



Toruń, 28. sierpnia 2023 r.

prof. dr hab. Krzysztof Goździewski
Instytut Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
ul. Grudziądzka 5, PL-87-100 Toruń

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Piotra Guzika
Interstellar minor bodies in the Solar System

RAMY PRAWNE I FORMALNE

Recenzję sporządzono w oparciu o wymagania formalne oraz zalecenia Rady Doskonałości Naukowej, stosownie do Ustawy z 2020 roku, poz. 85 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z późniejszymi zmianami, odnośnie postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora. Warunki stawiane rozprawom doktorskim zostały określone w art. 187 Ustawy. W odniesieniu do dziedziny astronomia, także ugruntowanym w środowisku wymaganiem jest to, aby *rozprawa doktorska prezentowała ogólną wiedzę teoretyczną kandydata do stopnia oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej*.

PRZEDMIOT I FORMA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Według wymagań ustawowych, przedmiotem rozprawy doktorskiej powinno być *oryginalne rozwiązanie problemu naukowego*. Ustawa dopuszcza, aby oprócz tradycyjnej formy zamkniętej pracy pisemnej, mógł ją tworzyć zbiór *opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych*, a także *samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej*.

Materiał rozprawy zawarty w trzech recenzowanych artykułach, opublikowanych wspólnie z promotorami dysertacji, dr. Michałem Drahusem i prof. Wacławem Waniakiem oraz innymi współpracownikami, w prestiżowych czasopismach z listy filadelfijskiej, t.j. *Nature* (aktualny IF 64) i *Nature Astronomy* (aktualny IF 16):

P1 Drahus, M.; **Guzik, P.**; Waniak, W.; Handzlik, B.; Kurowski, S. & Xu, S.: *Tumbling motion of 1I/‘Oumuamua and its implications for the body’s distant past*, *Nature Astronomy* **2**, 2018, pp. 407–412,

P2 **Guzik, P.**; Drahus, M.; Rusek, K.; Waniak, W.; Cannizarro, G. & Pastor-Manazuela, I.: *Initial characterization of interstellar comet 2I/Borisov*, *Nature Astronomy* **4**, 2020, pp. 53–57,

P3 **Guzik, P.** & Drahus, M.: *Gaseous atomic nickel in the coma of interstellar comet 2I/Borisov*, *Nature* **593**, 2021, pp. 375–378.

Wysoka ranga naukowa czasopism Nature i Nature Astronomy jest powszechnie uznawana. Są to periodyki publikujące przełomowe, wyselekcjonowane doniesienia badawcze, poddane dwuetapowej, wnikliwej ocenie międzynarodowych ekspertów oraz weryfikacji zgłaszanych wyników i ich interpretacji. Przyjęta przez te pisma forma publikacji, polegająca na przedstawieniu materiału w sposób zrozumiały dla niespecjalisty, ale uzupełniona o wyczerpujące, ściśle uzasadnienie i opis metod badawczych, pozwala na dotarcie do szerokiego kręgu odbiorców.

Według Astrophysics Data System (ADS), w momencie sporządzania recenzji praca P1 była cytowana 54 razy, praca P2 była cytowana 93 razy oraz P3 była cytowana 14 razy, co świadczy o ich żywym oddźwięku w środowisku astronomicznym.

Artykuły składające się na rozprawę powstały we współpracy z niewielką grupą współautorów. W dwóch artykułach (P2 i P3) mgr Guzik jest pierwszym autorem, w artykule P1 jest autorem drugim. Ponieważ w publikacjach Nature oraz Nature Astronomy wymagane jest podanie deklaracji wkładu merytorycznego autorów, możemy na tej podstawie ocenić kontrybucję mgra Guzika do tych prac. Ocena taka wynika także wprost z oświadczeń współautorów, dołączonych w dokumentacji. W artykułach P1 i P2 oceniają oni ogólny udział mgra Guzika na 40%. W artykule P3, napisanym z drem Drahussem, ta kontrybucja wynosi 55%. W każdym przypadku jest ona więc bardzo znacząca i dotyczy różnych aspektów opracowania materiału. W szczególności jest nim pomysł badań (co zaznaczono *explicitie* w pracy P1), planowanie i przygotowanie nietrywialnych wniosków obserwacyjnych na duże instrumenty, stworzenie kodów, redukcja surowych obserwacji, analiza uzyskanych danych, ich interpretacja i opracowanie tekstu. Nie ulega wątpliwości, że mgr Guzik był aktywnym i rzeczywistym współtwórcą prac.

