

prof. dr hab. Andrzej Pigulski
Instytut Astronomiczny
Uniwersytetu Wrocławskiego
ul. Kopernika 11
51-622 Wrocław

Ocena rozprawy habilitacyjnej
„Fotometryczny przegląd bardzo małych planetoid bliskich Ziemi”
oraz dorobku naukowego dra Tomasza Kwiatkowskiego

Ocena rozprawy

Przedstawiona mi do rozprawy rozprawa habilitacyjna dra Tomasza Kwiatkowskiego „Fotometryczny przegląd bardzo małych planetoid bliskich Ziemi” składa się z pięciu prac opublikowanych w latach 2007-2010 w *Astronomy & Astrophysics*. Dr Kwiatkowski jest pierwszym autorem jednej z tych prac, a pierwszym w pozostałych. Załączone oświadczenia współautorów i wyjaśnienia zawarte w autoreferacie nie budzą żadnych wątpliwości, że udział dra Kwiatkowskiego w przygotowaniu tych prac był dominujący. W tekście recenzji odwoływał się będą do tych prac w taki sam sposób, jak robi to dr Kwiatkowski we wstępie do rozprawy, czyli oznaczając je w porządku chronologicznym, od P1 do P5.

Za temat swojej rozprawy habilitacyjnej dr Kwiatkowski wybrał bardzo małe planetoidy (dalej w skrócie BMP), które definiuje jako planetoidy o rozmiarach mniejszych od 150 m. Definicja ta ma swoje fizyczne uzasadnienie pochodzące stąd, że praktycznie nie obserwuje się szybko rotujących planetoid większych niż 150 m. Tłumaczy się to tym, że większe planetoidy nie są na tyle spójne wewnętrznie, aby przeciwstawić się siłom, które przy szybkiej rotacji dążą do ich rozerwania. W przeciwieństwie do nich, BMP są obiektami monolitycznymi i mogą obracać się bardzo szybko. Z naukowego punktu widzenia obiekty te są niewątpliwie ciekawe, gdyż ich dokładne zbadanie powinno dać m.in. przyczynek do zrozumienia ewolucji zderzeniowej obiektów głównego pasa planetoid. Wybór taki narzuca jednak bardzo poważne ograniczenia obserwacyjne. Po pierwsze, obiekty takie są obiektami bardzo słabymi, co wymusza obserwacje dużymi teleskopami. Po drugie, są dostępne do obserwacji tylko wtedy, kiedy znajdują się blisko Ziemi. Zaletą tego faktu jest to, że można je wtedy badać metodami radarowymi, natomiast wady są dużo poważniejsze: szybki ruch na niebie oraz — poza nielicznymi wyjątkami — brak możliwości powtórnej obserwacji w skali czasowej rzędu kilku lat. Systematyczny przegląd fotometryczny kilkudziesięciu BMP za pomocą teleskopu SALT, który udało się zrealizować drowi Kwiatkowskiemu, jest więc niewątpliwym sukcesem.

Obserwacje wykonane kamerą SALTICAM na teleskopie SALT stanowią materiał obserwacyjny wykorzystany w czterech pracach stanowiących rozprawę, P2-P5. Warto tu pochwalić habilitanta za to, że zdołał wymyślić program obserwacyjny, który dał się zrealizować na tym bardzo dużym teleskopie, który nie był w pełni funkcjonalny, a jego wyposażenie — dość ubogie. To chyba zresztą był dla dra Kwiatkowskiego dość szczęśliwy zbieg okoliczności, gdyż z tych powodów urządzenie to nie było szczególnie atrakcyjne dla innych obserwatorów.

