

Warszawa, 1 września 2024 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr Agnieszki Mirochy
“Występowanie i własności promieniowania ultrafioletowego
w obszarach powstawania gwiazd w Drodze Mlecznej”

Niniejsza recenzja została sporządzona dla Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Rozprawa dotyczy badań realizowanych przez Doktorantkę pod kierunkiem prof. dr hab. Agnieszki Pollo (promotor) oraz dr Agaty Karskiej (promotor pomocniczy).

Przewodnim motywem doktoratu było pośrednie wnioskowanie o natężeniu promieniowania ultrafioletowego w wybranych obszarach gwiazdotwórczych na podstawie spektroskopii emisyjnej w zakresach milimetrowym, submilimetrowym oraz w dalekiej podczerwieni. Mgr Mirocha uczestniczyła w *par excellence* zespołowych przedsięwzięciach angażujących badaczy z Polski (6 jednostek naukowych), Danii, Holandii, Niemiec, Taiwanu i Francji. Nie brała udziału w części prac składających się na opisane wyniki, m.in. w naborze danych, tj. w obserwacjach. Dlatego cenne jest, że skrupulatnie wyszczególnia, co zrobiła sama, a gdzie korzystała z dokonań osób współpracujących bądź z ich szerokiej pomocy.

Rozdział otwierający Rozprawę poświęcony jest zwięzłemu przedstawieniu relacji między materią międzygwiazdową i początkowymi etapami ewolucji gwiazd, a także zagadnieniu klasyfikacji protogwiazd oraz morfologii obszarów ich powstawania. W rozdziale tym Autorka skrótowo omawia również zakres zainteresowań astrofizyki molekularnej i – bardziej szczegółowo – zagadnienie roli ultrafioletu w procesach gwiazdotwórczych. Znalazło się tu także przedstawienie celów doktoratu, które, ujmując rzecz najogólniej, koncentrują się wokół opisu wpływu promieniowania UV na astrochemię obszarów zawierających protogwiazdy i opisu warunków fizycznych panujących w tych obszarach.

W Rozdziale „Obserwacje” Doktorantka wylicza analizowane linie spektralne (atomy/cząsteczki wraz z częstotliwościami lub długościami fali obserwowanych emisji) i dostarcza podstawowych informacji o instrumentach, które posłużyły do obserwacji radioastronomicznych oraz w zakresie podczerwieni, tj. IRAM (*Institut de Radioastronomie Millimétrique*; teleskop 30-metrowy), APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*, teleskop 12-metrowy), SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*) i SPIRE (*Herschel Space Observatory*).

Ostatni z rozdziałów wstępnych to „Metodologia”, gdzie znajdujemy omówienie narzędzi zastosowanych do analizy danych. Oprogramowanie RADEX bazujące na obliczeniach równowagi termodynamicznej (obejmujących procesy kolizyjne i promieniste w jednorodnym ośrodku w obecności promieniowania tła) umożliwiło szacowanie temperatury, gęstości (rozumianej jako gęstość wodoru) i gęstości kolumnowych poszczególnych indywiduów chemicznych. Natomiast program Nahoon (oparty na bazie reakcji KIDA) posłużył do modelowania ewolucji składu chemicznego obłoku.

Rozdziały 4-5 to główna część Rozprawy. Pierwszy z nich dotyczy *Serpens Main*, popularnego rejonu badań protogwiazd małomasywnych. Najważniejszym celem postawionym przed Doktorantką, uwieńczonym sukcesem, było tu sprawdzenie możliwości wykorzystania stosunku obfitości CN / HCN



jako wskaźnika strumienia promieniowania UV oświetlającego protogwiazdy zanurzone w natywnym obłoku molekularnym (daleki nadfiolet łatwo rozkłada HCN na rodnik CN i wodór, natomiast fotodysocjacja CN jest trudna). Stosunki odpowiednich gęstości kolumnowych zostały uzyskane z danych obserwacyjnych za pośrednictwem modelu przepływu promieniowania RADEX. Konfrontacja tych wartości z modelami reakcji astrochemicznych wskazała, że strumień dalekiego nadfioletu w głównym obszarze formowania się gwiazd badanego obłoku przewyższa o trzy rzędy wielkości wartość przeciętną (G_0) przyjmowaną dla ośrodka międzygwiazdowego.