Dysertacja zawiera kilkunastostronicowy, przejrzysty wstęp, przewodnik po przedmiocie i najważniejszych wynikach rozprawy, napisany w języku angielskim.

Podsumowując ten wątek recenzji można stwierdzić, że artykuły składające się na doktorat mgra Guzika stanowią monotematyczny cykl poświęcony badaniom budowy i cech fizycznych, składu chemicznego oraz dynamiki ruchu małych obiektów pochodzących najprawdopodobniej spoza Układu Słonecznego. Kontrybucja merytoryczna i techniczna Doktoranta do tych artykułów jest bardzo znacząca, a biorąc pod uwagę fakt, że występuje w dwóch pracach jako autor pierwszy oraz w jednej pracy jako autor drugi, wkład ten można ocenić na co najmniej równoważny lub dominujący względem współautorów. Aspekty te w pełni pozytywnie wyczerpują przywołany wyżej warunek Ustawy, określający zakres merytoryczny i formę dysertacji.

OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ JAKO ROZWIĄZANIA PROBLEMU NAUKOWEGO

Aby zrozumieć głęboki sens naukowy i wartość badań przedstawionych w artykułach tworzących dysertację doktorską mgra Piotra Guzika, należy spojrzeć na nie przez pryzmat przełomu w badaniach układów planetarnych, jaki przyniosło odkrycie obiektów 1I/'Oumuamua i 2I/Borisov.

Są to pierwsze zidentyfikowane obiekty, które dotarły do Układu Słonecznego z przestrzeni międzygwiazdowej, choć istnienie takich ciał antycypowano co najmniej od połowy ubiegłego wieku, np. w pracach Jana Oorta i Freda Whipple, na zasadzie swego rodzaju Graala astrofizyki komet. Teoria formowania się planet zakłada, że duża część peryferyjnej materii komentarnej i planetozymali powinna być rozproszona w przestrzeń międzygwiazdową poprzez perturbacje planetarne. Odkrycie takich obiektów potwierdza więc nasze rozumienie tego procesu.

Komety i asteroidy wyrzucone ze swoich systemów macierzystych stanowią kapsuły czasu, niosące informacje o warunkach i procesach zachodzących w tych układach. Badanie ich składu chemicznego i charakterystyk fizycznych pozwala uzyskać wgląd w środowisko, w którym te obiekty się uformowały. Jak zauważa mgr Guzik w części przewodniej, ciała te pozwalają nam zbadać pozasłoneczne systemy planetarne z odległości ułamka AU, pomimo tego, że podróże międzygwiazdowe pozostają wyłącznie w sferze fantastyki naukowej. Oba obiekty urzeczywistniły

potencjał eksploracji obiektów międzygwiazdowych. Dzięki temu sformułowano projekty misji zdalnych, które mogłyby być aktywowane zaraz po wykryciu potencjalnych celów i badać je z bliska. Taką misją jest COMET INTERCEPTOR ESA (2019), przewidziana do realizacji w 2029 r.

Chociaż nie mamy jeszcze możliwości takich bezpośrednich obserwacji małych ciał z przestrzeni międzygwiazdowej typu 1I/'Oumuamua i 2I/Borisov, analiza pomiarów naziemnych w dziedzinie fotometrii, spektroskopii i analizy orbitalnej przyspieszenia niegrawitacyjnego dostarcza wskazówek na temat budowy i natury tych obiektów. Fotometria i spektroskopia pozwala w szczególności na określenie rozmiarów, kształtu i rotacji oraz barwy, składu chemicznego i cech morfologicznych, za zatem na klasyfikację ciała (zgrubnie, kometa lub asteroida).

