

Streszczenie w języku polskim

Układy wielokrotne – składające się z dwóch lub więcej gwiazd tworzących grawitacyjnie związany system – są powszechne we Wszechświecie. Ich szczególne własności, takie jak zmienna jasność, sprawiały że tego rodzaju systemy gwiazdowe kształtowały wyobraźnię już w czasach starożytnych. Były one również przedmiotem badań akademickich, zwłaszcza po skonstruowaniu pierwszych teleskopów. Wiedza na temat układów wielokrotnych gwiazd rosła wraz z coraz większymi możliwościami obserwacji Wszechświata. Pozwoliły one ustalić, że takie układy mogą być przyczyną występowania wielu ciekawych zjawisk, od supernowych i mgławic planetarnych, po zlewające się systemy dwóch czarnych dziur. Układy wielokrotne gwiazd regularnie pobudzały wyobraźnię na przykład w kontekście występowania wokół nich planet. W jaki sposób wyglądają układy planetarne wokół wielu gwiazd? Jak mogą przebiegać wielokrotne wschody i zachody gwiazd?

Niedawne obserwacje misji Kepler pokazały, że planety występują wokół gwiazd wielokrotnych. Pytanie w jaki sposób takie układy powstały jest naturalną konsekwencją naszej ciekawości i chęci zrozumienia, co powoduje powstawanie stabilnych układów wielokrotnych. Wczesne teorie koncentrowały się na scenariuszu, w którym jedna z gwiazd ściąga drugą na swoją orbitę i w ten sposób tworzą układ podwójny. Jednak ten pomysł miał poważne problemy, w szczególności potrzebę występowania bardzo wielu gwiazd w niedużych odległościach od siebie i udział w procesie także trzeciej gwiazdy. Zrozumienie w jaki sposób gwiazdy powstają i ewoluują może pomóc rozwiązać zagadkę występowania układów wielokrotnych gwiazd.

Opierając się na obserwacjach i modelach, proces powstawania gwiazd może zostać naszkicowany w następujący sposób. Rotujące obłoki gęstego pyłu i gazu mogą, przy korzystnych warunkach, zacząć kolaps grawitacyjny i uformować protogwiazdę głęboko zanurzoną w gęstym jądrze takiego obłoku. Takie zanurzone protogwiazdy wyrzucają silne i wąskie wypływy molekularne, które są sygnaturą trwającego aktualnie procesu powstawania gwiazdy. Rotacja oraz zapadanie się materiału na gwiazdę ostatecznie prowadzi do powstania spłaszczonej, rotującej struktury - dysku - która prawdopodobnie tworzy się na wczesnych etapach powstawania gwiazdy. Dysk w przyszłości stanie się miejscem powstawania planet i komet. W czasie gdy protogwiazda rośnie i ewoluje, ilość otaczającej jej materii maleje, zarówno z powodu akrecji na protogwiazdę, jak i rozpraszania gazu i pyłu przez wypływ molekularny. Gdy większość materiału zostanie już usunięta, pozostaje już tylko pojedyncza młoda gwiazda i planety, jeśli tylko powstały. Obserwacje wielu protogwiazd od etapu głęboko zanurzonego w materii do całkowicie z niej oczyszczonego pokazują, że układy wielokrotne gwiazd występują powszechnie. To z kolei sugeruje, że większość gwiazd rodzi się jako układy wielokrotne, a nasza wizja procesu powstawania gwiazd powinna uwzględnić ich ist-

nienie.

Fakt powstawania układów wielokrotnych gwiazd powoduje powstanie rozlicznych pytań dotyczących tych układów. Ta praca doktorska dotyka wielu otwartych pytań związanych z powstawaniem i ewolucją układów wielokrotnych gwiazd:

1. Kiedy powstaje dysk i jaki jest jego wpływ na układ protogwiazd?
2. Czy wszystkie gwiazdy w układzie wielokrotnym powstają jednocześnie?
3. Jakie czynniki wzmacniają lub utrudniają powstanie układów wielokrotnych gwiazd?
4. W jakim stopniu gwiazdy pojedyncze i układy wielokrotne są podobne jeśli chodzi o strukturę, zarówno fizyczną jak i chemiczną?

