

2. Wykaz treści

1. Inicjatywa	1000000000
2. Wykaz treści	1000000000
3. Zarys	1000000000
4. Bibliografia	1000000000

# Autoreferat

Anna Marciniak

Instytut Obserwatorium Astronomiczne  
Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza  
w Poznaniu

Poznań, 2019

1. Inicjatywa

2. Wykaz treści

3. Zarys

4. Bibliografia

1. Inicjatywa

2. Wykaz treści

3. Zarys

4. Bibliografia

1. Inicjatywa

2. Wykaz treści

3. Zarys

4. Bibliografia

# 1 Imię i nazwisko

Anna Marciniak

## 2 Wykształcenie

17.04.2009	Stopień doktora, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu; wyróżniona praca doktorska: „Modelowanie parametrów fizycznych planetoid metodą inwersji krzywych zmian jasności”, promotor: Prof. dr hab. Tadeusz Michałowski
03.06.2003	Tytuł magistra, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu; praca magisterska: „Wyznaczanie okresu gwiazdowego i kierunku rotacji planetoid metodą epok”, promotor: Prof. dr hab. Tadeusz Michałowski
12.1999	Certyfikat potwierdzający znajomość języka angielskiego w stopniu zaawansowanym: <i>Certificate in Advanced English</i> nadany przez University of Cambridge, Local Examination Syndicate

## 3 Zatrudnienie

10.2009 – nadal	Adiunkt w Instytucie Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
05.2008 – 06.2009	Tłumacz filmów popularnonaukowych w: „Iglo Studio” i „Rino Media Force, Studio nagrań lektorskich On-Line”

## 4 Habilitacyjne osiągnięcie naukowe

### 4.1 Tytuł

Niwelowanie wpływu efektów selekcji obserwacyjnej  
na znane własności fizyczne planetoid

### 4.2 Publikacje

- H1 **Marciniak A.**, Bartczak P., Santana-Ros T., Michałowski T., Antonini P., Behrend R., Bembrick C., Bernasconi L., Borczyk W., Colas F., Coloma J., Crippa R., Esseiva N., Fagas M., Fauvaud M., Fauvaud S., Ferreira D. D. M., Hein Bertelsen R. P., Higgins D., Hirsch R., Kajava J. J. E., Kamiński K., Kryszczyńska A., Kwiatkowski T., Manzini F., Michałowski, J., Michałowski M. J., Paschke A., Polińska M., Poncy R., Roy R., Santacana G., Sobkowiak K., Stasik M., Starczewski S., Velichko F., Wucher H., Zafar T. **2012**  
„Photometry and models of selected main belt asteroids XI. Introducing ISAM - Interactive Service for Asteroid Models”  
*Astronomy & Astrophysics* 545, A131, 31 stron  
Liczba cytowań: 13, IF(2012)=5.084

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wybraniu obiektów i zaplanowaniu dodatkowych obserwacji, wykonaniu i redukcji dużej części nowych danych (~60% danych z lat 2004-2011), stworzeniu modeli wszystkich obiektów i napisaniu całego tekstu publikacji. Brałam też udział merytoryczny w stworzeniu serwisu ISAM. Mój udział procentowy w publikacji szacuję na 80%.*

- H2 **Marciniak A.**, Pilcher F., Oszkiewicz D., Santana-Ros T., Urakawa S., Fauvaud S., Kankiewicz P., Tychoniec Ł., Fauvaud M., Hirsch R., Horbowicz J., Kamiński K., Konstanciak I., Kosturkiewicz E., Murawiecka M., Nadolny J., Nishiyama K., Okumura S., Polińska M., Richard F., Sakamoto T., Sobkowiak K., Stachowski G., Trela P. **2015**

„Against the biases in spins and shapes of asteroids”

Planetary and Space Science, 118, 256-266

Liczba cytowań: 9, IF(2015)=1.942

*Mój wkład polegał na zorganizowaniu kampanii obserwacyjnej pomijanych dotąd planetoid, zaangażowaniu do niej obserwatorów z 8 stacji z 5 krajów, wykonaniu i zredukowaniu części obserwacji oraz na analizie okresów rotacji dla wszystkich obiektów i napisaniu całego tekstu pracy. Mój udział procentowy szacuję na 80%.*

- H3 **Marciniak A.**, Bartczak P., Müller T., Sanabria J. J., Alí-Lagoa V., Antonini P., Behrend R., Bernasconi L., Bronikowska M., Butkiewicz-Bąk M., Cikota A., Crippa R., Ditteon R., Dudziński G., Duffard R., Dziadura K., Fauvaud S., Geier S., Hirsch R., Horbowicz J., Hren M., Jerosimic L., Kamiński K., Kankiewicz P., Konstanciak I., Korlevic P., Kosturkiewicz E., Kudak V., Manzini F., Morales N., Murawiecka M., Ogłozza W., Oszkiewicz D., Pilcher F., Polakis T., Poncy R., Santana-Ros T., Siwak M., Skiff B., Sobkowiak K., Stoss R., Żejmo M., Żukowski K. **2018**

„Photometric survey, modelling, and scaling of long-period and low-amplitude asteroids”

Astronomy & Astrophysics, 610, A7, 33 strony

Liczba cytowań: 4, IF(2017)=5.565 *Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na byciu pomysłodawcą jednoczesnego modelowania planetoid dwoma różnymi metodami w celu ich weryfikacji oraz skalowania powstałych modeli w analizie termofizycznej i, niezależnie, za pomocą zakryć gwiazdowych, na zaplanowaniu i koordynowaniu dużej kampanii obserwacyjnej, wykonaniu i zredukowaniu części obserwacji, stworzeniu modeli z inwersji wypukłej wszystkich obiektów, interpretacji wyników oraz napisaniu 90% tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.*

- H4 **Marciniak A.**, Alí-Lagoa V., Müller T. G., Szakáts R., Molnár L., Pál A., Podlewska - Gaca E., Parley N., Antonini P., Barbotin E., Behrend R., Bernasconi L., Butkiewicz - Bąk M., Crippa R., Duffard R., Ditteon R., Feuerbach M., Fauvaud S., Garlitz J., Geier S., Goncalves R., Grice J., Grześkowiak I., Hirsch R., Horbowicz J., Kamiński K., Kamińska M. K., Kim D.-H., Kim M.-J., Konstanciak I., Kudak V., Kulczak P., Maestre J. L., Manzini F., Marks S., Monteiro F., Ogłozza W., Oszkiewicz D., Pilcher F., Perig V., Polakis T., Polińska M., Roy R., Sanabria J. J., Santana-Ros T., Skiff B., Skrzypek J., Sobkowiak K., Sonbas E., Thizy O., Trela P., Urakawa

S., Żejmo M., Żukowski K.

„Thermal properties of slowly rotating asteroids. Results from targeted survey” *Astronomy & Astrophysics*, przyjęta do druku

DOI: 10.1051/0004-6361/201935129

Liczba cytowań: 0, IF(2017)=5.565

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i koordynowaniu kampanii obserwacyjnej prowadzonej w 20 stacjach w 12 krajach oraz z obserwatorium Keplera, wykonaniu i zredukowaniu części obserwacji, stworzeniu modeli wszystkich prezentowanych tu obiektów, interpretacji wyników oraz napisaniu 75% tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.*

## 4.3 Opis celów w naukowych i osiągniętych wyników

### 4.3.1 Wstęp

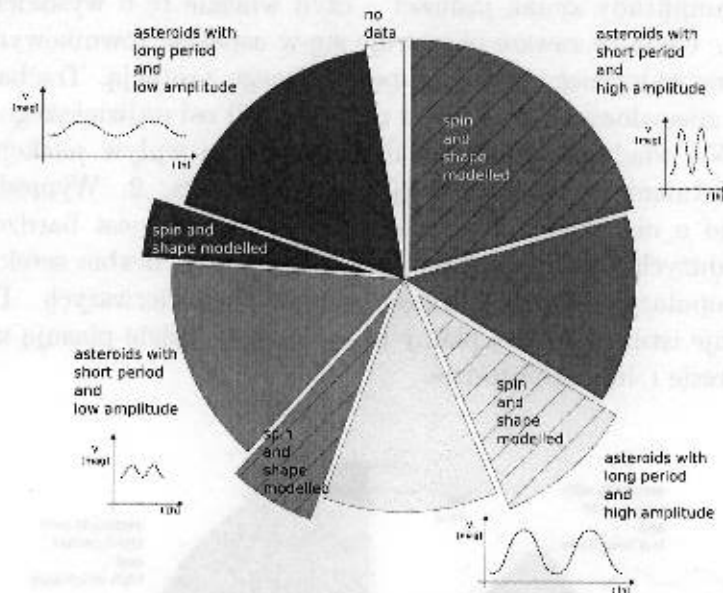
Badania właściwości fizycznych planetoid takich jak: częstość rotacji, położenie osi obrotu w przestrzeni, trójwymiarowy kształt, rozmiary, albedo, czy bezwładność cieplna materii na powierzchni mają kluczowe znaczenie w kontekście badań powstawania i ewolucji Układu Słonecznego, a planet typu ziemskiego i satelitów w szczególności. Najstarsze planetoidy uważane są za oryginalne planetezymale pozostałe z różnych etapów akrecji w dysku protoplanetarnym. Nabiera to szczególnego znaczenia w kontekście odkrywania pasów planetoid w pozasłonecznych układach planetarnych, w których planety najwyraźniej powstają podobnie jak miało to miejsce w naszym Układzie Słonecznym (Moerchen i in. 2007; Lawler i in. 2009).

