

# **Fotometryczny przegląd bardzo małych planetoid bliskich Ziemi**

---

*Rozprawa habilitacyjna*

Tomasz Kwiatkowski

Obserwatorium Astronomiczne  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
w Poznaniu

Poznań, 2009



Pracę tę dedykuję żonie Ewie, która w czasie jej przygotowywania była dla mnie wsparciem i źródłem inspiracji. Mimo swojego humanistycznego wykształcenia, pod wrażeniem opowieści o Williaminie Paton Stevens Fleming, Ewa nauczyła się fotometrii aperturowej i pomagała mi w żmudnej pracy przy redukcji danych z SALT'a.



W skład rozprawy wchodzi następujące prace:

- P1 Kwiatkowski, T., Kryszczyńska, A., Marciniak, A., Borczyk, A., Masi, G., Galád, A., Goncalves, R., Colas, F. (2007).  
**Photometry of 2004 RZ164: a probable binary asteroid.**  
*Astronomy and Astrophysics* 462, 341-344, DOI: 10.1051/0004-6361:20065448
- P2 Kwiatkowski, T., Kryszczyńska, A., Polińska, M., Buckley, D.A.H., O'Donoghue, D., Charles, P.A., Crause, L., Crawford, S., Hashimoto, Y., Kniazev, A., Loring, N., Romero Colmenero, E., Sefako, R., Still, M., Vaisanen, P. (2009).  
**Photometry of 2006 RH<sub>120</sub>: an asteroid temporary captured into a geocentric orbit**  
*Astronomy and Astrophysics* 495, 967-974, DOI: 10.1051/0004-6361:200810965
- P3 Kwiatkowski, T., Buckley, D.A.H., O'Donoghue, D., Charles, P.A., Crause, L., Crawford, S., Hashimoto, Y., Kniazev, A., Loring, N., Romero Colmenero, E., Sefako, R., Still, M., Vaisanen, P. (2009).  
**Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope. I. Lightcurves and periods for 14 objects.**  
*Astronomy and Astrophysics*, DOI: 10.1051/0004-6361/200913152
- P4 Kwiatkowski, T. (2009).  
**Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope. II. Discussion of YORP.**  
*Astronomy and Astrophysics*, DOI: 10.1051/0004-6361/200913153
- P5 Kwiatkowski, T., Polińska, M., Loring, N., Buckley, D.A.H., O'Donoghue, D., Kniazev, A., Romero Colmenero, E. (2009).  
**Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope. III. Lightcurves and periods for 12 objects and negative detections.**  
*Astronomy and Astrophysics*, DOI: 10.1051/0004-6361/200913468



# 1 Wstęp

Planetoidy bliskie Ziemi (near-Earth asteroids, dalej oznaczane skrótem NEAs) stanowią obiekty głównego pasa planetoid, które na skutek rezonansów orbitalnych zostały skierowane na ekscentryczne orbity o odległościach perihelium poniżej 1.3 AU. W wewnętrznym rejonie Układu Planetarnego ich ewolucja przebiega inaczej niż w pasie głównym. Dominującą rolę odgrywają oddziaływania pływowe w czasie przejść w pobliżu planet (Bottke et al. 1997) oraz działanie efektów niegrawitacyjnych takich jak efekt Yarkovskiego (Farinella and Vokrouhlicky, 1999) i YORP (Rubincam 2000). Mechanizmy te wpływają nie tylko na ruch orbitalny NEAs lecz również na ich ruch obrotowy wokół osi. Prowadzi to do powstawania złożonych modów rotacji (tumbling), zmiany prędkości kątowej (zarówno przyspieszanie rotacji, jak i jej spowalnianie) oraz zmian położenia osi rotacji w przestrzeni. Możliwa jest wtedy zmiana kształtu planetoidy, utrata masy, prowadząca do powstawania układów podwójnych, czy wręcz jej całkowity rozpad. Obserwacjom planetoidy, podejrzanej o podwójność, poświęcona jest praca P1.

Planetoidy bliskie Ziemi, z uwagi na częste zbliżenia do naszej planety, są łatwe do obserwacji przy pomocy teleskopów optycznych, radarów i sond kosmicznych. Potencjalne zagrożenie zderzeniem Ziemi z NEAs powoduje, że rozwijane są programy ich wykrywania i katalogowania – obecnie znanych jest ponad 6 tys. NEAs i liczba ta szybko rośnie.