Pierwsze z powyższych pytań jest szczególnie interesujące, ponieważ dyski to nie tylko miejsca powstawania planet i komet, ale mogą również grać rolę przy tworzeniu układów wielokrotnych na wczesnym etapie procesu powstawania gwiazd. Następne dwa pytania związane są ze sposobem, w jaki układy wielokrotne powstają. Fragmentacja, jako proces rozrywania materiału w jądrze formującym gwiazdę, jest powszechnie uważana za główny mechanizm tworzenia układów wielokrotnych. Nie jest jeszcze jednak wiadomo kiedy i jakie czynniki wpływają na pojawienie się fragmentacji i ostateczne powstanie układu wielokrotnego oraz jego ewolucję. Czwarte pytanie ma na celu zrozumienie, czy pojedyncze i wielokrotne gwiazdy różnią się swoją strukturą [budową] i czy te różnice są wynikiem wielokrotności czy jakiegoś innego procesu.

Aby podjąć próbę odpowiedzi na powyższe pytania, wykonałam obserwacje emisji pochodzącej od molekuł i pyłu oraz skonstruowałam modele fizyko-chemiczne, aby opisać strukturę obserwowanych protogwiazd. Emisja pochodząca od pyłu pokazuje położenie protogwiazdy i pomaga określić etap, na którym znajduje się tworząca się protogwiazda. Molekuły są ważne, ponieważ umożliwiają badanie kinematyki obiektu, w funkcji temperatury i gęstości, i ujawniają strukturę chemiczną protogwiazd. Znajomość procesów chemicznych może być bardzo ważnym narzędziem przy próbie zrozumienia Wszechświata.

Ta praca doktorska

Rozdział 1 zawiera szczegółowe wprowadzenie do aktualnego stanu wiedzy z zakresu powstawania gwiazd, zarówno dla gwiazd pojedynczych i wielokrotnych. Obserwacje przedstawione w tej pracy doktorskiej obejmują zakres od fal milimetrowych do bliskiej podczerwieni i zostały uzyskane przy użyciu instrumentów naziemnych oraz satelitów kosmicznych. Sieć anten submilimetrowych ALMA (*ang.* the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), która pracuje jako interferometr radiowy położony na płaskowyżu Chajnantor na pustyni Atakama w Chile, została wykorzystana do obserwacji chemicznej i fizycznej struktury układów wielokrotnych protogwiazd w skalach przestrzennych rzędu setek jednostek astronomicznych (1 jednostka astronomiczna to odległość Ziemi od Słońca). Teleskop APEX (*ang.* the Atacama Pathfinder Experiment), położony w pobliżu ALMA, to radioteleskop o pojedynczej antenie, który w tej pracy został użyty do badania protogwiazd w skalach przestrzennych podobnych do

wielkości jąder tworzących gwiazdy (tysiące jednostek astronomicznych). Wykorzystane również zostały archiwalne mapy fotometryczne z Kosmicznego Obserwatorium Herschela i Teleskopu Kosmicznego Spitzera.

