

dr hab. Maria Przybylska, prof. UZ

Zielona Góra, 13.09.2017

Instytut Fizyki

Wydział Fizyki i Astronomii UZ

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Mariusza Tarnopolskiego p.t. „Chaotic rotational dynamics of Hyperion”

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy badań chaotycznej dynamiki ruchu obrotowego jednego z księżyców Saturna - Hyperiona. Składa się ona z trzech części. Pierwsza z nich, obejmująca rozdziały 1-3, zawiera wprowadzenie zarówno do samego układu jak i stosowanych metod i narzędzi. W rozdziale pierwszym tej części dokonano przeglądu literatury poświęconej badaniom ruchu obrotowego Hyperiona. W rozdziale drugim autor opisuje stosowane metody do badania dynamiki chaotycznej. Modele ruchu obrotowego małych ciał na orbitach eliptycznych zawarte są w rozdziale trzecim. Podano w nim również formuły modelowania krzywej zmian jasności rotującego Hyperiona.

Część druga rozprawy obejmująca rozdziały 4-6 zawiera zestawienie wyników uzyskanych przez autora. Kolejne rozdziały odpowiadają trzem artykułom doktoranta. Rozdział czwarty dotyczy sterowania chaosem w hamiltonowskim układzie o dwóch stopniach swobody odpowiadającym równaniu Bieleckiego. Dodane do hamiltonianu odpowiednie zaburzenia tłumią zachowania chaotyczne co zostało zilustrowane odpowiednimi cięciami Poincaré i widmami mocy (zamieszczonymi w oryginalnym artykule). Rozdział piąty przedstawia wpływ oddziaływania innego satelity Saturna-Tytana na rotacje Hyperiona. Porównano ewolucje czasowe pewnej objętości przestrzeni fazowej i diagramy bifurkacyjne pod nieobecność i w obecności Tytana. W oryginalnym artykule przedstawiono ponadto zależność czasową wymiarów korelacji. W rozdziale piątym dokonano analizy fotometrycznych krzywych zmian blasku Hyperiona. Do analiz wykorzystano zarówno rzeczywiste dane obserwacyjne jak i dane uzyskane w wyniku symulacji. Wyznaczano wykładniki Lapunowa, maksymalne wykładniki Lapunowa, przeprowadzono test stacjonarności, w oryginalnym artykule zrekonstruowano również trajektorie w przestrzeni fazowej. Część drugą kończy rozdział siódmy zawierający podsumowanie otrzymanych wyników i obszerny spis literatury zawierający 133 pozycje.

W części trzeciej załączono trzy oryginalne artykuły: dwa opublikowane i jeden przyjęty do druku. Jedyńm autorem tych publikacji jest mgr. M. Tarnopolski. Jeden artykuł został opublikowany w czasopiśmie *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, drugi został przyjęty w *Astronomy and Astrophysics*. Czasopisma te mają uznaną renomę. Trzeci artykuł został opublikowany w *Astrophysics and Space Science*, które ma zdecydowanie niższą rangę.

Moją analizę rozprawy zacznę od uwagi dotyczących jej formy. Zgodnie z przepisami rozprawa doktorska może mieć formę maszynopisu książki, książki wydanej lub spójnego tematycznie zbioru rozdziałów w książkach wydanych, spójnego tematycznie zbioru artykułów opublikowanych lub przyjętych do druku w czasopismach naukowych. Z jednej strony, dwie pierwsze części przedłożonej dysertacji trudno uznać za przewodnik do

załączonych artykułów, z drugiej zaś nie zawierają one głębszego wyjaśnienia problemów omawianych w publikacjach. Trudno jest w nich również znaleźć dokładniejszą analizę zastosowanych metod. W istocie lektura rozprawy, pomimo jej lakoniczności jest trudna.

