

# AUTOREFERAT

---

Paweł Kankiewicz

Instytut Fizyki  
Uniwersytet Jana Kochanowskiego  
w Kielcach

Kielce, 2021

## **1 Imię i nazwisko**

Paweł Kankiewicz.

## **2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

- Tytuł magistra, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1997, praca magisterska *Zbliżenia gwiazd do Słońca*, promotor: prof. dr hab. Hieronim Hurnik.
- Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, 2004, praca doktorska *Wpływ subtelnych efektów grawitacyjnych na ewolucję orbit planetoid zbliżających się do Ziemi*, promotor: prof. dr hab. Edwin Wnuk.

## **3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych**

- 1.11.1997 – 30.09.1998 – pracownik naukowo techniczny, Obserwatorium Astronomiczne UAM w Poznaniu
- 01.10.1998 – 31.12.2002 – doktorant, Obserwatorium Astronomiczne UAM w Poznaniu
- od 01.03.2004 – adiunkt, Instytut Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach<sup>1</sup>

## **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 2020 r. poz. 85 z późn. zm.).**

Osiągnięciem naukowym jest monotematyczny cykl publikacji zatytułowany „Dynamika małych ciał na orbitach wstecznych”.

---

<sup>1</sup>do 2008 roku: Akademia Świętokrzyska, 2008–2011 r. : Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy w Kielcach.

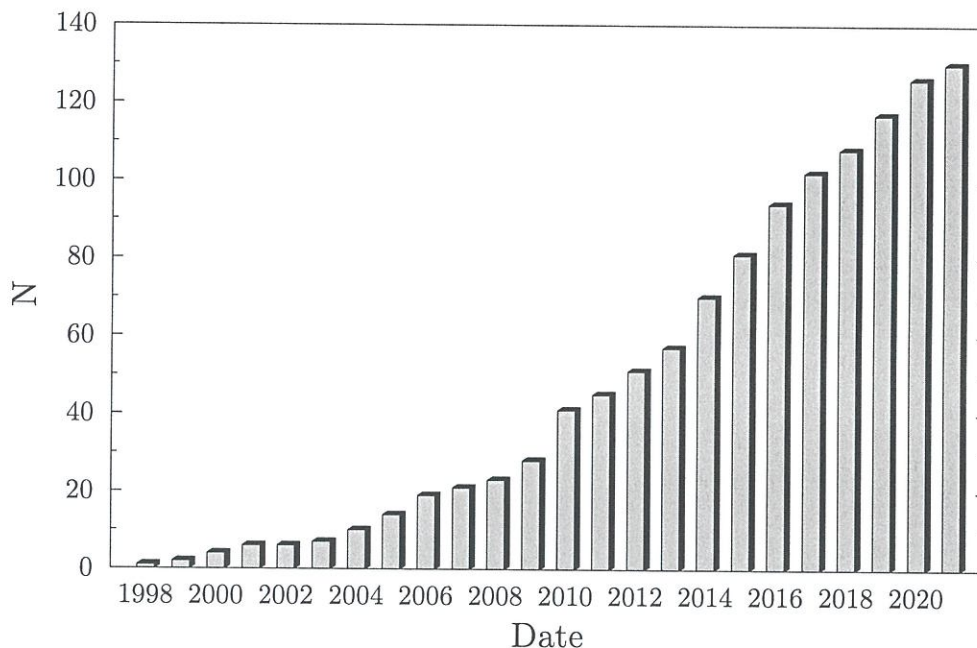
## 4.1 Wykaz artykułów naukowych stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego

- H1 **Kankiewicz, P., Włodarczyk, I.** 2006  
**Stability of the Most Hazardous Mars-Crossers.**  
*Acta Astronomica*  
2006, Volume 56, No. 4, IF(2006)=2.039,  
(Kankiewicz and Włodarczyk, 2006)
- H2 **Kankiewicz, P., Włodarczyk, I.** 2017  
**Dynamical lifetimes of asteroids in retrograde orbits.**  
*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*  
2017, Volume 468, Issue 4, IF(2017)=5.194,  
(Kankiewicz and Włodarczyk, 2017)
- H3 **Kankiewicz, P., Włodarczyk, I.** 2018  
**How long will asteroids on retrograde orbits survive?**  
*Planetary and Space Science*  
2018, Volume 154, IF(2018)=1.815,  
(Kankiewicz and Włodarczyk, 2018a)
- H4 **Kankiewicz, P.**  
**Orbit Inversion Scenarios of Minor Bodies in Retrograde Orbit**  
*Planetary and Space Science*  
2020, Volume 191, id. 105031, IF(2020)=2.03,  
(Kankiewicz, 2020)
- H5 **Kankiewicz, P., Włodarczyk, I.** 2021  
**Impact of non-gravitational effects on chaotic properties of retrograde orbits**  
*Astronomy and Astrophysics*  
2021, Volume 646, id. A182, IF(2020)=5.802,  
(Kankiewicz and Włodarczyk, 2021)

## 4.2 Omówienie celu naukowego w.w. prac i osiągniętych wyników

### 4.2.1 Wstęp

Pochodzenie i ewolucja układów planetarnych, w tym naszego Układu Słonecznego to fundamentalne zagadnienia, które zajmują astronomów o różnych specjalnościach od wielu lat. Szczególną rolę odgrywają tu obserwacje, wyznaczanie z nich własności fizycznych oraz badania dynamiczne z zakresu mechaniki nieba. Dzięki nim możliwe jest modelowanie i weryfikacja złożonych procesów, na skutek których układy wielu ciał ewoluują. Na tle tych wydarzeń, ważną rolę grają małe ciała, które pomagają nam odtwarzać historię naszego układu planetarnego. Są to planetoidy, komety, a także meteoroidy. Długookresowe badanie ich orbit dostarcza nam informacji, jak powstawał i zmieniał się Układ Słoneczny. Jednym z intrygujących i nie do końca wyjaśnionych zjawisk jest orbitalny ruch wsteczny, z którym mamy do czynienia, gdy nachylenie orbity przekracza 90 stopni. W ogólności, ponad milion znanych małych ciał obiega Słońce w zgodnym kierunku – co wydaje się zgodne z intuicją oraz hipotezami powstawania Układu Słonecznego. Zasada zachowania momentu pędu również wydaje się narzucać tę zgodność. Jednak niedługo po odkryciu pierwszej komety okazało się, że występują liczne odstępstwa. Począwszy od komety Halleya z nachyleniem ponad 160 stopni, bardzo wiele innych komet (ponad 18 %) porusza się ruchem wstecznym. Bardzo długo



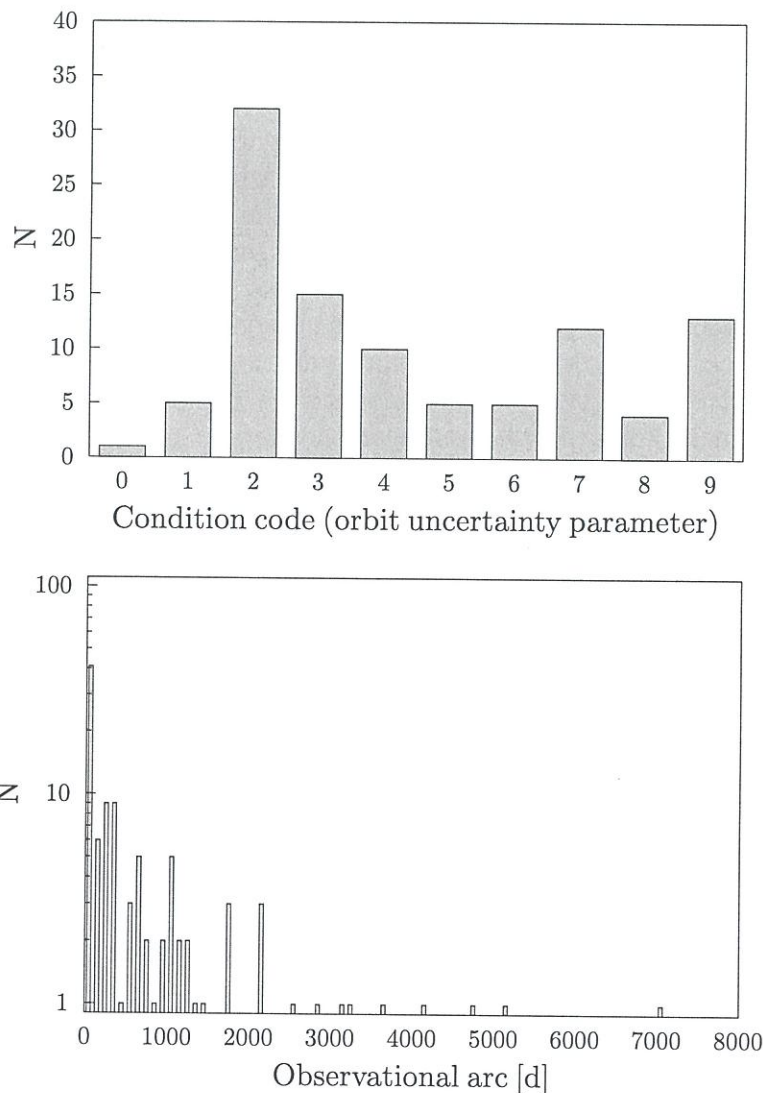
Rysunek 1: Przyrost populacji obiektów na orbitach wstecznych, zaobserwowanych i sklasyfikowanych formalnie jako planetoidy w latach 1998-2021 (rozszerzona wersja rysunku z pracy H3). Obecnie znanych jest ponad 120 takich obiektów. Do statystyki wliczone są także odkrywane od niedawna planetoidy międzygwiazdne, o ile spełniają kryterium ( $i > 90^\circ$ ).

kojarzono taki ruch wyłącznie z kometami, dopiero w 1999 roku odkryto pierw-



szą planetoidę na orbicie wstecznej: 20461 Dioretsa (pierwsze obserwacje pochodzą jeszcze z 1998). W kolejnych latach tego typu odkryć zaczęło przybywać (Rys. 1), a w 2007 i 2009 roku odkryto obiekty wsteczne zbliżające się do Ziemi, początkowo oznaczone jako 2007 VA85 oraz 2009 HC82 (Kankiewicz and Włodarczyk, 2010b, 2014b). Sukcesywne obserwacje zmieniły status pierwszego obiektu, który w 2016 roku został sklasyfikowany jako kometa 333P/LINEAR. Druga z planetoid otrzymała formalne oznaczenie (343158). Śledząc historię odkryć planetoid wstecznych, można zauważyć wiele ciekawych tendencji dotyczących ich statusu. Co jakiś czas obserwatorzy raportują dla indywidualnych obiektów aktywność kometarną, co skutkuje reklasyfikacją, czy przemianowaniem obiektu na kometa. W związku z tym planetoid wstecznych powoli przybywa, ale sporo z nich w międzyczasie zostaje formalnie kometami. Został nawet zaproponowany termin „asteroid on cometary orbit” – ACO (Tancredi, 2014). Znane są także koncepcje, że te obiekty są nieaktywnymi lub wygasłymi kometami. Analiza widmowa dostarcza mocnych argumentów za tą tezą (Licandro et al., 2018). Inny istotny fakt wpływający na badania to specyfika samych obserwacji pozycyjnych. Gdy było znanych kilkadziesiąt planetoid wstecznych, obserwacji astrometrycznych było naprawdę mało: często zaledwie kilkanaście obserwacji służyło jako podstawa do wyznaczenia orbity. Ponieważ obiekty te na ogół są niewielkie i obserwowane na peryferiach układu, bardzo trudno jest zgromadzić materiał do dostatecznie dobrego wyznaczenia orbity. Względnie niewielka jest lista obiektów obserwowanych w co najmniej dwóch opozycjach. Jakość wyznaczenia orbity ma kluczowe znaczenie w badaniu długookresowej ewolucji i oczywiście rzutuje na wnioski z takich symulacji. Na podstawie ilości obserwacji i kodów jakości wyznaczenia orbity („MPC orbit condition code/uncertainty parameter”) można wyciągnąć wniosek, że około 35% orbit spośród ponad 100 jest wyznaczonych z zadowalającą dokładnością (Rys. 2). To właśnie dla tych małych ciał można wykonać całkowania numeryczne na długich przedziałach czasu, które będą obciążone najmniejszymi błędami. Można też najwięcej powiedzieć o długo-okresowej stabilności ich orbit, a więc określić jak długo obiekty te znajdują się w naszym układzie lub jak długo się wewnątrz niego utrzymają. Można też określić w kategoriach statystycznych, jak często zbliżają się do planet, czy mogą ewentualnie podlegać kolizjom oraz jaką rolę w ich ruchu odgrywają rezonanse orbitalne.

