

Autoreferat

1 Podstawowe informacje

Imię i nazwisko	Dagmara Oszkiewicz
Data urodzenia	22.04.1982
adres e-mail	dagmara.oszkiewicz@amu.edu.pl
adres pocztowy	Instytut Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, ul. Słoneczna 36, 60-286 Poznań, Polska

2 Dyplomy i stopnie naukowe

28.06.2007	Mgr, Tytuł pracy: "Kwiatowe konstelacje satelitarne", promotor: prof. Edwin Wnuk, Instytut Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Polska
11.10.2012	Dr, Tytuł pracy: "Asteroid astrometric and photometric studies using Markov chain Monte Carlo methods", promotor: prof. Karri Muinonen, Wydział Fizyki, Uniwersytet Helsiński, Finlandia

3 Zatrudnienie

2016-now	Adiunkt, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Polska
2015-2016	Post-doc, Lowell Observatory, USA
2012-2016	Post-doc, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Polska
2011-2012	Astronom wspierający, Nordic Optical Telescope, Spain
2010-2011	Stażysta, Lowell Observatory, USA oraz Northern Arizona University, USA
2007-2012	Doktorant, University of Helsinki, Finland

4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.1 Tytuł

Wyznaczenie scenariusza powstawania zróżnicowanych planetozymali na podstawie obserwacji planetoid bazaltowych

4.2 Lista publikacji

- H1 **Dagmara Oszkiewicz**, Agnieszka Kryszczyńska, Paweł Kankiewicz, Nicholas A. Moskovitz, Brian A. Skiff, Thomas B. Leith, Josef Durech, Ireneusz Włodarczyk, Anna Marciniak, Stefan Geier, Grigori Fedorets, Volodymyr Troianskyi, and Dóra Föhring, "*Physical and dynamical properties of the unusual V-type asteroid (2579) Spartacus*", *Astronomy & Astrophysics*, 623, A170 (2019)
Liczba cytowań: 7, impact factor: 6.5
- H2 **Dagmara Oszkiewicz**, Volodymyr Troianskyi, Dóra Föhring, Adrián Galád, Tomasz Kwiatkowski, Anna Marciniak, Brian A. Skiff, Stefan Geier, Wojciech Borczyk, Nicholas A. Moskovitz, Paweł Kankiewicz, Stefan Gajdos, Jozef Világi, L'udovít Polcic, Tomasz Kluwak, Emil Wilawer, Volodymyr Kashuba, Sergei Udovichenko, Leonid Keir, Krzysztof Kaminński, Maxime Devogele, and Annika Gustafsson, "*Spin rates of V-type asteroids*", *Astronomy & Astrophysics* 643, A117 (2020)
Liczba cytowań: 7, impact factor: 6.5
- H3 **Dagmara Oszkiewicz**, Emil Wilawer, Edyta Podlewska-Gaca, Agnieszka Kryszczyńska, Tomasz Kwiatkowski, Volodymyr Troianskyi, Paweł Koleńczuk, Dóra Föhring, Adrian Galad, Brian A. Skiff, Stefan Geier, Wojciech Borczyk, Nicholas A. Moskovitz, Stefan Gajdos, Jozef Világd, Ludovít Polcid, Volodymyr Kashuba, Vladimir Benishek, Vasilij Shevchenko, "*First survey of phase curves of V-type asteroids*", *Icarus* 357, 114–158, (2021)
Liczba cytowań: 12, impact factor: 3.657
- H4 **Dagmara Oszkiewicz**, Hanna Klimczak, Benoit Carry, Antti Penttilä, Marcel Popescu, Joachim Krüger, Marcelo Aron Keniger, "*Spectral analysis of basaltic asteroids observed by the Gaia space mission*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 519, Issue 2, p. 2917–2928, (2023)
Liczba cytowań: 3, impact factor: 5.235
- H5 **Dagmara Oszkiewicz**, Volodymyr Troianskyi, Adrián Galád, Josef Hanuš, Josef Durech, Emil Wilawer, Anna Marciniak, Tomasz Kwiatkowski, Paweł Koleńczuk, Brian A. Skiff, Tom Polakis, Nicholas A. Moskovitz, Stefan Geier, Dóra Föhring, Denise Hung, Štefan Gajdoš, Jozef Világi, L'udovít Polcic, Volodymyr Kashuba, Sergei Udovichenko, Leonid Keir, Vladimir Benishek, Donald P. Pray, Vasilij Shevchenko, Yuriy Krugly, Paweł Kankiewicz, Sunao Hasegawa, Raoul Behrend, Laurent Bernasconi, Arnaud Leroy, René Roy, Oleksandra Ivanova, Marek Husárik, Andrii Simon, "*Spins and shapes of basaltic asteroids and the missing mantle problem*, *Icarus* 397, 115520, (2023)
Liczba cytowań: 2, impact factor: 3.657
- H6 Volodymyr Troianskyi, Paweł Kankiewicz, **Dagmara Oszkiewicz**, "*Dynamical evolution of basaltic asteroids outside the dynamical Vesta family in the inner Main Belt*, *Astronomy & Astrophysics* 672, A97 (2023)
Liczba cytowań: 0, impact factor: 6.5

4.3 Opis celów naukowych i wyników

4.3.1 Wprowadzenie

Planetoidy bazaltowe typu V oraz ich fragmenty, meteoryty z grupy HED (howardyty-eukryty-diogenity), są pozostałościami po kolizjach zróżnicowanych planetozymali – zarodków planetarnych, które istniały 4 miliardy lat temu w Układzie Słonecznym. Obiekty te, podobnie jak planety ziemskie, przeszły proces termicznej dyferencjacji, w wyniku którego utworzyły metaliczne jądro, bogaty w oliwiny płaszcz i bazaltową skorupę (Mittlefehldt, 2015). Za główne źródło ciepła, które doprowadziło do stopienia i dyferencjacji materiału planetozymalnego, uważa się rozpad radioaktywny Al^{26} i Fe^{60} (Ghosh et al., 2006; Russell et al., 1996; Srinivasan et al., 1999). W trakcie tego procesu stopione materiały o wysokiej gęstości (takie jak żelazo) opadają do jądra, a lżejsze minerały (krzemiany) wznoszą się na powierzchnię, tworząc strukturę warstwową.

Proces dyferencjacji był kiedyś powszechny i odpowiada za ogromne zróżnicowanie struktur wewnętrznych obserwowanych wśród planet i księżyców w naszym Układzie Słonecznym i poza nim. Proces ten występował m. in. na planetach (Zhar'kov, 1986), planetozymalach, planetach karłowatych (np. Ceres, Pluton, Eris, Haumea (King et al., 2018; Nimmo and McKinnon, 2021; Dunham et al., 2019)), planetoidzie (4) Westa oraz na księżycach (np. ziemski Księżyc, Io, Europa, Ganimedes, Kallisto, Tytan (Schubert et al., 1996; Kuskov and Kronrod, 2001, 2005; Bills and Nimmo, 2011)). Przypuszcza się, że dyferencjacja zachodzi również na egzoplanetach (Valencia et al., 2006; Zhang and Lin, 2022). Planetoida (16) Psyche uważana jest za pozostałość żelaznego jądra zróżnicowanej planetozymali, która została pozabawiona swojego płaszcza i skorupy wskutek kolizji typu "hit-and-run" (Asphaug et al., 2006; Asphaug and Reufer, 2014; Landsman et al., 2018; Avdellidou et al., 2018). Amerykańska sonda kosmiczna Psyche, która wystartowała 13 października 2023 roku, dotrze do planetoidy (16) Psyche w roku 2029, aby zbadać proces formowania się jąder planet typu ziemskiego oraz określić najbardziej prawdopodobne miejsce powstania tego obiektu (Elkins-Tanton et al., 2022; Oh et al., 2019).

Proces dyferencjacji silnie zależy od czasu formowania planetozymali, czasu trwania akrecji, miejsca formowania oraz początkowego składu mgławicy słonecznej (Neumann et al., 2012). Ponadto uważa się, że zróżnicowane planetozymale przyczyniły się do przyspieszenia procesu dyferencjacji planet typu ziemskiego, w odróżnieniu od modeli formowania planet z materiału nieróżnicowanego (Rubie et al., 2007; Minarik, 2003). Miejsce formowania planetozymali jest także związane z gradientem temperatury i składu wczesnej mgławicy protosłonecznej oraz położeniem linii śniegu¹ w Układzie Słonecznym (Gradie and Tedesco, 1982; Bus, 1999; DeMeo and Carry, 2014; Michel et al., 2015; Ghosh et al., 2006; Day, 2015).

Dlatego planetoidy bazaltowe typu V oraz meteoryty z grupy HED, czyli fragmenty skorup zróżnicowanych planetozymali, stanowią unikalną okazję do weryfikacji modeli formowania planet i ewolucji planetarnej. W szczególności, Bottke et al. (2006); Bottke (2014) zaproponowali, że planetozymale formowały się blisko Słońca, w regionie planet skalistych, a nie w Pasie Głównym planetoid, jak wcześniej sądzono (Burbine et al., 2002). Bottke et al. (2006); Bottke (2014) przewidują, że protoplanety, które powstały z tej populacji, zostały kolizyjne rozerwane, a następnie rozproszone do Pasa Głównego. Ten scenariusz formowania się zróżnicowa-

¹odległość od Słońca poza którą woda i inne lotne substancje pozostają w stanie stałym (lodu)

nych planetozymali powinien zostać zweryfikowany poprzez obserwacje planetoid typu V.

4.3.2 Cele

Głównym naukowym celem przedstawionego zbioru publikacji było połączenie obserwacji planetoid typu V z przewidywaniami numerycznego modelu formowania się i ewolucji planetozymali zaproponowanego przez Bottke et al. (2006) i Bottke (2014) oraz ustalenie najbardziej prawdopodobnego scenariusza powstawania zróżnicowanych planetozymali.

