

Toruń, 5 stycznia 2026 r.

dr hab. Gracjan Maciejewski, prof. UMK
Instytut Astronomii
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń
email: gmac@umk.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra Antoine’a Choukrouna
„**Sizes and thermal properties of asteroids**”

1. Podstawowe informacje o rozprawie doktorskiej

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra Antoine’a Choukrouna jest modelowanie własności fizycznych grupy planetoid Pasa Głównego, charakteryzujących się względnie długimi okresami rotacji (powyżej 12 godzin) oraz niewielkimi zakresami zmian blasku (poniżej 0,3 magnitudo). Z uwagi na istotne utrudnienia natury obserwacyjnej obiekty tego typu pozostają nadal słabo zbadane, co przekłada się na znaczące niedobory naszej wiedzy dotyczącej własności fizycznych populacji planetoid jako całości, a w dalszej konsekwencji na ograniczone rozumienie niezwykle istotnych aspektów procesów formowania i ewolucji Układu Słonecznego. Badania mgra Choukrouna zostały zrealizowane w ramach szerszego projektu badawczego, zainicjowanego i prowadzonego przez promotora rozprawy, prof. UAM dr hab. Annę Marciniak.

Rozprawa doktorska ma charakter pracy pisemnej przedstawiającej oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, co jest zgodne z wytycznymi zawartymi w art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.), zwanej dalej „Ustawą”, oraz § 3 pkt 1 uchwały nr 133/2020/2021 Senatu Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu z dnia 28 czerwca 2020 r. (z późn. zm.), dotyczącej określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora (opublikowanej w Biuletynie Informacji Publicznej Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu).

Praca została napisana w języku angielskim i składa się z dwóch głównych części. Pierwsza z nich liczy 56 stron i stanowi zasadniczą część rozprawy, zawierającą szczegółowy opis przeprowadzonych badań – począwszy od wprowadzenia do tematyki pracy i uzasadnienia podjęcia badań, poprzez opis rodzaju wykorzystanych danych obserwacyjnych oraz metod ich analizy, a skończywszy na prezentacji najistotniejszych wyników. Na pierwszych stronach zamieszczono streszczenia wraz ze słowami kluczowymi w językach angielskim i polskim, jak również podziękowania. Z kolei na ostatnich stronach umieszczono listę wykorzystanych pozycji bibliograficznych. Drugą część rozprawy stanowi zbiór czterech oryginalnych artykułów naukowych, tworzących rdzeń merytoryczny rozwiązania postawionego problemu naukowego. Wkład mgra Choukrouna w ich powstanie został szczegółowo opisany w części pierwszej rozprawy. Taki układ pracy nie budzi zastrzeżeń.

Praca cechuje się wysokim poziomem redakcyjnym i edytorskim. Napisana jest bardzo dobrą angielszczyzną. W tekście można dopatrzeć się jedynie drobnych i sporadycznych błędów redakcyjnych, a także faktu, iż czcionka użyta na niektórych rysunkach (np. rys. 2.4) wydaje się zbyt mała. Uwagi te jednak nie mają istotnego wpływu na wysoką ocenę formalnej strony rozprawy.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozdział pierwszy pełni rolę obszernego wprowadzenia do zagadnienia badań małych ciał Układu Słonecznego – planetoid. Narracja prowadzona jest od zarysu kontekstu historycznego, poprzez badania *in situ* z wykorzystaniem sond kosmicznych, aż po aspekty związane z górnictwem kosmicznym. Szczegółowo omówione zostały techniki obserwacyjne: astrometryczne, spektroskopowe, radarowe, a szczególny nacisk położono na fotometrię w zakresie widzialnym i podczerwonym. Przedstawiono znaczenie tzw. gęstych szeregów czasowych, opisujących zmiany blasku w wyniku rotacji ciała, jak również krótkotrwałych zjawisk okultacji gwiazd. Rozdział kończy się syntetycznym i klarownym przedstawieniem celów podjętych badań oraz zastosowanych metod analizy danych, które zostały szczegółowo omówione w dwóch kolejnych rozdziałach. Omawiany rozdział został przygotowany z dużą starannością. Zestaw poruszanych zagadnień został trafnie i logicznie dobrany, tak aby w sposób przystępny wprowadzić czytelnika w tematykę rozprawy. Opisy sformułowano w sposób wyczerpujący i spójny, a sam rozdział mógłby z powodzeniem pełnić rolę załączka opracowania monograficznego. Nie ulega zatem wątpliwości, że przesłanka zawarta w art. 187 ust. 1 Ustawy została spełniona.

