

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Pawlaka
„Poszukiwanie i analiza statystyczna układów podwójnych w Obłokach Magellana”**

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgr Michała Pawlaka poświęcona jest „poszukiwaniu i analizie układów podwójnych w Obłokach Magellana” (str. 5). To zdanie oraz przedstawione w rozprawie wyniki pozwalają się domyślać, że takie właśnie są cele projektu doktorskiego mgr Pawlaka: zidentyfikowanie układów podwójnych w Obłokach Magellana (Rozdz. 4 i 5), a następnie analiza statystyczna tej próbki. Analiza ta ogranicza się w rozprawie do wyznaczenia i dyskusji w Rozdz. 6 zależności okres–jasność absolutna (PL) dla czerwonych olbrzymów ze zmianami elipsoidalnymi (Rozdz. 6.2) oraz zależności okres–jasność absolutna–wskaźnik barwy (PLC) dla gwiazd ciągu głównego (Rozdz. 6.3).

Układy podwójne pełnią niezwykle ważną rolę w astronomii. Dwa zastosowania takich układów, tj. wyznaczanie parametrów składników (w szczególności ich mas i promieni) oraz odległości do nich (a tym samym do układów, których są członkami), zostały bardzo mocno podkreślone w rozprawie. Wypada mi dodać, że układy podwójne (zwłaszcza bliskie) stanowią doskonałe źródło badań wielu zjawisk astrofizycznych i dynamicznych. Rozprawa korzysta z danych projektu OGLE-IV. Próbką prawie 50 tys. gwiazd zaćmieniowych znalezionych w danych OGLE-IV dla Obłoków (to jeden z wyników tej rozprawy) niewątpliwie pozwala na zrealizowanie wielu ciekawych projektów naukowych. Mgr Pawlak zdecydował się wykorzystać je do badania zależności PL i PLC układów elipsoidalnych i zaćmieniowych, w szczególności kontaktowych. To niewątpliwie ważne zadanie, właściwe dla projektu doktorskiego.

Najważniejsze wyniki uzyskane przez mgr Pawlaka i przedstawione w recenzowanej rozprawie, zostały opublikowane w trzech pracach w *Acta Astronomica*. Do tych wyników należy przede wszystkim wyodrębnić prawie 50 tys. układów zaćmieniowych (a w zasadzie układów zaćmieniowych i układów elipsoidalnych) na podstawie fotometrii projektu OGLE-IV uzyskanej w latach 2005–2010. Jest to – jak podkreśla mgr Pawlak (str. 23) – najliczniejsza próbka tego typu gwiazd dla Obłoków. Jest to próbka wystarczająco liczna, żeby oprzeć na niej interesujące badania statystyczne. Mgr Pawlak ograniczył się do wykorzystania tej próbki do zbadania zależności PL dla gwiazd położonych na gałęzi czerwonych olbrzymów oraz zależności PLC dla gwiazd położonych na ciągu głównym. Na początku Rozdz. 6 (str. 29) wyjaśnia, że tego typu zależności mogą stanowić narzędzie do wyznaczenia odległości we Wszechświecie. Niestety, nie wskazuje, w jakich przypadkach analizowane przez niego zależności mogą znaleźć praktyczne zastosowanie. Wydaje się, że z uwagi na duży rozrzut tych zależności, ich praktyczne zastosowanie jest bardzo ograniczone. W tym kontekście istotnym wynikiem pozostawałoby zrozumienie dlaczego takie zależności istnieją i dlaczego są takie, a nie inne. To wyjaśnienie znajdujemy wprawdzie w rozprawie, jego uzasadnienie jest jednakże głównie jakościowe, a nie ilościowe. Muszę przyznać, że kończyłem czytanie tej rozprawy z uczuciem sporego niedosytu – wydaje się, że tak liczna próbka gwiazd podwójnych mogła być wykorzystana do badań znacznie lepiej, nawet jeśli ograniczyć się tylko do analizy zależności PL i PLC. Zamiast podsumowania (Rozdz. 7) lepsza byłaby dyskusja otrzymanych zależności PL i PLC w kontekście ich przydatności do wyznaczania odległości (lub w innym celu). Wyniki uzyskane w rozprawie uważam za ważne i interesujące, ale jednak tylko przyczynkowe.

