Universiteit Leiden
The Netherlands

Protostellar jets and planet-forming disks: Witnessing the formation of Solar System analogues with interferometry

Tychoniec, Ł.

Citation

Tychoniec, Ł. (2021, March 9). *Protostellar jets and planet-forming disks: Witnessing the formation of Solar System analogues with interferometry*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/3147349

Version:	Publisher's Version
License:	Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/3147349

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page

Universiteit Leiden

Leiden University Repository

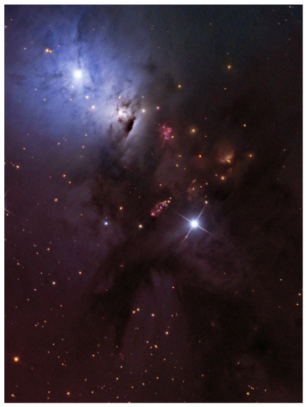
The handle http://hdl.handle.net/1887/3147349 holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Tychoniec, Ł.
Title: Protostellar jets and planet-forming disks: Witnessing the formation of Solar System analogues with interferometry
Issue date: 2021-03-09

Podsumowanie w języku polskim

Jak powstają gwiazdy i planety

Ciekawość na temat pochodzenia Ziemi, planet i Słońca jest nieustanną motywacją do dokonywania nowych odkryć astronomicznychnowych odkryć astronomicznych. Nic dziwnego, że z każdym nowym osiągnięciem technologicznym — począwszy od prostego teleskopu ręcznego wynalezionego przez Lippersheya i używanego przez Galileusza, po Very Large Telescope (VLT) o średnicy 8 m i 66 anten radiowych składających się na Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA) — staramy się dowiedzieć się czegoś o powstaniu naszego świata patrząc w niebo. Odkrycia dokonane w ciągu ostatnich 30 lat pokazują, że nasz Układ Słoneczny jest tylko jednym z wielu układów planetarnych. Do dziś odkryto już ponad cztery tysiące planet orbitujących wokół mniej lub bardziej odległych gwiazd. Aby zrozumieć, jak powstają te planety, nie wystarczy obserwować tylko te, które już uformowanych, ale konieczne jest skierowanie naszych teleskopów na obszary, w których właśnie teraz powstają nowe gwiazdy i planety: na obłoki molekularne.



Rysunek 1: *Z lewej:* Obserwacje teleskopu *Spitzer* w podczerwieni regionu gwiazdotwórczego NGC1333 w Perseuszu. Obraz kolorowy powstały po złożeniu filtrów podczerwonych: 3.6 μm (niebieski), 4.5 μm (zielony), 5.8 μm (pomarańczowy), 8.0 μm (czerwony). Źródło: NASA/JPL-Caltech/R. A. Gutermuth (Harvard-Smithsonian CfA). *Z prawej:* Obraz w świetle widzialnym w filtrach niebieskim, zielonym, i czerwonym tego samego regionu. Źródło: Robert Franke.

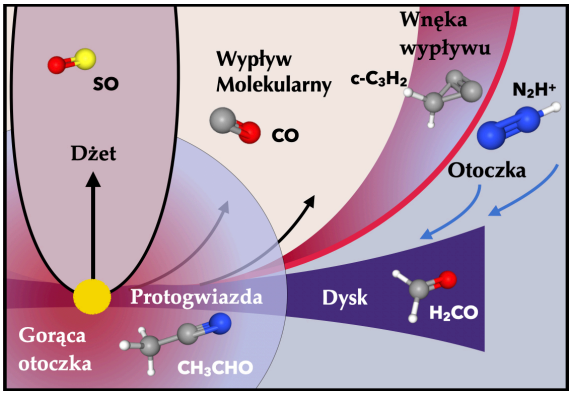
W ostatnich latach pojawiło się wiele dowodów na to, że formowanie planet zaczyna się błyskawicznie w kosmicznej skali czasu. W tej pracy dostarczam dowodów na to, że planety muszą zacząć się formować już w ciągu pierwszych 100 tysięcy lat po rozpoczęciu zapadania się pod wpływem grawitacji, obłoku z którego powstanie gwiazda i jej układ planetarny. To mgnienie oka w porównaniu z wiekiem naszego Słońca, które ma 4.6 miliarda lat. To odkrycie ma fundamentalne konsekwencje: aby zrozumieć, co wpływa na tworzenie się planet i w jakich warunkach powstają, musimy obserwować bardzo młode, jeszcze powstające gwiazdy. Warunki w młodych obłokach molekularnych wcale nie są spokojne: z gwiazdy i dysku protoplanetarnego wyrzucane są potężne naddźwiękowe dżety, temperatura jest wysoka z powodu dużej ilości materii opadającej na dysk. Przykładem takiego młodego regionu gwiazdotwórczego jest obłok molekularny Perseusza, z jednym z jego najbardziej spektakularnych obłoków NGC1333 przedstawionym na Rysunku 1.