Odkrycie obu ciał, szczególnie 1I/'Oumuamua, wyzwoliło fenomenalne zainteresowanie grup i badaczy specjalizujących się w obserwacjach komet i asteroid oraz interpretacji tych obserwacji (cytowania dziesiątków artykułów można znaleźć w aktualnym przeglądzie Jewitt & Seligman, ARA&A 2023). Ale w takiej sytuacji pojawia się też natychmiast silna konkurencja ze strony różnych grup badawczych oraz problemy techniczne i presja czasu – interesujące obiekty wykazują małą jasność (na poziomie 19 mag i 15 mag, odpowiednio), a ze względu na orbity hiperboliczne mogą się szybko oddalać od Słońca poza zasięg obserwacji w interwale tygodni (1I/'Oumuamua). Dlatego ich obserwacje wymagały użycia największych teleskopów oraz planowania i aplikacji o czas obserwacyjny na “oblegane” instrumenty w skali dosłownie dni, a może nawet godzin. Tym bardziej godne podziwu i uznania jest to, że mgr Guzik ze współpracownikami przygotowali projekty obserwacyjne i uzyskali dostęp do tych instrumentów w niebagatelnej ilości wielu nocy.

W powyższym kontekście praca doktorska mgra Piotra Guzika przynosi fundamentalne dane i wyniki, które opisano skrótowo poniżej, w oparciu o publikacje, przewodnik po materiale rozprawy i inne źródła.

ARTYKUŁ P1. Obserwacje fotometryczne 1I/'Oumuamua wykonane na 8-m teleskopie Gemini North 27. i 28. października, w momencie zbliżenia do Ziemi na 0.16 au pozwoliły na wykrycie i potwierdzenie nadzwyczajnych dużych zmian jasności 2.6 ± 0.2 mag i wydłużonego kształtu – wyznaczono relację półosi bryły rzędu 5, poprawiając wcześniejsze oszacowania w literaturze (Meech i in., Nature 2017) o czynnik 2. Wykryto zmienny okres rotacji ok. 7.56 ± 0.01 h, interpretując je jako “koziółkowanie” po wcześniejszym zderzeniu lub zderzeniami z innym ciałem. Wyznaczenie okresu i charakteru rotacji 1I/'Oumuamua pozostaje jednak otwarte – Flekkøey i in. (ApJL 2019) odkryli korelację okresu rotacji z epoką obserwacji. Potwierdzono brak mierzalnej aktywności kometarnej, co pozwoliło sklasyfikować obiekt jako asteroidę. Fakt ten pozostawał lub pozostaje w sprzeczności z niewytłumaczalnie dużym radialnym przyspieszeniem niegrawitacyjnym w kierunku od Słońca, raportowanym wielokrotnie w literaturze (np. Micheli, Nature 2018; Biały & Loeb, ApJL 2018; Spada, ArXiv 2023), wobec braku mierzalnej emisji gazowej i pyłowej. Niedawno opublikowany artykuł Bergner & Seligman (Nature, 2023), jak mi się wydaje, wyjaśnia ten paradoks w atrakcyjny sposób poprzez mechanizm radiolizy 30% lodu wodnego przez promieniowanie kosmiczne w głębokiej przestrzeni międzygwiazdowej, a następnie przez uwolnienie wodoru molekularnego blisko Słońca. Jest więc prawdopodobne, że 1I/'Oumuamua powstała jako kometa bogata w wodę, podobnie do obiektów z obłoku Oorta w Układzie Słonecznym. Według autorów przywołanej pracy ten atrakcyjny i prosty model wyjaśnia większość jego cech, w tym uznawanych dotąd za niezwykle. Kwestia pełnego ich zrozumienia pozostaje jednak, jak zauważa mgr Guzik w dysertacji, nadal otwarta. Wyniki pracy P1 przyczyniły się do rewizji klasyfikacji małych obiektów jako asteroid (nieaktywne) i komet (aktywne). Obecnie mówi się, że morfologiczne przejście pomiędzy nimi ma charakter dość ciągły (np. Seligman & Moro-Martín, ArXiv 2023).

ARTYKUŁ P2. Doświadczenie zdobyte przy analizie obserwacji 1I/'Oumuamua okazało się z pewnością nieocenione przy obserwacjach i wstępnej charakteryzacji pierwszej odkrytej komety międzygwiazdowej 2I/Borisov, odkrytej 30. sierpnia 2019. Już 10. i 13. września 2019 mgr Guzik