Pomijając pierwsze trzy rozdziały i podsumowanie, rozprawa doktorska jest w zasadzie tłumaczeniem trzech opublikowanych prac. Zwięzłość, która jest zaletą dla publikowanych prac, nie jest jednakże wskazana w przypadku rozprawy doktorskiej, w której powinien się znaleźć szczegółowy, odpowiednio zilustrowany rysunkami, opis „kuchni”, którą posługuje się kandydat na doktora. Tych szczegółów w wielu miejscach tej rozprawy brakuje. Przejdę teraz do uwag merytorycznych dotyczących recenzowanej rozprawy, w szczególności także do uzasadnienia mojej oceny przedstawionej wyżej.

Rozdz. 1 (Wprowadzenie): Wprowadzenie do pracy jest bardzo lakoniczne. Jeśli mowa w nim o wykorzystaniu układów zaćmieniowych do wyznaczania odległości we Wszechświecie, spodziewałbym się, że na końcu rozprawy przedyskutowane zostaną otrzymane wyniki (zależności PL/PLC) w tym kontekście. Takiej dyskusji w rozprawie prawie nie ma. We wprowadzeniu brakuje też opisu motywacji podjęcia takiego, a nie innego zadania jako doktorskiego projektu badawczego.

Rozdz. 2 (Układy podwójne) i 3 (Projekt OGLE): O ile rozdział poświęcony projektowi OGLE, mimo, że krótki, uważam za wystarczający, o tyle rozdział poświęcony układom podwójnym zawiera często informacje zbyt uproszczone lub nieprecyzyjne. Skoro w dalszej części rozprawy sporo czasu poświęca się układom elipsoidalnym, spodziewałbym się szerszej dyskusji efektów bliskości w układach podwójnych czy choćby dyskusji od jakich parametrów i jak zależy amplituda obserwowanych zmian. Pozwolę sobie wytknąć kilka nieścisłości:

- Oznaczenia EA/EB/EW (pochodzące z GCVS) odnoszą się do morfologii krzywych blasku i choć z podziałem na układy rozdzielone, półrozdzielone i kontaktowe mają wiele wspólnego, to jednak związek ten daleki jest od identyczności.
- Co do postulowanej na tej samej stronie (oraz na str. 23, 44, 45, 49 i 51) równowagi termicznej układów kontaktowych, to chciałbym podkreślić, że nie zawsze tak jest i znanych jest sporo układów typu W UMa, w których takiej równowagi nie ma (zob. np. Siwak i in., 2010, AcA 60, 305).
- Równanie (2.1) przedstawia uogólnione III prawo Keplera; użyte w nim zmienne są powszechnie znane, niemniej jednak należałoby je opisać.
- K_1 i K_2 definiowane są nie jako amplitudy prędkości radialnych, ale połowy zakresu zmian prędkości radialnych.
- We wzorach (2.3), (2.5) i (2.6) należałoby użyć uaktualnionej wartości stałej czyli $1,036149 \times 10^{-7}$, zobacz np. Torres i in., 2010, A&A Rev 18,67.
- Równanie (2.7) jest bardzo dużym przybliżeniem, nie uwzględniającym pociemnienia brzegowego. Przy okazji, dosyć często używany jest termin „temperatura” zamiast „temperatura efektywna”. To dwa bardzo różne pojęcia.

Rozdz. 4 (Poszukiwanie układów podwójnych) i Rozdz. 5 (Kolekcja układów podwójnych w Obłokach Magellana)

W Rozdziale 4 opisana została metoda, która została użyta do automatycznej selekcji układów zaćmieniowych i elipsoidalnych. Mgr Pawlak zdecydował się użyć metody opartej na algorytmie *random forest* (RF). Jest to oczywiście wybór subiektywny, choć metody oparte na drzewie decyzyjnym są często stosowane do klasyfikacji gwiazd zmiennych. Opis metody w Rozdz. 4 jest bardzo skrótowy. A tu właśnie można było pokazać wiele szczegółów opisywanej metody i przedyskutować na ile dobrze pracuje ona w tym konkretnym przypadku, kiedy celem jest wyodrębnienie gwiazd podwójnych zaćmieniowych i elipsoidalnych. Piszę „wyodrębnienie”, bo choć w tytule Rozdz. 4.1 i 4.3 znajdujemy słowo „klasyfikacja”, to w zasadzie nie wiadomo na jakie klasy (zgodnie z Rys. 4.1) podzielone zostały badane gwiazdy. Ile tych klas było? Jakie były warunki logiczne? Czy gwiazdy zaćmieniowe i elipsoidalne stanowiły jedną klasę czy też więcej?

