

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/28845> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Karska, Agata

**Title:** Feedback from deeply embedded low- and high-mass protostars. Surveying hot molecular gas with Herschel

**Issue Date:** 2014-09-24

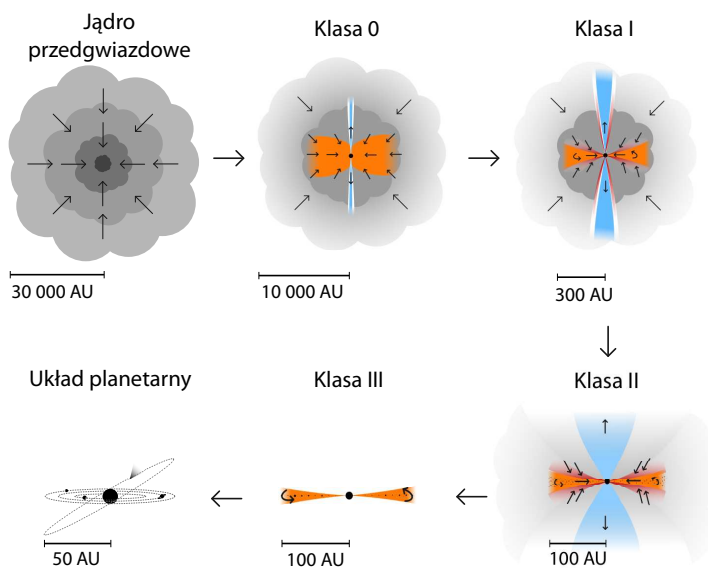
# Streszczenie w języku polskim

## Procesy oddziaływania protogwiazd na otoczenie. Przeglądy gorącego gazu molekularnego przy pomocy *Herschela*

### Powstawanie gwiazd

Odpowiedzi na pytanie, jak powstał nasz Układ Słoneczny, można poszukiwać poprzez obserwacje protogwiazd położonych w Drodze Mlecznej. Badanie protogwiazd, które w przyszłości staną się gwiazdami podobnymi do Słońca (tzn. utworzą małowymasywne gwiazdy o masach  $M$  z zakresu  $\sim 0,08-1,5 M_{\odot}$ , gdzie  $M_{\odot}$  to masa Słońca równa  $\sim 2 \times 10^{33}$  gramów), jest kluczowe do zrozumienia naszego własnego pochodzenia. Małowymasywne gwiazdy są najbardziej liczne w galaktykach a ich sumaryczna masa przewyższa masę nielicznych masywnych gwiazd. Mimo to, badania masywnych gwiazd ( $M \gtrsim 8 M_{\odot}$ ) są również niezwykle istotne, ponieważ gwiazdy te w istotny sposób wpływają na obszary formujące mniej masywne gwiazdy poprzez silne promieniowanie, wiatry gwiazdowe oraz wzbogacanie ośrodka w ciężkie pierwiastki.

Rysunek 1 przedstawia kluczowe fazy ewolucji protogwiazd o małych masach. Gravitacyjny kolaps najgęstszych obszarów obłoków molekularnych powoduje powstanie centralnego jądra gwiazdowego. Jego masa rośnie w wyniku akrecji materii z otoczki wokół protogwiazdy. Część tej materii jest wyrzucana w postaci symetrycznych dżetów tworzących wypływy molekularne, początkowo o bardzo małym kącie rozwarcia (Klasa 0), który rośnie na późniejszych etapach ewolucji (Klasa I). Promieniowanie ultrafioletowe (UV) z tworzącej się gwiazdy dociera do coraz bardziej zewnętrznych warstw otoczki, w miarę jak jej masa zmniejsza się pod wpływem akrecji, a część jest rozpraszana przez dżety. Dżety z czasem wyprowadzają coraz mniej materii z powodu spadającego tempa akrecji i ostatecznie ich działalność ustaje. W momencie, gdy znika otoczka (Klasa II), w świetle widzialnym zaczyna być widoczna gwiazda centralna przed ciągiem głównym, otoczona przez dysk wokółgwiazdowy. Gaz z tego dysku zostaje uwięziony w gazowych olbrzymach, czyli planetach takich jak Jowisz czy Saturn, lub rozproszony przez silny wiatr gwiazdowy i promieniowanie. W tym samym czasie następuje zlepianie się pyłu w coraz większe struktury, tworząc w efekcie planetozymale oraz planety skaliste takie jak Ziemia (Klasa III).