Rozdział drugi został poświęcony zagadnieniu rekonstrukcji bryły planetoidy na podstawie modulacji krzywej blasku. Kluczową kwestią jest pozyskanie danych obserwacyjnych o wysokiej jakości oraz ich rzetelna redukcja. Z uwagi na specyfikę projektu, dane te pochodzą zwykle z różnych instrumentów i obciążone są różnorodnymi efektami instrumentalnymi, wymagającymi pracochłonnych procedur oczyszczania. W odpowiedzi na te wyzwania mgr Choukroun opracował oryginalne oprogramowanie *STEROID*, służące do kompleksowej redukcji tego typu materiału obserwacyjnego. Jego podstawowy opis zawarto w podrozdziale 2.2, natomiast pełna prezentacja znajduje się w artykule „STEROID: A Python package to automate asteroid and stellar photometry”, złożonym do druku w *Acta Astronomica* i załączonym do rozprawy jako publikacja nr 1. Kod zawiera szereg algorytmów zoptymalizowanych do badań obiektów poruszających się na tle gwiazd. Przykładowo, w procesie identyfikacji obiektów zastosowano rozpoznawanie wzorców oparte na triangulacji wykonywanej na podzbiorach pięciu najbliższych (na niebie) obiektów, co znacząco usprawnia redukcję danych w przypadku ciągów obserwacyjnych dotkniętych dryfem pozycjonowania lub rotacją pola. Rezygnacja z często stosowanej w takich sytuacjach interpolacji poprawia precyzję pomiarów fotometrycznych, co zostało jednoznacznie wykazane w publikacji nr 1. Oprogramowanie jest dostępne na platformie GitHub i ma formę modułową, co umożliwia jego dalszą modyfikację oraz wykorzystanie w innych projektach badawczych. W dalszej części rozdziału zaprezentowano przykładowe krzywe blasku uzyskane dla planetoidy (931) Whittemora wraz z ich szczegółowym omówieniem.

W podrozdziale 2.3 omówiono teoretyczne podstawy rekonstrukcji trójwymiarowego kształtu planetoidy opartej na założeniu bryły wypukłej (ang. *convex body*), które – w przeciwieństwie do modeli zawierających wklęsłości – mogą prowadzić do jednoznacznych rozwiązań. Zrozumienie złożonych aspektów tego zagadnienia ułatwia pomysłowy schemat przedstawiony na rys. 2.2, ilustrujący różnice pomiędzy oboma podejściami w rozkładzie gaussowskiej gęstości powierzchni, opisującej sposób rozłożenia pola powierzchni bryły względem kierunków kątowych na sferze jednostkowej.