Wybór algorytmu BLS do wyznaczania okresów zmienności też jest jednym z możliwych wyborów, choć uzasadnienie tego wyboru nie jest przedyskutowane w rozprawie

i ogranicza się do stwierdzenia, że został on opracowany w celu poszukiwania tranzytów. Większość gwiazd zaćmieniowych i elipsoidalnych ma jednak krzywe blasku znacznie różniące się od tranzytów i taka dyskusja pokazująca w tym względzie zalety BLS w stosunku do innych metod byłaby na miejscu. Tym bardziej, że istnieje wiele innych metod (choćby minimalizacja dyspersji fazy czy analiza wariancji), które dobrze sobie radzą z niesinusoidalnymi krzywymi blasku. A już na pewno spodziewałbym się pokazania przykładów dopasowania dla krzywych blasku gwiazd zaćmieniowych i elipsoidalnych o różnym kształcie. Algorytmy oparte o transformatę Fouriera także mogą się sprawdzać w analizie gwiazd podwójnych zaćmieniowych i dać zarówno poprawny okres jak i parametry do klasyfikacji, o ile wzięte zostaną pod uwagę zależności fazowe między harmonikami.

Inne uwagi do Rozdz. 4:

- Brakuje szczegółowego opisu parametrów uzyskiwanych w algorytmie BLS i ich ilustracji, np. co to jest efektywność wykrycia sygnału (SDE)?
- Co to jest zysk informacji (str. 20/21)? Jak jest definiowany?
- Można było pokazać i przedyskutować przykłady fałszywych detekcji – to mogłoby pomóc w decyzji jak modyfikować używany algorytm selekcji.
- Dla danych obejmujących przedział o długości $W = \text{ok. } 2000 \text{ d}$ przyjęty krok w częstotliwości $0,0005 \text{ d}^{-1} \approx 1/W$. To krok na granicy rozdzielczości, który przy wąskich zaćmieniach może prowadzić do problemu z poprawną identyfikacją okresu. Być może w algorytmie BLS takiego zagrożenia nie ma, ale w algorytmach opartych na transformacie Fouriera próbuje się przestrzeń częstotliwości z krokiem rzędu $1/(10W)$, czyli o rząd mniejszym.

W Rozdziale 5 mowa jest o podziale próbki (układów podwójnych) na układy kontaktowe, niekontaktowe i niezaćmieniowe układy elipsoidalne (str. 23). Nie napisano jednak czy ten podział odbywał się na etapie pracy algorytmu RF czy też później. Jakie były kryteria tej klasyfikacji? Jak liczne są te podgrupy? W samym katalogu (kolekcji), dostępnym na stronie OGLE, nie znalazłem informacji o jakiegokolwiek klasyfikacji. Byłoby ciekawe zobaczenie jakie te trzy grupy gwiazd podwójnych mają rozkłady jasności i $\log P$ (Rys. 5.2 i 5.3 pokazują rozkłady tylko dla całej kolekcji). Nie jest też pokazane jaki jest rozkład przestrzenny tych gwiazd, ani gdzie na wykresach wskaźnik barwy – jasność gwiazdy tych trzech grup się znajdują. Uważam to za dość duży mankament tej pracy, zwłaszcza w świetle tego, że te trzy grupy gwiazd traktowane są rozdzielnie w Rozdz. 6.

Rozdz. 6 (Zależności okres – jasność)

Rozdział 6 stanowi najważniejszą część rozprawy. Na jego początku podkreślono znaczenie różnych zależności okres – jasność w astronomii, zwłaszcza ich użyteczność w wyznaczaniu odległości we Wszechświecie. Kłopot w tym, że o ile takie zależności dla cefeid i gwiazd RR Lyrae rzeczywiście znajdują zastosowanie do wyznaczania odległości, nie znam przykładu wykorzystania takich zależności dla ciągu E, analizowanego w rozprawie. Spodziewałbym się więc rzeczowej dyskusji użyteczności zależności dyskusowanych w Rozdz. 6 do wyznaczania odległości, a przynajmniej rzeczowego wyjaśnienia ich istnienia od strony fizycznej. Tego jednak w rozprawie jest niewiele, a cała dyskusja istnienia ciągów zawiera wiele wątpliwych stwierdzeń. Z drugiej strony mgr Pawlak nie zwraca czasami uwagi na ciekawe cechy pokazywanych wykresów, które w moim mniemaniu warto byłoby wyjaśnić. Oto kilka szczegółowych uwag do Rozdz. 6.2:

- Z wyjątkiem opisu równania (6.4), nie wiadomo jakie jasności dla gwiazd zaćmieniowych używane są na wykresach (i w równaniach): średnie, w minimum czy maksimum jasności.
- Co oznacza pojęcie „najpewniejsze obiekty” w podpisie pod Rys. 6.2, 6.3 i 6.5 oraz na str. 32?