Po etapie tworzenia się planet, na skutek migracji dużych planet (tzw. Grand Tack, Walsh i in. 2011) nastąpiła epoka wielkiego bombardowania i duże przetasowania w obszarze Głównego Pasa planetoid oraz innych rezerwuarów małych ciał. Wówczas większe ciała były rozbijane na całe grupy mniejszych, o podobnych własnościach dynamicznych i fizycznych – tzw. rodziny planetoid. Ich dalszym losem rządzi grawitacja, ale nie tylko – efekty termiczne związane z nagrzewaniem i niesymetrycznym wypromieniowywaniem energii cieplnej są w stanie efektywnie przesunąć mniejsze ciała (do 30-40 km średnicy, Vokrouhlický i in. 2015) w stronę stref silnych rezonansów, skąd mogą wędrować w okolice Ziemi, stając się obiektami typu NEA (Near Earth Asteroids). Efekty te potrafią też wpływać na rotację małych ciał, rozkręcając je lub spowalniając oraz zmieniając nachylenie ich osi obrotu (Vokrouhlický i in. 2003). Pierwszy z efektów, wpływający na orbity małych ciał nosi nazwę efektu Jarkowskiego, a drugi efektu YORP (jest to akronim od nazwisk jego badaczy: Yarkovsky, O’Keefe, Radzievskii, Paddack). Oba efekty silnie zależą od sposobu rotacji i własności fizycznych powierzchni, m. in. bezwładności cieplnej.

W swojej pracy badawczej zajmuję się wyznaczaniem okresów rotacji planetoid Głównego Pasa, położenia ich osi oraz odtwarzaniem ich trójwymiarowych kształtów, opierając się na wieloletnich danych fotometrycznych i metodzie inwersji krzywych zmian blasku. Dalej, bezwymiarowe modele kształtu planetoid z inwersji krzywych zmian blasku skaluję za pomocą danych uzyskanych w podczerwieni oraz zakryć gwiazdowych. Skupiam się w szczególności na obiektach pomijanych przez dotychczasowe przeglądy, ze względu na istniejące na tym polu ogromne efekty selekcji obserwacyjnej. Uzyskane modele planetoid służą następ-



nie m.in. do zbiorczych badań statystyk rozkładu osi rotacji w przestrzeni oraz częstości rotacji w zależności np. od rozmiarów, które z kolei stanowią niezbędną bazę do dynamicznych studiów nad zderzeniową historią planetoid (Durda i in. 2007) oraz badań wieku powstania i ewolucji rodzin planetoid pod wpływem dryfu Jarkowskiego (Vokrouhlický i in. 2006).

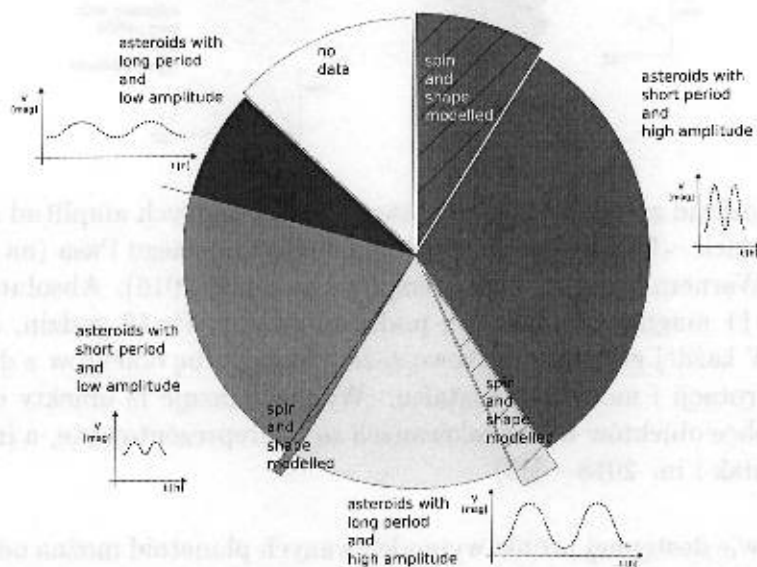


Rysunek 1: Rozkład znanych okresów rotacji i maksymalnych amplitud zmian blasku dla wszystkich  $\sim 1200$  najjaśniejszych planetoid Głównego Pasa (na podstawie bazy LCDB, Warnera i innych 2009, wersja z 5 września 2016). Absolutna jasność graniczna  $H=11$  magnitudo, wartości podziału zbioru:  $P=12$  godzin,  $a_{max}=0.25$  magnitudo. W każdej grupie dodatkowo zaznaczono liczbę obiektów z dostępnymi parametrami rotacji i modelami kształtu. Wykres ukazuje iż obiekty o pewnych cechach w próbie obiektów wymodelowanych są nadreprezentowane, a inne są unikane. (Marciniak i in. 2018 – H3)

Na podstawie dostępnej próbki wymodelowanych planetoid można odnieść wrażenie, że planetoidy w olbrzymiej większości rotują szybko, są mocno wydłużone i ich osie unikają okolic ekliptyki. Tymczasem, gdy zbadalam statystycznie próbkę 1200 najjaśniejszych planetoid, gdzie przegląd okresów rotacji i amplitud krzywych zmian blasku jest obecnie niemal kompletny, okazało się, że prawie połowa tych ciał rotuje z okresami dłuższymi niż 12 godzin (Rys. 1). Jest to znacznie wolniej, niż się powszechnie uważa: w roku 2002, gdy wydano zbiór artykułów przeglądowych „Asteroids III”, średni okres rotacji dużych (średnica  $\sim 200$  km) planetoid Pasa Głównego wynosił 8 godzin, średnich ( $D \sim 100$  km) 13, a małych ( $D \sim 10$  km) 6 godzin (Pravec i in. 2002), jednak z badań tych wykluczono obiekty wolno rotujące o okresach powyżej 24 godzin.

Dodatkowo, podobnie duża część zbadanej populacji planetoid wykazuje niewielkie zmiany blasku, nieprzekraczające 0.25 magnitudo, przez co umykają one masowym badaniom mającym na celu modelowanie planetoid. Zmiany blasku takich obiektów giną w szumie obserwacyjnym większości dostępnych dziś przeglądów fotometrycznych, których średnia precyzja to około 0.1–0.2 magnitudo (Hanus

i in. 2011). Stąd brak niemal połowy populacji w próbie planetoid o dostępnych modelach bieguna (czyli współrzędnych osi rotacji) i kształtu. Co więcej, panuje powszechne przekonanie iż osie rotacji planetoid zdecydowanie unikają okolic ekliptyki, ustawiając się do niej prostopadle, co można dobrze wyjaśnić jako wynik działania efektu YORP (Vokrouhlický i in. 2003). Jednak jest pewne, że na rozkład ten mocno wpływają efekty selekcji faworyzujące planetoidy, które zawsze wykazują duże amplitudy zmian jasności – czyli właśnie te o wysokich nachyleniach osi rotacji. Ciała te zawsze obserwuje się w aspekcie równikowym, co daje największe zmiany widocznego przekroju poprzecznego z rotacją. Trzeba tu dodać, że planetoidy w zdecydowanej większości rotują wokół osi największego momentu bezwładności. Nie wiadomo jednak na ile silny jest tu wpływ selekcji obserwacyjnej, ale jego istnienie wyraźnie ukazuje wykres na Rys. 2. Wymodelowanych małych planetoid o niewielkich amplitudach zmian blasku jest bardzo niewiele, natomiast te o dużych amplitudach są wymodelowane w liczbie setek, mimo że liczebność ich populacji jest tego samego rzędu co tych pierwszych. Dodatkowo sprawę komplikuje istnienie białej plamy na wykresie 2, gdzie plasują się obiekty, o nieznanym okresie i/lub amplitudzie.

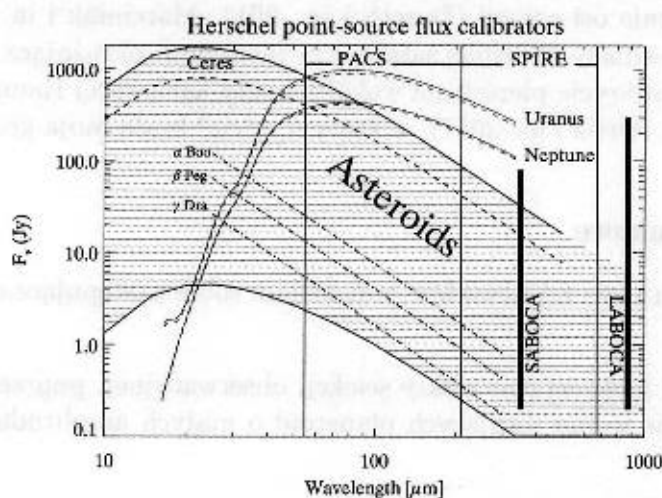


Rysunek 2: Wykres jak na Rys. 1, ale dla planetoid o mniejszych jasnościach – wszystkich  $\sim 2270$  obiektów o jasnościach absolutnych  $H$  z przedziału od 11 do 13 magnitudo (źródło: LCDB). Z grupy obiektów o dużych amplitudach (prawa część wykresu) wymodelowanych jest aż kilkaset, natomiast z tych o małych amplitudach (lewa część wykresu) zaledwie kilka. Na podstawie próbki małych planetoid z dostępnym modelem, a bez świadomości prawdziwego rozkładu cech w populacji, można odnieść mylne wrażenie, m.in. że niemal wszystkie małe planetoidy są ciałami silnie wydłużonymi. (Marciniak i in. 2018 – H3)

Wspomniane efekty selekcji niełatwo jest zniwelować, gdyż tak trudne obiekty wymagają wieloletnich obserwacji kompletnych krzywych zmian blasku, czyli przeprowadzenia setek godzin obserwacji i/lub zebrania bardzo precyzyjnych danych. W przeciwieństwie do nich, obiekty faworyzowane stusunkowo łatwo jest modelować na bazie już dostępnych tzw. rzadkich przeglądów fotometrycznych (takich

jak baza Lowell Observatory, Hanuš i in. 2011, Ďurech i in. 2016), gdzie dane na temat jasności planetoid są w postaci kilkuset punktów na przestrzeni kilku lat, czyli pojedynczych punktów na dobę lub rzadziej. Pewnym kompromisem jest tu modelowanie na mieszanych zbiorach danych (użycie rzadkich punktów wraz z gęstymi krzywymi zmian blasku z co najmniej jednej opozycji, Hanuš i in. 2013, 2016). Takie podejście jednak również jest ograniczone przez dostępność gęstych krzywych, które faworyzują obiekty o dużych amplitudach oraz krótkich okresach.