Większość informacji o naturze fizycznej planetoid pochodzi ciągle z obserwacji fotometrycznych, w ramach których określa się ich średnice efektywne<sup>1</sup>, okresy rotacji, położenia osi rotacji w przestrzeni oraz kształty, przy czym najłatwiejsze do uzyskania są dwa pierwsze parametry. Przedstawiając znane średnice i okresy rotacji planetoid na wykresie logarytmicznym łatwo zauważyć (Rys. 1 w pracy P4), że dominująca większość obiektów o średnicach powyżej ok. 150 m rotuje z okresami dłuższymi niż 2.2 h. Sugeruje to, że są one zbudowane z luźno ze sobą powiązanych odłamków skalnych, które przy szybszej rotacji uległyby rozpadowi (Pravec and Harris 2000).

Okresy rotacji planetoid mniejszych od ok. 150 m sięgają nawet pojedynczych minut, co świadczy o dużej spójności materiałowej tych obiektów. Najprawdopodobniej są one w większości głęboko splekanymi odławkami skalnymi (Holsapple 2007). Te bardzo małe planetoidy (Very Small Asteroids, zwane dalej VSAs) stanowią budulec dla większych obiektów, a ich własności materiałowe są ważne dla zrozumienia ewolucji zderzeniowej planetoid, powstawania układów podwójnych jak również kraterów na powierzchniach tych ciał. Najmniejsze z VSAs (o średnicach pojedynczych metrów), wpadając w atmosferę ziemską obserwowane są jako bolidy, których rozpad zależy od ich spójności wewnętrznej.

Badając najkrótsze obserwowane okresy rotacji VSAs można próbować ustalić na wykresie  $\log D - \log P$  granicę, poza którą większość planetoid ulega rozpadowi. Do tego jednak potrzebna jest duża ilość obserwowanych obiektów, by uzyskany rezultat był statystycznie istotny. Prace P2, P3 i P5 prezentują okresy

---

<sup>1</sup>Średnica efektywna jest średnicą kuli, odbijającej tyle samo światła, co planetoida, po uśrednieniu jej blasku w czasie okresu rotacji

rotacji dla 26 nowych VSAs, co powiększa o 50% materiał dostępny analizie. Dodatkowo w pracy P5 podjęto próbę wyznaczenia współczynnika spójności planetoid (tensile strength coefficient), odpowiadającego obserwowanym okresom granicznym.

Osobnym zagadnieniem jest sam mechanizm zwiększania rotacji VSAs do okresów rzędu pojedynczych minut. Obecnie przyjmuje się (Pravec et al. 2008; Rossi et al. 2009), że jest nim efekt YORP – moment siły działający na obracającą się planetoidę na skutek niejednorodnej emisji termicznej z jej powierzchni (Rubincam 2000). Jego modelowanie napotyka ciągle na problemy, choć obserwacje potwierdzają jego występowanie i pozwalają na wyznaczenie tempa wzrostu prędkości rotacji planetoid (np. Lowry et al 2007, Durech et al. 2008). Do obserwacyjnego wyznaczenia przyspieszenia kąтового, spowodowanego przez YORP, potrzebny jest dobór planetoid, dla których można wyznaczyć okres rotacji w przynajmniej dwóch, odpowiednio odległych od siebie, momentach czasu. Dodatkowo powinny to być obiekty, w przypadku których można oczekiwać szczególnie dużej wartości przyspieszenia kąтового (które w ogólności może być zarówno dodatnie, jak i ujemne). Poszukiwaniom takich planetoid poświęcony jest rozdz. 3 pracy P4.

Istnieje jeszcze jeden sposób testowania efektu YORP. Capek and Vokrouhlicky (2004) wykazali, że w przypadku VSAs efekt YORP powinien prowadzić do ustawiania osi rotacji tych obiektów prostopadle do płaszczyzny ich orbity wokół Słońca. W P4 wskazałem planetoidy, dla których w najbliższej przyszłości możliwe będzie wyznaczenie ich osi rotacji. Dodatkowo, w oparciu o obserwacje na SALT'cie i dane uzyskane przez Hergenrother et al. (2009) wyznaczyłem wstępne położenie bieguna planetoidy 2006 XY. Jej oś rotacji jest nachylona do płaszczyzny orbity pod kątem mniejszym niż 50 stopni. Jest to zachęcający wynik, który nie przeczy hipotezie Capka i Vokrouhlickiego (2004).

