



Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk

Zespół Astrochemii
Prof. dr hab. Robert Kołos

ul. Kasprzaka 44/52, 01-224 Warszawa

Tel. +(48 22) 343 32 18
Fax +(48 22) 343 33 33
E-mail: rkolos@ichf.edu.pl

Warszawa, 12 września 2018 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Magdaleny Kulczak-Jastrzębskiej *Deuterated Molecules in Star-Forming Regions*

Swoją pracę doktorską mgr Magdalena Kulczak-Jastrzębska poświęciła obserwacjom obfitości deuterowanych cząsteczek w obszarach powstawania gwiazd. Na Rozprawę składają się monoautorskie artykuły: dwa w Acta Astronomica oraz jeden w The Astrophysical Journal:

A. *Observations of HDO in the High-Mass Star Forming Regions* [AcA 66, 313 (2016)]

B. *Analysis of Low Excitation HDO Transitions toward the High-mass Star-forming Regions G34.26+0.15, W51e1/e2, and W49N* [ApJ 835, 121 (2017)]

C. *Deuterated Molecules in Star-Forming Regions* [AcA 68, 125 (2018)]

którym towarzyszy dwujęzyczne streszczenie oraz *Synopsis* - rodzaj referatu w języku angielskim.

W referacie nie został sprecyzowany cel podjętej pracy doktorskiej. Znajdujemy tu krótkie literaturowe wprowadzenie do historii badań ośrodka międzygwiazdowego, do zastosowań astrofizyki w podczerwieni i submilimetrycznym obszarze widma, a także do podstaw wiedzy o międzygwiazdowym gazie i pylu, ze zwróceniem uwagi na mechanizmy syntezy lodu oraz wzbogacania wody w izotopolog zawierający deuter. Doktorantka omawia również podstawy procesów gwiazdotwórczych, z podziałem na gwiazdy o masach małych i dużych. Opracowanie zamyka 3-stronicowe omówienie załączonych publikacji.

Artykuły A i B wiążą się z zagadnieniem genezy wody wykrywanej w obszarach tworzenia masywnych gwiazd. A priori, H_2O może powstawać (i) w zimnym gazie, poprzez szereg egzotermicznych reakcji poczynając od zderzeń H^{3+} lub protonów z atomowym tlenem; (ii) na powierzchni zimnych ziaren pyłu, zwłaszcza w sekwencji reakcji zapoczątkowanych spotkaniem atomów tlenu i wodoru; (iii) we fronsie fali uderzeniowej, z udziałem endotermicznych reakcji niezjonizowanych partnerów. Równolegle z syntezą H_2O trwa synteza HDO, przy czym wzbogacanie w cięższy wariant jest najefektywniejsze w niskich temperaturach. Zależnie od położenia wewnątrz

przedgwiazdowego obłoku oraz od zaawansowania jego ewolucji, woda zawarta jest preferencyjnie w lodowych otoczkach pyłu albo trafia z lodu do gazu. Rozdzielone przestrzennie oszacowania stosunku $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ w gazie, dostępne poprzez śledzenie czysto rotacyjnych przejść izotopologów wody, mogą dostarczyć wskazówek odnośnie warunków fizycznych towarzyszących niegdysiejszej syntezie obserwowanych cząsteczek.