Współczesne modelowanie ruchu małych ciał musi spełniać wysokie wymagania co do metod numerycznych i użytych założeń. Oprócz tego, że w modelach grawitacyjnych uwzględnia się precyzyjne położenia planet i największych planetoid, nie można zaniedbywać efektów niegravitacyjnych. W ciągu ostatnich dwudziestu lat bardzo wiele badań poświęcono tym perturbacjom, w szczególności efektowi Jarkowskiego w ruchu planetoid. Istnienie tego termicznego efektu postulowane było od dawna, ale po raz pierwszy zweryfikowane obserwacyjnie w 2003 roku (Chesley et al., 2003). Najbardziej precyzyjne modelowanie tego efektu w obliczeniach numerycznych jest możliwe dla planetoid o dobrze poznanych cechach fizycznych. Parametry związane z przewodnością termiczną, a także rozmiary, masy, gęstości, okresy rotacji



Rysunek 2: Jakość wyznaczenia orbity (u góry) dla planetoid wstecznych oraz rozkład długości łuków obserwacyjnych w dniach (u dołu) (wg pracy H5). Górny rysunek pokazuje rozkład tzw. parametru U, używanego powszechnie przez Minor Planet Center i opartego o przewidywaną niepewność w anomalii średniej planetoidy po 10 latach. Jest to liczba całkowita z zakresu od 0 do 9, gdzie 0 oznacza bardzo małą niepewność, a 9 bardzo dużą niepewność wyznaczenia orbity. Znaczna część populacji ma wciąż orbity wyznaczone z dużą niepewnością. Również rozkład długości łuków obserwacyjnych w dniach pokazany na dolnym rysunku wskazuje na przewagę liczebną obiektów obserwowanych krócej, niż 200 dni.

i orientacje przestrzenne osi planetoid są niezbędne, aby takie modelowanie przeprowadzić. Efekt Jarkowskiego ma istotne znaczenie np. w ewolucji rodzin planetoid, dlatego obserwacje dostarczające parametrów do jego modelowania są niezwykle wartościowe. Również w przypadku badań dynamiki planetoid wstecznych, znajomość wielu tych cech fizycznych byłaby bardzo pożądana (Kankiewicz and Włodarczyk, 2016). Nowe obserwacje sukcesyw-



nie dostarczają tych danych, ale czasem, jak wspomniano powyżej, przynoszą zaskakujące informacje o aktywności kometarnej. Wtedy do akcji wkraczają kolejne efekty niegrawitacyjne, tym razem związane z aktywnością kometarną. Są one jeszcze trudniejsze w modelowaniu i w zasadzie nieprzewidywalne na dłuższych przedziałach czasu.

W mojej pracy badawczej skoncentrowałem się na modelowaniu dynamiki planetoid na orbitach wstecznych ze szczególnym uwzględnieniem ich własności chaotycznych. Istotnym elementem wszystkich przeprowadzonych obliczeń było dowiązanie osiągniętych wyników do rzeczywistych obserwacji. Jako ogólne założenie można przyjąć, że najlepsze obserwacje dają najbardziej wiarygodne wyniki, a najsłabsze trzeba traktować jako mniej wiarygodną podstawę do wnioskowania. Dlatego bardzo często analizowano dane od obserwacji aż do wyników symulacji numerycznych, śledząc proces propagacji błędów obserwacyjnych. Takie podejście nadaje największą wagę statystyczną dla najlepszych danych startowych, a dyskryminuje te najgorsze (otrzymują mniejsze wagi statystyczne).

Przy założeniu, że używa się najnowszych narzędzi numerycznych, aktualnych obserwacji i najbardziej zaawansowanych modeli dynamicznych planetoid, można przejść do pytań bardziej fundamentalnych. Przede wszystkim chodzi o pochodzenie planetoid wstecznych. Wiele hipotez prowadzi do struktur peryferyjnych Układu Słonecznego, takich jak Dysk Kuipera i Obłok Oorta (Brasser et al., 2012). Nie jest to zaskakujące, bo wiele planetoid wstecznych to Centaury i Obiekty Transneptunowe (TNO). Można zaryzykować twierdzenie, że źródłem orbit wstecznych jest odległa struktura, w której małe ciała rozłożone są sferycznie – jak w hipotetycznym Obłoku Oorta. Z tego powodu do wnętrza układu, na skutek perturbacji trafiałyby ciała o przypadkowych, często ekstremalnych nachyleniach orbit. Niezwykle intrygujący wydaje się problem wstecznych planetoid zbliżających się do Ziemi. Znamy ich bardzo mało, ale orbity przypisane meteorytom spadającym na Ziemię często bywają wsteczne (Borovička et al., 2005), (Jopek and Kaňuchová, 2017). Może to nasuwać wniosek, że powinniśmy znać więcej obiektów wstecznych typu NEO, niż obserwuje się obecnie. Nawet, jeśli planetoidy wsteczne nie pochodzą z jakiegoś zewnętrznego źródła, w warunkach zaburzeń charakterystycznych dla układu planetarnego musi dochodzić czasem do odwrócenia, czyli inwersji orbit (zamiany ruchu prostego na wsteczny). Można na podstawie znanego materiału obserwacyjnego oszacować wydajność takich procesów ze statystycznego punktu widzenia (praca **H4**). Pozostaje jeszcze kwestia międzygwiazdowego pochodzenia takich obiektów, która również wydaje się prawdopodobna (Namouni and Morais, 2020). Od niedawna znane są planetoidy międzygwiazdne, i zdarza się dosyć często, że to są również planetoidy wsteczne (Marčeta and Novaković, 2020). Zakładając, że nie są dynamicznie powiązane z powstaniem Układu Słonecznego, nie ma powodu, by ich orbity trzymały się wspólnego kierunku obiegu wokół Słońca. Można zatem założyć, że taki mechanizm powstawania orbit wstecznych zapewne istnieje, chociaż nieznaną jest jego wydajność.

Poza pytaniem o pochodzenie badanych obiektów pojawia się inne klu-



czowe pytanie: jeśli już są obecne w Układzie Słonecznym, to jak stabilne są ich orbity i w konsekwencji jak długo przetrwają? Na te pytania udzielono częściowej odpowiedzi w pracach **H2** i **H3**. Ponieważ termin „stabilność” jest dosyć ogólny, warto się zastanowić, wg jakich kryteriów go badać. Najlepiej określić ją w sposób ilościowy, badając tzw. dynamiczne czasy życia planetoid w układzie, odnosząc się do przeszłości i przyszłości, jak to zrobiono w pracy **H2**. Wyniki te można skonfrontować z podobnymi parametrami, opartymi na ilościowym określaniu obecności chaosu, jak wykładniki Lapunowa i ich odwrotności – czasy Lapunowa. Parametrów tego typu użyłem w pracach **H3** i **H5** do oceny chaotyczności orbit. Dzięki temu udało się wyselekcjonować obiekty na orbitach wstecznych, które mogą długo przebywać w naszym układzie, jak również te, które są zaledwie przypadkowymi gośćmi.

Interesującą kwestią wydaje się zbadanie przyczynowości w ewolucji orbitalnej obiektów wstecznych. Jednym z elementów tej przyczynowości są możliwe scenariusze inwersji orbit. Na pytanie, jak są one prawdopodobne w świetle współczesnego materiału obserwacyjnego, odpowiedziałem w pracy **H4**. Inwersja orbit określana jest przez innych autorów jako „flipping” (Greenstreet et al., 2012). Prawdopodobieństwo takich zdarzeń oraz ich wydajność jako mechanizmu produkującego orbity wsteczne została omówiona w artykule **H4**. Dla indywidualnych obiektów, cechujących się największym prawdopodobieństwem inwersji orbit, określono także najbardziej możliwe ich przyczyny. Tymi przyczynami na ogół jest kombinacja ciasnych zbliżeń do planet oraz rezonanse wsteczne (RMMR: *Retrograde Mean Motion Resonances*). Wydaje się jednak, że wydajność tego procesu jest zbyt mała, aby wytłumaczyć obecność tak wielu orbit wstecznych.

Aby wyczerpać temat pochodzenia badanych obiektów, wszelkie perturbacje mogące wpłynąć na produkcję orbit wstecznych powinny zostać zweryfikowane jako potencjalna przyczyna, także te niegravitacyjne. Z problemem tym zmierzono się w pracy **H5** (choć sygnalizowano go w pracach wcześniejszych). Efekty niegravitacyjne kształtują obraz różnych populacji małych ciał Układu Słonecznego, ale jako bardzo subtelne oddziaływania są trudne w modelowaniu. Epoka bardziej precyzyjnych modeli z pewnością niedługo nadejdzie, wraz z osiągnięciami wielkich kampanii obserwacyjnych. Wypełnią one lukę w brakujących lub niedokładnie określonych własnościach fizycznych zarówno planetoid, jak i komet.

#### 4.2.2 Cele badawcze

Celem moich badań było rozwiązanie następujących problemów związanych z planetoidami na orbitach wstecznych:

1. Dobór optymalnych metod badawczych do śledzenia długookresowej ewolucji orbitalnej małych ciał na orbitach wstecznych.
2. Utworzenie modeli dynamicznych powiązanych z obserwacjami i uwzględniających potencjalne efekty niegravitacyjne.



3. Zbadanie, jak długo badane obiekty przebywają w Układzie Słonecznym.
4. Ilościowe oszacowanie obecności chaosu dla orbit wstecznych.
5. Zbadanie prawdopodobieństwa powstawania orbit wstecznych na skutek inwersji orbit.

