



Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Warszawskiego

Al. Ujazdowskie 4,
00-478 Warszawa, Poland
tel. +48 22-5530507

Prof. dr. hab. Łukasz Wyrzykowski
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytet Warszawski
Al. Ujazdowskie 4
00-478 Warszawa

Warszawa, 16 marca 2024

Recenzja pracy doktorskiej
Karoliny Jadwigi Dziadury
Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu,

p.t.:

Determination of physical and dynamical properties of asteroids observed by the Gaia mission

promotorzy:

Dr hab. Przemysław Bartczak, prof. UAM

Dr Dagmara Oszkiewicz

Praca doktorska Karoliny Dziadury podejmuje temat badań asteroid i wyznaczania ich właściwości, w szczególności z uwzględnieniem efektu Yarkovsky'ego. Temat jest bardzo na czasie, gdyż obecnie dostępne dane naziemne i kosmiczne po raz pierwszy pozwalają na badania dużych próbek obiektów, w tym potencjalnie niebezpiecznych asteroid (PHA) i obiektów bliskich Ziemi (NEO). Autorka wykorzystuje szereg zestawów danych, w szczególności dane astrometryczne udostępnione przez misję kosmiczną Gaia, i przeprowadza bardzo dokładną analizę danych obserwacyjnych i ich systematyk. Dane te są następnie wykorzystywane do określenia, czy efekt Yarkovsky'ego jest wykrywalny, a tym samym ma zastosowanie do pomiaru rozmiarów i gęstości pobliskich asteroid.

Praca liczy 119 stron i zawiera trzy główne części, w tym wprowadzenie i podsumowanie wyników, a następnie rozdział z trzema artykułami opublikowanymi w renomowanych czasopismach astrofizycznych. Artykuły zostały opublikowane w 2020, 2022 i 2023 roku i pomimo tego, że zostały opublikowane stosunkowo niedawno, już przyciągnęły uwagę społeczności astronomicznej z 13 cytowaniami. Prezentacja i układ pracy są bardzo dobre, z licznymi rysunkami i tabelami. Język angielski w tekście jest bardzo dobrej jakości i łatwo się go czyta, jednak zauważyłem niespójność w używaniu brytyjskiego i amerykańskiego angielskiego między rozdziałami i artykułami. W tekście jest kilka literówek, a słowa "figure" i "table" powinny być wszędzie pisane wielką literą. Jednak te drobne kwestie nie umniejszają ogólnej wysokiej jakości tekstu rozprawy.

W części I przedstawiono wprowadzenie do określania właściwości fizycznych asteroid wraz ze szczegółowym opisem historycznego tła tych badań. Wprowadzenie jest kontynuowane w odniesieniu do misji kosmicznej Gaia, głównego źródła danych w niniejszej rozprawie. Zauważyłem oczywistą literówkę i pomyłkę w liczbie gwiazd obserwowanych przez Gaia (70 milionów, zamiast ~2 miliardów). Ponadto stwierdzenie na stronie 22, że dokładność Gaia w kierunku AL jest trzykrotnie lepsza niż w kierunku AC jest również błędne - stosunek ten jest rzędu 50-100 (patrz np. Rybicki+2018), ale rozmiar piksela AC jest rzeczywiście trzykrotnie większy niż AL. Autorka pokazuje jednak prawidłowe liczby na rys. 3, rysunku zaczerpniętym ze Spoto+2018. Po wprowadzeniu następuje opis metod wyznaczania orbity, w tym dedykowanego oprogramowania wykorzystywanego w niniejszej rozprawie. Następnie szczegółowo opisano efekt Yarkovsky'ego wraz z licznymi odniesieniami i podkreślono jego znaczenie w badaniach orbit obiektów potencjalnie niebezpiecznych.

Część II wstępu zawiera podsumowanie celów naukowych i wyników uzyskanych w trzech publikacjach dołączonych do rozprawy. Dotyczą one wyznaczania rozmiarów planetoid oraz subtelnego efektu Yarkovsky'ego. Wykorzystanie danych z satelity Gaia sprawia, że zadania te są nie tylko możliwe, ale

także stanowią wyzwanie, ponieważ konieczne było opracowanie nowych podejść i metod, aby poradzić sobie z danymi o tak bezprecedensowej dokładności.