Bottke et al. (2006); Bottke (2014) stwierdzają, że zróżnicowane planetozymalne mogły powstać w regionie planet skalistych, a nie w Pasie Głównym planetoid, jak wcześniej sądzono (Burbine et al., 2002). Następnie zostały one rozbite w kolizjach i rozproszone do obecnego Pasa Głównego planetoid. Autorzy śledzili tysiące testowych cząstek ewoluujących wśród embryonów planetarnych o rozmiarach Księżyca i Marsa. Symulacje numeryczne przeprowadzono w trzech różnych podgrupach punktów o różnych początkowych zakresach półosi wielkiej (0.5-1.0 au, 1.0-1.5 au, 1.5-2.0 au). Doprowadziło to do różnych ostatecznych proporcji i rozkładów przestrzennych fragmentów przetransportowanych do Pasa Głównego po 10 milionach lat symulowanej numerycznie ewolucji dynamicznej. Od 0,1% do 10% początkowej populacji osiągnęło orbity w Pasie Głównym w zależności od początkowego miejsca formowania się planetozymali. Ten scenariusz przewiduje dużą ilość planetoid typu V pochodzących z różnych planetozymali w wewnętrznej części Pasa Głównego. Jednak większość planetoid typu V w wewnętrznym Pasie Głównym uważa się za fragmenty pochodzące z kolizji jednej planetozymali - planetoidy (4) Westa. Przedstawiony cykl publikacji zawiera ujednolicone podejście łączące badania fotometryczne, spektroskopowe i numeryczne w celu zidentyfikowania i jakościowej oceny ilości planetoid typu V (niepowiązanych z Westą) w całym Układzie Słonecznym oraz oceny miejsca powstawania zróżnicowanych planetozymali.

Moimi szczegółowymi celami były:

- (i) Zaprojektowanie i koordynacja fotometrycznej kampanii obserwacyjnej planetoid typu V (H1, H2, H3, H5),
- (ii) Wyznaczenie właściwości fizycznych (okresów rotacji, kształtów, parametrów spektralnych) i dynamicznych planetoid typu V poza rodziną Westy (H1 - H6),
- (iii) Porównanie wyznaczonych parametrów z parametrami typowych westoidów oraz z modelem ewolucji dynamicznej rodziny Westy przedstawionym przez Nesvorný et al. (2008) (H1 - H6),
- (iv) Identyfikacja planetoid typu V i weryfikacja hipotetycznej obecności planetoid nie będących westoidami w wewnętrznej części Pasa Głównego (H3, H4, H5),
- (v) Określenie i jakościowe porównanie przestrzennego rozmieszczenia planetoid niebędących westoidami w Pasie Głównym z przewidywanym rozkładem au-

torstwa Bottke et al. (2006) i Bottke (2014), określenie miejsca powstawania zróżnicowanych planetozymali (H5).

4.3.3 Wyniki

4.3.3.1 Planetoida (2579) Spartacus - pierwsza podejrzana (H1, H6)

Istnieją pewne dowody na to, że w wewnętrznej części Głównego Pasa Planetoid (skąd pochodzi większość meteorytów) mogą istnieć fragmenty materiału planetozymalnego innego niż Westa. Po pierwsze, kilka meteorytów z grupy HED wykazuje nietypowe składy izotopowe i chemiczne. Na przykład meteoryty Ibitra, Caldera, Pasamonte, ALHA78132, Asuka-881394, Banburra Rockhole są zubożone w izotop ^{16}O i dlatego nazywane są anomalicznymi/nietypowymi (Wiechert et al., 2004; Bland et al., 2009). Meteoryty te odbiegają tak znacząco od głównej linii masowej HED, że do wyjaśnienia ich istnienia potrzebne są unikalne planetoidy macierzyste (Scott et al., 2009; Zhang et al., 2019). Upadek jednego z tych meteorytów został zaobserwowany (Bland et al., 2009; Spurný et al., 2012). Jego pochodzenie było dynamicznie prześledzone do wewnętrznej części Głównego Pasa planetoid, a Spurný et al. (2012) sugeruje, że ciało macierzyste tego meteorytu może nadal znajdować się właśnie w tej okolicy. Jak dotąd nie zostało ono zidentyfikowane. Ponadto, Gounelle et al. (2009) doniósł o znalezieniu nietypowego mikrometeorytu i pokazał, że jego pochodzenie i dostarczenie go z wewnętrznej części głównego pasa jest znacznie bardziej prawdopodobne niż z jego środkowej czy zewnętrznej części. Badania spektralne jednak nie wykazują dowodów na różne mineralogie wśród planetoid typu V w wewnętrznej części Pasa Głównego (Moskovitz et al., 2010). Jedynym obiektem wykazującym nietypowe właściwości spektralne była planetoida (2579) Spartacus. Burbine et al. (2001) i Moskovitz et al. (2010) na podstawie pomiarów spektralnych wskazują na bogatszy w oliwiny skład chemiczny Spartacusa (w porównaniu do typowych Westoidów). W pracy H1 badałam parametry fizyczne i dynamiczne planetoidy (2579) Spartacus w celu zwiększenia wiedzy na temat jej właściwości i pochodzenia. Zebrałam dostępne dane literaturowe oraz wykonałam dodatkową fotometrię na podstawie obserwacji z teleskopów SMARTS, JKT, Hall oraz NOT. Pozwoliło mi to na wyznaczenie okresu rotacji i kształtu Spartacusa, które z kolei zostały użyte do całkowania ruchu planetoidy. Wyznaczony kierunek rotacji w połączeniu z całkowaniem numerycznym orbity pokazał, że Spartacus ma kierunek dryfu Jarkowskiego² zgodny z jego domniemanym pochodzeniem z planetoidy (4) Westa. Wsteczne całkowanie orbity pokazało, że obiekt ten mógł migrować z okolic granicy rodziny Westy w przeciagu ostatnich 1 mld lat. Rozszerzone całkowanie numeryczne do 2 Gmld lat w pracy H6 pokazało, że elementy orbity Spartacusa wyraźnie pokrywają się z rodziną Westy. Widma Spartacusa w zakresie widzialnym (VIS) i podczerwonym (NIR) w różnych fazach rotacji pokazały, że centra pasm $0,9\ \mu\text{m}$ i $2,0\ \mu\text{m}$ pokrywają się z typowymi Westoidami, ale stosunek obszaru pasm absorpcyjnych (BAR) wynosi połowę wartości typowej dla planetoid typu V z rodziny Westy. Połączenie tych właściwości doprowadziło mnie do wniosku, że najprawdopodobniej Spartacus jest kolizyjnie uwolnionym fragmentem Westy, być może pochodzącym z głębszej warstwy skorupy niż typowe Westoidy.

²Zmiany wiekowe w pólsci wielkiej zwykle obserwowane dla małych planetoid, wywołane nie równomierną emisją ciepłą

4.3.4 Właściwości fotometryczne planetoid z populacji typów V (H2, H3, H5)

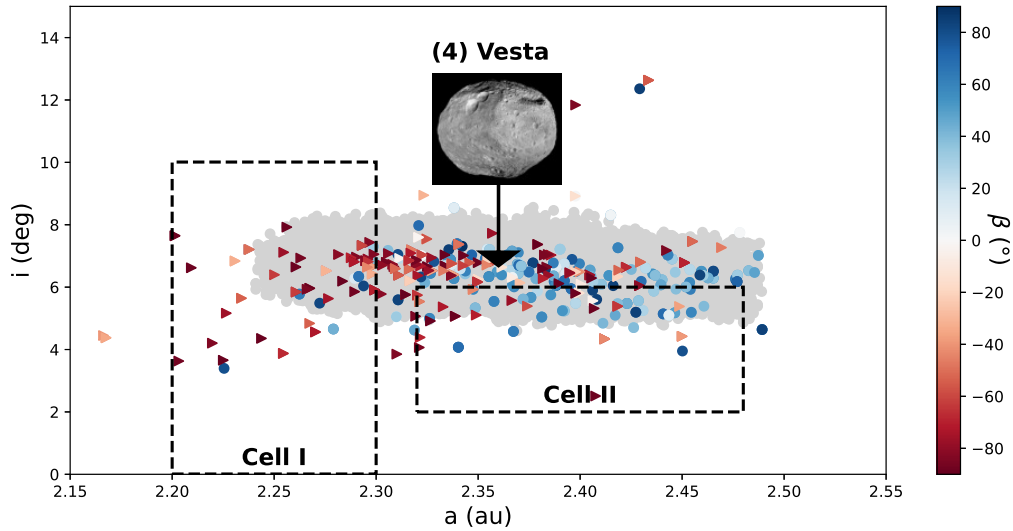
Dostarczanie meteorytów z środkowego i zewnętrznego obszaru Pasa Głównego, jest mało prawdopodobne. Większość meteorytów dociera na Ziemię z wewnętrznej części Pasa Głównego (Vokrouhlický and Farinella, 2000), co czyni ją głównym regionem poszukiwań ciał macierzystych nietypowych HED-ów. Jednak, z uwagi na obecność wielu rezonansów, pokrywanie się rodzin planetoid w przestrzeni parametrów orbitalnych oraz obecność licznych wtrąconych z innych obszarów planetoid w wewnętrznym Pasie Głównym, rozpoznanie tych ciał jest znacznie utrudnione. Ponadto, różnice w izotopach tlenu mogą nie być odzwierciedlone w widmach planetoid, co dodatkowo utrudnia identyfikację (Moskovitz et al., 2010). Dlatego konieczne jest zastosowanie zintegrowanego podejścia, które łączy badania spektroskopowe, fotometryczne i dynamiczne. Głównym celem tej pracy było więc pełne scharakteryzowanie próbki obiektów typu V w wewnętrznym Pasie Głównym oraz zapewnienie szerszego kontekstu dla teorii powstawania i ewolucji planetozymali.