Jeśli chcemy dotrzeć do sedna pochodzenia molekuł, których mieszanka sprawiła, że Ziemia eksplodowała życiem, musimy zbadać, co dzieje się w ciągu pierwszych 100 tysięcy lat cyklu formowania się gwiazd. Ta faza narodzin gwiazd nazywana jest fazą protogwiazdową i jest przedmiotem tej pracy doktorskiej.

Obserwacje powstających gwiazd

Młode gwiazdy są głęboko ukryte w obłokach gazowo-pyłowych, z których powstają. Oznacza to, że teleskopy optyczne, nawet te najpotężniejsze, nie nadają się do ich obserwacji z powodu silnej ekstynkcji - światło widzialne produkowane przez te obiekty jest pochłonięte. Innym czynnikiem, który nie ułatwia obserwacji, jest to, że rejony gwiazdotwórcze to zimne środowiska. Natura światła (fali elektromagnetycznej) sprawia, że nasze Słońce o temperaturze powierzchni 5400 K, świeci jasno w zakresie widzialnym, natomiast protogwiazdy charakteryzuje się temperaturą 30-500 K, co oznacza, że emitują one głównie fale o większej długości niż Słońce, a więc w podczerwieni i submilimetrowym zakresie widma elektromagnetycznego. Z tego powodu niniejsza praca wykorzystuje obserwatoria fal submilimetrowych i centymetrowych, takie jak Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA) i Very Large Array (VLA). Są to interferometry, co oznacza, że łączą sygnał z każdej z oddzielnych anten, aby uzyskać rozdzielczość, która jest równoważna rozdzielczości teleskopu z jedną anteną o średnicy równej odległości między antenami.

Każdy obiekt posiadający temperaturę, a więc także zimny pył otaczający protogwiazdy, emituje szerokopasmowym promieniowaniem o różnych długościach fal, taką emisję nazywamy kontinuum. Spektroskopia natomiast skupia się na liniach widmowych - wierzchołkach i spadkach w intensywności światła i jest wyjątkowym narzędziem do badania składu chemicznego i warunków fizycznych w tak młodych regionach. Zakres submilimetrowy jest bogaty w linie rotacyjne molekuł. Przejścia rotacyjne informuje o ilości cząsteczek emitujących światło i energii, którą posiadają. Kluczowe jest to, że różne molekuły śledzą różne warunki fizyczne. Dzięki temu możemy wyizolować poszczególne elementy układu protogwiezdnego (Rysunek 2). Niniejsza praca wykorzystuje obserwacje kontinuum do badania emisji termicznej pyłu w dyskach protoplanetarnych oraz spektroskopię do śledzenia gazowej emisji molekularnej.



Rysunek 2: Ilustracja komponentów składających się na system protogwiazdowy. Strzałki wskazują kierunki przemieszczania się gazu. Przedstawiono przykłady cząsteczek molekularnych, które są optymalne do obserwacji odpowiednich komponentów. Grafiki cząsteczek z https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/.

Dżety i dyski protogwiazdowe

Ta praca koncentruje się na scharakteryzowaniu głównych elementów układów protogwiazdowych, w szczególności ich dżetów i dysków. Dżety składają się z gazu o dużych prędkościach (od kilkudziesięciu do setek kilometrów na sekundę) wyrzucanego z wewnętrznych obszarów układu protogwiazdowego. Gdy chmura protogwiezdna zapada się, materiał wiruje szybciej z powodu zasady zachowania momentu pędu. Nadmiar tej energii obrotowej jest uwalniany w wypływach gazu o dużej prędkości, znacznie powyżej lokalnej prędkości dzwięku. Te wyrzuty materii nazywane dżetami, wchodzą w interakcje z otoczką gazowo-pyłową wokół młodej gwiazdy tworząc fale uderzeniową. Oznacza to, że warunki takie jak gęstość i temperatura zmieniają się diametralnie. Dżety są otoczone wolniejszymi i szerszymi wypływami o małej prędkości, składającymi się głównie z materiału, który jest unoszony z otoczki przez dżet. Badanie młodych dżetów może ujawnić informacje o składzie wyrzucanego materiału i wpływie, jaki szoki mogą mieć na procesy chemiczny całego układu.