Odtwarzane kształty i stany rotacji planetoid służą do dalszych badań, m.in. są niezbędną bazą do modelowania termofizycznego. Niedawno rozszerzyłam swoje zainteresowania badawcze o studia nad planetoidami w podczerwonym zakresie widma elektromagnetycznego. Okazuje się, że dysponując dokładnym modelem rotacji i kształtu planetoidy oraz różnorodnymi obserwacjami w podczerwieni można dokładnie określić jej rozmiar, albedo oraz bezwładność cieplną. Co więcej, można przewidzieć jej strumień cieplny daleko w przyszłość, tworząc idealne źródła kalibracyjne dla wszystkich obserwatoriów podczerwonych, zarówno naziemnych (np. APEX, ALMA, IRAM), jak i kosmicznych (Herschel, WISE, czy Spitzer). Dostarczają one danych o obiektach daleko wykraczających poza nasz Układ Słoneczny: od całkiem bliskich, jak brązowe karły czy dyski protoplanetarne, aż po najdalsze obiekty we Wszechświecie, np. bardzo młode galaktyki. Okazuje się że planety są do skalibrowania tych instrumentów zbyt jasne, a z kolei najjaśniejsze gwiazdy są zbyt słabe (Müller, Lagerros, 2002), co ukazuje Rysunek 3. W szczególności, wyjątkowo przydatne są tu jasne planetoidy o powolnych i niewielkich zmianach blasku. Jest to przykład praktycznego zastosowania modeli planetoid.



Rysunek 3: Rozkłady energii względem długości fali dla najjaśniejszych gwiazdowych źródeł kalibracji w środkowej podczerwieni oraz dla Urana i Neptuna (używanych do kalibracji na falach milimetrowych i submilimetrowych) oraz dla dużych planetoid (zakresowany obszar). Pokazano zakresy działania różnych instrumentów obserwatorium Herschela i APEX. Planetoidy wypełniają lukę pomiędzy gwiazdowymi a planetarnymi kalibratorami oraz pomiędzy środkową podczerwienią i falami milimetroowymi a także między obserwatoriami kosmicznymi i naziemnymi obserwującymi w tych zakresach widma (Müller i Lagerros, 2002).

Jeśli chodzi o aspekt naukowy, to np. pojawiły się doniesienia, że bezwładność

cieplna rośnie wraz z okresem rotacji, gdyż przez dłuższe nagrzewanie danych obszarów fala cieplna penetruje głębiej (Harris i Drube, 2016), próbując obszary o większej gęstości. Wydaje się więc, że można by więc w ten sposób wyznaczać cechy materiałowe (przewodnictwo cieplne, gęstość i pojemność cieplną) różnych warstw regolitu pokrywającego planetoidy i to bez wysyłania do nich kosztownych sond. Dotąd brakowało jednak modeli wolno rotujących obiektów, by móc zastosować na nich precyzyjne modelowanie termofizyczne (p. czerwone symbole na Rys. 6).

Inny ważny aspekt badań cech fizycznych planetoid to wyznaczanie ich rozmiarów. Znane dziś rozmiary planetoid to często jedynie oszacowania na podstawie porównania ich strumieni w świetle widzialnym i podczerwieni, pod nieobecność modelu; a więc przy nieznanym położeniu ich osi obrotu i kształtu; lub też w samym świetle widzialnym przy założonym albedo, gdzie niepewność wyznaczonej w ten sposób średnicy sięga czynnika 2. Dokładnym sposobem określania rozmiarów tych ciał, poza wspomnianym powyżej modelowaniem termofizycznym są obserwacje zakryć gwiazd przez te ciała (przykład na Rysunku 4). Ta dość prosta technika – wystarczy jedynie zarejestrować momenty zniknięcia i pojawienia się gwiazdy przesłanianej przez małe ciało – jest potężnym narzędziem, zwłaszcza gdy uda się zebrać dane z wielu różnych miejsc z powierzchni Ziemi, na którą padł cień zakrywającego obiektu. Wprawdzie uzyskuje się wówczas jedynie chwilowy, dwuwymiarowy przekrój tego ciała, jednak gdy dostępny jest pełny model z inwersji krzywych blasku, możliwe jest jego sfazowanie i przeskalowanie do śladów z zakrycia, co pozwala na precyzyjne wyznaczenie jego rozmiarów, a często nawet na potwierdzenie niektórych cech wymodelowanych kształtów (p. Rys. 19 w H3). Dodatkowo tego typu porównania często pozwalają odrzucić jedno z dwóch lustrzanych rozwiązań na położenie osi rotacji (Durech i in. 2011, Marciniak i in. 2018 – H3), a nawet odkryć nieznane wcześniej satelity czy pierścienie okrążające te ciała, czego przykładem jest odkrycie pierścienia wokół planety karłowatej Haumea, opublikowanego w *Nature* (Ortiz i in. 2017), w którym udział brała moja grupa badawcza.

#### 4.3.2 Cele naukowe

Ze wspomnianych powyżej powodów postawiłam sobie następujące cele badawcze:

1. Zniwelować niekorzystne efekty selekcji obserwacyjnej, poprzez obserwacje i modelowanie wolno rotujących planetoid o małych amplitudach zmian blasku.
2. Zwiększyć świadomość tych efektów w środowisku badaczy planetoid i skierować uwagę obserwatorów na pomijane dotąd obiekty.
3. Wyznaczyć rozmiary badanych planetoid w oparciu o modelowanie termofizyczne i/lub zakrycia gwiazdowe.
4. Stworzyć godne zaufania źródła kalibracyjne na falach podczerwonych.
5. Zweryfikować, czy bezwładność cieplna planetoid rzeczywiście jest tym większa, im wolniej one rotują.



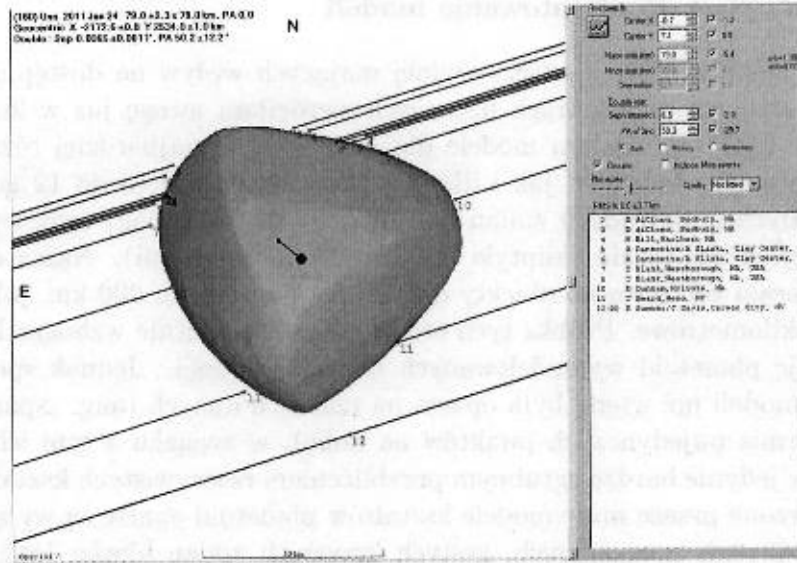
### 4.3.3 Pierwsza próbka modeli planetoid nieobciążona efektami selekcji i narzędzie do orientowania modeli

Na problem efektów selekcji obserwacyjnej mających wpływ na dostępną próbkę planetoid o znanych parametrach fizycznych zwróciłam uwagę już w 2012 roku. W pracy H1 zaprezentowałam modele dla możliwie jak najbardziej różnorodnej próbki planetoid: o krótkich, jak i długich okresach obrotu (3 do 12 godzin), o dużych i małych amplitudach zmian blasku (0.07 do 0.60 mag) oraz wysokich i niskich nachyleniach osi do ekliptyki ( $|\beta_p|$  od 88 do 10 stopni). Nasza ówczesna próbka zawierała też zarówno obiekty duże, o średnicy rzędu 200 km, jak i małe, zaledwie 13-kilometrowe. Próbka tych ośmiu obiektów istotnie wzbogaciła ówczesną populację planetoid wymodelowanych metodą inwersji. Jednak spora część dostępnych modeli już wtedy była oparta na rzadkich danych (ang. „sparse data” – dane w formie pojedynczych punktów na dobę), w związku z tym ich modele kształtu były jedynie bardzo zgrubnym przybliżeniem rzeczywistych kształtów planetoid. Tworzone przeze mnie modele kształtów planetoid oparte są wyłącznie na bogatych zestawach precyzyjnych, gęstych krzywych zmian blasku (ang. „dense lightcurves”). Stąd modele te zwykle są bardziej szczegółowe i lepiej oddają rzeczywiste kształty planetoid. W przeciwieństwie do nich, modele oparte w całości bądź w części na rzadkich danych mają kanciasty wygląd, niewielką rozdzielczość i czasem powodują problemy w dalszych zastosowaniach, jak np. modelowanie termofizyczne. Co więcej, niepewność wyznaczonej pozycji osi rotacji w modelach na gęstych krzywych jest rzędu pojedynczych stopni, natomiast na danych rzadkich często sięga 20-30 stopni (Hanusz i in. 2016). Podsumowując, moje badania skupiają się raczej na jakości modeli niż na ich ilości.