#### 4.2.3 Opracowanie i przetestowanie metod obliczeniowych

Wybór metod obliczeniowych, które będą używane w zagadnieniu n-ciał, jakim jest układ planetarny, nie jest kwestią trywialną. Ze względu na to, że w grę wchodzi niemal wyłącznie wielkoskalowe obliczenia numeryczne, należy minimalizować ich błędy i ograniczenia. W pracy **H1** przeprowadzono większość testów numerycznych, które zdecydowały o wyborze algorytmów używanych w późniejszych obliczeniach. W pracy tej nie uwzględniono jeszcze orbit wstecznych (materiał obserwacyjny był wówczas bardzo skromny), ale przeprowadzono wyznaczanie orbit i całkowanie numeryczne obiektów ciasno zbliżających się do Marsa i planet wewnętrznych. Pozwoliło to zdecydować o wyborze narzędzia do wyznaczania orbit: programu OrbFit (Milani et al., 1997) oraz integratorów, którymi są SWIFT (Duncan et al., 1998) i jego późniejsze pochodne (Brož et al., 2011) oraz Mercury (Chambers and Murison, 2000). Oba programy są standardowymi narzędziami używanymi w dynamice Układu Słonecznego, które ze względu na otwarty charakter kodu przechodziły w kolejnych latach wiele modyfikacji. W pracy **H1** opracowano także własne oprogramowanie, służące m.in. generowaniu rozkładów małych ciał dopasowanych do rozkładów obserwacyjnych (klonów) oraz numeryczną procedurę do ilościowego szacowania chaosu wg wykładników Lapunowa. Wspomniane wyżej narzędzia do całkowania numerycznego wykorzystano do badania ruchu orbitalnego obiektów wstecznych w pracach **H2**, **H3**, **H4** i **H5**. W międzyczasie pojawiły się odmiany tych narzędzi tworzone przez kolejnych autorów (Brož et al., 2011), w szczególności służące do modelowania efektów niegrawitacyjnych, których uwzględnienie stało się konieczne. Parametry charakteryzujące chaos (czasy Lapunowa) były później wyznaczone podczas badań opisanych w pracach **H3** i **H5**.

#### 4.2.4 Utworzenie modeli dynamicznych dla orbit wstecznych

Modele dynamiczne używane w moich badaniach można generalnie podzielić na grawitacyjne i niegrawitacyjne. Wielu autorów stosuje uproszczone modele perturbacji, biorące pod uwagę wyłącznie siły grawitacyjne. W tej sytuacji na ogół wystarcza precyzyjny model dynamiczny Układu Słonecznego (położenia i prędkości planet) wg efemeryd Jet Propulsion Laboratory (JPL). W bardziej wymagających sytuacjach uwzględnia się dodatkowo perturbacje od największych planetoid, ale perturbacje niegrawitacyjne pomija się. Argumenty za takim postępowaniem to najczęściej niedostateczna znajomość parametrów fizycznych planetoid i niska przewidywalność aktywności komet. W sytuacji, gdy przybywa tak wiele danych o cechach planetoid, warto podjąć



ryzyko i próbować symulować efekty, które dzięki postępowi zostały w ostatnich latach obserwacyjnie potwierdzone – jak np. efekt Jarkowskiego. Populacja badanych ciał to formalnie planetoidy, w większości obiegające Słońce na odległych orbitach, ale zdarzają się obiekty zbliżające się do planet wewnętrznych, zatem efekt Jarkowskiego może odgrywać w ich ewolucji znaczącą rolę. Efektywność siły Jarkowskiego zależy od własności fizycznych planetoidy, ale w dużym stopniu istotne jest położenie osi i okres rotacji. Wśród tych parametrów wiele jest nieznanych dla planetoid niedawno odkrytych, ale można w przybliżeniu oszacować typowe parametry termiczne i sprawdzić, czy efekt Jarkowskiego może być potencjalnie istotny w ich ruchu. W tym celu należy zaadaptować z literatury typowe i najbardziej wiarygodne zestawienie parametrów termicznych, niezbędnych do całkowania ruchu z uwzględnieniem tego efektu (prace **H2**, **H5**). Częstą praktyką jest badanie granicznych wartości niektórych parametrów rotacji, jak nachylenia osi o wartościach 0 i 180 stopni. Celem jest maksymalizacja efektu Jarkowskiego dla rotacji prostej i wstecznej w celu zbadania największych możliwych perturbacji – najbardziej charakterystyczna jest długookresowa zmiana pólosi wielkiej orbity (znana w ogólności jako dryf Jarkowskiego).

Znacznie większym wyzwaniem jest stworzenie modelu dynamicznego dla komet na orbitach wstecznych. Efekty kometarne w zasadzie nie pozwalają na wiarygodne symulacje numeryczne, przeprowadzane na długich okresach czasu (Wiegert and Tremaine, 1999). Dla niewielkiej liczby komet można wyznaczyć z odpowiednio dużej liczby obserwacji współczynniki określające przyspieszenia niegrawitacyjne:  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A_3$  (alternatywnie używa się także prostszego modelu ze składowymi przyspieszeniami: radialną  $A_1$  i transwersalną  $A_2$ ). W ograniczonych, jak na Układ Słoneczny, skalach czasu można się pokusić o badania ich stabilności orbitalnej. W pracy **H5** podjęto próbę zbadania stabilności orbit kilku komet wstecznych, interesujących z dynamicznego punktu widzenia. W użytych modelach wyznaczono wartości przyspieszeń kometarnych z obserwacji, albo posługiwano się parametrami modelu opublikowanymi przez innych autorów.

#### 4.2.5 Oszacowanie czasów życia planetoid na orbitach wstecznych

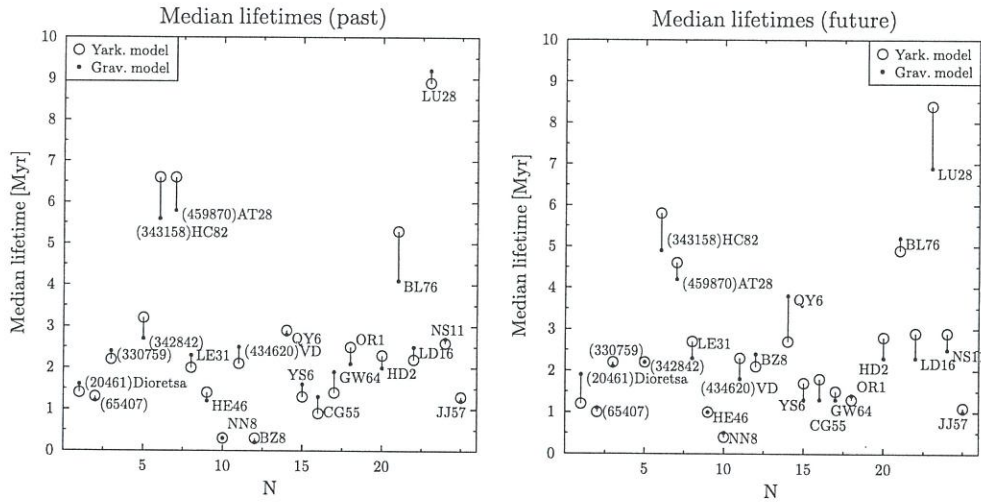
W zagadnieniach pochodzenia konkretnej populacji małych ciał bardzo istotne jest, w jakiej skali czasu stabilność ich orbit pozwala im utrzymać się wewnątrz Układu Słonecznego. Z tego właśnie powodu w pracy **H2** zaproponowałem oszacowanie tego czasu numerycznie, za pomocą mediany dynamicznego czasu życia (*median dynamical lifetime*), oznaczonego tam umownie jako  $\tau$ . Parametr ten jest bardzo wiarygodnym wskaźnikiem, jeśli jego wyznaczenie jest właściwie dowiązane do ilości i jakości obserwacji. Ponieważ analiza pojedynczego małego ciała na orbicie nominalnej jest niewystarczająca do wyciągania daleko idących wniosków, należy używać względnie dużej ilości ciał testowych o zaniedbywalnie małej masie – tzw. klonów, o zróżnicowanych początkowych położeniach i prędkościach. Istnieją rozmaite koncepcje i strategie przeprowadzania takich obliczeń, najważniejszy jednak wydaje się fakt, aby rozkład klonów odzwierciedlał rozkład i propagację błędów oryginalnych



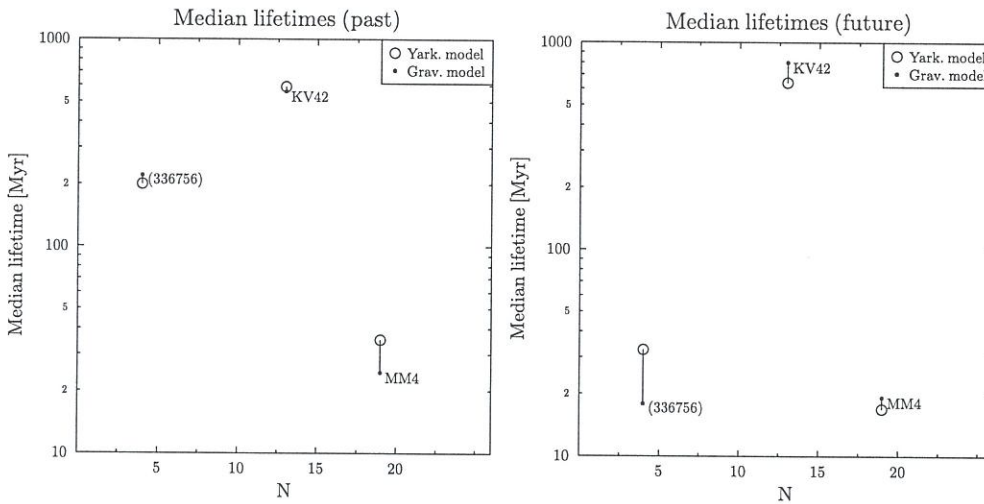
obserwacji (Sitarski, 2006). Najczęściej zakłada się, że ten rozkład jest Gaussowski. W przypadku obliczeń w pracy **H2**, użyty został zestaw 101 klonów leżących na tzw. linii wariacji (LOV - *the line of variation*) wyznaczonej z obserwacji astrometrycznych wg koncepcji zaproponowanej w pracy Milani and Valsecchi (1999). Liczba użytych klonów w tego typu obliczeniach jest zazwyczaj kompromisem między jak najliczniejszą próbą statystyczną a dostępną mocą obliczeniową. W kolejnych pracach, w zależności od celów i potrzeb zwiększano tę liczbę do 400 lub nawet 1000 dodatkowych klonów. Uogólniając, klonów powinno być jak najwięcej, ale może to oznaczać całe tygodnie lub miesiące obliczeń, nawet przy użyciu bardzo wydajnych klastrów komputerowych. Dla każdego klona możemy określić, jak długo przeżyje on w układzie planetarnym, dopóki nie nastąpi jego wyrzucenie na orbitę hiperboliczną, zderzenie z planetą lub ze Słońcem. Statystyka takich zdarzeń dla wszystkich klonów pozwala określić, jak długo przeżyje część populacji pokrywająca połowę rozkładu prawdopodobieństwa (medianę). Parametr ten, znany jako czas życia  $\tau$  można szacować zarówno w odniesieniu do przyszłości, jak i przeszłości (całkowania wstecz). Zaletą całej procedury jest fakt, że oddaje ona rozrzut oryginalnych obserwacji. Słabym elementem jest konieczność dysponowania dużą mocą obliczeniową. W większości przypadków można było rozwiązać problem za pomocą obliczeń równoległych, przeprowadzanych na klastrze komputerowym Instytutu Fizyki UJK (obecnie: Centrum Obliczeń i Modelowania Komputerowego Wydziału Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Jana Kochanowskiego).

Otrzymane w pracy **H2** dynamiczne czasy życia wiele wnoszą do charakterystyk planetoid na orbitach wstecznych i różnicują je pod względem dynamicznym. Po przeanalizowaniu czasów życia 25 obiektów w odniesieniu do przeszłości oraz przyszłości, widoczne są trzy obiekty o bardziej stabilnych orbitach, raportowane także przez innych autorów jako wielkie Centaury wsteczne (*large retrograde Centaurs*). Jakkolwiek większość otrzymanych czasów życia jest rzędu milionów lat (Rys. 3), dla tej grupy otrzymujemy czasy rzędów dziesiątek i setek milionów lat (Rys. 4). W tym kontekście, stabilność jest zdefiniowana bardzo ogólnie, jako zdolność do utrzymania się na zamkniętej orbicie w naszym układzie planetarnym. W porównaniu do dynamicznych czasów życia otrzymanych dla innych małych ciał na peryferiach Układu Słonecznego o orbitach posiadających typowe, małe nachylenia (Volk and Malhotra, 2013), otrzymane tutaj czasy wydają się względnie krótkie.

