funkcji barwy można następnie uwzględnić dla pozycji wszystkich badanych gwiazd.

## 1.3.5 Detekcja ruchów własnych z użyciem metody odejmowania obrazów

Gwiazdy o znacznych ruchach własnych (ang. *high proper motion stars*; HPM) w gęstych polach gwiazdowych można odnaleźć z pomocą techniki odejmowania obrazów. Algorytm metody odejmowania obrazów został przedstawiony w pracach Alard i Lupton (1998) i Alard (2000), natomiast jej zastosowanie do wykrywania gwiazd HPM zaproponowali Eyer i Woźniak (2001). W metodzie odejmowania obrazów, zbiór obrazów jest geometrycznie przekształcanych do współrzędnych wyznaczonych przez wybrany obraz referencyjny. Także funkcja rozmycia obrazu (ang. *point spread function*; PSF) dla danej ekspozycji jest dostosowana do PSF obrazu referencyjnego. Odjęcie obrazu danego od obrazu referencyjnego służy wykrywaniu i precyzyjnej fotometrii gwiazd zmiennych. Transformacja geometryczna wyznaczana jest z użyciem wszystkich gwiazd. Dlatego też obiekty, których ruch własny znacznie różni się od ruchu większość gwiazd będzie widoczny w postaci charakterystycznych residuów o zmiennej jasności – patrz Rys. 1.4. Eyer i Woźniak (2001) pokazali, że na podstawie zmian jasności na obrazie residualnym i całkowitej jasności można oszacować kierunek ruchu oraz wartość ruchu własnego gwiazd HPM. Ta metoda pomaga w znajdywaniu kandydatów na gwiazdy HPM w gęstych polach gwiazdowych.



Rysunek 1.4: Rysunek przedstawia fragment obrazu residualnego w polu gromady  $\omega$  Centauri uzyskanego na podstawie dwóch obrazów wykonanych w odstępie 9 lat (1999 i 2008 r.). Zaznaczona została gwiazda HPM, gwiazda zmienna (VAR) oraz gwiazda, która przesaturowała detektor (SAT). Źródło: praca własna

# 1.4 Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest rozdzielenie gwiazd tła od gwiazd gromady za pomocą ruchów własnych dla 7 bliskich Słońcu gromad kulistych: NGC 3201, Messier 4, Messier 12, NGC 6362, Messier 22, NGC 6752 i Messier 55. Na podstawie wyznacznych ruchów własnych i przynależności gwiazd do gromady będzie możliwe:

- poprawienie diagramów barwa-jasność (ang. color magnitude-diagram; CMD),
- znalezienie gwiazd nietypowych należących do gromady np. czerwonych/żółtych maruderów (ang. *red/yellow stragglers*),
- sprawdzenie przynależności do gromady znanych gwiazd zmiennych,
- określenie przynależności gwiazd znajdujących się na CMD w regionie błękitnych maruderów (ang. *blue stragglers*; BSS),
- określenie przynależności gwiazd tła do innych systemów gwiazdowych (np. zgrubienia centralnego, galaktyk karłowatych),
- analiza gwiazd podwójnych należących do ciągu głównego,

Należy zaznaczyć, że jedynie dla 3 z 7 analizowanych gromad, uprzednio zostały wyznaczane ruchy własne gwiazd z pomocą obserwacji z użyciem kamer CCD. Jednak w żadnej z opublikowanych prac nie posługiwano się tak znaczną liczbą pomiarów oraz tak długim odstępem między pierwszą a ostatnią epoką obserwacji jak w tej pracy.

### 1.5 Bibliografia – Rozdział 1

Abazajian i in. 2009, ApJS, 182, 543 Alard & Lupton 1998, ApJ, 503, 325 Alard, 2000, ApJS, 144, 363 Anderson i in. 2006, A&A, 454, 1029 Anderson i in. 2010, ApJ, 710, 1032 Bedin i in. 2003, AJ, 126, 247 Bellini i in. 2009, A&A, 493, 959 Bellini i in. 2010, A&A, 517A, 34 Bobylev & Bajkova 2010, MNRAS, 408, 1788 Brown 2008, arXiv, 0811.0571B, Galactic Center Newsletter - http://www.aoc.nrao.edu/~gcnews/ Clarkson i in. 2008, AJ, 684, 1110 Clarkson i in. 2011, ApJ, 735, 37 Coskunoglu i in. 2011, MNRAS, 412, 1237 Cudworth 1976, AJ, 81, 975 Dehnen & Binney 1998, MNRAS, 298, 387 Dinescu i in. 1997, AJ, 114, 1014 Dinescu i in. 1999, AJ, 117, 277 Dinescu i in. 2000, AJ, 120, 1892 Dinescu i in. 2004, AJ, 128, 687 Drukier i in. 2007 AJ, 133, 1041 ESA 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 Eyer & Wozniak 2001, MNRAS, 327, 601 Kerr & Lynden-Bell 1986, MNRAS, 221, 1023 Lindegren 1980, A&A, 89, 41 Majewski 1992, ApJS, 78, 87 Majewski i in. 2005, ASPC, 338, 240 Monet i in. 1992, AJ, 103, 638 Perryman i in. 1997, A&A, 323L, 49 Scholz i in. 1993, MNRAS, 264, 579 Schonrich i in. 2010, MNRAS, 403, 1829 Schweitzer i in. 1993, ASPC, 48, 113 Schweitzer i in. 1995, AJ, 110, 2747 Soszyński i in. 2002, AcA, 52, 143 Tucholke 1988, IAUS, 133, 465 Vasilevskis 1957, AJ, 62Q, 35

Vasilevskis i in. 1958, AJ, 63, 387 Vasilevskis i in. 1965a, AJ, 70, 797 Vasilevskis i in. 1965b, AJ, 70, 806 Vasilevskis 1967, AJ, 72, 583 Yadav i in. 2008, A&A, 484, 609

2

# Dane obserwacyjne, przedstawienie analizowanych gromad i metody redukcji danych

## 2.1 Dane obserwacyjne

Obrazy gromad kulistych ujętych w analizie zostały wybrane spośród obserwacji wykonanych w trakcie projektu Cluster AgeS Experiment (CASE; Kaluzny i in. 2005) w latach 1996-2009. Obserwacje przeprowadzono z użyciem 2.5-metrowego teleskopu du Pont w Obserwatorium Las Campanas, w Chile. Wszystkie obrazy zostały uzyskane za pomocą tego samego detektora CCD i tego samego zestawu filtrów. Użyto kamery CCD Tek#5 o rozmiarach 2048 x 2048 pikseli, skali odwzorowania 0.259"/piksel i polu widzenia 530" x 530". Obserwacje tych gromad były prowadzone w celu zbadania wybranych gwiazd zmiennych oraz odkrycia układów gwiazd podwójnych zaćmieniowych rozdzielonych. Dane zebrane w latach 2008-2009 zostały uzyskane przy udziale autora niniejszej pracy.

## 2.2 Analizowane gromady

Tab. 2.1 przedstawia podstawowe parametry dla analizowanych gromad (Harris 1996; aktualizacja grudzień 2010 r.). Kolejne kolumny Tab. 2.1 zawierają: nazwę obiektu w katalogu NGC (ID), nazwę obiektu w katalogu Messiera (Messier), współrzędne równonocne na epokę 2000.0 (RA, DEC), długość galaktyczną (l), szerokość galaktyczna (b), odległość od Słońca w kpc ( $R_{\odot}$ ), odległość od centrum Galaktyki w kpc ( $R_{gc}$ ), metaliczność ([Fe/H]), koncentrację gromady (c). Warto zwrócić uwagę na to, że do analizy ruchów własnych wybrano gromady kuliste znajdujące się relatywnie blisko Słońca, o stosunkowo małej gęstości gwiazd w ich centrach oraz w relatywnie dużych szerokościach galaktycznych (|b| > 7°.5). Poniżej została przedstawiona krótka charakterystyka każdej z gromad.

ID	Messier	RA (2000)	DEC (2000)	1	b	$R_{\odot}[kpc]$	$R_{\rm gc}[kpc]$	[Fe/H]	с
NGC 3201	_	$10^{h}17^{m}36$ sec.	-46°24′ 44″.9	277 °23	8°.64	4.9	8.8	-1.59	1.29
NGC 6121	M 4	16 <sup>h</sup> 23 <sup>m</sup> 35 <sup>s</sup> 22	-26°31′ 32″.7	350°.97	15°.97	2.2	5.9	-1.16	1.65
NGC 6218	M 12	$16^{h}47^{m}14^{s}.18$	-01°56′ 54″.7	15°.72	26°.31	4.8	4.5	-1.37	1.34
NGC 6362	_	17 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup> .99	-67°02′ 54″.0	325°.55	−17°.57	7.6	5.1	-0.99	1.09
NGC 6656	M 22	18 <sup>h</sup> 36 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> .94	-23°54′ 17″.1	9°.89	−7°.55	3.2	4.9	-1.70	1.38
NGC 6752	_	$19^{h}10^{m}52^{s}.11$	-59°59′ 04 <sup>″</sup> .4	336°.49	-25°.63	4.0	5.2	-1.54	2.50
NGC 6809	M 55	19 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> .71	-30°57′ 53 <sup>″</sup> .1	8°.79	-23°.27	5.4	3.9	-1.94	0.93

Tablica 2.1: Podstawowe informacje o analizowanych gromadach (Harris 1996).

#### 2.2.1 NGC 3201

Gromada kulista NGC 3201 położona jest w konstelacji Żagla, w odległości 4.9 kpc od Słońca. Jest to relatywnie rzadka gromada – parametr koncentracji wynosi c = 1.29, promień jądra  $r_c = 1.30$  arcmin, zaś promień zawierający połowę światła  $r_h = 3.10$  arcmin. Gromada znajduje się niecałe 9° od płaszczyzny Galaktyki, w obszarze o zmiennej ekstyncji. Jej wartość zmienia się nawet o  $\delta E(V-I) \sim 0.2$  mag w polu gromady (von Braun & Mateo 2001; Kravtsov i in. 2009). NGC 3201 ma znaczną prędkość radialną  $V_r = 495$  km/s (Cote i in. 1994), poruszając się w przeciwnym kierunku niż rotuje Galaktyka. Istnieją przypuszczenia, że jest gromadą przechwycona przez Drogę Mleczną (Gonzalez & Wallerstein 1998). Zawartość metali dla NGC 3201 jest typowa. Wartości podawane w literaturze zawierają się w przedziale [Fe/H] = -1.23 (Carreta & Gratton 1997) do -1.61 (Zinn & West 1984). Na podstawie analizy spektroskopowej 18 olbrzymów w NGC 3201 Gonzalez & Wallerstein (1998) otrzymali metalicznośc [Fe/H] =  $-1.42 \pm 0.03$  ( $\sigma = 0.14$ ). W gromadzie odnaleziono ponad setkę gwiazd zmiennych, więcej informacji na ich temat znajduje się w podrozdziale 3.2.2. Wiek NGC 3201 oceniany jest na 13-14 miliardów lat (Layden & Sarajedini 2003).

#### 2.2.2 Messier 4

Messier 4 (M 4 = NGC 6121) jest jedną z dwóch (obok NGC 6397) najbliższych Słońcu gromad kulistych i znajduje się w odległości 2.2 kpc od niego w konstelacji Skorpiona. M 4 jest gromadą relatywnie rzadką – parametr koncentracji ma wartość c = 1.65 (Harris 1996). Położona jest 15° od płaszczyzny równika galaktycznego, tym niemniej wartość poczerwienienia międzygwiazdowego E(B-V) zmienia się w polu gromady znacznie i nieregularnie ( $\delta E(B-V) \sim 0.07$  mag.; Mochejska i in. 2002). Zmienną ekstynkcję wiaże się z obłokiem pyłowym Sco-Oph. Metaliczność gromady oceniana jest na [Fe/H] = -1.16 (Harris 1996). Ze względu na swoją bliskość gromada jest przedmiotem intensywnych badań dotyczących m.in. wyznaczenia jej wieku z pomocą białych karłów (Bedin i in. 2009; Mochejska i in. 2002), ilości układów podwójnych (Sommariva i in. 2009; Heggie & Giersz 2008) oraz dwóch populacji gwiazdowych w gromadzie (Marino i in. 2008). Ciekawym obiektem w gromadzie M 4 jest prawdopodobna planeta o masie rzędu masy Jowisza, krażąca w układzie zawierającym pulsara i białego karła (Thorsett i in. 1999). Astrometria gwiazd z pola gromady M 4 została wykonana przez: Cudworth & Rees (1990) z użyciem klisz fotograficznych (baza czasowa 90 lat), Bedin i in. (2003) z pomoca HST (baza czasowa 5-6 lat) oraz przez Anderson i in. (2006) za pomocą teleskopów naziemnych wyposażonych w detektory CCD (baza czasowa niecałych 3 lat). W gromadzie odkryto 80 gwiazd zmiennych (Clement i in. 2001 oraz drogą korespondencyjną z Panią Christine Clement).

#### 2.2.3 Messier 12

Gromada Messier 12 (M 12 = NGC 6218) położona jest w gwiazdozbiorze Wężownika, w odległości 4.8 kpc od Słońca. Szerokość galaktyczna M 12 wynosi b  $\approx$  +26.5°. Poczerwienienie w polu gromady zmienia się nieznacznie ( $\delta E(B - V) \sim 0.04$  mag; von Braun i in. 2002). M 12 jest gromadą umiarkowanie mało-metaliczną ([Fe/H] = -1.54; Johnson & Pilachowski 2006). Na diagramie CMD gromady widać, że olbrzymy na gałęzi horyzontalnej położone są w kierunku barwy niebieskiej od pasa niestabilności RR Lyr. Mimo małej metaliczności i morfologii CMD typowej dla gromad halo orbita M 12 wskazuje na jej przynależność do składowej dysku (Pritzl i in. 2005). Parametry orbitalne, zostały wyznaczone dzięki wyznaczeniu absolutnego ruchu gromady (Dinescu i in. 1999). Prędkość radialna tej gromady wynosi ~ 40-45 km/s (Gratton & Nesci 1978; Harris i in. 1983; Geffert i in. 1991; Klochkova i in. 2003; Carretta i in. 2007). Z wyjątkiem pracy Geffert i in. (1991), dotyczącej 165 gwiazd w polu gromady M 12, nie wyznaczano jak do tej pory (październik 2011 r.) relatywnych ruchów własnych gwiazd w tej gromadzie.

#### 2.2.4 NGC 6362

NGC 6362 znajduje się w odległości około 7.6 kpc od Słońca w konstelacji Ołtarza. Gromadę tę klasyfikuje się jako przynależną do halo Galaktyki. Gromada ma dość typową metaliczność, wartości podawane w literaturze to: [Fe/H] =  $-1.08 \pm 0.09$  (Zinn & West 1984), [Fe/H] =  $-1.18 \pm 0.06$  (Rutledge i in. 1997) w tej samej skali lub [Fe/H] =  $-0.99 \pm 0.03$  w skali Carretta & Gratton (1997). NGC 6362 znajduje się w znacznej odległości od płaszczyzny Drogi Mlecznej b  $\approx 18^{\circ}$ , w związku z czym poczerwienienie jest równomierne w polu gromady:  $E(B - V) = 0.08 \pm 0.01$  (Olech et. al 2001). W gromadzie znanych jest 50 gwiazd zmienych różnych typów (Sawyer Hogg 1973; Clement i in. 1995; Mazur i in. 1999). Z pomocą gwiazd RR Lyr Olech i in. (2001) wyznaczył wartość modułu odległości do NGC 6362 i wynosi on  $(m - M_V) = 14.46 \pm 0.10$ . Natomiast wiek gromady szacowany jest na 13-16 Gyr (Piotto i in. 1999). Jak do tej pory (październik 2011) nie została opublikowana żadna praca dotycząca ruchów własnych gwiazd w tej gromadzie.

#### 2.2.5 Messier 22

Messier 22 (M 22 = NGC 6656), to gromad kulista odkryta już w 1665 r. przez Abrahama Ihle. Położona jest w konstelacji Strzelca, w odległości jedynie 3.2 kpc od Słońca. Znajduje się na sferze niebieskiej blisko centrum Galaktyki (l, b) = (+9°.89, -7°.55), co powoduje znaczne poczerwienienie  $E(B - V) \approx 0.38$  (Richter i in. 1999). Poczerwienienie zmienia się w polu gromady:  $\delta E(B - V) = 0.06 \pm 0.01$  (Monaco i in. 2004). M 22 ma niską metaliczność [Fe/H] = -1.70 (Harris 1996). Dowiedziono w niej obecności dwóch grup gwiazd na gałęzi czerwonych olbrzymów o średniej metaliczności różniącej się o 0.15 dex (Marino i in. 2011). Jest to trzecia gromada kulista, obok  $\omega$  Centauri, NGC 2808 i NGC 6397 (Lind i in. 2011), w której zaobserwowano niejednorodność zawartości metali. M 22 jest jedną z czterech gromad kulistych, w której odkryto mgławicę planetarną (Gillett i in. 1986) – pozostałe znajdują się w: M 15, Palomar 6, NGC 6441. W gromadzie odkryto około 70 gwiazd zmiennych (Clement 1997; Kaluzny & Thompson 2001), w tym dwie nowe karłowate (CV1: Anderson i in. 2003; Bond i in. 2005; CV2: Pietrukowicz i in. 2005). W M 22 obserwowano również zjawisko mikrosoczewkowania z gwiazdą bulge'u (Pietrukowicz i in. 2005; Pietrukowicz i in. 2012). Względne ruchy własne dla 672 gwiazd w gromadzie policzył Cudworth (1986), a ruch absolutny gromady Cudworth & Hanson (1993). W literaturze nie odnaleziono współczesnego pomiaru astrometrii względnej gwiazd w polu gromady Messier 22 (stan na październik 2011 r.).

#### 2.2.6 NGC 6752

NGC 6752 jest to gromada kulista znajdująca się w konstelacji Pawia i w odległości 4.0 kpc od Słońca. Jej spora szerokość ekliptyczna (b  $\approx -26^{\circ}$ ) sprawia, że poczerwienienie w kierunku gromady jest niewielkie  $E(B - V) = 0.046 \pm 0.005$  (Gratton i in. 2005). Gromadę wyróżnia dość znaczny parametr koncentracji c = 2.50 (Harris 1996). Jest jedyną, spośród analizowanych w tej pracy, która jest w fazie po zapadnięciu jądra (Djorgovski & King 1986; Auriere & Ortolani 1989). W gromadzie znaleziono w sumie 5 pulsarów milisekundowych (D'Amico i in. 2002), w tym jeden znajdujący się  $r \approx 6$ arcmin od środka gromady, w układzie podwójnym z białym karłem (Ferraro i in. 2003). Na diagramie CMD NGC 6752, w gałęzi horyzontalnej znajduje się relatywnie duża ilość niebieskich gwiazd. W jej polu znanych jest 25 gwiazd zmiennych (Sawyer Hogg 1973; Clement 1997; Thompson i in. 1999; Kaluzny & Thompson 2009) w tym jedna gwiazda kataklizmiczna (Bailyn i in. 1996). W pracy Milone i in. 2011 sugerowana jest możliwość, że NGC 6752 ma podwójny ciąg główny. Drukier i in. (2003) wyznaczyli ruchy własne dla około 20 tysięcy gwiazd, z pomocą HST/WFPC2 na podstawie 2 pomiarów w bazie czasowej 5 lat. Wyniki ich pomiarów nie zostały udostępnione publicznie, zaś korespondencja prywatna z autorami pracy nie przyniosła rezultatów. Natomiast Dinescu i in. (1999) wyznaczyli ruch absolutny gromady.

#### 2.2.7 Messier 55

Gromada Messier 55 (M 55 = NGC 6809) została odkryta przez Nicholas Louis de Lacaille w roku 1752. Położona jest w gwiazdozbiorze Strzelca, w odległości 5.4 kpc od Słońca. Jej szerokość galaktyczna to b  $\approx 9^{\circ}$ , a poczerwienienie wynosi  $E(B - V) = 0.11 \pm 0.03$  mag (Olech i in. 1999). M 55 jest gromadą należącą do halo Galaktyki o metaliczności zaledwie [Fe/H] = -1.94 (Harris 1996). Odkryto w niej ponad 70 gwiazd zmiennych z których około połowa położona jest w obszarze CMD zajmowanego przez *blue stragglers* (Pych i in. 2001; Kaluzny i in. 2010; Mandushev i in. 1997). Zawiera również nową karłowatą (Kaluzny i in. 2005). W tle gromady znajdują się części strumienia galaktyki karłowatej w Strzelcu – Sgr dSph. Ruch absolutny M 55 wyznaczony był przez

# ROZDZIAŁ 2. DANE OBSERWACYJNE, PRZEDSTAWIENIE ANALIZOWANYCH GROMAD I METODY REDUKCJI DANYCH

m.in. przez Dinescu i in. (1999). Pierwsza obszerna analiza ruchów własnych gwiazd gromady została przedstawiona w pracy autora tej rozprawy (Zloczewski i in. 2011).

# 2.3 Opis dokonywanych pomiarów

#### 2.3.1 Wybór i wstępna obróbka obrazów

Dla każdej gromady z każdej epoki obserwacji zostały wybrane *zestawy obrazów* o jak najmniejszej wartości seeingu, wykonane w możliwie najmniejszych odległościach zenitalnych (patrz Tab. 2.2) i w miarę możliwości uzyskane w trakcie jednej nocy. Odrzucano obrazy z relatywnie dużą wartością tła nieba lub wykonane przy zachmurzonym niebie. Każdy *zestaw obrazów* został uśredniony do jednego obrazu o wysokim stosunku S/N – *obrazu uśrednionego*. W trakcie tej procedury poszczególne obrazy zostały najpierw przeniesione do współrzędnych wybranego wcześniej obrazu odniesienia (obraz o najmniejszej wartości seeingu w danym zestawie). Przeniesienie obrazów zostało wykonane poprzez interpolację każdego piksela danego obrazu, z pomocą funkcji typu spline trzeciego stopnia (ang. *bicubic spline*). W tym celu została użyta procedura opisana w Numerical Recepies (Press i in. 2007) i zmodyfikowana przez autora niniejszej pracy. Następnie dla każdego obrazu wyznaczono funkcję rozmycia obrazu (ang. *point spread function*; PSF) i dla każdego obrazu wyliczono nowy obraz o wartości PSF wyznaczonej dla obrazu odniesienia. Aby to wykonać została wyliczona macierz transformacji PSF-u między danym obrazem a obrazem odniesienia.