Proces rekonstrukcji kształtu zilustrowano w podrozdziale 2.4 na przykładzie także planetoidy (931) Whitemora. Uzyskane krzywe blasku posłużyły do wyznaczenia okresu syderycznego oraz określenia orientacji przestrzennej osi rotacji ciała, która – z uwagi na niewielkie nachylenie orbity względem ekliptyki – jest zdegenerowana o 180° w długości ekliptycznej. Rysunki 2.5 i 2.6 ilustrują techniczne aspekty tego procesu, zazwyczaj niepublikowane w artykułach naukowych, co istotnie zwiększa walory dydaktyczne tej części rozprawy. Warto również zwrócić uwagę na schematy przedstawione na rys. 2.8 i 2.9, które w przystępny sposób ilustrują różnice pomiędzy pojęciami okresu synodycznego i syderycznego. Z kolei rys. 2.7 prezentuje rzuty trójwymiarowego modelu planetoidy w trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, osobno dla każdego z dwóch wariantów orientacji osi rotacji. Pewnym niedopowiedzeniem pozostaje jednak sposób uzyskania tego modelu, co wydaje się również pominięte w artykule „Asteroid sizes determined with thermophysical model and stellar occultations” (2025, A&A 698, A298), załączonym do rozprawy jako publikacja nr 2.

Rozdział trzeci poświęcony został zagadnieniu wyznaczania rzeczywistych rozmiarów planetoid¹. Opracowane wcześniej modele brył obarczone są niejednoznacznością wynikającą z korelacji pomiędzy rozmiarem ciała a jego albedo. W pierwszej kolejności omówiono metodę okultacji gwiazdowych, opierającą się na analizie cienia planetoidy rzucanego na powierzchnię Ziemi w czasie jej przejścia na tle jasnej gwiazdy. Metoda ta jest niezwykle wymagająca obserwacyjnie, lecz umożliwia precyzyjne „skanowanie” rzutu planetoidy na płaszczyznę nieba w określonej fazie jej obrotu. Dokładny model bryły planetoidy, uwzględniający pełną geometrię zjawiska, pozwala na znacznie efektywniejsze planowanie kampanii obserwacyjnych. Dobitym tego przykładem są wyniki przedstawione w publikacji nr 3 „Thermodynamical model of (269) Justitia – Main Belt Asteroid Possibly Implanted from Trans-Neptunian Region” (2025, PSJ 6, 60), której drugim autorem jest mgr Choukroun. Opracowany trójwymiarowy model planetoidy (269) Justitia umożliwił niezwykle trafne rozmieszczenie stacji obserwacyjnych podczas okultacji z końca sierpnia 2023 roku, co zaowocowało pozyskaniem wyjątkowo bogatego materiału obserwacyjnego (Buie et al., 2025, PSJ 6, 61).

W publikacji nr 2 wykorzystano zewnętrzne narzędzie do dopasowania obserwacji okultacyjnych do modelu planetoidy, obsługiwane przez współpracowników z Uniwersytetu Karola w Pradze. Natomiast w podrozdziale 3.1.3 rozprawy opisano autorski kod *occultationFit*, w całości przygotowany przez mgra Choukrouna i udostępniony na platformie GitHub. Narzędzie to umożliwia istotne skrócenie procedury dopasowywania oraz elastyczne wprowadzanie poprawek w zależności od potrzeb analizy. Testy porównawcze przeprowadzone dla dwóch planetoid wykazały bardzo dobrą zgodność wyników z danymi literaturowymi przy jednoczesnym osiągnięciu wyższej precyzji. Choć kod ten pozostaje obecnie w fazie prototypowej, można oczekiwać jego dalszego rozwoju i wykorzystania w przyszłych badaniach, również przez innych badaczy, a także jego publikacji w formie artykułu naukowego.

W podrozdziale 3.2 omówiono metodę wyznaczania rzeczywistych rozmiarów planetoid na podstawie wypukłego termofizycznego modelu inwersyjnego (ang. *convex inversion thermophysical model*), dalej określaną jako metoda CITPM. W podejściu tym rekonstrukcja kształtu planetoidy przy założeniu bryły wypukłej została rozszerzona o modelowanie emisji termicznej w podczerwieni, z wykorzystaniem modelu ciała doskonale czarnego w stanie równowagi termicznej. Dane fotometryczne w pasmach podczerwonych zaczerpnięto z katalogów przeglądów, zarówno najnowszych (np. WISE), jak i starszych (np. IRAS). W rezultacie, poza rozmiarami planetoid, uzyskano również in-