Inną istotną kwestią w badanym zagadnieniu są opisane wcześniej efekty niegrawitacyjne i ich wpływ na wyniki. W pracy **H2** zbadałem wpływ zastosowanego modelu dynamicznego na oszacowane wartości  $\tau$ . W tym celu przygotowałem zestaw parametrów fizycznych planetoid, niezbędny do modelowania efektu Jarkowskiego na podstawie danych obserwacyjnych i typowych wartości literaturowych. Wielu autorów nie uważa za celowe uwzględnianie takich efektów, ponieważ materiał obserwacyjny jest wciąż niewielki, a mamy do czynienia z obiektami odległymi. Z drugiej jednak strony, wśród ciał na orbicie wstecznej są już nie tylko ciała z peryferiów układu, ale obiekty zbliżające się do planet wewnętrznych i Słońca. W związku tym efekt Jarkowskiego nie jest



Rysunek 3: Czasy życia większości obiektów na orbitach wstecznych ( $\tau < 10$  mln lat), odnoszące się do całkowania numerycznego wstecz (lewy panel) i w przód (prawy panel). Wyniki z modelu grawitacyjnego są oznaczone punktami, natomiast wyniki otrzymane z uwzględnieniem efektu Jarkowskiego są oznaczone kółkami. Dla uwydatnienia tej różnicy, rezultaty dla indywidualnych obiektów są połączone linią (źródło: praca H2). W konsekwencji, im dłuższe są pionowe linie, tym większy jest potencjalny wpływ efektu Jarkowskiego na wyniki. Na rysunkach uwzględniono obiekty o krótkich czasach życia ( $\sim 1$  My), które stanowią znaczną większość w badanej populacji.



Rysunek 4: Najdłuższe czasy życia trzech obiektów na orbitach wstecznych ( $\tau > 10$  mln lat), odnoszące się do całkowania numerycznego wstecz i w przód. Lewy panel odnosi się do całkowania numerycznego w przeszłości (w tył), prawy – w przyszłości (w przód). Wyniki i ich różnice są oznaczone symbolami i liniami analogicznie, jak na Rys. 3 (źródło: praca H2). Spośród trzech dużych planetoid wstecznych, dla obiektu 2008 KV42 względny wpływ efektu Jarkowskiego wydaje się najmniejszy.

dla nich zaniedbywalnie mały, a ograniczenia w modelowaniu wynikają tylko ze słabej znajomości danych fizycznych. Na Rys. 3 i 4 zaprezentowane są różnice w  $\tau$  wynikające z zastosowania modelu grawitacyjnego oraz uproszczonego modelu z efektem Jarkowskiego. Kluczową kwestią jest pytanie: czy



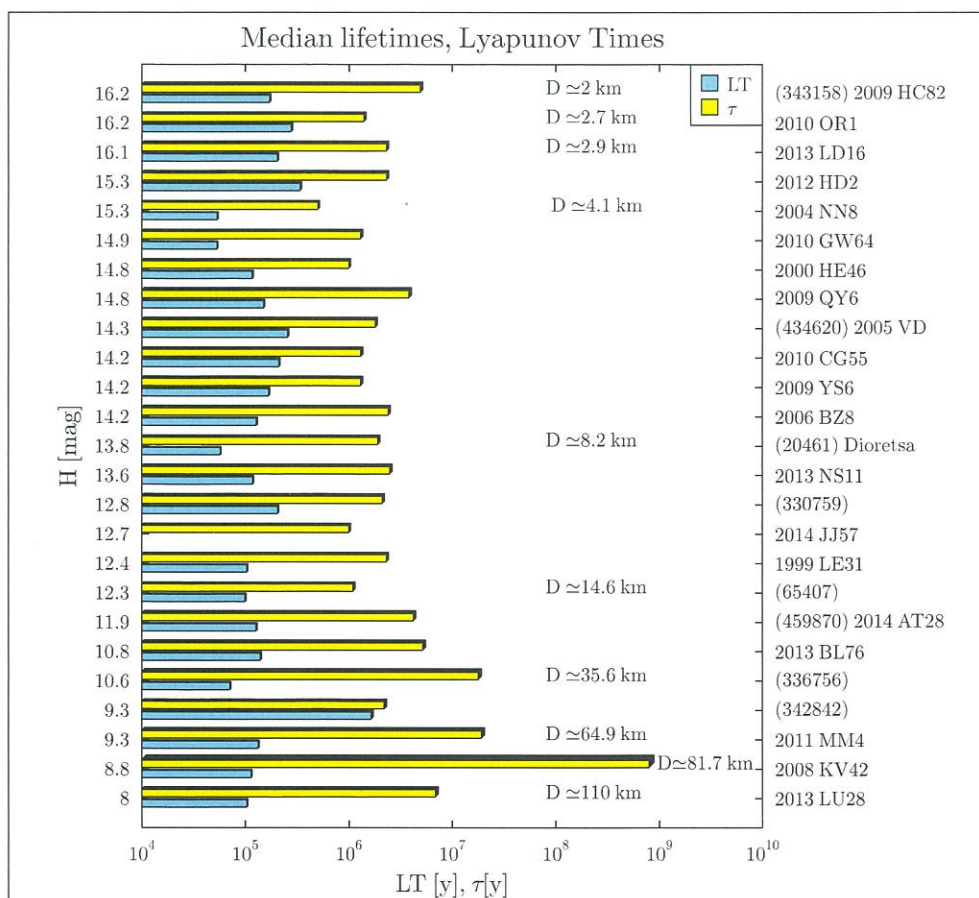
względnie słaby efekt Jarkowskiego ma wpływ na czasy życia planetoid na orbitach wstecznych? W granicach wiarygodności przyjętego prostego modelu, można odpowiedzieć, że tak, chociaż nie zmienia wyników o więcej, niż o rząd wielkości. Nie można generalizować, czy wspomniany efekt wydłuża czy skraca otrzymane wartości  $\tau$ . Na badanej próbie 25 obiektów można zauważyć niewielką tendencję do wydłużania tych czasów.

#### 4.2.6 Ilościowe zbadanie obecności chaosu dla orbit wstecznych

Wspomniane w poprzednim rozdziale dynamiczne czasy życia są wiarygodnym parametrem, ale warto poddać je konfrontacji z wielkościami opisującymi ilościowo chaos, które mają formalną definicję matematyczną. Takimi parametrami są wskaźniki oparte na wykładnikach Lapunowa. W mechanice nieba operuje się różnymi parametrami, które opisują mniej lub bardziej trafnie chaotyczność orbit, jak np. SALI, FLI, MEGNO (Maffione et al., 2011). Wybór właściwego parametru nie jest kwestią trywialną, ale aby odnieść się do rezultatów innych autorów, warto stosować podobne założenia i metody. Przykładowo, w dynamice pozasłonecznych układów planetarnych bardzo popularne jest określanie obecności chaosu za pomocą parametru MEGNO – *mean exponential growth of nearby orbits* (Cincotta and Simó, 2000), (Goździewski et al., 2001). Z kolei w dynamice małych ciał Układu Słonecznego często używane są wykładniki i czasy Lapunowa. Metodę, w której określane są numerycznie estymatory wykładników Lapunowa, czyli wskaźniki Lapunowa opracowałem wcześniej do celów obliczeniowych w pracy **H1** i następnie zastosowałem w pracach **H3** i **H5**. Oryginalna koncepcja obliczania wykładników Lapunowa jest opisana w pracy Benettin et al. (1976), natomiast realizację obliczeń za pomocą metod numerycznych przedstawił Sprott (2003). Do celów opisowych używałem odwrotności wyznaczonych parametrów, czyli czasów Lapunowa (LT). W pracy **H3** wyznaczyłem wartości  $\tau$  i LT w modelu grawitacyjnym, natomiast w późniejszej pracy **H5** zbadałem znacznie szerszy zakres wpływu możliwych efektów niegrawitacyjnych.

Gdyby potraktować oba wyznaczone parametry ( $\tau$  i LT) bardzo ogólnie, można wyciągnąć pobieżny wniosek, że powinny być one ze sobą skorelowane. Jednak sposób ich wyznaczania oraz towarzyszące mu założenia bardzo się różnią. W konsekwencji, mogą występować małe ciała o chaotycznym zachowaniu dynamicznym (dużej wrażliwości na warunki początkowe), a pomimo to mające długi czas życia. W pracy **H3** wyznaczyłem czasy Lapunowa i porównałem je z przeciętnymi czasami życia w układzie (Rys. 5).

Obiekty przedstawione na Rys. 5 zostały posortowane według jasności absolutnej, a zarazem przybliżonych rozmiarów. Czasy Lapunowa, będące parametrami wyznaczanymi wg innych założeń są znacznie krótsze od dynamicznych czasów życia, dlatego skala pozioma jest logarytmiczna. Zauważalny jest fakt, że wartości  $\tau$  są największe dla dużych ciał. Poza tym, zaprezentowane parametry nie są ze sobą skorelowane, a nawet trafiają się orbity o krótkim czasie Lapunowa i długim czasie życia. Podobne zachowania orbit małych ciał zostały kiedyś określone w literaturze jako „stabilny chaos” (Milani and Nobili, 1992). Ten paradoks można krótko scharakteryzować jako fakt,



Rysunek 5: Zestawienie otrzymanych czasów życia  $\tau$  i czasów Lapunowa (LT) dla planetoid wstecznych (wg pracy **H3**). Obiekty zostały posortowane od najmniejszych (u góry) do największych (u dołu). podano także przybliżone średnice, oszacowane najczęściej wg podanych po lewej stronie jasności absolutnych i albedo. Zauważalna jest niewielka korelacja pomiędzy rozmiarem obiektu a dynamicznym czasem życia: największe ciała mają na ogół największe wartości  $\tau$ .