Rozdział 2 poświęcony jest próbie odpowiedzenia na pytanie, kiedy powstaje dysk. Aby to zrobić, badany jest bardzo młody układ wielokrotny protogwiazd - VLA 1623-2417. VLA 1623-2417 jest układem potrójnym położonym w sercu ρ Ophiuchus (w odległości 391 lat świetlnych). Trzy składniki układu wykazują duże różnice, prawdopodobnie z powodu różnic w etapie ewolucyjnym. Jeden ze składników, VLA 1623-2417 A, posiada spłaszczoną strukturę przypominającą dysk widoczną zarówno w emisji molekuł, jak i pyłu. Badania kinematyki gazu przy użyciu molekuły $C^{18}O$ i prostego modelu pokazują, że ta emisja w istocie pochodzi z rotującego dysku o promieniu około 150 jednostek astronomicznych, czyli pięć razy większego niż orbita Neptuna. Ponieważ VLA 1623-2417 A jest bardzo młodą, głęboko zanurzoną protogwiazdą, znalezienie rotującego dysku wokół tego obiektu jest dowodem, że tego rodzaju struktury powstają na bardzo wczesnym etapie powstawania gwiazd.

Jak pokazuje Rozdział 2, rotujące dyski mogą się tworzyć podczas wczesnych etapów powstawania gwiazd. Stąd ich obecność musi w jakiś sposób wpływać na ewolucję protogwiazdy. Ten problem poruszony jest w Rozdziale 3 poprzez badanie materiału otaczającego rotujący dysk VLA 1623-2417 A. Wykorzystano w tym celu molekuły związane zwykle z chłodnym materiałem w obłoku molekularnym wokół protogwiazd. Molekuła DCO^+ użyta została do zbadania tego chłodnego materiału, ponieważ powstaje głównie w temperaturze 20 K lub niższej. Połączenie obserwacji z prostym modelem chemicznym pozwala na analizę emisji DCO^+ . Zaobserwowana emisja w DCO^+ jest położona bliżej źródła niż przewidywałby model o sferycznie symetrycznym rozkładzie gęstości i temperatury tzn. sytuacji, gdyby protogwiazda ogrzewała otaczający ją materiał w sposób równomierny we wszystkich kierunkach. Zamiast tego, emisja w DCO^+ obserwowana jest bliżej protogwiazdy wzdłuż rotującego dysku, ale nie wzdłuż wypływu molekularnego. Spowodowane jest to obniżeniem temperatury na brzegu dysku z powodu zacielenia materiału od strony ogrzewającej go protogwiazdy. Wskazuje to na duży wpływ obecności dysku na otaczający materiał, skutkujący zmianami w rozkładzie temperatury i strukturze chemicznej.

Fizyko-chemiczna struktura zanurzonych protogwiazd jest dalej badana w Rozdziale 4 przy użyciu molekuł, które są wzbudzone przez chłodny i ciepły gaz obecny w jądrach protogwiazdowych. Badane są dwa układy wielokrotne - IRAS 16293-2422 i VLA 1623-2417. Oba systemy protogwiazd położone są w ρ Ophiuchus i są głęboko zanurzone w macierzystych jądrach materii. IRAS 16293-2422 jest bardzo jasnym układem podwójnym podczas gdy VLA 1623-2417 jest słabszym układem potrójnym protogwiazd badanym w Rozdziałach 2 i 3. W VLA 1623-2417 A został odkryty rotujący dysk (Rozdział 2), podczas gdy IRAS 16293-2422 A posiada dużą, spłaszczoną strukturę dyskopodobną o promieniu rzędu 200 jednostek astronomicznych. Inne składniki tych układów wielokrotnych nie posiadają potwierdzonych struktur dyskowych lub dyskopodobnych. Chłodny gaz był badany przy użyciu molekuł DCO^+ , N_2H^+ i N_2D^+ , które powstają w temperaturach poniżej 20 K i dlatego charakteryzują chłodne obszary. Dla ciepłych obszarów o temperaturach od 50 do 100 K i tych, które są ogrzewane przez promieniowanie UV od centralnej protogwiazdy użyteczne są molekuły $c-C_3H_2$ i C_2H . Molekuły pochodzące z chłodnego gazu są widoczne bliżej źródeł w obu systemach z powodu obecności dysku / struktur dyskopodobnych, ale nie w każdym kierunku. Dla VLA 1623-2417 N_2H^+ i N_2D^+ nie są zaobserwowane, prawdopodobnie