Tablica 2.2: Statystyki odległości zenitalnych obrazów, które posłużyły do obliczenia *obrazów uśrednionych.* <z> oznacza średnią masę powietrza obrazów składowych *obrazu uśrednionego*.

gromada	zakres <z></z>	mediana <z></z>
NGC 3201	1.048-1.080	1.056
Messier 4	1.000-1.130	1.029
Messier 12	1.124-1.227	1.139
NGC 6362	1.270-1.337	1.279
Messier 22	1.005-1.089	1.023
NGC 6752	1.167-1.250	1.192
Messier 55	1.006-1.430	1.028

Pomiary astrometryczne i fotometryczne wykonano posługując się *obrazami uśrednionymi* podzielonymi na mozaikę mniejszych obrazów zachodzących na siebie nawzajem. Liczba mniejszych obrazów wynosiła od 6 do 16 i była zależna od tego jaka część z całej matrycy CCD była odczytywana podczas obserwacji. Zazwyczaj obrazy obejmowały całą matrycę CCD, w związku z tym mozaika mniejszych obrazów miała najczęściej 16 elementów. Metodę tę stosuje się po to aby zredukować efekty związane ze zmiennością kształtu PSF. Uśrednienie obrazów wykonane zostało z pomocą zmodyfikowanej przez autora tej pracy wersji pakietu oprogramowania DIAPL (ang. *Difference Image Analyses PL*) autorstwa Wojciecha Pycha. Lista uśrednionych obrazów przedstawią Tab. 2.3–2.9. Zawierają one w kolejnych kolumnach: nazwy obrazów uśrednionych (ID), epoki obserwacji ( $\Delta$ T) liczone w latach od daty HJD<sub>0</sub> = 2450000.0, ilość użytych obrazów do uzyskania *obrazu uśrednionego* (N), typowe czasy ekspozycji ( $<T_{exp}>$ ) liczone w sekundach i typowe wartości seeingu (<seeing>) w arcsec. Do utworzenia listy gwiazd, dla których badano ruchy własne posłużono się dla każdej z gromad jednym lub dwoma *obrazami uśrednionymi*. Wybrano je tak aby pokrywały jak największy obszar i żeby w rezultacie umożliwić wyznaczenie  $\mu$  dla jak największej ilości gwiazd. Wybrane *obrazy uśrednione* charakteryzował znakomity seeing i wysoka wartość S/N. Te *obrazy uśrednione* nazywamy *obrazami referencyjnymi*. Ich położenie względem gromad zostały przedstawione na obrazach w paśmie R pobranych z internetowego atlasu nieba *ESO Online Digitized Sky Survey*<sup>1</sup> (Rys. 2.1–2.7).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>http://archive.eso.org/dss/dss

Tablica 2.3: Uśrednione obrazy dla gromady NGC 3201. Obrazy referencyjne NGC 3201-F1 = c\_02, NGC 3201-F2 = c\_32.  $\Delta T = \langle HJD - 2450000.0 \rangle$ .

ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>	ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
	[lat]		[s]	[arcsec]		[lata]		[s]	[arcsec]
c_01	1.36	17	120	0.87	c_18	10.49	21	50	0.71
c_02	1.37	22	100	0.68	c_19	10.57	19	60	0.93
c_03	1.37	13	100	0.86	c_20	10.64	11	60	0.93
c_04	1.37	10	100	0.87	c_21	10.65	8	60	1.29
c_05	1.37	12	100	0.89	c_22	10.65	8	60	1.11
c_06	2.33	13	100	0.89	c_23	12.26	17	55	0.87
c_07	2.33	19	100	0.81	c_24	12.26	20	50	0.84
c_08	2.34	8	120	0.88	c_25	12.26	21	50	0.81
c_09	5.73	15	120	1.06	c_26	12.27	17	50	0.65
c_10	7.29	16	100	0.92	c_27	12.27	15	50	0.63
c_11	7.30	11	100	0.90	c_28	12.27	2	120	0.86
c_12	7.30	26	90	0.79	c_29	12.27	22	50	0.86
c_13	8.29	17	50	0.83	c_30	12.34	16	50	0.88
c_14	8.51	17	100	0.83	c_31	12.42	13	60	0.96
c_15	8.51	20	80	0.62	c_32	12.43	22	60	0.69
c_16	8.51	19	50	0.78	c_33	13.61	14	50	0.92
c_17	9.43	11	75	0.98					
ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>	ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
--------	------------	----	------------------------	-------------------	-------	------------	----	------------------------	-------------------
	[lat]		[s]	[arcsec]		[lata]		[s]	[arcsec]
brb_1	10.56	2	60	1.17	cb_3	-0.35	2	60	0.88
brb_2	11.69	6	60	0.96	cb_6	2.64	6	40	1.08
brl_1	8.63	7	30	0.85	cb_7	2.64	2	10	1.12
brl_2	8.64	2	50	1.11	cb_9	10.71	8	90	1.11
brl_3	8.77	9	40	0.88	cb_10	10.71	5	20	1.13
brl_4	10.71	17	45	1.11	cb_12	11.78	9	25	1.08
brl_5	10.71	3	150	1.17	cb_13	13.72	5	60	1.62
brl_6	12.66	7	50	1.19	cb_14	13.72	7	25	1.38
brl_7	12.66	25	40	0.86	sc_1	6.58	17	35	0.77
brl_8	12.67	7	30	0.70	sc_2	7.57	12	35	0.70
brl_9	12.67	11	20	0.66	sc_3	7.57	8	40	0.89
brl_10	12.68	14	50	0.68	sc_4	7.57	8	30	0.84
brl_11	12.68	2	200	0.73	sc_5	7.58	11	40	1.13
brl_12	12.68	5	50	0.94	sc_6	8.51	16	40	0.84
brl_13	12.74	5	50	1.16	sc_7	8.51	11	40	0.66
brl_14	12.75	13	50	0.88	sc_8	8.61	11	40	1.13
brl_15	13.61	16	20	0.78	sc_9	8.64	6	45	1.11
brl_16	13.72	9	25	1.03	sc_10	8.78	9	40	0.69
brl_17	13.72	3	60	1.05	sc_11	10.56	12	50	0.91
cb_1	-0.36	5	60	0.93	sc_12	10.57	10	60	0.86
cb_2	-0.35	12	60	1.11	vs_1	5.57	15	45	0.89

Tablica 2.4: Uśrednione obrazy dla gromady M 4. Obrazy referencyjne M4-F1 = cb\_1, M4-F2 = brl\_10.  $\Delta T = \langle HJD-2450000.0 \rangle$ .

ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>	ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
	[lat]		[s]	[arcsec]		[lata]		[s]	[arcsec]
c_01	5.55	5	20	0.86	c_14	11.76	11	70	0.96
c_02	5.55	5	120	0.93	c_15	11.76	14	80	1.05
c_03	5.55	8	60	0.94	c_16	11.76	19	80	1.23
c_04	5.56	5	60	1.07	c_17	11.86	2	80	1.12
c_05	5.63	14	60	1.05	c_18	12.42	19	70	1.10
c_06	5.65	31	70	0.95	c_19	12.43	13	70	0.79
c_07	5.74	11	100	0.64	c_20	12.67	19	60	0.95
c_08	8.63	19	60	1.34	c_21	12.67	28	69	0.97
c_09	10.70	10	60	0.95	c_22	12.67	8	19	0.90
c_11	11.69	2	100	0.88	c_23	12.75	8	80	1.32
c_12	11.75	8	20	0.88	c_24	13.70	25	80	1.05
c_13	11.75	12	60	0.93					

Tablica 2.5: Uśrednione obrazy dla gromady M 12. Obraz referencyjny M 12-F1 = c\_19.  $\Delta T$  = <HJD-2450000.0>.

Tablica 2.6: Uśrednione obrazy dla gromady NGC 6362. Obraz referencyjny NGC 6362-F1 = c\_10.  $\Delta T = \langle HJD - 2450000.0 \rangle$ .

ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>	ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
	[lat]		[s]	[arcsec]		[lata]		[s]	[arcsec]
c_01	-0.40	6	150	1.23	c_15	10.72	15	120	1.13
c_02	1.66	6	40	1.10	c_16	11.67	3	360	1.22
c_03	1.66	3	25	1.18	c_17	11.68	2	180	1.23
c_04	3.67	2	100	1.23	c_18	11.75	7	90	0.88
c_05	4.67	13	180	1.16	c_19	11.77	16	90	1.17
c_06	4.67	2	100	1.04	c_20	11.86	13	110	1.18
c_07	5.64	4	120	1.20	c_21	12.66	10	100	0.95
c_08	5.64	2	60	1.20	c_22	12.67	7	69	1.07
c_09	5.73	12	70	0.87	c_23	12.68	6	119	1.18
c_10	10.65	13	150	0.96	c_24	12.74	16	100	1.06
c_11	10.70	7	100	1.04	c_25	13.61	5	80	1.04
c_12	10.70	5	25	1.13	c_26	13.61	10	40	1.08
c_13	10.72	2	20	1.10	c_27	13.61	17	120	1.17
c_14	10.72	3	90	1.21					

ID	ΔΤ	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>	ID	ΔΤ	N	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
	[lat]		[s]	[arcsec]		[lata]		[s]	[arcsec]
c_01	3.67	25	40	1.07	c_09	12.66	25	30	0.97
c_02	5.64	3	10	0.96	c_10	12.66	5	100	1.06
c_03	5.64	2	60	1.02	c_11	12.68	19	30	0.80
c_04	10.70	8	15	1.06	c_12	12.68	9	90	1.01
c_05	10.70	5	60	0.92	c_13	12.68	10	15	1.04
c_06	10.70	4	7	0.97	c_14	13.70	12	30	0.85
c_07	11.78	21	30	0.83	c_15	13.70	5	120	0.96
c_08	11.86	3	90	1.10					

Tablica 2.7: Uśrednione obrazy dla gromady M 22. Obraz referencyjny M22-F1 = c\_11.  $\Delta T$  = <HJD-2450000.0>.

Tablica 2.8: Uśrednione obrazy dla gromady NGC 6752. Obraz referencyjny NGC 6752-F1 = c\_05.  $\Delta T = \langle HJD - 2450000.0 \rangle$ .

$\Delta T$	Ν	$< T_{exp} >$	<seeing></seeing>	ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
[lat]		[s]	[arcsec]		[lata]		[s]	[arcsec]
-0.40	6	90	1.12	c_12	11.78	13	15	0.85
-0.40	18	120	0.89	c_13	11.78	9	120	1.12
2.63	30	30	0.98	c_14	11.86	12	40	1.32
2.63	5	10	0.91	c_15	11.86	3	60	1.34
2.64	23	25	0.81	c_16	12.67	13	37	1.10
2.64	12	40	1.11	c_17	13.61	16	50	1.09
2.64	10	60	0.98	c_18	13.70	15	40	1.06
2.64	11	120	0.96	c_19	13.71	11	50	1.41
2.65	22	35	1.07	c_20	13.72	11	40	1.14
2.65	17	30	0.94	c_21	13.72	13	15	1.12
2.65	10	50	1.11	c_22	13.72	15	50	1.16
	ΔT [lat] -0.40 2.63 2.63 2.64 2.64 2.64 2.64 2.64 2.65 2.65 2.65	ΔT    N      [lat]    -      -0.40    6      -0.40    18      2.63    30      2.64    23      2.64    12      2.64    10      2.64    11      2.65    17      2.65    10	ΔTN $$ [lat].[s]-0.40690-0.40181202.6330302.645102.6412402.6410602.64111202.6522352.6517302.651050	ΔTN $$ $$ [lat] $\cdot$ [s][arcsec]-0.406901.12-0.40181200.892.6330300.982.635100.912.6423250.812.6412401.112.6410600.982.6522351.072.6517300.942.6510501.11	ΔTN $< T_{exp} >$ $< seeing >$ ID[lat][s][arcsec]-0.406901.12c_12-0.40181200.89c_132.6330300.98c_142.635100.91c_152.6423250.81c_162.6412401.11c_172.6410600.98c_182.64111200.96c_192.6522351.07c_202.6517300.94c_212.6510501.11c_22	ΔTN $< T_{exp} >$ $$ ID $ΔT$ [lat] $[s]$ $[arcsec]$ $[lata]$ -0.40690 $1.12$ $c_12$ $11.78$ -0.4018120 $0.89$ $c_13$ $11.78$ 2.633030 $0.98$ $c_14$ $11.86$ 2.63510 $0.91$ $c_15$ $11.86$ 2.642325 $0.81$ $c_16$ $12.67$ 2.641240 $1.11$ $c_17$ $13.61$ 2.641060 $0.98$ $c_18$ $13.70$ 2.6411120 $0.96$ $c_19$ $13.71$ 2.651730 $0.94$ $c_21$ $13.72$ 2.651050 $1.11$ $c_22$ $13.72$	ΔTN $< T_{exp} >$ $< seeing >$ IDΔTN[lat][s][arcsec][lata][lata]-0.406901.12 $c_12$ 11.7813-0.40181200.89 $c_13$ 11.7892.6330300.98 $c_14$ 11.86122.635100.91 $c_15$ 11.8632.6423250.81 $c_16$ 12.67132.6412401.11 $c_17$ 13.61162.6410600.98 $c_18$ 13.70152.64111200.96 $c_19$ 13.71112.6522351.07 $c_20$ 13.72112.6517300.94 $c_21$ 13.72152.6510501.11 $c_22$ 13.7215	ΔTN $< T_{exp} >$ $< seeing >$ IDΔTN $< T_{exp} >$ [lat][s][arcsec][lata][lata][s] $-0.40$ 6901.12 $c_12$ 11.781315 $-0.40$ 181200.89 $c_13$ 11.7891202.6330300.98 $c_14$ 11.8612402.635100.91 $c_15$ 11.863602.6423250.81 $c_16$ 12.6713372.6412401.11 $c_17$ 13.6116502.6410600.98 $c_18$ 13.7015402.64111200.966 $c_19$ 13.7111502.6517300.94 $c_21$ 13.7213152.6510501.11 $c_22$ 13.721550

Tablica 2.9: Uśrednione obrazy dla gromady M 55. Obrazy referencyjne M55-F1 = F1-1997, M55-F2 = F2-1999.  $\Delta T = \langle HJD - 2450000.0 \rangle$ .

ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>	ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
	[lat]		[s]	[arcsec]		[lata]		[s]	[arcsec]
F1-1997	1.65	12	60	0.80	F2-2006A	10.57	19	40	0.70
F1-2006	10.70	6	75	1.06	F2-2006B	10.64	15	60	0.87
F1-2007	11.86	8	40	1.08	F2-2008	12.68	14	50	0.67
F1-2008	12.66	21	35	0.90	F3-2006A	10.71	8	65	0.82
F2-1999	3.68	23	120	0.83	F3-2006B	10.72	7	50	0.83
F2-2001	5.65	8	100	0.93	F3-2007A	11.70	4	60	0.95
F2-2003	7.58	18	85	0.86	F3-2007B	11.77	13	60	0.78
F2-2004A	8.63	3	80	1.05	F3-2008	12.73	14	85	0.89
F2-2004B	8.78	17	50	0.89	F4-2007	11.75	18	60	0.82



Rysunek 2.1: Analizowane obszary w gromadzie NGC 3201 zaznaczone na tle obrazu Digitized Sky Survey (DSS) w filtrze R. Pola: NGC 3201-F1 i NGC 3201-F2. Szerokość obrazu to 15 arcmin.



Rysunek 2.2: Analizowany obszary w gromadzie M 4, pola M4-F1 i M4-F2 na tle obrazu DSS o szerokości 15 arcmin.



Rysunek 2.3: Analizowany obszar w gromadzie M 12, pole M12-F1 na tle obrazu DSS o szerokości 15 arcmin.



Rysunek 2.4: Analizowany obszar w gromadzie NGC 6362, pole NGC 6362-F1 na tle obrazu DSS o szerokości 15 arcmin.



Rysunek 2.5: Analizowany obszar w gromadzie, M 22, pole M22-F1 na tle obrazu DSS o szerokości 15 arcmin.



Rysunek 2.6: Analizowany obszar w gromadzie NGC 6752, pole NGC 6752-F1 na tle obrazu DSS o szerokości 15 arcmin.



Rysunek 2.7: Analizowane obszary w gromadzie M 55, pola: M55-F1, M55-F2 na tle obrazu DSS o szerokości 15 arcmin. Pola M55-F3 i M55-F4 nie są istotne.

#### 2.3.2 Fotometria i pomiar pozycji gwiazd

Do wykrycia gwiazd i ich fotometrii na *obrazach referencyjnych* wykorzystano programy z pakietu DAOPHOT/ALLSTAR (Stetson 1987). Również na tym etapie podzielono obrazy na mozaikę obrazów o mniejszej wielkości. PSF wyznaczano z użyciem funkcji Moffata. Wyznaczając parametry tej funkcji uwzględniono jej zmienność przestrzenną wraz z położeniem we współrzędnych obrazu CCD. Ze względu na dużą gęstość gwiazd w obserwowanych polach fotometria była wykonywana iteracyjnie, stopniowo obniżając poziom detekcji gwiazd i cyklicznie sprawdzając wartości parametrów gwiazd podawanych przez program ALLSTAR. Aby uniknąć efektu nieprawidłowego rozdzielania gwiazd w gęstych polach zastosowano pomocnicze procedury sprawdzające jakość obrazów, na których odjęto wcześniej zmierzone gwiazdy.

Następnie ręcznie dobrano gwiazdy, jakie mogły być jeszcze wyraźne widoczne i ominięte w automatycznej procedurze. W ten sposób utworzono listy pozycji gwiazd na *obrazach referencyjnych*. W dalszej kolejności współrzędne wszystkich gwiazd z tej listy zostały przeliczone do współrzędnych wszystkich *obrazów średnich* wykonanych w kolejnych epokach obserwacji. W oparciu o te zgrubne współrzędne została wykonana fotometria profilowa gwiazd z list ustawiając parametr programu ALLSTAR re = 1. Dzięki temu współrzędne gwiazd zostały dla każdego *obrazu uśrednionego* zmierzone na nowo.

#### 2.3.3 Astrometria względna

Względne ruchy własne zostały zmierzone posługując się metodą lokalnej transformacji podobnej do tej jaka została przedstawiona w pracy Anderson i in. (2006). Dla danej gwiazdy, na obrazach wykonanych w kolejnych epokach, wyznaczono jej względną pozycję z użyciem gwiazd znajdujących się w jej pobliżu – *gwiazd siatki*. Wybrano je posługując się następującymi kryteriami.

- Gwiazdy znajdujące się na diagramie barwa-jasność w pobliżu ciągu głównego, gałęzi czerwonych olbrzymów lub gałęzi horyzontalnej. Tę ocenę wykonano w pierwszym przybliżeniu na podstawie instrumentalnych diagramów barwa-jasność: v/(v-i) lub v/(b-v).
- 2. Jakość pomiaru fotometrycznego gwiazd z pomocą programu ALLSTAR na *obrazie referencyjnym* posługując się przedziałami parametrów CHI od 0.02 do 1.00 oraz SHARP w przedziale od -0.3 do 0.3.
- W przypadku jasnych gwiazd (ALLSTAR\_MAG < 13.5<sup>mag</sup>), sprawdzano czy na *obrazie refe*rencyjnym z odjętymi gwiazdami czy ich residua są odpowiednio gładkie. Tzn. nie więcej niż 30% pikseli w promieniu 1.5×FWHM od jasnej gwiazdy przyjmuje wartości ±20 zliczeń ADU poniżej wartości średniej lokalnego tła.

#### ROZDZIAŁ 2. DANE OBSERWACYJNE, PRZEDSTAWIENIE ANALIZOWANYCH GROMAD I METODY REDUKCJI DANYCH

Dla każdej gwiazdy – dla której zdecydowano się wykonać pomiar ruchu własnego – wybierano zbiór *gwiazd siatki* w jej pobliżu w kwadracie o rozmiarach 308×308 pikseli czyli ~80"×80". *Gwiazdy siatki* posłużyły do wyznaczenia transformacji geometrycznej między *obrazem referencyjnym* a kolejnymi *obrazami średnimi*. Transformację wyliczono z użyciem funkcji *immatch.geomap* i *immatch.geoxytran* dostępnych w pakiecie oprogramowania IRAF<sup>2</sup>. Do wyznaczenia transformacji użyto dwuwymiarowego wielomianu Czebyszewa 3-rzędu. Współczynniki transformacji posłużyły do wyznaczenia spodziewanych pozycji gwiazdy na kolejnych *obrazach uśrednionych* (X<sub>C</sub>, Y<sub>C</sub>) na podstawie pozycji gwiazdy na *obrazie referencyjnym* (X<sub>R</sub>, Y<sub>R</sub>). Względne ruchy własne gwiazd obliczono na podstawie różnicy pozycji wyznaczonej (X<sub>C</sub>, Y<sub>C</sub>) i obserwowanej (X<sub>O</sub>, Y<sub>O</sub>) tj.  $\Delta X =$ X<sub>C</sub> – X<sub>O</sub> oraz  $\Delta Y = Y_C - Y_O$ . Wyznaczenia wartości  $\Delta X$  i  $\Delta Y$  wykonano dla wszystkich *obrazów uśrednionych*. Ruch własny gwiazdy w obu współrzędnych został obliczony na podstawie dopasowania funkcji liniowej do  $\Delta X$  i  $\Delta Y$  w funkcji czasu. Rys. 2.8. Przedstawia przykładowe wyznaczenie ruchu własnego gwiazdy #13300383 z gromady M 55.



Rysunek 2.8: Przykład wyznaczenia ruchu własnego gwiazdy.