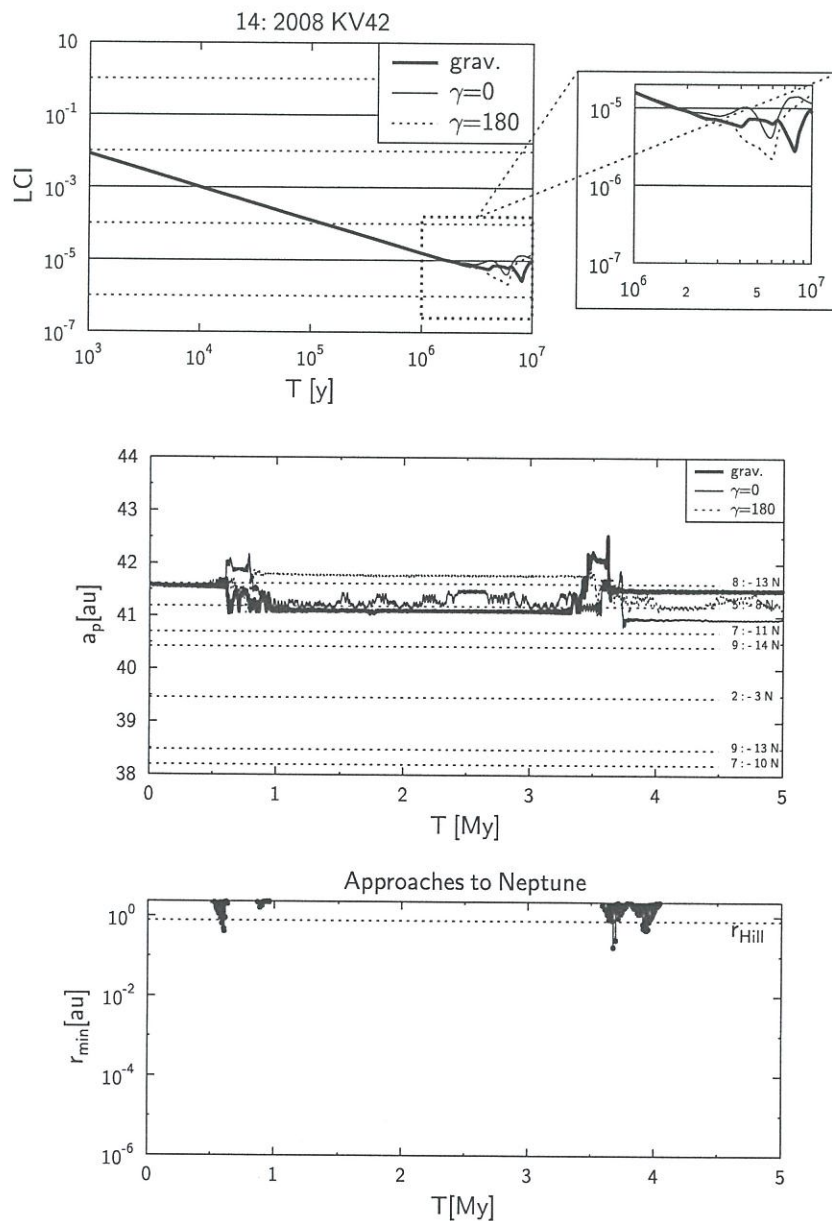
że zachowanie chaotyczne orbity ogranicza jej przewidywalność, ale nie przesądza o jej długookresowej obecności wewnątrz układu planetarnego (Muri-son et al., 1994), (Šidlichovský, 1999). Ponieważ efekt Jarkowskiego i efekty kometarne mogą mieć wpływ na obecność chaosu, w pracy **H5** zbadałem zachowanie tych parametrów w szerszym zakresie, badając więcej ciał na orbitach wstecznych i uwzględniając większy zakres potencjalnych efektów. W przeprowadzonych obliczeniach uwzględniono przypadki maksymalnego i minimalnego działania efektu Jarkowskiego poprzez symulację nachyleń osi rotacji do płaszczyzny orbity:  $\gamma = 0^\circ$  dla rotacji prostej i  $\gamma = 180^\circ$  dla rotacji wstecznej. Takie założenia maksymalizują działanie siły Jarkowskiego i w konsekwencji maksymalny możliwy dryf półosi wielkiej – dodatni lub ujemny. W sytuacji, gdy dane obserwacyjne nie dostarczają jeszcze informacji o orientacji osi, takie symulacje dają najlepsze wyobrażenie o możliwym działaniu efektu Jarkowskiego. Długookresowy dryf w półosi wielkiej powoduje, że ciała trafiają w obszary szczególnych rezonansów w ruchu średnim z planetami,



co w konsekwencji powoduje zmianę reżimu dynamicznego, a więc i stabilności w sensie Lapunowa. Kolejny czynnik to regularne ciasne zbliżenia z planetami, które również wpływają na stabilność. Z tego powodu, otrzymane czasy Lapunowa mogą się znacznie różnić po uwzględnieniu efektu Jarkowskiego, jak to opisano w pracy **H5**. Uzyskane wyniki potwierdzają, że efekt ten odgrywa znaczny wpływ na przewidywalność orbit, jakkolwiek niektóre dane fizyczne konieczne do modelowania są jeszcze mało dokładne. W pracy **H5** został dodatkowo poruszony problem perturbacji pochodzących od sił niegrawitacyjnych, związanych z aktywnością kometarną. Jak wspomniano wcześniej, komety są ciałami o umiarkowanie przewidywalnej aktywności i w grę wchodzi tylko krótkookresowe symulacje ze współczynnikami przyspieszeń kometarnych (Marsden et al., 1973). Badana populacja małych ciał to niedawno odkryte obiekty, często zmieniające status z planetoid na komety i z pewnością należy to uwzględnić we wnioskowaniu, zwłaszcza w świetle mocnej hipotezy, że są to ciała z Obłoku Oorta (de la Fuente Marcos and de la Fuente Marcos, 2014). W pracy zbadano najlepiej udokumentowany obserwacyjnie przypadek takiej komety, jaką jest 333P/LINEAR, poprzednio znana jako planetoida wsteczna typu NEA (2007 VA85). Zbadano też porównawczo dynamikę komety podobnej klasy, 161P Hartley/IRAS. Z rezultatów wynika, że uwzględnienie efektów kometarnych powoduje zmiany w pólach wielkiej komety 333P o rząd większe, niż na skutek efektu Jarkowskiego. Podobnie zachowuje się kometa 161P. W obu przypadkach kometarne efekty niegrawitacyjne powodują znaczne zmiany w parametrach chaotycznych, jakimi są czasy Lapunowa. Zbadano dość szeroki zakres błędów w wyznaczonych przyspieszeniach kometarnych i na tej podstawie można sądzić, że wybór modelu zaburzeń niegrawitacyjnych jest kluczowy dla dalszych wniosków dotyczących chaotycznego zachowania badanych orbit. Dokładniejsze modele prawdopodobnie pojawią się wkrótce, wraz z napływem nowych obserwacji i informacji o cechach fizycznych planetoid i komet.

#### 4.2.7 Zbadanie wiarygodności scenariuszy powstawania orbit wstecznych

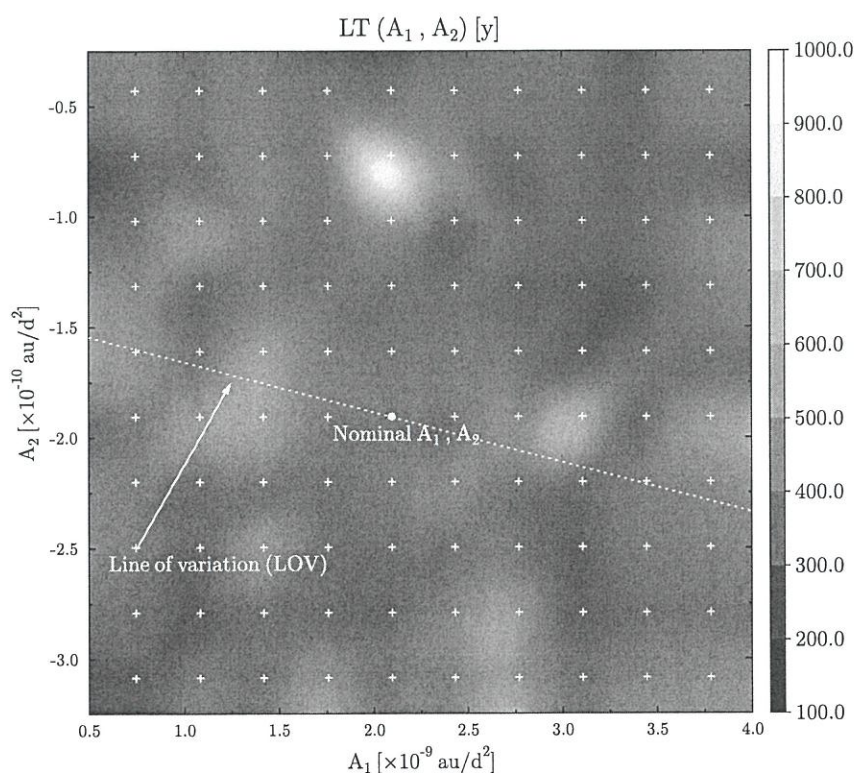
Jeśli przyjąć założenie, że orbity wsteczne powstają po prostu na skutek perturbacji planetarnych, warto zweryfikować statystycznie wydajność takiego procesu. Dokonałem tego w pracy **H4**. Odwrócenie (inwersja) orbity określana w literaturze jako *flipping* (de la Fuente Marcos et al., 2015) jest prawdopodobnym zjawiskiem, co udało się oszacować ilościowo. W tym celu dla każdej z wybranych 39 planetoid wstecznych zbadalem dynamikę chmury klonów o rozkładzie zbliżonym do obserwacyjnego. Podstawowym założeniem było przyjęcie, że każdy z wyznaczonych elementów orbitalnych grupy klonów ma rozkład normalny (Gaussa), a rozrzut indywidualnych wartości odpowiada błędom wyznaczenia tych elementów. Podobnie, jak w przypadku szacowania prawdopodobieństwa kolizji z planetami, posłużyłem się chmurą klonów do obliczenia prawdopodobieństw odwrócenia orbit (Rys. 8), przy czym badałem zarówno scenariusze zmiany ruchu z prostego na wsteczny (w pobliżu nachyleń 90 stopni), jak i większych zmian, np. z orbit o ruchu prostym i na-



Rysunek 6: Wartości LCI, oszacowane numerycznie dla planetoidy 2008 KV42 (u góry, także w powiększeniu), możliwe warianty ewolucji półośi wielkiej z zaznaczonymi rezonansami w ruchu średnim z Neptunem (panel środkowy) oraz ciasne zbliżenia planetoidy do Neptuna z zaznaczonym promieniem Hilla (u dołu). Przedstawiono trzy warianty modelu dynamicznego: grawitacyjny oraz dwa maksymalnie efektywne modele uwzględniające efekt Jarkowskiego przy rotacji prostej i wstecznej. 2008 KV42 jest jednym z większych badanych obiektów. Potencjalnie działający efekt Jarkowskiego ma niewielki wpływ na oszacowaną numerycznie stabilność w sensie Lapunowa. Źródło: praca H5.