Wyniki badań bardzo masywnej (ok. 20 000 $M_\odot$) protogwiazdy DR21 w kompleksie Cygnus X (jej potężny bipolarny wypływ szacowany jest na 3000 $M_\odot$) Autorka zamieściła w Rozdziale 5. Głównym osiągnięciem było tu niewątpliwie użycie znaczników regionów fotodysocjacyjnych (PDR), tj. linii emisyjnych C II (158 μm) i O I (63 μm , 145 μm) do modelowania zależności między gęstością wodoru i strumieniem UV z wykorzystaniem oprogramowania uwzględniającego transfer promieniowania, reakcje chemiczne i termodynamikę ośrodka. Pozwoliło to m.in. na wykreślenie mapy intensywności dalekiego UV w sąsiedztwie DR21, co jest nowym, cennym wynikiem. Analiza linii CO wskazała na trójmodalny rozkład temperatur rotacyjnych (charakteryzowany przez wartości ok. 90, 200 i 260 K); stanowi to potwierdzenie i rozszerzenie wcześniejszych ustaleń. Z kolei porównanie intensywności linii podwójnie zjonizowanego tlenu wykazało (zgodnie z poprzednimi oszacowaniami), że gęstość elektronów wynosi kilkaset na cm^3 . Doktorantka potwierdziła również ważną rolę neutralnego tlenu jako czynnika chłodzącego gaz w obszarze gwiazdotwórczym. Potwierdzeniem wcześniejszych wyników jest także oszacowanie strumienia UV w rejonach PDR towarzyszących DR21 na 10^5 - 10^6 G_0 .

Opisane w recenzowanej Rozprawie wyniki doktoratu oceniam jako oryginalne i poprawnie omówione (niezależnie od kilku uwag krytycznych zamieszczonych poniżej). Część z nich (analiza małowymasywnych obiektów z *Serpens Main*) ukazała się jako obszerny artykuł w *Astronomy & Astrophysics*, a także w materiałach dwóch konferencji naukowych (mgr A. Mirocha jest pierwszą autorką tych publikacji). Wyniki dotyczące obiektu DR21 niewątpliwie wkrótce pojawią się w jednym z wiodących czasopism astronomicznych.

Układ Rozprawy jest przejrzysty. Tekst budzi istotne zastrzeżenia dotyczące braku odpowiedniej staranności edycyjnej. Liczne są literówki (zauważyłem ich ok. 80) i błędy językowe. Usterki te z reguły nie utrudniają jednak lektury.

Poniżej przedstawiam (w kolejności pojawiania się w tekście) wykaz znalezionych przeze mnie nieścisłości bądź błędów, a także komentarze/pytania – do tych o większej wadze Doktorantka być może zechce się ustosunkować podczas publicznej obrony Rozprawy.

1. Str. 10 – „Formowanie się gwiazd to skomplikowany proces, na który składa się wiele czynników w różnych skalach przestrzennych. Zaliczają się do nich: akrecja gazu z ośrodka międzygwiazdowego i obiektów satelitarnych na dysk Galaktyki i ośrodka międzygalaktycznego w skali Mpc, chłodzenie tego gazu i...”. Co miałyby oznaczać „akrecja gazu [...] na dysk Galaktyki i ośrodka międzygalaktycznego”? Prawdopodobnie chodziło o akrecję gazu z ośrodka międzygalaktycznego i obiektów satelitarnych na dysk Galaktyki?
2. Str. 25 – Jeden z przypadków pojawiania się żargonu specjalistycznego: „Niektórzy autorzy (np. Lee et al. 2015) próbują tłumaczyć ciepły komponent w drabinie CO za pomocą modelu zawierającego jedynie promieniowanie UV”
3. Str. 33-35 – Przypis do Tabeli 2 to jedyny fragment tekstu, w którym Autorka tłumaczy, czym jest gęstość krytyczna: „Gęstością krytyczną n_{crit} nazywamy gęstość, dla której następuje wzbudzenie molekuly do danego