¹ Rozmiar planetoidy określany jest poprzez promień kuli o objętości odpowiadającej objętości bryły tejże planetoidy, często o dość nieregularnym kształcie.

formacje o własnościach fizycznych ich powierzchni, takich jak chropowatość, stopień pokrycia kraterami czy bezwładność cieplna. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zarówno model termofizyczny, jak i fotometryczny zostały bardzo szczegółowo omówione. Innowacyjnym aspektem zaproponowanego podejścia jest urealnienie wyników poprzez włączenie do modelowania zarówno kształtu bryły planetoidy, jak i orientacji jej osi rotacji. W tym miejscu warto podkreślić, że we wcześniejszym podejściu ograniczano się do wykorzystania uprzednio przygotowanego modelu trójwymiarowego. Pomimo wprowadzenia przez mgra Choukrouna licznych usprawnień, skracających czas analizy około czterokrotnie, procedura ta nadal wymaga uważnego i świadomego nadzoru badacza. Nie wszystkie parametry mogą być jednocześnie uwolnione, w szczególności te opisujące własności fizyczne powierzchni planetoidy, co wymusza stosowanie tzw. metody siatkowej. Warto tu odnotować, że zastosowana minimalizacja Levenberga–Marquardta, jako metoda gradientowa, jest bardziej podatna na utknięcie w minimach lokalnych niż bezgradientowy algorytm Nelder–Meada. Być może implementacja tego drugiego algorytmu, a także zastosowanie bardziej zaawansowanych metod globalnej eksploracji przestrzeni parametrów, takich jak próbkowanie zagnieżdżone (ang. *nested sampling*), mogłyby dodatkowo usprawnić proces modelowania.

W podrozdziale 3.3 dokonano zwięzłego porównania rozmiarów planetoid wyznaczonych obiema metodami, tj. z okultacji gwiazdowych oraz z modelowania CITPM. Najistotniejszym wnioskiem jest wysoka jakościowa zbieżność uzyskanych wyników. Choć metoda okultacyjna pozostaje najbardziej miarodajna, wymaga ona znacznego nakładu obserwacyjnego. W przypadku braku takich danych wyniki uzyskane metodą CITPM można zatem uznać za wysoce wiarygodne substytuty. Zarówno w rozprawie, jak i w publikacji nr 2, brakuje jednak ilościowego ujęcia przedstawionych korelacji. W publikacji tej odnaleźć można jedynie informację o rozbieżnościach na poziomie około 5%. Rysunek 3.7 oraz jego odpowiednik w publikacji nr 2 (rys. 5) prezentują zależność promieni planetoid wyznaczonych z okultacji w funkcji średnich wartości modelowych zaczerpniętych z literatury. Choć możliwe jest sformułowanie pewnych wniosków na podstawie analizy wykresu rezyduów czy powiększonego fragmentu wykresu we wstawce, brakuje jednoznacznej dyskusji, czy i w jakim stopniu metoda CITPM zapewnia bardziej wiarygodne wyniki niż wcześniejsze, uproszczone podejścia. Czy faktycznie – jak stwierdzono w rozdziale 4.4 publikacji nr 2 – „our residuals are, on average, smaller than those based on the literature values”, czy też obserwowany efekt wynika z istotnie mniejszej próbki analizowanych obiektów? Na marginesie można również zauważyć, że wykresy porównawcze, takie jak rys. 3.6 i 3.7, byłyby czytelniejsze w formacie kwadratowym (przy identycznych zakresach obu osi).