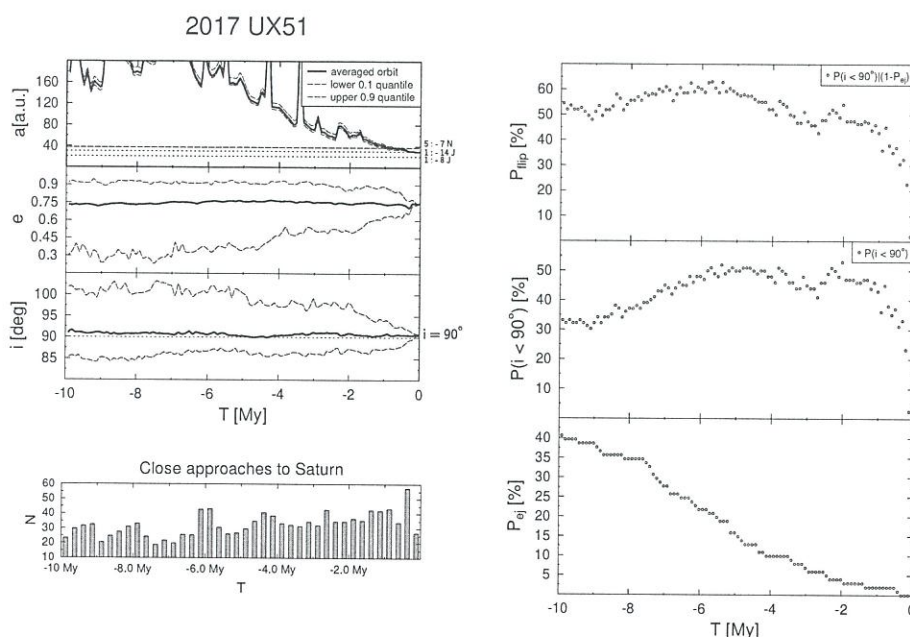
chyleniach poniżej 60 stopni, aż do ruchu wstecznego. Określiłem również ze statystycznego punktu widzenia, jaki ułamek czasu życia planetoidy spędziły na orbitach prostych, a jaki na wstecznych. Po uwzględnieniu faktu, że





Rysunek 7: Zależność oszacowanych czasów Lapunowa (LT) od parametrów przyspieszenia niegrawitacyjnego  $A_1$  i  $A_2$  dla komety 333P. Zbadano chmurę obiektów (klonów), uwzględniając zakres możliwych błędów w wyznaczonych wartościach przyspieszeń kometarnych. Pośrodku zaznaczono rozwiązanie nominalne, dla najlepiej pasującej orbity oraz tzw. linię wariacji (LOV) (Milani and Valsecchi, 1999). Dla komety 333P, wartości LT w zależności od parametrów  $A_1$  i  $A_2$  mogą się wahać w zakresie od 100 do niemal 1000 lat. Źródło: praca H5.

nie wszystkie badane ciała testowe (klony) miały równe czasy życia i oszacowaniu inwersji poprzez prawdopodobieństwo warunkowe, okazało się, że przypadki odwrócenia tych orbit w Układzie Słonecznym są możliwe (i nie jest to prawdopodobieństwo zaniedbywalnie małe). W ogólności, po zbadaniu 39 przypadków w pracy H4 można ten proces wstępnie określić jako zbyt mało wydajny, aby wytłumaczyć znaną ilość orbit wstecznych. Jako główne czynniki wpływające na odwrócenie orbity można podać ciasne zbliżenia do planet oraz rezonanse wsteczne (RMMR). Istotną konkluzją z omówionych badań jest stwierdzenie, że potencjalnie mogą istnieć inne perturbacje pochodzące od masywnych obiektów, niż określone w modelu dynamicznym użytym w pracy. Inna przyczyna zewnętrzna to możliwe przechwycenie obiektów znanych jako międzyplanetarne. Zapewne w najbliższej przyszłości proces powstawania orbit wstecznych zostanie zweryfikowany dokładniej, gdy będziemy mieli do czynienia z większą ilością danych obserwacyjnych.



Rysunek 8: Elementy orbitalne (po lewej) i prawdopodobieństwo odwrócenia lub opuszczenia układu planetarnego (po prawej) planetoidy 2017 UX51 przy całkowaniu wstecznym. Pierwsze trzy wykresy pokazują uśrednione elementy  $a$ ,  $e$ ,  $i$ . Aby pokazać rozpiętość elementów, uwzględniono górne i dolne kwantyle rozkładu. Statystyka zbliżeń, pokazana na dole po lewej stronie dotyczy średniej liczby ciasnych zbliżeń do Saturna, zliczanych w przedziałach 0.25 My. Prawdopodobieństwo odwrócenia orbity  $P_{flip}$ , pokazane u góry po lewej stronie jest prawdopodobieństwem warunkowym (przy założeniu, że obiekt pozostaje na orbicie zamkniętej wewnątrz układu). Prawdopodobieństwa osiągnięcia orbity o ruchu prostym ( $P(i < 90^\circ)$ ) oraz prawdopodobieństwo opuszczenia układu ( $P_{ej}$ ) są odpowiednio pokazane niżej, na prawym panelu. Scenariusz inwersji orbity w przeszłości jest w tym przypadku bardzo prawdopodobny. Oprócz obecności rezonansów w ruchu średnim z Jowiszem i Neptunem, potwierdzonych również przez innych autorów (Li et al., 2019), planetoida wykazuje umiarkowaną liczbę ciasnych zbliżeń, głównie do Saturna.

#### 4.2.8 Podsumowanie osiągnięć

Przedstawione powyżej publikacje dotyczą różnych aspektów badań dynamiki i stabilności małych ciał na orbitach wstecznych, wykonanych w oparciu o metody numeryczne. Prace badawcze są wykonane w oparciu o istniejące metody obliczeniowe, z wykorzystaniem zaawansowanego oprogramowania, zazwyczaj zmodyfikowanego indywidualnie na potrzeby zagadnienia oraz oryginalnych programów własnych.

Kilka rozwiązań użytych w analizie danych jest unikalnych. Jest to między innymi sposób dowiązania symulacji numerycznych do błędów obserwacyjnych, a także sposoby szacowania parametrów związanych ze stabilnością orbit. Dzięki nim udało się uzyskać nowe, oryginalne wyniki w zakresie badań orbit wstecznych. Na moje główne działania związane z omówioną tematyką składają się opisane publikacje **H1 – H5**, ale także siedem innych artykułów o statusie materiałów konferencyjnych, wymienionych poniżej w literaturze (Kan-



kiewicz and Włodarczyk, 2010a,b, 2014a,b, 2016, 2018b, 2020).

W odniesieniu do postawionych celów, udało mi się zrealizować następujące cele naukowe:

1. Na podstawie dostępnych metod i indywidualnie opracowanego oprogramowania, udało mi się stworzyć środowisko do kompleksowych badań numerycznych małych ciał, w szczególności tych na orbitach wstecznych. Jest ono oparte zarówno o zmodyfikowane, istniejące metody numeryczne, jak i własne narzędzia do analizy danych. Istniejące narzędzia zostały zaadaptowane (m.in. zintegrowane z precyzyjnymi efermerydami planetarnymi, badaniem statystyk zbliżeń do planet oraz wykrywaniem rezonansów w ruchu średnim i wiekowych). Na bazie tych metod powstało oprogramowanie do ilościowego szacowania zachowań chaotycznych.
2. We wszystkich badanych zagadnieniach dowiazałem analizę danych i całe wnioskowanie statystyczne do oryginalnych obserwacji i ich błędów. W omówionych pracach, szczególną uwagę poświęciłem dowiązaniu obliczeń numerycznych do obserwacji, m.in. poprzez założenie, że elementy orbitalne użyte w danych początkowych powinny mieć rozrzut odpowiadający rzeczywistemu rozkładowi błędów obserwacyjnych. Wymagało to kompleksowej analizy danych od wyznaczania orbity aż do badań długookresowej ewolucji elementów i innych parametrów. Pozwoliło to na bardzo szerokie zbadanie dynamiki obiektów wstecznych. Dodatkowo, stworzyłem i zastosowałem w obliczeniach modele dynamiczne uwzględniające efekty niegrawitacyjne, czego wcześniej nie robiono dla badanej grupy małych ciał.
3. Zbadałem, jakie są czasy życia w Układzie Słonecznym ciał na orbitach wstecznych. Oryginalne wyniki dotyczą długookresowej ewolucji odnoszącej się do przeszłości i przyszłości. Są w większości spójne i porównywalne z późniejszymi wynikami innych autorów. Pozwoliło to odpowiedzieć na pytanie, jak długo te obiekty przetrwały lub mogą przetrwać w Układzie Słonecznym.
4. Wyzaczyłem parametry określające ilościowo obecność chaosu w orbitalnym ruchu wstecznym. Pozwoliło to scharakteryzować obecność chaosu zdefiniowanego w sensie matematycznym jako wrażliwość na warunki początkowe – pod względem ilościowym. Dzięki temu można było porównać stabilność w sensie Lapunowa różnych orbit wstecznych. Jest to bardzo często używane kryterium, zatem rezultaty można porównywać i odnosić do innych ciał w układzie. Umożliwiło to także konfrontację z dynamicznymi czasami życia, które są nieco innymi parametrami.
5. Zweryfikowałem scenariusze powstawania orbit wstecznych na skutek odwrócenia (inwersji) orbit. Dopasowane do obserwacji scenariusze pozwoliły na określenie prawdopodobieństwa oraz innych parametrów statystycznych, pozwalających realnie oszacować wydajność takich procesów. Otrzymane rezultaty potwierdziły, że zdarzenia te mogą zachodzić

z niewielkim prawdopodobieństwem, zatem tylko niewielka część badanych orbit mogła ewoluować w ten sposób.

Podsumowując, w opisanych badaniach dynamiki planetoid wstecznych zastosowałem kompleksową analizę propagacji błędów obserwacyjnych (klonowanie, czyli tworzenie rozkładów danych początkowych, pokrywających zakresy rzeczywistych błędów wyznaczania orbit), a także zbadałem własności dynamiczne tych ciał pod kątem dodatkowych, możliwych do wystąpienia efektów perturbacyjnych. Rezultaty moich badań w zestawieniu z wynikami innych autorów wskazują, jaka metodyka i jakie dane będą w użyciu w najbliższej przyszłości w badaniach nietypowej populacji małych ciał, jakimi są planetoidy i komety wsteczne. Wielu autorów porusza niewyjaśnione problemy podobieństw komet i planetoid wstecznych (Licandro et al., 2018), a także hipotetycznych związków nietypowo nachylonych orbit z obiektami międzygwiazdowymi, których ostatnio odkrywa się coraz więcej (Marčeta and Novaković, 2020), (Namouni and Morais, 2020). Wydaje się również, że sztywna klasyfikacja małych ciał jako komet lub planetoid według kryteriów dynamicznych to za mało, aby znaleźć pokrewieństwo obiektów na podobnych orbitach – cechy fizyczne małych ciał zapewne pozwolą je klasyfikować i rozróżniać dokładniej (Sekiguchi et al., 2018). Z tego powodu, masowe wyznaczanie parametrów fizycznych będzie w przyszłości kluczem do poznania natury i pochodzenia planetoid i komet. Jak dotąd, dla badanych obiektów nie osiągnięto jeszcze tak dużej precyzji modelowania, aby słabe efekty niegrawitacyjne wykazały większą istotność, ale ostatnie badania (Hromakina et al., 2021) pokazują, że po wyeliminowaniu innych błędów ich uwzględnianie stanie się konieczne. Zacytowane wyżej wyniki różnych autorów potwierdzają, że opisana i zastosowana przeze mnie metodyka badań może być skuteczna. W świetle ich wyników, wraz z nowymi odkryciami i sukcesywnymi obserwacjami prawdopodobnie zbliża się moment, kiedy niewyjaśnione hipotezy związane z istnieniem orbit wstecznych zostaną lepiej zweryfikowane. W najbliższym czasie otworzą się nowe możliwości związane z wykorzystaniem obliczeń równoległych na wielką skalę, także dla dużych zbiorów danych. Powstają też nowe narzędzia numeryczne, które te obliczenia zoptymalizują i ułatwią. W związku z tym, po uzupełnieniu danych pochodzących z obserwacji moje zainteresowania naukowe w dalszym ciągu będą koncentrować się na badaniu dynamicznych scenariuszy pochodzenia małych ciał na orbitach wstecznych.

## Literatura

- G. Benettin, L. Galgani, and J.-M. Strelcyn. Kolmogorov entropy and numerical experiments. *PRA*, 14:2338–2345, December 1976. doi: 10.1103/PhysRevA.14.2338.
- J. Borovička, P. Koteš, P. Spurný, J. Boček, and R. Štork. A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids. *Icarus*, 174:15–30, March 2005. doi: 10.1016/j.icarus.2004.09.011.



