

*Agnieszka KRYSZCZYŃSKA<sup>1</sup>, Magdalena POLIŃSKA<sup>1</sup>*

**809 LUNDIA – PODWÓJNA ZAGADKA**  
809 LUNDIA – BINARY PUZZLE

**Abstract:** CCD photometry of 809 Lundia obtained from September 2005 till January 2006 at Borowiec and Pic du Midi Observatories shows that this object is a synchronous binary system with an orbital period of  $15.418 \pm 0.001$  h. In this paper we present the results of photometric observations of Lundia from two oppositions in 2005/2006 and 2007 as well as the first modelling of the system. For sake of simplicity we have assumed a fluid like nature for each component in modified Roche model and triaxial ellipsoid shape in kinematic model. Our models gave similar results. Triaxial ellipsoid shape solutions and separation between components are given after taking an equivalent diameter of 9.1 km from  $H = 11.8$  mag and assuming an albedo of 0.4. Orbital period of the Lundia system obtained from modelling is the same as from lightcurve analysis  $15.418 \pm 0.001$  h. Bulk density of both components is 1.64 or  $1.71 \pm 0.01$  g/ccm. The double system of Lundia likely originates from the fission process of a single body that could have been spun up by the YORP effect. The predicted lightcurves for future oppositions are also presented.

**Keywords:** planets and satellites, formation, minor planets, photometry

WSTĘP – ODKRYCIE I POCHODZENIE LUNDII

809 Lundia została zaobserwowana po raz pierwszy w sierpniu 1915 roku w Heidelbergu przez niemieckiego astronoma Max Wolfa. Jej nazwa pochodzi od miejscowości Lund w Szwecji, w której znajduje się obserwatorium astronomiczne. Parametry orbitalne Lundii sugerowały, że należy ona do rodziny planetoid zwanej rodziną Flory (Zappala et. al. 1995).

Pierwsze obserwacje spektroskopowe Lundii zostały wykonane w maju 2001 roku spowodowały, że teoria pierwotnego pochodzenia Lundii uległa zmianie. Na podstawie typu widmowego V została ona zakwalifikowana jako obiekt należący do spektroskopowej rodziny Westy (Florczak et. al. 2002), czyli do grupy obiektów, które prawdopodobnie zostały wybite z powierzchni Westy w wyniku potężnego zderzenia. (W okolicy południowego bieguna Westy znajduje się gigantyczny krater o rozmiarach porównywalnych ze średnicą samej Westy.) Ale w jaki sposób Lundia mogła dokonać migracji od okolic Westy do innej rodziny? Tłumaczy się to oddziaływaniem rezonansów i efektu Jarkowskiego na planetoidy (Wpływ tego efektu na planetoidy został opisany m.in. w materiałach z III Seminarium Meteorologicznego, Kryszczyńska & Polińska 2005). Carruba i in. 2005 przeanalizowali możliwą migrację Lundii pod wpływem rezonansów i efektu Jarkowskiego na jej obecnej orbicie, jednak wytłumaczenie było rozpatrywane dla pojedynczego ciała a aktualnie wiadomo, że Lundia jest układem podwójnym. Mechanizm oddziaływania efektu Jarkowskiego i YORP (Jarkowski-O'Keefe Radziewski Paddack) na planetoidy podwójne nie jest jeszcze dobrze znany. Efekt YORP (wpływający na prędkość i położenie osi rotacji) był badany dla podwójnych planetoid zbliżających się do Ziemi przez Vokrouhlicky i in. (2005). Został on nazwany BYORP (Binary YORP).

---

<sup>1</sup> Obserwatorium Astronomiczne. Uniwersytet im. Adama Mickiewicza. 60-286 Poznań.  
ul. Słoneczna 36

## OBSERWACJE FOTOMETRYCZNE

W Stacji Obserwacyjnej Borowiec pod Kórnikiem wyposażonej w 0.4 m teleskop z kamerą CCD KAF 400 prowadzone są systematycznie obserwacje planetoid, w tym obiektów z rodziny Flory. Pierwsze obserwacje Lundii były wykonane prawie dwa miesiące przed jej opozycją, 18 września 2005 roku. Po dokonaniu redukcji danych z pierwszej nocy, na krzywej zmian blasku widoczny był wyraźny spadek jasności. Pojawiło się więc przypuszczenie, że planetoida jest układem podwójnym. W związku z tym była ona konsekwentnie obserwowana przez kolejne dziewięć nocy dzięki szczęśliwie nam sprzyjającej pogodzie. Uzyskane dane przedstawione są na Fig. 1 i pokazują typową krzywą zmian blasku dla synchronicznie rotujących podwójnych planetoid takich jak: 90 Antiope, 854 Frostia, 1089 Tama czy 4492 Debussy. Planetoidy te charakteryzują się takim samym okresem rotacji wokół osi i okresem orbitalnym.

