

Kielce, 2024-02-28

Dr hab. Paweł Kankiewicz, prof. UJK
Instytut Fizyki UJK
ul. Uniwersytecka 7, 25-406 Kielce

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Karoliny Dziadury pt.
„Determination of physical and dynamical properties of asteroids
observed by the Gaia mission”**

Praca dotyczy wyznaczania własności fizycznych małych ciał oraz wykorzystania danych z projektu *Gaia* w badaniach efektu Jarkowskiego dla planetoid. Składa się z obszernych trzech rozdziałów, ponumerowanych jako I, II i III, przy czym ostatni rozdział stanowią załączone publikacje.

Praca została oparta na trzech publikacjach autorki:

1. Physical parameters of selected Gaia mass asteroids

E. Podlewska-Gaca, A. Marciniak, V. Alí-Lagoa, P. Bartczak, T. G. Müller, R. Szakáts, R. Duffard, L. Molnár, A. Pál, M. Butkiewicz-Bąk, G. Dudziński, K. Dziadura, P. Antonini, V. Asenjo, M. Audejean, Z. Benkhaldoun, R. Behrend, L. Bernasconi, J. M. Bosch, A. Chapman, B. Dintinjana, A. Farkas, M. Ferrais, S. Geier, J. Grice, R. Hirsh, H. Jacquinet, E. Jehin, A. Jones, D. Molina, N. Morales, N. Parley, R. Poncy, R. Roy, T. Santana-Ros, B. Seli, K. Sobkowiak, E. Verebélyi and K. Żukowski
Astronomy & Astrophysics 638, A11, 2020

2. Investigating the most promising Yarkovsky candidates using Gaia DR2 astrometry

K. Dziadura, D. Oszkiewicz, P. Bartczak
Icarus 383, 115040, 2022

3. The Yarkovsky effect and bulk density of near-Earth asteroids from Gaia DR3

K. Dziadura, D. Oszkiewicz, F. Spoto, B. Carry, P. Tanga, P. Bartczak
Astronomy & Astrophysics 680, A77, 2023

W pierwszej publikacji autorka rozprawy należy do współautorów, których wszystkich jest 39. W drugiej i trzeciej publikacji jest główną autorką (korespondencyjną). Biorąc także pod uwagę treść oświadczeń współautorów,

można zatem uznać, że jej wkład w publikacje jest znaczący. Wszystkie artykuły zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach astronomicznych, które są wysoko punktowane na tzw. liście ministerialnej. Wszystkie prace związane są z uczestnictwem autorki w projekcie *Gaia*, przy czym pierwsza publikacja skoncentrowana jest na własnościach fizycznych planetoid (rozmiary, ale także gęstości i masy planetoid), a pozostałe na detekcji i ilościowym wyznaczeniu efektu Jarkowskiego z precyzyjnych obserwacji. Publikacje są powiązane tematycznie i odzwierciedlają realizację głównych celów przedłożonej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale I autorka zawarła wprowadzenie teoretyczne oraz historyczny i bieżący stan wiedzy na temat prowadzonych badań. Jest on podzielony na trzy podrozdziały dotyczące kolejno: astrometrii, wyznaczaniu orbit i efektu Jarkowskiego. Jak podkreślono w pierwszym podrozdziale, dzięki możliwości, jaką daje niespotykana dotąd precyzja pomiarów projektu *Gaia*, astrometria planetoid stała się nowym wyzwaniem, którego celem jest badanie subtelnych efektów niegrawitacyjnych, dotąd uważanych za zjawiska na granicy wykrywalności. Oczywiście precyzyjna, masowa analiza tak dużej ilości danych wymaga nowego podejścia, które zostało w ogólnym zarysie przedstawione czytelnikowi. W kolejnym podrozdziale autorka opisuje koncepcję wyznaczania orbit oraz główne narzędzie, które jest stosowane w pracy (program *OrbFit*). Następny podrozdział w szeroki, przeglądowy sposób opisuje efekt Jarkowskiego dla małych ciał Układu Słonecznego. Jest to najbardziej istotny efekt niegrawitacyjny uwzględniany w dynamice planetoid, który w znaczący sposób kształtuje m. in. ewolucję rodzin planetoid w Układzie Słonecznym a także jest uwzględniany w precyzyjnym szacowaniu ryzyka kolizji planetoid z Ziemią. W ciągu ostatnich dwudziestu lat jego oddziaływanie było badane przede wszystkim przez ograniczone symulacje, a obecnie powstają coraz większe możliwości jego bezpośredniej detekcji – czego dowodem są m. in. wyniki badań przedstawione w pracy.

W rozdziale II opisane są wyniki badań przeprowadzonych przez autorkę w nawiązaniu do załączonych publikacji. Na początku rozdziału autorka wskazała główne cele pracy, którymi są: wyznaczenie rozmiarów wybranych planetoid obserwowanych w projekcie *Gaia*, wyznaczenie efektu Jarkowskiego w oparciu o dane astrometryczne projektu *Gaia* (*DR2*) oraz wyznaczenie efektu Jarkowskiego z zastosowaniem danych *Gaia DR3* w oparciu o nowy schemat ważenia statystycznego. Pierwszy z celów został zrealizowany przez kompleksową analizę zaćmień gwiazd przez planetoidy w połączeniu z danymi (masami) z projektu *Gaia*, co zaowocowało bardzo precyzyjnymi modelami wybranych planetoid.