Przez analizę krzywych fazowych (w pracy H3) wykazałam, że parametry funkcji fazowych planetoid typu V są zgodne z tymi dla obiektów o umiarkowanym i wysokim albedo. W badanej próbce nie znalazłam dowodów na istnienie wielu klastrów obiektów w przestrzeni parametrów fazowych. Dodatkowo wyznaczyłam parametry G_1 , G_2 i G_{12} (opisujące kształt krzywej fazowej) z jednoczesnego dopasowania funkcji fazowej do wszystkich danych fotometrycznych obserwowanych planetoid typu V. Stanowi to rozszerzenie pracy Penttilä et al. (2016), w której zalecano używanie stałych parametrów krzywych fazowych do dopasowywania niskiej jakości danych fotometrycznych. Wyznaczone parametry krzywej fazowej mogą być używane do oszacowania jasności absolutnych (a tym samym rozmiarów planetoid dla danego albedo geometrycznego) planetoid typu V z małą ilością obserwacji.

Poprzez analizę okresów rotacji planetoid typu V (H1) pokazałam, że obiekty te były pod wpływem efektu YORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack)³, co modyfikowało ich okresy rotacji. Efekt ten, łącznie z efektem Jarkowskiego, który skutkuje dyspersją rodzin planetoid, prowadzi do konkretnych rozkładów właściwości rotacyjnych planetoid. Na przykład jest mniej prawdopodobne, że planetoidy rotujące prosto o półosiach wielkich mniejszych niż półoś Westy pochodzą z Westy, ze względu na termiczne siły powodujące zwiększanie się ich półosi, a więc wypychające je w kierunku przeciwnym do Słońca (efekt Jarkowskiego, Nesvorný et al. (2008); Vokrouhlický and Farinella (2000)). Zakładając, że wewnętrzny Pas Główny jest zasiedlony przez Westoidy, które wyemigrowały z rodziny Westy, Nesvorný et al. (2008) pokazali że:

- 81% planetoid w tzw. regionie rezonansów rozproszonych (określonym przez elementy orbitalne $2.2 \text{ au} < a < 2.3 \text{ au}$, $0.05 < e < 0.2$, $0 < i < 10^\circ$, w Nesvorný et al. (2008) tzw. Komórka I) powinno mieć rotacje wsteczne (Nesvorný i Roig, prywatna korespondencja, na podstawie symulacji z Nesvorný et al. (2008));
- 40% obiektów w regionie niskiego nachylenia (określonym przez elementy orbitalne $2.32 \text{ au} < a < 2.48 \text{ au}$, $0.05 < e < 0.2$, $2^\circ < i < 6^\circ$, Komórka II

³Efekt zmieniający okresy oraz kierunki osi rotacji planetoid o niesymetrycznych kształtach ze względu na nierównomierne rozpraszania światła słonecznego oraz nierównomierną emisję ciepłą



Rysunek 1: Rozkład orbitalny (półosi wielkiej a oraz nachylenia i) planetoid typu V w wewnętrznym pasie głównym, kolor odpowiada szerokości ekliptycznej osi rotacji (β). Obiekty o rotacjach wstecznych oznaczono trójkątami, a rotujące prosto kółkami. Położenie planetoidy (4) Westa oznaczone jest strzałką, a członkowie rodziny Westy są zaznaczeni na szaro. Komórki I i II są oznaczone prostokątami.

w Nesvorný et al. (2008)), powinno mieć rotacje wsteczne (Nesvorný i Roig, prywatna korespondencja, na podstawie symulacji z Nesvorný et al. (2008));

Nadmiar planetoid rotujących prosto może wskazywać, na to, że ich populacja została zasilona przez planetoidy z innych niż rodzina Westy populacji planetozymali. Te przewidywania zweryfikowałam przez badania fotometryczne przeprowadzone w publikacjach H2 i H5. Zaprojektowałam, koordynowałam i przeprowadziłam kampanię fotometryczną w celu obserwacyjnego zweryfikowania tych numerycznych przewidywań. Znaczna niezgodność między przewidywaną a obserwowaną frakcją mogłaby wskazywać na udział innych populacji w zasobach typów V w Komórkach I i II. Obserwacje fotometryczne planetoid typu V z wewnętrznego Pasa Głównego przeprowadzono za pomocą około 20 różnych teleskopów, głównie w Europie i Stanach Zjednoczonych, w latach 2013-2022. W rezultacie zebrałam 2910 krzywych zmian blasku i uzyskałam 101 modeli kształtu. Dodatkowo uzupełniłem te zbiory modelami typów V przewidzianymi w pracy H3, dostępnymi z bazy danych DAMIT oraz modelami pochodzącymi z katalogu Gaia DR3 (Durech and Hanuš, 2023). Na Rysunku 1 przedstawiłam rozkład sklasyfikowanych planetoid typu taksonomicznego V w wewnętrznym Pasie Głównym. Kolor odpowiada wyznaczonym szerokościom ekliptycznym osi obrotu, a położenie Komórek I i II oznaczone jest przerywanymi prostokątami. Określiłam obserwacyjnie, że:

- w komórce I znajduje się $78\% \pm 11\%$ obiektów rotujących wstecznie oraz $22\% \pm 11\%$ rotujących prosto,
- a w komórce II $38\% \pm 13\%$ rotujących wstecznie oraz $62\% \pm 13\%$ rotujących prosto.

Podane niepewności są na poziomie 2σ i zostały wyliczone na podstawie wielkości próbki. Ta statystyka jest niezwykle zgodna z symulacjami numerycznymi

opisywanymi w Nesvorný et al. (2008), które przewidują 81% planetoid rotujących wstecznie w Komórce I i 40% w Komórce II po całkowaniu przez 2 miliardy lat. Na podstawie tych statystyk doszłam do wniosku, że jeśli istnieją planetoidy typu V wewnętrznego Pasa Głównego niezwiązane z Westą, to prawdopodobnie ich liczba jest bardzo niewielka i co najwyżej mieści się w ramach podanych niepewności. Jest to zgodne z niewielkim udziałem nietypowych meteorytów HED znajdujących się w kolekcjach meteorytów oraz małą liczbą planetoid spoza rodziny Westy w środkowym i zewnętrznym Pasie Głównym. Na podstawie danych z katalogu MOVIS-C Mansour et al. (2020) stwierdzili niewielki odsetek planetoid typu V w środkowej i zewnętrznej części Pasa Głównego Planetoid wśród wszystkich sklasyfikowanych obiektów (odpowiednio 4% oraz 1%). Odsetki te są zgodne z małą ilością planetoid nie powiązanych z Westą w wewnętrznej części Pasa Głównego określoną w tej pracy. Łącznie wyniki te są zgodne z rokładem przewidzianym przez Bottke et al. (2006); Bottke (2014).

Bottke et al. (2006) i Bottke (2014) badali ewolucję dynamiczną planetozymali, zakładając trzy różne miejsca ich formowania się w regionie planet skalistych. Jakościowe porównanie wyników wywnioskowanej niskiej liczby planetoid spoza rodziny Westy z wynikami symulacji numerycznych Bottke et al. (2006) i Bottke (2014) sugeruje, że planetozymale powstawały bardzo blisko Słońca. Co ciekawe, niedawno Morbidelli et al. (2022) pokazali, że planetozymale mogły powstać w ciągu pierwszego 0.5 miliona lat w dwóch odrębnych lokalizacjach: na linii śniegu (w okolicach 5 au) i na linii sublimacji krzemianów (w okolicach 1 au). Te lokalizacje odpowiadają planetozymalom bogatym w lód oraz planetozymalom bogatym w krzemiany. To drugie jest zadziwiająco zgodne z naszymi wnioskami dotyczącymi zróżnicowanych planetozymali (bogatych w krzemiany).

4.3.4.1 Spektralna identyfikacja planetoid typu V (H4)

Ważnym krokiem w kierunku zrozumienia rozkładu planetoid typu V i tym samym fragmentów planetozymali jest identyfikacja taksonomiczna. Do tej pory przeprowadzono dużą liczbę spektralnych identyfikacji planetoid typu V w całym Układzie Słonecznym. Są one łatwo rozpoznawalne ze względu na ich charakterystyczne widma z dwoma wyraźnymi pasmami absorpcyjnymi oliwinu/piroksenu przy długościach fal 0.9 μm i 2.0 μm (DeMeo et al., 2009). Większość z tych obiektów znajduje się w wewnętrznym Pasie Głównym. Większość z nich stanowi część kolizyjnej rodziny Westy lub należy do populacji tzw. uciekinierów z Westy (planetoidy, które wyemigrowały poza granice dynamicznej rodziny i nie można ich powiązać z rodziną za pomocą konwencjonalnych metod analizy skupień), zbiorczo nazywanych Westoidami. Związek między uciekinierami, planetoidą (4) Westa i główną grupą meteoritów HED jest dobrze ugruntowany w literaturze za pomocą badań spektralnych (Mittlefehldt (2015); McCord et al. (1970); Consolmagno and Drake (1977); Binzel and Xu (1993); Burbine et al. (2001); Florczak et al. (2002); Duffard et al. (2006); De Sanctis et al. (2011); Moskovitz et al. (2010); Hardersen et al. (2014)) oraz badań dynamicznych (Carruba et al. (2005); Nesvorný et al. (2008) i inni).

Bazaltowe planetoidy typu V znaleziono również w środkowej i zewnętrznej części Pasa Głównego, za rezonansem 3:1 z Jowiszem (Lazzaro et al., 2000; Roig et al., 2008; Moskovitz et al., 2008; Duffard and Roig, 2009; Ieva et al., 2018). Jest to wynik pomiarów spektrofotometrycznych pochodzących z dużych przeglądów nieba,

takich jak Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (York et al. (2000); Stoughton et al. (2002); Adelman-McCarthy et al. (2006); Ivezić et al. (2004, 2001)). Pierwszym ze zidentyfikowanych obiektów była planetoida (1459) Magnya, której bazaltowy charakter odkryto w 2000 roku (Lazzaro et al., 2000). Planetoida ta nie należy do żadnej znanej rodziny planetoid i wykazuje odmienne chemiczne właściwości piroksenu w porównaniu do Westy (Hardersen et al., 2004). Ponadto, Michtchenko et al. (2002) wykazuje, że Westa może być wykluczona jako ciało macierzyste Magnyi. Planetoida 1459 ma średnicę około 30 km, zbyt małą, aby samodzielnie uległa różnicowaniu, dlatego Magnya stanowi fragment skorupy większego zróżnicowanego ciała (Michtchenko et al., 2002). Inne zidentyfikowane planetoidy typu V w środkowej i zewnętrznej części Pasa Głównego wykazują właściwości spektralne różniące się od właściwości Westoidów (Hardersen et al., 2004; Leith et al., 2017; Ieva et al., 2018), i z dynamicznego punktu widzenia jest mało prawdopodobne, aby były w przeszłości częścią Westy (np. Michtchenko et al. (2002); Roig et al. (2008)), dlatego obiekty te znane są jako tzw. nie-Westoidy.