W omawianej tu pracy H1 po raz pierwszy wyskalowaliśmy skonstruowane przeze mnie modele za pomocą obserwacji zakryć gwiazd przez planetoidy. Bazując na procedurze przedstawionej przez Durecha i in. (2011) stworzyliśmy własne narzędzie dopasowujące trójwymiarowe modele planetoid do dwuwymiarowych zestawów śladów (ang. chords) z zakryć gwiazd przez planetoidy. W międzyczasie powstała też konieczność orientowania modeli planetoid na dany moment na płaszczyźnie nieba. Od strony technicznej problemem tym zajął się dr Przemysław Bartczak, z merytorycznym wsparciem z mojej strony. Gdy udało nam się stworzyć narzędzie do orientacji modeli planetoid, powstał pomysł by udostępnić je szerokiej społeczności. W związku z tym zaimportowaliśmy wszystkie, dostępne wtedy modele (m. in. z bazy DAMIT (Durech i in. 2010) do naszej nowoutworzonej bazy „ISAM” (ang. Interactive Service for Asteroid Models)<sup>1</sup>. Pierwszym testem i przykładem na udane wykorzystanie bazy okazało się poprawne zorientowanie modelu planetki 160 Una (stworzonego w pracy Marciniak i in. 2009) i dobre dopasowanie jej do zakrycia gwiazdy podwójnej obserwowanego przez George’a i innych (2011), Rys. 4.

Rozmiary badanych planetoid wyznaczone dzięki dopasowaniu do zakryć dobrze zgadzają się z wcześniejszymi wyznaczeniami za pomocą danych z teleskopów obserwujących w podczerwieni (IRAS, AKARI czy WISE). Stworzona przez nas baza ISAM działa do dziś i jest szeroko wykorzystywana m.in. przez obserwatorów zakryć oraz innych badaczy planetoid. Jest też dobrym narzędziem do popularyzacji badań planetoid i astronomii w ogóle, pozwalając np. na wyświetlanie

<sup>1</sup>isam.astro.amu.edu.pl



Rysunek 4: Ślady z zakrycia gwiazdy HIP 46249 przez planetoidę 160 Una, z nałożonym jej modelem z pracy Marciniak i in. 2009. Zjawisko to niezależnie potwierdziło parametry rotacji i kształtu modelu z inwersji krzywych zmian blasku (George i in. 2011).

trójwymiarowych obrazów modeli czy proste generowanie animacji z obracającą się planetoidą i tworzoną przez nią krzywą zmian blasku. Pozwala to prześledzić, jak różne cechy powierzchni tworzą konkretne cechy krzywych blasku.

#### 4.3.4 Pionierska kampania przeciwdziałająca efektom selekcji obserwacyjnej w badaniach planetoid

Olbrzymia większość badań parametrów fizycznych planetoid prowadzonych przed rokiem 2010 skupiona była głównie na obiektach o krótkich lub bardzo krótkich okresach rotacji oraz tych o względnie dużych amplitudach (np. Magnusson 1990, Michałowski 1996, Kaasalainen i in. 2002), m.in. ze względu na stosunkowo niską jakość dostępnych wówczas danych z fotometrów oraz wczesnych kamer CCD. Wyjątkiem były tu np. planetoidy podwójne, w tym planetka (90) Antiope, które ze swej natury mają okresy wzajemnego obiegu składników rzędu co najmniej kilkunastu godzin (Michałowski i in. 2004) oraz planetoidy precesujące np. Toutatis (Hudson i Ostro, 1998) Planetoidy pojedyncze o okresach dłuższych niż 10-12 godzin i amplitudach nieprzekraczających  $\sim 0.2$  magnitudo uważane były wówczas za nieliczne trudne przypadki, którymi nie warto się zajmować. Pogląd ten był wtedy szeroko rozpowszechniony, m.in. dzięki sztandarowej pracy Pravec'a i in. (2002), gdzie wykazano, że średni okres obrotu planetoid o znanych okresach wynosi około 8 godzin. Kluczowe tu jest jednak słowo „znanych”. W badaniach rotacji planetoid powszechnie używana jest baza „LCDB”<sup>2</sup> stworzona i aktualizowana przez Warnera i in. (2009). Zbiera ona wszystkie dane literaturowe na temat parametrów fizycznych planetoid. Otóż wówczas, w bazie LCDB, okresy rotacji

<sup>2</sup>The Asteroid Lightcurve Database, <http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>

były wyznaczone jedynie dla niecałego tysiąca planetoid i dla praktycznie żadnej z grup planetoid wiedza o okresach rotacji nie była kompletna. Kilkanaście lat później planetoid o znanych okresach jest już we wspomnianej bazie ponad 20 tysięcy (LCDB, wersja z 31 stycznia 2019). Można też uznać, że dla prawie wszystkich planetoid Pasa Głównego jaśniejszych niż  $H=11$  magnitudo (co przekłada się na rozmiary powyżej 30 km) okresy ich rotacji są znane (patrz Rys. 1).

Analizując tę dobrze zbadaną grupę odkryłam, iż średni okres rotacji wcale nie wynosi 8 godzin, a jest znacznie dłuższy i sięga teraz aż 20 godzin. Mediana okresów rotacji w tej grupie to prawie 11 godzin (H2). Podobnie jest z maksymalnymi amplitudami obserwowanymi dla tych obiektów: jak zauważyli Warner i Harris (2011) dla 40% planetoid o okresach uznanych za wiarygodne w bazie LCDB, nie przekracza ona 0.2 magnitudo. Pośrednio wpływa to na poprawność wyznaczonych okresów i dalsze perspektywy ich wyznaczenia w obliczu pojawiających się dużych przeglądów nieba, dostarczających danych o rzadkim charakterze (rzędu 1-3 punktów na dobę). Mediana maksymalnych amplitud dla wspomnianej próbki to 0.27 magnitudo (Marciniak i in. 2015 – H2).

Podsumowując więc, niemal połowa dobrze zbadanej populacji ma okresy uznawane za długie (dłuższe niż 12 godzin), w zasadzie niemożliwe do pełnego pokrycia w ciągu jednej nocy obserwacyjnej, a równie liczna grupa ma małe lub bardzo małe amplitudy (nieprzekraczające 0.25 mag), co wymaga dokładności obserwacji fotometrycznych na poziomie setnych i tysięcznych części magnitudo. Po dokonaniu powyższych odkryć postanowiłam rozpocząć kampanię obserwacyjną dla obiektów, u których obie te cechy się nakładają, tj. jasnych planetoid Głównego Pasa o wolnej rotacji i małych amplitudach, by możliwe efektywnie zniwelować oba efekty selekcji. Program ten uzyskał wsparcie Narodowego Centrum Nauki w ramach kierowanego przeze mnie projektu badawczego SONATA pt. „Efekty selekcji obserwacyjnej w fizyce planetoid”. Celem było zebranie danych fotometrycznych w pełni pokrywających okres rotacji dla każdej z kilkudziesięciu wybranych planetoid w każdej opozycji, aż dane te (uzupełnione o dane z literatury), umożliwią stworzenie jednoznacznych modeli kształtu i rotacji dla co najmniej kilku tych ciał za pomocą metody inwersji krzywych zmian blasku.

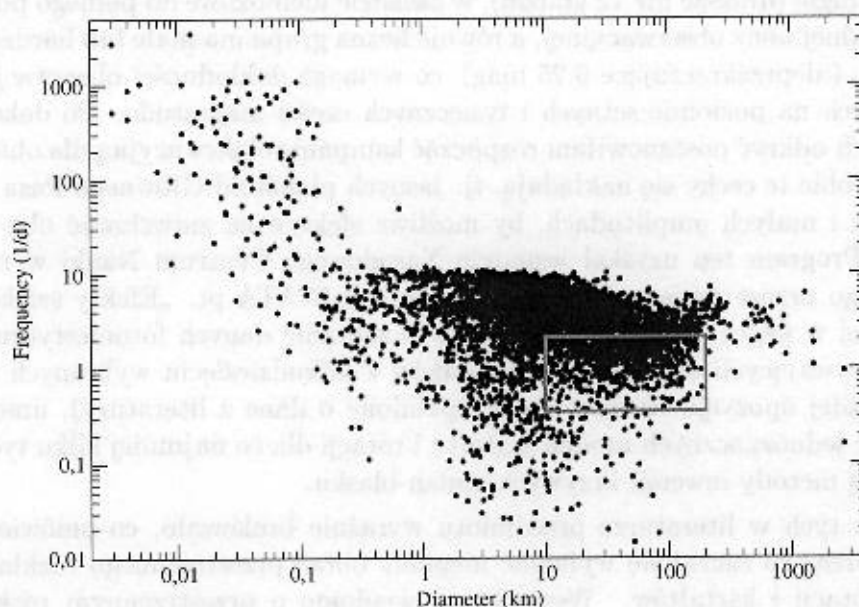
Modeli tych w literaturze przedmiotu wyraźnie brakowało, co omówiono we wstępie, przez co zaczął się wylaniać niepełny obraz przestrzennego rozkładu osi obrotu, rotacji i kształtów. Wszystko co wiadomo o przestrzennym rozkładzie osi rotacji i kształtach małych planetoid (poniżej 30 km średnicy) oparte jest na zbadaniu jedynie ich podgupy o specyficznych cechach, które umożliwiły wyznaczenie tych cech. Można powiedzieć, że jest to rodzaj samospełniającej się przepowiedni. Bynajmniej jednak nie jest to próbka reprezentatywna dla całej populacji, co ukazuje Rys. 2 gdzie zaprezentowano planetoidy z zakresu  $H=11-13$  mag, co przekłada się na rozmiary  $D \simeq 37-5$  km. Brak świadomości istnienia tych i innych efektów selekcji ma daleko sięgające konsekwencje, wpływając na obowiązujące teorie dynamiki i ewolucji małych ciał Układu Słonecznego.

Podsumowując, praca H2 zawiera uzasadnienie i wyniki pierwszej tego typu kampanii, która koncentruje się na niepopularnych, trudnych obiektach, idąc niejako pod prąd dotychczasowych masowych przeglądów. W przeciwieństwie do większości obserwacji tego typu dostępnych w literaturze, w kampanii tej prowadzimy regularne monitorowanie badanych obiektów w każdej opozycji (a nie tylko w jednej), aby wyznaczyć nie tylko okres, ale też współrzędne osi rotacji i kształt,



nawet przy niekorzystnych warunkach, gdy nasze obiekty są na niskich deklinacjach lub w okolicach Drogi Mlecznej.