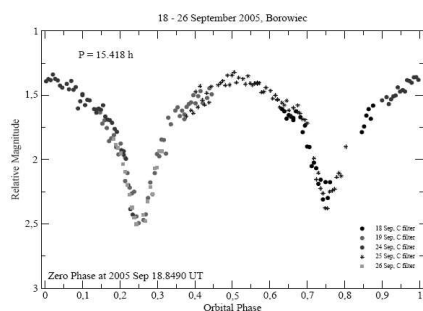


Fig. 1. Krzywa zmian balasku planetoidy 809 Lundia uzyskana we wrześniu 2005 roku w Borowcu.

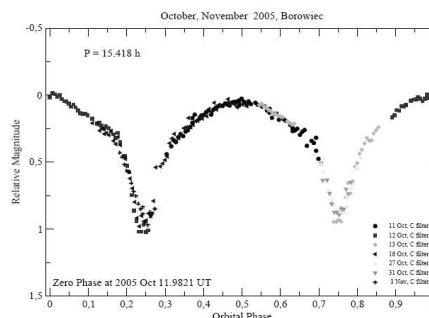


Fig. 2. Krzywa zmian blasku planetoidy 809 Lundia otrzymana w październiku 2005 roku w Borowcu.

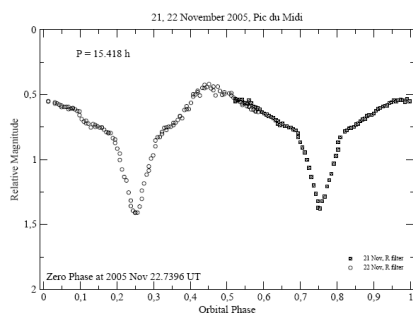


Fig. 3. Krzywa zmian blasku planetoidy podwójnej 809 Lundia wykonana w obserwatorium Pic du Midi w listopadzie 2005 roku.

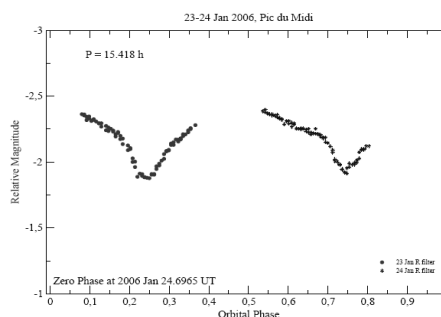


Fig. 4. Krzywa zmian blasku planetoidy 809 Lundia ze stycznia 2006 roku.

Na krzywej zmian blasku wyraźnie widać charakterystyczne zaćmienia, które są wynikiem wzajemnego przesłaniania się składników. Na osi pionowej znajduje się jasność względna obserwowanej planetoidy, a na osi poziomej faza rotacji. Całkowita amplituda na krzywej wynosi 1.1 magnitudo, a krzywą można rozłożyć na dwie składowe. Pierwsza

z nich sinusoidalna zmiana jasności to wynik rotacji niesferycznych ciał, o amplitudzie 0.35 mag. Natomiast druga składowa będąca następstwem zaćmień (gwałtowne spadki jasności) ma amplitudę 0.75 mag. Minima powtarzają się na krzywej co pół okresu, który został oszacowany na 15.4 godziny. 809 Lundia była dziesiątą odkrytą planetoidą podwójną pasa głównego (Kryszczyńska et. al. 2005) i należy do siedmiu znanych układów synchronicznych.