Planetoida	a (au)	e	i (deg)	Literatura
(6442) Salzburg	2.69	0.04	3.00	[7]
(7459) Gilbertfranco	2.60	0.15	2.21	[1, H4, 7]
(7954) 1991 OK1	2.61	0.19	13.96	[H4]
(8790) Michaelamato	2.66	0.09	3.62	[7]
(10578) 1999 LH	2.69	0.41	11.44	[H4]
(13760) Rodriguez	2.56	0.17	2.84	[7]
(19493) 1998 JY1	2.64	0.12	6.10	[H4]
(20188) 1997 AC18	2.59	0.10	8.63	[H4, 7]
(20254) Upice	2.51	0.13	4.00	[7]
(21238) Panarea	2.54	0.11	11.45	[1, 2, 8]
(21949) Tatulian	2.71	0.12	3.36	[7]
(22032) Mikekoop	2.56	0.19	13.27	[7]
(23472) Rolfriekher	2.61	0.16	14.00	[7]
(26592) Maryrenfro	2.69	0.18	11.43	[7]
(27272) 2000 LU4	2.39	0.16	10.60	[H4]
(28349) 1999 FB26	2.81	0.15	9.88	[H4]
(30392) 2000 XK26	2.70	0.22	12.76	[H4]
(31254) 1998 DK23	2.76	0.21	9.01	[H4]
(31544) 1999 DZ5	2.70	0.08	13.96	[H4]
(35057) 1984 SP4	2.53	0.25	5.09	[7]
(36118) 1999 RE135	2.71	0.03	4.81	[H4]
(38403) 1999 RU197	2.59	0.05	13.98	[7]
(40521) 1999 RL95	2.53	0.07	12.63	[3,7,8]
(41896) 2000 WN123	2.54	0.10	2.74	[7]
(47634) 2000 CN24	2.64	0.18	12.54	[H4]
(52132) 5034 P-L	2.59	0.25	10.62	[7]
(56034) 1998 WS19	2.63	0.25	11.76	[H4]
(56904) 2000 QP171	2.63	0.12	13.82	[H4]
(59423) 1999 GE4	2.65	0.11	12.44	[7]
(61985) 2000 RW30	2.56	0.10	8.07	[7]
(62061) 2000 RU71	2.56	0.19	5.38	[7]
(81879) 2000 LB11	2.78	0.08	17.24	[H4]

Asteroid	a (au)	e	i (deg)	References
(93981) 2000 XU11	2.66	0.04	12.55	[H4]
(103237) 1999 YO26	2.56	0.12	15.13	[H4]
(112981) 2002 RK25	2.59	0.18	12.48	[7]
(123381) 2000 WK57	2.64	0.15	14.72	[7]
(132693) 2002 NQ33	2.67	0.28	9.28	[H4]
(139631) 2001 QP56	2.76	0.18	13.90	[H4]
(144329) 2004 DD23	2.62	0.11	14.99	[7]
(161033) 2002 GW84	2.53	0.01	8.79	[7]
(162298) 1999 VZ74	2.65	0.10	10.88	[H4]
(169057) 2001 FN116	2.61	0.05	13.75	[7]
(170417) 2003 UF54	2.74	0.16	13.01	[H4]
(177988) 2006 QV45	2.65	0.18	15.59	[H4]
(180703) 2004 HW46	2.72	0.18	13.05	[7]
(193561) 2001 AG11	2.60	0.32	4.99	[7]
(197480) 2004 BE8	2.72	0.18	12.60	[7]
(201576) 2003 SX69	2.77	0.17	3.04	[7]
(210830) 2001 OZ52	2.67	0.21	7.20	[7]
(232170) 2002 EP22	2.56	0.23	6.38	[7]
(252389) 2001 TT	2.66	0.28	30.76	[H4]
(1459) Magnya	3.15	0.23	16.90	[4]
(2452) Lyot	3.16	0.11	11.77	[1, 7]
(7472) Kumakiri	3.01	0.11	9.91	[5]
(10537) 1991 RY16	2.85	0.07	7.26	[5,6]
(13704) Aletesi	3.05	0.13	5.63	[H4]
(15677) 1980 TZ5	2.85	0.15	13.34	[H4]
(21741) 1999 RN162	2.86	0.13	13.92	[H4]
(23512) 1992 PC3	3.06	0.15	11.61	[H4]
(26842) Hefele	3.07	0.18	6.29	[7]
(29834) Mariacallas	2.91	0.04	2.02	[7]
(31674) 1999 JD9	2.85	0.07	2.65	[H4]
(34698) 2001 OD22	3.17	0.07	23.24	[H4]
(34910) 4052 P-L	2.92	0.10	8.02	[H4]
(38620) 2000 AQ186	3.12	0.18	16.25	[7]
(47837) 2000 EB118	3.04	0.09	12.35	[7]
(55613) 2002 TY49	2.91	0.05	8.88	[H4]
(59530) 1999 JU24	3.13	0.03	11.85	[H4]
(65040) 2004S12	12.21	0.19	3.15	[7]
(65068) 2004S26	9.99	0.13	1.73	[7]
(123786) 2001 BS17	3.09	0.17	3.22	[7]
(126981) 2002 FW26	2.98	0.07	9.95	[7]
(133687) 2003 UR206	2.94	0.06	18.05	[7]

Tabela 4: Zidentyfikowane planetoidy typu V w środkowym (górze) i zewnętrznym (dół) Pasi Głównym oraz ich elementy orbitalne podane z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku (pół wielka, mimośród, nachylenie). Literatura: [1] Medeiros et al. (2019), [2] Hammergren et al. (2006), [3] Roig et al. (2008), [4] Lazzaro et al. (2000), [5] Duffard and Roig (2009), [6] Moskovitz et al. (2008), [7] Mansour et al. (2020), [8] Ieva et al. (2016) [H4] Oszkiewicz et al. 2023

W publikacji H4 przeprowadziłam binarną klasyfikację maszynową 60 518 widm planetoid z katalogu Gaia DR3, dzieląc je na dwie grupy: typy V i pozostałe typy. Zidentyfikowałam około 2 000 wcześniej nieznanymi planetoid typu V, spośród których około 350 pomyślnie zweryfikowałam. Wśród tych nowo odkrytych planetoid typu V, znalazłam wiele obiektów w środkowym i zewnętrznym Pasi Głównym (patrz Tabela 4). Te odkrycia przyczyniają się do wzrostu kolekcji obiektów, których nie można łatwo związać z znaną skamieniałą planetozymalą - planetoidą (4) Westa. Dodatkowo, znalazłam dużą liczbę planetoid typu V w wewnętrznym Pasi Głównym. Wyznaczyłam i przeprowadziłam analizę nachyleń widm w wybranych zakresach oraz głębokości i środków pasma absorpcyjnego na $0,9 \mu\text{m}$ dla różnych populacji planetoid typu V. W wewnętrznym Pasi Głównym wykryłam obiekty z głębokościami pasm przewyższającymi głębokość obserwowaną w przypadku (1459) Magnyi. Ponadto zidentyfikowałam obiekty z środkami pasm absorpcyjnych w okolicy $0,9 \mu\text{m}$, odbiegającymi od typowych wartości obserwowanych u typowych Westoidów. Obiekty te, podobnie jak Magnya, potencjalnie mogą wykazać odmienny skład chemiczny w porównaniu z Westą i mogą pochodzić od innego ciała macierzystego. Jednak do dokładnej analizy mineralogicznej potrzebne są widma wysokiej jakości w zakresie VIS i NIR. Porównałam też parametry spektralne pochodzące z obserwacji naziemnych z parametrami pochodzącymi z misji Gaia i wykryłam efekt systematyczny dotyczący głębokości $0,9 \mu\text{m}$ pasma absorpcji oliwiny/piroksenu.

4.3.4.2 Analiza dynamiczna planetoid typu V spoza rodziny Westy (H6)

Odkrycie bazaltowego charakteru (1459) Magnyi na 3.1 au (poza obecną linią śniegu) wywołało lawinę pytań dotyczącą tego, jak ten termicznie zróżnicowany obiekt trafił do zewnętrznej części Pasa Głównego (Lazzaro et al., 2000). Michtchenko et al. (2002) przeprowadzili analizę dynamiczną hipotetycznej rodziny Magnyi i regionu sąsiadującego. Autorzy doszli do wniosku, że najbardziej prawdopodobnym scenariuszem dla tego obiektu jest jego pochodzenie od innej niż Westa zróżnicowanej planetozymali, a następnie jego transport dynamiczny. Dodatkowym przyczynkiem wspierającym tę hipotezę jest również analiza mineralogiczna Magnyi wykazująca odrębny skład mineralogiczny obiektu (Hardersen et al., 2004).

Odkrycie dodatkowych planetoid typu V w środkowej i zewnętrznej części Pasa Głównego zainspirowało dalsze badania dynamiczne. Roig et al. (2008) pokazuje, dla dużych planetoid (o średnicy $d \sim 5 \text{ km}$) istnieje niskie prawdopodobieństwo ($<1\%$) migracji z Westy w ciągu 3.5 miliarda lat. Powodem tego niskiego prawdopodobieństwa jest konieczność przejścia przez niestabilny rezonans 3:1 z Jowiszem oraz niska efektywność efektu Jarkowskiego dla dużych planetoid (Roig et al.,

2008). Mniejsze planetoidy mogą osiągnąć prawdopodobieństwa na poziomie $\sim 70-100\%$. Korzystając z modelu migracji planet, Brasil et al. (2017) pokazali, że obecność większości planetoid typu V w środkowej i zewnętrznej części Pasa Głównego może być wyjaśniona tym mechanizmem transportu. Inny możliwy scenariusz zakłada, że obiekty typu V w środkowym Pasie Głównym, takie jak (21238) 1995 WV7, pochodzą od ciała macierzystego rodziny Eunomii. Pochodzenie planetoid typu V w środkowym Pasie Głównym z lokalnych rodzin planetoid było danej badane przez Carruba et al. (2014), a tych w zewnętrznym Pasie Głównym przez Huaman et al. (2014).