W mojej kampanii brało wówczas 8 stacji obserwacyjnych z różnych krajów, skupiając kilkunastu badaczy wokół idei niwelowania efektów selekcji w badaniach planetoid, co przyniosło bardzo dobre wyniki. Przez pierwsze dwa lata jej trwania zebrano blisko 1700 godzin danych o precyzji rzędu setnych i tysięcznych magnitudo. Jej pierwszym, niespodziewanym efektem było odkrycie że co najmniej 1/4 badanej populacji miała wcześniej błędnie wyznaczone okresy rotacji, często o czynnik 3/2 lub nawet 2. Obok omówionych wyżej efektów selekcji trafiłam więc na dodatkowy efekt zniekształcający rozkład znanych okresów rotacji np. względem rozmiarów. Odsetek ten z pewnością jest jeszcze większy wśród słabszych obiektów, co musi mocno zniekształcać dolną część sztandarowego wykresu rozmiar-częstość rotacji (Rys. 5). To z kolei ma wpływ na symulacje zderzeń i efektów termicznych i oparte na nich teorie dynamiki i procesów fizycznych, jakim podlegają małe ciała Układu Słonecznego.



Rysunek 5: Diagram częstości rotacji planetoid względem ich rozmiarów (za: Warner i in. 2009). Czerwona ramka obejmuje obiekty badane w projekcie Marciniak i in. (2015) – H2.

#### 4.3.5 Synergiczne badania planetoid na falach widzialnych i podczerwonych, weryfikacja technik modelowania

W 2017 roku, po 4 latach intensywnej kampanii, zebrany przez mnie materiał obserwacyjny był już na tyle bogaty, że umożliwił skonstruowanie pełnych modeli rotacji i kształtu pierwszych pięciu planetoid z badanej próbki (do uzyskania jednoznacznego modelu planetoidy potrzeba pełnych krzywych blasku z co najmniej pięciu różnych opozycji).



W pracy H3, jako jednej z nielicznych w literaturze, zaprezentowałam efekty modelowania planetoid dwoma różnymi technikami inwersji krzywych zmian blasku: klasyczną już metodą inwersji wypukłej (Kaasalainen i Torppa 2001, Kaasalainen i in. 2001) oraz stworzoną niedawno w naszym instytucie metodą SAGE („Shaping Asteroids with Genetic Evolution”, Bartczak i Dudziński, 2018). Tę drugą metodę przetestowano uprzednio jedynie na dwóch rzeczywistych obiektach, więc dodatkowych pięć przypadków pomogło ją uwiarygodnić i ugruntować. Używając tej pierwszej metody stworzyłam wersje wypukłe modeli kształtów badanych tu obiektów. Wyniki są dość ciekawe: uzyskane parametry rotacji są zgodne w granicach niepewności, natomiast niektóre kształty czasem dość mocno się od siebie różnią (p. model 227 Philosophii oraz 329 Svei na Rysunkach 5 i 6 oraz 7 i 8 w H3). Inne otrzymane tu kształty potwierdzają znany fakt, iż duże płaskie elementy powierzchni modeli wypukłych najczęściej reprezentują większe wgłębienia na powierzchniach planetoid. Poza tymi miejscami modele z obu technik są ze sobą w większości zgodne (por. Rys. 3 i 4, 9 i 10 oraz 11 i 12 z H3).

W pracy tej nie poprzestałam jednak na stworzeniu samych bezwymiarowych modeli planetoid. Uzyskane modele dopasowano do dostępnych wielośladowych zakryć gwiazdowych z bazy NASA Planetary Data System (Dunham i in. 2016), w efekcie wyznaczając rozmiary dwóch badanych ciał. Dzięki temu udało się również wyraźnie wskazać preferowane rozwiązanie z dwóch możliwych rozwiązań na biegun i kształt planetki 329 Svea. Tego typu dwa lustrzane rozwiązania na współrzędne bieguna są nieodłączną cechą modeli z inwersji krzywych blasku (por. Rysunki 19 i 20 w H3). Co więcej, zakrycia ewidentnie potwierdziły niektóre wklęsłości kształtów modeli z metody SAGE: ślady z timingu zakryć układają się na Ziemi w kształt zakrywającego gwiazdę ciała i nasze modele okazały się pasować to tego kształtu (p. Rys. 19 w H3). Warto tu nadmienić, że te modele kształtu stworzyliśmy używając wyłącznie obserwacji planetoid jako źródeł punktowych (ang. „disk-integrated photometry”). Jest to szczególnie istotny wynik w świetle prac argumentujących iż jednoznaczne wymodelowanie wklęsłości techniką inwersji krzywych jest niemożliwe, gdyż krzywe zmian blasku planetoid Pasa Głównego miałyby nie zawierać informacji o tego typu cechach powierzchni (Ādurech i Kaasalainen 2003, Viikinkoski i in. 2017).

Kolejny nowatorski aspekt tej pracy polegał na zastosowaniu modelowania termofizycznego do otrzymanych modeli planetoid z równoczesnym użyciem danych podczerwonych z aż trzech różnych obserwatoriów kosmicznych (IRAS, AKARI i WISE), z bardzo dobrym skutkiem. Uzyskano dobre dopasowania, pomimo problemów z kalibracją w danych z każdej z sond z osobna oraz pomiędzy nimi. Dodatkowo, małe odchyłki i brak trendów na wykresach O-C względem długości fali, kąta fazowego oraz kąta rotacji potwierdzają dobrą jakość naszych modeli bieguna i kształtu (p. np. Rys. 15 w H3). Co więcej, dzięki termice udało się zidentyfikować wyraźnie preferowane rozwiązanie na biegun dla dwóch kolejnych planetoid. Wyniki te stały się ważnym przyczynkiem do określenia jakie warunki musi spełniać zbiór obserwacji podczerwonych, by umożliwił jednoznaczne zidentyfikowanie właściwego rozwiązania na biegun – kwestie te to jeden z głównych problemów badawczych jakie miał rozwiązać projekt „Small Bodies: Near And Far” (Müller i in. 2018) realizowany w ramach programu Horyzont 2020, w którym pełniłam rolę uczelnianego koordynatora. Okazało się, że zbiór taki musi zawierać obserwacje podczerwone otrzymane zarówno przed opozycją, jak i po niej oraz pocho-

dzące z różnych aspektów (geometrii widzenia) powierzchni badanego ciała. Mniejsze znaczenie ma tu za to szerokość zakresu długości fal podczerwonych. Wiedza ta pomoże w planowaniu przyszłych optymalnych obserwacji w podczerwieni na instrumentach takich jak VLT/VISIR czy SOFIA. Modelowanie termofizyczne pozwoliło też z dużą dokładnością określić rozmiary wszystkich badanych tu ciał, wykazując zgodność z rozmiarami wyznaczonymi za pomocą zakryć i pozytywnie weryfikując zarówno nasze modele bieguna i kształtu jak i metody inwersji użyte do ich otrzymania.

Jednym z głównych celów takiego synergicznego podejścia do badania planetoid było zweryfikowanie tezy o wzroście bezwładności cieplnej planetoid z okresem rotacji (Harris i Drube, 2016). Bezwładność cieplna wyznaczona była wówczas jedynie dla dwóch planetoid o wolnej rotacji (Delbo i in. 2015), pozostałe wartości pochodziły jedynie z oszacowań. Okazało się że obiekty z mojego przeglądu to, pod wieloma względami, te najbardziej brakujące. Wyznaczone przez nas w H3 bezwładności cieplne okazały się mieć duże ( $\sim 100$  jednostek  $SI^3$ ) oraz średnie ( $\sim 50$  jednostek) wartości, co wydawało się potwierdzać powyższą tezę.

W pracy H3 zaprezentowałam też dodatkowo kolejną próbkę krzywych blasku obiektów wolno rotujących o małych amplitudach zmian blasku, które jak się okazało, miały uprzednio błędnie wyznaczone okresy rotacji, potwierdzając fakt odkryty w H2, że błędy te obciążają co najmniej 1/4 badanej populacji. Warto zauważyć, że w tej próbce znalazł się jeden obiekt (830 Petropolitana), który nawet miał już dostępny w literaturze model, jednak okazał się rotować z okresem aż 169 godzin, zamiast 37 godzin, co sfalsyfikowało ten model, ukazując wady podejścia opartego wyłącznie na rzadkich danych (Hanuš i in. 2016).

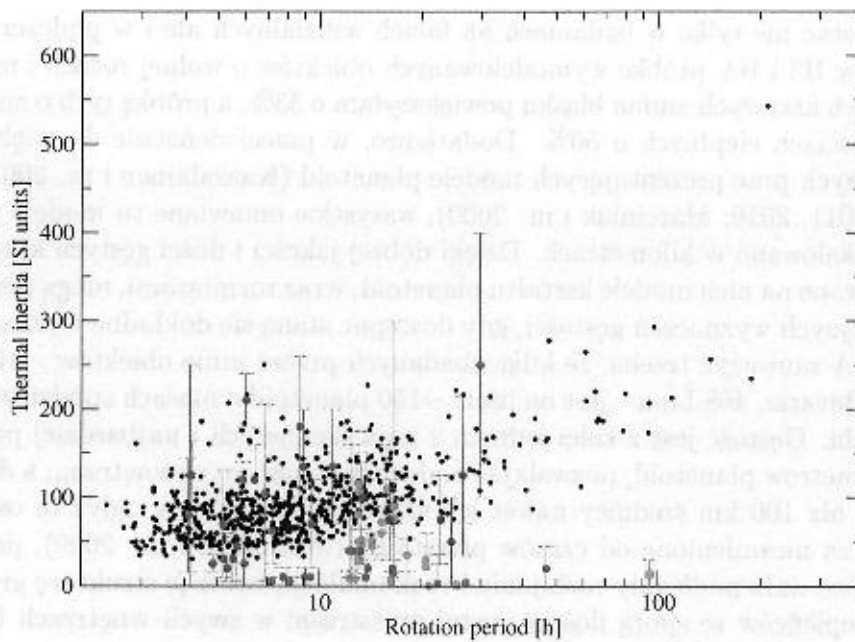
#### 4.3.6 Własności cieplne wolno rotujących planetoid

Praca H4 kontynuowała podejście zaproponowane w H3, tym razem jednak na większej próbce obiektów. Modelowanie kształtów zdecydowałam się wykonywać dalej jedynie metodą inwersji wypukłej ze względu na jej większą jednoznaczność i stabilność oraz mniejsze wymagania na moc obliczeniową. Jak z resztą wykazałam w poprzedniej pracy, oba rodzaje modeli – wypukłe i niewypukłe – w analizie termofizycznej zachowują się podobnie.