Rozdział pierwszy to prawie czterostronicowy przegląd literatury dotyczącej badania ruchu obrotowego małych ciał w Układzie Słoneczny ze szczególnym uwzględnieniem Hyperiona. Autor dużo uwagi poświęcił badaniom związanych z analizą ruchów chaotycznych. Ruch obrotowy większość księżyców planet w Układzie Słonecznym jest regularny. Długa ewolucja doprowadziła do ukołowania ich orbit, a ruch obrotowy przyjął formę oscylacji w otoczeniu rezonansu niskiego rzędu. W wyjątkowych wypadkach gdy orbita księżyca ma stosunkowo dużą ekscentryczność, a jego kształt jest nieregularny, jego ruch może być chaotyczny. W istocie jeżeli badamy ruch ciał rozciągniętych, to ruch środków mas tych ciał zależy od ich ruchu obrotowego i vice versa. W sytuacji gdy rozmiary ciał są małe w porównaniu ze minimalnymi odległościami pomiędzy nimi, wówczas stosuje się przybliżenie, w którym zakłada się iż ruch orbitalny ciała nie jest zaburzany przez jego ruch obrotowy. Ponadto we wszystkich modelach przedstawionych w pracy stosuje się dodatkowe przybliżenie polegające na obcięciu potencjału wzajemnego oddziaływania masy punktowej i bryły. Uwzględnione są tylko wyrazy zawierające harmoniki stopnia nie wyższego niż dwa. Moim zdaniem wymienione tutaj uwagi powinny się znaleźć w rozdziale pierwszym, a spis literatury powinien być uzupełniony o fundamentalne prace G. N. Duboshina dotyczące ruchu postępowo-obrotowego.

Równanie Bieleckiego opisuje płaskie oscylacje satelity na orbicie eliptycznej (jedna z głównych osi bezwładności jest stale prostopadła do płaszczyzny orbity). Badaniom tego równania poświęconych jest wiele prac trudno więc cytować wszystkie ale fundamentalne wyniki uzyskane przez A.D. Bruno powinny być przytoczone.

Dowód faktu, że równanie Bieleckiego jest niecałkowalny podał A. A. Burov w pracy A. A. Burov, Nonintegrability of the equation of plane oscillations of a satellite in an elliptic orbit. (Russian) Vestnik Moskov. Univ. Ser. I Mat. Mekh. 1984, no. 1, 71-73. W pracy A. Khan, R. Shama, L.M. Saha, Chaotic motion of an ellipsoidal satellite I, Astron. J., vol 116, 1998, pp. 2058-2066 zacytowanej przez autora, podano ten sam dowód nie wspominając nic o wynikach A. A. Burova.

Równanie Bieckiego opisuje bardzo prosty model. W bardziej realistycznym ujęciu ruch obrotowy nie jest płaski. Takie modele były opisane i badane bardzo intensywnie przez samego V. V. Bieleckiego, A. P. Markiejewa oraz wielu innych rosyjskich uczonych. Uzyskane przez nich wyniki i opracowane teorie na pewno zasługują na wspomnienie.

Rozdział pierwszy kończy się przedstawieniem głównych celów pracy. Dwa z nich, a mianowicie zbadanie wpływu trzeciego ciała na chaotyczny ruch obrotowy oraz wyznaczenie warunków koniecznych do wiarygodnego określenia maksymalnego wykładnika Lapunowa na podstawie obserwacji fotometrycznych, są logicznie i tematycznie z sobą związane. Natomiast włączenie do rozprawy zatytułowanej *Chaotic rotational dynamics of Hyperion* problemu sterowania chaosem w równaniu Bieleckiego wymagałoby lepszego uzasadnienia, gdyż ruch Hyperiona nie jest najprawdopodobniej płaski i trudno przypuszczać by ktoś

planował zmieniać ruch obrotowy naturalnego księżyca. Jest to raczej zagadnienie matematyczne, które może mieć znaczenie w zastosowaniach do sztucznych satelitów.

W rozdziale drugim autor opisuje metody, które zastosował w swoich badaniach. Są to zarówno metody badania autonomicznych układów równań różniczkowych pierwszego rzędu (cięcia Poincaré, diagramy bifurkacyjne, wymiar korelacji, wykładniki Lapunova) jak i metody analizy szeregów czasowych (spektrum mocy, rekonstrukcja trajektorii w przestrzeni fazowej, maksymalny wykładnik Lapunowa). Jeżeli autor uznał za celowe dokonanie takiego opisu, to powinien to zrobić bardziej szczegółowo i precyzyjnie. Wszystkie wymienione w tym rozdziale metody są znane ale nie powszechnie. Zatem ich opis powinien być w miarę jasny.