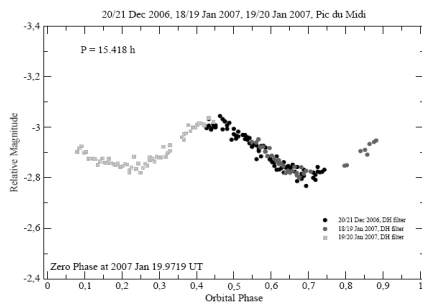


Fig. 5. Krzywa zmian blasku (w tej opozycji bez zaćmień) planetoidy 809 Lunda uzyskana na przełomie 2006 i 2007 roku w obserwatorium Pic du Midi.

metrowego teleskopu i kamery THX 7863.

Uzyskane dane zaprezentowane są na Fig. 3. Całkowita amplituda zmian jasności wynosi tyle samo ile w miesiącu październiku, czyli 1.0 mag. Zmieniły się tylko nieznacznie proporcje pomiędzy głębokością zaćmień składników (0.65 mag), a rotacją wokół osi (0.35 mag). Na krzywej zmian blasku widać charakterystyczny „garb”, który pojawia się około 0.4 fazy rotacji układu. Wydaje się, że jest to efekt spowodowany właściwością powierzchni planetoidy, jednak na tym etapie badań trudno jest dokładnie określić jego pochodzenie.

Kampania obserwacyjna nowoodkrytej planetoidy podwójnej trwała także przez trzy grudniowe noce 2005 roku na Pic du Midi. Obserwacje wykonane w styczniu 2006 roku na Pic du Midi, kiedy to Lunda była prawie trzy miesiące po opozycji, wykazały zaskakującą zmianę na krzywej zmian blasku. Amplituda zmian jasności okazała się mniejsza o około 0.5 mag. Krótkie okno obserwacyjne nie pozwoliło uzyskać pełnej krzywej przeszło 15 godzinnego okresu planetki, jednakże można zauważyć wyraźną zmianę przebiegu krzywej (Fig. 4). Widocznym jest, że część składowa spowodowana zaćmieniami ma amplitudę zaledwie 0.25 mag. Zmiany te wynikają z faktu, że podczas długiego okresu obserwacji planetoidy znacząco zmieniły się wzajemne położenia Ziemi, Słońca i samej planetoidy czyli tzw. geometria obserwacji. Wszystkie przedstawione wykresy z krzywymi zmian blasku są wykonane w jednakowej skali.

Obserwacje Lundii wykonane na przestrzeni czterech miesięcy pozwoliły potwierdzić, że jest to układ synchroniczny z okresem orbitalnym jak i rotacyjnym równym  $15.418 \pm 0.001$  godziny.

Na Fig. 5 przedstawione są obserwacje, które były wykonane w kolejnej opozycji na przełomie roku 2006 i 2007 w obserwatorium Pic du Midi. Nie zostały wtedy zaobserwowane żadne zmiany na krzywej wynikające z zasłaniania się składników. Całkowita amplituda zmian jasności wyniosła 0.2 magnitudo.

Obserwacje fotometryczne Lundii były kontynuowane w Borowcu przez siedem nocy w październiku 2005 roku. Krzywa zmian jasności z tego okresu czasu jest przedstawiona na Fig. 2. Amplituda zmian jasności uległa nieznacznym zmianom, całkowita wynosi 1.0 mag. Momenty zaćmień 0.7 mag, a zmiany jasności wynikające z rotacji ciał równają się 0.3 mag.

W drugiej połowie listopada, już po opozycji która miała miejsce 5 listopada, planetoida Lunda była zaobserwowana podczas dwóch nocy w obserwatorium Pic du Midi we Francji za pomocą 1.05

### MODELOWANIE UKŁADU

Efektywna średnica  $D$  Lundii równa 9.1 km została wyliczona z jej jasności absolutnej  $H=11.8$  mag i przyjętego geometrycznego albedo  $p_v=0.4$ , czyli takie jak ma Westa. Obie wartości, zarówno  $H$  jak i  $p_v$  są obciążone błędami. Standardowy błąd wyznaczenia jasności absolutnej  $H$  podawany przez Minor Planet Center wynosi  $\pm 0.5$  mag, natomiast albedo Westy zmienia się na jej powierzchni nawet o 20 %. Biorąc pod uwagę błąd jasności i uwzględniając, że albedo dla Westy wynosi  $p_v=0.4 \pm 20\%$  zakres efektywnej średnicy dla Lundii wzrasta do przedziału  $6.7 \text{ km} < D < 12.9 \text{ km}$ . Dlatego też wyniki modelowania: rozmiary ciał i ich odległość są zależne od przyjętej średnicy efektywnej równej 9.1 km. Natomiast gęstość, stosunek mas czy położenie osi rotacji układu jest niezależne od przyjętej średnicy.

