Dr hab. Marek Wolf, prof. nadzw. UKSW
Wydział Matematyczno–Przyrodniczy. Szkoła Nauk Ścisłych
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego
ul. Wóycickiego 1/3, PL-01-938 Warszawa

Wrocław, 07.09.2017

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Mariusza Tarnopolskiego zatytułowanej *Chaotic rotational dynamics of Hyperion*

Panuje powszechne przekonanie, że Układ Słoneczny zachowuje się jak bardzo dokładnie chodzący zegarek. Ziemia obraca się wokół osi w ciągu prawie 24 godzin a obieg wokół Słońca zajmuje 365 dni i 6 godzin. Z kolei Księżyc obraca się wokół swojej osi w ciągu 28 ziemskich dni i tyle samo zajmuje obieg wokół Ziemi (rezonans spin–orbita 1:1). Planeta Merkury jest w rezonansie 3:2 spin–orbita, tzn. merkuriański rok trwa półtora tamtejszego dnia. Sukcesem newtonowskej mechaniki było przepowiedzenie istnienia Neptuna. Analitycznie można rozwiązać tylko zagadnienie dwóch ciał działających na siebie siłami grawitacji. Włączenie do rozważań trzeciego ciała prowadzi do nieprzezwyciężonych trudności i niemożliwości znalezienia zwartego wzoru dającego ewolucję czasową. W 3-tomowym dziele *Nowe metody mechaniki niebieskiej* H. Poincare udowodnił, że układ równań opisujących trzy ciała jest niecałkowalny. Pozostaje szukanie rozwiązań przybliżonych w postaci szeregów perturbacyjnych. Wspomniane dzieło Poincarego zawierało pojęcia, które wiele lat później weszły do teorii chaosu, np. bifurkacje, przekroje Poincarego. W 1988 roku G.J.Sussmann i J. Wisdom pokazali numerycznie, że ruch Plutona jest chaotyczny i jego położenia już za 10 milionów lat nie można przewidzieć. W późniejszych latach J.Laskar pokazał, że wykładniki Lapunowa dla Układu Słonecznego są dodatnie i nie można przewidzieć pozycji planet za kilkadziesiąt milionów lat. Dla równań opisujących ziemską atmosferę wykładniki Lapunowa mają tak duże wartości, że nie można przewidzieć pogodę na więcej niż 3–4 dni naprzód. W połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku, po tym jak próbnik Voyager 2 przesłał na Ziemię zdjęcia Hiperiona, siódmego księżyca Saturna, J. Wisdom, S.J. Peale i F. Mignard pokazali, że ruch obrotowy tego księżyca jest chaotyczny — na Hiperionie nie ma dobrze określonej doby. Właśnie badaniu tego niestabilnego ruchu obrotowego Hiperiona jest poświęcona rozprawa doktorska mgra Mariusza Tarnopolskiego.

Przedstawiona do oceny rozprawa w całości napisana jest po angielsku. Składa się ona z 3 części: I. Preliminaries, II. Summary of the published articles i III. Publications. W trzeciej części zamieszczono następujące artykuły, których jedynym autorem jest Mariusz Tarnopolski:

[1] *Rotation of an oblate satellite: Chaos control* przyjęta do druku w Astronomy & Astrophysics, (impact factor 5.014, 35 punktów ministerialnym wykazie czasopism naukowych)

[2] *Influence of a second satellite on the rotational dynamics of an oblate moon* Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2017, **127**, No. 2, strony 121—-138 (Impact Factor 1.584, 30 punktów ministerialnym wykazie czasopism naukowych)

[3] *Nonlinear time series analysis of Hyperion's rotation: photometric observations and numerical simulations*, Astrophysics and Space Science, **357**:160, 2015 (Impact Factor 1.622, 25 punktów ministerialnym wykazie czasopism naukowych)

Dwie pierwsze części zajmują ponad 50 stron oraz 8 stron obszernego spisu referencji. Autor przedstawił historię odkrycia chaotycznego ruchu obrotowego Hiperiona, który ma wyjątkowo nieregularny kształt — jego rozmiary są następujące: $360.2 \times 266 \times 205.4$ km. Przypomina on nieregularnego kartofla, chociaż w literaturze angielskojęzyznej używany jest przydomek "sponge", ale to raczej dlatego, że ma małą gęstość właściwą: 0.54 g/cm^3. Z powodu dużego spłaszczenia Hiperion koziołkuje chaotycznie i nie daje się określić okresu obrotu, gdyż stale zmienia chwilową oś obrotu. Autor wprowadza podstawowe pojęcia używane w teorii chaosu: przekroje Poincarego, bifurkacje, wymiar korelacyjny, wykładniki Lapunowa, szeregi czasowe i ich widmo mocy. W następnym rozdziale omówione są modele opisujące ruch spłaszczonych księżyców. Stopień ich spłaszczenia opisuje parametr wyrażony przez odpowiednią kombinację momentów bezwładności względem trzech osi głównych oznaczony ω^2, co myli się z taką samą literą używaną na oznaczenie prędkości kątowej w innych miejscach.