## 2 Wyznaczanie okresów rotacji bardzo małych NEAs

Etapem wstępnym do prowadzenia obserwacji fotometrycznych planetoid było uruchomienie w Borowcu teleskopu o średnicy 40 cm (Poznan Imaging Telescope, w skrócie PIT), które odbywało się pod moim nadzorem. Do obróbki danych fotometrycznych wykorzystałem pakiet Starlink, do którego napisałem zestaw skryptów. Pozwalają one na standardową redukcję na offset (bias), prąd ciemny (dark current) i pola wyrównujące (flat-fields), jak również na wykonywanie fotometrii aperturowej. Nie najlepsze profile gwiazd w PIT'cie uniemożliwiają fotometrię profilową, a ruch obserwowanego obiektu w zasadzie wyklucza stosowanie metody odejmowania obrazów.

NEAs są obserwowane na ogół w czasie zbliżeń do Ziemi, kiedy to szybko poruszają się na tle gwiazd. By uniknąć rozmycia ich obrazu, można dostosować prędkość śledzenia teleskopu do ruchu planetoidy. Można też stosować bardzo krótkie czasy ekspozycji, a uzyskane obrazy nakładać na siebie w czasie redukcji. W czasie obserwacji 2004 RZ<sub>164</sub>, opisanego w pracy P1, zastosowałem pierwszy z tych sposobów. Nie mogąc prowadzić teleskopu za obiektem w obu osiach poczekałem, aż planetoida będzie się poruszała wzdłuż równika niebieskiego, dzięki



czemu wystarczyło zmienić jedynie prędkość ruchu gwiazdowego instrumentu.

Uzyskane krzywe zmian jasności, po połączeniu z danymi zebranymi przez innych obserwatorów, pozwoliły mi stwierdzić, że pomimo znacznych zmian położenia 2004 RZ<sub>164</sub> względem Ziemi i Słońca, jego amplituda zmian blasku (mierzona od maksimum do minimum) pozostawała na tym samym poziomie. Oznaczało to, że obiekt jest sferoidalny (kształt dwuosiowej elipsoidy, obracającej się wokół krótszej osi), a być może nawet prawie kulisty.