stanu". Jest to definicja bardzo lakoniczna i przez to nie do końca trafna. Szkoda, że w Rozdziale 1 zabrakło omówienia procesów wzbudzenia i dezaktywacji kształtujących emisję promieniowania przez atomy i molekuly w gazowych obłokach. Są to zagadnienia kluczowe dla spektroskopii będącej podstawą Rozprawy. Autorka mogła przedyskutować wpływ, z jednej strony, parametrów fizycznych obłoku (zwłaszcza gęstości oraz temperatury kinetycznej) i, z drugiej strony, energii wzbudzenia stanu kwantowego atomu lub cząsteczki, na pojawianie się (ew. wygaszanie) emisji z tego stanu. Opis termodynamicznych podstaw oprogramowania RADEX (w Rozdziale „Metodologia”) uzupełnia te luki jedynie częściowo.

Moje zdziwienie budzi też fakt, że gęstości krytyczne wpisane w Tab. 2 dla HCN i H^{13}CN różnią się o rząd wielkości.

W pobliżu Tabeli 4 celowe byłoby zamieszczenie graficznego schematu trzech najniższych stanów energetycznych tlenu neutralnego i podwójnie zjonizowanego. Być może zapobiegłoby to wpisaniu do tabeli błędnych wartości energii stanu wyższego (E_u/k_B). Np.: energii stanu $^3\text{P}_0$ O I nie uzyskamy przeliczając na kelwiny $145.53\ \mu\text{m}$ (długość fali przejścia $^3\text{P}_0\text{--}^3\text{P}_1$), skoro stanem podstawowym jest tu $^3\text{P}_2$.

4. Str. 36 – Instrument SPIRE (Herschel) zawierał raczej *spektrometr* fourierowski (nie „spektroskop”).

5. Str. 42 – Czytamy, w kontekście możliwości oferowanych przez oprogramowanie Nahoon, że „Więcej zastosowań [niż 0D] jednak mają obliczenia 1D, w rezultacie których otrzymujemy tablicę danych temperatury, gęstości i ekstynkcji międzygwiazdowej.” W rzeczywistości, stablicowane wartości T , ρ , A_v nie stanowią rezultatu obliczeń, lecz są danymi wejściowymi modelu.

6. Str. 44, 94 – Przykład błędu językowego: „ilość bardzo młodych źródeł”, „ilość molekul H_2O ”. Z rzeczownikami policzalnymi należy stosować określenie *liczba*, nie *ilość*.

7. Str. 46 – Przykład nieprecyzyjnego języka: w podpisie Rysunku 13 czytamy, że „przesunięcie osi Y między kolejnymi krzywymi wynosi 3 rzędy wielkości”. W rzeczywistości, przesunięcie to wynosi 3, skoro oś rzędnych wyskalowana jest w jednostkach logarytmu strumienia promieniowania.

8. Str. 54 – Autorka zauważa, że emisja linii $J=3\text{--}2$ izotopologu C^{34}S „jest skoncentrowana głównie w okolicach źródeł SMM1, SMM4 i SMM9, w przeciwieństwie do $\text{CS } J=3\text{--}2$, która nie wykazuje wyraźniej emisji w pozycji protogwiazdy SMM1” (pisownia oryginalna). Podsumowuje to nieco enigmatycznym stwierdzeniem: „Izotopolog co do zasady będą śledzić ten sam gaz”. Przydałoby się próba wskazania możliwych przyczyn wzajemnie niewspółmiernych zmian intensywności linii C^{34}S i C^{32}S w analizowanym obszarze, widocznych zwłaszcza dla SMM1 (Rys. 19 i 22).