Podstawowym równaniem jest równanie V. V. Bieleckiego zaproponowane pod koniec lat pięćdziesiątych XX wieku pierwotnie dla opisu ruchu sztucznych satelitów Ziemi ("sputników"). Następnie autor omawia układ trzech równań Eulera dla bryły sztywnej w zastosowaniu do Hiperiona. Nieokresowość ruchu obrotowego będzie się przejawiać w dużych zmianach jasności — dyskusja tego zjawiska kończy pierwszą część wstępu. W równaniach (3.16a,b,c) nie wiadomo, co to jest $\Phi_i(\kappa)$ i nie podano, jaki zakres przebiega indeks i. Ponieważ następna część zawiera przedstawienie otrzymanych przez autora wyników w pracach [1,2,3], przejdę od razu do części trzeciej zawierającej oryginalne publikacje mgra Tarnopolskiego.

Doktorant zestawił artykuły składające się na pracę doktorską w odwrotnym porządku chronologicznym: jako pierwsza jest praca *Rotation of an oblate satellite: Chaos control* przyjęta w sierpniu b.r. do druku w Astronomy & Astrophysics. Praca [2] ukazała się już drukiem w 2017 roku, a praca [3] pochodzi z 2015 roku. W pracy [1] autor używa równania Bieleckiego, aby otrzymać dynamikę spłaszczonych księżyców, w szczególności Hiperiona. Następnie podaje postać hamiltonianu prowadzącego do tych równań. Hamiltonian jest następnie tak zmodyfikowany, aby stłumić nieokresowe zachowanie, a więc móc kontrolować chaos. Nowy hamiltonian ma postać $\tilde{\mathcal{H}} = \mathcal{H} + \alpha\mathcal{F}$, gdzie parametr α autor nazywa czynnikiem skalowania (mimo przypisu na str. 29 to oznaczenie myliło mi się z występującym w innych miejscach kątem α). Otrzymane równania są całkowane numerycznie, a wyniki są przedstawione w postaci przekrojów Poincarego dla różnych wartości parametru α. Nie ma informacji o tym, jaki sposób rozwiązywania numerycznego równania różniczkowego zastosowano. Osobiście użyłbym metody Rungego – Kutty. Rysunek 4.1 na str. 31 jest dwukrotnie powtórzony: drugi raz w oryginalnej pracy. Przedstawia on 35 przekrojów Poincarego dla równania różniczkowego (30) (r. (4.3) na str. 30). Mimo iż autor pisze, że czynnik skalowania α jest mały, przekroje Poincarego były wykonane aż do $\alpha = 9.6$. Brakuje próby wyjaśnienia, dlaczego ze wzrostem parametru skalowania α od zera chaos maleje, aby przy $\alpha = 3$ otrzymać ruch periodyczny, po czym chaos znowu się pojawia, np. dla $\alpha = 4.3$. Pojawienie czysto okresowego ruchu dla $\alpha = 3.0$ jest też zademonstrowane za pomocą wykresu widma mocy. Brakuje szczegółów, jak to widmo mocy zostało otrzymane: ile było wartości w szeregu czasowym? Czy autor użył szybkiej transformaty Fouriera? Wtedy szereg czasowy powinien zawierać liczbę elementów, będącą potęgą 2? Pan Tarnopolski ogranicza się do stwierdzenia, że używa metodę Lomba-Scargle.

W pracy [2] mgr Tarnopolski bada grawitacyjny wpływ Tytana, największego z księżyców Saturna (średnica 5150 km), na ruch obrotowy Hiperiona. W takiej sytuacji są do dyspozycji trzy parametry. Oprócz spłaszczenia i mimośrodu orbity Hiperiona jest jeszcze stosunek masy Tytana do masy Saturna, który ma wartość 2.4×10^{-4}. Okazuje się, że bez Tytana ruch obrotowy Hiperiona byłby regularny. Analiza oparta jest na równaniach opisujących układ planeta — spłaszczony księżyc oraz planeta — sferycznie symetryczny księżyc (punktowa masa) poruszający się po kolistej orbicie + spłaszczony księżyc. Ciekawie modelowany jest spłaszczony księżyc jako dwie hantle, na końcach których znajdują się takie same masy, a hantle są różnej długości i wzajemnie prostopadłe (układ taki jest płaski). Aby lepiej zasymulować elipsoidę o trzech różnych osiach, potrzebna jest trzecia hantla prostopadła do pozostałych dwóch i o innej długości. Trudno przewidzieć na ile dodanie trzeciej hantli zmieni zachowanie systemu — w nieliniowych zjawiskach intuicja często zawodzi. Rysunek Fig.4 przedstawia coś w rodzaju przekrojów Poincerego (zamiast rysować punkty przecięcia trajektorii z ustaloną płaszczyzna w przestrzeni fazowej zaznaczono w zmiennych $\theta, \dot{\theta}$ punkty po każdym przyroście o 2π zmiennej grającej rolę czasu — czyli zdjęcia stroboskowe) oraz wykresy bifurkacyjne w funkcji spłaszczenia ω^2 oraz stosunku mas księżyca i macierzystej planety (przypadek ogólniejszy niż Saturn–Tytan) dla obu układów, tzn. planeta–spłaszczony księżyc i planeta + 2 księżyce. Wykonanie tych wykresów wymagało olbrzymiej i dobrze zorganizowanej pracy. Zaprezentowane wykresy pokazują regularny ruch obrotowy bez uwzględnienia dodatkowego księżyca i chaotyczny ruch obrotowy, gdy obecne jest dodatkowe oddziaływanie grawitacyjne. Autor wylicza też wymiar korelacyjny zbiorów punktów (Fig. 4) i otrzymuje wyraźnie różne wartości: bliskie 1 przy braku dodatkowego oddziaływania i wymiar około 1.75 przy obecności dodatkowego satelity. Tym razem autor napisał, że do całkowania równań różniczkowych używał metody backward differentiation. Hamiltonian dla rozważanych równań składa się z dwóch części: głównego członu opisującego przyciąganie grawitacyjne Saturna i mniejszego zaburzenia pochodzącego od Tytana. Taka postać sugeruje użycie twierdzenia KAM (Kołmogorowa–Arnolda–Mosera) dla jakościowej (oprócz numerycznej) dyskusji rozwiązań albo też badany model mógłby posłużyć jako ilustracja tego twierdzenia. Niektóre rysunki znowu występują dwukrotnie: w publikacji i na stronach 35–37 w rozdziale 5. Mimośród orbity Hiperiona oznaczany jest na rysunkach literą ϵ a w tekście e.