nie z powodu niskiej jasności protogwiazdy i bardzo niskich temperatur (poniżej 10 K) spowodowanych ocienieniem materiału przez dysk. Jest to zgodne z wynikami z Rozdziału 3, w którym pokazano, że dysk ma dramatyczne znaczenie na strukturę fizyko-chemiczną protogwiazdy. Ciepła molekula $c\text{-C}_3\text{H}_2$ dobrze pokazuje wężki wpływów molekularnych u obu systemów, co jest zgodne z obecnością tej molekuli w ciepłym i oświetlanym przez promieniowanie UV otoczeniu. Molekuly $c\text{-C}_3\text{H}_2$ i C_2H czasem pochodzą z tego samego obszaru. Jest to prawdą dla VLA 1623-2417, ale nie dla IRAS 16293-2422. Warto zauważyć, że wielokrotność tych układów nie wydaje się mieć dużego znaczenia na strukturę chemiczną, choć dalsze badania są niezbędne.

W Rozdziale 5 zbadano czy rzeczywiście wszystkie gwiazdy w układach wielokrotnych powstają w tym samym czasie. Aby odpowiedzieć na to pytanie konieczne jest badanie protogwiazd na bardzo wczesnych etapach ewolucji, a nie tych późniejszych. Dzieje się tak dlatego, że warunki powstawania u młodych protogwiazd są praktycznie nienaruszone przez samą gwiazdę, podczas gdy na późniejszych etapach mamy do czynienia z wyewoluowanymi systemami. To jednak powoduje również problemy. Wiek zanurzonych protogwiazd jest praktycznie niemożliwy do określenia. Z drugiej strony etap ewolucyjny protogwiazdy, czyli właściwie jej "wiek", jest określony poprzez rozkład jasności w funkcji długości fali nazywany widmowym rozkładem promieniowania (*ang.* spectral energy distribution, SED). Podczas etapu zanurzonego, jasność protogwiazdy jest największa na długich falach z powodu kokonu pyłowego, w którym ona powstaje. Wraz z ewolucją protogwiazdy, materia wokół protogwiazdy ulega rozproszoniu i jasność protogwiazdy sukcesywnie przesuwa się ku krótszym falom. Gdy gwiazda zaczyna palić wodór w swoim jądrze, to jej jasność przesuwa się do zakresu widzialnego. Dlatego etap ewolucyjny protogwiazdy, w porównaniu do innych składników w układzie wielokrotnym, może być użyty do sprawdzenia czy wszystkie protogwiazdy w danym systemie powstały w tym samym czasie. SED dla wszystkich protogwiazd odkrytych w obłoku molekularnym Perseusza (w odległości 750 lat świetlnych) zostały zrekonstruowane przy użyciu danych literaturowych i fotometrycznych map z Kosmicznego Obserwatorium Herschela. Dla układów wielokrotnych SED poszczególnych składników mogły być rozwikłane przy odległościach pomiędzy protogwiazdami powyżej 1600 jednostek astronomicznych z powodu rozdzielczości Obserwatorium Herschela. Nachylenie protogwiazdy w kierunku linii widzenia może wpływać na wygląd SED, ponieważ protogwiazda widziana wzdłuż wypływu będzie wydawała się starsza niż jest w rzeczywistości, bo otoczka w ogóle może zostać niezauważona. Dlatego, aby wyznaczyć czy protogwiazdy w układach wielokrotnych powstawały jednocześnie czy nie, trzeba wziąć pod uwagę orientację protogwiazd, ich strukturę fizyczną i SED. Wyniki tego badania pokazują, że w jednej trzeciej przypadków składniki układów wielokrotnych nie powstają w tym samym czasie. Innymi słowy, niektóre obłoki molekularne tworzą protogwiazdy nawet długo potem gdy jedna lub dwie już zostały utworzone. Dostarcza to istotnej informacji dla teorii i modeli opisujących powstawanie gwiazd wielokrotnych i tym samym wskazuje na potrzebę zrozumienia czynników przyczyniających się do powstawania kolejnych protogwiazd w układach wielokrotnych.