- R. Brasser, M. E. Schwamb, P. S. Lykawka, and R. S. Gomes. An Oort cloud origin for the high-inclination, high-perihelion Centaurs. *MNRAS*, 420:3396–3402, March 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20264.x.
- M. Brož, D. Vokrouhlický, A. Morbidelli, D. Nesvorný, and W. F. Bottke. Did the Hilda collisional family form during the late heavy bombardment? *MNRAS*, 414:2716–2727, 2011.
- J. E. Chambers and M. A. Murison. Pseudo-High-Order Symplectic Integrators. *AJ*, 119:425–433, January 2000. doi: 10.1086/301161.
- Steven R. Chesley, Steven J. Ostro, David Vokrouhlický, David Čapek, Jon D. Giorgini, Michael C. Nolan, Jean-Luc Margot, Alice A. Hine, Lance A. M. Benner, and Alan B. Chamberlin. Direct Detection of the Yarkovsky Effect by Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka. *Science*, 302(5651):1739–1742, December 2003. doi: 10.1126/science.1091452.
- P. M. Cincotta and C. Simó. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials - I. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 147:205–228, December 2000. doi: 10.1051/aas:2000108.
- C. de la Fuente Marcos and R. de la Fuente Marcos. Large retrograde Centaurs: visitors from the Oort cloud? *APSS*, June 2014. doi: 10.1007/s10509-014-1993-9.
- C. de la Fuente Marcos, R. de la Fuente Marcos, and S. J. Aarseth. Flipping minor bodies: what comet 96P/Machholz 1 can tell us about the orbital evolution of extreme trans-Neptunian objects and the production of near-Earth objects on retrograde orbits. *MNRAS*, 446:1867–1873, January 2015. doi: 10.1093/mnras/stu2230.
- M. J. Duncan, H. F. Levison, and M. H. Lee. A Multiple Time Step Symplectic Algorithm for Integrating Close Encounters. *AJ*, 116:2067–2077, October 1998. doi: 10.1086/300541.
- K. Goździewski, E. Bois, A. J. Maciejewski, and L. Kiseleva-Eggleton. Global dynamics of planetary systems with the MEGNO criterion. *Astronomy and Astrophysics*, 378:569–586, November 2001. doi: 10.1051/0004-6361:20011189.
- S. Greenstreet, B. Gladman, H. Ngo, M. Granvik, and S. Larson. Production of Near-Earth Asteroids on Retrograde Orbits. *APJL*, 749:L39, April 2012. doi: 10.1088/2041-8205/749/2/L39.
- T. Hromakina, I. Belskaya, Yu. Krugly, V. Rumyantsev, O. Golubov, I. Kyrylenko, O. Ivanova, S. Velichko, I. Izvekova, A. Sergeyev, I. Slyusarev, and I. Molotov. Small Solar System objects on highly inclined orbits. Surface colours and lifetimes. *Astronomy and Astrophysics*, 647:A71, March 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202039737.

- T. J. Jopek and Z. Kaňuchová. IAU Meteor Data Center-the shower database: A status report. *PSS*, 143:3–6, September 2017. doi: 10.1016/j.pss.2016.11.003.
- P. Kankiewicz. Orbit inversion scenarios of minor bodies in retrograde orbit. *PSS*, 191:105031 (**H4**), October 2020. doi: 10.1016/j.pss.2020.105031.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Stability of the Most Hazardous Mars-Crossers. *Acta Astronomica*, 56:413–425 (**H1**), December 2006.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Possible Origin of Asteroids on Retrograde Orbits. In *Protecting the Earth against Collisions with Asteroids and Comet Nuclei*, page 52, June 2010a.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. The Orbital Evolution of 2007 VA85, an Amor-type Asteroid on a Retrograde Orbit. In *Protecting the Earth against Collisions with Asteroids and Comet Nuclei*, page 268, June 2010b.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Orbital Evolution and Impact Hazard of Asteroids on Retrograde Orbits. In T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, and I. P. Williams, editors, *Meteoroids 2013*, pages 27–33, July 2014a.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Asteroids in Retrograde Orbits: Interesting Cases. In *XXXVI Polish Astronomical Society Meeting*, pages 167–169, December 2014b.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Yarkovsky effect in the motion of asteroids in retrograde orbits. In Agata Różańska and Michał Bejger, editors, *37th Meeting of the Polish Astronomical Society*, volume 3, pages 286–289, June 2016.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Dynamical lifetimes of asteroids in retrograde orbits. *MNRAS*, 468(4):4143–4150 (**H2**), July 2017. doi: 10.1093/mnras/stx558.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. How long will asteroids on retrograde orbits survive? *PSS*, 154:72–76 (**H3**), May 2018a. doi: 10.1016/j.pss.2018.03.001.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Non-gravitational effects in the motion of comet 333P/LINEAR. In Agata Różańska, editor, *XXXVIII Polish Astronomical Society Meeting*, volume 7, pages 132–134, August 2018b.
- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Chaotic Properties of Minor Bodies in Retrograde Orbits. In Katarzyna Małek, Magdalena Polińska, Agnieszka Majczyna, Grzegorz Stachowski, Radosław Poleski, Łukasz Wyrzykowski, and Agata Różańska, editors, *XXXIX Polish Astronomical Society Meeting*, volume 10, pages 97–100, October 2020.



- P. Kankiewicz and I. Włodarczyk. Impact of non-gravitational effects on chaotic properties of retrograde orbits. *A&A*, 646:A182 (**H5**), February 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202037738.
- Miao Li, Yukun Huang, and Shengping Gong. Survey of asteroids in retrograde mean motion resonances with planets. *AA*, 630:A60, Oct 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201936117.
- J. Licandro, M. Popescu, J. de León, D. Morate, O. Vaduvescu, M. De Prá, and V. Ali-Laoga. The visible and near-infrared spectra of asteroids in cometary orbits. *Astronomy and Astrophysics*, 618:A170, October 2018. doi: 10.1051/0004-6361/201832853.
- N. P. Maffione, L. A. Darriba, P. M. Cincotta, and C. M. Giordano. A comparison of different indicators of chaos based on the deviation vectors: application to symplectic mappings. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 111: 285–307, November 2011. doi: 10.1007/s10569-011-9373-z.
- B. G. Marsden, Z. Sekanina, and D. K. Yeomans. Comets and nongravitational forces. V. *AJ*, 78:211, March 1973. doi: 10.1086/111402.
- D. Marčeta and B. Novaković. Retrograde orbits excess among observable interstellar objects. *MNRAS*, May 2020. doi: 10.1093/mnras/staa1378.
- A. Milani and A. M. Nobili. An example of stable chaos in the Solar System. *Nature*, 357:569–571, June 1992. doi: 10.1038/357569a0.
- A. Milani and G. B. Valsecchi. The Asteroid Identification Problem. II. Target Plane Confidence Boundaries. *Icarus*, 140:408–423, August 1999. doi: 10.1006/icar.1999.6135.
- A. Milani, G. Gronchi, G. Tommei, F. Bernardi, S. Cicalo, D. Farnocchia, Z. Knezevic, B. Novakovic, M. E. Sansaturio, O. Arratia, and G. B. Valsecchi. Orbit consortium: Orbit software 1997-2012, 1997. URL "http://adams.dm.unipi.it/~orbmain/orbit/".
- M. A. Murison, M. Lecar, and F. A. Franklin. Chaotic motion in the outer asteroid belt and its relation to the age of the solar system. *AJ*, 108:2323–2329, December 1994. doi: 10.1086/117245.
- F. Namouni and M. H. M. Morais. An interstellar origin for high-inclination Centaurs. *MNRAS*, 494(2):2191–2199, April 2020. doi: 10.1093/mnras/staa712.
- T. Sekiguchi, S. Miyasaka, B. Dermawan, T. Mueller, N. Takato, J. Watanabe, and H. Boehnhardt. Thermal infrared and optical photometry of Asteroidal Comet C/2002 CE<sub>10</sub>. *Icarus*, 304:95–100, Apr 2018. doi: 10.1016/j.icarus.2017.12.037.
- G. Sitarski. Generating of “Clones” of an Impact Orbit for the Earth-Asteroid Collision. *Acta Astronomica*, 56:283–292, September 2006.

- J. C. Sprott. *Chaos and Time-Series Analysis*. Oxford University Press, 2003.
- G. Tancredi. A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters. *Icarus*, 234:66–80, May 2014. doi: 10.1016/j.icarus.2014.02.013.
- M. Šidlichovský. On Stable Chaos in the Asteroid Belt. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 73:77–86, January 1999. doi: 10.1023/A:1008330610152.
- K. Volk and R. Malhotra. Do Centaurs preserve their source inclinations? *Icarus*, 224:66–73, May 2013. doi: 10.1016/j.icarus.2013.02.016.
- P. Wiegert and S. Tremaine. The Evolution of Long-Period Comets. *Icarus*, 137(1):84–121, Jan 1999. doi: 10.1006/icar.1998.6040.



## **5 Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

Poza badaniami związanymi z planetoidami wstecznymi pracowałem również nad innymi zagadnieniami mechaniki nieba oraz różnymi projektami z szerokiego zakresu astrofizyki obserwacyjnej, które opisałem odpowiednio poniżej.

**Dynamika planetoid z rodziny Westy - współpraca przy projekcie NCN Sonata.** Obecnie jestem wykonawcą w projekcie NCN SONATA pt. „Planetoidy typu V z wewnętrznego Pasa Głównego jak pozostałości zróżnicowanych planetozymali”. Projekt obejmuje kompleksowe badania małych ciał z rodziny Westy: kampanię obserwacyjną, wyznaczanie własności fizycznych oraz weryfikację ich pochodzenia w kontekście hipotezy istnienia wielu zróżnicowanych ciał pierwotnych. W projekcie zajmuję się m.in. długookresowym modelowaniem dynamiki planetoid z uwzględnieniem efektu Jarkowskiego. W związku z tym, jestem współautorem kilku prac, które są powiązane w realizacją projektu: Oszkiewicz et al. (2015, 2017, 2019, 2020). W bieżącym roku przewidziane jest opublikowanie kolejnych rezultatów.

**Udział w projekcie SANORDA – współpraca z IOA UAM.** Jako członek zespołu, we współpracy z Instytutem Obserwatorium Astronomiczne UAM oraz firmą ITTI z Poznania wziąłem udział w projekcie: Service for Archival NEO Orbital and Rotational Data Analysis (SANORDA). Zadaniem projektu jest zbieranie i analizowanie danych obserwacyjnych obiektów zbliżających się do Ziemi na potrzeby projektów astronomicznych. Mój udział polegał na współpracy przy tworzeniu specjalistycznego oprogramowania, analizującego dane obserwacyjne.

**Współpraca z IOA UAM w zakresie obserwacji optycznych sztucznych satelitów Ziemi.** Brałem także udział w innym projekcie prowadzonym przez IOA UAM, związanym z projektowaniem systemu obserwacji optycznych sztucznych satelitów Ziemi: „Polish Component to SSA: ESA Space Surveillance & Tracking, NEA and Space Weather”. Elementem tego projektu było przeprowadzenie ekspertyz i kompleksowe przygotowanie oprogramowania do automatycznej analizy obserwacji sztucznych satelitów, śmieci kosmicznych i planetoid zbliżających się do Ziemi. Moja rola polegała na przygotowaniu ekspertyzy w zakresie obserwacji satelitarnych oraz zbadaniu możliwości wykonywania masowej, automatycznej astrometrii CCD sztucznych satelitów.