Ustalenia obfitości HDO opisane w artykule **A** oparte są głównie na obserwacjach najniższej energetycznej rotacyjnej emisji tej cząsteczki w kierunku pięciu radioźródeł – obszarów formowania masywnych gwiazd: Sgr B2(N), Sgr B2(M), W33A, W31C oraz DR21(OH). Doktorantka skorzystała ponadto z danych literaturowych dotyczących kilku przejść między stanami rotacyjnie wzbudzonymi (dla Sgr B2(N) i Sgr B2(M)) oraz intensywności promieniowania ciągłego emitowanego przez pył (dla W33A oraz W31C). Dane te, wraz z kompletem założeń (dotyczących m.in. stosunku pyłu do gazu, temperatury sublimacji wody, a także wartości wykładników potęgowych opisujących radialny rozkład obfitości molekularnego wodoru oraz radialny rozkład temperatury) posłużyły do modelowania profili obserwowanych linii spektralnych, dając względne, odniesione do H_2 , obfitości HDO w gorącym obszarze wewnętrznego rdzenia (X_{in}) oraz w chłodnej zewnętrznej otoczce (X_{out}). Jakościowy wynik przeprowadzonej analizy – X_{in} większe od X_{out} – jest oczywiście zgodny z wcześniejszą wiedzą o podobnych obiektach; sublimacja lodowych ziaren zwiększa zawartość wody w fazie gazowej. Zaprezentowany przez Doktorantkę rysunek obrazujący cząstkowe obsadzenia kilku wzbudzonych poziomów rotacyjnych HDO w funkcji odległości od centrum obłoku (wynik modelowania) przekonująco wskazuje, że przejście emisyjne 465 GHz dobrze nadaje się do sondowania warunków fizycznych w zimnej zewnętrznej otoczce. Szkoda, że Autorka nie zacytowała przy tej okazji pracy Comito et al. sprzed 15 lat (2003, A&A 402, 635; patrz Fig. 5), z której wypływa podobny wniosek. Ogólnie, praca budzi pewien niedosyt poprzez brak próby oszacowania kluczowego stosunku $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$. Czy przynajmniej dla W33A i DR 21(OH) nie można tu było skorzystać z obserwacji H_2^{18}O dokonanych instrumentem HIFI (Flagey et al. 2013)?

Pełniejsza analiza została przedstawiona w artykule **B** dla kolejnych trzech obszarów formowania gwiazd masywnych: G34.26+0.15, W51e1/e2 oraz W49N. Pracę tę Doktorantka oparła na nowych pomiarach przejść HDO: $1_{0,1}-0_{0,0}$ przy 465 GHz i (po raz pierwszy dokonanych z naziemnego obserwatorium) $1_{1,0}-1_{0,1}$ przy 509 GHz. Wykorzystała również dostępne w literaturze dane dotyczące submilimetrowej emisji pyłu oraz (dla G34.26+0.15 i W51e1/e2) obserwacje przejść z wyżej wzbudzonych poziomów rotacyjnych HDO. Co ważne, skorzystała z wcześniejszych obserwacji izotopologu H_2^{18}O w kierunku wymienionych wyżej źródeł; pozwoliło to wyznaczyć wartości stosunku $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ w zewnętrznych otoczkach. Zaproponowane zostały również oszacowania $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ dla wewnętrznego rdzenia, oparte na założeniu, iż $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ wynosi tam niezmiennie 10^{-4} . Wnioskowanie – na podstawie tych szacunków – o wzbogacaniu obserwowanej wody w deuter w miarę przesuwania się od rdzenia do zimnej otoczki uważam za ryzykowne. Podobnie jak w

przypadku publikacji A, ciekawe jest śledzenie zmian obsadzenia wzbudzonych poziomów rotacyjnych HDO towarzyszących zwiększaniu odległości od centrum obłoku. Na uwagę zasługuje wskazanie roli linii 509 GHz (pochodzącej od cząsteczek o umiarkowanym wzbudzeniu rotacyjnym) jako nośnika informacji o obszarze przejściowym – charakteryzowanym przez temperaturę bliską punktowi sublimacji lodu (ok. 100 K) – separującym wewnętrzną część obłoku od zewnętrznej. Uzyskane oszacowania obfitości HDO oraz stosunku HDO/H₂O Doktorantka dyskutuje porównując je z danymi literaturowymi o zróżnicowanej wiarygodności, mniej lub bardziej kompletnymi, dostępnymi dla rozmaitych obszarów formowania się gwiazd. W interesującej zbiorczej Tabeli 9 (B) zabrakło jednak wyników uzyskanych przez nią samą, opisanych w publikacji A.