Za najwartościowszy wynik rozprawy habilitacyjnej dra Kwiatkowskiego uważam znaczne zwiększenie próbki BMP, dla których wyznaczone zostały synodyczne

okresy rotacji oraz oszacowane rozmiary i kształty. Poprawiło to znacznie statystykę tych obiektów i umożliwiło dyskusję efektów fizycznych, w szczególności efektu YORP (P4) czy spójności materiałowej BMP (P5). Szczegółowa analiza krzywej blasku domniemanej podwójnej planetoidy 2004 RZ₁₆₄ (praca P1), która w świetle wyżej wspomnianej definicji nie jest BMP, wpisuje się dobrze w tematykę badań habilitanta. Szczegółowe uwagi do wyników zawartych w rozprawie habilitacyjnej pozwolę podzielić sobie na odrębne części tematyczne:

- **Obserwacje.** Fotometria poruszającego się obiektu zarejestrowanego na obrazie CCD¹ nie jest zadaniem łatwym gdyż dwuwymiarowy profil takiego obiektu jest inny niż gwiazd, względem których mierzymy jego jasność. Teleskop rzadko kiedy wyposażony jest w możliwość śledzenia za obiektem poruszającym się na tle gwiazd. W pracy P1 (obserwacje z Borowca) wyraźnie sugeruje się, że śledzenie za obiektem jest lepsze niż śledzenie za gwiazdami. Nie bardzo rozumiem zaletę tego pierwszego podejścia (rozmażane są i tak albo obrazy gwiazd albo planetoidy) poza może przypadkiem kiedy planetoida jest wyraźnie słabsza od gwiazd względem których mierzona jest jej jasność. Tak czy inaczej obserwacje z Borowca i Pic du Midi dla 2004 RZ₁₆₄ są jedynymi w całej rozprawie, dla których teleskop śledzi planetoidę (Borowiec) lub przesuwa się w tempie równym połowie tempa ruchu planetoidy na tle gwiazd (Pic du Midi). Nie wydaje się, żeby w jakiś szczególny sposób dawało to lepszą fotometrię.
- **Kalibracja danych z SALT-a.** Poza obserwacjami 2007 KE₄ (P3) wszystkie obserwacje uzyskane za pomocą kamery SALTICAM nie zostały poprawione na flat-field (dalej w skrócie FF). Jak wyjaśnia habilitant, nie dało się tego zrobić poprawnie i w związku z tym ten etap kalibracji został pominięty. Habilitant pisze (praca P3), że jest to wynikiem braku ruchomej osłony, co powodowało, że w trakcie obserwacji w sposób ciągły zmieniała się wiązka padająca na detektor. Wspomina jednak o uzyskaniu FF na wieczornym niebie, a także o FF, które zostały wykorzystane do kalibracji obserwacji 2007 KE₄, a które zostały zrobione na nocnym niebie rozjaśnionym poświatą Księżyca. Jest to dla mnie wyjaśnienie trochę niespójne, bo jeśli dało się zrobić „nocne” FF poprawnie, powinno się też dać zrobić takie FF na porannym czy wieczornym niebie. Z kolei sam fakt zmiany wiązki (tę zmianę rozumiem w ten sposób, że zmienia się efektywna powierzchnia lustera, z której dochodzą fotony padające na detektor) nie powinien wpływać na poprawność uzyskania FF. Oczywiście poważniejszym problemem byłoby gdyby efektywna powierzchnia lustera była różna (i zmienna) dla różnych miejsc na detektorze. Poprawka na FF ma istotne znaczenie przede wszystkim dla kompensacji różnic w małej skali przestrzennej, np. zabrudzeń na oknie kamery czy mniejszej czułości grupy pikseli na detektorze. W tym kontekście wydaje mi się, że habilitant mógł pokusić się o taką poprawkę. Lepiej bowiem choć częściowo skompensować wspomniane zmiany niż nie zrobić tego wcale. Ma to o tyle znaczenie, że w projekcie tym nie dało się prowadzić obserwacji w taki sposób, że obserwowane było cały czas to samo pole (z danymi gwiazdami w dokładnie tym samym miejscu detektora). Porusza się sama planetoida, a obserwacje podczas kilku nocy wymuszały na pewno zmianę obserwowanego pola. To oczywiście rzutuje na ostateczne wyniki i ich wiarygodność. Habilitant wspomina o niegaussowskim szumie