9. Str. 55 – Inny przykład braku precyzji językowej: w opisie Tabeli 9 czytamy, że „Zakresy prędkości dla linii CN $J=1\text{--}0$ i HCN $J=1\text{--}0$ zostały obliczone osobno dla każdego komponentu struktury nadsubtelnej.” W rzeczywistości, owe zakresy prędkości zostały nie „obliczone”, lecz po prostu, jak podano dalej w tekście, „ustalone na poziomie 2σ ”.

10. Str. 75 – Podziałka na osiach X, Y wykresu (Rys. 26) podaje wartości, odpowiednio, $N_{\text{CN}}/N_{\text{HCN}}$ i $I_{\text{CN}}/I_{\text{HCN}}$ (a nie wartości logarytmu tych stosunków). Podobne błędy pojawiły się na Rys. 27 (str. 77) oraz na Rys. 57–73 (str. 148–156).

11. Str. 76–78 – „Zakładając, że formacja gwiazdowa w gęstych obłokach molekularnych zaczyna się w czasie $t = 10^6$ lat, modelowe wartości obfitości wszystkich 489 molekul i atomów użytych w sieci chemicznej w tym czasie zostały użyte jako dane wejściowe kolejnych modeli astrochemicznych.” Przydałoby się tutaj jakieś uzasadnienie przyjętej wartości $t = 10^6$ yr i/lub odnośnik literaturowy (tym bardziej, że na str. 10 części wstępnej Autorka pisze: „Według nowszych oszacowań miną dziesiątki milionów lat nim rozpocznie się fragmentacja i zapadanie się obłoku molekularnego”). Konfuzyje zwiększa fakt, że Rozdział 4.4.2. („Model astrochemiczny”) ilustrowany jest Rysunkiem 28, gdzie jako wartość wejściową modelu widzimy nie 10^6 yr, lecz 10^7 yr, który to czas odpowiada ustabilizowanym obfitościom monitorowanych cząsteczek (inaczej niż $t = 10^6$ yr; patrz Rys. 27).

12. Str. 79 – Z opisu Rysunku 29 nie wynika, skąd konkretnie zostały wzięte współrzędne umożliwiające umieszczenie na wykresie punktów odpowiadających protogwiazdom Ser SMM1, SMM3, SMM4. Autorka pisze jedynie, że założyła dla nich gęstości wodoru pochodzące z artykułu Kristensen *et al.* 2012. Tymczasem logarytmy dziesiętne wartości n_{H_2} opublikowanych w cytowanym artykule (Tab. C.1) dla w/w obiektów (odpowiednio, 6.6, 6.0, 6.7) nie zgadzają się z wartościami rzędnej na Rys. 29.



13. Str. 80 – “Dla trzech źródeł obserwowanych przez program WISH, czyli SMM1, SMM3 i SMM4 obliczono temperatury gazu otoczki na odległości 1000 AU od protogwiazdy oraz niezależnie natężenie promieniowania UV (Kristensen et al. 2012, Kristensen et al. 2017, Karska et al. 2018). Na podstawie modeli Nahaon relatywne natężenie promieniowania ultrafioletowego w najbliższym otoczeniu małowasywnych protogwiazd można określić jako $10^3 - 10^4$ przeciętnego promieniowania w ośrodku międzygwiazdowym.” Należałoby tu zacytować konkretne wartości wzięte z konkretnych publikacji, tym bardziej, że w przytoczonym artykule Karska et al. 2018 dotyczącym małowasywnych protogwiazd zawarty został następujący wynik (ibid., str. 19-20): “The majority of the sources show a very similar incident UV field, about $10^2 G_0$ on scales of ~ 1000 au, with the exception of a more massive source, Serpens SMM1 (#66), which is in the $10^3 G_0$ regime.”