W opisie odwzorowania Poincaré w rozdz. 2.1 przykład wyboru płaszczyzny cięcia $x=0$ dla układu Henona-Héilesa jest niejasny, gdyż nie sprecyzowano zmiennych opisujących układ ani nie podano hamiltonianu. Ostatnie zdanie podrozdziału 2.1 dotyczy odwzorowania stroboskopowego dla układów z 1.5 stopnia swobody z siłą wymuszającą, gdzie naturalne jest cięcie trajektorii płaszczyznami stałego czasu nT , gdzie T to okres siły wymuszającej i rzutowanie uzyskanych punktów na płaszczyznę fazową. Opis diagramów bifurkacyjnych w rozdz. 2.2 też nie jest zbyt precyzyjny. Na przykład trudno dociec co oznacza stwierdzenie w ostatnim akapicie roz 2.2: Zazwyczaj na bifurkacyjnym diagramie pojawiają się pewne krzywe przebiegające obszar chaotyczny. Są to tzw. krzywe krytyczne (...) zdefiniowane przez $x = F^n(x; a)$, które są wielomianami stopnia n .

W rozdziale 2.4.2 w równaniu (2.5) mamy wielkość $J(t)$, w równaniu (2.7) mamy symbol $D\vec{F}_t(\vec{x}_0)$. Jestem pewna, że takie pojawianie się niezdefiniowanych symboli jest poważnym błędem (nie wiadomo co to jest $D\vec{F}_t$; autor pisze Jacobian, ale Jacobian czego?). Co oznacza zdanie „Because a chaotic trajectory is bounded in the phase space, the evolution of the flow cannot be performed for an arbitrary long time ...”

W rozdziale tym można spotkać bardzo rozbudowane cytowania. Już na samym początku przed równaniem (2.1) autor cytuje pięć podręczników. W istocie (2.1) to ogólna postać autonomicznego układu równań różniczkowych pierwszego rzędu w przestrzeni d -wymiarowej. Cytowanie w tym miejscu książki Wainwrighta i Ellisa *Dynamical systems in cosmology* jest chyba przesadą.

Rozdział trzeci nosi tytuł Rotational model of an oblate moon. Rozdział ten jest bardzo krótki. W istocie czytelnik spodziewałby się bardziej szczegółowego opisu głównego przedmiotu badań i cytowania pracy Bieleckiego na samym początku rozdziału 3.1. W punkcie 2 na str. 19 mowa jest o modelowaniu wydłużonego satelity przy pomocy dwóch skrzyżowanych hantli z masami numerowanymi od 1 do 4 i odwołanie do rysunku 3.1 gdzie jednak te masy nie są zaznaczone. Nie wiadomo w którym momencie autor wykorzystuje założenie, że satelita jest modelowany przy pomocy hantli.

W wyprowadzeniu równania Bieleckiego (3.7) można zauważyć kilka niedokładności. Anomalia prawdziwa w równaniu (3.1) nie jest dana równaniem (3.2); równanie (3.2) wynika z prawa zachowania momentu pędu.

Aby były możliwe płaskie rotacje satelity nie trzeba zakładać, że jest on elipsoidą trójosiową. Wystarczy założyć jest symetryczny względem jednej z głównych płaszczyzn bezwładności.

Na stronie 20 w akapicie przed wzorem (3.7) autor wykorzystuje „the well known general relations in the two-body motion” i cytuje pracę A. Khan, R. Shama, L.M. Saha, Chaotic motion of an ellipsoidal satellite I, Astron. J., vol 116, 1998, pp. 2058-2066. Praca ta nie jest kanonicznym źródłem wzorów mechaniki nieba.