¹ Habilitant używa we wstępie do rozprawy i autoreferacie pojęcia „ramka CCD”. To zapewne kalka z angielskiego „frame”, która nie wydaje mi się jednak poprawna. Jeśli trzymać się analogii do obrazu i ramy/ramki, to z całą pewnością obraz odpowiada temu, co uzyskujemy z kamery CCD jako materiał do analizy. Bywa oczywiście, że rama jest ładniejsza (i droższa) od obrazu, ale to raczej wyjątek niż reguła. Będę zatem używał pojęcia „obraz CCD”.

na poziomie 0.05-0.1 mag jako efekcie braku poprawki na FF. To chyba zbyt optymistyczne stwierdzenie, ale na szczęście większość obserwowanych planetoid wykazuje zmiany blasku dużo większe, często większe niż 1 mag. Dość powszechne jest stosowanie stałych poprawek w celu połączenia fragmentów krzywych blasku, z tej samej i z różnych nocy. Nie jest dla mnie jasne, czy wynika to tylko z faktu zmiany zestawu gwiazd porównania (w tym wypadku poprawkę da się w większości przypadków wyliczyć) czy też częściowo wynika także z nieuwzględnienia FF w kalibracji (i poprawka jest przyjmowana dowolnie). Pewien brak zaufania do własnych wyników przewija się przez prace: w P5 wspomniane jest (str. 8), że oprócz obiektów omówionych w P3 i P5 oraz negatywnych detekcji (Tab. 3 w P5) obserwowanych było bardzo wiele obiektów, które „są trudne do zinterpretowania” wspominając o efektach instrumentalnych jako jednym z powodów tych trudności. Dla 2007 XN₁₆ (P5) autorzy piszą, że nie udało im się pogodzić obserwacji z wszystkich trzech nocy sugerując jakiś bliżej niesprecyzowany błąd dla dwu krótszych nocy jako powód niezgodności.

- **Redukcja obrazów CCD.** Za wyjątkiem części obserwacji 2004 RZ₁₆₄ (praca P1) habilitant i jego współpracownicy używali do redukcji obrazów CCD własnych programów. Fotometria, którą uzyskali to — o ile zdołałem się zorientować — w ogromnej większości czy nawet w całości fotometria aperturowa. Zrozumiałe są dla mnie powody takiego podejścia: fotometria aperturowa jest stosunkowo łatwa do wykonania zarówno dla gwiazd, których obrazy mają dość symetryczne profile jak i nieco rozmazanych wskutek ruchu obrazów planetoid. Takie ograniczenie się tylko do fotometrii aperturowej ma jednak swoje wady. Po pierwsze, nie można wykorzystać obrazów CCD, na których obraz planetoidy zlewa się z obrazem pobliskiej gwiazdy (o czym habilitant wspomina w swoich pracach). Po drugie, uniemożliwia to praktycznie obserwacje obiektów przechodzących przez płaszczyznę Galaktyki (gęste pole gwiazdowe). Znalazło to swój wyraz w pracy P4, gdzie habilitant wyraźnie podkreśla jako niekorzystne te powroty planetoid, kiedy będą one obserwowane na tle Drogi Mlecznej. Na str. 8 Wstępu habilitant pisze też, że „nie najlepsze [czyli niesymetryczne] profile [...] uniemożliwiają fotometrię profilową, a ruch obserwowanego obiektu w zasadzie wyklucza stosowanie metody odejmowania obrazów”. Otóż obydwa te stwierdzenia nie są prawdziwe. Po pierwsze, to właśnie metoda odejmowania obrazów powinna (i może) być zastosowana w bardzo gęstych polach, np. podczas ruchu planetoidy w płaszczyźnie Galaktyki. Po drugie, fotometria profilowa ma rację bytu dla obiektów ruchomych. Profil obrazu poruszającej się planetoidy może być bowiem wyliczony jeśli dysponujemy profilem gwiazdy (w założeniu obrazem obiektu punktowego) i informacją o ruchu (kierunek, prędkość kątowna) planetoidy. Na przyszłość sugerowałbym więc napisanie takiego oprogramowania, tym bardziej, że fotometria profilowa jest dokładniejsza niż aperturowa dla obiektów słabych, a takimi często są planetoidy. Dodatkowo można w ten sposób uzyskać dokładną pozycję planetoidy na środek ekspozycji, a nawet próbować uzyskać (przy prostym modelu, np. liniowych zmian) charakter zmian jasności planetoidy w trakcie ekspozycji. To z kolei umożliwiłoby wykonywanie dłuższych ekspozycji bez obawy uśrednienia zmian jasności, który to problem w rozprawie przewija się kilkakrotnie. W tym kontekście ciekaw jestem, w jaki sposób dobierane były rozmiary i kształty apertur podczas wykonywania fotometrii aperturowej.
- **Wyznaczanie synodycznych okresów rotacji.** Krzywe blasku planetoid, ze względu na ich kształt i fakt, że świecą odbitym światłem, są okresowe tylko przy założeniu rotacji wokół osi głównej i niewielkich zmianach kąta fazowego. Dla BMP można się spodziewać więcej niż jednego maksimum w czasie jednego okresu rotacji, najczęs-