ze współpracownikami przeprowadzili obserwacje fotometryczne i spektroskopowe tego obiektu z wykorzystaniem 4.2 m teleskopu Williama Herschela (La Palma) oraz 8.2 m teleskopu Gemini North (Mauna Kea). Doktorant przeanalizował hiperboliczną orbitę obiektu, wskazującą na silny efekt niegrawitacyjny. Najważniejsze wyniki publikacji to oszacowanie barwy, podobnej do komet w Układzie Słonecznym, zbadanie charakteru i cech jakościowych emisji pyłu oraz rozmiaru obiektu ok. 1 km (później zrewidowanych przez Jewitt i in. na ok. 0.5 km). Przeprowadzenie badań 2I/Borisov było w istocie możliwe dzięki automatycznemu alertowi przez dedykowany, autorski system śledzący w czasie rzeczywistym bazy danych astrometrycznych (Rusek & Guzik, INTERSTELLAR CRUSHER, 2019). Efektywnie zaplanowana z rozmysłem praca P2 jest dlatego szczególnie cenna, co także ma odzwierciedlenie w niemal 100 cytowaniach, zaledwie po dwóch latach od jej opublikowania.

ARTYKUŁ P3. Dzięki temu, że pod odkryciu komety 2I/Borisov warunki obserwacyjne ulegały przez wiele tygodni poprawie, w pracy P3 przedstawiono wyniki i interpretację obserwacji spektroskopowych 2I/Borisov za pomocą spektrografu na teleskopie 8 m ESO/VLT, wykonanych w ciągu kolejnych trzech nocy, gdy kometa 2I/Borisov była w odległości ponad 2 au od Słońca. W widmie wykryto po raz pierwszy i nieoczekiwanie obecność par niklu w zimnym środowisku (180 K). Odkrycie niklu w emisji 2I/Borisov prawdopodobnie “sprowokowało” wkrótce podobne znaleziska par metali w warkoczach komet przynależących do naszego Systemu (np. Manfroid i in., Nature 2021) lub odnowiło zainteresowanie tym wątkiem. Potwierdzono również obecność molekuł typowych dla komet w Układzie Słonecznym: CN, C₂, C₃, NH, NH₂, OH. Ugruntowało to podobieństwo komety 2I/Borisov do znanych nam obiektów, choć istnieją jakościowe różnice, np. znacznie wyższy poziom emisji CO (Jewitt & Seligman, ARA&A 2023).

W tym miejscu jest okazja wygłosić właściwie jedyny komentarz krytyczny, dotyczący samej prezentacji rozprawy na tle bogatej literatury przedmiotu. Przewodnik ten aka przedmowa mogłyby być bardziej rozwinięte, w szczególności zawierając obszerniejsze odniesienie i dyskusję wyników rozprawy do gwałtownie przyrastającej ilości publikacji i hipotez dotyczących natury obiektów 1I/'Oumuamua i 2I/Borisov. Niektóre takie wątki poruszyłem wrywkowo wyżej.

OCENA OGÓLNEJ WIEDZY TEORETYCZNEJ DOKTORANTA

Prace rozprawy dotyczą w istocie badań o charakterze interdyscyplinarnym. Oparte są o całą ścieżkę wnioskowania, począwszy od sformułowania problemu, wykrycie bardzo rzadkiego i interesującego obiektu, planowanie obserwacji i aplikację o czas obserwacyjny na największych dostępnych instrumentach, a następnie redukcję surowych obserwacji fotometrycznych i spektroskopowych, ich złożoną analizę i interpretację. Na każdym kroku, a w szczególności na etapie aplikacji o czas instrumentalny, należy mieć jasną wizję celu pomiarów. Prace mgr Guzika dowodzą, że nabył on rozległą wiedzę obserwatora i teoretyka w dziedzinie astrofizyki. Samo przygotowanie wniosków obserwacyjnych na największe dostępne instrumenty o indywidualnej charakterystyce wymaga wyobraźni naukowej i nietrywialnych umiejętności praktycznych.

Doktorant udowodnił, że potrafi kontrybuować na każdym etapie projektu badań: od pomysłu i wyboru celu obserwacji (wspomniana już praca P1), zaplanowania obserwacji fotometrycznych i spektroskopowych (P1, P2, P3), analizę orbitalną z użyciem specjalistycznych kodów (P2), a także opracowanie autorskiego oprogramowania (INTERSTELLAR CRUSHER, P2) analizującego rozproszone bazy danych astrometrycznych *online*, analizę fotometryczną pozwalającą na zbadanie cech fizycznych i rozmiarów obiektu (P1, P2) oraz spektroskopową, która pozwala zbadać szczegółowo skład chemiczny (P3), wreszcie przygotowanie publikacji w wysoko notowanych periodykach.