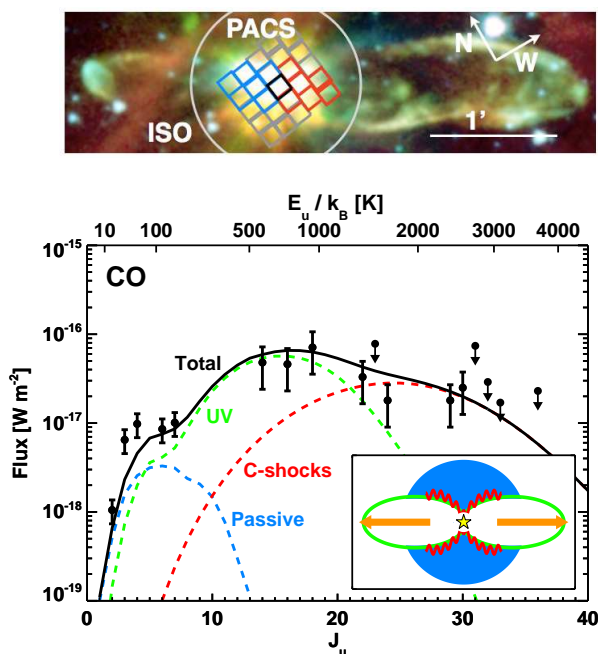


**Rysunek 5.8** – Schemat ewolucji protogwiazd, które w przyszłości utworzą gwiazdy podobne do naszego Słońca. Każdy obrazek ma przypisane typowe rozmiary przestrzenne, przy czym 1 jednostka astronomiczna (AU) odpowiada odległości Ziemia-Słońce i wynosi  $1 \text{ AU} = 1,5 \times 10^8 \text{ km}$ . Na podstawie Persson (2013).

## Główne cele pracy doktorskiej

Z przedstawionego scenariusza jasno wynika, że młode protogwiazdy gwałtownie oddziałują na macierzyste obłoki molekularne. Gdy protogwiazdy zwiększają swoją masę, ogrzewają kurczącą się otoczkę i jednocześnie wyrzucają dżety gazu, które uderzają w otaczające je ciemne obłoki materii. W tym samym czasie promieniowanie ultrafioletowe przedostaje się do opróżnionej przez dżet wnętrzy wypływów molekularnych i dysocjuje oraz ogrzewa gaz. Dokładne scharakteryzowanie tego typu oddziaływań jest kluczowe do wyjaśnienia bardzo niskiej obserwowanej efektywności procesu formowania gwiazd oraz chemicznego przetwarzania materiału, który stanie się budulcem układu planetarnego.

Praca doktorska przedstawia analizę procesów fizycznych w otoczeniu młodych protogwiazd, które odzwierciedlają się w emisji gazu molekularnego w dalekiej podczerwieni. Obserwacje pochodzą z instrumentu PACS (ang. Photodetector Array Camera and Spectrometer) na *Kosmicznym Teleskopie Herschela*. Spektrofotometr PACS umożliwia badania i obrazowanie — z dotychczas najwyższą czułością i rozdzielczością przestrzenną — procesów energetycznych w pobliżu protogwiazd, które to procesy są całkowicie niewidoczne w świetle optycznym. Pozwala, między innymi, na obserwacje molekuł wody, które wskazują na obecność ciepłego gazu oraz procesów energetycznych zachodzących



**Rysunek 5.9** – Góra: Wpływ molekularny z HH 46, protogwiazdy Klasy I. Naniesione jest również pole widzenia PACS na *Herschelu* oraz jego poprzednika, instrumentu LWS na ISO. Kolorowe kwadraty pokazują piksele detektora PACS, które obserwują część wypływu oddalającego się od nas (czerwone) oraz zbliżającego się do nas (niebieskie). Dół: Strumienie linii CO obserwowane przy pomocy PACS na *Herschelu* oraz teleskopu submilimetrowego APEX (przejścia oznaczone jako  $J_u < 10$ ) oraz model teoretyczny uwzględniający grzanie przez kolapsującą otoczkę (na niebiesko), ogrzewanie wnek obłoków molekularnych przez promieniowanie UV (zielone), oraz lokalne szoki wzdłuż wnek (czerwone). Czarna linia jest sumą tych trzech składników, które dodatkowo zobrazowane są na małej wstawce. Na podstawie van Kempen et al. (2010b).

podczas formowania się gwiazd, a także odgrywają ważną rolę w procesie chłodzenia gazu. Interpretacja pochodzenia linii emisyjnych w dalekiej podczerwieni pozwala na określenie warunków fizycznych gazu oraz roli szoków i promieniowania UV podczas ‘przedszkolnych lat’ protogwiazd o małych i dużych masach.