W rozdziale 3.2 autor podaje równania ruchu obrotowego dla dowolnego ciała. O założeniach, przy których te równania opisują poprawnie ruch satelity autor nie wspomina. Istotnym mankamentem jest brak podania układów współrzędnych, w których te równania są wypisane. I tak równania Eulera (3.9) są wypisane w układzie osi głównych satelity, ale występują w nich wielkości, które autor nazywa kosinusami kierunkowymi. Dalej wzory (3.10) i (3.11) wyrażają te kosinusy kierunkowe za pomocą kątów Eulera ale nie wiadomo jak zdefiniowane są te kąty bo nie podano w jakim układzie współrzędnych opisywana jest orientacja satelity: czy jest to układ planocentryczny, orbitalny czy barycentryczny. Jest to raczej istotne gdy mówimy o konkretnym obiekcie takim jak Hyperion.

Określenie „współrzędne Wisdoma” lub „kąty Wisdoma”, wprowadzone przez Klavettera jest wyjątkowo niewłaściwe. Są to po prostu kąty Eulera typu 3-1-2 (najczęściej używane są kąty Eulera typu 3-1-3).

Z wzorów podanych w rozdziale 3.2 trudno jest dociec w jaki sposób wygenerować krzywą blasku. Bardziej stosowny byłby algorytmiczny opis poczynając od wyjściowych równań Eulera do postaci końcowych wykresów, opisać jakie wielkości są kolejno wyznaczane i przytoczyć wzory z wyjaśnieniami lub chociażby odnośnikami np. do równania (3.15) można zacytować A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, A. N. Gritsuk, A. V. Mel'nikov, M. Yu. Sidorov, and I. I. Shevchenko, Observations and Theoretical Analysis of Lightcurves of Natural Satellites of Planets, Solar System Research, Vol. 36, No. 3, 2002, pp. 248-259. Dobrze byłoby również skorelować oznaczenia osi pionowych rysunków 6.2 z oznaczeniami wielkości w opisywanych w podrozdziale 3.2.2.

W podrozdziale 4.1. przydałoby się chociaż krótkie wyjaśnienie z jakiego warunku uzyskuje się poprawki $F_{2(i)}$, gdzie $i=0,1,2,3,\dots$. W dołączanej pracy autora podane są tylko wzory algorytmu, brakuje natomiast wyjaśnienia istoty zastosowanej metody sterowania chaosem.

W podrozdziale 5.1. po podaniu relacji trygonometrycznych widocznych na rysunku 5.1 pojawia się równanie różniczkowe (5.5) poprzedzone tekstem „Finally, one obtains the following equation of motion:” Wypada wspomnieć skąd ono się bierze lub chociażby odwołać się do Appendixu 2 pracy doktoranta M. Tarnopolski, Influence of a second satellite on the rotational dynamics of an oblate moon, Celest. Mech. Dyn. Astr. vol 127, 2017, pp. 121-138. Warto byłoby do dać, że uzyskane równanie istotnie różni się od równania Bieleckiego: jego współczynniki nie są w ogólności peridycznymi funkcjami czasu.

Praca doktorska, poza przedstawieniem wyników autora powinna być też źródłem rzetelnej wiedzy z której w przyszłości będą mogli korzystać przyszli studenci i doktoranci.

Rozprawa w całości napisana jest w języku angielskim i autor dobrze opanował ten język obcy. Występują tylko drobne literówki jak np. str 13, wiersz 7 od dołu: „and to not allow” czy też drobne błędy edytorskie typu błędna nazwa czasopisma w pracy A. Khan, R. Shama, L.M. Saha, Chaotic motion of an ellipsoidal satellite I,. Ukazała się ona w The Astronomical Journal a nie w The Astrophysical Journal jak wskazuje użyty skrót Astrophys. J.

Mimo przedstawionych powyżej zastrzeżeń i uwag krytycznych dotyczących sposobu prezentacji tekstu rozprawy uważam, że uzyskane wyniki opublikowane w oryginalnych artykułach są wartościowe, doktorant udowodnił, że potrafi się posługiwać pewnymi technikami badania układów dynamicznych i analizy szeregów czasowych więc rozprawa spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane w procedurze nadania stopnia doktora i wnoszę o dopuszczenie pana mgr. M. Tarnopolskiego do dalszych etapów tejże procedury.

Anna Rybicka