ciej dwu maksimów. Przy wyznaczaniu okresów rotacji habilitant stosuje dwie metody: bliżej niesprecyzowany kod oparty na transformacie Fouriera (praca P1) i dopasowywanie skończonego szeregu Fouriera zawierającego harmoniki do drugiej, czwartej, szóstej lub ósmej włącznie (prace P2 i P3) metodą najmniejszych kwadratów, po czym użycie testu χ^2 jako parametru jakości dopasowania. Dokładność wyznaczenia okresu/częstotliwości rotacji dość silnie zależy od zastosowanej metody (symulacje Monte Carlo z założonym szumem gaussowskim o $\sigma = 0,15$ mag). To 0,15 mag wynika zapewne z wcześniejszych oszacowań błędu fotometrii, ale tak naprawdę można byłoby ten błąd oszacować *post factum* z rozrzutu residuów. Mam wrażenie, że dla wielu planetoid jest on znacznie różny od 0,15 mag. Poza tym założenie gaussowskiego szumu w symulacjach trochę kłóci się ze wspomnianą wyżej uwagą o niegaussowskim szumie wskutek niepoprawnego uwzględnienia FF. Tym niemniej wydaje się, że okresy synodyczne zostały wyznaczone poprawnie, choć — ze względu na naturę zjawiska — nie zawsze jednoznacznie. Na koniec kilka uwag, które odnoszą się do wyznaczania okresów rotacji. (i) P2: Równania na str. 969 nie trzeba linearyzować, bo dla założonego okresu jest ono liniowe. Błąd okresu można też wyznaczać z dopasowania metodą najmniejszych kwadratów, jeśli uwolni się okres (w tym przypadku równanie oczywiście trzeba linearyzować). Trochę dziwne, że błąd okresu wyznaczony z pojedynczej nocy jest taki sam lub nawet nieco mniejszy (dla P₂) niż wyznaczony z dwu sąsiednich nocy: powinno być odwrotnie. (ii) P3, planetoida 2007 DD: Autorzy piszą (str. 7), że krzywa syntetyczna dla pierwszego rozwiązania (z P₁, dłuższy okres) jest zdominowana przez drugą harmonikę i że w przeciwieństwie do tego ta krzywa dla drugiego rozwiązania (z P₂ = P₁/2, krótszy okres) jest zdominowana przez pierwszą harmonikę. Nie ma tu żadnego przeciwieństwa, bo $2f_1 = f_2$, gdzie $f_{1,2} = 1/P_{1,2}$, czyli dokładnie tak, jak powinno być. Poza tym pojęcia „harmonika” powinno się w zasadzie używać w odniesieniu do częstotliwości, a nie okresów, a „pierwsza harmonika” tożsama jest z główną częstotliwością. (iii) P5, planetoida 2007 RQ₁₂: f_5 , f_4 i f_2 to nie aliasy, jak piszą autorzy, ale harmoniki. (iv) Wstęp do rozprawy: wyrażenie „zwiększanie rotacji do okresów pojedynczych minut” (str. 8) jest dość nieszczęśliwe: zwiększa się kątowna prędkość rotacji, ale okresy rotacji się skracają.