Artykuł C również związany jest z problemem syntezy deuterowanych międzygwiazdowych cząsteczek, dotyczy jednak obszarów formowania gwiazd o małych masach, w najwcześniejszych etapach ewolucji. Przejście rotacyjne 216 GHz DCO⁺ zostało wybrane jako próbnik obecności molekuł zdeuterowanych. Przestrzenny rozkład tego kationu tworzonego w przedgwiazdowym rdzeniu zestawiany był z rozkładem CO (potencjalnie mapującym kierunki molekularnych wypływów z sąsiednich protogwiazd) oraz z obrazowaniem submilimetrowego promieniowania pyłu. Doktorantka, inspirowana pracami Lisa et al. z 2002 i 2016 r., poszukiwała przykładów szczególnych odstępstw topografii emisji DCO⁺ od topografii emisji pyłu (odzwierciedlającej globalną gęstość obłoku), które można by tłumaczyć jako efekt oddziaływania molekularnych wypływów z pobliskich protogwiazd. Na przedstawionych mapach (analizowane były obszary Barnard 1, NGC 1333, LDN 1251, LDN 1630, LDN 1641 oraz S 68) można znaleźć argumenty sugerujące istnienie takich oddziaływań. Niekiedy jest to całkiem przekonujące, np. dla NGC 1333, gdzie rejon SK16, z intensywną emisją DCO⁺, znajduje się w zasięgu prominentnego wypływu z protogwiazdy SVS13. Doktorantka przytacza koncepcję Lisa et al. jakościowo tłumaczącą zjawisko zwiększonego deuterowania w molekularnym obłoku, przez który przechodzi front fali uderzeniowej. Zgadzam się z Jej końcową konkluzją, iż niezbędne tu będą dalsze pomiary, z lepszą przestrzenną rozdzielczością.

Jednym z zadań recenzenta jest ocena badawczej samodzielności kandydata do stopnia naukowego. W przypadku publikacji zbiorowych wymagane byłyby stosowne oświadczenia współautorów. Artykuły przedstawione jako Rozprawa są monoautorskie, co procedurę upraszcza. Najważniejsze dane obserwacyjne doktoratu, pochodzące z Caltech Sub-millimeter Observatory, zostały uzyskane w okresie lat 2002 - 2012. Wobec braku stwierdzenia przeciwnego, były to niewątpliwie własne obserwacje mgr Kulczak-Jastrzębskiej, szkoda jednak, że *Synopsis* nie zawiera informacji o Jej naukowej współpracy i podróżach. Pewna niejasność wynika z faktu, że artykuły B i C są rozszerzonymi wersjami *wieloautorskich* publikacji towarzyszących komunikatom z konferencji PTA, odpowiednio:

Observations of HDO in the High-Mass Formation Regions, M. Kulczak-Jastrzębska, D. Lis, M. Gerin, PTA Proceedings (2016) vol. 3, str. 195

oraz

Nie pomaga tu przyjęta przez Autorkę konwencja posługiwania się pierwszą osobą liczby mnogiej (np.: *we used, we carried out, we approximated, we assume, we found, we concluded...*) w artykułach **A**, **B** i **C**. Prowadzenie obserwacji i/lub opracowywanie wyników wspólnie z innymi badaczami nie jest niczym nagannym (wręcz przeciwnie), oczekiwałbym jednak, jeśli tak było, odnośnej, precyzyjnej informacji w tekście danego monautorskiego artykułu, a przede wszystkim w referacie zbiorczo omawiającym 3 publikacje. Podziękowania kończące każdy z artykułów nie w pełni rozjaśniają tę sprawę. Stosowny komentarz będzie z pewnością przedstawiony w trakcie obrony doktoratu.

Kilka dalszych uwag wymieniam w kolejności zgodnej z układem tekstu Rozprawy.

Rozdział Synopsis

str. 9, dolny przypis: „Permanent dipoles occur when two atoms in a molecule have substantially different electronegativity.” – To stwierdzenie nie jest ścisłe. Po pierwsze, można się tylko domyślać, że pisząc „dipole” Autorka ma na myśli *elektryczny moment dipolowy*. Po drugie, elektroujemności dwóch atomów nie muszą być „substantially different”, aby taki trwały moment dipolowy zaistniał (przykład: HD). W cząsteczce CO₂ natomiast, atomy węgla i tlenu znacząco różnią się elektroujemnościami, elektryczny moment dipolowy wynosi zaś zero.

str. 18: Autorka podaje schemat $C^+ \rightarrow CH_2^+ \rightarrow CH_3^+$ jako niezbyt trafną ilustrację stwierdzenia, że astrochemia węgla może się rozwijać podobnie jak dla tlenu. Pierwsza z tych reakcji jest stosunkowo trudną radiacyjną asocjacją z H₂. Bardziej prawdopodobna w gęstych obłokach, gdzie węgiel nie jest znacząco zjonizowany, powinna być, według mojej wiedzy, synteza CH₂⁺ w reakcjach: $H_3^+ + C \rightarrow CH^+ + H_2$, $CH^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+ + H$, które, rzeczywiście, są w pełni analogiczne do reakcji tlenu (7) i (8) przytoczonych w Rozprawie.