Dla poszczególnych *obrazów uśrednionych* wyznaczono względne wagi przesunięć  $\Delta X$  i  $\Delta Y$  w kolejnych epokach na podstawie fotometrii aperturowej kilku-kilkudziesięciu jasnych i izolowanych gwiazd. Ich jasności – w postaci zliczeń – zostały zmierzone na wszystkich obrazach składających się na dany *obraz uśredniony*. Wyznaczone jasności zostały zsumowane a odwrotność sumy została użyta do wyznaczenia względnych wag.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>pakiet programów IRAF jest udostępniany przez National Optical Astronomy Observatory, które jest sterowane przez Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., przy współpracy z National Science Foundation, USA.

nazwa pola	Ν	$\sigma$ [arcs]
NGC 3201-F1	469	0.18
NGC 3201-F2	500	0.19
M4-F1	1124	0.21
M4-F2	1070	0.20
M12-F1	515	0.16
NGC 6362-F1	556	0.15
M22-F1	1871	0.20
NGC 6752-F1	1120	0.19
M55-F1	671	0.15
M55-F2	636	0.15

Tablica 2.10: Informacje dotyczące jakości wyznaczenia współrzędnych równonocnych. Gdzie N – ilość użytych gwiazd,  $\sigma$  – odchylenie standardowe położenia od średniej.

Ruchy własne były wyznaczane jedynie dla obiektów, dla których pozycje zmierzono przynajmniej na 4 *obrazach uśrednionych* i w bazie czasowej co najmniej 4 lat. W celu znalezienia poprawnych wyznaczeń ruchów własnych dla każdego dopasowania liniowego ruchu własnego wykonano test  $\chi^2$  na poziomie ufności  $\alpha = 1\%$ .

Obliczenia ruchów własnych wykonano w dwóch krokach. W pierwszym wyznaczano wstępne wartości ruchów własnych. W drugim użyto jedynie *gwiazd siatki*, dla których obliczono wartości ruchów własnych z zadowalająca dokładnością ( $\sigma_{\mu} < 0.75 \text{ mas/yr}$ ). Ponadto aby zmniejszyć niepewności związane z ruchem *gwiazd siatki* poprawiono ich współrzędne uwzględniając wyznaczony wstępnie ruch własny i przesunięte do epoki *obrazu referencyjnego*. Te nowe współrzędne zostały użyte do wyznaczenia transformacji geometrycznej w drugim kroku obliczeń. Współrzędne i ruchy własne gwiazd w układzie równikowym równonocnym uzyskano z pomocą katalogu UCAC3 (Zacharias i in. 2010). Do wyznaczenia współrzędnych równonocnych użyto gwiazd jaśniejszych od V = 17. Informacje dotyczące jakości dopasowania siatki przedstawia Tab. 2.10. W jej kolejnych kolumnach podano: oznaczenie analizowanego pola (nazwa pola), liczbę gwiazd użytych do wyznaczenia współrzędnych (N), odchylenie standardowe od średniej dla różnicy pozycji gwiazd użytych do wyznaczenia współrzędnych ( $\sigma$ ).

### 2.3.4 Przynależność gwiazd do gromady

Wyznaczone względne ruchy własne gwiazd każdej z analizowanych gromad zostaną w Rozdziale 3 przedstawione na diagramach ( $\mu_{\alpha} cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ ) (ang. PM vector point diagram; w skrócie VPD).

## ROZDZIAŁ 2. DANE OBSERWACYJNE, PRZEDSTAWIENIE ANALIZOWANYCH GROMAD I METODY REDUKCJI DANYCH

Aby ocenić prawdopodobieństwo przynależności gwiazd do gromady powszechnie używana jest metoda próby lokalnej (ang. *local-sample method*) przedstawiona przez Platais (1984) i Platais i in. (2003). W metodzie tej z diagramu VPD wybiera się podzbiory gwiazdy w przedziałach o podobnej jasności oraz podobnych niepewnościach wyznaczenia  $\mu$ . Wyznaczane są dwa rozkłady prawdopodobieństwa – gwiazd przynależnych do gromady oraz gwiazd nie należących do niej (gwiazdy tła). W wypadku większości gromad kulistych mamy do czynienia ze stosunkową małą ilością gwiazd tła w stosunku do liczby gwiazd gromady (kilka procent) w związku z tym wyznaczenie rozkładu prawodpodobieństwa dla gwiazd tła jest obarczone znacznymi niepewnościami. W związku z tym w analizie zaprezentowanej w Rozdziale 3 ograniczona zostanie do oceny przynależności na podstawie położenia na diagramie VPD oraz niepewności  $\mu$ .

Do wyznaczenia klasy przynależności, w przedziałach jasności (dobranych pod względem ilości gwiazd) wyznaczono dla ( $\mu_{\alpha} cos\delta; \mu_{\delta}$ ):

- ich średnie wartości  $(M_{\alpha}; M_{\delta})$ ,
- odchylenia standardowe od średniej oznaczane odpowiednio  $(S_{\alpha}; S_{\delta})$ ,
- niepewności ( $ME_{\alpha}, SE_{\alpha}; ME_{\delta}, SE_{\delta}$ )
- a także  $S = (S_{\alpha}^2 + S_{\delta}^2)^{1/2}$ ,  $ME = (ME_{\alpha}^2 + ME_{\delta}^2)^{1/2}$  oraz  $SE = (SE_{\alpha}^2 + SE_{\delta}^2)^{1/2}$ .

Posługując się powyższymi wartościami gwiazdy podzielono na trzy grupy:

- nie należące do gromady spełniają warunek  $M > 3.0 \times S$ ; oznaczane mem = 0
- prawodpodobnie należące do gromady spełniają warunek M ≤ 3.0×S oraz σ<sub>μ</sub> > ME+3.0×S E;
  oznaczane mem = 1
- uznane za przynależne do gromady spełniają warunek M ≤ 3.0×S oraz σ<sub>μ</sub> ≤ ME + 3.0×S E;
  oznaczane mem = 2

#### 2.3.5 Jasności standardowe gwiazd

Dla wybranych gromad wyliczono jasności standardowe gwiazd. Wyznaczenia wykonano posługując się standardami pośrednimi w systemie Landolta udostępnionymi on-line przez Petera B. Stetsona<sup>3</sup>. Przy wyznaczaniu jasności gwiazd posłużono się równaniami 2.1–2.4:

$$v - V = A(V - I) + C$$
 (2.1)

$$(v - i) = D(V - I) + E$$
 (2.2)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Źródło: http://www3.cadc-ccda.hia-iha.nrc-cnrc.gc.ca/community/STETSON/standards/

lub

$$v - V = A(B - V) + C$$
 (2.3)

$$(b - v) = D(B - V) + E$$
 (2.4)

gdzie współczynniki A i D są dobrze znane i ustalone dla kamery Tek#5 (wartości współczynników A i D pozyskane zostały od promotora pracy). Posługując się nimi oraz jasnościami instrumentalnymi uzyskanymi z obrazów w filtrach v, i lub b wyznaczono współczynniki C oraz E. W wyznaczeniu jasności nie uwzględniono poprawek aperturowych. Wyznaczone kolory (B-V), (V-I) i jasności V zostały użyte na diagramach barwa-jasność (dalej CMD, ang. *colour magnitude diagram*) na pozostałych wykresach diagnostycznych – dla kompletności zbioru gwiazd – posługiwano się wartościami V wyznaczonymi jedynie na podstawie współczynnika C. Typowe wartości członu to A(V-I)  $\approx$  (+0.05)÷(+0.07) mag., zaś A(B-V)  $\approx$  (-0.02)÷(-0.01) mag. zatem są na tyle małe, że zakładamy brak ich wpływu na interpretację wykresów diagnostycznych.

## 2.3.6 Selekcja gwiazd pod względem jakości fotometrii

Dla części zaprezentowanych w Rozdziale 3 diagramów CMD zastosowano selekcję gwiazd uwzględniającą jakość fotometrii. Za gwiazdy mające fotometrię o dobrej jakości uznawano te, których formalne niepewności podawane przez program ALLSTAR (dv), były nie większe niż 2.5 odchylenia standardowe ( $S_v$ ) od wartości typowej tj. mediany ( $M_{dv}$ ). Uwzględniono przy tym zarówno niepewność jasności dv jak i koloru dbv (dbv =  $\sqrt{db^2 + dv^2}$ ) lub dvi (dvi =  $\sqrt{dv^2 + di^2}$ ). Selekcje wykonano w przedziałach v o rozmiarze 0.25 mag., aby uwzględnić zmianę dv w funkcji v. Opisane powyżej warunki zostały przedstawione w postaci równań 2.5–2.7:

$$dv_i - M_{dv} < 2.5S_v$$
 (2.5)

oraz

$$dbv_i - M_{dbv} < 2.5S_{bv} \tag{2.6}$$

lub

$$dvi_i - M_{dvi} < 2.5S_{vi}$$

# 2.4 Bibliografia – Rozdział 2

Anderson i in. 2003, AJ, 620, L103 Anderson i in. 2006, A&A, 454, 1029 Auriere & Ortolani 1989, A&A, 221, 20 Bedin i in. 2003, AJ, 126, 247 Bedin i in. 2009, ApJ, 697, 956 Bailyn i in. 2009, ApJ, 697, 956 Bond i in. 2005, AJ, 620, L103 Carretta & Gratton 1997, A&AS, 121, 95 Carretta i in. 2007, A&A, 464, 939 Clement i in. 1995, AJ, 110, 2195 Clement 1997, yCat, 5097, 0C, Updated 3rd Cat Variable Stars in Globular Clusters Clement i in. 2001, AJ, 122, 2587 Cote i in. 1994, ApJS, 90, 83 Cudworth 1986, AJ, 92, 348 Cudworth & Rees 1990, AJ, 99, 1491 Cudworth & Hanson 1993, AJ, 105, 168 D'Amico i in. 2002, ApJ, 570L, 89 Dinescu i in. 1999, AJ, 117, 1792 Djorgovski & King 1986, 305L, 61 Drukier i in. 2003, AJ, 125, 2559 Ferraro i in. 2003, ApJ, 596L, 211 Geffert i in. 1991, A&AS, 91, 487 Gillett i in. 1986, ApJ, 300, 722 Gonzalez & Wallerstein 1998, AJ, 116, 765 Gratton & Nesci 1978, MNRAS, 182P, 61 Gratton i in. 2005, A&A, 442, 947 Johnson & Pilachowski 2006, AJ, 132, 2346 Harris i in. 1983, PASP, 95, 256 Harris 1996, AJ, 112, 1487<sup>4</sup> Heggie & Giersz 2008, MNRAS, 389, 1858 Kaluzny & Thompson 2001, A&A, 373, 899 Kaluzny i in. 2005, AIPC (eds. J.Mikolajewska, A.Olech), 752, 70 Kaluzny i in. 2005, MNRAS, 359, 677 Kaluzny & Thompson 2009, AcA, 59, 273

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>katalog elektroniczny grudzień 2010; http://www.physics.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat

Kaluzny i in. 2010, AcA, 60, 245 Klochkova i in. 2003, AstL, 29, 748 Kravtsov i in. 2009, A&A, 497, 371 Lavden & Sarajedini 2003, AJ, 125, 208 Lind i in. 2011, A&A, 527A, 148 Mandushev i in. 1997, AJ, 113, 1060 Marino i in. 2008, A&A, 490, 625 Marino i in. 2011, A&A, 532A, 8 Mazur i in. 1999, MNRAS, 306, 727 Mazur i in. 2003, MNRAS, 340, 1205 Milone i in. 2011, arXiv:1111.0552, zaakceptowane w A&A Mochejska i in. 2002, AJ, 124, 1486 Monaco i in. 2004, Memorie della S.A. Italiana, 75, 32 Olech i in. 1999, AJ, 118, 442 Olech i in. 2001, MNRAS, 321, 421 Pietrukowicz i in. 2005, AcA, 55, 261 Pietrukowicz i in. 2012, ApJ, 744L, 18 Piotto i in. 1999, AJ, 117, 264 Platais 1984 Soviet Astronomy Letters, 10, 84 Platais i in. 2003, AJ, 126, 2922 Press i in. 2007, Numerical Recepies; The Art of Scientific Computing (3rd ed.). New York: Cambridge University Press Pritzl i in. 2005, AJ, 130, 2140 Pych i in. 2001, A&A, 367, 148 Richter i in. 1999, A&A, 350, 476 Rutledge i in. 1997, PASP, 109, 883 Sawyer Hogg 1973, PDDO, 3, 6S Sommariva i in., 2009, A&A, 493, 947 Stetson 1987, PASP, 99, 191 Thompson i in. 1999, AJ, 118, 462 Thorsett i in. 1999, ApJ, 523, 763 von Braun & Mateo 2001, AJ, 121, 1522 von Braun i in. 2002, AJ, 124, 2067 Zinn & West 1984, ApJS, 55, 45 Zloczewski i in. 2011, MNRAS, 414, 3711 Zacharias i in. 2010, AJ, 139, 2184

# **B** Rezultaty i ich dyskusja

# 3.1 Pole testowe – gromada $\omega$ Centauri

## 3.1.1 Dane, metody i rezultaty

Przed wykonaniem docelowych obliczeń wyliczono ruchy własne gwiazd w polu  $\omega$  Centauri i porównano z wyznaczeniami  $\mu$  z pracy Bellini i in. (2009, nazywana dalej B09). Porównanie wykonano po to aby przetestować metody i procedury przyjęte w tej rozprawie. Analizowane dane obserwacyjne zostały zebrane z pomocą 1-m teleskopu Swope, położonego w Las Campanas Observatory, Chile. Użyty detektor to SITe#3 (2048×3150 pikseli), którego skala obrazu na teleskopie Swope wynosi 0.435 arcs/piksel.

Analizowane pole gwiazdowe znajduje się około 10 arcmin na północny-wschód od centrum gromady  $\omega$  Centauri i obejmuje obszar o rozmiarach kątowych 261×261 arcsec (600×600 pikseli). Stworzono łącznie 22 *obrazów uśrednionych*, obejmujących bazę czasową około 9.5 roku. Ich zestawienie przedstawia Tab. 3.1. Fotometrię i ruchy własne dla tego pola testowego wyznaczono podobnie jak dla pozostałych gromad, przy czym  $\mu$  nie liczono iteracyjnie oraz nie posłużono się względnymi wagami (patrz rozdział 2.3.3). Ruch własny  $\mu$  wyznaczono dla 2057 gwiazd spośród 9328 gwiazd znalezionych na *obrazie referencyjnym*. Z nich dla 2051 gwiazd pomiar  $\mu$  wykonał również B09. Poniżej przedstawiono wykresy porównujące pomiary. Na Rys. 3.1 pokazano diagramy VPD dla tych gwiazd, z kolei na Rys. 3.2 przedstawiono różnice między wyznaczeniami ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) w katalogu z pracy B09, a wyliczonych w tej pracy, w funkcji jasności *V* wziętej z katalogu Belliniego.

## 3.1.2 Dyskusja

W pracy B09 do wyznaczenia ruchów własnych użyto dwóch obserwacji wykonanych w odstępie czasu 4 lat. Natomiast w tej pracy ruchy własne policzono na podstawie 22 obrazów w bazie czasowej 9,5 lat. Pozwoliło to na zmniejszenie niepewności wyznaczenia ruchów własnych. Jej miarą jest m.in. rozrzut ruchów własnych gwiazd, w pobliżu środka diagramu VPD (Rys. 3.1). Rozrzut ten wyliczono

ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>	ID	$\Delta T$	Ν	<t<sub>exp&gt;</t<sub>	<seeing></seeing>
	[lat]		[s]	[arcsec]		[lat]		[s]	[arcsec]
V1_1999A	3.34	9	160	2.77	V1_2006A	10.52	9	120	3.02
V1_1999B	3.52	10	120	2.92	V1_2006B	10.61	11	100	3.04
V1_1999	3.58	10	90	2.36	V1_2006C	10.73	9	120	2.76
V1_1999C	3.61	10	90	2.46	V1_2007A	11.44	11	120	2.66
V1_1999D	3.66	10	120	3.11	V1_2007B	11.56	11	140	3.38
V1_1999E	3.69	12	120	3.01	V1_2007C	11.75	12	120	2.67
V1_1999F	3.79	9	100	2.52	V1_2007D	11.85	9	100	3.06
V1_2000A	4.51	7	120	3.03	V1_2008A	12.48	13	120	3.03
V1_2000B	4.58	9	160	3.18	V1_2008B	12.60	8	120	2.80
V1_2000C	4.64	12	140	2.55	V1_2008C	12.68	11	120	2.69
V1_2001A	5.67	8	115	2.90	V1_2008D	12.81	14	120	2.75

Tablica 3.1: Uśrednione obrazy dla gromady  $\omega$  Centauri. Obraz referencyjny V1\_1999.  $\Delta T = \langle HJD - 2450000.0 \rangle$ .

jako odchylenie standardowe od średniej dla N = 1774 gwiazd o  $\mu_{B09} < 5$  mas/yr. Dla pomiarów B09 średnie wartości odchylenia standardowego ruchu własnego wynoszą: ( $S_{\alpha}$ ,  $S_{\delta}$ ) = (1.50, 1.49) mas/yr. Natomiast pomiary z tej rozprawy dla tych samych gwiazd dają wartości niemal dwukrotnie mniejsze ( $S_{\alpha}$ ,  $S_{\delta}$ ) = (0.72, 0.80) mas/yr.

Ponadto wyliczono dla tej grupy wartości średnie względnych ruchów własnych ( $M_{\alpha}$ ,  $M_{\delta}$ ). Dla B09 ( $M_{\alpha}$ ,  $M_{\delta}$ ) = (-0.18, 0.29) mas/yr, natomiast wartości uzyskane w tej pracy: ( $M_{\alpha}$ ,  $M_{\delta}$ ) = (-0.017, 0.008) mas/yr. Uzyskane w tej pracy wartości średnie  $\mu$  niewiele się różnią od (0, 0) mas/yr. Tak też powinno być, ponieważ ruch własny jest liczony względem gwiazd gromady. Natomiast średnie  $\mu$  dla pomiaru B09 wykazuje systematyczną odchyłkę od (0, 0) mas/yr.

W analizowanym polu katalog ruchów własnych B09  $\omega$  Cen podaje wartości  $\mu$  dla około 9 tys. gwiazd i wyznaczone zostały na podstawie jedynie dwóch pomiarów współrzędnych. Natomiast w niniejszej pracy pomiar  $\mu$  wyliczono na podstawie nawet 22 obrazów, co pozwoliło na sprawdzenie poprawność wyznaczonych ruchów własnych jak zostało opisane w rozdziale 2.3.3. Narzucenie dodatkowego warunku poprawności wyznaczenia  $\mu$  zmniejsza liczbę gwiazd, dla których pomiar uznano za wiarygodny. Takiej selekcji, ze względu na jedynie 2 punkty pomiarowe nie wykonano w pracy B09.

Rys. 3.2 pokazuje, że różnice  $\Delta \mu_{\alpha cos\delta}$ ,  $\Delta_{\delta}$  są relatywnie małe. Średnia różnicy wyznaczeń dla gwiazd wszystkich wspólnych gwiazd wynosi ( $\Delta \mu_{\alpha cos\delta}$ ,  $\Delta \mu_{\delta}$ ) = (-0.07, 0.39) mas/yr. Natomiast dla grupy wspólnych gwiazd o jasnościach  $V_{B09} < 17.5$  zaledwie ( $\Delta \mu_{\alpha cos\delta}$ ,  $\Delta \mu_{\delta}$ ) = (-0.06, 0.09) mas/yr. Odchylenie standardowe od średniej dla ( $\Delta \mu_{\alpha cos\delta}$ ,  $\Delta \mu_{\delta}$ ) rośnie wraz z  $V_{B09}$ , gdyż zwiększają się za-



Rysunek 3.1: Wykresy ruchów własnych gwiazd dla pola testowego w polu gromady  $\omega$  Cen. Po lewej wyznaczenia Bellini i in. (2009), zaś po prawej wyznaczenia PM dla tych samych gwiazd w tej pracy.

równo niepewności pomiarów w katalogu B09 jak i pomiarów wykonanych w tej rozprawie.

Porównując diagramy VPD w lewym i prawym panelu Rys. 3.1 twierdzimy, że zwiększenie liczby epok oraz wybranie jedynie poprawnych wyznaczeń  $\mu$  (z pomocą testu  $\chi^2$ ) zmniejszyło dyspersję  $\mu$  grupy gwiazd przynależnych do gromady. Poprawiło to znacząco możliwość zidentyfikowania gwiazd należących i nie należących do gromady. Na podstawie Rys. 3.2, twierdzimy, że wartości  $\mu$  wyznaczane przez Bellini i in. (2009) i w tej pracy sobą ze sobą zgodne. Metody wyznaczeń  $\mu$ przez Bellini i in. (2009) są analogiczne do tych użytych w tej pracy. Zatem oprogramowanie użyte w wyznaczaniu ruchów własnych działa poprawnie i może być użyte do analizy kolejnych gromad.



Rysunek 3.2: Różnica wartości ruchów własnych tych samych gwiazd ( $\mu_{\alpha} cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ ) między pomiarami Bellini i in. (2009) oraz wykonanymi w tej pracy. Gromada  $\omega$  Cen.

# 3.2 Gromada NGC 3201

## 3.2.1 Rezultaty

Wykres prędkości własnych gwiazd w polu gromady NGC 3201 przedstawia Rys. 3.3. Łącznie uzyskano wyznaczenia  $\mu$  dla około 22.5 tysiąca gwiazd. Zgrubna ocenę przynależności gwiazd do gromady można wykonać na podstawie samego Rys. 3.3. Gwiazdy należące do gromady umiejscowione są w pobliżu punktu ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (0, 0) mas/yr, natomiast grupa gwiazd o znacznych ruchach własnych do gromady nie należy. Przyjmując roboczo  $\mu_l$  = 3 mas/yr jako wartość graniczną dzielącą gwiazdy należące do gromady i te do niej nie należące otrzymamy następujące liczby gwiazd:  $N_{\mu < \mu_l}$  = 21 223 oraz  $N_{\mu \ge \mu_l}$  = 1 321. Około 5.7% spośród wszystkich zmierzonych gwiazd stanowią gwiazdy tła. W sumie 49 gwiazd znajduje się poza obszarem przedstawionym na Rys. 3.3, ich całkowite pręd-kości własne są w przedziale 10.3–43.8 mas/yr.



Rysunek 3.3: Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady NGC 3201. Gwiazdy których wartości  $\mu < \mu_l = 3$  mas/yr oznaczono punktami, zaś gwiazdy  $\mu \ge \mu_l$  większymi punktami.

Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w polu gromady w funkcji jasności przedstawia Rys. 3.4. Widać liniową zależność między  $log_{10}\sigma_{\mu}$  a jasnością gwiazd V. Jest ona dobrze widoczna dla gwiazd słabszych niż V = 17.5. Dla gwiazd o jasności V  $\approx$  19.0 mediana  $\sigma_{\mu}$  wynosi 0.29 mas/yr, zaś dla V  $\approx$  20.0 mediana zwiększa się do  $\sigma_{\mu}$  = 0.46 mas/yr. Wzrost niepewności związany jest z coraz mniejszym stosunkiem sygnału do szumu. Rozrzut punktów związany jest pośrednio z metodami redukcji danych np. transformacją współrzędnych, wyznaczaniem ruchów własnych a w szczególności ilością danych użytych w tych obliczeniach. Większe wartości niepewności dla gwiazd jaśniejszych od V < 15.0 związane są z ich saturacją na niektórych *obrazach uśrednionych*, zatem i mniejszą ilością pomiarów pozycji.



Rysunek 3.4: Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w funkcji ich jasności dla gromady NGC 3201.

Ruchy własne zostały pomierzone odrębnie dla pól NGC 3201-F1 i NGC 3201-F2 (Rys 2.1), stąd dla 17 693 gwiazd występujących w obu polach zmierzono je dwukrotnie. Użyto w tym celu tych samych *obrazów uśrednionych* i ponownie wykonano fotometrię, wyznaczenie pozycji gwiazd. Wykorzystamy pomiary ruchów własnych dla tych samych gwiazd z pól NGC 3201-F1 i NGC 3201-F2 do oceny niepewności  $\mu$  związanej z metodami redukcji danych. Porównanie tych wyznaczeń w funkcji jasności V przedstawia Rys. 3.5. Dla 66% gwiazd różnica wyznaczeń  $\Delta\mu$  jest mniejsza niż 0.08 mas/yr, zaś dla 95% gwiazd  $\Delta\mu < 0.37$  mas/yr.

Miarę kompletności wyznaczeń dla gromady NGC 3201 wskazują Rys. 3.6 oraz 3.7. Na pierwszym z nich prezentowany jest ułamek z liczby gwiazd, dla których próba wyznaczenia ruchu własnego zakończyła się sukcesem. Jest to ponad 80% gwiazd jaśniejszych niż  $V \approx 20.0$ , po czym zmniejsza się do ponad 50% dla gwiazd jaśniejszych niż  $V \approx 21.5$ . Wyliczenia kompletności wyznaczeń przedstawionych na tym rysunku wykonano w przedziałach V = 12.5-15.0, następnie 15-16, 17-18 itd. aż do V = 21-22. Na kolejnym rysunku (Rys. 3.7) pokazano ułamek liczby gwiazd z wyznaczonymi ruchami własnymi w funkcji odległości od środka gromady (współrzędne środka wg Harris 1996). Ułamek liczby zmierzonych gwiazd wynosi 54% dla odległości r < 1 arcmin od środka gromady i rośnie do 86% w przedziale r = 3-4 arcmin. Mniejsza ilość wyznaczeń dla środka gromady wynika z dużej ilości gwiazd w jej centrum. Natomiast spadek dla gwiazd znajdujących się w odległości większej niż 4 arcmin związana jest ze zmniejszeniem się liczby obrazów, na których te gwiazdy były widoczne.

Na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.3) wyznaczono rozkłady  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  w sześciu przedziałach jasności V (Rys. 3.8) tak jak zostało opisane w paragrafie 2.3.4. Zestawienie otrzymanych statystyk ukazuje Tab. 3.2. Na podstawie statystyk  $\mu$  z 22 544 zmierzonych gwiazd za należące do



Rysunek 3.5: Różnica ruchów własnych gwiazd zmierzonych w polach NGC 3201-F1 i NGC 3201-F2.



Rysunek 3.6: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada NGC 3201.

gromady uznano 20 520 gwiazdy (91.0%), dla 318 gwiazd (1.4%) przynależność jest niepewna, natomiast 1 706 gwiazd (7.6%) uznano za nie należące do gromady.

# 3.2.2 Dyskusja

Rozróżnienie między gwiazdami tła a gwiazdami gromady jest znaczące (Rys 3.3). Ruch własny samej gromady jest relatywnie niewielki ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (5.28±0.32, -0.98±0.33) mas/yr (Casetti-Dinescu i in. 2007). Stąd też znaczna prędkość względna gwiazd tła wynika z ich prędkości własnej.



Rysunek 3.7: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada NGC 3201.

Tablica 3.2: Statystyki  $\mu$  dla przedziałów jasności w gromadzie NGC 3201.

V	$M_{lpha}$	$S_{\alpha}$	$M_{\delta}$	$S_{\delta}$	ME	SE
13–17	-0.005	0.319	-0.001	0.310	0.217	0.204
17–18	-0.010	0.282	0.005	0.302	0.208	0.239
18–19	-0.007	0.320	0.011	0.326	0.241	0.257
19–20	-0.002	0.358	0.008	0.360	0.365	0.275
20-21	0.007	0.445	-0.009	0.441	0.619	0.281
21-22	0.026	0.580	-0.050	0.581	0.926	0.235

W kierunku na gromadę znajdują się gwiazdy należące do ramienia Strzelca Galaktyki.

Na podstawie obserwacji wykonanych w filtrach *V* i *I* wykonano diagramy barwa jasność. Jasności otrzymano na podstawie kalibracji z 143 (pole NGC 3201-F1) oraz 121 (pole NGC 3201-F2) gwiazdami – standardami pośrednimi jak opisano w rozdziale 2.3.5. Wyznaczone przynależności gwiazd do gromady pozwalają na poprawienie diagramu CMD gromady, poprzez usunięcie z niego gwiazd nie przynależnych do gromady (mem=0). W lewym panelu Rys. 3.9 pokazano CMD dla wszystkich gwiazd ze zmierzonymi przynależnościami, gdzie czerwonym kolorem zaznaczono te które nie należą do gromady (mem=0). Natomiast prawy panel tego rysunku przedstawia diagram CMD jedynie z gwiazdami możliwie (mem=1) i należącymi do gromady (mem=2). Liczby gwiazd przedstawione na Rys. 3.9 różnią się od liczby gwiazd zmierzonych z powodu ich selekcji, ze względu na jakość fotometrii, opisanej w procedurze przedstawionej w rozdziale 2.3.6.



Rysunek 3.8: Rozkład  $\mu_{\alpha}cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  gwiazd w gromadzie NGC 3201 dla dwóch skrajnych (z sześciu) przedziałów jasności: V = 13-17 i V = 21-22. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 1.34 mas/yr (V = 13-17) oraz 2.46 mas/yr (V = 21-22).

Pierwszy katalog 56 gwiazd zmiennych w polu gromady NGC 3201 wydali Woods & Bailey (1919). Obecnie znamy ich ponad setkę. Listę i pozycje znanych gwiazd zmiennych w NGC 3201 uzyskano na podstawie prac: Clement i in. (2001), Samus i in. (2009), Layden & Sarajedini (2003), von Braun & Mateo (2002), pracy doktorskiej Pani Beaty Mazur (1996) oraz prywatnej korespondecji z Panią Christine Clement. W sumie w analizowanym polu gromady znaleziono około 150 gwiazd zmiennych lub podejrzanych o zmienność. Wśród nich dla 123 gwiazd dokonano pomiaru  $\mu$ i ocenę przynależności. Tab. 3.4 prezentuje zestawienie przynależności, zaś Tab. 3.3 opisuje użyte oznaczenia gwiazd zmiennych. Do gromady nie przynależą: układ podwójny rozdzielony - LS564 oraz V01; gwiazda z widoczną modulacją w krzywej blasku - V28; gwiazda S097, dla której Samus i in. (2009) nie podali typu zmienności; gwiazdy zmienne typu W UMa – V29 oraz V31, a także gwiazda oznaczona jako zmienna typu RR Lyr – LS171. Ruch własny tej ostatniej gwiazdy wynosi  $\mu = 12.2 \pm 0.6$  mas/yr, zatem jej przynależność jako członka gromady jest watpliwy. Pozostałe 81 gwiazd RR Lyr znaleziono jako przynależne do gromady (mem=2). Dla wszystkich 20 z 21 gwiazd typu SX Phe, które znalazły się w polach NGC 3201-F1, F2 zmierzono  $\mu$  i są one przynależne do gromady (mem=2). Gwiazda V05 znalazła się poza badanym obszarem. Sześć gwiazd podwójnych rozdzielonych należy do gromady (BMV-E1, BMV-E3, V09, V12, V18, V19). Trzy gwiazdy (V02, V26, V15) zmienne elipsoidalne oraz gwiazda prawdopodobnie należąca do zmiennych klasy RS CVn są przynależne do gromady. Kolejne trzy gwiazdy podwójne typu W UMa (V10, LS1218/BM3,

źródło	oznaczenie
Samus i in. (2009)	Sxxx
Layden & Sarajedini (2003)	LSxxxx
von Braun & Mateo (2002)	BMxx
praca doktorska Pani Beaty Mazur (1996)	Vxx
Pani Beata Mazur, korespondencja prywatna	BMV-Ex

Tablica 3.3: Oznaczenia gwiazd zmiennych użytych w Tab. 3.4 w kolumnie: 2, 5 i 8.

LS4396/BM2) na podstawie pomiaru ruchów własnych należą do gromady. Podobnie jest dla gwiazd oznaczonych jako *nova variable* – S70 i S74.

Gwiazdy zmienne, dla których wyznaczono jasności i kolor (V - I) przedstawione są na Rys. 3.10. Trzy układy rozdzielone BMV-E1, BMV-E3 i V12 znajdują się w pobliżu odejścia od ciągu głównego, V19 położone jest na CMD w obszarze BSS, natomiast układ V18 leży w obszarze zajmowanym przez podolbrzymy.

Na Rys. 3.11 przedstawiono pozycje na CMD gwiazd uznane za przynależne do gromady (mem=1, mem=2) wyróżniając większymi punktami gwiazdy położone w obszarze BSS oraz yellow stragglers. Łącznie za BSS i yellow stragglers uznano 88 gwiazd. Podobnie na Rys. 3.12 zaznaczono gwiazdy znacznie odbiegające od ciągu głównego zarówno po stronie niebieskiej (22 gwiazdy) jak i po stronie czerwonej (11 gwiazd). Dzięki jednoznacznemu rozdzieleniu gwiazd tła od gwiazd gromady (Rys. 3.3) gwiazdy leżące w nietypowych obszarach na CMD można uznać za niemal pewne. Aby mieć całkowitą pewność ich przynależności do gromady należy zmierzyć prędkośc radialną oraz sprawdzić czy gwiazdy te nie są blendami (co zmienia ich jasności) – gwiazdami leżącymi małej w odległości kątowej od siebie – np. z pomocą obrazów uzyskanych przez HST.

Dla gromady NGC 3201 pominięto analizę gwiazd podwójnych na ciągu głównym ze względu na znaczną szerokość ciągu głównego na diagramach CMD. Jest ona spowodowana nie uwzględnieniem w analizie zmiennej ekstynkcji w polu gromady oraz poprawek aperturowych. Zmienna ekstynkcja przejawia się np. w szerokości ciągu podolbrzymów (patrz Rys. 3.12) czy też w punkcie TO (patrz Rys. 3.11).

ID	nazwa	mem	ID	nazwa	mem	ID	nazwa	mem
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
2240011	S001	2	1326152	S050	2	1336408	LS0274	2
2240014	S002	2	1436063	S051	2	2120005	LS0278	2
1136027	S003,LS0285	2	1436070	S070	2	1220006	LS0281	2
2136076	S004	2	1446131	S071	2	1236325	LS0284	2
2230032	S005	2	1326145	S073	2	1210005	LS0564	0
2340002	S006, LS0257	2	1326360	S074	2	2330045	LS0651	2
1346073	S007, LS0208	2	1326334	S075, LS0272	2	1320045	LS0752	1
1336127	S008, LS0213	2	2230019	S076, LS0288	2	1330087	LS0941	2
1336360	S009	2	1336328	S077	2	1440017	LS0967,BM4,V29	0
1416022	S010,	LS0339	1240003	S078	2	1140010	LS1019	2
1326341	S011, LS0186	2	1222891	S080	2	1410026	LS1120, BM12, V01	0
2320006	S012, LS0344	2	1146004	S082	2	1220084	LS1218, BM3	2
1426050	S013	2	1110001	S083, LS0283	2	1230425	LS4396, BM2	2
1426079	S014, LS0358	2	1336387	S090	2	1440020	BMV, 331	0
2440004	S015, LS0133	2	1436075	S092	2	1310036	V02	2
1230003	S017	2	1436087	S097	0	1210020	V06	2
1236171	S018	2	1336409	S098	2	1320035	V07	2
2210005	S019	2	1336253	S099	2	1320074	V08	2
1216101	S020, LS0120	2	1336376	S100	2	2420024	V09	2
2126242	S021, LS0287	2	2426085	LS0134	2	1220314	V10	2
2330011	S022, LS0260	2	1336293	LS0160	2	1320084	V11	2
2236240	S023	2	1236244	LS0167	2	1420085	V12	2
2126092	S025, LS0331	2	2120001	LS0171	0	1220082	V13	2
2136105	S028	2	2226123	LS0173	2	1330079	V14	2
1426081	S029, LS0244	2	1246033	LS0175	2	1330113	V15	2
2416057	S030	2	1416026	LS0179	2	1230058	V16	2
2120012	S031, LS0286	2	2226125	LS0181	2	1230029	V17	2
1116054	S032	2	1426067	LS0188	2	1330081	V18	2
2230021	S033, LS0297	2	2136081	LS0199	2	1236281	V19	2
1326347	S035	2	1236155	LS0211	2	1230033	V20	2
2330017	S036, LS0165	2	2240005	LS0218	2	1230107	V21	2
1336261	S037	2	1220004	LS0223	2	1330080	V22	2
1336351	S038, LS0329	2	1236262	LS0232	2	1230043	V23	2
2236375	S039, LS0330	2	2120003	LS0233	2	1130021	V24	2
1326134	S040, LS300	2	1220005	LS0240	2	1440010	V25	2
2420002	S042	2	1246050	LS0243	2	1340037	V26	2
2226108	S044	2	1436078	LS0247	2	1240021	V27	2
2136082	S045	2	2130005	LS0251	2	1240047	V28	0
1216043	S047, LS0161	2	1246042	LS0256	2	1340030	V30	2
1436071	S048	2	1336379	LS0258	2	1320346	BMV-E1	2
1326337	S049, LS0212	2	1226087	LS0269	2	1210068	BMV-E3	2

Tablica 3.4: Przynależności gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w NGC 3201.



Rysunek 3.9: Diagramy barwa-jasność V/(V-I) dla gromady NGC 3201. Po lewej diagram zawierający gwiazdy dla, których zmierzono  $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czerwone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).



Rysunek 3.10: Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie V/(V-I). Gromada NGC 3201. Trójkąty – zmienne typu W UMa, okręgi – pulsujące typu SX Phe, romby – RR Lyr, czarnymi kołami – gwiazdy pulsujące, odwrócone trójkąty – gwiazdy z modulacją modulację lub układy ellipsoidalne, przekreślenia – obiekty, które nie przynależą do gromady na podstawie wyznaczonych w pracy ruchów własnych, kwadraty – układy podwójne rozdzielone (EA), które dodatkowo nazwano.



Rysunek 3.11: Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie V/(V-I) w obszarze gwiazd BSS oraz TO. Większe punkty oznaczają gwiazdy kandydatki na blue/yellow stragglers. Gromada NGC 3201.



Rysunek 3.12: Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie V/(V - I). Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono większymi punktami, zaś po stronie czerwonej od ciągu głównego i podolbrzymów zaznaczno rombami. Gromada NGC 3201.

# 3.3 Gromada Messier 4

#### 3.3.1 Rezultaty

Wykres prędkości własnych gwiazd w polu gromady Messier 4 przedstawia Rys. 3.13. Łącznie uzyskano wyznaczenia  $\mu$  dla około 13 tysięcy gwiazd. Zgrubna ocenę przynależności gwiazd do gromady można wykonać na podstawie samego Rys. 3.13. Gwiazdy należące do gromady umiejscowione są w pobliżu punktu ( $\mu_{\alpha} cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (0, 0) mas/yr, natomiast grupa gwiazd o znacznych ruchach własnych do gromady nie należy. Liczba gwiazd, dla których wyznaczony ruch własny jest mniejszy niż  $\mu_l = 4$  mas/yr wynosi  $N_{\mu < \mu_l} = 12$  147, zaś liczba gwiazd szybszych  $N_{\mu \ge \mu_l} = 889$ , czyli około 6.8% całkowitej liczby gwiazd, dla jakich zmierzono PM. Łącznie 11 gwiazd znajduje się poza obszarem przedstawionym na Rys. 3.13, ich całkowite prędkości własne są w przedziale 18.8–41.9 mas/yr.



Rysunek 3.13: Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady M 4.

Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w polu gromady w funkcji jasności przedstawia Rys. 3.14. Widać liniową zależność między  $log_{10}\sigma_{\mu}$  a jasnością gwiazd V. Jest ona dobrze widoczna dla gwiazd słabszych niż V = 16.5. Dla gwiazd o jasności V  $\approx$  19.0 mediana  $\sigma_{\mu}$  wynosi 0.67 mas/yr, zaś dla V  $\approx$  20.0 mediana zwiększa się do  $\sigma_{\mu}$  = 1.11 mas/yr. Wzrost niepewności związany jest z coraz mniejszym stosunkiem sygnału do szumu na *obrazach uśrednionych*. Rozrzut punktów związany jest pośrednio z metodami redukcji danych np. transformacją współrzędnych, wyznaczaniem ruchów własnych a w szczególności ilością danych użytych w tych obliczeniach. Większe wartości niepewności dla gwiazd jaśniejszych od V < 14.0 związane są z ich saturacją na niektórych *obrazach uśrednionych*, zatem i mniejszą ilością pomiarów pozycji.



Rysunek 3.14: Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada M 4.

Ruchy własne zostały pomierzone odrębnie dla pól M4-F1 i M4-F2, stąd dla 10 385 gwiazd występujących zarówno w polu F1 jak i F2 zmierzono je dwukrotnie. Porównanie tych wyznaczeń w funkcji jasności V przedstawia Rys. 3.15. Dla 66% gwiazd różnica wyznaczeń  $\Delta\mu$  jest mniejsza niż 0.16 mas/yr, zaś dla 95% gwiazd  $\Delta\mu$  < 0.75 mas/yr. Porównanie pomiarów z pól M4-F1 i M4-F2 daje oszacowanie rzędu wielkości niepewności związanych z jakością danych obserwacyjnych.



Rysunek 3.15: Różnica ruchów własnych zmierzonych w polach F1 i F2. Gromada M 4.

Miarę kompletności wyznaczeń dla gromady Messier 4 wskazują Rys. 3.16 oraz 3.17. Na pierw-

szym z nich prezentowany jest ułamek z liczby gwiazd, dla których próba wyznaczenia ruchu własnego zakończyła się sukcesem. Jest to około 90% dla gwiazd z przedziału V = 14.0-19.0, zaś około 50% dla gwiazd w przedziale V = 11.25-14.0 i dla jasności  $V \approx 20.5$ . Wyliczenia kompletności wyznaczeń przedstawionych na tym rysunku wykonano w przedziałach V = 11.25-14.0, następnie 14-15, 15-16 itd. aż do V = 21-21.55. Na kolejnym rysunku (Rys. 3.17) pokazano ułamek liczby gwiazd z wyznaczonymi ruchami własnymi w funkcji odległości od środka gromady (współrzędne środka wg Harris 1996). Ułamek ten wynosi 66% gwiazd dla odległości r < 1 arcmin od środka gromady i rośnie do 85% w przedziale r = 2-3 arcmin. Mniejsza ilość wyznaczeń dla środka gromady wynika z dużej ilości gwiazd w jej centrum, natomiast spadek dla gwiazd w odległości większej niż 4 arcmin związana jest ze zmniejszeniem się liczby obrazów, na których te gwiazdy były widoczne.



Rysunek 3.16: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada M 4.

Na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.13) wyznaczono rozkłady  $\mu_{\alpha}cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  w pięciu przedziałach jasności V (Rys. 3.18) tak jak zostało opisane w paragrafie 2.3.4. Zestawienie otrzymanych statystyk ukazuje Tab. 3.5. Na podstawie statystyk  $\mu$  z 13 036 zmierzonych gwiazd za należące do gromady uznano 11 326 gwiazdy (86.9%), dla 233 gwiazd (1.8%) przynależność jest niepewna, natomiast 1 477 gwiazd (11.3%) uznano za nienależące do gromady.

## 3.3.2 Dyskusja

Rozróżnienie między gwiazdami tła a gwiazdami gromady jest wyraźne. Jest to przede wszystkim odzwierciedlenie ruchu własnego samej gromady ( $\mu_{\alpha} cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (-12.50±0.36, -20.02±0.49) mas/yr (Dinescu i in. 1999).

Na podstawie obserwacji wykonanych w filtrach B i V wykonano diagramy barwa jasność. Ja-



Rysunek 3.17: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada M 4.

V	$M_{lpha}$	$S_{\alpha}$	$M_{\delta}$	$S_{\delta}$	ME	SE
12.7–17	0.038	0.574	-0.007	0.551	0.249	0.276
17–18	0.056	0.571	-0.014	0.578	0.307	0.291
18–19	-0.048	0.624	0.008	0.630	0.475	0.350

0.035

0.053

0.709

0.741

0.762

1.026

0.426

0.594

19-20

20-22

-0.148

-0.165

0.694

0.718

Tablica 3.5: Statystyki  $\mu$  dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 4.

sności otrzymano na podstawie kalibracji z 4 108 (pole M4-F1) oraz 4 757 (pole M4-F2) gwiazdami – standardami pośrednimi jak opisano w rozdziale 2.3.5. Wyznaczone przynależności gwiazd do gromady pozwoliły na wykonanie diagramów, wskazujących kontaminację CMD gwiazdami tła. W lewym panelu Rys. 3.19 pokazano CMD dla wszystkich gwiazd ze zmierzonymi przynależnościami. Natomiast prawy panel tego rysunku przedstawia diagram CMD jedynie z gwiazdami możliwie i należące do gromady (mem=1, mem=2). Liczby gwiazd przedstawione na Rys. 3.19 różni się od liczby gwiazd zmierzonych z powodu ich selekcji, ze względu na jakość fotometrii, opisanej w procedurze przedstawionej w rozdziale 2.3.6.