W wewnętrznej części Pasa Głównego ($a < 2.5$ au) większość planetoid typu V należy do rodziny Westy. Nesvorný et al. (2008) przeprowadzili numeryczne symulacje pokazujące, że w wyniku efektu Jarkowskiego i rezonansów dynamicznych planetoidy mogą przedostać się poza granice rodziny Westy i stać się uciekinierami. Carruba et al. (2005) pokazali, że planetoidy takie jak (809) Lunda i (956) Elisa mogły dynamicznie wywędrować z rodziny Westy. Autorzy zakładali, że Lunda obraca się w kierunku wstecznym i użyli klonów o średnicy 100 m, co maksymalizuje efekt Jarkowskiego. Kierunki rotacji tych ciał zostały wcześniej określone i są to odpowiednio kierunek prosty (Lunda) i wsteczny (Elisa) (Kryszczyńska et al. (2009); Bartczak et al. (2017), H5).

W H6 przeprowadzono całkowanie numeryczne właściwych elementów orbitalnych planetoid typu V z modelami rotacji wyznaczonymi w H5. Choć większość planetoid typu V w wewnętrznym pasie głównym można łatwo przyporządkować rodzinie Westy, znaleziono dwie planetoidy ((3307) Athabasca i (17028) 1999 FJ5), które nie są łatwo powiązywalne z Westą

4.3.5 Podsumowanie

Dzięki przedstawionemu cyklowi publikacji, pracy obserwacyjnej i analizie danych z misji kosmicznej, przyczyniłam się do lepszego scharakteryzowania i zrozumienia planetoid typu V oraz ich przodków (zróżnicowanych planetozymali) w Układzie Słonecznym. W szczególności przeprowadziłam następujące działania:

- Szczegółowe badanie planetoidy (2579) Spartacus, które wykazało, że jej właściwości fizyczne i dynamiczne wskazują na pochodzenie z obszaru głęboko w skorupie Westy jako najbardziej prawdopodobny scenariusz. Analiza spektralna prowadzi do pogodzenia jej właściwości spektralnych z typowymi westoidami, z wyjątkiem parametru BAR, który pozostaje niezwykle niski w porównaniu do typowych westoidów (cele (ii),(iii)).
- Klasyfikację widm ponad 60 000 planetoid za pomocą danych misji kosmicznej ESA Gaia zawartych w katalogu DR3. Identyfikację dodatkowych planetoid typu V na odległościach większych niż 2.5 au w środkowej i zewnętrznej części Pasa Głównego Planetoid (cele (iii)).
- Analizę parametrów spektralnych największego zbioru dokładnych widm planetoid typu V i identyfikację obiektów z głębokimi pasmami absorpcji na długości 0.9 mikrometra (cele (ii), (iii) i (iv)).
- Zaprojektowanie i koordynację globalnej kampani obserwacyjnej oraz wyznaczenie obrotów i kształtów 101 planetoid (cel (i)).

- Analizę migracji dynamicznej planetoid typu V znajdujących się na zewnątrz rodziny Westy (cel (ii) i (iii))
- Analizę właściwości rotacyjnych planetoid typu V i potwierdzenie symulacji numerycznych z pracy Nesvorný et al. (2008). Pokazało to, że tego rodzaju symulacje numeryczne można zweryfikować obserwacyjnie w szczegółach i wykorzystywać także do innych populacji planetoid (cel (iii)).
- Wykazanie najprawdopodobniej bardzo niskiej liczby planetoid typu V niewiązących się z Westą, co prowadzi do wniosku, że zróżnicowane planetozymale mogły powstać bardzo blisko Słońca. To odkrycie jest zgodne z badaniami teoretycznymi Bottke et al. (2006) i Morbidelli et al. (2022) (cel (v)).
- Pierwszą analizę właściwości krzywych fazowych planetoid typu V, która pokazała, że nie ma dowodów na wyraźne skupiska wśród planetoid typu V w przestrzeni parametrów krzywych fazowych. Wyzaczyłam także globalny parametr G_{12} do stosowania w jednoparametrowej funkcji fazowej do dopasowywania planetoid typu V o małej ilości lub niskiej jakości obserwacji fotometrycznych (cele (ii) i (iii)).

W przedstawionym cyklu publikacji wykazałam, że górna granica liczby planetoid typu V nie będących Westoidami w wewnętrznym Pasie Głównym jest co najwyżej bardzo niewielka. Wykorzystanie pracy Nesvorný et al. (2008) wykazało, że niezgodność między przewidywanymi właściwościami rotacyjnymi planetoid typu V spoza rodziny dynamicznej Westy a obserwowanym rozkładem kierunków rotacji mieści się w błędzie próbkowania. To, w połączeniu z faktem, że planetoidy typu V są rzadkie na odległościach większych niż 2.5 au od Słońca i nie są one powiązane z żadną rodziną planetoid, wspiera hipotezę Bottke et al. (2006) i Bottke (2014) jako bardziej prawdopodobny scenariusz w porównaniu z teorią powstawania zróżnicowanych planetoidalnych ciał bezpośrednio w Głównym Pasie Planetoid. Jakościowe porównanie niskiej liczby planetoid typu V niepowiązanych z Westą z symulacjami numerycznymi Bottke et al. (2006) sugeruje, że miejsce powstania ich ciał macierzystych (zróżnicowanych planetozymali) było bardzo blisko Słońca. Jest to zgodne z pracą Morbidelli et al. (2022), która sugeruje linię sublimacji krzemianu na ~ 1 au. Dalsza weryfikacja miejsca formowania się zróżnicowanych planetozymali może nastąpić wkrótce dzięki misji kosmicznej NASA Psyche. Celem tej misji jest dokładne określenie lokalizacji powstawania podejrzanego żelaznego jądra zróżnicowanego planetozymala, czyli planetoidy (16) Psyche (Elkins-Tanton et al., 2022). Niewielka zmienność w krzywych fazowych i parametrach spektralnych sugeruje również, że planetoidy typu V niebędące Westoidami albo występują bardzo rzadko, albo różnice w izotopach tlenu nie są widoczne w widmach, albo te ciała powstały w podobnych środowiskach utleniających i w podobnej odległości od Słońca. Niektóre z tych ciał mogły zostać przetransportowane mechanizmem zaproponowanym przez Brasil et al. (2017) i znaleźć się dalej niż 2.5 au od Słońca

5 Prezentacja znaczącej działalności naukowej lub artystycznej prowadzonej w więcej niż jednym uniwersytecie, instytucji naukowej lub kulturalnej, zwłaszcza w zagranicznych instytucjach

Pracę doktorską obroniłam w 2012 roku na Uniwersytecie Helsińskim w Finlandii. W trakcie studiów doktoranckich byłam zaangażowana w rozwijanie kodu dla procesu przetwarzania danych misji kosmicznej Gaia w międzynarodowym konsorcjum DPAC (Gaia Data Processing and Analysis Consortium). W szczególności pracowałam nad pakietem do inwersji orbitalnej, który był rozwijany przez jednostkę Gaia DU456 (jednostka koordynacyjna CU4 - przetwarzanie obiektów). Moje studia doktoranckie były częściowo wsparte przez sieć szkoleniową Marie Curie - European Leadership in Space Astrometry (ELSA) - finansowaną przez Szósty Program Ramowy Komisji Europejskiej (FP6, umowa sieciowa: MRTN-CT-2006-033481). W trakcie studiów doktoranckich uczestniczyłam także w rocznym stażu w Lowell Observatory i na Uniwersytecie Północnej Arizony w Stanach Zjednoczonych oraz pracowałam jako studentka (tzw. astronom wspierający) na Nordic Optical Telescope w Hiszpanii (6 miesięcy). Podczas mojego pobytu w Lowell Observatory wyznaczałam krzywe fazowe planetoid na podstawie fotometrii zgłaszanej do Minor Planet Center. Moje obowiązki na Nordic Optical Telescope obejmowały wykonywanie obserwacji serwisowych oraz wsparcie techniczne i obserwacyjne odwiedzających astronomów, przeprowadzanie testów w trakcie nocy technicznych oraz pisanie skryptów i małego oprogramowania, a także własną pracę badawczą.

W 2012 roku (po obronie doktoratu) spędziłam 4 miesiące w Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE) przy Obserwatorium Paryskim, gdzie pracowałam nad opracowaniem metody obliczania orbit opartej na algorytmie Metropolisa-Hastingsa oraz metodzie obliczania orbit Thiele-Innes dla planetoid podwójnych. Pobyt ten był wspierany przez Europejską Fundację Nauki, grant: G3: Wizyta badawcza wspierana w ramach programu Gaia Research for European Astronomy Training Network - programu wspieranego przez Komisję Europejską w ramach siódmego programu ramowego (FP7) Marie Curie w ramach umowy grantowej 264895.