Podsumowując: rozprawa doktorska dowodzi, że mgr Piotr Guzik jest zdolnym i gruntownie wykształconym astrofizykiem zajmującym się małymi obiektami w układach planetarnych. Zasiób jego wiedzy ogólnej w dziedzinie astronomii i astrofizyki obserwacyjnej i teoretycznej jest niewątpliwie rzeczywisty i bardzo dobrze, obiektywnie udokumentowany.

OCENA UMIEJĘTNOŚCI SAMODZIELNEGO PROWADZENIA PRACY NAUKOWEJ

W tym punkcie można zasadniczo powtórzyć argumenty sformułowane powyżej i ocenić umiejętność prowadzenia badań naukowych przez mgra Piotra Guzika bardzo wysoko. Jeszcze raz warto podkreślić fakt opublikowania wyników badań w czasopiśmie *Nature* i *Nature Astronomy* na samym progu kariery naukowej. Jest to najlepsza rekomendacja dla zdolności i umiejętności Doktoranta. Mówiąc o samodzielności w pracy naukowej nie można zapominać, że w istocie ta samodzielność wymaga umiejętności współpracy w zespole badawczym – jest truizmem stwierdzenie, że w dziedzinie astronomii bardzo trudno osiągnąć ważne wyniki i odkrycia pracując samodzielnie. Także w tym aspekcie Doktorant udowodnił, że potrafi komunikować się i współdziałać z większą grupą współpracowników. Nie mam wątpliwości, że mgr Piotr Guzik jest ukształtowanym i dojrzałym naukowcem, którego dalszy rozwój będziemy z przyjemnością obserwować w nadchodzących latach.

KOMENTARZ I PODSUMOWANIE

Rozprawa doktorska mgra Piotra Guzika opiera się na oryginalnym materiale, zweryfikowanym i ocenionym pozytywnie przez niezależnych recenzentów międzynarodowych pism *Nature* i *Nature Astronomy*. Prace rozprawy mają charakter pionierski, przyczyniając się do utworzenia nowej gałęzi astrofizyki pozasłonecznych układów planetarnych, w oparciu o obserwacje komet i asteroid wyrzuconych z systemów macierzystych. Zbadano szczegółowo dwa takie obiekty, dotychczas wykryte w przeglądach naziemnych. Dziedzina ta ma świetne perspektywy, dzięki spodziewanemu w przyszłym roku uruchomieniu Teleskopu Vera C. Rubin Observatory i istniejącej populacji potencjalnie interesujących ciał, której liczebność w Układzie Słonecznym oceniana jest na kilka tysięcy. Przewiduje się, że przeglądy NASA NEO SURVEYOR oraz Vera C. Rubin LSST wykryją co najmniej jeden taki obiekt międzygwiazdowy rocznie (Jewitt & Seligman, *ARA&A* 2023).

Ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną (obserwacyjną) Doktoranta w dziedzinie astronomii, jak również zdolność do prowadzenia samodzielnych badań naukowych należy ocenić wysoko i jednoznacznie pozytywnie.

Z formalnego, merytorycznego i zwyczajowego punktu widzenia, rozprawa doktorska mgra Piotra Guzika spełnia wymogi Ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dziennik Ustaw, z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami). W świetle przedstawionego materiału, ocena rozprawy oraz wszystkich wymaganych jej aspektów jest jednoznacznie pozytywna.

Z przekonaniem i przyjemnością rekomenduję dopuszczenie mgra Piotra Guzika do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy, biorąc pod uwagę jej nowatorski i szeroki zakres oraz przełomowe wyniki obserwacyjne i teoretyczne. Oryginalny i ambitny projekt doktorski jest ważki dla astrofizyki i teorii formowania układów planetarnych, aktualny i perspektywiczny. Przyniósł bogate wyniki, opublikowane w periodykach o globalnym zasięgu i najwyższym *Impact Factor*. Prace składające się na rozprawę uzyskały w krótkim okresie ponad 150 cytowań, co świadczy o ich rozpoznawalności i wadze dla szerokiego środowiska astronomicznego. Świadczą one również o potencjale naukowym i wysokim poziomie przeprowadzonych badań.

Krzysztof Goździewski
(niemal w rocznicę odkrycia komety 2I/Borisov)