Listy gwiazd zmiennych w gromadzie Messier 4 zebrano na podstawie prac: Clement i in. (2001; oznaczone Vxx) i katalogu online, Kaluzny i in. (1997; oznaczone JKxx) oraz listy przekazanej przez promotora pracy (oznaczone JKP-xxxxx). W sumie ze 101 gwiazd zmiennych (lub podejrzanych o zmienność), 71 z nich znajduje się w analizowanym w tej pracy polu. Dla 42 gwiazd wyznaczono ruch



Rysunek 3.18: Rozkład  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  gwiazd w gromadzie Messier 4 dla dwóch skrajnych (z ogółem pięciu) przedziałów jasności V = 12.7-17 i V = 20-22. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 2.41 mas/yr (V = 12.7-17) oraz 3.10 mas/yr (V = 20-22).

własny i określono przynależność do gromady. Większość z nich jest przynależna do gromady (mem = 2). Gwiazdy zmienne, dla których wyznaczono jasności i kolor (B - V) przedstawione są na Rys. 3.20. W UMa (V68) nie przynależy do gromady na podstawie  $\mu$ . Również Kaluzny i in. (1997) określił V68 jako nie przynależną do gromady na podstawie zależności Rucińskiego dla gwiazd W UMa. Gwiazdy JKP-V11888 oraz JKP-V10989 są interesującymi zmiennymi zaćmieniowymi, rozdzielonymi leżącymi na ciągu głównym gwiazd. Zestawienie gwiazd zmiennych, wraz z wyznaczonymi przynależnościami przedstawia Tab. 3.6.

Na Rys. 3.21 i 3.22 pokazano CMD z wyróżnionymi gwiazdami należącymi do gromady na podstawie wyznaczonych w tej pracy ruchów własnych i znajdującymi się w nietypowych obszarach na CMD. W obszarze BSS znalazły się 33 gwiazdy (Rys. 3.21), wytypowano 14 gwiazd po stronie niebieskiej od ciągu głównego (Rys. 3.22; oznaczone większymi punktami) oraz 1 gwiazdę po stronie czerwonej (oznaczona symbolem rombu). Dzięki jednoznacznemu rozdzieleniu gwiazd tła od gwiazd gromady (Rys. 3.13) gwiazdy leżące w nietypowych obszarach na CMD można uznać za niemal pewne.

Dla gromady Messier 4 pominięto analizę gwiazd podwójnych na ciągu głównym ze względu na znaczną ekstynkcję różnicową. Ekstynkcja różnicowa powoduje poszerzenie charakterystycznych ciągów gwiazd na CMD, uniemożliwiając jego wnikliwą analizę.
nazwa	ID	mem	nazwa	ID	mem	nazwa	ID	mem
V02	-	-	V38	2336056	-	V74, JK55, JKP-220379	1310077	2
V04	-	-	V39	V39 2326203 – V77		-	_	
V05	2436020	-	V40	-	-	V78	-	_
V07	1436097	2	V41	1126008, 2236026	2	JKP-120021	2120275	2
V08	1336138	2	V44	1346074	-	JKP-120869	1210481	2
V09	1336347, 2416059	2	V45	1126056, 2336095	2	JKP-120874	1210058	2
V10	1436012	2	V46	1126009, 2336057	2	JKP-130444	1110414	_
V11	2346082	-	V47	2336070	-	JKP-140095	2140153	2
V12	1136012, 2336136	2	V48	2326160	-	JKP-140266	1110337	_
V14	1136022, 2346083	2	V49	1316021, 2226044	2	JKP-210789	1326463	2
V16	1336152, 2316099	1	V50	1326371	-	JKP-211387	1321495	2
V17	1336244	-	V51	2436027	-	JKP-211515	1420328	2
V18	1326256	2	V52	1346097, 2416055	1	JKP-230456	1221219	_
V20	2326159	-	V63, JK44, JKP-430897	1240170	2	JKP-310227	1420470	2
V21	1326134	-	V64, JK45	-	-	JKP-311625	1330277	2
V22	1326385	2	V65, JK46, JKP-120916	1210360	2	JKP-311902	1430043	2
V23	1226438	-	V66, JK47	1430059	2	JKP-312185	1330764	2
V24	1326246	0	V67, JK48	-	-	JKP-312189	1331758	_
V25	1326245	2	V68, JK49	1231710	0	JKP-321973	1330658	2
V26	1226089, 2226058	2	V69, JK50	1230360	2	JKP-410363	1430356	_
V27	1426012	-	V70, JK51	1330345	2	JKP-450228	1236200	2
V28	1316120	2	V71, JK52	1330277	2	JKP-V11888	2320353	_
V36	_	-	V72, JK53	1220046	2	JKP-V10989	1331758	-
V37	1336150, 2326247	0	V73, JK54	1110137	2			

Tablica 3.6: Przynależność gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w Messier 4.



Rysunek 3.19: Diagramy barwa-jasność V/(B-V) dla gromady Messier 4. Po lewej diagram zawierający gwiazdy dla, których zmierzono  $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czerwone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).



Rysunek 3.20: Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie V/(B - V). Trójkąty – gwiazdy zaćmieniowe (W UMa i EA), romby – inne gwiazdy zmienne, przekreślenie – gwiazda nie przynależna do gromady. Gromada Messier 4.



Rysunek 3.21: Obszar gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie V/(B - V). Przedstawiono jedynie gwiazdy należące do gromady (mem=1 lub mem=2). Większe punkty oznaczają gwiazdy kandydatki BSS i yellow stragglers. Gromada Messier 4.



Rysunek 3.22: Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie V/(V - I). Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego i BSS zaznaczono większymi punktami, zaś gwiazdę leżącą po stronie czerwonej od podolbrzymów zaznaczno rombem. Gromada Messier 4.

# 3.4 Gromada Messier 12

### 3.4.1 Rezultaty

Wykres prędkości własnych gwiazd w polu gromady Messier 12 przedstawia Rys. 3.23. Łącznie uzyskano wyznaczenia  $\mu$  dla około 12.6 tysiąca gwiazd. Zgrubną ocenę przynależności gwiazd do gromady można wykonać na podstawie samego Rys. 3.23. Gwiazdy należące do gromady umiejscowione są w pobliżu punktu ( $\mu_{\alpha} cos \delta, \mu_{\delta}$ ) = (0, 0) mas/yr, natomiast grupa gwiazd o znacznych ruchach własnych do gromady nie należy. Liczba gwiazd, dla których wyznaczony ruch własny jest mniejszy niż  $\mu_l = 3$  mas/yr wynosi  $N_{\mu < \mu_l} = 12$  363, zaś gwiazd szybszych  $N_{\mu \ge \mu_l} = 292$  (około 2.3% całkowitej liczby zmierzonych gwiazd). Najszybsze dwie gwiazdy znajdują się poza obszarem przedstawionym na Rys. 3.23, ich całkowite prędkości własne wynoszą 53.2 i 56.1 mas/yr.



Rysunek 3.23: Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady M 12.

Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w polu gromady w funkcji jasności przedstawia Rys. 3.24. Widać liniową zależność między  $log_{10}\sigma_{\mu}$  a jasnością gwiazd V. Jest ona dobrze widoczna dla gwiazd słabszych niż V = 17.5. Dla gwiazd o jasności V  $\approx$  19.0 mediana  $\sigma_{\mu}$  wynosi 0.59 mas/yr, zaś dla V  $\approx$  20.0 mediana zwiększa się do  $\sigma_{\mu}$  = 0.89 mas/yr. Wzrost niepewności związane jest z coraz mniejszym stosunkiem sygnału do szumu. Rozrzut punktów związany jest pośrednio z metodami redukcji danych np. transformacją współrzędnych, wyznaczaniem ruchów własnych a w szczególności ilością danych użytych w tych obliczeniach.



Rysunek 3.24: Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada M 12.

Miarę kompletności wyznaczeń dla gromady Messier 12 wskazują Rys. 3.25 oraz 3.26. Na pierwszym z nich prezentowany jest ułamek z liczby gwiazd, dla których próba wyznaczenia ruchu własnego zakończyła się sukcesem. Jest to około 90% dla gwiazd z przedziału V = 15.0-16.0, następnie wraz ze zmniejszającą jasnością stopniowo dla coraz to mniejszej ilości gwiazd wyznaczano  $\mu$  np. dla  $V \approx 20.5$  wynosi on 46.5%. Wyliczenia kompletności wyznaczeń przedstawionych na tym rysunku wykonano w przedziałach V = 11.90-15.0, następnie 15-16, 16-17 itd. aż do V = 21-22. Na kolejnym rysunku (Rys. 3.26) pokazano ułamek liczby gwiazd z wyznaczonymi ruchami własnymi w funkcji odległości od środka gromady (współrzędne środka wg Harris 1996). Ułamek ten wynosi zaledwie 17% gwiazd dla odległości r < 1 arcmin od środka gromady i rośnie do 76% w przedziałe r = 3-5arcmin. Mniejsza ilość wyznaczeń dla środka gromady wynika z dużej ilości gwiazd w jej centrum.

Na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.23) wyznaczono rozkłady  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  w sześciu przedziałach jasności V (Rys. 3.27) tak jak zostało opisane w paragrafie 2.3.4. Zestawienie otrzymanych statystyk ukazuje Tab. 3.7. Na podstawie statystyk  $\mu$  z 12 654 zmierzonych gwiazd za należące do gromady uznano 11 758 gwiazdy (92.9%), dla 60 gwiazd (0.5%) przynależność jest niepewna, natomiast 836 gwiazd (6.6%) uznano za nie należące do gromady.

## 3.4.2 Dyskusja

Rozróżnienie między gwiazdami tła a gwiazdami gromady na podstawie diagramu VPD nie jest wyraźne. Mimo to ruch własny samej gromady jest relatywnie duży ( $\mu_{\alpha} cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (1.30±0.58, -7.83±0.62) mas/yr (Dinescu i in. 1999). Gromada leży w kierunku ramienia Strzelca i centrum Galaktyki.

Na podstawie obserwacji wykonanych w filtrach B i V wykonano diagramy barwa jasność. Jasno-



Rysunek 3.25: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada M 12.



Rysunek 3.26: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada M 12.

ści otrzymano na podstawie kalibracji z 5 gwiazdami – standardami pośrednimi jak opisano w rozdziale 2.3.5. Wyznaczone przynależności gwiazd do gromady pozwoliły na wykonanie diagramów CMD uwzględniające informację o przynależności gwiazd do gromady. W lewym panelu Rysu. 3.28 pokazano CMD dla wszystkich gwiazd ze zmierzonymi przynależnościami, zaznaczono również te nie należące do gromady (mem=0). Natomiast prawy panel tego rysunku przedstawia diagram CMD jedynie z gwiazdami możliwie (mem=1) i należącymi do gromady (mem=2). Liczby gwiazd odnotowane na Rys. 3.28 różni się od liczby gwiazd zmierzonych z powodu ich selekcji, opisanej w



Rysunek 3.27: Rozkład  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  gwiazd w gromadzie Messier 12 w dwóch (z sześciu) przedziałów jasności V = 13.4-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 1.85 mas/yr (V = 13.4-17) oraz 2.60 mas/yr (V = 20-21).

procedurze przedstawionej w rozdziale 2.3.6.

W polu gromady Messier 12 znanych jest co najmniej 30 gwiazd zmiennych. Z czego 1 gwiazdę zmienną wymienia katalog Clement i in. (2001; oznaczenie Vx), 2 gwiazdy praca von Braun i in. (2002; oznaczenie vBx), pozycje 28 gwiazd udostępnił promotor tej pracy (oznaczenie JKxxxx). Zestawienie tych gwiazd przedstawia Tab. 3.8. W obszarze, w jakim analizowano ruchy własne znalazło się 27 gwiazd zmiennych, gwiazdy które znalazły się poza obserwowanym polem oznaczono w kolumnie *mem* symbolem (\*). Łącznie dla 16 gwiazd uzyskano wartość ruchu własnego, na ich podstawie wszystkie przynależą do gromady (mem=2). Pozycje na diagramie CMD dla 15 z 16 gwiazd zmiennych, dla których uzyskano wyznaczenie ruchu własnego przedstawia Rys. 3.29. Pominięto gwiazdę JK24 o jasności V  $\approx$  14.67, znajdującej się na gałęzi czerownych olbrzymów. Łącznie 8 gwiazd znajduje się w obszarze BSS, 1 gwiazda w rejonie zajmowanych przez yellow stragglers (żółtych maruderów), 1 gwiazda tuż za punktem odejścia od ciągu głównego, zaś pozostałe 4 gwiazdy zmienne położone są na ciągu głównym.

Na Rys. 3.30 przedstawiono pozycje na CMD gwiazd przynależnych uznanych za przynależne do gromady (mem=1, mem=2) wyróżniając większymi punktami gwiazdy położone w obszarze BSS oraz yellow stragglers. Łącznie za BSS i yellow stragglers uznano 70 gwiazd. Podobnie na Rys. 3.31 zaznaczono gwiazdy znacznie odbiegające od ciągu głównego zarówno po stronie niebieskiej (9 gwiazdy) jak i po stronie czerwonej (30 gwiazd). Na obu rysunkach zastosowano selekcję gwiazd ze

V	$M_{lpha}$	$S_{\alpha}$	$M_\delta$	$S_{\delta}$	ME	SE
13.4–17	-0.030	0.448	-0.058	0.425	0.379	0.293
17–18	-0.034	0.389	0.004	0.393	0.387	0.306
18–19	-0.012	0.405	0.004	0.393	0.456	0.306
19–20	0.029	0.468	0.019	0.465	0.692	0.317
20-21	-0.009	0.610	0.012	0.617	1.048	0.379
21–21.8	0.010	0.741	0.038	0.756	1.301	0.706

Tablica 3.7: Statystyki  $\mu$  dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 12.

Tablica 3.8: Przynależność gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w Messier 12.

nazwa	ID	mem	nazwa	ID	mem	nazwa	ID	mem
JK1	220092	2	JK11	330646	-	JK21	240049	-
JK2, vBV1	220713	2	JK12	326745	-	JK23	310023	2
JK3	-	-	JK13=JK22=JK286	340023	2	JK24	310001	2
JK4	230052	2	JK14	326603	-	JK25	321712	2
JK5	220757	2	JK15	330333	-	JK26	440150	2
JK6	221187	-	JK16	320174	2	JK27	(*)	-
JK7	230063	2	JK17	330172	-	JK3400	324759	-
JK8	220045	2	JK18	330377	2	JK4602	320184	-
JK9	226205	-	JK19	321096	2	V1	(*)	-
JK10	336227	2	JK20	430034	2	vBV2	(*)	-



Rysunek 3.28: Diagramy barwa-jasność V/(B - V) dla gromady Messier 12. Po lewej diagram zawierający gwiazdy dla, których zmierzono  $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czerwone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).

względu na jakość fotometrii opisanej w rozdziale 2.3.6. Ze względu na niejednoznaczne rozdzielenie gwiazd należnych i nie przynależnych do gromady, należy być ostrożnym co do przynależności wyselekcjonowanych gwiazd. Część z gwiazd, dla których ruch własny jest bliski zeru wcale nie musi być przynależna do gromady, różniąc się od ruchu gromady prędkością radialną a nie ruchem własnym. Aby sprawdzić ile takich gwiazd może znajdować się poza typowymi miejscami na CMD wybrano na podstawie ruchów własnych (Rys. 3.23) 67 gwiazd tła (w promieniu o rozmiarze  $\mu_l = 3$  mas/yr wokół punktu ( $\mu_{\alpha} cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ )=(3.3, 5.0) mas/yr; arbitralnie). Spośród tych gwiazd 25 znajduje się w obszarze CMD, w którym zaznaczono gwiazd leżących po stronie czerwonej od ciągu głównego, 2 gwiazdy tła w obszarze BSS i yellow stragglers oraz żadna po stronie niebieskiej od ciągu głównego. To zgrubne oszacowanie gwiazd tła o niewielkim ruchu własnym względem gromady wskazuje, że gwiazdy znajdujące się po stronie czerwonej od ciągu głównego oraz gałęzi olbrzymów, jednocześnie należące do gromady mogą być gwiazdami tła. Natomiast gwiazdy po stronie niebieskiej oraz w obszarze BSS/yellow stragglers są pewnymi członkami gromady (na podstawie  $\mu$ ). Aby mieć całkowitą pewność przynależności do gromady należy zmierzyć prędkość radialną oraz sprawdzić czy gwiazdy te nie są blendami.

Dla gromady Messier 12 pominięto analizę gwiazd podwójnych na ciągu głównym.



Rysunek 3.29: Gwiazdy zmienne zaznaczono trójkątami na wykresie V/(B - V). Zaznaczono jedynie gwiazdy należące do gromady (mem=1 i mem=2). Gromada Messier 12.



Rysunek 3.30: Obszar gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie V/(B - V). Większe punkty oznaczają gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers. Gromada Messier 12.



Rysunek 3.31: Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie V/(B - V). Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono większymi punktami, zaś gwiazdy leżące po stronie czerwonej ciągu głównego i od podolbrzymów zaznaczno rombami. Gromada Messier 12.

# 3.5 Gromada NGC 6362

## 3.5.1 Rezultaty

Wykres prędkości własnych gwiazd w polu gromady NGC 6362 przedstawia Rys. 3.32. Łącznie uzyskano wyznaczenia  $\mu$  dla około 11.8 tysiąca gwiazd. Zgrubna ocenę przynależności gwiazd do gromady można wykonać na podstawie samego Rys. 3.32. Gwiazdy prawdopodobnie należące do gromady umiejscowione są w pobliżu punktu ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (0, 0) mas/yr, natomiast grupa gwiazd o znacznych ruchach własnych (> 4 mas/yr) zapewne do gromady nie należy. Liczba gwiazd, dla których wyznaczony ruch własny jest mniejszy niż  $\mu_l$  = 4 mas/yr wynosi  $N_{\mu < \mu_l}$  = 11 158, zaś gwiazd szybszych  $N_{\mu \geq \mu_l}$  = 630, czyli około 2.3% z całkowitej liczby zmierzonych gwiazd. W sumie 7 gwiazd znajduje się poza obszarem przedstawionym na Rys. 3.32, ich całkowite prędkości własne są w przedziale 18.9–82.3 mas/yr.



Rysunek 3.32: Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady NGC 6362.

Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w polu gromady w funkcji jasności przedstawia Rys. 3.33. Widać liniową zależność między  $log_{10}\sigma_{\mu}$  a jasnością gwiazd V. Jest ona dobrze widoczna dla gwiazd słabszych niż V = 18.0. Dla gwiazd o jasności V ≈ 19.0 mediana  $\sigma_{\mu}$  wynosi 0.48 mas/yr, zaś dla  $V \approx 20.0$  mediana zwiększa się do  $\sigma_{\mu} = 1.62$  mas/yr. Wzrost niepewności związane jest z coraz mniejszym stosunkiem sygnału do szumu. Za rozrzut wartości niepewności dla gwiazd o podobnej jasności odpowiedzialne są metody redukcji danych np. transformacja współrzędnych, wyznaczanie ruchów własnych oraz ilość danych użytych w obliczeniach.



Rysunek 3.33: Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada NGC 6362.

Miarę kompletności wyznaczeń dla gromady NGC 6362 wskazują Rys. 3.34 oraz 3.35. Na pierwszym z nich prezentowany jest ułamek z liczby gwiazd, dla których próba wyznaczenia ruchu własnego zakończyła się sukcesem. Jest to około 90% dla gwiazd z przedziału V = 15.0-17.5, następnie wraz ze zmniejszającą jasnością stopniowo dla coraz to mniejszej ilości gwiazd wyznaczano  $\mu$  np. dla  $V \approx 20.5$  wynosi on 51.1%. Wyliczenia kompletności wyznaczeń przedstawionych na tym rysunku wykonano w przedziałach V = 12.6-15.0, następnie 15-16, 16-17 itd. aż do V = 21-21.5. Na kolejnym rysunku (Rys. 3.35) pokazano ułamek liczby gwiazd z wyznaczonymi ruchami własnymi w funkcji odległości od środka gromady (współrzędne środka wg Harris 1996). Ułamek ten wynosi tylko 28% gwiazd dla odległości r < 1 arcmin od środka gromady i rośnie do 70% w przedziałe r = 3-5 arcmin. Mniejsza ilość wyznaczeń dla środka gromady wynika ze sporej gęstości gwiazd w jej centrum.

Na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.32) wyznaczono rozkłady  $\mu_{\alpha}cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  w sześciu przedziałach jasności V (Rys. 3.36) tak jak zostało opisane w paragrafie 2.3.4. Zestawienie otrzymanych statystyk ukazuje Tab. 3.9. Na podstawie statystyk  $\mu$  z 11 781 zmierzonych gwiazd za należące do gromady uznano 9 970 gwiazdy (84.6%), dla 167 gwiazd (1.4%) przynależność jest niepewna, natomiast 1 644 gwiazd (14.0%) uznano za nienależące do gromady.



Rysunek 3.34: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada NGC 6362.



Rysunek 3.35: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada NGC 6362.

## 3.5.2 Dyskusja

Rozróżnienie między gwiazdami tła a gwiazdami gromady na podstawie diagramu VPD nie jest wyraźne, populacje znacznie się na siebie nakładają. Ruch własny samej gromady jest relatywnie mały ( $\mu_{\alpha} cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (-2.85±0.46, -4.08±0.46) mas/yr (Dinescu i in. 1999) co przekłada się na znaczną trudność rozróżnienia gwiazd tła od gromady. NGC 6362 leży w kierunku ramienia Strzelca Galaktyki, zatem zapewne obserwujemy gwiazdy tła należące do niego.

V	$M_{lpha}$	$S_{\alpha}$	$M_{\delta}$	$S_{\delta}$	ME	SE
13–17	0.067	0.494	-0.004	0.457	0.268	0.180
17–18	0.009	0.518	0.013	0.575	0.290	0.242
18–19	-0.003	0.602	-0.018	0.586	0.397	0.288
19–20	-0.008	0.752	0.004	0.722	0.628	0.305
20–21	0.040	1.113	-0.016	1.070	1.068	0.324
21–22	0.254	1.305	-0.024	1.359	1.564	0.274

Tablica 3.9: Statystyki  $\mu$  dla przedziałów jasności w gromadzie NGC 6362.