Następnie wróciłam do Polski, gdzie rozpoczęłam pracę niezależną. Kierowałam badaniami właściwości zróżnicowanych rodzin planetoid w ramach 3-letniego grantu pt. "Zróżnicowane rodziny planetoid jako brakujące ogniwo w historii Układu Słonecznego"(2012-2015, grant FUGA numer 2012/04/S/ST9/00022, Narodowe Centrum Nauki, Polska). W 2014 roku w ramach tych badań odwiedziłam (1 miesiąc) grupę badawczą planetarną na Massachusetts Institute of Technology w Stanach Zjednoczonych, aby nauczyć się narzędzi do analizy obserwacji spektralnych wykonanych w bliskiej podczerwieni na teleskopie NASA Infrared Telescope Facility (IRTF). Później kierowałam badaniami na pokrewny temat "Planetoidy typu V z wewnętrznego pasa głównego jako pozostałości zróżnicowanych planetozymali"(2018-2023, grant SONATA numer 2017/26/D/ST9/00240, Narodowe Centrum Nauki, Polska). Wyniki tych badań są zawarte w niniejszym auto-

referacie, w tym kluczowe wyniki obserwacyjne sugerujące, że zróżnicowane planetozymale powstawały blisko Słońca. Praca ta wymagała szerokiej współpracy i koordynacji z ponad 20 obserwatoriami i instytucjami rozszanowanymi po całym świecie.

W 2015 roku uzyskałam 3-letnią pozycję post-doktorską w Lowell Observatory w Stanach Zjednoczonych, gdzie byłam zatrudniona w ramach grantu Narodowej Fundacji Nauki (USA, numer grantu 73016), który poświęcony był spektroskopii Plutona i Charona przed spotkaniem z misją New Horizons. Ze względu na uzyskanie etatu nauczyciela akademickiego na stanowisku adiunkta badawczo-dydaktycznego na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, wróciłam do Polski po roku, tj. w roku 2016.

W latach 2016-2019 pełniłam funkcję eksperta ds. NEO (obiektów zbliżających się do Ziemi) dla Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) w ramach dwóch projektów finansowanych przez ESA, które współtworzyłam:

- 2017-2019 "Service for Archival NEO Orbital and Rotational Data Analysis (SANORDA)", projekt ESA, UAM był głównym wykonawcą (a firma ITTI Sp. z o.o. zleceniobiorcą),
- 2016-2017 "P2-NEO-VI NEO User Support Tools (NEO-Tools)", projekt ESA, UAM i ITTI Sp. z o.o. były współwykonawcami.

W ramach tych projektów opracowaliśmy narzędzia programistyczne do obserwacji planetoid zbliżających się do Ziemi (NEAs) oraz analizy fotometrycznych i orbitalnych danych planetoid. Pakiet NEO-Toolkit, powstały w ramach projektu NEO-Tools, został wdrożony i jest dostępny na stronach Near-Earth Objects Co-ordination Center (ESA). Jednocześnie uczestniczyłam w pracach grupy roboczej CEN/CENELEC TC5 - WG2 ds. standaryzacji asteroid bliskich Ziemi. Prace te zaowocowały kilkoma standardami (Telescope Scheduling and Commanding Message (SCM) Standard, NEO & SST Glossary of Terms, FITS header keywords requirements), które zostały zatwierdzone przez CEN/CENELEC.

W latach 2018-2023 kierowałam pracą doktorantki mgr Karoliny Dziadury, laureatki "Diamentowego grantu", w zakresie wyznaczania orbit planetoid i detekcji efektu Jarkowskiego na podstawie astrometrii z misji Gaia. Praca ta zaowocowała dwiema publikacjami we współpracy z członkami zespołu DPAC (2018-2021 'Detection of the Yarkovsky effect using improved astrometric measurements', Grant Diamentowy nr 0062/DIA/2018/47, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Polska). Obecnie projekt ten jest rozwijany dalej w celu zbadania efektu przesunięcia fotocentrum-barycentrum (różnicy między zmierzonym obserwowanym położeniem środka oświetlonego obszaru powierzchni planetoidy skierowanego w kierunku obserwatora a rzeczywistym fizycznym środkiem masy planetoidy) w ramach dwóch dodatkowych grantów (2023-2024 "Improving orbits of potentially dangerous asteroid" Grant nr 2022/45/N/ST9/01403 Narodowe Centrum Nauki, Polska i 2022-2023 "From historical plates to the Gaia mission – a deep dive into NEOs" NAWA: Polonium – wymiana bilateralna między Polską a Francją, BPN/BFR/2021/1/00026/U/00001). Ten ostatni jest realizowany we współpracy z Obserwatorium Paryskim.

W 2019 roku rozpoczęłam roczny urlop macierzyński, po którym nastąpił dwuletni okres naznaczony globalną pandemią COVID-19.

Przez całą moją karierę naukową brałam udział w licznych badaniach krzywych fazowych planetoid i łączeniu ich z właściwościami powierzchni planetoid. Obecnie kieruję badaniami nad efektem poczerwienienia widm planetoid w zależności od kąta fazowego i jego wpływem na wyznaczaną taksonomię/mineralogię (2023-2027 "Large scale study of the asteroid spectral phase reddening effect" grant Narodowego Centrum Nauki - OPUS nr 2022/45/B/ST9/00267, Polska). Byłam również współbadaczką i jestem promotorką pomocniczą doktoranta - mgr Emila Wilawera - w grantcie związanym z krzywymi fazowymi asteroid pt. 'New asteroid taxonomy as a tool to study planetary systems' (grant OPUS nr 2017/25/B/ST9/00740, Narodowe Centrum Nauki, Polska). Pozostałe moje badania nad krzywymi fazowymi były prowadzone we współpracy z pracownikami Uniwersytetu Helsińskiego w Finlandii, Obserwatorium Uniwersytetu w Charkowie w Ukrainie i New Mexico State University w Stanach Zjednoczonych (krzywe fazowe termiczne). W 2022 roku uzyskałam stypendium rządu francuskiego na wizytę w Obserwatorium Lazurowego Wybrzeża, we Francji, gdzie przebywałam przez 1 miesiąc, pracując nad krzywymi fazowymi planetoid i efektem poczerwienienia widm. Obecnie współpracuję również z badaczami tego instytutu nad projektem związanym z wykrywaniem planetoid podwójnych (grant Francuskiej Agencji Badań Naukowych, CNRS - "Gaia Moons"). Niedawno wniosłam wkład w analizę fotometryczną do pracy Santanara et al. (2022) oraz spektroskopową do pracy Lazzarin et al. (2023), opublikowanych w Nature Communications. W sposób ciągły aktywnie współpracuję z wieloma instytutami na całym świecie, co znajduje odzwierciedlenie w moim zróżnicowanym dorobku publikacyjnym.

6 Prezentacja osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz osiągnięć w dziedzinie popularyzacji nauki

6.1 Doświadczenie w nauczaniu oraz doradztwo przy pracach dyplomowych i doktorskich

Od 2016 roku, kiedy rozpoczęłam pracę na stanowisku adiunkta na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, moje obowiązki dydaktyczne obejmują 210 godzin nauczania rocznie. W ciągu tych lat prowadziłam następujące zajęcia:

- Astrodynamika - wykład i ćwiczenia,
- Fotometria - laboratorium,
- Laboratorium komputerowe - laboratorium,
- Metody statystyczne w obserwacjach astronomicznych - ćwiczenia,
- Dynamika Układu Słonecznego - seminarium,

- Metody komputerowe dla astronomów - laboratorium,
- Podstawy astronomii dla studentów geoinformatyki - ćwiczenia,
- Wprowadzenie do astronomii / Zajęcia obserwacyjne - laboratorium,
- Programowanie i metody numeryczne - laboratorium,
- Mechanika nieba - ćwiczenia.

Byłam promotorką jednej pracy licencjackiej (2017, Karolina Dziadura, "Analiza formalnych niepewności w określaniu okresów obrotowych asteroid za pomocą szeregów Fouriera"). Jestem promotorką pomocniczą dla 2 doktorantów (mgr Karolina Dziadura, mgr Emil Wilawer, planowane obrony w 2024).

6.2 Organizacja konferencji i szkół letnich

Zorganizowałam lub współorganizowałam kilka sesji i konferencji:

- European Astronomical Society Annual Meeting (EAS), Kraków, Polska, 10/07/2023-14/07/2023 - współorganizatorka i współprzewodnicząca sesji SS5: The Solar System - from near to far - in its stellar environment at the Gaia & LSST era,
- European Planetary Science Congress (EPSC), Granada, Hiszpania, 18/09/2022-23/09/2022 - współorganizatorka i współprzewodnicząca sesji SB1: Asteroid Observations and modelling: properties and evolution of individual objects and populations,
- European Planetary Science Congress (EPSC), spotkanie wirtualne, 13/09/2021-24/09/2021 - współorganizatorka i współprzewodnicząca sesji SB6: Asteroid Observations and modelling: properties and evolution of individual objects and populations,
- Asteroids, Comets, Meteors (ACM), Helsinki, Finlandia, 30/06/2014-04/07/2014 - członkini lokalnego komitetu organizacyjnego ,
- Meteoroids 2013, Poznań, Polska, 26/08/2013-30/08/2013 - członkini lokalnego komitetu organizacyjnego,
- Electromagnetic and Light Scattering Conference XII, Helsinki, Finlandia, 28/06/2010-02/07/2010 - członkini lokalnego komitetu organizacyjnego.

Oprócz organizacji konferencji i sesji pełniłam również funkcję przewodniczącej sesji na różnych międzynarodowych konferencjach (np. DPS 2021, ACM 2014, EPSC 2021, EPSC 2022). Niedawno, jako jedna z dwóch osób odpowiedzialnych, zaproponowałam zorganizowanie konferencji "Asteroids, Comets, Meteors"(ACM) w 2026 roku w Poznaniu. Organizacja konferencji została nam powierzona przez złożony z poprzednich prezydentów ACM komitet wykonawczy.

Współorganizowałam dwie szkoły letnie w ramach sieci Europlanet:

- Asteroid Reseach Training Workshop (Towarzystwo Europlanet), Obserwatorium Tartu, Estonia, 21/08/23-25/08/23 - współorganizowałam szkołę i prowadziłam zajęcia praktyczne,
- Asteroid Photometry Virtual Summer School (Towarzystwo Europlanet), szkoła online, 17/08/21 - 27/08/21 - współorganizowałam szkołę i prowadziłam zajęcia praktyczne.