- Na Rys. 6.4 widać wyraźnie, że układy elipsoidalne z okresami krótszymi od 40 dni znajdują się zarówno na gałęzi RC jak i na ciągu głównym. Czym różnią się te dwie próbki?
- Czym jest wyraźne zgrupowanie obiektów w okolicy $(V - I, W_I) = (0,5; 18)$ na Rys. 6.4?
- W pracy stawiana jest hipoteza, że ciąg $E_2 - E_1$ na Rys. 6.3, 6.6, 6.7, 6.12 i 6.13 stanowią układy olbrzym – olbrzym, a ciąg $E_3 - E_1$, układy olbrzym – karzeł. Hipoteza ta weryfikowana jest w rozprawie tylko jakościowo poprzez pokazanie krzywych jasności układów z poszczególnych obszarów wykresu $P - W_I$ (Rys. 6.10 i 6.11) oraz analizę amplitud zmian dla tych gwiazd (np. Rys. 6.7). Tymczasem można by zweryfikować tę hipotezę w sposób ilościowy, gdyby użyć do jej weryfikacji wyników modelowania krzywych jasności dla założonych parametrów układu. Osobiście mam wątpliwości, co do prawdziwości niektórych stwierdzeń zawartych w tym rozdziale czy do końcowych wniosków, właśnie dlatego, że stawiana hipoteza nie została dobrze zweryfikowana (choć taka możliwość istniała). Dla przykładu, układ olbrzyma z gorętszym karłem dałby silny efekt odbicia, który ma okres równy okresowi orbitalnemu, a więc dwa razy dłuższy od okresu efektu elipsoidalności. Czy takie układy znajdują się w wyselekcjonowanej próbce czy też nie?
- Skoro zależności dla postulowanych układów olbrzym – olbrzym i olbrzym – karzeł przecinają się na Rys. 6.13, jakie parametry mają układy z obydwu ciągów w punkcie przecięcia? Wcale nie jestem pewien, że jak pisze mgr Pawlak ma to związek z tym, że zaniedbywalny staje się wpływ towarzysza (str. 39).
- Nie wydaje mi się, żeby linia pokazana na Rys. 6.13 jako dopasowanie do układów o małych amplitudach (czerwona) rzeczywiście była wynikiem dopasowania do pokazanych punktów, bo w obszarze długich okresów większość punktów leży wyraźnie poniżej tej linii.
- Wbrew temu, co napisano na str. 32, zależności E_3 nie widać na Rys. 6.3 ani dla całej próbki układów elipsoidalnych, ani dla „najpewniejszych obiektów”. Można uznać, że widać ją dopiero po podziale obiektów ze względu na amplitudę zmian (Rys. 6.7 i 6.13).
- Jaka jest fizyczna przyczyna bimodalności rozkładów pokazanych na Rys. 6.2 i 6.5?
- Jakie znaczenie ma nieuwzględnienie wpływu ekstynkcji na pokazane na Rys. 6.9 parametry? Czy może to częściowo tłumaczyć widoczną zależność?
- Dlaczego jeśli jeden olbrzym w układzie jest zdeformowany, drugi ma być niezdeformowany (drugi akapit na str. 37)?
- W jaki sposób zostały wyodrębnione układy olbrzym – olbrzym i olbrzym – karzeł, pokazane na Rys. 6.12? Jakie były kryteria tej separacji? Co to są układy niesklasyfikowane? Jakie były kryteria tej klasyfikacji?
- Program *fnpicks* ma trzech autorów.