Na podstawie obserwacji wykonanych w filtrach *B* i *V* wykonano diagramy barwa jasność. Jasności otrzymano na podstawie kalibracji z 4 108 gwiazdami – standardami pośrednimi jak opisano w rozdziale 2.3.5. Wyznaczone przynależności gwiazd do gromady pozwoliły na wykonanie diagramów, wskazujących kontaminację CMD gwiazdami tła. W lewym panelu Rys. 3.37 pokazano CMD dla wszystkich gwiazd ze zmierzonymi przynależnościami, zaznaczono również te gwiazdy które nie należą do gromady (mem=0). Natomiast prawy panel tego rysunku przedstawia diagram CMD jedynie z gwiazdami możliwie i należącymi do gromady (mem=1, mem=2). Liczby gwiazd przedstawione na Rys. 3.37 różnią się od liczby gwiazd zmierzonych z powodu ich selekcji, opisanej w procedurze przedstawionej w rozdziale 2.3.6.

W polu gromady znaleziono 52 gwiazd zmiennych (Sawyer Hogg 1973; Clement i in. 1995; Mazur i in. 1999; dane przekazane przez promotora pracy). Spośród nich 36 to gwiazdy RR Lyr, 4 to gwiazdy SX Phe, 5 to podwójne układy rozdzielone EA, 1 gwiazda klasy W UMa, 3 układy kontaktowe (EW), 1 gwiazda zaćmieniowa nieznanego typu oraz 2 zmienne wykazujące modulacje jasności. W polu gromady analizowanym w tej pracy znalazło się w sumie 38 z tych gwiazd, spośród których dla 35 wyznaczono ruchy własne. Wszystkie te gwiazdy są przynależne do gromady. Nie wyznaczono ruchów własnych dla gwiazd V15, V16, V36, które są gwiazdami zmiennymi typu RR Lyr. Ich średnia obserwowana jasność jest typowa dla gwiazd RR Lyr gromady NGC 6362 zwiazku z tym ich przynależność do niej jest pewna. Dla wszystkich gwiazd RR Lyr z wyznaczonymi ruchami własnymi (N = 25) przynależność do gromady jest pewna. Potwierdzamy przynależność układów rozdzielonych V40, V41, JK-V6840 i JK-V15923 (gwiazda V42 znalazła się poza analizowanym polem). Gwiazdy typu SX Phe: V38, V46, V47 i V48 na podstawie ruchów własnych przynależa do gromady. Również do gromady przynależy gwiazda zmienna z modulacja w krzywej blasku – V49. Nie udało się potwierdzić przynależności dla 3 gwiazd typu W UMa (V43, V45, V52), znalazły się poza analizowanym polem. Udało się natomiast potwierdzić przynależność do gromady gorącego podkarła z pracy Mazur et. al 1999. W Tab. 3.10 znajduje się lista gwiazd zmiennych oraz informacja



Rysunek 3.36: Rozkład  $\mu_{\alpha}cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  gwiazd w gromadzie NGC 6362 dla dwóch (z sześciu) przedziałów jasności V = 13.2-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 2.09 mas/yr (V = 12.7-17) oraz 4.63 mas/yr (V = 20-21).

dotycząca wyznaczenia przynależności w tej pracy oraz typie zmienności. Znakiem (\*) w kolumnie *mem* oznaczono gwiazdy znajdujace się poza analizowanym polem. Rys. 3.38 pokazuje fragment diagramu CMD dla gwiazd przynależnych do gromady z zaznaczonymi gwiazdami zmiennymi. Licznych gwiazd zmiennych typu RR Lyr nie oznaczano indywidualnie. Jasności i kolory większości gwiazd wzięto z prac: Olech i in. (2001), Mazur i in. (1999). Dla gwiazd V38–V41 do wyliczenia (B-V) użyto wartości B wyznaczonych w tej pracy, natomiast  $V_{max}$  użyto z pracy Mazur i in. (1999), analogicznie postępiono dla gwiazd JK-V6840 i JK-V15923.

Na Rys. 3.39 ukazano część CMD w obszarze BSS i TO. Wykreślono jedynie gwiazdy uznane za przynależne do gromady (mem=1, mem=2), większymi punktami wyróżniono gwiazdy położone w obszarze BSS oraz yellow stragglers. Łącznie za BSS i yellow stragglers uznano 132 gwiazd. Podobnie na Rys. 3.40 ukazano CMD dla gwiazd V<17.0, na którym wyróżniono gwiazdy odbiegające po stronie niebieskiej (5 gwiazdy) jak i po stronie czerwonej (32 gwiazd) od ciągu głównego. Rozdzielenie rozdzielenie gwiazd należnych i nie przynależnych do gromady, w zwiazku z tym podobnie jak dla gromady Messier 12 wykonuję zgrubne oszacowanie ilości gwiazd tła w obszarach CMD zajmowanych przez gwiazdy wyróżnione na Rys. 3.39–3.40. Gwiazdy tła wybrano na podstawie ruchów własnych (Rys. 3.33) 180 gwiazd tła (w promieniu o rozmiarze  $\mu_l = 4$  mas/yr wokół punktu ( $\mu_a cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ )=(8.0, 0.0) mas/yr; arbitralnie).

Spośród tych gwiazd 82 znajduje się w obszarze CMD, w którym zaznaczono gwiazd leżących



Rysunek 3.37: Diagramy barwa-jasność V/(B - V) dla gromady NGC 6362. Po lewej diagram zawierający gwiazdy dla, których zmierzono  $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czerwone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).

po stronie czerwonej od ciągu głównego, dwie gwiazdy tła znajdują się w pobliżu słabych gwiazd niebieskich (patrz Rys. 3.40, V $\approx$  21.0, (B-V) $\approx$  0.5), żadna w okolicy gwiazd niebieskich (patrz Rys. 3.40, V $\approx$  19.5, (B-V) $\approx$  -0.3÷0.5), 16 w obszarze zajmowanym przez BSS i yellow stragglers – z czego wszystkie gwiazdy tła wypadają w obszarze yellow stragglers (szacunkowo 46 gwiazd), zaś żadna w obszarze BSS. Te zgrubne oszacowanie gwiazd tła wskazuje, że gwiazdy czerwone niemal z dużym prawodpodobieństwem są gwiazdami tła o niewielkim ruchu własnym, dyskusyjna jest również przynależność słabych gwiazd niebieskich oraz szacunkowo 1/3 yellow stragglers może być gwiazdami tła. Niemal na pewno do gromady należą 3 niebieskie gwiazdy oraz BSS. Aby mieć całkowitą pewność ich przynależności do gromady konieczne jest wykonanie pomiaru prędkości radialnej gwiazd oraz sprawdzenie czy nie są one blendami.

Dla gromady NGC 6362 pominięto analizę gwiazd podwójnych na ciągu głównym.

93

ID ID nazwa ID nazwa mem typ mem typ nazwa mem typ 320004 V01 230044 V19 420003 V37 2 RRab 2 RRab 2 RRc 336214 V02 2 RRab 230004 V20 2 RRab 330097 V38 2 SXPhe 330032 V03 2 RRab 130002 V21 2 RRc 230168 V39 2 W UMa 2 04 (\*) 230200 V40 V22 RRc EA \_ gw. stała 2 2 230037 V05 RRab 230043 V23 2 RRc 330543 V41 EA 216084 V06 2 RRc 230008 V24 2 RRc V42 (\*) EA 2 W UMa 220031 V07 V25 (\*) V43 RRab RRab (\*) 230047 V08 (\*) RRc V26 2 RRab V44 (\*) RRab 09 V27 (\*) RRc V45 (\*) W UMa gw. stała \_ \_ \_ V10 220007 2 110017 SXPhe (\*) RRc V28 RRc V46 2 V11 V29 2 220076 2 320031 2 RRc 336313 RRab V47 SXPhe 430009 V12 2 RRab 320035 V30 2 RRab 230107 V48 2 SXPhe RRab 2 436054 V13 2 320002 V31 RRab 136049 V49 2 mod 2 V14 (\*) RRc 220008 V32 RRab V50 (\*) Ecl? 220012 V15 2 RRc V33 (\*) RRc V51 (\*) mod \_ V16 RRab 240009 2 RRab 330031 V34 2 V52 W UMa (\*) 2 130012 V17 2 230006 340186 RRc V35 RRc SDB\_Mazur1999 2 226228 V18 2 RRab 320019 V36 2 RRc 230200 JK-V6840 2 EA 330543 JK-V15923 2 ΕA

Tablica 3.10: Przynależności gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w NGC 6362.



Rysunek 3.38: Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie V/(B-V). Gromada NGC 6362. Oznaczenia: romby – RR Lyr, okręgi – inne gwiazdy pulsujące, kwadraty – gwiazdy zaćmieniowe rozdzielone, pusty trójkąt – W UMa, odwrócone trójkąty – inne gwiazdy zmienne.



Rysunek 3.39: CMD V/(B - V) dla obszaru gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie. Większe punkty oznaczają gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers. Gromada NGC 6362.



Rysunek 3.40: Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie V/(B - V) dla V<17.0. Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono większymi punktami, zaś gwiazdy leżące po stronie czerwonej ciągu głównego i od podolbrzymów zaznaczno rombami. Gromada NGC 6362.

## 3.6 Gromada Messier 22

#### 3.6.1 Rezultaty

Wykres prędkości własnych gwiazd w polu gromady Messier 22 przedstawia Rys. 3.41. Łącznie uzyskano wyznaczenia  $\mu$  dla 10 961 gwiazd. Zgrubna ocenę przynależności gwiazd do gromady można wykonać na podstawie samego Rys. 3.41. Gwiazdy należące do gromady umiejscowione są w pobliżu punktu ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (0, 0) mas/yr, natomiast grupa gwiazd o znacznych ruchach własnych do gromady nie należy. Liczba gwiazd, dla których wyznaczony ruch własny jest mniejszy niż  $\mu_l$  = 4 mas/yr wynosi  $N_{\mu < \mu_l}$  = 8 780, zaś gwiazd szybszych  $N_{\mu \ge \mu_l}$  = 2 181 (czyli około 20.0% całkowitej liczby zmierzonych gwiazd). Jedna gwiazda znajduje się poza obszarem przedstawionym na Rys. 3.41, jej  $\mu$  = 23.6 mas/yr.



Rysunek 3.41: Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady Messier 22. Gwiazdy których wartości  $\mu < \mu_l = 4$  mas/yr oznaczono punktami, zaś gwiazdy  $\mu \ge \mu_l$  większymi punktami.

Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w polu gromady w funkcji jasności przedstawia Rys. 3.42. Widać liniową zależność między  $log_{10}\sigma_{\mu}$  a jasnością gwiazd V. Jest ona widoczna dla gwiazd słabszych niż V = 16.5. Dla gwiazd o jasności V  $\approx$  19.0 mediana  $\sigma_{\mu}$  wynosi 0.64 mas/yr, zaś dla V  $\approx$  20.0 mediana zwiększa się do  $\sigma_{\mu}$  = 1.23 mas/yr. Relatywnie duże niepewności wyznaczeń w porównaniu z innymi gromadami wiążemy ze sporą gęstością gwiazd w polu gromady, bezpośrednio w tle gromady znajduje się bulge Galaktyki.



Rysunek 3.42: Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w funkcji ich jasności dla gromady Messier 22.

Miarę kompletności wyznaczeń dla gromady Messier 22 wskazują Rys. 3.43 oraz 3.44. Na pierwszym z nich prezentowany jest ułamek z liczby gwiazd, dla których próba wyznaczenia ruchu własnego zakończyła się sukcesem. Jest tojedynie około 50% gwiazd jaśniejszych niż V = 15.5, 33% dla V = 17.5 i szybko maleje do niecałych 13% dla gwiazd o jasności  $V \approx = 19.5$ . Wyliczenia kompletności wyznaczeń przedstawionych na tym rysunku wykonano w przedziałach V = 11.0-15.0, następnie 15-16, 17-18 itd. aż do V = 20-21. Na kolejnym rysunku (Rys. 3.44) pokazano ułamek liczby gwiazd z wyznaczonymi ruchami własnymi w funkcji odległości od środka gromady (współrzędne środka wg Harris 1996). Ułamek ten jest bliski 0% gwiazd do odległości r < 1.5 arcmin od środka gromady, następnie rośnie do około 30% od  $r \approx 3.5$  arcmin i utrzymuje podobną wartość do brzegu analizowanego pola. Znikoma liczba wyznaczeń dla środka gromady wynika z dużej gęstości gwiazd w jej centrum.

Na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.41) wyznaczono rozkłady  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  w czterech przedziałach jasności V (Rys. 3.45) tak jak zostało opisane w paragrafie 2.3.4. Zestawienie otrzymanych statystyk ukazuje Tab. 3.11. Na podstawie statystyk  $\mu$  z 10 961 zmierzonych gwiazd za należące do gromady uznano 8 599 gwiazdy (78.4%), dla 30 gwiazd (0.3%) przynależność jest niepewna, natomiast 2 332 gwiazd (21.3%) uznano za nie należące do gromady.

## 3.6.2 Dyskusja

Rozróżnienie między gwiazdami tła a gwiazdami gromady na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.41) jest wyraźne. Związane jest to głównie z relatywnie dużym ruchem własnym i prędkością ra-



Rysunek 3.43: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada Messier 22.



Rysunek 3.44: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada Messier 22.

dialną gromady ( $\mu_{\alpha} cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (8.60±1.30, -5.10±1.30) mas/yr. Gromada znaduje się w kierunku na ramię Strzelca oraz bulge Galaktyki, dlatego też nie dziwi znaczna ilość gwiazd tła w polu gromady M 22.

Obserwacje w filtrach *V* i *I* wykorzystano do wykreślenia diagramów barwa jasność. Jasności otrzymano na podstawie kalibracji z 26 gwiazdami – standardami pośrednimi jak opisano w rozdziale 2.3.5. Podobnie jak przedstawiono to dla poprzednich gromad Rys. 3.46 pokazuje kontaminację CMD gwiazdami tła. W lewym panelu Rys. 3.46 pokazano CMD dla wszystkich gwiazd ze zmierzonymi

V	$M_{lpha}$	$S_{\alpha}$	$M_{\delta}$	$S_{\delta}$	ME	SE
12.3–17	0.014	0.579	0.079	0.584	0.377	0.298
17–18	-0.010	0.594	-0.008	0.568	0.506	0.312
18–19	0.027	0.611	0.013	0.598	0.676	0.402
19–20.7	0.090	0.663	-0.002	0.649	0.983	0.579

Tablica 3.11: Statystyki  $\mu$  dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 22.

przynależnościami, gdzie czerwonym kolorem zaznaczono te które nie należą do gromady (mem=0). Natomiast prawy panel tego rysunku zawiera jedynie gwiazdy prawodpodobnie należące i należące do gromady (mem=1, mem=2).

W gromadzie Messier 22 znaleziono niewiele ponad setkę gwiazd zmiennych. Tab. 3.12 przedstawia listę 108 gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność na podstawie: katalogu Clement i in. (1995; oznaczone CL-xx), prac Kaluzny & Thompson (2001; oznaczone KT-xx), Pietrukowicz & Kaluzny (2003; oznaczone PK-xx) oraz listy gwiazd udostępnionych przez promotora pracy (oznaczone JK-xx). Łącznie 85 gwiazd znalazło się w polu analizowanych w tej pracy, z czego dla 56 gwiazd zidentyfikowano gwiazdy na liście pozycji gwiazd *obrazu uśrednionego* (M22-F1), a dla 26 zmierzono ruchy własne. Gwiazdy, które znalazły się poza analizowanym polem (23 gwiazdy) oznaczono w kolumach (mem) Tab. 3.12 symbolem (\*).

Rys. 3.47 przedstawia diagram CMD z gwiazdami gromady oraz 23 gwiazdami zmiennych (z 26 dla, których zmierzono ruchy własne) z wyznaczonymi. Dla gwiazd z pracy Kaluzny & Thompson (2001) użyto jasności V (średnie dla gwiazd pulsujących, maksymalne dla gwiazd zaćmieniowych i innych) jakie zostałe podane w tej pracy; (V - I) wyznaczono z pomocą procedury z rozdziału 2.3.6. Natomiast dla pozostałych gwiazd zarówno jasność V jak i (V - I) obliczono z pomocą wspomnianej procedury, w związku z tym wartości te należy traktować jako przybliżone.

Na Rys. 3.48 przedstawiono pozycje na CMD gwiazd przynależnych uznanych za przynależne do gromady (mem=1, mem=2) wyróżniając większymi punktami gwiazdy położone w obszarze BSS oraz yellow stragglers. Łącznie za BSS i yellow stragglers uznano 29 gwiazd. Podobnie na Rys. 3.49 zaznaczono gwiazdy odbiegające od ciągu głównego zarówno po stronie niebieskiej (8 gwiazdy) jak i po stronie czerwonej (15 gwiazd). Dzięki jednoznacznemu rozdzieleniu gwiazd tła od gwiazd gromady (Rys. 3.41) gwiazdy leżące w nietypowych obszarach na CMD można uznać za niemal pewne.

Dla gromady Messier 22 pominięto analizę gwiazd podwójnych na ciągu głównym ze względu na znaczną szerokość ciągu głównego na diagramach CMD (patrz Rys. 3.48) spowodowanego nie uwzględnieniem w analizie zmiennej ekstynkcji w polu gromady, poprawek aperturowych oraz po-

nazwa	ID	typ	mem	nazwa	ID	typ	mem	nazwa	ID	typ	mem
CL-1	1330024	RR0	-	CL-37	-	-	(*)	KT-40	1410173	Ecl/EW	_
CL-2	_	RR0	-	CL-38	-	-	(*)	KT-41	1430786	Ecl/EW	_
CL-3	_	RR0	(*)	CL-39	_	_	(*)	KT-42	1220561	Puls?	0
CL-4	1330008	RR0	-	CL-40	-	-	(*)	KT-43	1332001	Ecl/EW	_
CL-5	_	SR	-	CL-41	-	-	(*)	KT-45	1330226	SXPhe	_
CL-6	_	RR0	-	CL-42	-	-	(*)	KT-46	1341980	Ecl/EB	_
CL-7	-	RR0	(*)	CL-43	-	-	(*)	KT-48	1343009	Ecl?	-
CL-8	-	SR	-	CL-CV1	-	UG?	-	KT-51	1120013	sdB	_
CL-9	_	SR?	-	CL-CV2	-	-	(*)	KT-54	1310078	SXPhe	0
CL-10	-	RR0	-	CL-P1	-	-	-	KT-55	1320010	RR	-
CL-11	1326759	CW	-	KT-01	1130841	Ecl/EW	-	JK-06	1130005	-	2
CL-12	-	NV	-	KT-02	1130200	Ecl/EB	2	JK-09	1120004	-	2
CL-13	1216589	RR0	2	KT-03	1121005	Ecl/EW	0	JK-11	1230001	-	2
CL-14	-	М	(*)	KT-04	1120112	SXPhe	2	JK-19	1216589	-	2
CL-15	-	RR1	-	KT-05	1110110	SXPhe	0	JK-21	1224891	-	2
CL-16	-	RR1	-	KT-07	-	Ecl/EW	-	JK-24	1330011	-	_
CL-17	-	SR	(*)	KT-08	-	Ecl/EW	-	JK-25	1330008	-	_
CL-18	-	RR1	(*)	KT-10	-	SXPhe	-	JK-30	1330001	-	2
CL-19	1326564	RR1	2	KT-12	1224068	RR-field	-	JK-31	1326564	-	2
CL-20	-	RR1	-	KT-13	-	Ecl/EW	-	JK-32	1330024	-	-
CL-21	1224891	RR1	2	KT-14	-	RR	-	JK-44	1330021	-	-
CL-22	-	RR0	(*)	KT-15	1210112	Ecl/EW	0	JK-47	1336587	-	_
CL-23	1330021	RR0	-	KT-16	1240002	RR	2	JK-51	1220202	-	_
CL-24	-	RR	-	KT-18	1210310	Ecl/EA	0	JK-52	1223419	-	-
CL-25	-	RR1	(*)	KT-20	1210113	Ecl/EW	2	JK-55	1346526	-	_
CL-26	-	?	(*)	KT-23	1310101	Ecl/EW	2	PK-01	1330332	SXPhe	-
CL-27	-	RR1	(*)	KT-26	-	RR	-	PK-02	-	EW	-
CL-28	-	?	(*)	KT-27	-	SXPhe	-	PK-03	1332001	EW	_
CL-29	-	RR1	(*)	KT-28	1326612	SXPhe	2	PK-04	-	EW	-
CL-30	-	SR	-	KT-29	-	SXPhe	-	PK-05	1331116	EW	-
CL-31	-	SR	(*)	KT-33	1320245	Ecl/EW	-	PK-06	1233763	EW	_
CL-32	-	-	(*)	KT-34	1330265	SXPhe	2	PK-07	1224348	Ell/BY	-
CL-33	-	-	(*)	KT-36	1330009	RR	-	PK-08	_	Ell/BY	-
CL-34	-	-	-	KT-37	1420006	RR	2	PK-09	1237086	Ell/BY	-
CL-35	-	-	-	KT-38	1440092	SXPhe	2	PK-10	_	Ell/BY	-
CL-36	-	-	(*)	KT-39	1420232	Ecl/EW	0	PK-11	-	Ell(?)	-

Tablica 3.12: Przynależność gwiazd zmiennych i podejrzanych o zmienność w gromadzie M 22.



Rysunek 3.45: Rozkład  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  gwiazd w gromadzie Messier 22 dla przedziałów jasności V = 12.3-17 i V = 19-20.7. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 2.47 mas/yr (V = 12.3-17) oraz 2.78 mas/yr (V = 19-20.7).

pulacji gwiazd o różnej metaliczności (patrz charakterystyka gromady 2.2.5).



Rysunek 3.46: Diagramy barwa-jasność V/(V-I) dla gromady Messier 22. Po lewej diagram zawierający gwiazdy dla, których zmierzono  $\mu$ ; należących (czarne) i nie należących (czerwone) do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).