str. 26: Trudno obronić stwierdzenie Doktorantki: “Previous research and observations about HDO have been carried out almost 20 years ago...” (patrz także uwaga do str. 240 artykułu **A**).

str. 28: Kategoryczna teza: „In the case of high-mass protostars, the abundance of HDO ~~are~~ is lower than in low-mass sources.” nie jest na razie, w mojej ocenie, dobrze uzasadniona statystycznie. Podobne zdanie: „Observations of sites of high-mass star formation show in general the lower HDO abundances than observations of low-mass star-forming cores.” znajdujemy na str. 10 artykułu **B**.

Artykuł A

str. 240: Pisząc „Previous studies of the water fractionation in the high-mass hot cores were performed almost twenty years ago, when the submillimeter spectrum was difficult to observe (Jacq et al. 1990, Gensheimer et al. 1996, Helmich et al. 1996).” Autorka zdaje się pomijać liczne późniejsze publikacje (niektóre z nich zresztą cytuje w tym samym artykule).

str. 241: Nie jest ścisłe stwierdzenie, iż reakcja $D^+ + H_2 \leftrightarrow HD + H^+ + 410\text{ K}$ „... will proceed to the right”. Reakcja ta przebiega oczywiście w obu kierunkach. Należało napisać np. „...will preferentially proceed to the right.”

str. 242: Zdanie „At the temperatures deduced for hot cores regions (100 K–300 K) very little fractionation is expected to occur because the energy barriers inhibiting the reverse route of reactions may be overcome by the elevated temperature (Millar et al. 1989).” nie oddaje istoty rzeczy. Kontekst – oraz cytowana praca Millara – dotyczą głównie takich reakcji przebiegających w fazie gazowej, dla których można założyć nieistnienie barier energetycznych (innym słowy: zerowe energie aktywacji). W procesach tych istotne jest natomiast niewielkie zwiększenie efektu cieplnego (egzotermicznego) dla reakcji tworzących cząsteczki zdeuterowane (w porównaniu z analogicznymi syntezami izotopologów niezawierających deuteru). Owe niewielkie różnice egzotermiczności oczywiście tracą

znaczenie (czyli wpływ na różnicowanie stałych szybkości reakcji) w miarę podnoszenia temperatury.
str. 249: Doktorantka pisze: „We conclude that the ground state rotational transition of HDO at 464.925 GHz is a very good probe of the fractional abundance in the outer envelope (consistent with the results ~~of~~ observed for the solar-type protostar IRAS 16293-2422, Parise 2005).” Zasadnicza konkluzja wygląda na dobrze uzasadnioną, jednak powoływanie się, bez dodatkowej dyskusji, na obserwacje Parise et al. jest problematyczne. W cytowanej pracy pokazano bowiem, że maksimum stosunkowo szerokiej emisji 465 GHz pojawia się w obszarze *wewnętrznym*, przed skokiem temperaturowym; na tym tle widoczna jest wąska *absorpcja* pochodząca od zewnętrznej otoczki.

str. 252 (Summary): „The inner HDO abundances are consistent with recent studies of high-mass protostars (Coutens et al. 2014, Liu et al. 2013, Kulczak–Jastrzębska in preparation).” Pojemna fraza „are consistent with recent studies” może nawet pasuje do podsumowania artykułu, jednak poprzedni, bardzo krótki rozdział *Discussion* należało moim zdaniem rozszerzyć o porównanie uzyskanych wyników z danymi literaturowymi – zwracając uwagę, że dane takie były dostępne (niekiedy również dla obszaru zewnętrznego) nie tylko w pracach Coutens et al. (2014) oraz Liu et al. (2013), lecz także np. van der Tak et al. (2006), Gensheimer et al. (1996) lub Comito et al. (2010).