6.3 Popularyzacja nauki

Przez lata brałam udział w wielu działaniach popularyzujących naukę. Od wykładów publicznych, przez organizację warsztatów, pisanie artykułów popularnonaukowych, wywiady radiowe i telewizyjne, po udział w wydarzeniach popularyzujących naukę (np. obserwacje teleskopowe itp.). Choć trudno oddać pełny zakres moich działań popularyzatorskich, poniżej znajduje się kilka przykładów.

Regularnie udzielam wywiadów radiowych i telewizyjnych. Na przykład w 2008 roku udzieliłam wywiadu TVP Poznań związku z upadkiem meteorytu w Czelańsku. W 2017 i 2022 roku udzieliłam wywiadów dla programu telewizyjnego "Astronarium"(popularny program telewizyjny o astronomii) związanego z planetoidami bliskimi Ziemi, a także misją DART. W 2021 roku wzięłam udział w podcaście radiowym TOKFM na temat zderzeń planetoid z Ziemią, a w 2022 roku zostałam zapytana przez radio Kampus o misję kosmiczną NASA OSIRIS-REx.

Napisałam także kilka artykułów popularnonaukowych. Najnowsze z nich, opublikowane w magazynie "Urania - Postępy Astronomii"(popularnym magazynie Polskiego Towarzystwa Astronomicznego), to:

- "Misja DART - sonda wysłana na Didymosa", Urania nr 4/2022, J. Gołębiewska i D. Oszkiewicz,
- "DART po uderzeniu", Urania nr 1/2023, D. Oszkiewicz i T. Kwiatkowski.

Często angażuję się w wygłaszanie wykładów popularnonaukowych i uczestniczę w różnych wydarzeniach popularyzujących astronomię. W 2023 roku gościłam dwie grupy przedszkolaków w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza i zorganizowałam warsztaty budowy modeli rakiet kosmicznych. Podczas obchodów w Poznaniu w 2022 roku z okazji jubileuszu odkrycia planetoidy (1572) Posnania, wygłosiłam wykład popularnonaukowy pt. "Planetoidy - współczesna wiedza i odkrycia". W 2017 roku zorganizowałam wycieczkę na wystawę kosmiczną NASA „Gateway To Space” w Warszawie. Podczas mojego pobytu w Lowell Observatory, USA w 2016 roku wzięłam udział w popularnym cyklu spotkań z astronomią "Poznaj astronoma", aby przedstawić bieżące badania prowadzone w Obserwatorium Lowella. W tym samym roku wsparłam obserwacje teleskopowe dla szkoły Indian Navajo prowadzone w stacji obserwacyjnej Anderson Mesa oraz uczestniczyłam w wydarzeniu popularyzującym astronomię w rezerwacie Indian Navajo. W 2013 roku prowadziłam obserwacje teleskopowe na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu podczas "Nocy Naukowców". Przedstawiłam bieżący stan badań nad planetoidami w 2013 roku podczas

Festiwalu Sztuki i Nauki w Poznaniu i wygłosiłam kilka wykładów podczas "wykładów otwartych" na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza (np. 2013: "Rodziny planetoid o różnicowanej strukturze jako brakujące ogniwo w historii Układu Słonecznego", 2018: "O zaginionych przodkach bazaltowych asteroid").

Jednym z moich najważniejszych osiągnięć popularyzatorskich jest stworzenie ścieżki edukacyjnej w Rezerwacie Przyrody Meteoryt Morasko w Poznaniu. Byłam główną inicjatorką i organizatorką tego przedsięwzięcia. Razem z koleżankami z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu i we współpracy z Polskim Towarzystwem Ochrony Przyrody "Salamandra zebrałyśmy fundusze, przygotowaliśmy materiały edukacyjne i zaprojektowałyśmy tablice edukacyjne, umieszczone obecnie przy kraterach powstałych w wyniku upadku żelaznego meteorytu w rezerwacie przyrody Meteoryt Morasko. W związku z tą działalnością w 2014 roku współorganizowałam także konferencję popularnonaukową zorganizowaną z okazji 100 rocznicy odkrycia pierwszego fragmentu meteorytu Morasko.

Literatura

- Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., Anderson, K. S., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Baldry, I. K., Barentine, J., Berlind, A., et al. (2006). The fourth data release of the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 162(1):38.
- Asphaug, E., Agnor, C. B., and Williams, Q. (2006). Hit-and-run planetary collisions. *Nature*, 439(7073):155–160.
- Asphaug, E. and Reufer, A. (2014). Mercury and other iron-rich planetary bodies as relics of inefficient accretion. *Nature Geoscience*, 7(8):564–568.
- Avdellidou, C., Delbo', M., and Fienga, A. (2018). Exogenous origin of hydration on asteroid (16) Psyche: The role of hydrated asteroid families. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(3):3419–3428.
- Bartczak, P., Kryszczyńska, A., Dudziński, G., Polińska, M., Colas, F., Vachier, F., Marciniak, A., Pollock, J., Apostolovska, G., Santana-Ros, T., et al. (2017). A new non-convex model of the binary asteroid (809) Lundia obtained with the SAGE modelling technique. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471(1):941–947.
- Bills, B. G. and Nimmo, F. (2011). Rotational dynamics and internal structure of Titan. *Icarus*, 214(1):351–355.
- Binzel, R. P. and Xu, S. (1993). Chips off of asteroid 4 Vesta: Evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites. *Sci*, 260(5105):186–191.
- Bland, P. A., Spurný, P., Towner, M. C., Bevan, A. W., Singleton, A. T., Bottke, W. F., Greenwood, R. C., Chesley, S. R., Shrubený, L., Borovička, J., et al. (2009). An anomalous basaltic meteorite from the innermost main belt. *science*, 325(5947):1525–1527.
- Bottke, W. (2014). On the origin and evolution of Vesta and the V-Type asteroids. *Vesta in the Light of Dawn: First Exploration of a Protoplanet in the Asteroid Belt*, 1773:2024.
- Bottke, W. F., Nesvorný, D., Grimm, R. E., Morbidelli, A., and O'Brien, D. P.

- (2006). Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region. *Nature*, 439(7078):821.
- Brasil, P., Roig, F., Nesvorný, D., and Carruba, V. (2017). Scattering V-type asteroids during the giant planet instability: a step for Jupiter, a leap for basalt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468(1):1236–1244.
- Burbine, T. H., Buchanan, P. C., Binzel, R. P., Bus, S. J., Hiroi, T., Hinrichs, J., Meibom, A., and McCoy, T. J. (2001). Vesta, Vestoids, and the howardite, eucrite, diogenite group: Relationships and the origin of spectral differences. *Meteoritics & Planetary Science*, 36(6):761–781.
- Burbine, T. H., McCoy, T. J., Meibom, A., Gladman, B., and Keil, K. (2002). Meteoritic parent bodies: Their number and identification. *Asteroids III*.
- Bus, S. J. (1999). Compositional structure in the asteroid belt: Results of a spectroscopic survey. *Ph. D. Thesis*, page 311.
- Carruba, V., Huaman, M., Domingos, R., Santos, C. D., and Souami, D. (2014). Dynamical evolution of V-type asteroids in the central main belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439(3):3168–3179.
- Carruba, V., Michtchenko, T., Roig, F., Ferraz-Mello, S., and Nesvorný, D. (2005). On the V-type asteroids outside the Vesta family-I. Interplay of nonlinear secular resonances and the Yarkovsky effect: the cases of 956 Elisa and 809 Lunda. *Astronomy & Astrophysics*, 441(2):819–829.
- Consolmagno, G. J. and Drake, M. J. (1977). Composition and evolution of the eucrite parent body: Evidence from rare earth elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(9):1271–1282.
- Day, J. M. (2015). Planet formation processes revealed by meteorites. *Geology Today*, 31(1):12–20.
- De Sanctis, M., Migliorini, A., Jasmin, F. L., Lazzaro, D., Filacchione, G., Marchi, S., Ammannito, E., and Capria, M. (2011). Spectral and mineralogical characterization of inner main-belt V-type asteroids. , 533:A77.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202(1):160–180.
- DeMeo, F. E. and Carry, B. (2014). Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 505(7485):629–634.
- Duffard, R., Lazzaro, D., Licandro, J., De Sanctis, M. C., and Capria, M. T. (2006). V-type asteroids: A mineralogical study. , 38(9):1987–1990.
- Duffard, R. and Roig, F. (2009). "Two new V-type asteroids in the outer Main Belt? . *Planetary Space Science*, 57(2):229–234.
- Dunham, E., Desch, S., and Probst, L. (2019). Haumea’s shape, composition, and internal structure. *The Astrophysical Journal*, 877(1):41.
- Ďurech, J. and Hanuš, J. (2023). Reconstruction of asteroid spin states from Gaia DR3 photometry. *Astronomy & Astrophysics*, 675:A24.
- Elkins-Tanton, L. T., Asphaug, E., Bell III, J. F., Bierson, C. J., Bills, B. G., Bottke, W. F., Courville, S. W., Dobb, S. D., Jun, I., Lawrence, D. J., et al. (2022). Distinguishing the origin of asteroid (16) Psyche. *Space Science Reviews*, 218(3):17.
- Florczak, M., Lazzaro, D., and Duffard, R. (2002). "Discovering New V-Type Asteroids in the Vicinity of 4 Vesta . , 159:178–182.