Pierwsza praca była kierowana przez E. Podlewską-Gacę, a jej współautorami było wielu badaczy, głównie z Instytutu Obserwatorium Astronomicznego UAM w Poznaniu, w tym doktorantka. Brakuje mi oświadczenia pierwszego autora o roli i wkładzie doktoranta w tę pracę, stąd nie jest jasne, które części zostały przygotowane przez kogo. Alternatywnie, doktorantka mogła wyraźnie wyjaśnić w streszczeniu pracy, jaki był jej szczególny wkład w tę pracę. Niemniej jednak temat artykułu bardzo dobrze wpisuje się w zakres niniejszej rozprawy i jej późniejszych rozdziałów, a także pokazuje, że doktorantka była zaangażowana w te badania od bardzo wczesnego etapu studiów doktoranckich.

Rozmiary i kształty 13 asteroid pasa głównego, a także ich pozycje zostały określone na podstawie danych z okultacji. Algorytm genetyczny o nazwie SAGE został wykorzystany do modelowania fotometrycznych pomiarów w dziedzinie czasu, w wyniku czego określono spin i kształty obiektów. Praca ta została wykonana przed opublikowaniem danych Gaia dla asteroid, dlatego wybór obejmował obiekty, dla których badania kształtu byłyby przydatne w połączeniu z danymi astrometrycznymi Gaia w celu pomiaru mas asteroid. W przypadku niektórych obiektów wartości rozmiarów zostały porównane z poprzednimi pomiarami i stwierdzono ich zgodność, a także znaczną poprawę dokładności. Niektóre obiekty zostały zmierzone po raz pierwszy w tej pracy. Brakuje mi przykładowych krzywych blasku z fotometrią optyczną zebraną dla asteroid, które były istotnym źródłem danych w tej pracy. Dodatek pokazuje tylko residua i termiczne krzywe blasku (podczerwień) dla wybranych obiektów.

Drugi artykuł z 2022 r. został napisany przez doktorantkę i przygotowany wspólnie z obojgiem promotorów. Wykorzystuje ona pierwszy zestaw danych Gaia dotyczących asteroid opublikowanych w ramach Gaia DR2 w 2018 r. w połączeniu z innymi danymi w celu zbadania efektu Yarkovsky'ego na orbitach wybranych asteroid. Dane astrometryczne Gaia oferują wyjątkową precyzję pomiarów poniżej milisekundy, jednak tylko wzdłuż kierunku, w którym Gaia skanuje niebo w danym momencie. Ta osobliwość wprowadziła potrzebę ponownego opracowania niektórych dobrze znanych algorytmów, aby poradzić sobie z tego rodzaju danymi, a także zaprojektować narzędzia do konwersji danych Gaia do powszechnie używanych formatów. Autorka wykorzystała dobrze zbadane obiekty, takie jak Golewka, Bennu i Bacchus, aby zweryfikować nowe podejście do danych.

Włączenie danych Gaia, nawet we wczesnej formie DR2, pomogło znacznie poprawić wykrywalność efektu Yarkovsky'ego. Na przykład, w przypadku obiektu Moshup, SNR wzrósł ponad 5-krotnie dzięki włączeniu danych Gaia. Ponadto, ze względu na lepszą czułość, nowy zestaw danych był w stanie wykryć bardziej subtelne efekty na orbitach, takie jak korelacja między kierunkiem rotacji a efektem Yarkovsky'ego. Wartości sygnału efektu Yarkovsky'ego uzyskane w tej pracy zostały również porównane z wcześniejszymi oznaczeniami z literatury i stwierdzono ich dobrą zgodność.

We Wprowadzeniu do pracy II na stronie 41 znajduje się dziwna literówka utrudniająca zrozumienie zdania ("tfeaturinga").