Stanowi to ważny wkład do badań efektu Jarkowskiego, które do zadowalającego opisu potrzebuje dokładnego modelu rotacji oraz zestawu cech fizycznych planetoidy. Oprócz otrzymanych mas i rozmiarów bardzo istotna jest możliwość oszacowania gęstości planetoid. Drugi z celów pracy, czyli wyznaczenie efektu Jarkowskiego z danych astrometrycznych *Gaia DR2* został osiągnięty w dużej mierze za pomocą programu do wyznaczania orbit *OrbFit*. Jest to złożone oprogramowanie, zaprojektowane w otwarty sposób i nadające się do zastosowań dla doświadczonych specjalistów. Zawiera kilka dodatkowych narzędzi, ale najlepiej zaprojektowanym elementem jest część do wyznaczania/poprawiania orbit. Właśnie tę część autorka wykorzystowała do bardzo precyzyjnej analizy danych astrometrycznych w celu wykrycia perturbacji innych, niż grawitacyjne dla wybranych planetoid. Chodzi tu o składową transwersalną przyspieszenia A2, utożsamianą z efektem Jarkowskiego dla planetoid pozbawionych innej aktywności. Parametr ten może zostać dopasowany do trajektorii wraz z elementami orbitalnymi w procedurze wyznaczania orbit. Warunkiem są jednak odpowiednio precyzyjne obserwacje (jest to znaczące osiągnięcie projektu *Gaia*). Generalizując całą procedurę, można tak wyznaczyć orbitę z obserwacji z uwzględnieniem efektu Jarkowskiego, że błędy dopasowania (residua) są mniejsze, niż w przypadku modelu bez tych perturbacji. Zagadnienie precyzyjnego wyznaczania orbity jest nietrywialnym i wielowymiarowym problemem i jak pokazała autorka w trzeciej części rozdziału, w tym obszarze istnieją duże możliwości optymalizacji analizy danych. Chodzi o statystyczne metody ważenia wyników, które faworyzują dobre obserwacje, a dyskryminują słabe. Tę część autorka wykonała w ścisłej współpracy z członkami projektu *Gaia*. Ważenie obserwacji, chociaż spowalnia proces obliczeniowy może dawać bardzo dobre wyniki, chociaż kosztuje sporo pracy zespołowej i kompleksowej analizy obserwacji ze zróżnicowanych źródeł. Postęp w jakości danych doskonale oddaje rysunek 5 w pracy, gdzie porównane zostały wyniki astrometryczne projektu *Gaia* na tle dotychczasowych obserwacji. Pomimo, że o sile statystyk obserwacyjnych decyduje duża ilość danych, krytyczna ocena jakości obserwacji może wiele wnieść do całego procesu obliczeniowego. Poszukiwanie słabo wykrywalnych, subtelnych perturbacji w ruchu małych ciał jest trudne i moim zdaniem autorka sprostała temu zadaniu.

Praca napisana jest w języku angielskim w zrozumiałym i logicznym sposób. Nie mogę ocenić w detaliczny sposób stylu językowego, ale z punktu widzenia wymogów stawianym rozprawie doktorskiej zawiera ona wszystkie niezbędne elementy. Czytelnik jest w stanie zrozumieć w ogólnym zarysie kolejne etapy analizy danych i jak otrzymane zostały wyniki.

Poniżej zamieszczam szczegółowe uwagi dotyczące rozprawy:

1. W tab. 1. na stronie 11 autorka definiuje skrót NGTA (*Non-gravitational Transverse Acceleration*) jako A_2 lub da/dt . W rzeczywistości są to wielkości fizyczne o różnym wymiarze, ponieważ A_2 wyrażane jest typowo w $au \cdot d^{-2}$, natomiast da/dt (tu: dryf Jarkowskiego) w $au \cdot My^{-1}$. Proszę o komentarz dotyczący fizycznej interpretacji obu wielkości.

2. W opisie realizacji pierwszego z celów pracy, w podsumowaniu na stronie 39 autorka używa określenia „the program” dla użytej metody. Być może warto byłoby wcześniej opisać metodologię obliczeń przynajmniej na takim poziomie szczegółowości, jak to zrobiono np. dla programu *OrbFit*.

3. Przy opisie programów z pakietu *OrbFit* powinna być zachowana konsekwentnie ta sama pisownia (jest ona specyficzna i związana z żargonem informatycznym). Najlepiej, gdyby nazwy „ORBFIT”, „OrbFit” i „Orbfit” nie mieszały się ze sobą w tekście pracy.

4. Na stronie 30 autorka cytuje najważniejszych autorów publikujących w ostatnich latach wyniki detekcji efektu Jarkowskiego (w tym własne prace, co ma istotne znaczenie). Czy prace zostały tutaj uszeregowane wg ważności, czy porządek cytowań jest przypadkowy?

5. Na stronie 39 (*Results*) umieszczony jest podrozdział/sekcja pt. „Determine asteroid sizes for selected Gaia mass asteroids”. Lepiej byłoby użyć „The determination of...”. W podobnej konwencji zatytułowane są kolejne sekcje (strona 40 i 43). Zalecałbym użycie bardziej formalnych tytułów.

Zamieszczone uwagi nie umniejszają całkowitej wartości pracy, która podsumowuje wartościowe rezultaty opublikowane przez autorkę w znaczących czasopismach. Uważam, że wykonana praca badawcza prezentuje wysoki poziom i odpowiada wymogom zwyczajowym oraz ustawowym stawianym rozprawom doktorskim. Przedstawioną rozprawę oceniam pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora.



Dr hab. Paweł Kankiewicz, prof. UJK