Rotacja opadającego obłoku powoduje spłaszczenie materii otaczającej gwiazdę w strukturę w kształcie dysku. W tych dyskach powstają pierwsze zalążki planet, gdy ziarna pyłu zderzają się i łączą ze sobą. Ziarna pyłu są pokryte zamarzniętym materiałem, głównie wodą. Inne cząsteczki, takie jak CO (tlenek węgla), mogą również osiadać z fazy gazowej na ziarna pyłu i zostać przekształcone w związki takie jak CH_3OH (metanol) i H_2CO (formaldehyd). Znajo-

mość składu tego lodu na powierzcni pyłu pozwala zdobyć informację o tym, jakie molekuły wchodzą w skład tworzących się planet. To, czy cząsteczka będzie obecna w fazie gazowej, czy w lodzie, zależy od temperatury: woda zamarza na ziarnach poniżej 100 K, a tlenek węgla poniżej 20 K. Temperatura dysku spada wraz z odległością od protogwiazdy. Granica, poza którą pewna cząsteczka występuje głównie w stanie stałym, nazywana jest linią lodu. Te linie odgrywają ważną rolę w formowaniu się planet, ponieważ mogą ułatwiać gromadzenie się materii, ale także znacząco zmieniają skład gazu i pyłu, z którego powstają planety. Masy dojrzałych dysków protoplanetarnych, starszych niż milion lat, pokazują, że po rozproszeniu obłoku molekularnego nie mają one dość materiału, aby móc tworzyć planety. Czy to oznacza, że planety zaczynają się formować wcześniej? Jest na to kilka dowodów: meteoryty widziane w naszym Układzie Słonecznym są podzielone na dwie klasy między wewnętrzną a zewnętrzną częścią układu, tak jakby masywna planeta (prawdopodobnie Jowisz) uformowała się i oddzieliła je bardzo wcześnie. Dzięki obserwacjom sieci ALMA zaobserwowano również bardzo szybki wzrost rozmiaru ziaren pyłu w młodych dyskach.

Główne wyniki i ich implikacje

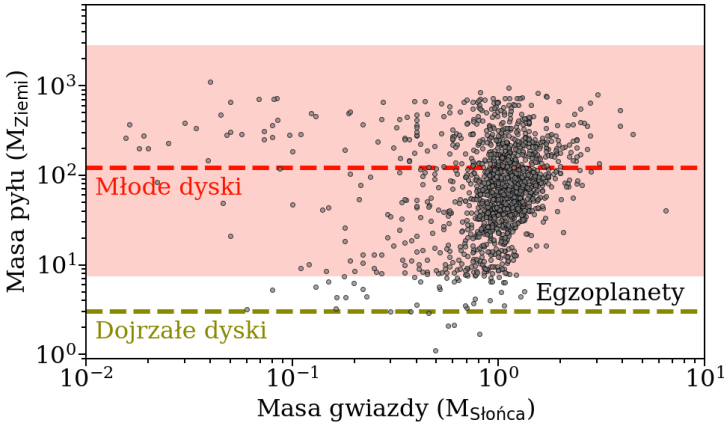
Ta praca przedstawia obserwacje astronomiczne mające na celu scharakteryzowanie najwcześniejszych etapów formowania się gwiazd i planet. W Rozdziale 2 wykorzystaliśmy obserwacje 100 protogwiazd w Perseuszu interferometrem VLA na 4 i 6.4 cm, w celu zbadania zjonizowanych dżetów pochodzących od protogwiazd. Pokazaliśmy, że parametry zjonizowanego dżetu są powiązane z innymi kluczowymi właściwościami gwiazd. Dzięki dużej liczbie zaobserwowanych obiektów, byliśmy w stanie wykorzystać informacje o radiowych dżetach, aby skorygować pomiary mas dysków na krótszych długościach fal. Pozwoliło to po raz pierwszy porównać masy młodych dysków ze starszymi oraz sprowokowało nową zagadkę: czy w najmłodszych dyskach jest wystarczająco dużo materiału do tworzenia się planet?