### ELIPSOIDY ROCHE'A

W 1849 roku Edward Roche zajął się problemem przedstawienia ciał niebieskich jako obiektów znajdujących się w równowadze hydrostatycznej orbitujących synchronicznie wokół siebie po kołowych bądź keplerowskich orbitach. W wyniku wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego ciała wywierają na siebie siłę, która powoduje deformacje ich kształtów do elipsoid, które nazywane są elipsoidami Roche'a. Dla przypadku planetoidy 809 Lundii, która jest właśnie takim synchronicznym układem ciał o porównywalnych rozmiarach, można zastosować ideę figur Roche'a. Takie podejście było już użyte dla innego systemu planetoidy podwójnej - 90 Antiope (Descamps et. al. 2007). Kształt i wzajemna odległość składników zależne są tylko od dwóch czynników, mianowicie od stosunku rozmiarów komponentów oraz od tempa rotacji. Zakłada się też jednakową gęstość dla obu składników. Za pomocą takiego modelu dla układu synchronicznego Lundia, otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 1. Półosie elipsoid obu składników znajdujące się w tabeli odpowiadają rozmiarom ciała o średnicy 9.1 km.

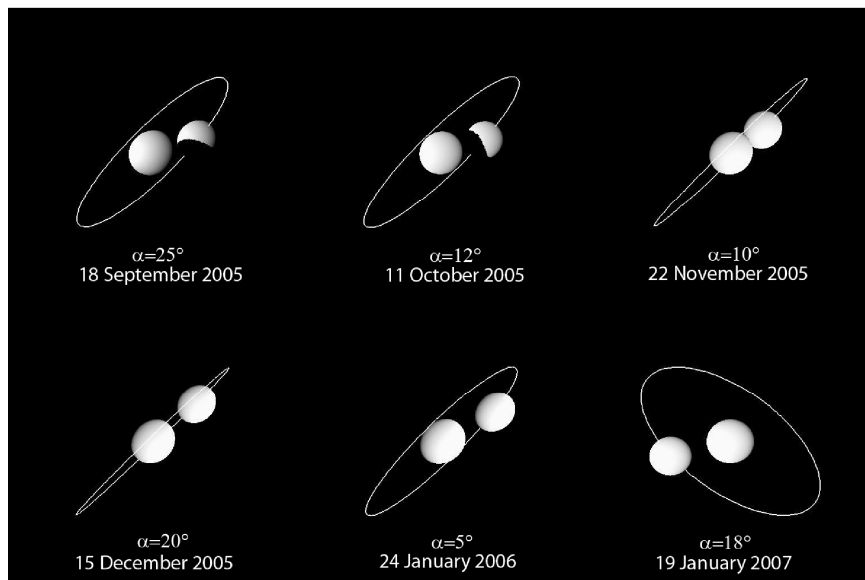


Fig. 6. Orientacja składników układu Lundii w momencie obserwacji fotometrycznych stworzona w oparciu o wyniki modelowania.

## MODEL KINEMATYCZNY

Zakładając, że system planetoidy podwójnej składa się z dwóch elipsoid trójosiowych, jesteśmy w stanie określić parametry systemu dla Lundii oraz symulować krzywe zmian blasku. Promień orbity układu wyznaczany jest z trzeciego prawa Keplera, współrzędne orbitalne systemu obliczane są z elementów keplerowskich z uwzględnieniem położenia Ziemi i Słońca według formuły przedstawionej przez Somma (1988).

Tabela 1.