## *Herschel* / PACS

Kompletne widmo protogwiazdy w podczerwieni zostało po raz pierwszy otrzymane przy pomocy Spektrometru Długich Fali (ang. Long-Wavelength Spectrometer, LWS) działającego na *Kosmicznym Obserwatorium Podczerwonym* (ang. *Infrared Space Observatory*, ISO). Teleskop miał średnicę 0,6 m, co umożliwiało obserwacje najbliższych protogwiazd z rozdzielczością przestrzenną  $\gtrsim 20\,000$  AU ( $1\text{ AU} = 1.5 \times 10^8$  km, odpo-

wiada odległości Ziemia-Słońce). W rezultacie, zarówno otoczka jak i wypływy molekularne przypadają na jeden piksel (zobacz Rysunek 2) i jednoznaczne określenie pochodzenia emisji podczerwonej było niemożliwe.

Instrument PACS działający na *Herschelu* od połowy 2009 do połowy 2013 roku umożliwił ośmiokrotne zwiększenie rozdzielności przestrzennej, aż do wielkości przestrzennych rzędu  $\sim 2\,000$  AU (porównanie pola widzenia ISO oraz PACSa pokazane jest na Rysunku 2). W połączeniu z większą czułością PACSa oraz nowymi modelami astrochemicznymi, możliwe stało się identyfikowanie źródeł emisji w dalekiej podczerwieni i tym samym opis procesów fizycznych mających miejsce podczas najwcześniejszych etapów formowania się gwiazd.

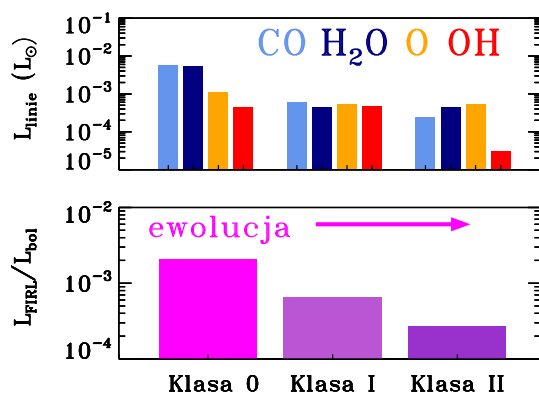
Rysunek 2 pokazuje przykład takiej analizy, gdzie grzanie gazu przez otoczkę, fotony UV z protogwiazdy oraz szoki zostało wymodelowane tak, aby wyjaśnić emisję we wszystkich liniach molekuly CO obserwowanej u protogwiazdy Klasy I. Niestety, tego typu modele nie są unikatowe – emisja w CO może być odtworzona używając, przykładowo, tylko różnych rodzajów szoków (bez otoczki i promieniowania UV). Z tego powodu bardzo istotna jest jednoczesna analiza emisji w podczerwieni wszystkich obserwowanych molekuł i atomów: tlenku węgla (CO), pary wodnej (H<sub>2</sub>O), wodorotlenku (OH) i tlenu atomowego (O). Przeglądy protogwiazd na różnych etapach ewolucji, w szerokim zakresie masy i położonych w różnorodnych środowiskach, są niezbędne, aby prawidłowo zidentyfikować i wyizolować główne procesy fizyczne prowadzące do powstania gwiazd.

## Wyniki

W niniejszej pracy obserwacje przy pomocy PACSa na *Herschelu* użyte są do odpowiedzi na pytania o źródło emisji podczerwonej u protogwiazd Klasy 0 i I, o małych i dużych masach. Molekularna emisja podczerwona okazuje się być powszechna w obszarach formowania gwiazd (Rozdziały 2–5). Emisja w liniach CO, H<sub>2</sub>O oraz OH została zaobserwowana u 80% małowymasywnych protogwiazd. 40% tych obiektów wykazuje ponadto emisję w wysokowzbudzeniowych liniach CO oraz H<sub>2</sub>O (Rozdział 5). Rozkład przestrzenny emisji molekularnej jest rzędu  $\sim 1000$  AU, z wyjątkiem kilku obiektów w których rozciąga się ona aż do  $\sim 10\,000$  AU w kierunku wypływu molekularnego obserwowanego w niskich przejściach molekuly CO. Emisja tlenu atomowego jest zwykle rozciągnięta i ma podobny rozkład.