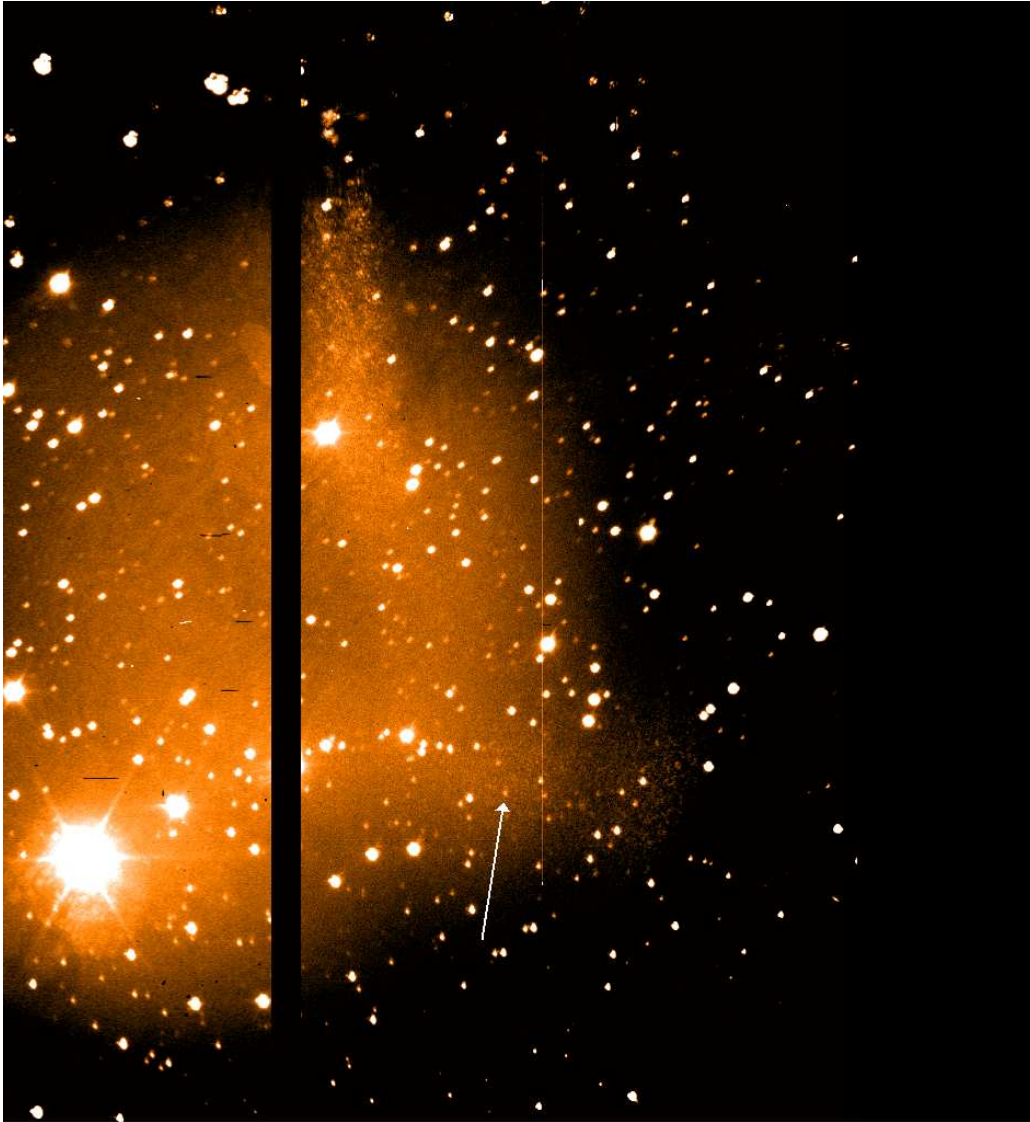
Analiza Fouriera krzywych zmian blasku wykazała brak pojedynczej częstotliwości, którą można by zinterpretować jako rotację niesferycznego obiektu wokół osi. Wyraźny spadek blasku na jednej z krzywych (P1, Rys. 1, krzywa Modra I), po jego weryfikacji sugerował, że mamy do czynienia z początkiem zaćmienia w układzie podwójnym. To spowodowało, że preferowanym wytłumaczeniem obserwowanych krzywych 2004 RZ<sub>164</sub> jest obecność drugiego składnika, a nie precesja osi rotacji. Okres rotacji głównego składnika został oceniony na 2.5559 h, a okres orbitalny jego satelity na powyżej 10.8 h. Wynik ten jest typowy dla małych, podwójnych NEAs, które powstają na skutek odrzutu materii przez grawitacyjny konglomerat (rubble pile), obracający się z okresem bliskim wartości krytycznej 2.2 h (Pravec et al., 2007).

Niewielki zasięg fotometryczny teleskopu w Borowcu spowodował, że do kontynuacji prac obserwacyjnych szukałem innych, znacznie większych instrumentów. Wykrywane VSAs, w czasie zbliżeń do Ziemi, osiągają jasności widome  $V = 18 - 20$ . Ponieważ wiele z nich rotuje bardzo szybko, ich systematyczne obserwacje fotometryczne wymagają stałego dostępu do instrumentu o średnicy 2 i więcej metrów w dłuższym okresie czasu.

Możliwość zakrojonej na szerszą kampanii obserwacyjnej NEAs pojawiła się dopiero w czasie uruchamiania kamery obrazującej SALTICAM na teleskopie SALT w RPA. Pomimo zachęt ze strony kierownictwa SALT'a, ilość projektów obserwacyjnych, zgłaszanych w latach 2007-2008 na ten teleskop była niewielka. Powodów było kilka:

1. ograniczenie czasu pojedynczej ekspozycji do 60 s
2. zła jakość obrazów gwiazd (przy zewnętrznym seeingu 1" typowy FWHM wynosił 2"-4")
3. obecność bocznego zaświecenia (stray light) od lasera kolimującego główne zwierciadło
4. brak możliwości korekty obrazów na pole wyrównujące (flat-field)
5. częste przerwy w czasie obserwacji, powodowane utratą kształtu sferycznego przez główne lustro (efekt nagłego rozogniskowania teleskopu)