Praca [3] analizuje metodę fotometryczną wyznaczenia ruchu obrotowego Hiperiona. Pierwsze takie obserwacje (w paśmie R) przeprowadził pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku J.J. Klavetter, używając kamery CCD 800×800 pikseli na McGraw-Hill Observatory w Arizonie. Otrzymał krzywe jasności, które dowodziły, że ruch obrotowy Hiperiona jest nieokresowy. W 1999 i 2000 roku A.V. Devyatkin et al przeprowadzili obserwacje Hiperona w pasmach C, B, V oraz R. Pan Tarnopolski podejmuje próbę wyznaczenie maksymalnego wykładnika Lapunowa (mwL) z tych danych. Klavetter przytacza w swojej pracy tabelę wartości 38 pomiarów i mgr Tarnopolski metodą sklejania funkcji (cubic spline) dopasowuje do nich krzywą, z której następnie wyznacza 5000 równoodległych wartości, użytych następnie do wyznaczenia mwL. Doktorant wykonuje rekonstrukcję przestrzeni fazowej metodą Takensa i szacuje wymiary korelacyjne tych trajektorii. Tylko dla danych Klavettera wymiar jest znacząco większy od 1: $d_C = 1.31$. Dwiema metodami mgr Tarnopolski szacuje mwL i dla większości zbiorów danych i wartości parametru zanurzania w metodzie Takensa są one ujemne. Okazuje się, że dane te zawierają za mało punktów pomiarowych: autor szacuje, że potrzebne są co najmniej roczne pomiary krzywych jasności, próbkowane dostatecznie często. W haśle *Hyperion_(moon)* na wikipedii podany jest czas Lapunowa rzędu 30 dni i wynik ten jest przypisany właśnie Panu Tarnopolskiemu. W równaniu (6) w pracy [3] po pierwsze δ_{jk} myli się z deltą Kroneckera, a po drugie, po prawej stronie nie występuje indeks j. Praca ta zawiera blisko 60 wykresów i ich wykonanie musiało być bardzo czasochłonne.

Pan Tarnopolski wykazał bardzo dobrą znajomość literatury odnoszącej tak do ruchu obrotowego Hiperiona jak też do teorii chaosu i metod tam stosowanych. Praca jest bardzo dobrze napisana i ze sporym talentem dydaktycznym. Otrzymałem egzemplarz w twardych okładkach wydrukowany w kolorze na bardzo dobrym papierze.

W archiwum preprintów arXiv znalazłem 18 prac Pana Tarnopolskiego, w tym cykl artykułóów o rozbłyskach gamma, które mogłyby być podstawą kolejnej rozprawy doktorskiej. Najnowszy preprint z 3.08 2017 poświęcony jest modelowaniu kursu wirtualnej waluty bitcoin. Doktorant przedstawił też dydaktyczne wyjaśnienie, dlaczego nasz wszechświat jest trójwymiarowy.

Pan Tarnopolski był w roku 2013 i 2015 laureaten Stypendium Specjalnego im. M. Smoluchowskiego dla doktorantów.

Ostatecznie stwierdzam, że przedstawiona przez Mariusza Tarnopolskiego rozprawa spełnia wymagania wymienione w artykule 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o tytułach i stopniach naukowych (z późniejszymi znianami) i wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Biorąc pod uwagę wysoki poziom pracy doktorskiej i bogaty dorobek publikacyjny składam wniosek o nagrodę dla doktoranta.

Wolf

(dr hab. Marek Wolf)