Rysunek 3.47: Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie V/(V - I). Gromada Messier 22. trójkąty – W UMa (EW), kwadraty – pozostałe gwiazdy zaćmieniowe, okręgi – gwiazdy pulsujące SX Phe, romby – RR Lyr i pozostałe gwiazdy pulsujące, pełne trójkąty – nieznany typ zmienności, przekreślone – gwiazdy nieprzynależne do gromady.



Rysunek 3.48: CMD V/(V - I) dla obszaru gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie. Większe punkty oznaczają gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers. Gromada Messier 22.



Rysunek 3.49: Gwiazdy przynależne do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2) na wykresie V/(V - I). Leżące po stronie niebieskiej od ciągu głównego zaznaczono większymi punktami, zaś gwiazdy leżące po stronie czerwonej ciągu głównego zaznaczno rombami. Gromada Messier 22.

## 3.7 Gromada NGC 6752

### 3.7.1 Rezultaty

Wykres prędkości własnych gwiazd w polu gromady NGC 6752 przedstawia Rys. 3.50. Łącznie uzyskano wyznaczenia  $\mu$  dla 12 986 gwiazd. Zgrubna ocenę przynależności gwiazd do gromady można wykonać na podstawie samego Rys. 3.50. Gwiazdy należące do gromady umiejscowione są w pobliżu punktu ( $\mu_{\alpha} cos \delta, \mu_{\delta}$ ) = (0, 0) mas/yr, natomiast grupa gwiazd o znacznych ruchach własnych do gromady nie należy. Liczba gwiazd, dla których wyznaczony ruch własny jest mniejszy niż  $\mu_l = 3$  mas/yr wynosi  $N_{\mu < \mu_l} = 12$  794, zaś gwiazd szybszych  $N_{\mu \ge \mu_l} = 192$ . Zaledwie około 1.5% liczby gwiazd, dla jakich zmierzono  $\mu$  jest gwiazdami tła. Dwie gwiazdy znajdują się poza obszarem przedstawionym na Rys. 3.50, ich całkowite prędkości własne to: 18.8 i 38.8 mas/yr.



Rysunek 3.50: Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady NGC 6752. Gwiazdy których wartości  $\mu < \mu_l = 3$  mas/yr oznaczono punktami, zaś gwiazdy  $\mu \ge \mu_l$  większymi punktami.

Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w polu gromady w funkcji jasności przedstawia Rys. 3.51. Widać liniową zależność między  $log_{10}\sigma_{\mu}$  a jasnością gwiazd V. Jest ona dobrze widoczna dla gwiazd słabszych niż V = 17.5. Dla gwiazd o jasności V  $\approx$  19.0 mediana  $\sigma_{\mu}$  wynosi 0.64 mas/yr, zaś dla V  $\approx$  20.0 mediana zwiększa się do  $\sigma_{\mu}$  = 1.23 mas/yr.

Miarę kompletności wyznaczeń dla gromady NGC 6752 wskazują Rys. 3.52 oraz Rys. 3.53. Na pierwszym z nich prezentowany jest ułamek z liczby gwiazd, dla których próba wyznaczenia ruchu własnego zakończyła się sukcesem. Jest około 35% gwiazd jaśniejszych niż  $V \approx 14$ , niemal 60% dla


Rysunek 3.51: Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w funkcji ich jasności dla gromady NGC 6752.

 $V \approx 15.0$ . Następnie kompletność maleje powoli około 17% dla gwiazd o jasności  $V \approx 20$ . Wyliczenia kompletności wyznaczeń przedstawionych na tym wykresie wykonano w przedziałach V = 10.8-13.8, następnie 13.8-14.8, 14.8-15.8 itd. aż do V = 19.8-20.8. Na kolejnym wykresie (Rys. 3.53) pokazano ułamek liczby gwiazd z wyznaczonymi ruchami własnymi w funkcji odległości od środka gromady (współrzędne środka wg Harris 1996). Ułamek ten jest bliski 2% gwiazd do odległości r < 1.0 arcmin od środka gromady, następnie rośnie do około 70% od  $r \approx 4.5$  arcmin i utrzymuje podobną wartość do brzegu analizowanego pola. Znikoma liczba wyznaczeń dla środka gromady wynika ze znacznej gęstości gwiazd w jej centrum.

Na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.50) wyznaczono rozkłady  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  w pięciu przedziałach jasności V (Rys. 3.54) tak jak zostało opisane w paragrafie 2.3.4. Zestawienie otrzymanych statystyk ukazuje Tab. 3.13. Na podstawie statystyk  $\mu$  z 12 986 gwiazd za należące do gromady uznano 12 583 gwiazdy (96.9%), dla 122 gwiazd (0.9%) przynależność jest niepewna, natomiast 281 gwiazd (2.2%) uznano za nie należące do gromady.

#### 3.7.2 Dyskusja

Rozróżnienie między gwiazdami tła a gwiazdami gromady na podstawie diagramu VPD nie jest jednoznaczne, ponieważ ilość gwiazd tła w polu gromady jest niewielka. Ponadto gromada ma relatywnie mały ruch własny ( $\mu_{\alpha} cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (-0.84±0.42, -2.79±0.45) mas/yr (Dinescu i in. 1997). Gromada jest położona na niebie w kierunku ramion spiralnych: Strzelca oraz Tarczy–Centaura. Niewielka ilość gwiazd tła spowodowana jest zapewne znaczną szerokością galaktyczną gromady  $b = -25^{\circ}63$ .



Rysunek 3.52: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada NGC 6752.



Rysunek 3.53: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada NGC 6752.

Podobnie jak dla wcześniejszych gromad Rys. 3.55 pokazuje kontaminację CMD gwiazdami tła. Do wykreślenia tego rysunku wyjątkowo użyto fotometrii z pracy Kaluzny & Thompson (2009; Fig. 3). Łącznie dla 96% gwiazd, dla których uzyskano ruchy własne w tej rozprawie znaleziono jasności i kolory w danych z pracy Kaluzny & Thompson (2009). W lewym panelu Rys. 3.55 pokazano CMD dla wszystkich gwiazd ze zmierzonymi przynależnościami, gdzie czerwonym kolorem zaznaczono te, które nie należą do gromady (mem=0). Natomiast prawy panel tego rysunku zawiera jedynie gwiazdy prawodpodobnie należące i należące do gromady (mem=1, mem=2).

V	$M_{lpha}$	$S_{\alpha}$	$M_{\delta}$	$S_{\delta}$	ME	SE
12.6–17	-0.004	0.394	-0.008	0.394	0.272	0.202
17–18	-0.020	0.391	0.005	0.391	0.290	0.198
18–19	-0.006	0.418	-0.005	0.418	0.357	0.196
19–20	-0.026	0.483	0.011	0.483	0.563	0.209
20-21	-0.027	0.574	-0.020	0.574	0.817	0.197

Tablica 3.13: Statystyki  $\mu$  dla przedziałów jasności w gromadzie NGC 6752.



Rysunek 3.54: Rozkład  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  gwiazd w gromadzie NGC 6752 dla dwóch (z pięciu) przedziałów jasności V = 12.6-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 1.67 mas/yr (V = 12.6-17) oraz 2.78 mas/yr (V = 20-21).

W polu gromady NGC 6752 znaleziono 25 gwiazd zmiennych (Sawyer Hogg 1973; Cannon & Stobie 1973; Thompson & Kaluzny 1999; Kaluzny & Thompson 2009). Spośród nich w analizowanym w tej pracy polu znalazło się 17 z tych gwiazd, a wśród nich dla 12 gwiazd wyznaczono w tej pracy ruchy własne (patrz Tab. 3.14). Znakiem (\*) w kolumnie *mem* oznaczono gwiazdy znajdujące się poza analizowanym polem. Gwiazda V1 (ad. 1 w Tab. 3.14) była prześwietlona na *obrazie referencyjnym*, gwiazdy V2 nie zidentyfikowano na podstawie podanych współrzędnych (ad. 2 w Tab. 3.14), natomiast gwiazda V25 znajduje się blisko centrum gromady, zatem jej identyfikacja nie była możliwa (ad. 3 w Tab. 3.14). Rys. 3.56 pokazuje fragment diagramu CMD dla gwiazd przynależnych do



Rysunek 3.55: Diagramy barwa-jasność V/(B - V) dla gromady NGC 6752. Po lewej diagram zawierający gwiazdy dla, których zmierzono  $\mu$  należących i nie należących do gromady. Po prawej diagram zawierający jedynie gwiazdy przynależne do gromady (mem=1 lub mem=2).

gromady z zaznaczonymi gwiazdami zmiennymi. Jasności i kolory gwiazd wzięto z prac: Thompson & Kaluzny 1999; Kaluzny & Thompson 2009. Gwiazdy V09, V19, V20 oraz V22 sklasyfikowano na podstawie ruchów własnych jako nieprzynależne do gromady. Za przynależne do gromady uznano gwiazdy EHB: V15, V16, V17; gwiazdę BHB: V24; układ zaćmieniowy rozdzielony EA: V23; pulsujące gwiazdy zmienne typu SX Phe: V7 i V12; a także układ kontaktowy V08.

Na Rys. 3.57 przedstawiono pozycje na CMD gwiazd przynależnych uznanych za przynależne do gromady (mem=1, mem=2) wyróżniając większymi punktami gwiazdy położone w obszarze BSS, yellow stragglers oraz po stronie czerwonej od ciągu podolbrzymów. Łącznie za BSS i yellow stragglers uznano 29 gwiazd, natomiast 3 gwiazdy oznaczone diamentami uznano za red stragglers. Jedna gwiazda zaliczona do gromady na podstawie ruchów własnych – #121077 – położona jest relatywnie daleko od ciągu głównego, po jego niebieskiej stronie tj. V = 20.43, (B - V) = 0.50. Można ją bez trudu odnaleźć również na prawym panelu Rys. 3.55. Dzięki niewielkiej gęstości gwiazd tła (Rys. 3.50) gwiazdy leżące w nietypowych obszarach na CMD można uznać za niemal pewne.

Celem sprawdzenia względnej ilości gwiazd podwójnych na ciągu głównym gromady NGC 6752 wykonano histogramy dla wybranych zbiorów gwiazd należących do gromady. Wybrano gwiazdy poniżej punktu odejścia od ciągu głównego, w przedziałe jasności V = 17.10-20.30 i należące do gromady na podstawie ruchów własnych (mem=1 lub mem=2). Przedziały jasności przedstawia Tab.

nazwa	ID	mem	typ	nazwa	ID	mem	typ	nazwa	ID	mem	typ
V01	-	_(1)	Cep?	V10	-	(*)	EA?	V19	210035	0	-
V02	-	_(2)	-	V11	-	(*)	EW	V20	320078	0	-
V03	-	(*)	LPV	V12	420043	2	SX Phe	V21	340067	_	-
V04	-	(*)	EW	V13	-	(*)	SX Phe	V22	420433	0	-
V05	-	(*)	EW	V14	-	(*)	EW	V23	440386	2	EA
V06	-	(*)	EW	V15	230175	2	EHB	V24	440007	2	BHB,var?
V07	233406	2	SX Phe	V16	233589	2	EHB	V25,CX4	-	_(3)	CV
V08	230571	2	EW	V17	230073	2	EHB				
V09	140014	0	EW?	V18	241858	-	EHB				

Tablica 3.14: Przynależność gwiazd zmiennych w gromadzie NGC 6752. Adnotacje (\*), (1), (2) i (3) opisano w tekście.

Tablica 3.15: Statystyki dla gwiazd podwójnych ciągu głównego w gromadzie NGC 6752.

grupa	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>	Ν	$N_{\pm 6\sigma}$	$\Delta N_{3\sigma-6\sigma}$	f <sub>bin</sub> [%]
А	17.100	17.843	2050	1807.9	79.0	4.4
В	17.843	18.401	2052	1818.3	109.4	6.0
С	18.401	18.906	2046	1827.1	91.8	5.0
D	18.906	19.454	2048	1980.1	72.8	3.7
Е	19.454	20.300	2052	2049.0	66.1	3.2
suma	-	-	10248	9482.4	419.1	4.4

3.15. Gwiazdy podzielono na 5 równych grup (A, B, C, D i E), tak aby w każdym liczność gwiazd w każdej grupie była taka sama lub zbliżona. Dla każdej z grup wykonano histogram ilości gwiazd w funkcji koloru (B-V). Dla każdej gwiazdy (a następnie na histogramach) określono odstępstwo  $\Delta(B - V)$  od koloru średniego określonego na podstawie gwiazd znajdujących się na ciągu głównym (wyznaczno je co 0.05 mag. jedynie dla zbioru gwiazd – określonego zgrubnie – jako pojedyncznych gwiazd ciągu głównego). Zastosowano przedziały histogramowania co 0.01 mag. Następnie do tak wykonanych histogramów wyliczono dopasowanie funkcją gaussa (z parametrami wolnymi: amplitudą, szerokością –  $\sigma$  i miejsce maksimum –  $\Delta(B - V)_{max}$ ). Histogramy i dopasowania funkcji przedstawia Rys. 3.58. Dopasowanie funkcją gaussa nie jest dokładne ze względu na niesymetryczny rozkład ilości gwiazd, z nadwyżką w kierunku gwiazd czerwonych. Nadwyżka ta spowodowana jest gwiazdami podwójnymi na ciągu głównym, których jasność składników się dodaje. Określenie tej nadwyżki w przedziale  $3\sigma$ - $6\sigma$  od  $\Delta(B - V)_{max}$  daje dolne oszacowanie liczby gwiazd podwójnych o stosunku mas co najmniej q > 0.7. Wyliczona nadwyżka wynosi  $f_{bin} = 4.4\%$ . Ilość gwiazd podwójnych w tej gromadzie została również wyznaczona przez Milone i in. (2011) i dla gwiazd q > 0.7 ułamek ten wynosi 0.2% a dla całej gromady około 1÷3%.



Rysunek 3.56: Gwiazdy zmienne zaznaczone na wykresie V/(B - V). Gromada NGC 6752. Kwadrat – układ EA, odwrócone trójkąty – zmienne na HB i EHB, okręgi – gwiazdy typu SX Phe, biały trójkąt – układ EW, ciemne koła – inne gwiazdy zmienne, przekreślenia – gwiazdy zmienne nie należące do gromady na podstawie  $\mu$ .



Rysunek 3.57: CMD V/(B - V) dla obszaru gwiazd BSS oraz TO zaznaczone na wykresie. większe punkty – gwiazdy kandydatki blue/yellow stragglers, romby – gwiazdy kandydatki red stragglers. Gromada NGC 6752.



Rysunek 3.58: Ilość gwiazd w okolicach ciągu głównego na CMD w kolejnych przedziałach jasności od lewej do prawej. Gromada NGC 6752.

### 3.8 Gromada Messier 55

#### 3.8.1 Rezultaty

Wykres prędkości własnych gwiazd w polu gromady Messier 55 przedstawia Rys. 3.59. Łącznie uzyskano wyznaczenia  $\mu$  dla blisko 17 tysiąca gwiazd. Ocenę przynależności gwiazd do gromady można wykonać już na podstawie samego Rys 3.59. Podobnie jak w innych gromadach gwiazdy należące do gromady umiejscowione są w pobliżu punktu ( $\mu_{\alpha} cos \delta, \mu_{\delta}$ ) = (0, 0) mas/yr, natomiast grupa gwiazd o znacznych ruchach własnych do gromady nie należy. Liczba gwiazd, dla których wyznaczony ruch własny jest mniejszy niż  $\mu_l$  = 3 mas/yr wynosi  $N_{\mu < \mu_l}$  = 16 551, zaś gwiazd szybszych  $N_{\mu \ge \mu_l}$  = 394, czyli około 2.3% liczby gwiazd. Na Rys. 3.59 zaznaczono również gwiazdę zmienną RR Lyr V15 znajdującą się w polu gromady, do niej wrócimy w dyskusji wyników uzyskanych dla gromady. Łącznie 15 gwiazd znajduje się poza obszarem przedstawionym na Rys. 3.59, ich całkowite prędkości własne są w przedziale 15.3–44.0 mas/yr.



Rysunek 3.59: Wykres ruchów własnych gwiazd w polu gromady M 55.

Niepewności wyznaczenia pozycji gwiazd w polu gromady w funkcji jasności przedstawia Rys. 3.60. Widać liniową zależność między  $log_{10}\sigma_{\mu}$  a jasnością gwiazd V. Jest ona dobrze widoczna dla gwiazd słabszych niż V = 17.0. Dla gwiazd o jasności V  $\approx$  19.0 mediana  $\sigma_{\mu}$  wynosi 0.47 mas/yr, zaś dla V  $\approx$  20.0 mediana zwiększa się do  $\sigma_{\mu}$  = 0.65 mas/yr. Wzrost niepewności związany jest z coraz mniejszym stosunkiem sygnału do szumu. Rozrzut punktów związany jest pośrednio z metodami redukcji danych np. transformacją współrzędnych, wyznaczaniem ruchów własnych a w szczególności ilością danych użytych w tych obliczeniach. Większe wartości niepewności dla gwiazd jaśniejszych od V < 14.0 związane są z ich saturacją na niektórych obrazach uśrednionych, zatem i mniejszą ilością pomiarów pozycji.



Rysunek 3.60: Niepewności wyznaczenia pozycji w funkcji jasności. Gromada M 55.

Ruchy własne zostały pomierzone odrębnie dla pól M55-F1 i M55-F2, stąd dla 11 397 gwiazd występujących zarówno w polu M55-F1 jak i M55-F2 zmierzono je dwukrotnie. Porównanie tych wyznaczeń w funkcji jasności V przedstawia Rys. 3.61. Dla 66% gwiazd różnica wyznaczeń  $\Delta\mu$  jest mniejsza niż 0.34 mas/yr, zaś dla 95% gwiazd  $\Delta\mu < 0.94$  mas/yr. Porównanie pomiarów z pól M55-F1 i M55-F2 daje wyobrażenie o rzędzie wielkości niepewności związanych z jakością danych obserwacyjnych.

Miarę kompletności wyznaczeń dla gromady Messier 55 wskazują Rys. 3.62 oraz Rys. 3.63. Na pierwszym z nich prezentowany jest ułamek z liczby gwiazd, dla których próba wyznaczenia ruchu własnego zakończyła się sukcesem. Jest to około 70% dla gwiazd z przedziału V = 11.7-19.0, zaś około 20% dla gwiazd o jasności  $V \approx 20.5$ . Na kolejnym rysunku (Rys. 3.63) pokazano ułamek liczby gwiazd z wyznaczonymi ruchami własnymi w funkcji odległości od środka gromady (współrzędne środka wg Harris 1996). Ułamek ten wynosi 29% gwiazd dla odległości r < 1 arcmin od środka gromady i rośnie do około 50% w przedziale r = 2-6 arcmin. Mniejsza ilość wyznaczeń dla środka gromady wynika z dużej ilości gwiazd w jej centrum, zaś niewielki spadek dla gwiazd w odległości większej niż 6 arcmin związany jest ze zmniejszeniem się liczby obrazów, na których te gwiazdy były widoczne.

Na podstawie diagramu VPD (Rys. 3.59) wyznaczono rozkłady  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  w pięciu przedziałach jasności V (Rys. 3.64) tak jak zostało opisane w paragrafie 2.3.4. Zestawienie otrzymanych



Rysunek 3.61: Różnica ruchów własnych gwiazd zmierzonych w polach M55-F1 i M55-F2. Gromada M 55.

Tablica 3.16: Statystyki  $\mu$  dla przedziałów jasności w gromadzie Messier 55.

V	$M_{lpha}$	$S_{\alpha}$	$M_\delta$	$S_{\delta}$	ME	SE
13–17	0.038	0.308	-0.010	0.324	0.268	0.152
17–18	0.022	0.346	-0.010	0.362	0.294	0.185
18–19	-0.000	0.408	-0.019	0.414	0.396	0.195
19–20	-0.002	0.512	-0.010	0.514	0.555	0.175
20-21	0.023	0.644	-0.024	0.658	0.710	0.162

statystyk ukazuje Tab. 3.16. Wykonano je dla gwiazd  $\mu < 1.8 \text{ mas/yr}$ . Na tej podstawie z 16 945 zmierzonych gwiazd za należące do gromady uznano 11 899 gwiazdy (91.3%), dla 76 gwiazd (0.6%) przynależność jest niepewna, natomiast 1 062 gwiazd (8.1%) uznano za nienależące do gromady.

Na *obrazach uśrednionych* gromady Messier 55 odszukano również galaktyki. W sumie znaleziono ich 70, z czego 11 było na tyle jasnych i zwartych, że nadawały się do wyznaczenia ich  $\mu$ względem gwiazd gromady. Ze względu na znaczną gęstość gwiazd w pobliżu wybranych galaktyk konieczna była ich fotometria wraz z nimi. Pozycje galaktyk uzyskano z pomocą programu GAL-FIT 3.0 (Peng i in. 2010). Użyto w tym celu wycinków *obrazów uśrednionych* o rozmiarach 30×30 lub 60×60 pikseli. PSF wyznaczono z pomocą procedury DAOPHOT programu IRAF. W wyliczaniu pozycji galaktyk uwzględniano również: gwiazdy położone bezpośrednio przed daną galaktyką oraz poziom zliczeń w tle. Do dopasowania kształtu galaktyki w 9 przypadkach użyto dwuwymiarowego modelu funkcji Sersic'a. Wyznaczone pozycje galaktyk na danym *obrazie uśrednionym* zostały



Rysunek 3.62: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji jasności. Gromada M 55.

następnie użyte do wyliczenia ich  $\mu$  tak jak zostało to wcześniej wykonane dla gwiazd. Na tym etapie odrzucono dwie galaktyki, których przesunięcia ( $\Delta X, \Delta Y$ ) w czasie znacznie odbiegały od funkcji liniowej. Najprawdopodobniej było to spowodowane niedokładnością wyznaczenia ich pozycji. Średnia ważona  $\mu$  pozostałych 9 galaktyk ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (-3.10 ± 0.37, -9.27 ± 0.80) mas/yr. Kaluzny i in. (2005) w pracy dotyczącej gwiazd kataklizmicznych w gromadzie Messier 55 odszukał 7 relatywnie niebieskich obiektów. Z nich dla dwóch uzyskaliśmy  $\mu$ , jeden z nich (#22401066; #175550 w numeracji Kaluzny i in. 2005) należy do gromady, natomiast drugi (#23100322; M55-B1) ma ruch własny bliski średniemu  $\mu$  uzyskanego dla galaktyk. Na podstawie zmienności w krzywej blasku M55-B1 Kaluzny i in. (2005) sklasyfikował go jako możliwego kwazara. Wyznaczony  $\mu$  tego obiektu względem gromady potwierdza tę hipotezę. Średnia ważona  $\mu$  dla 9 galaktyk i kwazara M55-B1 wynosi ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (-3.30 ± 0.20, -9.14 ± 0.17) mas/yr. Ruchy własne liczone względem gromady dla tych obiektów prezentuje Rys. 3.65. Po odrzuceniu z tego przybliżenia galaktyki o największej niepewności wyznaczenia  $\mu$  (galaktyka spiralna lub soczewkowa widziana w linii dysku) uzyskano ( $\mu_{\alpha}cos\delta, \mu_{\delta}$ ) = (-3.31 ± 0.10, -9.14 ± 0.15) mas/yr.