W publikacji tej udało mi się stworzyć jednoznaczne modele parametrów rotacji i kształtu dla 11 planetoid o wolnej rotacji i małych amplitudach zmian blasku. Korzystałam tu z danych obejmujących setki godzin obserwacyjnych dla każdej z nich, w większości zebranych w prowadzonym przez mnie programie, rozszerzonym w międzyczasie do 20 stacji z 12 krajów (i dodatkowo o teleskop kosmiczny Keplera w modzie K2, dzięki czasowi w kampaniach C14 – C19 przyznanemu w ramach kierowanych przez mnie projektów obserwacyjnych). Jednak tu, zamiast weryfikowania poszczególnych cech kształtów, skupiłam się bardziej na aspekcie termicznym badanych ciał. Otrzymane modele parametrów rotacji i kształtów są mimo tego pozytywnie zweryfikowane w procesie modelowania termofizycznego, gdyż dobrze pasują do danych termicznych zarówno w fazie jak i w natężeniu strumienia. Synergia badań na falach widzialnych i podczerwonych znów przyniosła bardzo dobre efekty: udało się wyznaczyć dokładne rozmiary wszystkich badanych ciał, ich albedo oraz dla wszystkich poza jednym określić bezwładności

---

<sup>3</sup>[ $Jm^{-2}s^{-0.5}K^{-1}$ ]



Rysunek 6: Zaktualizowany przeze mnie wykres zależności bezwładności cieplnej od okresu rotacji dla planetoid, z pracy Harrisa i Drube (2016). Czarne punkty to oszacowane wartości na podstawie danych z misji WISE, czerwone to uprzednio dostępne wyznaczenia na bazie precyzyjnego modelowania termofizycznego (z kompilacji Delbo i innych 2015), a pomarańczowe to nowe wyznaczenia Hanuša i innych (2018) dla obiektów wolnorotujących, na podstawie modeli modyfikowanych metodą „bootstrapping”. Niebieskie punkty oznaczają wartości z pracy H3, a zielone z H4. Wzrost bezwładności cieplnej z okresem rotacji nie potwierdził się (Marciniak i in., w druku – H4).

cieplne. Sporym zaskoczeniem było to, że większość zbadanych planetoid tym razem wykazała małe lub wręcz bardzo małe wartości bezwładności cieplnej (3 – 15 jednostek SI), jedynie kilka z nich wykazywało średnie wartości ( $\sim 40$  jednostek), a żaden nie miał wysokiej wartości ( $\sim 100$  jednostek). Sprawdzenie wszystkich zastosowanych tu procedur na kilku poprzednio badanych obiektach utwierdziło nas w przekonaniu o prawdziwości otrzymanych wyników. Mimo iż oczekiwaliśmy dużych wartości bezwładności cieplnej, w sumie, w pracach H3 i H4 otrzymaliśmy duży rozrzut tej wielkości, podobnie jak w opublikowanej w międzyczasie pracy Hanuša i innych (2018). Nasza próbka 15 obiektów powiększyła dostępny zbiór wolno rotujących planetoid o znanej bezwładności cieplnej aż o 50%. Wyniki te sfalsyfikowały tezę Harrisa i Drube (2016) o wzroście bezwładności cieplnej z tempem rotacji (Rys. 6). Oznacza to iż fala cieplna penetrować musi jedynie płytkie warstwy powierzchni planetoid lub że w danych podczerwonych z zakresu  $3.4 - 100 \mu\text{m}$  nie ujawniają się cechy warstw podpowierzchniowych. Istnieją jednak silne przesłanki, że te warstwy są gęstsze (Gulkis 2012, Keihm i Langseth 1975), z drugiej jednak strony muszą być też chłodniejsze, więc wpływ tych dwóch efektów na ogólną bezwładność cieplną może się równoważyć.

Dzięki wieloletniej kampanii obserwacyjnej nakierowanej na unikane dotąd objekty i włączeniu tych badań w ramy projektu SBNAF w programie Horyzont 2020 udało mi się zmniejszyć niekorzystne efekty selekcji obserwacyjnej, które okazały



się być istotne nie tylko w badaniach na falach widzialnych ale i w podczerwieni. W sumie, w H3 i H4, próbkę wymodelowanych obiektów o wolnej rotacji i małych amplitudach krzywych zmian blasku powiększyłam o 33%, a próbkę tych o znanych bezwładnościach cieplnych o 50%. Dodatkowo, w przeciwieństwie do większości wcześniejszych prac prezentujących modele planetoid (Kaasalainen i in. 2003; Hanuš i in. 2011, 2016; Marciniak i in. 2009), wszystkie omawiane tu modele precyzyjnie wyskalowano w kilometrach. Dzięki dobrej jakości i ilości gęstych krzywych skonstruowane na nich modele kształtu planetoid, wraz rozmiarami, mogą posłużyć do precyzyjnych wyznaczeń gęstości, gdy dostępne staną się dokładne wyznaczenia ich masy. A zauważyć trzeba, że kilka zbadanych przeze mnie obiektów – 100 Hekate, 301 Bavaria, 468 Lina – jest na liście ~150 planetoid o masach spodziewanych z misji Gaia. Gęstość jest z kolei jednym z najważniejszych i najbardziej pożądanych parametrów planetoid, pozwalając badać ich strukturę wewnętrzną, a dla ciał większych niż 100 km średnicy nawet ich skład mineralogiczny, gdyż te ostatnie uważa się za niezmiennione od czasów powstania (Morbidelli i in. 2009), podczas gdy mniejsze ciała podlegały rozbijaniu i reakumulacji, tworząc strukturę grawitacyjnych zlepieńców ze sporą ilością pustej przestrzeni w swych wnętrzach (Carry 2012, Scheeres i in. 2015).

#### 4.3.7 Podsumowanie osiągnięcia habilitacyjnego

Nawiązując do sformułowanych wyżej celów naukowych, można stwierdzić że wszystkie z nich udało mi się zrealizować:

1. Zmniejszyłam główne efekty selekcji obserwacyjnej wśród jasnych planetoid, najpierw badając planetoidy z szerokiego zakresu wszystkich parametrów fizycznych, później rozpoczynając szeroko zakrojoną kampanię obserwacyjną nakierowaną na obiekty o wolnej rotacji i małych zmianach blasku. W jej efekcie zgromadziłam ponad 10 000 godzin dobrej jakości danych fotometrycznych oraz stworzyłam modele rotacji i kształtu dla 16 badanych obiektów. Znaczący wzrost liczby wymodelowanych planetoid z tej pomijanej dotąd, choć licznej, populacji nastąpił niemal wyłącznie dzięki mojemu projektowi.
2. Dzięki publikacjom, prezentacjom na najważniejszych konferencjach w branży oraz budowaniu współpracy udało mi się zwiększyć świadomość istnienia i ważności efektów selekcji w środowisku badaczy (p. np. Ďurech i in. 2016, 2018, Cibulková i in. 2016, Molnár i in. 2018) i obserwatorów małych ciał Układu Słonecznego – obecnie w moim programie uczestniczy aż 25 stacji obserwacyjnych z 15 krajów na 5 kontynentach, co owocuje regularnym monitorowaniem dziesiątek tego typu „trudnych” obiektów. W nawiązaniu do moich badań powstała również praca doktorska prezentująca statystyczne podejście do problemu efektów selekcji, która dodatkowo zidentyfikowała bias samej metody inwersji (Cibulková 2017).
3. Moje obecne badania, w przeciwieństwie do tych z mojej rozprawy doktorskiej, prezentują interdyscyplinarne podejście, łącząc modele uzyskane dzięki fotometrii w zakresie widzialnym z danymi z podczerwonego zakresu widma (wykorzystując zarówno obserwacje naziemne jak i sond kosmicznych) oraz z zakryciami gwiazd przez planetoidy (obserwacje zarówno profesjonalne jak



i amatorskie). Skutkuje to m.in. precyzyjnymi wyznaczeniami rozmiarów. Dzięki temu uzyskuję pełniejszy obraz badanych obiektów.

4. Wolno rotujące, jasne planетки o małych zmianach blasku stanowią idealne źródła kalibracyjne dla obserwatoriów działających w zakresie podczerwieni, jednak dotąd modeli takich ciał było niewiele. Wszystkie stworzone przez mnie modele oraz dane do nich użyte są publicznie dostępne, w bazach: DAMIT<sup>4</sup>, CDS<sup>5</sup>, oraz bazie danych podczerwonych, stworzonej w ramach projektu SBNAF<sup>6</sup>. Dodatkowo, serwis ISAM<sup>7</sup> mojego współautorstwa pomaga w przewidywaniu zakryć gwiazd przez planetoidy i dopasowywaniu dostępnych modeli planetoid do rezultatów z tych zjawisk.
5. Moja próbka modeli zastosowana w procedurach termofizycznych zaowocowała 50-procentowym wzrostem liczby planetoid o wolnej rotacji z wyznaczoną bezwładnością cieplną. Dane te dla tego typu obiektów były bardzo oczekiwane (Delbo i in. 2015, Harris i Drube 2016). Otrzymane wartości okazały się ostatecznie mieć bardzo szeroki zakres, w ten sposób sfalsyfikowałam tezę o wzroście bezwładności cieplnej planetoid z okresem rotacji. Oznacza to, że w danych termicznych z zakresu  $3.4 - 100\mu\text{m}$  nie ujawniają się wyraźnie efekty od bardziej zwartych warstw podpowierzchniowych.