Model	Składnik A			Składnik B			Separacja	Stosunek mas	Gęstość	Okres	Współrzędne bieguna orbity układu	
	km			km			km		$g/cm^3$	godz.	$\lambda_0 \beta_0$	( $^\circ$ )
Roche	3.9	3.3	3.2	3.5	2.9	2.8	15.8	$0.7 \pm 0.1$	$1.64 \pm 0.1$	$15.418 \pm 0.001$	$119 \pm 2$	$28 \pm 4$
Kinematic	4.1	3.3	2.5	3.2	2.9	2.7	15.8	$0.7 \pm 0.1$	$1.71 \pm 0.1$	$15.418 \pm 0.001$	$120 \pm 5$	$18 \pm 12$

Parametry systemu 809 Lundia otrzymane za pomocą modelu: Rocha i kinematycznego, które zostały dopasowane do obserwacji uzyskanych w latach 2005-2006 oraz 2006-2007.

Generowana jasność składników jest oparta na procedurze, którą wykorzystuje się w algorytmach grafiki komputerowej i nazywa „metodą śledzenia promieni” (ang. ray-tracing method). Do obliczeń jasności zostało użyte także prawo odbicia światła od powierzchni planetoidy Lommel'a-Seeliger'a. Jak najprostsze prawo odbicia światła wybrano w celu uniknięcia zbyt dużej ilości parametrów modelu. Dopasowanie krzywych syntetycznych do obserwacji rzeczywistych i wyliczenie dzięki temu parametrów układu wykonano według metody zwanej PIKAIA opracowanej przez Charbonneau (1995).

W modelu kinematycznym jedynym zakładanym parametrem jest półoś wielka  $a$  głównego ciała. Wyniki otrzymane dla modelu kinematycznego znajdują się w Tabeli 1.

Na Fig. 6 przedstawiona jest orientacja składników układu Lundii w momencie obserwacji fotometrycznych w oparciu o wyniki modelowania, a na Fig. 7 zostały zestawione krzywe wygenerowane za pomocą obydwu modeli w porównaniu z obserwacjami. Linia ciągła to model Roche'a, natomiast linią przerywaną zaznaczony jest model kinematyczny.

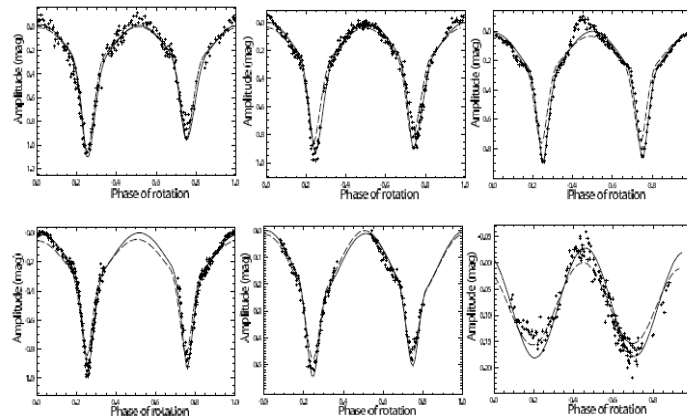


Fig. 7. Porównanie obserwacji i modelowanych krzywych zmian blasku, linia ciągła model Roche'a, przerywana model kinematyczny.

## PPRZYSZŁE OBSERWACJE

Dzięki znajomości parametrów układu dla Lundii możemy przewidzieć jej przyszłe krzywe zmian blasku w następnych opozycjach. Takie krzywe przedstawione są na Fig. 8.

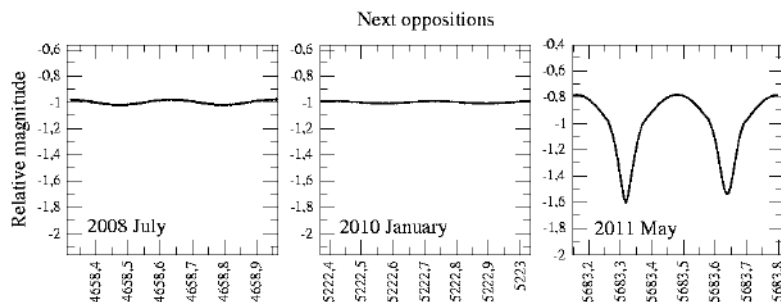


Fig. 8. Przyszłe krzywe zmian blasku dla 809 Lundii, wygenerowane za pomocą modelu kinematycznego.