Pomimo tych niedogodności, postanowiłem tak dobrać planetoidy do obserwacji, by wykorzystać teleskop już na tym wczesnym etapie jego działania. Ograniczenie czasu naświetlania do 60 s spowodowało, że przy doborze planetoid preferowałem obiekty o krótkich okresach rotacji, dla których dłuższe ekspozycje, z uwagi na szybką rotację wokół osi, i tak byłyby niewskazane. Oznaczało to ograniczenie się do planetoid o jasnościach absolutnych  $H \geq 21.5$  mag, co przy



Rysunek 1: Przykładowa ramka CCD z kamery obrazującej SALTICAM teleskopu SALT, pokazująca planetoidę 2006 RH<sub>120</sub> oraz efekty instrumentalne (niesferyczne obrazy gwiazd, niespłaszczone pole (brak korekty na flat-field) oraz boczne zaświecenie). Obraz uzyskano 15 marca 2007 r. w filtrze „czystym” (unfiltered photometry), z czasem ekspozycji 7 s. Planetoida miała wówczas jasność ok.  $V = 20.5$  mag i przesuwała się po niebie z prędkością 10"/min.

typowym albedo geometrycznym NEAs równym ok. 0.2 przekłada się ma średnice efektywne  $D \leq 150$  m. Jak widać na Rys. 1 w P4, okresy większości takich planetoid są krótsze od 1 h, co dobrze pasuje do typowego czasu trwania pojedynczej, nieprzerwanej obserwacji na SALT'cie, wynoszącego właśnie 1 h. Dodatkowo czasy ekspozycji poniżej 60 s zapobiegały rozmywaniu się obrazów planetoid na skutek ich szybkiego ruchu na niebie (prowadzenie teleskopu ruchem niegwiazdowym nie było wówczas dostępne).

Wspomniane wyżej problemy instrumentalne spowodowały, że na początku spędziłem dużo czasu by zorientować się, jaki jest ich wpływ na krzywe jasności,

a w szczególności na wyznaczone okresy rotacji. Stosowanie prostej fotometrii aperturowej na surowych obrazach (korygowanych jedynie przez obsługę SALT'a na offset) okazało się przynosić dobre rezultaty dla tych planetoid, które wykazywały zmiany jasności o amplitudach (od maksimum do minimum) powyżej ok. 0.2 mag. Gwiazdy porównania, których zawsze kilka było fotometrowanych razem z planetoidą, wykazywały zarówno przypadkowe zaszumienie (o typowym odchyleniu standardowym  $\pm 0.05$  mag), jak i efekty systematyczne ( $\pm 0.1$  mag). Służyły one jako test jakości fotometrii. Dla jednego obiektu (2007 KE<sub>4</sub>) udało się spłaszczyć obrazy (korekta na flat-field). Było to możliwe dlatego, że obiekt ten obserwowałem przy pełni Księżyca (co umożliwiło zastosowanie tzw. night flat-fields), a jednocześnie krótki czas ekspozycji (2 sekundy) ograniczał zakłócenia ze strony światła rozproszonego. Warto też dodać, że w większości przypadków dla obserwowanych obiektów uzyskiwałem pokrycie kilku okresów rotacji, wiele planetoid obserwowałem też podczas więcej niż jednego okna obserwacyjnego (track). Wszystko to spowodowało, że otrzymane wyniki są wiarygodne.

Większość badanych planetoid mogła być obserwowana na SALT'cie w okresie 1-2 tygodni po ich odkryciu. Powodowało to, że w ciągu trwania kampanii obserwacyjnej na bieżąco przeglądałem listy nowo odkrywanych obiektów i decydowałem, które z nich warto obserwować. W tym czasie wysłałem do obsługi SALT'a 144 zgłoszenia obserwacyjne, zawierające dokładne instrukcje, efemerydy i mapki porównania (finding charts). Wykonane obserwacje były najpierw przesyłane z SAAO do Kapsztadu, gdzie poddawano je wstępnej obróbce (korekta na offset) i umieszczano na serwerze ftp. Na ogół po 2-3 dniach po wykonaniu obserwacji miałem dostęp do danych, jednak transfer dużych plików na linii RPA-Polska często trwał kilkanaście godzin, co dodatkowo utrudniało podejmowanie decyzji o ew. kontynuacji obserwacji wybranych obiektów.