## 5 Pozostałe zainteresowania i osiągnięcia naukowe

Moje pozostałe zainteresowania naukowe dotyczą m.in. obrazowania planetoid pasa głównego za pomocą optyki adaptacyjnej, obserwacji zjawisk zakryciowych przez obiekty transneptunowe, badania planetoid podwójnych i tych należących do rodzin w celu wykrywania efektów termicznych (dryfu Jarkowskiego i efektu YORP) oraz poszukiwania obiektów typu widmowego V niezwiązanych z rodziną Vesty. Ostatnio interesują mnie też różne metody modelowania termofizycznego planetoid, obok klasycznego podejścia zaprezentowanego w H3 i H4, także równoczesna optymalizacja kształtu i parametrów termofizycznych oraz poszukiwanie metodami statystycznymi optymalnych rozwiązań na kształt z użyciem danych podczerwonych.

Moje najwcześniejsze badania dotyczyły obserwacji planetoid podwójnych (m. in. 90 Antiope, 809 Lundia, 22 Kalliope, 939 Isberga) oraz tych z rodziny Flory. Uczestniczyłam w odkryciu podwójności planetoidy 809 Lundia oraz w wieloletniej kampanii obserwacyjnej planetoidy 90 Antiope. Planetoidy podwójne dają unikatową okazję do dokładnego wyznaczenia mas i gęstości składników, a co za tym idzie, badań struktury wewnętrznej planetoid (Michałowski i in. 2004, Kryszczyńska i in. 2009, Bartczak i in. 2017). Natomiast badanie rotacji członków rodzin planetoid pozwala m.in. oszacować ich wiek, znaleźć źródła planetoid zbliżających się do Ziemi (NEA) a także tzw. grupy spinowe (Kryszczyńska i in. 2012). Badania te prowadziłam w latach 2004 – 2013, jako wykonawca w krajowych projektach badawczych kierowanych przez prof. Tadeusza Michałowskiego, prof. Agnieszkę Kryszczyńską oraz dr. Przemysława Bartczaka.

<sup>4</sup><http://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D>

<sup>5</sup><http://cdsarc.u-strasbg.fr>

<sup>6</sup><https://ird.konkoly.hu/>

<sup>7</sup><http://isam.astro.amu.edu.pl>

Za swój ważny wkład w tę dziedzinę badań uważam m.in. przeniesienie powstałej na Uniwersytecie w Helsinkach metody inwersji krzywych zmian blasku (Kaasalainen i in. 2001) na grunt polski i nauczanie rzeszy studentów oraz badaczy jej stosowania. Moja praca doktorska jest jedynym dostępnym opisem tej metody w języku polskim i stała się często wykorzystywanym źródłem. Poskutkowało to powstaniem kilku publikacji (Kryszczyńska 2013, Marciniak i in. 2012 – HI, Oszkiewicz i in. 2019) oraz rozpoczęciem współpracy z grupą badaczy planetoid z Uniwersytetu Karola w Pradze (Durech i in. 2007, Marciniak i in. 2007, Hanuš i in. 2013, 2016).

Oprócz stworzenia światowej sieci małych teleskopów i zaangażowania aż 50 obserwatorów do mojego opisanego wyżej programu, od ponad 10 lat koordynuję też działanie lokalnej grupy obserwatorów, nieprzerwanie wykonującej obserwacje w ramach różnych projektów na teleskopie fotometrycznym w stacji w Borowcu pod Poznaniem. Przez wiele lat zajmowałam się też obróbką i archiwizacją zbieranych w tej stacji danych oraz szkoleniem nowych obserwatorów, angażując studentów do pracy badawczej już na poziomie drugiego roku studiów licencjackich.

Jestem aktywnym obserwatorem, odbyłam wielokrotne staże obserwacyjne w SAAO w Republice Południowej Afryki, i Obserwatoriach Kanaryjskich na Teneryfie i La Palmie. Wykonuję też regularne obserwacje w lokalnej stacji w Borowcu. Uczestniczyłam w różnych kampaniach obserwacyjnych m.in. planetoid o nietypowych właściwościach polaryzacyjnych powierzchni (Devogèle i in. 2017), planetoid podwójnych (Carry i in. 2015) oraz planetoid zbliżających się do Ziemi (Müller i in. 2017), a ostatnio obserwuję też zjawiska mikrosoczewkowania grawitacyjnego uczestnicząc w sieci obserwatorów alertów Gai.

Aktywnie działam też na polu współpracy zawodowych astronomów z miłośnikami astronomii – kilka stacji w mojej sieci badawczej to obserwatoria amatorskie, ostatnio dołączyłam też do międzynarodowej organizacji obserwatorów zakryć (IOTA)<sup>8</sup>, w której większość członków to zaawansowani miłośnicy zbierający precyzyjne dane z zakryć gwiazd przez planetoidy, o dużej wartości naukowej. Uczestniczyłam w kampanii obserwacyjnej skutkującej odkryciem pierścienia wokół planety karłowatej Haumea (Ortiz i in. 2017) oraz m.in. w pierwszym precyzyjnym wyznaczeniu rozmiarów i kształtu nieregularnego satelity Jowisza – Himalii, za pomocą zakrycia gwiazdowego (Gomes-Junior, praca w przygotowaniu).

Od dwóch lat uczestniczę w dużym programie VLT (kierownik programu: dr Pierre Vernazza, Uniwersytet Aix-Marseille), który, dzięki znacznie unowocześnionym technikom optyki adaptacyjnej na dużych teleskopach, z obszaru badań globalnego kształtu planetoid sięga aż do dziedziny geologii planetarnej (Fetick i in. 2019), pozwalając wręcz wykrywać poszczególne kratery na większych planetoidach i łączyć je z powstawaniem rodzin planetoid czy konkretnych typów meteoroidów (Vernazza i in. 2018, Viikinkoski i in. 2018, Carry i in. 2019). Moja rola w tym projekcie polega na dostarczaniu danych fotometrycznych uzupełniających obrazy z optyki adaptacyjnej w jednym procesie modelowania za pomocą algorytmu ADAM (All Data Asteroid Modelling, Viikinkoski i in. 2015).

Obecnie uczestniczę też w projekcie NCN SONATA (kierownik projektu: dr Dagmara Oszkiewicz) zatytułowanym „Planetoidy typu V z wewnętrznego Pasa Głównego jako pozostałości zróżnicowanych planetozymali”, gdzie zajmuję się częścią kampanii obserwacyjnej i modelowaniem planetoid w celu wyznaczenia ich

<sup>8</sup><http://www.asteroidoccultation.com/observations/>

kierunku rotacji (Oszkiewicz i in. 2017 i 2019). Determinuje to ich przeszłą historię – w szczególności dryf Jarkowskiego – i być może umożliwi wykrycie miejsca ich pochodzenia: bazaltowego ciała macierzystego innego niż planetoida Vesta, którego jak dotąd nie udało się odnaleźć, mimo licznych przesłanek teoretycznych postulujących niegdysiejsze istnienie bardzo wielu zróżnicowanych wewnętrznie planetozymali.

Dzięki dobrej znajomości specjalistycznego języka angielskiego często pomagam w korekcie tekstów napisanych w tym języku. Brałam też udział w tłumaczeniach konferencyjnych, przez pewien czas pracowałam też jako tłumacz filmów popularnonaukowych, przybliżając polskiemu widzowi m.in. serię „Kosmos” wyprodukowaną przez The History Channel.

## 6 Podsumowanie dorobku naukowego

Jestem współautorem 33 publikacji z bazy Journal Citation Reports (JCR), z części A, z których 26 ukazało się po uzyskaniu przeze mnie stopnia naukowego doktora. Jestem również współautorem 20 innych publikacji i katalogów danych, nie licząc abstraktów konferencyjnych. Łączna liczba cytowań wg. Web of Science to 272. Liczba cytowań bez autocytowań wynosi 201. Sumaryczny Impact Factor wszystkich publikacji wg. bazy JCR zgodnie z rokiem opublikowania wynosi 187,865. Mój indeks Hirscha wg. Web of Science wynosi 10.

Brałam udział w 7 projektach badawczych finansowanych przez Komitet Badań Naukowych, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Narodowe Centrum Nauki oraz Komisję Europejską. W jednym projekcie krajowym pełniłam funkcję kierownika, a w jednym międzynarodowym – uczelnianego koordynatora. Należę do 3 konsorcjów badawczych.

Moja współpraca międzynarodowa (m.in. z badaczami z Instytutu Maxa Plancka w Niemczech, Węgierskiej Akademii Nauk, Uniwersytetu Karola w Czechach, Andaluzjskiego Instytutu Astrofizyki w Hiszpanii oraz Uniwersytetu Aix-Marseille we Francji) zaowocowała dostępem i efektywnym wykorzystaniem danych z obserwatoriów kosmicznych (IRAS, AKARI, WISE, Kepler, TESS) oraz dołączeniem do światowej czołówki badaczy obiektów transneptunowych, a także dostępem do najbardziej zaawansowanych metod obrazowania (VLT/SPHERE) i modelowania planetoid. Wyniki tych ostatnich znalazły się niedawno dwukrotnie na okładce elektronicznego wydania *Astronomy & Astrophysics*.

Brałam aktywny udział w 10 konferencjach międzynarodowych i 6 krajowych, na których prezentowałam 8 referatów ustnych i 8 plakatów. Byłam też współautorem innych 9 referatów i 19 plakatów prezentowanych na 17 konferencjach międzynarodowych. Przez ostatnie 3 lata brałam też aktywny udział w 6 spotkaniach roboczych międzynarodowej grupy badawczej realizującej projekt „Small Bodies: Near And Far” w ramach programu Horyzont 2020. Odbylam 10 staży naukowych w zagranicznych ośrodkach badawczych: Uniwersytet Helsiński (Finlandia), South African Astronomical Observatory (RPA), Instituto de Astrofísica de Canarias (Hiszpania) oraz na Uniwersytecie Karola (Czechy). Jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Astronomicznego, Międzynarodowej Unii Astronomicznej oraz International Occultation Timing Association (IOTA).

Uczestniczyłam w organizacji 6 międzynarodowych i krajowych konferencji (w jednej z nich jako członek naukowego komitetu organizacyjnego). Przewodniczy-



łam 5 sesjom konferencyjnym.