Kolejne zjawiska zaćmień pomiędzy składnikami Lundii będą widoczne dopiero w roku 2011. W opozycji tej długość ekliptyczna Lundii różni się o 180 stopni w porównaniu z rokiem 2005, kiedy po raz pierwszy zostały zaobserwowane charakterystyczne głębokie minima na krzywej. Inaczej mówiąc będziemy obserwowali układ Lundii z przeciwnej strony. Sytuacja ta zobrażowana jest na Fig. 9, gdzie kółkami zaznaczone są różne długości ekliptyczne i odpowiadające im daty. Czerwonym kółkiem oznaczony jest moment występowania zaćmień, szarymi kółkami obserwacje, podczas których nie były one widoczne. Koła puste to przyszłe opozycje.

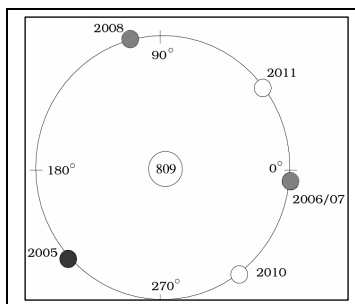


Fig. 9. Porównanie długości ekliptycznych Ziemi w odniesieniu do planetoidy Lundia, która znajduje się w środku układu współrzędnych.

## PODSUMOWANIE

Dokładność dopasowania modelowanych krzywych do obserwacji wynosi średnio 0.03 mag dla modelu Roche'a i 0.05 mag dla modelu kinematycznego. Pomimo różnic w kształtach modelowanych ciał, globalna charakterystyka układu jest bardzo podobna w obu modelach: stosunek mas składników wynosi 0.7 i średnia gęstość ciał (tzw. bulk density) wynosi ok 1.7 g/ccm (tabela 1.). Spektroskopowe powiązanie pomiędzy planetoidą 4 Westa (a także planetoidami typu V) i meteorytami HED wydaje się być powszechne akceptowane. Wiemy, że gęstość meteorytów HED wynosi 2.86 – 3.26 g/ccm (Britt & Consolmagno 2004, McCausland & Flemming 2006). Stąd możemy oszacować

makroskopową porowatość dla ciał tworzących układ Lundii na 42 - 49 %, typową dla luźno upakowanych odłamków (Britt et. al. 2002).

Budowa wewnętrzna planetoid jest nadal niejasna. Rezultatem zderzeń pomiędzy ciałami macierzystymi mogą być zlepki grawitacyjne utworzone z fragmentów pokruszonego ciała macierzystego lub odłamki, które nigdy całkiem się nie rozkruszyły (Cheng 2009). Natomiast efekt YORP wydaje się mieć wystarczająco silny wpływ na przyspieszenie rotacji ciała o rozmiarach mniejszych od 40 km, by mogło ono osiągnąć stan niestabilności w czasie znacznie krótszym, niż czas życia planetoidy (Vokrouhlicky et. al. 2003). Ciało macierzyste Lundii mogło więc przyspieszyć swoją rotację i rozszczepić się na 2 fragmenty, podobnie jak w przypadku innych planetoid synchronicznych o porównywalnych rozmiarach składników (Descamps & Marchis 2008).

#### LITERATURA

- BRITT D. T., et. al. 2002. In Asteroids III, Univ. Arizona Press, 395.  
BRITT D. T., CONSOLMAGNO G. J., 2004. 35th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas. abst. 2108.  
CARRUBA V., et. al. 2005. Astron. Astrophys. 441. 819.  
CHRBONEAU P. 1995. ApJS 101. 309.  
CHENG A. and The HYABUSA Team. 2009. Planet. Space. Sci. in press.  
DESCAMPS P., MARCHIS F., MICHAŁOWSKI T. et al. 2007. Icarus. 187. 482.  
DESCAMPS P., MARCHIS F., 2008. Icarus. 193. 74.  
FLORCZAK M., LAZZARO D., DUFFARD R., 2002. Icarus. 159. 178.  
KRYSZCZYŃSKA A., et. al. 2005. CBET. 229.  
SOMMA M., 1988, Cel. Mech., 41. 389.  
VOKROUHLICKY D et. al. 2003. Nature. 425. 147.  
VOKROUHLICKY D., CAPEK D., CHESLEY S. R., OSTRO S. J., 2005. Ikarus. 179.128.  
ZAPPALA V., BENDJOYA P., CELLINO A., et al. 1995. Icarus 116. 291.