Artykuł B

str. 3: Autorka pisze: „In the modeling, we assumed a constant ortho-to-para ratio (OPR) of H₂ equal to 3.”, natomiast kilka wierszy dalej: „We assume that all hydrogen is in the ortho state.” Wymaga to uściślenia.

str. 7: Stwierdzenie „Previous observations of the high-mass star-forming regions indicate an HDO abundance in the hot cores (T>100 K) but not in the outer, cooler envelopes (T<100 K) (Jacq & Wamsley 1990; Gensheimer et al. 1996, Pardo et al. 2001; see Table 9).” nie jest prawdziwe, o czym zaświadcza właśnie Tabela 9.

str. 8: Błędnie cytowany wynik Comito et al. (2010) dla T < 100 K w Sgr B2(M): jest „ 2.5×10^{-11} ”, powinno być „ 1.3×10^{-11} ”. Dziwne, że Doktorantka nie przytacza tu również własnych ustaleń dla Sgr B2(M) (z pracy A).

Artykuł C

str. 12: Pierwsze dwa zdania akapitu zaczynającego się od frazy “Interferometric observations” sugerują (błędnie), że nie wykryto wpływu z B1b-N.

Lista poniżej wylicza większość dostrzeżonych przeze mnie usterek redakcyjnych. Tam, gdzie to możliwe, kursywa wskazuje literówki oraz problemy ortograficzne lub gramatyczne w cytowanych fragmentach. Nota bene, odpowiedzialność za dużą liczbę trywialnych błędów tego rodzaju spada nie tylko na Autorkę, lecz i na redakcję Acta Astronomica; obie publikacje z AcA (a zwłaszcza C) sprawiają wrażenie tekstów *przed* korektą.

Synopsis

str. 9: „... detected *trough* their ...”

str. 11: „... indicates that *star* inside the globules are young stellar objects.”

str. 13: „... in diffuse clouds *trough* the ...”

str. 14: „*tetrahedras*” (2 razy) – powinno być „*tetrahedra*” lub „*tetrahedrons*”

str. 15: „locked up in *this* solids”

str. 18: „may proceed *trough*”

str. 18: jest „The next stage of hydrogen abstraction...” zamiast „The next stage of hydrogen addition...”

str. 20: jest „For high-mass stars, of about 30 M_⊙ *star* these two timescales are...” zamiast „For high-mass stars,

of about 30 $M_{\odot}$, these two timescales are ...”

str. 21: cytowanie „McKee & Ostriker 2007” nie jest uwzględnione w spisie literatury

str. 22: „Class I phase *last* typically”

str. 24: Drobne błędy gramatyczne lub stylistyczne z reguły nie przeszkadzają w lekturze tej pracy. Jednym z kilku wyjątków jest fragment „*The difference between the HCHII regions and the UCHII regions is their size, typical from 0.01 pc to 0.1 pc (Keto 2007). Physically the ultracompact HII regions have probably stopped accretion at this point, but this class is not entirely homogeneous either an accretion may still continue in some UCHII regions*”.

str. 26: „... a combination of different *mechanism* is needed ...”

str. 27: jest „an abundance of $X(H_2O)$ ” zamiast „an abundance of H_2O ” lub „an abundance $X(H_2O)$ ”

str. 27: „Based on *to* the reduced observations ...”

str. 28: jest „... does not take into account *either* the velocity field *nor* the presence of any accretion disk.” zamiast „... does not take into account either the velocity field or the presence of an accretion disk.” lub „... takes into account neither the velocity field nor the presence of an accretion disk.”

str. 28: jest „(Lis 2012, 2016)” ; powinno chyba być „(Lis 2002, 2016)”

str. 29: „... due to the shock front which *eject* CO ...”

Artykuł A

str. 239: „*These makes* studying them challenging.”

str. 239: „Water is one of the most important *molecule* ...”

str. 240: jest „ H_2O low-energy lines are almost invisible from the ground due to a very strong absorption.” zamiast „ H_2O low-energy lines are almost invisible from the ground due to very strong atmospheric absorption.”

str. 240: „Although the *process* leading to the water deuteration *are* ...”

str. 240: „... used to probe the outer envelope in *this sources*.”

str. 241: „...*trough* charge exchange ...”

str. 241: „The role of dust *grain* must be considered.”

str. 242: „... formed *trough* this one.”

str. 245: „... The HDO collisional coefficient with H_2 used in this study *were* recently computed...”

str. 246: „We assumed that the gas and dust radial temperature profile *follow* a power law ...”

str. 250: Pomiary promieniowania ciągłego, cytowane w Tabeli 7, nie dotyczą 509 GHz, lecz chyba raczej 343 GHz (patrz Tab. 5)?