Emisja w przejściach molekuly CO odpowiada temperaturom wzbudzeniowym  $\sim 320$  K i  $\sim 690$  K u małowymasywnych protogwiazd (Rozdziały 2 i 5). Komponent o temperaturze  $\sim 300$  K widoczny jest również u protogwiazd o dużych masach (Rozdział 3). Pomimo tych podobieństw, udział otoczki w grzaniu gazu i chłodzeniu przy pomocy CO w przypadku masywnych protogwiazd wzrasta dziesięciokrotnie w stosunku do obiektów o małych masach (Rozdział 3).

Status ewolucyjny ma istotny wpływ na stosunek emisji molekularnej do atomowej, zdecydowanie większy niż masa protogwiazdy. Z kolei stosunek całkowitego chłodzenia gazu do jasności obiektów zmniejsza się jedynie czterokrotnie między Klasą 0 i I



**Rysunek 5.10** – Góra: Chłodzenie gazu w liniach tlenku węgla (CO), pary wodnej (H<sub>2</sub>O), wodorotlenku (OH), oraz tlenu atomowego (O) dla obiektów Klasy 0, I i II. Dół: Zmiany ewolucyjne stosunku chłodzenia gazu w liniach dalekiej podczerwieni i jasności bolometrycznej (w całym zakresie widma) badanych obiektów.

(Rysunek 3) i aż dwudziestokrotnie między protogwiazdami o małych i dużych masach (Rozdziały 2 i 3).

Szoki są głównym źródłem gorącego ( $T \gtrsim 300$  K) i gęstego ( $n \sim 10^6$  cm<sup>-3</sup>) gazu w małowymasywnych protogwiazdach (Rozdziały 2, 4 i 5). Szoki, które nie powodują dysocjacji molekuł, odpowiedzialne są za większość emisji w liniach CO i H<sub>2</sub>O, podczas gdy szoki dysocjujące są niezbędne do wyjaśnienia emisji w liniach tlenu atomowego oraz liniach OH, a także emisji w najbardziej wzbudzonych przejściach CO i H<sub>2</sub>O (Rozdziały 4 i 5). Jednakże uwzględnienie wpływu promieniowania UV na szoki jest niezbędne do ścisłego określenia ich parametrów i musi zostać zaimplementowane w następnej generacji modeli szoków (Rozdział 4 i 5). Pole promieniowania UV w otoczeniu protogwiazd jest około 10–100 razy większe niż średnie międzygwiazdowe pole promieniowania (Rozdział 5).

## Plany na przyszłość

Widma w dalekiej podczerwieni o większej rozdzielczości widmowej niż PACS mogą być otrzymywane przez Niemiecki Instrument na Częstotliwościach Terahercowych (ang. The German REceiver for Astronomy at Terahertz Frequencies, GREAT), działający na Stratosferycznym Obserwatorium dla Astronomii Podczerwonej (ang. Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA). W szczególności, w ciągu najbliższego roku wykonywane będą po raz pierwszy obserwacje tlenu atomowego z największą dotychczas rozdzielczością rzędu 1 km s<sup>-1</sup>, co pozwoli na określenie stosunku emisji powodowanej przez dzety oraz promieniowanie UV od protogwiazd o różnym stopniu zaawansowania ewolucyjnego.

Komplementarny obraz procesów fizycznych wokół protogwiazd dostarczają obser-

wacje w paśmie (sub)milimetrycznym prowadzone przy pomocy Wielkiej Sieci Teleskopów Sub/Milimetrycznych na Atacama (ang. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA). ALMA umożliwia obserwacje izotopologów linii CO w obszarach wielkości  $\sim 100$  AU, co w najbliższych latach pozwoli na określenie roli promieniowania UV w obszarze formowania gwiazd o małych masach. Z kolei obserwacje w liniach SiO pomogą określić parametry silnych szoków powstających w wyniku oddziaływań otoczki i dżetów.

Podobną rozdzielczość przestrzenną (0.4-0.8") w podczerwieni będzie oferował Instrument Podczerwony (ang. Mid-Infrared Instrument, MIRI), który znajdzie się na pokładzie planowanego do wystrzelenia pod koniec 2018 roku *Teleskopu Kosmicznego Jamesa Webba* (ang. James Webb Space Telescope, JWST). Instrument dostarczy informacji o rozkładzie przestrzennym gorącego gazu i jego właściwościach ukazanych przez linie widmowe w zakresie 5-28  $\mu\text{m}$ .

Pomimo zakończenia misji *Herschela* w połowie 2013 roku, ogromna ilość danych ciągle nie została jeszcze opracowana. Tymczasem kompletny przegląd protogwiazd w pobliskich obłokach molekularnych jest potrzebny do opracowania modeli teoretycznych powstawania gwiazd oraz ich ewolucji, a także wpływu protogwiazd na najbliższe otoczenie.