



Centrum Fizyki Teoretycznej
Polskiej Akademii Nauk
Warszawa, Al. Lotników 32/46

Warszawa, 21 sierpnia 2025

Ocena rozprawy doktorskiej mgra Prasada Sawanta

Rozprawa doktorska mgr Prasada Sawanta nosi tytuł “*Probing the baryon cycle of primordial galaxies in the ALMA and JWST era*” i została wykonana pod kierunkiem prof. Ambra Nanni, a promotorem pomocniczym był dr Michael Romano. Rozprawa została przygotowana w języku angielskim. Projekt dotyczy ewolucji galaktyk na ich wczesnym etapie, ze szczególnym uwzględnieniem roli ośrodka międzygwiazdowego i międzygalaktycznego w tej ewolucji. Podstawą rozważań są obserwacje, ponieważ daleko nam jeszcze do pełnego zrozumienia zachodzących tam procesów. Samo zjawisko formowania się pyłu umyka jeszcze pełnemu zrozumieniu od strony teoretycznej, a pył odgrywa kluczową rolę w powstawaniu i ewolucji gwiazd, w procesie, gdzie te dwa zjawiska sprzęgają się ze sobą nielokalnie.

Praca jest napisana jako nowa całość, choć koncepcja opiera się w znacznej mierze o opublikowaną pracę „*The ALPINE-ALMA [CII] Survey: Unveiling the baryon evolution in the interstellar medium of $z \sim 5$ star-forming galaxies*” (A&A, 694, A82, 2025), której mgr Prasad Sawant jest pierwszym autorem. Cała koncepcja pracy i jej związek z wyżej wymienioną publikacją jest jasno przedstawiona na początku rozdziału 4 rozprawy: elementy wstępu z tej publikacji wyewoluowały do rozdziału 2 rozprawy, z umiejscowieniem zagadnienia w szerszym kontekście. Dane, stanowiące podstawę rozprawy są teraz omówione w rozdziale 3 rozprawy w znacznym rozszerzeniu, a wyniki badań, prowadzonych przez doktoranta i opublikowane w wyżej wspomnianej pracy, znajdują się w rozdziale 4. Rozdział 5 przynosi nowe, jeszcze nie opublikowane wyniki dla pod-próbki obiektów z rozdziału 4, uzupełnionej o nowe obserwacje z JWST. Wnioski i dalsze perspektywy badań znajdują się w ostatnim, szóstym rozdziale. Poniżej omawiam rozdziały w tej właśnie kolejności.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do zagadnienia ewolucji pyłu i jego sprzężenia z ewolucją gwiazd we wczesnym Wszechświecie. Zagadnienie jest bardzo złożone, bo produkcja pyłu jest wynikiem ewolucji gwiazd, ale gwiazdy też niszczą pył, a pośrednikiem w tych procesach jest nie tylko ośrodek międzygwiazdowy, ale i międzygalaktyczny. Autor skrótowo nakreśla początki Wszechświata i model kosmologiczny Λ CDM, aby następnie przejść do opisu kluczowego z punktu widzenia rozprawy i zarazem bardzo złożonego procesu powstawania gwiazd. Wstęp wprowadza rys historyczny i podstawowe pojęcia, jak początkowy rozkład mas gwiazd i problem, jaki wprowadza tu metaliczność poprzez zdolność plazmy do chłodzenia się. Omawia też związany z powstawaniem pierwszych pokoleń gwiazd etap jonizacji ośrodka międzygalaktycznego. Efekt musi zależeć istotnie od niejednorodności rozkładu materii już na tym etapie. Moja jedna uwaga – możliwa rola aktywnych jąder galaktyk nie została wspomniana. Następnie omawia zależność tempa powstawania gwiazd od przesunięcia ku czerwieni i podkreślając jej niepewność dla $z > 2$