Do analizy krzywych jasności szybko-rotujących planetoid stworzyłem własne oprogramowanie, bazujące na standardowej analizie Fouriera – zostało ono pokrótce opisane w P2. Z uwagi na niepewności pomiarowe fotometrii, zamiast jednego okresu rotacji uzyskiwałem na ogół 2-4 rozwiązań, odpowiadających krzywej blasku z 1,2,3 i 4 maksimumami. Niekiedy asymetria między maksimumami jasności pozwalała na wybór tylko jednego rozwiązania. Częściej jednak nieoznaczoność pozostawała, co nie wyklucza jednak stosowania otrzymanych wyników w badaniach statystycznych. Warto dodać, że podobne niejednoznaczności są typowe wśród okresów rotacji spotykanych w literaturze przedmiotu.

Kolejną trudnością była konieczność przeanalizowania całego zestawu danych w celu wybrania obiektów, dla których możliwe było wyznaczenie okresów rotacji. Biorąc pod uwagę fakt, że zaobserwowałem łącznie 79 planetoid (uzyskując dla nich 146 krzywych blasku), a okresy udało się wyznaczyć dla 27 (w tym dla 2006 XY, który był już wcześniej obserwowany), średnio tylko co trzeci obiekt nadawał się do wykorzystania. W wielu przypadkach zmienne w czasie efekty instrumentalne wymagały ręcznego mierzenia każdej ramki CCD, co dodatkowo utrudniało analizę danych.

Dalsze obserwacje zbadanych do tej pory planetoid będą trudne z uwagi na to, że tylko niewiele z nich pojawi się w pobliżu Ziemi w najbliższych latach. W pracy P4 wyliczyłem przyszłe zblizenia do Ziemi dla wszystkich znanych,

szybko-rotujących planetoid. Okazało się, że w ciągu najbliższych 20 lat ok. 20% z nich powinno być dostępnych obserwacjom przy czym większość będzie musiała być wcześniej ponownie odkryta z uwagi na niedokładności efemeryd. Planowane uruchomienie nowych teleskopów wykrywających planetoidy (Pan-STARRS, LSST) może oznaczać, że ponowne odkrycia nie będą wcale takie rzadkie.

### 3 Rotacja bardzo małych NEAs

Podsumowanie wyników całej kampanii fotometrycznej znalazło się w ostatniej pracy z cyklu (P5). Dzięki powiększeniu ilości znanych okresów rotacji bardzo małych planetoid z grupy NEAs o ok. 50% (wzrost z 53 do 79 planetoid) możliwa stała się pierwsza analiza statystyczna tej populacji obiektów. Histogram prędkości rotacji wszystkich znanych VSAs z populacji NEAs przedstawiono na Rys. 15 w P5. Tak jak należało oczekiwać, uzyskany rozkład bardzo różni się od rozkładu Makswela co potwierdza, że za ewolucję rotacji VSAs odpowiadają nie wzajemne zderzenia, lecz np. YORP. W histogramie widoczny jest nadmiar długich okresów rotacji (powyżej 0.5 h) oraz zagęszczenie okresów wokół wartości 0.25 h (która jest medianą okresu dla całej badanej próbki). Ten drugi efekt jest najprawdopodobniej spowodowany małą liczebnością próbki i wymaga potwierdzenia.

Znaczne zwiększenie ilości okresów VSAs pozwoliło na nowo spojrzeć na zagadnienie granicznych prędkości ich rotacji. Są one związane ze spójnością materiału planetoid (tensile strength), którą próbowano szacować w oparciu o laboratoryjne pomiary próbek meteorytów. Zauważano przy okazji, że wyniki mogą być znacząco różne dla rzeczywistych planetoid. By uzyskać lepsze szacunki współczynnika spójności  $\kappa$  dla planetoid (zdefiniowanego w rozdz. 3 w pracy P5), przeanalizowałem wyniki uzyskane z obserwacji rozpadu najjaśniejszych meteoroidów w atmosferze ziemskiej. Okazało się, że minimalna wartość  $\kappa$ , przy której następuje pierwsza fragmentacja meteoroidów o najłabszej strukturze, wynosi ok.  $10^5 \text{ N m}^{-3/2}$ .