Na to pytanie odpowiadamy w Rozdziale 3, w którym łączymy obserwacje ALMA i VLA, aby scharakteryzować pył w młodych dyskach. Porównując masy młodych dysków z układami egzoplanetarnymi, pokazujemy, że planety gazowe mogą powstawać na najwcześniejszych etapach. Wynik ten jest pokazany na Rysunku 3: obserwowane egzoplanety mają masy znacznie większe od mas dojrzałych dysków, ale mieszczą się w zakresie mas młodych dysków.

W Rozdziale 4 badamy skład chemiczny dżetów molekularnych z protogwiazd w obłoku molekularnym w gwiazdozbiorze Wężą. Potwierdzamy poprzednie badania pokazujące, że stosunek obfitości atomów węgla do atomów tlenu w dżecie jest niższy niż ten w otaczającej powłoce. Badanie młodych dżetów może mieć zatem kluczowe znaczenie dla zbadania wewnętrznych obszarów dysków i zmian, które zachodzą w jego składzie. Rozdział 5 zawiera przegląd chemicznych wskaźników fizycznych komponentów protogwiazd. Obserwacje siecią ALMA kilkunastu protogwiazd umożliwiają systematyczną analizę róznych elementów tworzących układ protogwiezdny. Obserwacje molekuł można użyć do pomiaru temperatury (np. DCO^+ i N_2D^+ to wskaźniki zimnego gazu) lub rodzaju promieniowania (C_2H i CN jako produkty przemian chemicznych zdominowanych przez promieniowanie UV).

Tę pracę doktorską można podsumować następująco: Powstawanie planet rozpoczyna się bardzo wcześnie, w pierwszych 100 tysiącach lat od początków systemu gwiezdnego w bardzo młodych dyskach otaczających protogwiazdy. Charakterystyka tych młodych systemów jest niezbędna do zrozumienia warunków powstawania planet. Obserwacje interfero-

metryczne molekuł w skalach porównywalnych z Układem Słonecznym są niezwykle przydatne do opisywania tych warunków. Dżety molekularne, które, jak pokazujemy, są bardzo powszechne w młodych układach, mogą być szczególnie ważne w pozyskiwaniu informacji o wewnętrznych rejonach układów, z których powstają planety.



Rysunek 3: Wykres przedstawiający rozkład mas układów egzoplanetarnych dla planet wokół gwiazd ciągu główneg (źródło: exoplanet.eu). Zacieniowany na czerwono obszar oznacza zakres oszacowania mas dysków w obłoku molekularnym w Perseuszu z medianą masy zaznaczoną linią przerywaną. Mediana masy dojrzałych dysków jest pokazana na żółto.

Przyszłość badań powstających gwiazd i planet

Obserwatorzy młodych systemów protogwiazdowych mają przed sobą ekscytująca przyszłość: ALMA działa na pełnych obrotach ujawniając swoje niesamowite możliwości obserwując młode protogwiazdy, ich dyski i dżety, w skali porównywalnej do rozmiarów Układu Słonecznego. ALMA szczególnie dobrze nadaje się do charakteryzowania młodych dżetów protogwiazdowych, które skrywają tajemnicę składu wewnętrznych obszarów dysków. Kolejna rewolucja nadchodzi dzięki teleskopowi Jamesa Webba (JWST), największemu teleskopowi kosmicznemu, jaki kiedykolwiek zbudowano, a który zostanie wystrzelony w kosmos w 2021 roku. Szczególnie Mid-InfraRed Instrument (MIRI) będzie obserwował protogwiazdy w podobnej rozdzielczości przestrzennej co ALMA lecz w zakresie 5-28 μm, który jest nieosiągalny, lub znacząco ograniczony dla obserwatoriów na Ziemi. Te obserwacje ujawnią skład zarówno gorącego gazu jak i chłodnego lodu zamarzniętego na powierzchni pyłu. W połączeniu z informacjami z sieci ALMA na temat chłodniejszego gazu, wkrótce będziemy mieli najbardziej przejrzysty obraz początków powstawania gwiazd i planet.