wiąże ją z określaniem zawartości pyłu w galaktykach. Dalej starannie omawia własności wielofazowego ośrodka międzygwiazdowego i jego aktywną rolę w powstawaniu gwiazd. Podsumowanie stanowi bilans materii barionowej we Wszechświecie i schematyczny model jej cyrkulacji. W opisie autor odwołuje się zarówno do wcześniejszych prac jak i do wyników najnowszych (literatura jest bardzo obszerna). Osobny, szczegółowy watek to opis linii emisyjnych i ich roli przy określaniu własności materii wczesnych galaktyk. Linie emisyjne są później używane w przedstawionych wynikach rozprawy, ale można było wspomnieć kilkoma zdaniem o śledzeniu własności ośrodka poprzez badanie linii absorpcyjnych. Ciekawe, dlaczego linia [CII]158 μ m jest aż tak intensywna. Rozdział wieńczy dyskusja własności pyłu, kluczowa dla dalszych części rozprawy, w tym wyjaśnienie rozróżnienia pomiędzy ekstynkcją i atenuacją. Zakończeniem rozdziału jest lista problemów, które powinny być rozwiązane i którymi mgr Sawant zajmował się w swojej działalności naukowej. Podsumowując, rozdział bardzo mi się podobał.

Rozdział drugi przedstawia szczegółowo pewne aspekty metody użytej do uzyskania wyników. Jest tu opis ogólny metod modelowania szerokopasmowego widma, oraz równania opisujące ewolucję gazu i pyłu, które występują w oryginalnej opublikowanej pracy. Równania ewolucji chemicznej są zasadniczo oparte o równania z pracy Nanni et al. (2020), ale zostały uproszczone z formy całkowitej do przecalkowanej w charakterystycznej skali czasowej τ_{main} , która mogła być jakoś wyjaśniona. Skala ta wcześniej się nie pojawia. Tempo wypływu w równaniu 2.1 jest parametryzowane przez SFR, co jest intuicyjnie jasne, natomiast ta sama parametryzacja pojawia się w członie z napływem masy do galaktyki, co nie wydaje się oczywiste. Taki napływ jest raczej zdeterminowany otoczeniem galaktyki i zabrakło mi tu jakiegoś uzasadnienia. Cały układ równań opisujących ewolucję poszczególnych elementów (frakcje gazowe, frakcje pyłu) jest oczywiście bardzo złożony i pewne uproszczenia są konieczne. Aby powiązać model z obserwacjami, równania są tak sformułowane, aby w sumie dostarczyć informację o całkowitej masie pyłu i jasności obiektu i dać możliwość sprzężenia z modelowaniem szerokopasmowego widma i konfrontacji z danymi obserwacyjnymi.

W kolejnej części pracy autor omawia właśnie promieniowanie powstające w galaktyce (jego składniki to gwiazdy, swobodny gaz i pył) oraz różne podejścia do modelowania tego procesu. W dalszej części rozprawy (rozdział 4) użyty będzie kod CIGALE.

Jest dodatkowo sekcja o roli aktywnych jąder galaktyk w kształtowaniu widma galaktyki. Nie jest wspomniana to rola, jaką AGN mogą odgrywać w samej ewolucji galaktyki (tzw. feedback) ze względu na możliwość regulowania przez AGN tempa powstawania gwiazd (zarówno dodatnie jak i ujemne sprzężenie może występować). I nie jest uwzględniana w wynikach prezentowanych w rozdziale 4.

Brakuje mi w tym rozdziale wyjaśnienia wzoru (20) z oryginalnej opublikowanej pracy Sawant et al.. Sam wzór pojawia się w rozdziale 4, jako wzór 4.4, ale też bez dodatkowych wyjaśnień. Dlaczego ostateczny wynik pochodzi z uśredniania (ważonego) po parametrach modelu, a nie po prostu z najlepszego dopasowania? Składanie prawdopodobieństw może być oczywiście uzasadnione, ale nie musi. Czy zdaniem autora wszystkie te parametry reprezentują rozrzut ewolucyjny, czy też uzasadnienie jest inne?

Część modelowania jest wyjaśniona dopiero w rozdziale czwartym, w szczególności fakt używania wzorca widmowego (*template*) w podczerwieni, co było dla mnie zaskakujące, skoro wybrane obiekty pochodzą z pól pokrytych przez instrumenty Spitzer i Herschel.

Rozdział trzeci przedstawia historię badań galaktyk gwiazdotwórczych na możliwie wczesnym etapie ewolucji Wszechświata. Następnie omawia ALIPNE Survey, wykonany oryginalnie kilka lat wcześniej przez duży zespół i przedstawiony po raz pierwszy w pracy Le Fevre et al. (2020).