W Rozdziale 6 badany jest jeden z możliwych czynników wpływających na powstawanie gwiazd wielokrotnych: temperatura. Modele, które obejmują ogrzewanie gazu i pyłu przez centralną protogwiazdę sugerują, że od momentu, w którym protogwiazda zostaje uformowana, podgrzany gaz i pył nie dzieli się już w więcej skupisk. Z kolei, wyniki z Rozdziału 5 pokazują, że są jeszcze inne przyczyny fragmentacji i pow-

stawiania układów wielokrotnych gwiazd. Aby stwierdzić, czy istnieje zależność między temperaturą a fragmentacją, są prowadzone badania gazu i pyłu w skali tysięcy jednostek astronomicznych. Obserwacje teleskopem APEX skupiały się na molekułach, które są dobrymi miernikami temperatury, jak DCO^+ i H_2CO , oraz na $\text{c-C}_3\text{H}_2$ i C_2H , charakteryzujących regiony oświetlane przez protogwiazdę. Obserwacje tych molekuł wykonane zostały dla próbki wyselekcjonowanych systemów protogwiazdowych w obłoku molekularnym Perseusza, zarówno wielokrotne, jak i pojedynczych. Badanie obu typów systemów pozwala na porównanie warunków w pojedynczych i wielokrotnych gwiazdach, co może pomóc w stwierdzeniu, czy temperatura jest kluczowym elementem w tworzeniu się gwiazd wielokrotnych. Obserwacje molekuł i wyznaczone na ich podstawie temperatury gazu nie pokazują jasnej relacji między temperaturą a wielokrotnymi bądź pojedynczymi gwiazdami. Jediną zaobserwowaną różnicą jest to, że wielokrotne systemy gwiazdowe mają ogromne zasoby chłodnego gazu w porównaniu z pojedynczymi protogwiazdami. To sugeruje, że masa i gęstość, bardziej niż temperatura, odgrywają rolę we fragmentacji, a w konsekwencji w formowaniu wielokrotnych systemów protogwiazdowych.

Wnioski

Wyniki tej pracy pozwalają na dołożenie kolejnych cennych elementów do układanki pod tytułem formowanie się gwiazd wielokrotnych i zostaną tu krótko przytoczone. Ogromne dyski mogą powstawać we wczesnych stadiach rozwoju protogwiazdy i wpływać na fizyko-chemiczną strukturę protogwiazd. Jest to istotne dla całego procesu formowania się gwiazd i zmienia nasze spojrzenie na ewolucję protogwiazd. Ponadto, oba czynniki - dysk oraz struktura fizyko-chemiczna, mogą wpływać na formowanie się systemów wielokrotnych poprzez fragmentacji. Nie wszystkie protogwiazdy w takim systemie tworzą się jednocześnie. To oznacza, że w niektórych przypadkach warunki panujące w gazowym jądrze sprzyjają dalszej fragmentacji. Te warunki nie są jednak związane z temperaturą, choć mogą być z masą i gęstością.

Wyniki te pozwalają wykonać kolejny krok na przód w rozumieniu formowania się systemów wielokrotnych, choć potrzebne są dalsze badania. Na przykład byłoby interesujące dowiedzieć się, czy wyniki uzyskane dla obłoku molekularnego Perseusza mają zastosowanie dla innych regionów powstawania gwiazd. Nasze rozumienie tego procesu musi zostać poszerzone o formowanie gwiazd wielokrotnych, gdyż są najczęstszym sposobem powstawania gwiazd. Modele i teorię należy zrewidować o wyniki obserwacji, co pozwoli na ukierunkowanie naszych dalszych badań.