- Ghosh, A., Weidenschilling, S., McSween Jr, H., and Rubin, A. (2006). Asteroidal heating and thermal stratification of the asteroid belt. *Meteorites and the early solar system II*, pages 555–566.
- Gounelle, M., Chaussidon, M., Morbidelli, A., Barrat, J.-A., Engrand, C., Zolensky, M. E., and McKeegan, K. D. (2009). A unique basaltic micrometeorite expands the inventory of solar system planetary crusts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(17):6904–6909.
- Gradie, J. and Tedesco, E. (1982). Compositional structure of the asteroid belt. *Science*, 216(4553):1405–1407.
- Hammergren, M., Gyuk, G., and Puckett, A. (2006). (21238) 1995 WV7: A new basaltic asteroid outside the 3: 1 mean motion resonance. *arXiv preprint astro-ph/0609420*.
- Hardersen, P. S., Gaffey, M. J., and Abell, P. A. (2004). Mineralogy of Asteroid 1459 Magnya and implications for its origin. , 167(1):170–177.
- Hardersen, P. S., Reddy, V., Roberts, R., and Mainzer, A. (2014). More chips off of Asteroid (4) Vesta: Characterization of eight Vestoids and their HED meteorite analogs. *Icarus*, 242:269–282.
- Huaman, M. E., Carruba, V., and Domingos, R. C. (2014). Dynamical evolution of V-type photometric candidates in the outer main belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(3):2985–2992.
- Ieva, S., Dotto, E., Lazzaro, D., Fulvio, D., Perna, D., Mazzotta Epifani, E., Medeiros, H., and Fulchignoni, M. (2018). Basaltic material in the main belt: a tale of two (or more) parent bodies? , 479(2):2607–2614.
- Ieva, S., Dotto, E., Lazzaro, D., Perna, D., Fulvio, D., and Fulchignoni, M. (2016). Spectral characterization of V-type asteroids—II. A statistical analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455(3):2871–2888.
- Ivezić, Ž., Lupton, R., Schlegel, D., Boroski, B., Adelman-McCarthy, J., Yanny, B., Kent, S., Stoughton, C., Finkbeiner, D., Padmanabhan, N., et al. (2004). SDSS data management and photometric quality assessment. *Astronomische Nachrichten: Astronomical Notes*, 325(6-8):583–589.
- Ivezić, Ž., Tabachnik, S., Rafikov, R., Lupton, R. H., Quinn, T., Hammergren, M., Eyler, L., Chu, J., Armstrong, J. C., Fan, X., et al. (2001). Solar system objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data. *The Astronomical Journal*, 122(5):2749.
- King, S. D., Castillo-Rogez, J. C., Toplis, M., Bland, M. T., Raymond, C. A., and Russell, C. T. (2018). Ceres internal structure from geophysical constraints. *Meteoritics & Planetary Science*, 53(9):1999–2007.
- Kryszczyńska, A., Colas, F., Descamps, P., Bartczak, P., Polińska, M., Kwiatkowski, T., Lecacheux, J., Hirsch, R., Fagas, M., Kamiński, K., et al. (2009). New binary asteroid 809 Lunda-I. Photometry and modelling. *Astronomy & Astrophysics*, 501(2):769–776.
- Kuskov, O. and Kronrod, V. (2005). Internal structure of Europa and Callisto. *Icarus*, 177(2):550–569.
- Kuskov, O. L. and Kronrod, V. A. (2001). Core sizes and internal structure of Earth’s and Jupiter’s satellites. *Icarus*, 151(2):204–227.
- Landsman, Z. A., Emery, J. P., Campins, H., Hanuš, J., Lim, L. F., and Cruikshank, D. P. (2018). Asteroid (16) Psyche: Evidence for a silicate regolith from spitzer space telescope spectroscopy. *Icarus*, 304:58–73.

- Lazzarin, M., Fiorangela, L. F., Alessandra, M., Elisa, F., Andrea, F., Paolo, O., and et al. (2023). The Near-Earth Didymos-Dimorphos binary system after the NASA/DART impact: rotationally resolved spectral characterization. *Nature Communications*.
- Lazzaro, D., Michtchenko, T., Carvano, J., Binzel, R., Bus, S., Burbine, T., Mothé-Diniz, T., Florczak, M., Angeli, C., and Harris, A. W. (2000). Discovery of a basaltic asteroid in the outer main belt. *Science*, 288(5473):2033–2035.
- Leith, T. B., Moskovitz, N. A., Mayne, R. G., DeMeo, F. E., Takir, D., Burt, B. J., Binzel, R. P., and Pefkou, D. (2017). The compositional diversity of non-vesta basaltic asteroids. , 295:61–73.
- Mansour, J.-A., Popescu, M., de León, J., and Licandro, J. (2020). Distribution and spectrophotometric classification of basaltic asteroids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(4):5966–5979.
- McCord, T. B., Adams, J. B., and Johnson, T. V. (1970). Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications. *Science*, 168(3938):1445–1447.
- Medeiros, H., de León, J., Lazzaro, D., Popescu, M., Lorenzi, V., Pinilla-Alonso, N., Landsman, Z., Rizos, J., and Morate, D. (2019). Compositional characterization of V-type candidate asteroids identified using the MOVIS catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488(3):3866–3875.
- Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F. (2015). Asteroids: recent advances and new perspectives. *Asteroids IV*, 1(3):1.
- Michtchenko, T., Lazzaro, D., Ferraz-Mello, S., and Roig, F. (2002). Origin of the basaltic asteroid 1459 Magnya: A dynamical and mineralogical study of the outer main belt. *Icarus*, 158(2):343–359.
- Minarik, B. (2003). The core of planet formation. *Nature*, 422(6928):126–127.
- Mittlefehldt, D. W. (2015). Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Geochemistry*, 75(2):155–183.
- Morbidelli, A., Baillie, K., Batygin, K., Charnoz, S., Guillot, T., Rubie, D. C., and Kleine, T. (2022). Contemporary formation of early Solar System planetesimals at two distinct radial locations. *Nature Astronomy*, 6(1):72–79.
- Moskovitz, N. A., Lawrence, S., Jedicke, R., Willman, M., Haghighipour, N., Bus, S. J., and Gaidos, E. (2008). "A spectroscopically unique main-belt asteroid: 10537 (1991 RY16)
. *Astrophysical Journal, Letters*, 682(1):L57.
- Moskovitz, N. A., Willman, M., Burbine, T. H., Binzel, R. P., and Bus, S. J. (2010). A spectroscopic comparison of HED meteorites and V-type asteroids in the inner main belt. *Icarus*, 208(2):773–788.
- Nesvorný, D., Roig, F., Gladman, B., Lazzaro, D., Carruba, V., and Mothé-Diniz, T. (2008). Fugitives from the vesta family. , 193(1):85–95.
- Neumann, W., Breuer, D., and Spohn, T. (2012). Differentiation and core formation in accreting planetesimals. *Astronomy & Astrophysics*, 543:A141.
- Nimmo, F. and McKinnon, W. B. (2021). Geodynamics of Pluto. *The Pluto system after New Horizons*, pages 89–103.
- Oh, D. Y., Collins, S., Drain, T., Hart, W., Imken, T., Larson, K., Marsh, D., Muthulingam, D., Snyder, J. S., Trofimov, D., et al. (2019). Development of the Psyche mission for NASA’s discovery program.
- Penttilä, A., Shevchenko, V., Wilkman, O., and Muinonen, K. (2016). H, G1, G2 photometric phase function extended to low-accuracy data. *Planetary and Space*

- Science*, 123:117–125.
- Roig, F., Nesvorný, D., Gil-Hutton, R., and Lazzaro, D. (2008). V-type asteroids in the middle main belt. *Icarus*, 194(1):125–136.
- Rubie, D., Nimmo, F., and Melosh, H. (2007). Formation of Earth’s core. *Evolution of the Earth*, 9:51–90.
- Russell, S. S., Srinivasan, G., Huss, G., Wasserburg, G., and MacPherson, G. (1996). Evidence for widespread ^{26}Al in the solar nebula and constraints for nebula time scales. *Science*, 273(5276):757–762.
- Santana-Ros, T., Micheli, M., Faggioli, L., Cennamo, R., Devogèle, M., Alvarez-Candal, A., Oszkiewicz, D., Ramírez, O., Liu, P.-Y., Benavidez, P. G., et al. (2022). Orbital stability analysis and photometric characterization of the second Earth Trojan asteroid 2020 XL5. *Nature Communications*, 13(1):447.
- Schubert, G., Zhang, K., Kivelson, M. G., and Anderson, J. D. (1996). The magnetic field and internal structure of Ganymede. *Nature*, 384(6609):544–545.
- Scott, E. R., Greenwood, R. C., Franchi, I. A., and Sanders, I. S. (2009). Oxygen isotopic constraints on the origin and parent bodies of eucrites, diogenites, and howardites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19):5835–5853.
- Spurný, P., Bland, P. A., Shrubbený, L., Borovička, J., Ceplecha, Z., Singelton, A., Bevan, A. W., Vaughan, D., Towner, M. C., McClafferty, T. P., et al. (2012). The Bunburra Rockhole meteorite fall in SW Australia: fireball trajectory, luminosity, dynamics, orbit, and impact position from photographic and photoelectric records. *Meteoritics & Planetary Science*, 47(2):163–185.
- Srinivasan, G., Goswami, J., and Bhandari, N. (1999). ^{26}Al in eucrite Piplia Kalan: Plausible heat source and formation chronology. *Science*, 284(5418):1348–1350.
- Stoughton, C., Lupton, R. H., Bernardi, M., Blanton, M. R., Burles, S., Castander, F. J., Connolly, A., Eisenstein, D. J., Frieman, J. A., Hennessy, G., et al. (2002). Sloan digital sky survey: early data release. *The Astronomical Journal*, 123(1):485.
- Valencia, D., O’Connell, R. J., and Sasselov, D. (2006). Internal structure of massive terrestrial planets. *Icarus*, 181(2):545–554.
- Vokrouhlický, D. and Farinella, P. (2000). Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies. *Nature*, 407(6804):606–608.
- Wiechert, U., Halliday, A., Palme, H., and Rumble, D. (2004). Oxygen isotope evidence for rapid mixing of the HED meteorite parent body. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1-4):373–382.
- York, D. G., Adelman, J., Anderson Jr, J. E., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bakken, J., Barkhouser, R., Bastian, S., Berman, E., et al. (2000). The sloan digital sky survey: Technical summary. *The Astronomical Journal*, 120(3):1579.
- Zhang, C., Miao, B., and He, H. (2019). Oxygen isotopes in HED meteorites and their constraints on parent asteroids. *Planetary and Space Science*, 168:83–94.
- Zhang, Y. and Lin, J.-F. (2022). Molten iron in Earth-like exoplanet cores. *Science*, 375(6577):146–147.
- Zharkov, V. N. (1986). *Interior structure of the Earth and planets*. CRC Press.