- **Astrometria i pochodzenie planetoid.** Wynikiem redukcji obserwacji CCD są, oprócz jasności, ich pozycje, które mogą być wykorzystane do badań astrometrycznych, w tym wyznaczania orbit planetoid. Z wykazu publikacji dra Kwiatkowskiego wynika, że przynajmniej część danych astrometrycznych, które były wynikiem ubocznym programu fotometrycznego, została udostępniona poprzez MPEC i MPC. W samej rozprawie kwestia orbit dyskutowana jest szczegółowo tylko w pracy P2 z uwagi na to, że planetoida 2006 RH₁₂₀ znajdowała się tymczasowo na orbicie geocentrycznej. Dla planetoid obserwowanych za pomocą SALT-a wspomina się tylko czasem, że należą do rodziny Apollo czy Amora. Wydaje mi się, że dyskusja orbit badanych BMP, ich przynależności do poszczególnych rodzin czy nawet pochodzenia dałaby pełniejszy obraz własności BMP, o ile tylko taka dyskusja jest możliwa.
- **2004 RZ₁₆₄.** Ta planetoida z rodziny Apollo, której poświęcona jest praca P1, jest w badanym towarzystwie dość wyjątkowa, jako że obserwacje pokazują, że może być planetoidą podwójną. Pokazane zaćmienie nie jest jednak bardzo przekonujące, tym bardziej że domniemany ingres wystąpił tuż przed przerwą w obserwacjach. Na miejscu habilitanta sprawdziłbym może jeszcze hipotezę o wjechaniu teleskopem na kopułę, która powinna dać się łatwo zweryfikować poprzez użycie gwiazd porównania, położonych w różnych kierunkach w stosunku do planetoidy. Zgrubne oszacowanie kątownej separacji składników na środek obserwacji daje liczbę rzędu 0.1". Przy

dość dużym stosunku mas składników i dużej liczbie obrazów CCD daje to chyba pewne szanse na potwierzenie/wykluczenie podwójności z pomiarów astrometrycznych (położenie fotocentrum).

- **2006 RH₁₂₀.** Kwestia pochodzenia tej planetoidy jest szczegółowo dyskutowana w pracy P2 i, przyznając, budzi pewne wątpliwości. Mówiąc o naturalnym pochodzeniu, habilitant powołuje się na obserwacje radarowe Hegenrothera (P2) opublikowane prawdopodobnie przez Bressiego i in. (2008, patrz Wstęp do rozprawy). Przedstawiona w samej pracy P2 argumentacja za naturalnym pochodzeniem tej planetoidy, przy odwołaniu się do jej położenia na wykresie $\cos \theta$ vs. U , nie jest specjalnie przekonująca. Autorzy być może mają rację, ale znacznie bardziej przekonujące byłoby pokazanie za pomocą całkowania równań ruchu, że planetoida może rzeczywiście przejść z pozycji $(U, \cos \theta) = (0.05, 0.5)$ do tej zajmowanej przez nią obecnie.
- **Efekt YORP.** Badania prowadzone przez habilitanta, w szczególności wyniki prac P3 i P5 mogą być rzeczywiście bardzo ważne w kontekście badania efektu YORP. I to mimo tego, że perspektywy detekcji efektu YORP w badanej (czy nawet ogólniej, znanej) próbie BMP są raczej dość ograniczone. Tym niemniej, uważam, że dyskusja tego efektu w pracy P4, w szczególności perspektywy ponownych obserwacji badanych planetoid, jest bardzo ważna. Pierwsze kroki zostały zrobione, teraz ważne jest przede wszystkim dalsze zwiększanie próbki obserwowanych BMP, co habilitant już robi (zob. uwagi we Wstępie do rozprawy) oraz dokładna separacja innych efektów, które mogą powodować zmianę okresów rotacji. W kontekście dyskusji wkładu efektu YORP do obserwowanego rozkładu okresów rotacji w funkcji rozmiaru planetoidy ważne też jest, aby dobrze ocenić wkład innych możliwych scenariuszy prowadzących do szybkiej rotacji, w szczególności zderzeń prowadzących do fragmentacji i efektów pływowych podczas bliskich spotkań z planetami.
- **Uwagi redakcyjne.** W opublikowanych, bądź co bądź, pracach jest jeszcze sporo literówek i dość niezręcznych wyrażen. Kilukrotnie (w różnych pracach) występuje słowo „then” zamiast „than”. Inny przykład: nie pisze się „A typical two maxima, two minima pattern can be traced in f_4 ...”. Polecam to uwadze habilitanta i jego współpracowników w przyszłych pracach.