Trzeci artykuł z 2023 r. również został napisany przez doktorantkę jako pierwszą autorkę. Kontynuuje ona badanie wykorzystania danych Gaia w badaniu efektu Yarkovsky'ego, wraz z kolejnym wydaniem danych Gaia, DR3, z 2022 roku. Tym razem opracowano i wykorzystano bardziej zaawansowany model ważenia, aby poradzić sobie z bardzo precyzyjnymi danymi Gaia i przyspieszyć obliczenia. Autorka współpracowała z dr Federicą Spoto z Minor Planet Center (MPC) w USA, co obejmowało wizytę badawczą, podczas której większość badań została wykonana. Kolejna praca szczegółowo opisująca nowy model ważenia, w której doktorantka będzie współautorką, zostanie wkrótce opublikowana przez dr Spoto. Fragmenty tej pracy zostały zawarte we wstępie do części II pracy doktorskiej. To bardzo satysfakcjonujące widzieć jak młodzi naukowcy, tacy jak doktorantka, wykorzystują współpracę międzynarodową, która wykracza poza ich typowe środowisko doktoranckie i lokalne.

Artykuł rozszerza poszukiwania efektu Yarkovsky'ego na więcej przypadków asteroid, dodatkowo gęstości obiektów zostały obliczone z wykorzystaniem efektu Yarkovsky'ego. Z 446 asteroidami bliskimi Ziemi (NEA) i 54 094 asteroidami wewnętrznego pasa głównego, próbka badana w tej pracy jest prawdopodobnie największym takim katalogiem, jaki kiedykolwiek powstał. Efekt Yarkovsky'ego został zmierzony w 49 obiektach NEA, co jest kluczowym osiągnięciem w badaniach efektów niegrawitacyjnych wpływających na wyznaczanie orbit tych ważnych obiektów. Kto wie, być może pewnego dnia ludzkość uniknie konieczności przeznaczenia bilionów dolarów na niepotrzebną misję ratunkową mającą na celu przekierowanie nieszkodliwej asteroidy, dzięki naszej poszerzonej wiedzy na temat jej orbity wynikającej właśnie z precyzyjnych badań wykonanych przez doktorantkę.

W obu artykułach wykorzystujących dane Gaia założono, że dane Gaia są praktycznie doskonałe pod każdym względem, co nie zawsze może być prawdą. Brakuje mi jakiegokolwiek formy krytyki i wątpliwości co do rozwiązania astrometrycznego Gaia, na przykład, jeśli w danych występują jakieś systematyki, które mogłyby zostać ujawnione podczas porównywania z mniej doskonałymi, ale niezależnymi danymi naziemnymi lub między Gaia Data Releases. Wykrycie wszelkich potencjalnych rozbieżności i błędów w

danych Gaia byłyby niezwykle cenne dla przyszłego przetwarzania danych Gaia i dla innych użytkowników tych danych.

W Podsumowaniu na końcu Wstępu Autorka opisuje wyniki pracy, podkreślając rewolucyjne przełomy osiągnięte w dziedzinie wyznaczania orbit asteroid z wykorzystaniem danych Gaia. Postępy te nie byłyby możliwe bez wdrożenia nowych dedykowanych algorytmów, które uczyniły obliczenia bardziej niezawodnymi i znacznie szybszymi, umożliwiając badania ogromnych próbek obiektów. Istnieje naturalna progresja metod opracowanych w tej pracy do nowszych wersji danych Gaia, w tym Gaia Focused Product Release z 2023 r. i nadchodzącego DR4 (2026). Poza Gaią pojawią się również doskonałe dane pochodzące z teleskopu Vera C. Rubin. Zastosowanie metod opracowanych w tej pracy stanowi podstawę do przyszłych badań milionów obiektów w najbliższej przyszłości.

PODSUMOWANIE

Podsumowując, uważam, że doktorantka wykonała ogromną pracę badawczą oraz że zrobiła to bardzo starannie i pracowicie. Rozprawa zawiera wiele istotnych badań i pomiarów oraz pokazuje nowe metody badawcze. Autorka wykazała się biegłością badawczą poprzez wykonanie wielu złożonych zadań w zakresie obróbki danych, analizy astrofizycznej, modelowania i interpretacji wyników.

W mojej ocenie praca Karoliny Dziadury spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Polsce i dlatego rekomenduję ją do dalszego rozpatrywania.

Warszawa, 16 marca 2024

prof. dr. hab. Łukasz Wyrzykowski