14. Str. 80 – W opisie osi odciętych wykresu (Rys. 30) powinno być „log G_0 ” zamiast „log G/G_0 ”.

15. Str. 81-84 – Tabele 18 i 19 chyba nie są potrzebne, skoro wszystkie informacje z nich zawarte odnajdujemy w Tab. 20?

16. Str. 90 – Stwierdzenie: “Zmiana profilu linii [O I] jest uważana jako jeden ze znaczników promieniowania UV” powinno być sformułowanie bardziej precyzyjnie (jaka zmiana co oznacza?) i wsparte odnośnikiem literaturowym.

17. Str. 94 – „Silne pola fotonowe ($G_0 > 10^3$) najlepiej odtwarzają obserwowany stosunek CN/HCN przy założeniu temperatury równej 50 K (Sekcja 4.4.2). Obserwowany stosunek CN/HCN jest zgodny z polami fotonowymi w zakresie 0,1-10 razy silniejszymi niż średnie promieniowanie w ośrodku międzygwiazdowym.” Zestawienie tych dwóch zdań nie jest stylistycznie szczęśliwe, ale można zrozumieć, że drugim (obok $G_0 > 10^3$) zakresem pól fotonowych pasującym do obserwowanego stosunku CN/HCN jest 0,1-10 G_0 . Wykres z Rys. 29 wydaje się jednak sugerować, że tym drugim zakresem jest raczej 0,1-1 G_0 (dla realistycznych wartości n_{H_2}). Natomiast odnośny fragment wersji angielskiej, tj. publikacji Mirocha et al. 2021, wskazuje w tym kontekście zakres 10^{-3} - $10^{-2} G_0$: “Chemical models are consistent with the observed column density ratio of CN to HCN for UV fields that are 10^3 larger than the average interstellar value (Fig. 8). The observations are also consistent with models with significantly lower UV fields, 10^{-3} - 10^{-2} times the average interstellar UV field.” (Fig. 8 cytowanej pracy to odpowiednik Rys. 29).

18. Str. 100 – Cytowana publikacja Harris 1973 nie została uwzględniona w spisie literatury.

19. Str. 114, 116, Równania 24, 26, 27 – Nie jestem entuzjastą notacji typu $\ln^{-1}(x)$ rozumianej jako $1/\ln(x)$. Zapis $\sin^{-1}(x)$ oznacza arcsin(x), równie dobrze można więc interpretować $\ln^{-1}(x)$ jako $\exp(x)$.

20. Str. 115-116 – Kreski w komórkach Tabeli 24 podających temperaturę wzbudzeniową neutralnego tlenu oznaczają „nie spełnienie warunku dla Równania 25”. Sądzę, że należało w tekście skomentować te potencjalnie ciekawe przypadki – niespełnienie wymienionego równania (raczej Równ. 27, nie 25) oznacza, formalnie, inwersję obsadzeń.

21. Str. 119 – W Równaniu 28 należy stosować logarytm naturalny.

22. Str. 121 – Rys. 53 świadczy o prawdziwości stwierdzenia Doktorantki, że neutralny tlen jest dominującym kanałem chłodzenia obłoku w zakresie dalekiej podczerwieni – we wszystkich analizowanych pozycjach wokół DR21. Nasuwa się jednak pytanie, jak różnice wykryte między tymi pozycjami mają się do błędów wynikających z dokładności surowych danych oraz z metodyki ich redukcji i późniejszej analizy. Być może wykonalne jest oszacowanie tych błędów?

Wymienione wyżej uwagi nie zmieniają mojej pozytywnej oceny recenzowanej pracy „Występowanie i własności promieniowania ultrafioletowego w obszarach powstawania gwiazd w Drodze Mlecznej”. Stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim zapisane w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z 20 lipca 2018 r. (z późniejszymi zmianami). Wnoszę do Rady Dyscypliny Astronomii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie o dopuszczenie mgr Agnieszki Mirochy do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Prof. dr hab. Robert Kotos