**Projekty związane z detektorami promieniowania kosmicznego, udział w konsorcjum NICA PL.** Jestem współautorem kilku prac naukowych dotyczących detekcji wysokoenergetycznych cząstek (mionów), zarejestrowanych w eksperymencie ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) na detektorze

ACORDE (*A Cosmic Ray Detector for ALICE*). Moja rola w tym projekcie polegała na analizie kierunkowości mionów kosmicznych i rozkładu przestrzennego ich hipotetycznych źródeł (Kankiewicz et al., 2017). Pracę tę zrealizowałem wykorzystując doświadczenia z lokalnie wykonywanych badań fizycznych, ze współpracownikami z Instytutu Fizyki UJK oraz Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Warszawie.

W konsekwencji powyższej aktywności naukowej i otrzymanych wyników badawczych, obecnie jestem zaangażowany w część astrofizyczną projektu NICA-MPD prowadzonego przez polski zespół w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej. Jestem członkiem konsorcjum NICA-PL (*Nuclotron-based Ion Collider Facility*) i odbyłem dwa wyjazdy do Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej (Rosja). Obejmowały one konferencje, seminaria, prace zespołu w Instytucie, publikacje (Bielewicz et al., 2019, 2020) oraz inne działania praktyczne w ramach kolaboracji eksperymentu MPD (*Multi Purpose Detector*).

## Literatura do punktu 5

- M. Bielewicz, M. Milewicz-Zalewska, M. Grodzicka-Kobylka, S. Mianowski, P. Sibczynski, L. Swiderski, T. Szczesniak, M. Linczuk, D. Wielanek, A. Kisiel, G. Kasprowicz, K. Pozniak, W. Zabolotny, R. Romaniuk, A. Chłopik, A. Banczer, K. Grodzicki, M. Pietrzak, A. Dudziński, E. Jaworska, E. Strugalska-Gola, M. J. Peryt, M. Rybczynski, Z. Włodarczyk, G. Stefanek, and P. Kankiewicz. MCORDE - MPD Cosmic Ray Detector a new features. In *European Physical Journal Web of Conferences*, volume 204 of *European Physical Journal Web of Conferences*, page 07016, September 2019. doi: 10.1051/epjconf/201920407016.
- M. Bielewicz, M. Grodzicka-Kobylka, B. Maksiak, S. Mianowski, D. Pszczel, P. Sibczynski, J. Stepaniak, L. Swiderski, T. Szczesniak, M. Linczuk, D. Wielanek, A. Kisiel, G. Kasprowicz, K. Pozniak, W. Zabolotny, R. Romaniuk, A. Chłopik, A. Banczer, K. Grodzicki, A. Dudziński, E. Jaworska, E. Strugalska-Gola, M. Szuta, M. J. Peryt, K. Roslon, M. Rybczynski, Z. Włodarczyk, G. Stefanek, P. Kankiewicz, A. Synfeld-Kazuch, and M. Milewicz-Zalewska. The cosmic ray detector for the NICA collider. In *European Physical Journal Web of Conferences*, volume 239 of *European Physical Journal Web of Conferences*, page 07004, May 2020. doi: 10.1051/epjconf/202023907004.
- P. Kankiewicz, M. Rybczyński, Z. Włodarczyk, and G. Wilk. Muon Bundles as a Sign of Strangelets from the Universe. *APJ*, 839(1):31, April 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa67ee.
- D. Oszkiewicz, P. Kankiewicz, I. Włodarczyk, and A. Kryszczyńska. Differentiation signatures in the Flora region. *Astronomy and Astrophysics*, 584: A18, December 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201526219.



- D. Oszkiewicz, A. Kryszczyńska, P. Kankiewicz, N. A. Moskovitz, B. A. Skiff, T. B. Leith, J. Ďurech, I. Włodarczyk, A. Marciniak, S. Geier, G. Fedorets, V. Troianskyi, and D. Föhring. Physical and dynamical properties of the unusual V-type asteroid (2579) Spartacus. *Astronomy and Astrophysics*, 623:A170, March 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201833641.
- D. Oszkiewicz, V. Troianskyi, D. Föhring, A. Galád, T. Kwiatkowski, A. Marciniak, B. A. Skiff, S. Geier, W. Borczyk, N. A. Moskovitz, P. Kankiewicz, S. Gajdoš, J. Világi, L. Polčic, T. Kluwak, E. Wilawer, V. Kashuba, S. Udovichenko, L. Keir, K. Kamiński, M. Devogele, and A. Gustafsson. Spin rates of V-type asteroids. *Astronomy and Astrophysics*, 643:A117, November 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202038062.
- D. A. Oszkiewicz, B. A. Skiff, N. Moskovitz, P. Kankiewicz, A. Marciniak, J. Licandro, M. A. Galiazzo, and W. Zeilinger. Non-Vestoid candidate asteroids in the inner main belt. *Astronomy and Astrophysics*, 599:A107, March 2017. doi: 10.1051/0004-6361/201629551.

## 6 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

**Działalność dydaktyczna.** Posiadam doświadczenie dydaktyczne od czasu studiów doktorackich na UAM w Poznaniu (1998-2002), gdzie prowadziłem ćwiczenia laboratoryjne oraz konwersatoria. Później, w ramach działalności dydaktycznej prowadziłem wykłady, konwersatoria, laboratoria, przedmioty specjalistyczne na kierunkach Fizyka, Informatyka oraz Inżynieria Danych w IF UJK. Zajęcia prowadzone przeze mnie w latach 2004-2021 obejmowały ponad 15 przedmiotów. Głównie były to przedmioty związane z astronomią (astronomia z astrofizyką, pracownia astronomiczna), ale prowadziłem również wiele zajęć związanych z metodami obliczeniowymi (metody statystyczne, obliczenia inżynierskie) oraz przedmioty informatyczne (wstęp do programowania, język i środowisko programisty, bezpieczeństwo systemów komputerowych) na wymienionych wyżej kierunkach. Łącznie prowadziłem 8 wykładów kursowych, 4 konwersatoria i 9 przedmiotów w formie ćwiczeń laboratoryjnych. Zajęcia są pozytywnie oceniane przez studentów. Byłem także promotorem 8 prac magisterskich na kierunku Fizyka oraz jednej pracy licencjackiej na kierunku Informatyka. Wszystkie promowane prace dotyczyły astronomii, a studenci brali udział w wykonywanych lokalnie obserwacjach, których wyniki posiadają oryginalną wartość naukową. Studenci są również współautorami publikacji elektronicznych: cyrkularzy MPC IAU<sup>2</sup> gdzie udokumentowane są wybrane obserwacje związane z ich pracami.

**Popularyzacja astronomii.** Kontynuuję aktywną działalność popularyzatorską w zakresie astronomii. W związku z tą działalnością, w roku 2004 wraz

<sup>2</sup>The Minor Planet Center, Division F of the International Astronomical Union

z zespołem z Zakładu Astrofizyki IF otrzymałem Zespołową Nagrodę Rektora AŚ. Z okazji różnych wydarzeń (festiwali nauki, dni otwartych, Roku Astronomii 2009, ciekawych zjawisk astronomicznych, jak np. zaćmienia i tranzyty planet) przeprowadziłem wiele wykładów, pokazów i obserwacji w Obserwatorium Astronomicznym UJK, a od 2005 r. prowadzę seanse w Planetarium UJK. Udzieliłem także cyklu wywiadów dla Radia Kielce (m. in. audycje "Lato pod gwiazdami"), wystąpiłem w audycji Radia Kielce o pozaziemskich układach planetarnych oraz kilku programach TVP Kielce. Prowadziłem również zajęcia i otwarte wykłady z astronomii na Świętokrzyskim Uniwersytecie Trzeciego Wieku. Dodatkowo, wygłosiłem trzy wykłady popularne w Olsztyńskim Planetarium. W ogólności, po uzyskaniu stopnia doktora, wygłosiłem 25 wykładów popularnonaukowych o tematyce astronomicznej.

**Projekt Feniks.** Brałem udział w trzyletnim programie edukacyjnym FENIKS, realizowanym m.in. na UJK w latach 2009-2012 w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Projekt był realizowany przez konsorcjum uniwersytetów: Jagiellońskiego, Rzeszowskiego i Jana Kochanowskiego w Kielcach i dotyczył uczniów z 250 szkół z województw: małopolskiego, podkarpackiego i świętokrzyskiego. Program odniósł wielki sukces popularyzacyjny w regionie, angażując około 3000 uczniów. Moje działania obejmowały prowadzenie zajęć i pokazów laboratoryjnych na uczelni oraz w szkołach, wykłady dla uczestników projektu oraz przygotowanie publikacji dydaktycznej.

**Udział w projekcie PROGRES.** W ramach projektu „PROGRES - Program rozwoju: Gospodarka - Edukacja – Sukces” opiekowałem się grupami studentów Informatyki UJK podczas wyjazdów na konferencje: II Konferencja „Technologie przetwarzania danych” (Poznań, 2010) oraz „Górska Konferencja Informatyków” (Wisła, 2012). W ramach projektu PROGRES wzięłem udział w wizycie studyjnej kadry dydaktycznej kierunku Fizyka Techniczna w Elektrowni Jądrowej Forsmark (Szwecja) oraz na Uniwersytecie w Sztokholmie.


**Współorganizacja konferencji.** Brałem udział w organizowaniu kilku konferencji astronomicznych, które odbyły się w IF UJK. Współpracowałem m.in. przy organizacji 33 zjazdu Polskiego Towarzystwa Astronomicznego w Kielcach (2007), Cosmology School Kielce (2015) i konferencji „Wykorzystanie Małych Teleskopów” (2005, 2016). Od 2007 roku jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Astronomicznego i biorę czynny udział w zjazdach i konferencjach organizowanych przez PTA.

**Członkostwo w radach uczelnianych.** Od 2013 do 2019 roku byłem członkiem Rady Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego UJK, biorąc udział we wszystkich posiedzeniach. Od 2013 roku jestem członkiem Rady Instytutu (obecnie: Rady Naukowej IF UJK), gdzie pełnię funkcję Sekretarza Rady.



## 7 Pozostałe osiągnięcia

**Program badawczy dla lokalnego obserwatorium.** Od początku mojego zatrudnienia w IF UJK zajmuję się rozwojem lokalnego programu obserwacyjnego w Obserwatorium Astronomicznym UJK. Począwszy od wdrożenia najprostszych obserwacji, poprzez rejestrację teleskopu w międzynarodowych bazach danych oraz udział w kampaniach obserwacyjnych stopniowo rozwijałem możliwości teleskopu uczelnianego. Wykonywałem obserwacje astrometryczne planetoid i komet, a następnie fotometrię planetoid oraz gwiazd zmiennych o różnych klasach zmienności (kataklizmiczne, zaćmieniowe). Obserwacje, przypisane do różnych projektów były wykonywane we współpracy z wieloma obserwatoriami w Polsce i na świecie. Na podstawie tych obserwacji opublikowałem jako współautor 11 artykułów, które ukazały się w punktowanych czasopismach. Ponadto, obserwacje astrometryczne planetoid i komet były raportowane w 30 cyrkularzach MPC/MPEC IAU. W ramach tych raportów opracowywałem także obserwacje astrometryczne z innych teleskopów; dokonałem m.in. rejestracji teleskopu Southern African Large Telescope (SALT) w Minor Planet Center. W działania związane z obserwacjami oraz jako współautorów zaangażowałem również studentów realizujących prace magisterskie i licencjackie. W grudniu 2017 r. otrzymałem Nagrodę Indywidualną III stopnia Rektora UJK za wyróżniające osiągnięcia naukowe.

  
.....  
(podpis wnioskodawcy)