Korzystając z teorii opracowanej przez Holsapple (2007) wyznaczyłem na wykresie  $\log D - \log P$  linię granicznych okresów rotacji, dopasowując ją do obserwacji. Z uwagi na ciągle niewielką ilość danych uzyskane położenie linii granicznej jest jeszcze niepewne. Lepszego zbadania wymaga też relacja między dynamicznym naprężeniem, przy którym następuje rozpad meteoroidu w atmosferze, a jego spójnością. Dla rotujących planetoid, naprężenia wywołane przez siły bezwładności mają charakter statyczny (Holsapple 2007).

Pomimo to, odpowiadający linii granicznej współczynnik spójności  $\kappa = 10^5 \text{ N m}^{-3/2}$  zgadza się co do rzędu wielkości z wartością uzyskaną z obserwacji meteoroidów. Wskazuje to, że powiązanie własności materiałowych meteoroidów i małych planetoid może stanowić dodatkowy warunek brzegowy w teorii budowy wewnętrznej tych ciał.

## 4 Planetoida 2006 RH<sub>120</sub>

Przy okazji rutynowych obserwacji na SALT'cie udało mi się zbadać małą planetoidę 2006 RH<sub>120</sub>, którą odkryto na orbicie geocentrycznej. W przeszłości obserwowano już podobne obiekty, krążące tymczasowo wokół Ziemi, zawsze jednak okazywały się być one sztucznego pochodzenia (wypalone człony raket nośnych z misji międzyplanetarnych lub księżycowych). Obserwacje radarowe 2006 RH<sub>120</sub> (a w szczególności uzyskana z nich polaryzacja kołowa fali odbitej od powierzchni obiektu), a także zaobserwowana dla niego krzywa fazowa, potwierdziły jego naturalne pochodzenie (Bressi et al. 2008).

Obserwacje tego słabego ( $V=20.5$  mag) obiektu, wykonywane z czasem ekspozycji 7 s, były bardzo trudne. Niemniej jednak udało mi się wyznaczyć okres jego rotacji (1.375 lub 2.750 minuty), średnicę efektywną (ok. 3 m) i wydłużenie ( $a/b \geq 1.4$ ). Wyniki prezentuje praca P2, w której dodatkowo dyskutuję możliwe pochodzenie planetoidy 2006 RH<sub>120</sub>. Najprawdopodobniej obiekt ten trafił na orbitę podobną do orbity Ziemi (Earth-like Orbit, ELO) z orbity typowej dla obiektów grupy Apollo lub Amora, lecz o małej ekscentryczności. Odrzuciwszy powstanie 2006 RH<sub>120</sub> bezpośrednio w pobliżu Ziemi w wyniku uderzenia w Księżyc większej planetoidy twierdzę, że nie można wykluczyć, iż 2006 RH<sub>120</sub> był typową planetoidą bliską Ziemi, zbliżającą się do niej z dużą prędkością względną, która utraciła energię kinetyczną w wyniku hamowania w ziemskiej atmosferze, bez zderzenia z jej powierzchnią. Jest to obecnie czysto hipotetyczna możliwość, wymagająca dalszego szczegółowego zbadania.

## 5 Podsumowanie

Niniejsza rozprawa habilitacyjna poświęcona jest zagadnieniu wyznaczania okresów rotacji bardzo małych planetoid bliskich Ziemi w oparciu o obserwacje fotometryczne ich zmian blasku. Do najważniejszych osiągnięć można w niej zaliczyć:

- wyznaczenie okresu rotacji i przybliżonego kształtu głównego składnika w prawdopodobnym układzie podwójnym planetoid, 2004 RZ<sub>164</sub>, jak również ograniczenia na ruch orbitalny jego prawdopodobnego satelity
- wyznaczenie synodycznego okresu rotacji i średnicy efektywnej oraz oszacowanie wydłużenia  $a/b$  dla najmniejszej obserwowanej dotychczas fotometrycznie planetoidy, 2006 RH<sub>120</sub>, która reprezentuje nową, mało znaną populację obiektów na orbitach bliskich orbicie Ziemi (ELO asteroids)
- przedyskutowanie pochodzenia 2006 RH<sub>120</sub> i jego związku z innymi planetoidami na orbitach podobnych do orbity Ziemi (Earth-like Orbit Asteroids)
- wyznaczenie po raz pierwszy okresów rotacji dla 26 bardzo małych, szybko rotujących planetoid z grupy NEAs, co powiększa znaną ich liczbę z 53 do 79 obiektów (wzrost o 50%) i umożliwia pierwsze badania statystyczne