Przegląd ten stanowi bazę obserwacyjną pracy wykonanej przez doktoranta i przedstawionej w rozdziale 4. Przegląd oryginalnie prezentuje wyniki dla 118 gwiazdotwórczych galaktyk z zakresu przesunięcia ku czerwieni 4 – 6. Obserwacje wykonane instrumentem ALMA zawierają obserwacje w linii [CII]-158 μm oraz kontinuum w dalekiej podczerwieni. Opis przedstawiony w rozprawie bardzo jasno podsumowuje proces selekcji źródeł, w sposób bardziej zwarty i przejrzysty niż oryginalna praca Le Fevre et al. W szczególności od razu podkreśla skupienie się na dwóch polach – COSMOS i ECDFS – ze względu na gotowe do wykorzystania dane w wielu zakresach widmowych. Rozdział omawia też przeglądy ALPINE-CRISTAL oraz ALPINE-CRISTAL-JWST (PI:Faisst), z którego wyniki są dopiero w przygotowaniu. Wstępne wyniki doktoranta z przeglądu ALPINE-CRISTAL-JWST są przedstawione w rozdziale 5.

Rozdział czwarty zawiera dalsze omówienie metody oraz właściwe wyniki z przeglądu ALPINE-ALMA-[CII]. Przedmiotem badań mgra Sawanta było 98 obiektów z tego przeglądu, ponieważ tyle spełniało nałożone kryteria obserwacyjne. W analizie autor poświęcił odpowiednią uwagę w pojawiających się górnych ograniczeniach na niektóre mierzone parametry. Metoda analizy została przedstawiona na czytelnych schematach, a zakładane parametry bądź ich zakresy umieszczone w tabeli. Indywidualne będy wyznaczenia parametrów są spore (np. Fig. 4.6), ale znaczna liczba obiektów w próbie zapewnia widoczność obserwowanych trendów.

Wszystkie obiekty zostały wymodelowane, co pozwoliło na test opisu ich ewolucji. Obiekty starsze niż 600 milionów lat były stosunkowo łatwo wymodelowane i niezbyt wrażliwe na czynione założenia odnośnie kształtu IMF. Natomiast wymodelowanie młodszych galaktyk (poniżej 300 milionów lat) narzucało zdecydowane ograniczenia na scenariusz ewolucji. Wymagany kształt IMF musiał być top-heavy (z przewagą gwiazd masywniejszych w stosunku do standardowego modelu), oraz z wydajnym formowaniem się pyłu. Także niezbędne było dopuszczenie znacznego wpływu materii z galaktyki, aby wyjaśnić obserwowany spadek ilości gazu i pyłu w stosunku do masy gwiazdowej wraz z wiekiem galaktyki. Wyniki te są bardzo interesujące.

Bardzo dobrze się stało, że autor zamieścił tu przykład modelowania widma jednego z obiektów. Faktycznie widać spory odstęp w danych w okolicach, gdzie przypada pik emisji (Fig. 4.4), choć jeden punkt tam jest, i to pokazuje znaczenie założonej/wyznaczonej temperatury pyłu. Testy zamieszczone w pracy odnośnie założonego kształtu widma (Fig. 4.2) sugerują, że nie ma to dużego znaczenia dla masy gwiazdowej i masy pyłu, choć może mieć dla tempa powstawania gwiazd – tu jest spory rozrzut, i bez dodatkowo założonego kształtu widma w podczerwieni wartości są sporo mniejsze.

W podsumowaniu tego rozdziału (Sect. 4.5) zastanawia mnie konkluzja, że pył powinien w znacznej mierze formować się w ośrodku międzygwiazdowym, a nie w gwiazdach AGB. Doktorant cytuje w tym kontekście pracę Algiera et al. (2024), gdzie autorzy dyskutują dość szczegółowo fizykę tego zjawiska – z jednej strony postępującą koagulację pyłu w gęstej fazie ośrodka międzygwiazdowego, a z drugiej strony uzyskiwanie przez ziarna pyłu płaszczą, zmieniającego jego własności optyczne. Zatem to może działać, a zarazem stanowić argument za bardzo dużą niejednorodnością ośrodka międzygwiazdowego w młodych galaktykach, co może się łączyć ze wspomnianą wcześniej przez doktoranta fazą jonizacji ośrodka międzygalaktycznego w wyniku tak niejednorodnej struktury galaktyki.