Artykuł B

str. 3: „... transitions with *an* upper energies less than 444 K.”

str. 5: „... we could not *to* reproduce the 509 GHz line.”

str. 11: Nieprawidłowy rok w cytowaniu pracy Parise et al.

Artykuł C

str. 1: Jest „... C-type shocks may produce conditions favorable deuterium fractionation ...” zamiast np. „... C-type shocks may produce conditions favorable for deuterium fractionation ...”

str. 1: „... (3–2) rotational *transion* ...”

str. 2: „In order to study how outflows from protostars influence *of* the parent molecular cloud ...”

str. 3: Niezrozumiałe zdanie: „The other bipolar outflow from protostar, hosts in the submillimeter clump SMM 6 (also referred as B1-a), is more compact.”

str. 4: „The B1-b core (in SMM 1) contains two submillimetre/millimeter continuum *source* B1-bN and B1-bS.”

str. 4: „The best *know* outflow in this region ...”

str. 4: Jest „... extended blue- and red- outflows lobes *is* associated...” zamiast „... extended blue- and red-

shifted outflow lobes are associated...”

str. 4: Jest „The next two perpendicular outflows, directed N-S and E-W, both *originating* from IRAS 2A (binary source).” zamiast „The next two perpendicular outflows, directed N-S and E-W, both originate from IRAS 2A (binary source).”

str. 5: Jest „The bright emission of DCO^+ , *coinciding* with lobes of high-velocity CO emission rather than dust continuum peaks, marking the locations of embedded protostars Lis et al. (2016).” zamiast np. „The bright emission of DCO^+ coincides with lobes of high-velocity CO emission rather than with dust continuum peaks, the latter marking the locations of embedded protostars (Lis et al. 2016).”

str. 8: „... intermediate-*mas* star-forming region ...”

str. 9: „The Serpens central cloud core *reveal* two “clusters” ...”

str. 11: Jest „When the protostar is formed starts driving a high-velocity ...” zamiast „When a protostar is formed it starts driving a high-velocity ...”

str. 11: Jest „... conditions favorable deuterium fractionation ...” zamiast „... conditions favorable for deuterium fractionation ...” lub „... conditions favoring deuterium fractionation ...”

str. 11: „... abundances of deuterated *molecules species* ...”

str. 12: „... DCO^+ may also *forms* independently of H_2D^+ ...”

str. 12: „... using the facility *insruments* ...”

str. 12: „Interferometric observations of *Bernard 1 b* ...”

str. 12: „... outflow *asociated* with Class I source ...”

str. 12: „... either *on* the gas-phase ...”

str. 12: Jest „... enhance the DCO^+ abundance through *realease* CO...” zamiast „... enhance the DCO^+ abundance through the release of CO...”

str. 13: “While the avarage dust temperature in a single-dish beam, this may be dominated by the outer surface layers and the dust temperature in the central, most shielded regions may be significant lower (Bacmann et al. 2016).” (???)

str. 13: Powtórzenie ze str. 5. Jest „In summary Lis et al. (2016) concluded that the bright DCO^+ emission, assumed to trace cold, dense gas, *coinciding* with the tips of CO outflow emission rather than the dust continuum peaks, marking the location of embedded protostars.” zamiast np.: „In summary Lis et al. (2016) concluded that the bright DCO^+ emission, assumed to trace cold, dense gas, coincides with the tips of CO outflow emission rather than the dust continuum peaks, the latter marking the location of embedded protostars.”

Reasumując, uważam, że tematyka recenzowanej pracy jest interesująca i aktualna. Jakość prezentacji uzyskanych wyników nie budzi entuzjazmu, jednak spełnia, w mojej ocenie, minimalne oczekiwania. Warto zauważyć, że – niezależnie od trzech publikacji składających się na Rozprawę – mgr Kulczak-Jastrzębska jest współautorką dodatkowych dwóch artykułów zamieszczonych w *Astronomy & Astrophysics* oraz *Acta Astronomica*, wykraczających poza tematykę tego doktoratu.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr Magdaleny Kulczak-Jastrzębskiej spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595 oraz Dz. U. z 2017 r. poz. 1789). Wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie do jej publicznej obrony.


Prof. dr hab. Robert Kołos