- charakterystyka statystyczna otrzymanej próbki VSAs, a w szczególności oszacowanie okresów granicznych tych obiektów, co umożliwi wstępne wyliczenie współczynnika spójności (tensile strength) materiału skalnego, z którego są one zbudowane;
- odkrycie nowej planetoidy o prawdopodobnym złożonym modzie rotacji (2007 RQ12, praca P5), co powiększa znaną ich liczbę z 3 do 4
- wskazanie obiektów z grupy szybko-rotujących VSAs, które w ciągu najbliższych 20 lat będą mogły być obserwowane w celu przetestowania współczesnych teorii efektu YORP
- wyznaczenie bardzo dokładnego okresu rotacji planetoidy 2006 XY, kierunku jej obrotu i przybliżonego położenia bieguna; jest to drugi obiekt w grupie VSAs, dla którego takie dane zostały uzyskane

Na zakończenie warto dodać, że w okresie od października 2008 do kwietnia 2009 przeprowadziłem drugą kampanię obserwacji VSAs na SALT'cie, uzyskując dane dla 46 obiektów. Są one obecnie poddawane analizie. Przy założeniu podobnego jak w czasie kampanii pierwszej współczynnika sukcesu (1/3) oznacza to, że wkrótce nasz zbiór okresów rotacji VSAs może wzbogacić się o kolejne 15 obiektów.

## Podziękowania

W tym miejscu chciałbym wyrazić swoją wdzięczność wszystkim osobom, z którymi współpracowałem z trakcie prac nad rozprawą habilitacyjną. Dziękuję moim koleżankom i kolegom z Obserwatorium Astronomicznego UAM: Agnieszce Kryszczyńskiej i Magdalenie Polińskiej za pomoc w żmudnej pracy przy redukcji obserwacji z SALT'a oraz Tadeuszowi Jopkowi za przybliżenie mi zagadnienia podobieństwa orbit w przestrzeni. W pwyznaczaniu położeń planetoid na ramach CCD pomógł mi Paweł Kankiewicz, a całkowanie ruchu dwóch planetoid, opisanych w pracy P4, wykonał dla mnie Ireneusz Włodarczyk. Do obserwacji planetoidy 2006 RH<sub>120</sub> zachęcił mnie Carl Hergenrother, a pewne uwagi o mojej pracy o tym obiekcie wyrazili Gonzalo Tancredi oraz Brett Gladman. Dziękuję również recenzentom moich publikacji: Josefowi Durechowi, Stevenowi Slivanowi i Dawidowi Vokrouhlickiemu (oraz dwóm anonimowym recenzentom) których uwagi przyczyniły się do ich ulepszenia. Na końcu dziękuję studentom astronomii OA UAM, którzy poświęcili kilka godzin poza zajęciami na pomoc w szybkim zredukowaniu danych z SALT'a w początkowym okresie kampanii obserwacyjnej.

## Literatura

Bottke, W.F., Richardson, D.C., and Love, S.G. (1997) *Icarus*, 126, 470

- Bressi, T.H., Hergenrother, C.W., Christensen, E.J. et al. (2008) *Minor Planet Electronic Circular*, D12
- Capek, D., and Vokrouhlicky, D. (2004) *Icarus*, 172, 526
- Durech, J., Vokrouhlicky, D., Kaasalainen, M. (2008) *A&A* 489, L25
- Farinella, F, Vokrouhlicky, D. (1999) *Science* 283, 1507
- Hergenrother, C.W., Whiteley, R.J., and Christensen, E.J. (2009) *Minor Planet Bulletin* 36, 16
- Holsapple, K. (2007) *Icarus* 187, 500
- Lowry, S.C., Fitzsimmons, A., Pravec, P. et al. (2007) *Science*, 316, 272
- Pravec, P. and Harris, A.W. (2000) *Icarus* 148, 12
- Pravec, P., Harris, A.W., Warner, B.D. (2006).  
Near Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk, Proceedings of IAU Symposium 236. Edited by G.B. Valsecchi and D. Vokrouhlický, and A. Milani. Cambridge: Cambridge University Press, 2007., pp.167-176
- Pravec, P., Harris, A.W., Vokrouhlicky, D. et al. (2008) *Icarus* 197, 497
- Rossi, A., Marzari, F., and Scheers, D.J. (2009). *Icarus*, 202, 95