Podsumowując tę część mojej oceny chciałbym podkreślić, że bardzo wysoko oceniam część związaną z organizacją obserwacji, w szczególności fakt, że zwykle już kilka dni po odkryciu planetoida była obserwowana za pomocą SALT-a. Co do kwestii opracowania danych oraz ich dyskusji i interpretacji moja ocena jest nieco niższa. Większość swoich wątpliwości przedstawiłem wyżej. Nie są one jednak na tyle poważne, żeby kwestionować wiarygodność uzyskanych przez dra Kwiatkowskiego wyników. Jego rozprawa habilitacyjna zawiera moim zdaniem wartościowe wyniki, a do tych najważniejszych zaliczam: (i) znaczne zwiększenie próbki BMP z wyznaczonymi synodycznymi okresami rotacji i oszacowaniami kształtów i rozmiarów, (ii) wszechstronną dyskusję efektu YORP i jego wpływu na ewolucję rotacji BMP, w tym wyznaczenie położenia osi rotacji planetoidy 2006 XY, (iii) szczegółową dyskusję pochodzenia 2006 RH₁₂₀. Tematykę badania BMP uważam za rozwojową i zachęcam habilitanta do jej kontynuowania.

Ocena dorobku naukowego

Zgodnie z załączonym w Autoreferacie wykazem opublikowanych prac naukowych, dr Kwiatkowski opublikował po doktoracie 51 prac, z czego 33 to prace recenzowane opublikowane w ogromnej większości w *Astronomy & Astrophysics* (22 prace). Dochodzi do tego jeszcze 15 prac (w tym dwie recenzowane) opublikowane przez niego przed doktoratem. Jest to dorobek niemały jak na ten etap rozwoju naukowego, choć trzeba wyraźnie podkreślić, że w dużej części jest to wspólny dorobek poznańskiej grupy prof. Tadeusza Michałowskiego zajmującej się głównie modelowaniem fotometrycznych zmian planetoid. Nadmienię tylko, że dr Kwiatkowski jest pierwszym autorem tylko jednej pracy recenzowanej spośród tych, które nie zostały włączone do rozprawy: jest to praca z 1995 roku poświęcona planetoidzie Geographos. Tym niemniej, z opisu wkładu dra Kwiatkowskiego do tych prac i wyjaśnień zawartych w autoreferacie wynika niezbicie, że jego wkład do tych wyników jest niemały. Ponadto świadczy to o tym, że opanował on bardzo dobrze warsztat badawczy w swojej dziedzinie, tworzy własne oprogramowanie, obserwuje, proponuje własne programy badawcze i je realizuje.

Zgodnie z bazą ADS, wszystkie prace dra Kwiatkowskiego cytowane są w sumie 250 razy, co jest wynikiem bardzo przyzwoitym.

Końcowa konkluzja

Podsumowując moje powyższe uwagi, stwierdzam z przyjemnością, że rozprawa habilitacyjna i dorobek naukowy dra Tomasza Kwiatkowskiego spełniają wymagania określone w art. 16 i 17 *Ustawy z dn. 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* i wnioskuję o dopuszczenie go do kolokwium habilitacyjnego.

we Wrocławiu, 30.06.2010 r.