Badając zależność PLC dla układów kontaktowych na ciągu głównym, w tym ich użyteczność do wyznaczania odległości, można się było także posłużyć modelowaniem takich układów do interpretacji otrzymanych wyników. Można się domyślać, że duży rozrzut wokół tej zależności odzwierciedla fakt, że układy te nie tworzą fizycznie jednorodnej próbki, w szczególności nie zawierają układów o takim samym stosunku mas, tak samo zaawansowanych ewolucyjnie na ciągu głównym (promienie gwiazd masywnych rosną mniej więcej dwukrotnie na ciągu głównym) czy w tak samo głębokim kontakcie (być może nie są w ogóle układami kontaktowymi). Użyteczność wyznaczonych zależności jest więc bardzo wątpliwa. Podobnie jak do Rozdz. 6.3 pozwolę sobie na kilka uwag krytycznych:

- Wnioskowanie wskazane w pierwszym zdaniu Rozdz. 6.3 nie jest poprawne: z większego zakresu temperatur efektywnych nie wynika wprost większy zakres jasności powierzchniowych, bo jasność powierzchniowa zależy od czwartej potęgi temperatu-

ry efektywnej. Tak naprawdę, zakres jasności powierzchniowych jest mniejszy dla gwiazd gorących niż dla gwiazd chłodnych.

- W przeciwieństwie do mgra Pawlaka (str. 40), nie mam pewności, że wszystkie obiekty pokazane na Rys. 6.15 należą do LMC. W szczególności dotyczy to dwóch grup najbardziej czerwonych gwiazd: kilku gwiazd z $V = 16,3 - 17,7$ mag oraz najśłabszych gwiazd, z jasnościami $V \sim 19$ mag. Jeśli tylko niektóre z nich należą do Galaktyki, może mieć to duży wpływ na końcowy wynik.
- Stosunek mas dla układów kontaktowych wcale nie musi być zawsze bliski 1 i dla „klasycznych” gwiazd W UMa wcale tak nie jest. Tym bardziej nie musi być dla analizowanych w Rozdz. 6.3 gwiazd, co autor sam zauważa (str. 43 i 51). To z pewnością rzutuje na rozrzut zależności PLC. Można by było spróbować zbadać jak, gdyby udało się włączyć modelowanie krzywych blasku do rozprawy.
- Jednakowa głębokość zaćmień nie oznacza równowagi termicznej, podobnie jak niejednakowa nie oznacza, że jej nie ma. Masy i promienie też odgrywają rolę w tym jak wygląda krzywa jasności układu.
- Nie jest dla mnie jasne jaki model regresji był stosowany w wyznaczaniu zależności PLC (a wcześniej PL). Co było minimalizowane?
- W podpisie pod Rys. 6.18 mowa jest o tym, że na górnym panelu układy bliskie kontaktu leżą średnio poniżej układów kontaktowych. Można pokazać czy jest to statystycznie istotna różnica.
- Zależność jasności powierzchniowej od wskaźnika barwy nie jest liniowa dla wszystkich gwiazd. Pokazuje to np. David Gray w swoim podręczniku „*The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*” (str. 352). Nie dziwi więc wynik pokazany na Rys. 6.21.
- Młoda populacja gwiazd w LMC ma dość spory rozrzut metaliczności. Możliwe więc, że i ten czynnik wpływa na większy rozrzut zależności PLC.

Nie mam uwag do Rozdz. 7 (Podsumowanie), choć – jak napisałem wyżej – wolałbym w tym miejscu zobaczyć szerszą dyskusję otrzymanych wyników.

Strona redakcyjna pracy

Praca napisana jest stosunkowo dobrym językiem i dobrze się ją czyta. Nie ma praktycznie wcale „kalek” z języka angielskiego, a „*readout noise*” (str. 15) ma swój polski odpowiednik: prąd odczytu. Zdarzają się drobne błędy ortograficzne [„małomasywne” (kilkukrotnie) i „spośród” (str. 23) pisze się razem] lub przejęzyczenia („metoda najmasywniejszych kwadratów”, str. 44), a liczba literówek, błędów stylistycznych i interpunkcyjnych jest do zaakceptowania. Ilustrując pracę rysunki są w większości dobrze opisane i przejrzyste, choć w niektórych brakuje opisu wszystkich występujących na nich symboli (np. linie i ciągi na Rys. 6.3, symbole w tle na Rys. 6.15). Na Rys. 6.11 w podpisie powinno być „olbrzym – karzeł”, a nie „olbrzym – olbrzym”.

Końcowa konkluzja

Podsumowując, uważam, że mimo dość licznych mankamentów, a w szczególności niewielkiej dyskusji otrzymanych wyników, rozprawa doktorska mgra Michała Pawlaka zawiera wartościowe wyniki naukowe. Są one na tyle istotne dla badań gwiazd podwójnych, że pozwala mi to uznać rozprawę za **spełniającą formalne warunki stawiane rozprawom doktorskim** i wnioskować o dopuszczenie mgra Michała Pawlaka do dalszych etapów postępowania, w tym publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