#### 3.8.2 Dyskusja

Rys. 3.66 przedstawia diagramy CMD V/(B - V) dla gromady Messier 55 w oparciu o fotometrię z pracy Kaluzny i in. 2010 (dalej nazywaną JK10). W lewym panelu tego rysunku wykreślone zastało wykreślonych około 10 tysięcy gwiazd z dobrą jakością fotometrii. Wyznaczenia ruchów własnych dla gwiazd gromady pozwoliły na wybranie gwiazd sklasyfikowanych jako należące do gromady (mem = 2). Te gwiazdy zostały przedstawione w prawym panelu Rys. 3.66.



Rysunek 3.63: Ułamek liczby gwiazd, dla których wyznaczono ruchy własne w funkcji odległości od centrum gromady. Gromada M 55.

Łącznie w gromadzie Messier 55 znanych jest 71 gwiazd zmiennych (Olech i in. 1999, Pych i in. 2001, JK10). Spośród nich dla 52 gwiazd dokonano pomiaru  $\mu$ . Ponadto ruch własny pomierzono dla 46 spośród 65 kandydatów na BSS wymienonych w pracy Lanzoni i in. (2007). Tab. 3.17 zawiera te gwiazdy wraz z ich przynależnościami do gromady gdzie: ID – oznaczenie gwiazd zmiennych w M 55, ID<sub>L</sub> – oznaczenie gwiazd z pracy Lanzoni i in. (2007), ID<sub>PM</sub> – numer gwiazdy w tej pracy, mem – przynależność gwiazdy do gromady. Na Rys. 3.67 przedstawiono CMD górnej części ciągu głównego gwiazd oraz obszar w którym położone są gwiazdy typu BSS. Wszystkie BSS, dla których uzyskano w tej pracy  $\mu$  uznano za najpewniej przynależne do gromady. Obszarze CMD zajmowanym przez BSS znajdują się gwiazdy przynależne do gromady, ale nie wykazujące zmienności. Krzywe blasku tych gwiazd zostały ponownie sprawdzone, jednak żadna z nich nie przejawia oznak zmienności. Dwie z BSS to zmienne zaćmieniowe. Gwiazdy zmienne, które z całą pewnością nie przynależą do gromady to: V15, V49, V50 i V51. Ponadto gwiazdy BSS-7, BSS-27, BSS-31 i BSS-39 z pracy Lanzoni i in. (2007) są gwiazdami tła. Indywidualne przypadki gwiazd powinny być brane pod uwagę wraz z niepewnościami  $\mu$ . Definitywne rozstrzygnięcie przynależności tych gwiazd zmiennych do gromady możliwe jest po zmierzeniu ich prędkości radialnych.

Olech i in. (1999) sklasyfikował gwiazdę zmienną V15 jako RR Lyr należącą do galaktyki karłowatej w Strzelcu (Sgr dSph). Część tej galaktyki przechodzi w tle gromady Messier 55 (Ibata i in. 1994; Mateo i in. 1996). Ruch własny tej gwiazdy względem gromady wynosi ( $\mu_{\alpha}cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ ) = (1.14 ± 0.31, 7.81 ± 0.36) mas/yr. Zmienna V15 znajduje się na diagramie VPD (Rys. 3.59) w pobliżu skupiska kilkudziesięciu innych gwiazd. Gwiazdy te najpewniej należą do Sgr dSph. Dla grupy 29 gwiazd położonych na VPD w okolicach V15 uzyskano absolutną wartość ( $\mu_{\alpha}cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ ) =

ID	$\mathrm{ID}_{\mathrm{L}}$	ID <sub>PM</sub>	mem	ID	$\mathrm{ID}_{\mathrm{L}}$	<b>ID</b> <sub>PM</sub>	mem	ID	$\mathrm{ID}_{\mathrm{L}}$	ID <sub>PM</sub>	mem
V02	—	24300001	2	V32	BSS-21	22400204	2	V62	_	23201072	2
V04	—	12200014	2	V33	BSS-51	13400039	2	V63	BSS-35	23300072	2
V05	—	22405193	2	V34	BSS-61	12400077	2	V64	—	23300099	2
V06	—	12200010	2	V35	BSS-52	23200027	2	V65	—	13300228	2
V07	—	12220322	2	V36	BSS-53	23300087	2	V67	—	14400131	2
V08	—	22400024	2	V37	BSS-55	13300163	2	V69	BSS-45	13400057	2
V10	—	12100004	2	V38	BSS-20	13300141	2	—	BSS-01	22300208	2
V11	—	21300008	2	V40	BSS-60	12200189	2	—	BSS-02	13200131	2
V12	—	12300018	2	V41	BSS-10	22400135	2	—	BSS-07	22300198	0
V15	—	14400150	0	V42	BSS-25	13200170	2	—	BSS-08	12300182	2
V16	BSS-56	12200151	2	V44	—	21400232	2	—	BSS-14	23400059	2
V17	BSS-58	11300070	2	V45	BSS-32	12200109	2	—	BSS-15	22300189	2
V18	BSS-22	21300093	2	V47	BSS-06	22300183	2	—	BSS-16	23300108	2
V19	BSS-12	22300308	2	V48	BSS-03	12200099	2	—	BSS-19	22400262	2
V20	BSS-23	23400089	2	V49	—	11300622	0	—	BSS-27	13400030	0
V21	BSS-26	22400085	2	V50	—	21400104	0	—	BSS-31	21400069	0
V22	BSS-54	12400055	2	V51	—	21200261	0	—	BSS-34	22200033	2
V23	BSS-62	13200171	2	V53	BSS-37	12300123	2	—	BSS-36	11300049	2
V24	BSS-57	23300107	2	V54	—	24300158	2	—	BSS-39	23100015	1
V25	BSS-50	23300058	2	V55	BSS-46	21300126	2	—	BSS-41	22203014	2
V26	BSS-63	23300063	2	V57	BSS-04	22300166	2	—	BSS-49	22200293	2
V27	BSS-24	23400103	2	V60	—	22300197	2				
V31	BSS-11	12300229	2	V61	—	12300228	2				

Tablica 3.17: Przynależności gwiazd zmiennych i BSS z pracy Lanzoni i in. (2007; ID<sub>L</sub>).



Rysunek 3.64: Rozkład  $\mu_{\alpha} cos\delta$  oraz  $\mu_{\delta}$  gwiazd w gromadzie M 55 dla przedziałów jasności V = 12.7-17 i V = 20-21. Okręgi w prawym panelu wyznaczone są jako 3×S równe 1.34 mas/yr (V = 13-17) oraz 2.76 mas/yr (V = 20-21).

 $(-2.23 \pm 0.14, -1.83 \pm 0.23)$  mas/yr (posłużono się przy tym ( $\mu_{\alpha}cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ ) zmierzoną dla galaktyk). Pozycja ta wyliczona została iteracyjnie z wartością  $\mu$  dla V15 jako pozycją wyjściową i gwiazdami w promieniu r = 1 mas/yr. Dla promieni r = 0.75 i 1.25 mas/yr pozycja końcowa zmienia się w granicach uzyskanych niepewności. Położenia tak wybranych gwiazd na CMD przedstawione zostały kwadratami w lewym panel Rys. 3.66. Najpewniej gwiazdy te należą do ciągu podolbrzymów i górnej części ciągu głównego Sgr dSph. Dla porównania Pryor i in. (2010) uzyskał na podstawie archiwalnych danych z HST absolutny ruch Sgr dSph ( $\mu_{\alpha}cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ ) = (-2.75 ± 0.20, -1.65 ± 0.22) mas/yr. Ich pomiary wykonano 7 °.3 i 9 °.7 na północny-zachód od centrum Messier 55. Inne wyznaczenia  $\mu$  Sgr dSph podaje Dinescu i in. (2005) oraz Ibata i in. (1997).

Tablica 3.18: Statystyki dla gwiazd podwójnych ciągu głównego w gromadzie Messier 55.

grupa	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>	Ν	$N_{\pm 6\sigma}$	$\Delta N_{3\sigma-6\sigma}$	f <sub>bin</sub> [%]
А	18.000	17.843	1483	1363.2	47.2	3.4
В	18.550	18.401	1482	1367.9	32.6	2.4
С	19.026	18.906	1480	1349.5	53.3	3.9
D	19.444	19.454	1482	1406.1	45.4	3.2
Е	19.892	20.501	1479	1241.1	64.3	5.1
suma	_		7406	6727.9	242.8	3.6



Rysunek 3.65: Wyznaczenie względnych ( $\mu_{\alpha} cos\delta$ ,  $\mu_{\delta}$ ) dla 10 galaktyk zmierzonych w tle gromady M 55.

W prawym panelu Rys. 3.66 widać wyraźnie sekwencję gwiazd równoległą do ciągu głównego i od niego jaśniejszą. Tę grupę gwiazd interpretujemy jako gwiazdy podwójne należące do gromady Messier 55. Populacja gwiazd podwójnych w tej gromadzie była omawiana przez Sollima i in. (2007) na podstawie obrazów jądra gromady pozyskanych z pomocą kamery HST/ACS. Natomiast w tej analizie większość gwiazd z ciągu gwiazd podwójnych (q  $\approx$  1) położonych jest dalej od centrum gromady. Ciąg ten przecina TO i przechodzi do obszaru gwiazd BSS. Warto w tym miejscu również odnotować potencjalne gwiazdy yellow i red stragglers. Położone są one ponad TO po obu stronach gałęzi podolbrzymów. Całkowitą pewność przynależności gwiazd red/yellow/blue stragglers do gromady, można uzyskać dzięki obserwacjom spektroskopowym. Nie powinno być to trudne ze względu na znaczną prędkość radialną gromady  $V_r = 174.8$  km/s (Harris 1996).

Analogicznie jak dla gromady NGC 6752 wyznaczono nadwyżkę gwiazd podwójnych. Tab. 3.18 podaje wyznaczane statystyki, natomiast Rys. 3.68 pokazuje histogramy ilości gwiazd wraz z dopasowaniem funkcji o profilu gaussa. Określenie tej nadwyżki w przedziale  $3\sigma$ - $6\sigma$  od  $\Delta(B - V)_{max}$  daje dolne oszacowanie liczby gwiazd podwójnych o stosunku mas co najmniej q > 0.7. Wyliczona nadwyżka wynosi  $f_{bin} = 3.6\%$ . Ilość gwiazd podwójnych w tej gromadzie została również wyznaczona przez Milone i in. (2011) i dla gwiazd q > 0.7 ułamek ten wynosi 2.3% a dla całej gromady około 8%.



Rysunek 3.66: Lewy panel - CMD V/(B - V) gromady M 55 na podstawie fotometrii z pracy JK10. Gwiazdy zaznaczone kwadratami najpewniej należą do galaktyki Sgr dSph. Prawy panel - CMD z gwiazdami najprawodpodobniej należącymi do gromady (mem=1 lub mem=2). Większymi punktami oznaczono blue/yellow/red stragglers.



Rysunek 3.67: CMD V/(B - V) w okolicach punktu odejścia od ciągu głównego oraz obszaru blue stragglers. Okręgami zaznaczono gwiazdy zmienne pulsujące typu SX Phe, kwadratami gwiazdy zaćmieniowe. Na rysunku wykreślono jedynie gwiazdy najpewniej należące do gromady (mem=1 lub mem=2).



Rysunek 3.68: Ilość gwiazd w okolicach ciągu głównego na CMD w kolejnych przedziałach jasności od lewej do prawej. Gromada Messier 55.

# 3.9 Katalog elektroniczny

W załączeniu do pracy zachowane jest archiwum danych zawierające pliki w formacie tekstowym, Virtual Observatory Table (VOT) oraz obrazy referencyjne do jednoznacznej identyfikacji gwiazd. Nazwy tych plików dla odpowiednich gromad podsumowuje Tab. 3.19. Pierwsze wiersze katalogu i jego pełen opis przedstawia Tab. 3.20.

Tablica 3.19: Nazwy plików katalogu elektronicznego ruchów własnych gwiazd gromad analizowanych w tej pracy.

gromada	plik z danymi jak w Tab. 3.20	plik z obrazem referencyjnym
NGC 3201	NGC3201.PM.vot	NGC3201-F1-c_02.fits
	NGC3201.PM.dat	NGC3201-F1-c_32.fits
Messier 4	M4.PM.vot	M4-F1-cb_1.fits
	M4.PM.dat	M4-F2-brl_10.fits
Messier 12	M12.PM.vot	M12-F1-c_19.fits
	M12.PM.dat	
NGC 6362	NGC6362.PM.vot	NGC6362-F1-c_10.fits
	NGC6362.PM.dat	
Messier 22	M22.PM.vot	M22-F1-c_11.fits
	M22.PM.dat	
NGC 6752	NGC6752.PM.vot	NGC6752-F1-c_05.fits
	NGC6752.PM.dat	
Messier 55	M55.PM.vot	M55-F1-F1-1997.fits
	M55.PM.dat	M55-F2-F2-1999.fits

# 3.10 Bibliografia – Rozdział 3

Bellini i in. 2009, A&A, 493, 959 Cannon & Stobie 1973, MNRAS, 162, 227 Casetti-Dinescu i in. 2007, AJ, 134, 195 Clement i in. 1995, AJ, 110, 2195 Clement i in. 2001, AJ, 122, 2587 Dinescu i in. 1997, AJ, 114, 1014 Dinescu i in. 1999, AJ, 117, 277 Dinescu i in. 2005, ApJ, 618L, 25 Harris 1996, AJ, 112, 1487

Tablica 3.20: Przykładowe wiersze elektronicznego katalogu ruchów własnych gwiazd. Oznaczenie kolumn: (1) ID - numer gwiazdy (zad	czyna
się od cyfry 1 dla pól xxx-F1 i 2 dla pól xxx-F2); (2) & (3) współrzędne równonocne $(\alpha, \delta)_{2000.0}$ dla epoki obrazów referencyjnych; (4)	& (5)
współrzędne X, Y na obrazach referencyjnych; (6)–(9) ruchy własne i ich niepewności; (10) N – ilość epok użytych do wyliczenia $\mu$ ; (11)	dT –
długość bazy czasowej; (12) mem – przynależność do gromady; (13) V – jasność standardowa;	

ID	α	δ	X	Ŷ	$\mu_{\alpha} cos\delta$	$\sigma_{\mu_{lpha} cos \delta}$	$\mu_\delta$	$\sigma_{\mu_\delta}$	Ν	dT	mem	V
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
[#]	[°]	[°]	[piksel]	[piksel]	[mas/yr]	[mas/yr]	[mas/yr]	[mas/yr]	[#]	[yr]	[-]	[mag]
11100007	295.053729	-30.902151	449.000	149.951	0.25	0.22	-0.51	0.29	8	10.217	2	14.586
11100009	295.058880	-30.928524	362.498	509.429	-0.66	0.22	11.84	0.19	9	11.033	0	14.810
11100020	295.066402	-30.924406	277.438	446.329	-0.05	0.17	0.65	0.21	5	11.017	2	16.792
11100021	295.060880	-30.928912	338.443	513.105	-0.36	0.32	1.24	0.16	9	11.025	2	16.796
11100023	295.046117	-30.915949	525.736	346.697	0.53	0.52	-0.31	0.79	13	10.217	1	16.980
11100026	295.071004	-30.916422	230.649	332.343	0.47	0.20	0.06	0.20	5	11.017	2	17.029
11100032	295.066432	-30.905801	295.049	189.641	0.09	0.14	0.15	0.22	6	11.017	2	17.223
11100039	295.056244	-30.921224	400.756	410.949	-0.10	0.11	-0.20	0.11	9	11.025	2	17.359
11100045	295.047850	-30.924146	497.279	458.297	-0.01	0.06	-0.22	0.14	11	11.033	2	17.441
11100046	295.070611	-30.926622	225.463	473.366	-0.61	0.15	0.88	0.07	5	11.017	2	17.455

Ibata i in. 1994, Nature 370, 194 Ibata i in. 1997, AJ 113, 634 Kaluzny i in. 1997, AJ, 113, 2219K Kaluzny & Thompson 2001, A&A, 373, 899 Kaluzny i in. 2005, MNRAS, 359, 677 Kaluzny & Thompson 2009, AcA, 59, 273 Kaluzny i in. 2010, AcA, 60, 245 Lanzoni i in. 2007, ApJ, 670, 1065 Layden & Sarajedini 2003, AJ, 125, 208 Mateo i in. 1996, ApJ, 458, L13 Mazur 1996, praca doktorska Mazur i in. 1999, MNRAS, 306, 727 Milone i in. 2011, arXiv:1111.0552, zaakceptowane w A&A Olech i in. 1999, AJ, 118, 442 Olech i in. 2001, MNRAS, 321, 421 Peng i in. 2010, AJ, 139, 2097 Pietrukowicz & Kaluzny 2003, AcA, 53, 371 Pryor i in. 2010, AJ, 139, 839 Pych i in. 2001, A&A, 367, 148 Samus i in. 2009, PASP, 121, 1378 Sawyer Hogg 1973, PDDO, 3, 6 Sollima i in. 2007, MNRAS, 380, 781 Thompson i in. 1999, AJ, 118, 462 Woods & Bailey 1919, Harvard College Observatory Circular, 216, 1 von Braun & Mateo 2002, AJ, 123, 279 von Braun i in. 2002, AJ, 124, 2067

# 4

# Podsumowanie

W powyższej pracy zostały przedstawione wyniki pomiarów ruchów własnych dla gwiazd w 7 gromadach kulistych nieba południowego. Wyniki zostały poprzedzone: wstępem opisującym podstawy pomiarów astrometrycznych (Rozdział 1.1), rysem historycznym dotyczącym astrometrii w gromadach gwiazdowych (Rozdział 1.2), a także metodami stosowanymi w astrometrii gromad gwiazdowych z pomocą detektorów CCD (Rozdział 1.3). Opisano główne cele pracy (Rozdział 1.4). Przedstawiono wykorzystane w pracy dane obserwacyjne (Rozdział 2.1), krótko zaprezentowano każdą z gromad (Rozdział 2.2), a także opisano zastosowane metody astrometryczne i pomiary fotometryczne (Rozdział 2.3). Metody pomiaru ruchu własnego została przetestowana i porównana z użyciem danych dla gromady  $\omega$  Centauri (Rozdział 3.1).

Dla każdej z 7 gromad przedstawiono: wyniki pomiarów ruchów własnych, analizę ich niepewności ruchów własnych, kompletność tych pomiarów, diagramy CMD gromad z uwzględnieniem przynależności gwiazd do gromady, dyskusję przynależności gwiazd zmiennych do gromady oraz wyselekcjonowano gwiazdy, znajdujące się poza typowymi obszarami na CMD a w niektórych przypadkach zanalizowano liczność populacji gwiazd podwójnych ciągu głównego (Rozdziały 3.2–3.8). W każdej z gromad (poza gromadą  $\omega$  Centauri) zmierzono ruchy własne dla co najmniej kilkunastu tysięcy gwiazd (nawet 22.5 tys. gwiazd dla NGC 3201). Wykorzystano przy tym pozycje wyznaczone na 9-20 obrazów w bazie czasowej od 8 do 13 lat. Dla każdej z gromad zmierzono ruchy własne dla gwiazd do jasności granicznej  $V \approx 20$ . Typowa precyzja pomiarów dla gwiazd o jasności  $V \approx 19$  zawierała się w przedziale  $\sigma_{PM} = 0.29 \div 0.67$  mas/yr. Ponadto dla gromady Messier 55 uzyskano wyznaczenie jej ruchu własnego względem galaktyk tła oraz oszacowanie ruchu własnego galaktyki karłowatej w Strzelcu. Rozdział 3.9 przedstawia opis katalogu załączonego do pracy na elektronicznym nośniku danych.

Wyznaczenie ruchu własnego gwiazd w gromadach kulistych przy pomocy naziemnych teleskopów wyposażonych w kamery CCD pozwala na znalezienie gwiazd tła dla gromad o znacznym ruchu własnym względem gwiazd tła. Mimo tego trudność w odróżnieniu gwiazd tła od gwiazd gromady potrafią być istotne (np. dla Messier 12 i NGC 6362). Dlatego też, definitywne ustalenie przynależności danej gwiazdy do gromady wymaga ustalenia jej prędkości radialnej i porównanie jej z prędkością radialną samej gromady. Tab. 4.1 podsumowuje pomiary ruchów własnych gwiazd wykonane w ramach tej pracy.

ID	Ν	<n></n>	$\Delta T$	$V_{lim}$
			[lat]	
$\omega$ Cen	2 057	22	9.50	21.9
NGC 3201	22 544	12	12.25	22.0
M 4	13 036	12	11.08	21.5
M 12	12 654	9	8.15	21.8
NGC 6362	11 781	9	12.96	21.9
M 22	10 961	12	10.03	21.0
NGC 6752	12 986	20	11.09	21.0
M 55	16 945	11	11.03	21.0

Tablica 4.1: Podsumowanie wyników pomiarów ruchów własnych gwiazd.

gdzie N – to liczba gwiazd dla których dokonano pomiar  $\mu$ , <n> – mediana ilości użytych obrazów,  $\Delta T$  – baza czasowa liczona w latach,  $V_{lim}$  – graniczna jasność gwiazd dla jakiej zmierzono ruchy własne.