Zrecenzowałam 4 artykuły do czasopism z listy „A” JCR („Astronomy & Astrophysics” oraz „Earth, Moon and Planets”), a także jeden do „Acta Societatis Mathematicae Polonorum”. Byłam recenzentem jednej rozprawy doktorskiej, z zagranicznego ośrodka. Zrecenzowałam też dwa projekty obserwacyjne w ramach sieci OPTICON (Optical Infrared Coordination Network for Astronomy).

Prowadziłam 3 wykłady kursowe, 7 zajęć laboratoryjnych i 8 ćwiczeń dla studentów astronomii, fizyki i geografii. Pełniłam opiekę nad studentami w funkcji promotora 2 prac licencjackich i jednej magisterskiej oraz funkcję opiekuna jednej pracy magisterskiej. Wygłosiłam 14 wykładów popularnonaukowych oraz brałam aktywny udział w ponad 20 pokazach astronomicznych dla publiczności. Wygłosiłam 8 referatów na zaproszenie w polskich instytucjach badawczych oraz jeden na krajowej konferencji. Wzięłam też udział w nagraniu dwóch filmów popularyzujących astronomię.

W ramach podnoszenia kwalifikacji uczestniczyłam jako słuchacz w szkole letniej na temat astrostatystyki i dużych baz danych astronomicznych, kursie nowoczesnej metodyki kształcenia dla nauczycieli fizyki na poziomie akademickim, kursie specjalistycznego języka angielskiego oraz kursie programowania w języku Python.

Otrzymałam 4 nagrody zespołowe Rektora Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza za osiągnięcia badawcze oraz jedno indywidualne stypendium Rektora UAM za wybitne osiągnięcia naukowe. Otrzymałam też stypendium dla młodych doktorów oraz dla unikatowych absolwentów oraz nagrodę Dziekana Wydziału Fizyki za prace nad nowymi programami kształcenia. Dwukrotnie otrzymałam dodatek motywacyjny za osiągnięcia naukowe i aktywność w zdobywaniu środków grantowych. W kwietniu 2017 roku Komisja ds. Nazewnictwa Międzynarodowej Unii Astronomicznej nadała planetoidzie nr 10471 nazwę „Marciniak”, za mój wkład w badania długookresowych planetoid Głównego Pasa.

## Bibliografia

- Bartczak, P. i Dudziński, G. 2018, MNRAS, 473, 5050  
Bartczak, P.; Kryszczyńska, A.; Dudziński, G. i in. 2017, MNRAS, 471, 941  
Carry, B. 2012, Planet. Space Sci. 73, 98  
Carry, B.; Matter, A.; Scheirich, P. i in. 2015, Icarus, 248, 516  
Carry, B., Vachier, F., Berthier, J. i in. 2019, Astronomy Astrophys., 623, A132  
Čibulková, H. 2017, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Karola w Pradze  
Čibulková, H., Ďurech, J., Vokrouhlický, D., Kaasalainen, M. i Oszkiewicz, D. A. 2016, Astronomy Astrophys., 596, A57  
Delbo, M., Mueller, M., Emery, J. P., Rozitis, B. i Capria, M. T. 2015, Asteroids IV, ed. P. Michel, F. E. DeMeo i W. F. Bottke, s. 107  
Devogèle, M., Tanga, P., Bendjoya, P. i in. 2017, Astronomy Astrophys., 607, A119  
Dunham, D. W., Herald, D., Frappa, E. i in. 2016, NASA Planetary Data System, 243  
Durda, D. D., Bottke, W. F. i Nesvorný D. 2007, Icarus 186, 498  
Ďurech, J.; Hanuš, J.; Brož, M. i in. 2018, Icarus, 304, 101



- Ďurech, J.; Hanuš, J.; Oszkiewicz, D. i Vančo, R. 2016, *Astronomy Astrophys.*, 587, A48  
 Ďurech, J. i Kaasalainen, M. 2003, *Astronomy Astrophys.* 404, 709  
 Ďurech, J.; Kaasalainen, M., Herald, D. i in. 2011, *Icarus* 21, 652  
 Ďurech, J., Kaasalainen, M., Marciniak, A. i in. 2007, *Astronomy Astrophys.*, 465, 331  
 Fetick, R. J.L., Jorda, L., Vernazza, P. i in. 2019, *Astronomy Astrophys.*, 623, A6  
 George, T., Timerson, B., Beard, T. i in. 2011, *Journal of Double Star Observations*, 7, 175  
 Gulkis, S., Keihm, S., Kampa, L. i in. 2012, *Planet. Space Sci.*, 66, 31  
 Hanuš, J., Delbo, M., Ďurech, J. i Alí-Lagoa, V. 2018, *Icarus*, 309, 297  
 Hanuš, J., Ďurech, J., Brož, M. i in. 2013, *Astronomy Astrophys.*, 551, A67  
 Hanuš, J., Ďurech, J., Brož, M. i in. 2011, *Astronomy Astrophys.*, 530, A134  
 Hanuš, J., Ďurech, J., Oszkiewicz, D. A. i in. 2016, *Astronomy Astrophys.*, 586, A108  
 Harris, A. W. i Drube, L. 2016, *ApJ*, 832, 127  
 Hudson, R. S. i Ostro, S. J. 1998, *Icarus*, 135, 451  
 Kaasalainen, M. i Torppa, J. 2001, *Icarus*, 153, 24  
 Kaasalainen, M., Torppa, J. i Muinonen, K. 2001, *Icarus*, 153, 37  
 Kaasalainen, M., Torppa, J. i Piironen J. 2002, *Icarus* 159, 369  
 Keihm, S. J. i Langseth, M. G. 1975, *Icarus*, 24, 211  
 Kryszczyńska, A. 2013, *Astronomy Astrophys.*, 551, A102  
 Kryszczyńska, A.; Colas, F.; Descamps, P. i in. 2009, *Astronomy Astrophys.*, 501, 769  
 Kryszczyńska, A.; Colas, F.; Polińska, M. i in. 2012, *Astronomy Astrophys.*, 546, A72  
 Lawler, S. M.; Beichman, C. A.; Bryden, G. i in. 2009, *ApJ*, 705, 89  
 Magnusson P. 1990, *Icarus* 85, 229  
 Marciniak, A., Alí-Lagoa, V., Müller, T. G. i in. 2019, *Astronomy Astrophys.*, w druku (H4)  
 Marciniak, A., Bartczak, P. Santana-Ros T. i in. 2012 *Astronomy Astrophys.*, 545, A 131 (H1)  
 Marciniak, A., Michałowski, T., Hirsch, R. i in. 2009, *Astronomy Astrophys.*, 498, 313  
 Marciniak, A., Michałowski, T., Kaasalainen, M. i in. 2007, *Astronomy Astrophys.*, 673, 633  
 Marciniak, A., Bartczak, P., Müller, T. i in. 2018, *Astronomy Astrophys.*, 610, A7 (H3)  
 Marciniak, A., Pilcher, F., Oszkiewicz, D. i in. 2015, *Planet. Space Sci.*, 118, 256 (H2)  
 Michałowski, T.; Bartczak, P.; Velichko, F. P. i in, 2004, *Astronomy Astrophys.*, 429, 1159  
 Michałowski, T., 1996, *Icarus* 123, 456  
 Moerchen, M. M.; Telesco, C. M.; De Buizer, J. M. i in. 2007, *ApJ*, 666, L109  
 Molnár, L.; Pál, A.; Sárneczky, K. i Szabó, R. 2018, *ApJS*, 234, 37

- Morbidelli, A. Bottke, W. F., Nesvorný, D. i Levison, H. F. 2009, *Icarus*, 2004, 558
- Müller, T. G. i Lagerros, J. S. V. 2002, *Astronomy Astrophys.*, 381, 324
- Müller T. G., Marciniak, A., Butkiewicz-Bąk M. i in. 2017 *Astronomy Astrophys.*, 598, A63
- Müller, T. G., Marciniak, A., Kiss, Cs. i in. 2018, *Advances in Space Research* 62, 2326
- Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Sicardy B. i in. 2017, *Nature* 550, 219
- Oszkiewicz, D. A.; Skiff, B. A.; Moskovitz, N. i in. 2017, *Astronomy Astrophys.*, 599, A107
- Oszkiewicz D., Kryszczyńska A., Kankiewicz P. i in. 2019, *Astronomy Astrophys.*, 623, A170
- Pravec, P.; Harris, A. W. i Michałowski, T. 2002 *Asteroids III*, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi i R. P. Binzel (eds), s. 113
- Scheeres, D. J., Britt, D., Carry, B. i Holsapple, K. A. 2015 *Asteroids IV*, ed. P. Michel, F. E. DeMeo, i W. F. Bottke, s. 745
- Vernazza, P., Brož M., Drouard A., i in. 2018, *Astronomy Astrophys.*, 618, A154
- Viikinkoski, M., Hanuš, J., Kaasalainen, M, Marchis, F. i Ďurech, J. 2017 *Astronomy Astrophys.* 607, A117
- Viikinkoski, M.; Kaasalainen, M. i Ďurech, J. 2015, *Astronomy Astrophys.*, 576, A8
- Viikinkoski, M., Vernazza, P., Hanuš, J. i in. 2018 *Astronomy Astrophys.*, 619, L3
- Vokrouhlický, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J. i Statler, T. S. 2015, *Asteroids IV*, ed. P. Michel, F. E. DeMeo i W. F. Bottke, s. 509
- Vokrouhlický, D., Brož M., Bottke, W. F., Nesvorný D. i Morbidelli, A. 2006, *Icarus*, 182, 118
- Vokrouhlický, D., Nesvorný, D. i Bottke, W. F. 2003, *Nature* 425, 147
- Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N, O'Brien, D. P. i Mandell A. M. 2011, *Nature*, 475, 206
- Warner, B. D. i Harris, A. W. 2011, *Icarus*, 216, 610
- Warner, B. D., Harris, A. W. i Pravec, P. 2009, *Icarus*, 202, 134

*Anne Rovinsky*