Opracowanie obszernego materiału obserwacyjnego oraz przeprowadzenie modelowania własności fizycznych z wykorzystaniem obecnie najbardziej zaawansowanych metod dla próbki 16 wolno rotujących planetoid stanowi ważne i znaczące osiągnięcie badawcze. Wykazanie zgodności rozmiarów planetoid wyznaczonych z chronometrażu okultacji gwiazdowych i z modelowania opartego na relatywnie łatwych do pozyskania ciągów fotometrycznych otwiera możliwość zastosowania tej drugiej metody na znacznie większą skalę. Kładzie to solidne podstawy pod dalsze, rozszerzone badania populacji wolno rotujących planetoid, z których można oczekiwać licznych cennych wniosków o charakterze statystycznym. Dodatkowo opracowanie oryginalnego oprogramowania do kompleksowej redukcji danych obserwacyjnych, modułu do dopasowywania danych okultacyjnych, a także wprowadzenie szeregu usprawnień do procedury analizy metodą CITPM stanowią trudny do przecenienia wkład w rozwój narzędzi i metod badawczych. Z przedstawionych opisów poszczególnych etapów pracy jednoznacznie wynika, że od strony metodologicznej proces analizy został przeprowa-

dzony rzetelnie i poprawnie. Nie ulega zatem wątpliwości, że rozprawę mgra Choukrouna należy ocenić bardzo wysoko również pod względem merytorycznym, a tym samym uznać, iż spełnia ona przesłanki określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy.

Na zakończenie warto odnotować, że znaczna część wyników zawartych w rozprawie została już opublikowana w prestiżowych czasopismach naukowych. Najważniejsze z nich przedstawiono w publikacji nr 2, której mgr Choukroun jest pierwszym autorem i w której – jak wynika z dołączonego oświadczenia – jego wkład był dominujący. Publikacje nr 3 i 4 dokumentują natomiast wyraźny rozwój naukowy doktoranta, od wkładu w postaci redukcji materiału obserwacyjnego po współtworzenie pełnego modelu planetoidy (269) Justitia metodą CITPM. Wszystkie załączone publikacje są wieloautorskie, co potwierdza, że doktorant posiada umiejętność efektywnej pracy zespołowej, a także zdolność do jej koordynowania i współkierowania.

3. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgra Antoine’a Choukrouna niewątpliwie stanowi w pełni oryginalne rozwiązanie jasno zdefiniowanego problemu naukowego o istotnym znaczeniu dla współczesnych badań nad małymi ciałami Układu Słonecznego. Dzięki znacznemu zwiększeniu liczebności szczegółowo scharakteryzowanych wolno rotujących planetoid Pasa Głównego, których populacja pozostaje dotąd słabo rozpoznana, rozprawa w sposób zasadniczy poszerza aktualny stan wiedzy o ich własnościach fizycznych oraz tworzy solidne podstawy do dalszych badań porównawczych i statystycznych, istotnych dla zrozumienia procesów formowania i ewolucji populacji planetoid oraz Układu Słonecznego jako całości.

Zawartość merytoryczna pracy jednoznacznie dowodzi, że doktorant opanował przedmiotową wiedzę na poziomie eksperckim, a zakres i jakość przeprowadzonych analiz świadczą o jego bardzo wysokich kompetencjach naukowych. Co więcej, mgr Choukroun wykazał się ponadprzeciętną samodzielnością badawczą, umiejętnością krytycznej analizy danych oraz zdolnością do tworzenia oryginalnych, zaawansowanych narzędzi obliczeniowych, które mają realny potencjał szerokiego zastosowania w przyszłych badaniach.

Wszystkie te elementy prowadzą do jednoznacznego wniosku, że rozprawa nie tylko spełnia kryteria ustawowe i zwyczajowe stawiane pracom doktorskim, lecz wyraźnie je przekracza, co uzasadnia bardzo wysoką ocenę jej wartości naukowej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgra Antoine’a Choukrouna do dalszych etapów przewodu doktorskiego, wyrażając jednocześnie przekonanie, że przedstawiona rozprawa w pełni zasługuje na wyróżnienie.

dr hab. Gracjan Maciejewski, prof. UMK