Rozdział piąty to zarys nowej, bardzo ciekawej pracy opartej właśnie o przegląd ALPINE-CRISTAL-JWST. Dla wyselekcjonowanej pod-próbki z przeglądu ALIPNE przeprowadzono obserwacje przy pomocy teleskopu JWST w celu wyznaczenia ich widm w zakresie nadfioletu, optycznym i w bliskiej podczerwieni w układzie spoczynkowym obiektu. Autor przeprowadził szczegółową analizę obrazów oraz widm, wyodrębniając aktywne rejony galaktyki. Wyznaczone

przykładowe widmo (Fig. 5.4) pokrywa zakres linii H α i H β . Mając do dyspozycji dodatkową informację widmową, autor powtórzył dopasowania szerokopasmowego widma nowszą wersją kodu CIGALE, ale nie wiem czemu tym razem z wyłączeniem dalekiej podczerwieni. To chyba utrudniło poprawną ocenę roli pyłu. Zasadniczo jednak efekt atenuacji został uwzględniony, a nowym elementem było dodatkowo włączenie układów podwójnych do badań, co nie było stosowane w poprzednim rozdziale. Efekt istnienia układów podwójnych gwiazd uwidacznia się w modelowaniu SED – obecność układów podwójnych z jakiegoś powodu (szczerze mówiąc, nie wiem, dlaczego) wymusza znacznie silniejszą rolę atenuacji. Opis analizy danych jest szczegółowy, widać staranność autora w podejściu oraz sposób pokonywania różnych trudności na tym etapie.

W szczególności kluczowym pomiarem był stosunek H α do dalekiego nadfioletu (H α -to-FUV) i przy jego pomocy nakładanie ograniczeń na modele początkowej funkcji masy (IMF). Ogólnie, mgr Sawant faworyzuje tak zwany top-heavy model, ale dokładne wyniki zależą od obiektu, a zatem jak już sugerowali wcześniej inni autorzy, IMF nie ma charakteru uniwersalnego i dalsza szczegółowa analiza zależności IMF od ilości pyłu i wcześniejszej znacznej gwałtownej aktywności gwiazdotwórczej jest niezbędna. Nowe dane obserwacyjne pozwalają to teraz zacząć testować.

Rozdział szósty zawiera krótkie podsumowanie rozprawy – co zostało osiągnięte, a co jeszcze pozostaje do zbadania w omawianym zagadnieniu. W szczególności, mgr Sawant nie jest (i słusznie) jeszcze w pełni usatysfakcjonowany opisem formowania się pyłu przy dużych przesunięciach ku czerwieni i interpretacją powiązanego z procesem formowania pyłu znacznego rozrzutu w początkowej funkcji mas gwiazd dla bardzo młodych galaktyk. Ale nadchodzące nowe dane obserwacyjne stwarzają podstawę do dalszego postępu w tym kierunku.

Podsumowanie

Rozprawa dotyczy zagadnień bardzo ważnych z punktu widzenia astrofizyki w kontekście wczesnych etapów ewolucji galaktyk, przy przesunięciu ku czerwieni 4 – 6. Praca jest wartościowa, ciekawa, na wysokim poziomie merytorycznym. Punktem wyjścia są świetne dane obserwacyjne, uzyskane przez międzynarodowy zespół, ale wymodelowane następnie przez doktoranta. Wyniki pokazują, że powstawanie pyłu jest sprzężone z powstawaniem gwiazd, wpływ materii z młodych galaktyk jest ważnym elementem ich ewolucji poprzez relatywny spadek zawartości gazu i pyłu obserwowany w nieco starszych obiektach. Bardzo ważnym elementem podkreślanym przez doktoranta jest znaczna niejednorodność w rozkładzie masy młodych galaktyk, co wpływa znacząco na ich ewolucję i rozrzut własności, w tym początkowej funkcji masy nowo powstających gwiazd.

Praca od strony redakcyjnej przygotowana jest bardzo starannie, zawiera listę skrótów, listę rysunków i tabel, a poszczególne rozdziały przyozdobione są interesującymi i ładnie sformatowanymi cytatami.

Podsumowując, recenzowana praca spełnia wszystkie kryteria właściwe dla rozpraw doktorskich, co uzasadnia postawienie wniosku o przyjęcie rozprawy doktorskiej, dopuszczenie jej do publicznej obrony i kontynuowanie czynności w ramach przewodu doktorskiego mgra Prasada Sawanta.

prof. dr hab. Bożena Czerny