Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N.Yeltsin
Institute of Natural Sciences and Mathematics

СТРУКТУРА МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА ПРОТОЗВЕЗДЫ КЛАССА 0 HOPS-60

Е. О. Криницкий[1], И. В. Петрашкевич[1], А. Ф. Пунанова[1], Я. Н. Павлюченков[2], М. С. Кирсанова[2], А. И. Васюнин[1]

[1]Научная лаборатория астрохимических исследований, УрФУ
[2]Институт астрономии российской академии наук

Введение

Протозвёзды класса 0 находятся на ранней стадии формирования: они ещё окружены плотной газопылевой оболочкой и продолжают набирать массу. Наблюдения таких объектов позволяют изучить, как истечения формирующейся звезды влияют на движение и нагрев окружающего газа. В этой работе мы исследуем HOPS-60 (OMC-2 FIR 6b), протозвезду класса 0 в облаке Орион А на расстоянии около 392 пк [Matsushita и др. 2021]. Инфракрасные линии H_2 позволяют проследить нагретый молекулярный газ в её биполярном истечении как вблизи источника, так и дальше вдоль потока.

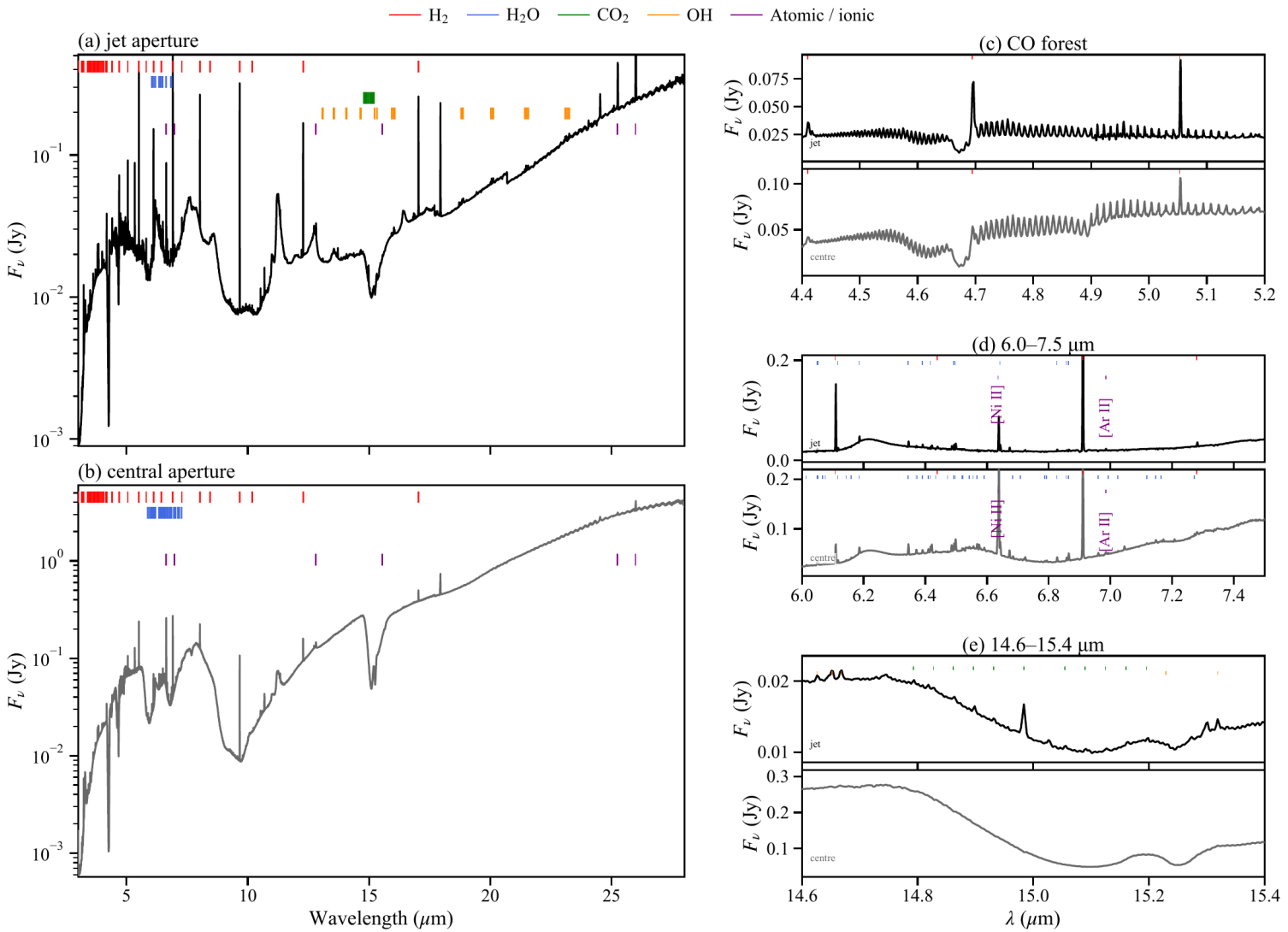
Цель исследования

Исследовать пространственную структуру, кинематику и физические условия молекулярного газа в окрестности HOPS-60 по инфракрасным эмиссионным линиям в спектрах JWST.

Наблюдения и подход

Использованы спектральные кубы NIRSpec IFU и MIRI/MRS (MAST, GO 5804). Были построены вращательные диаграмы H_2 по спектрам в двух апертурах у источника и в джете, построены карты интенсивности по которым прослеживается газ и карты возбуждения H_2.

Инфракрасные спектры HOPS-60



Обнаруженные молекулы

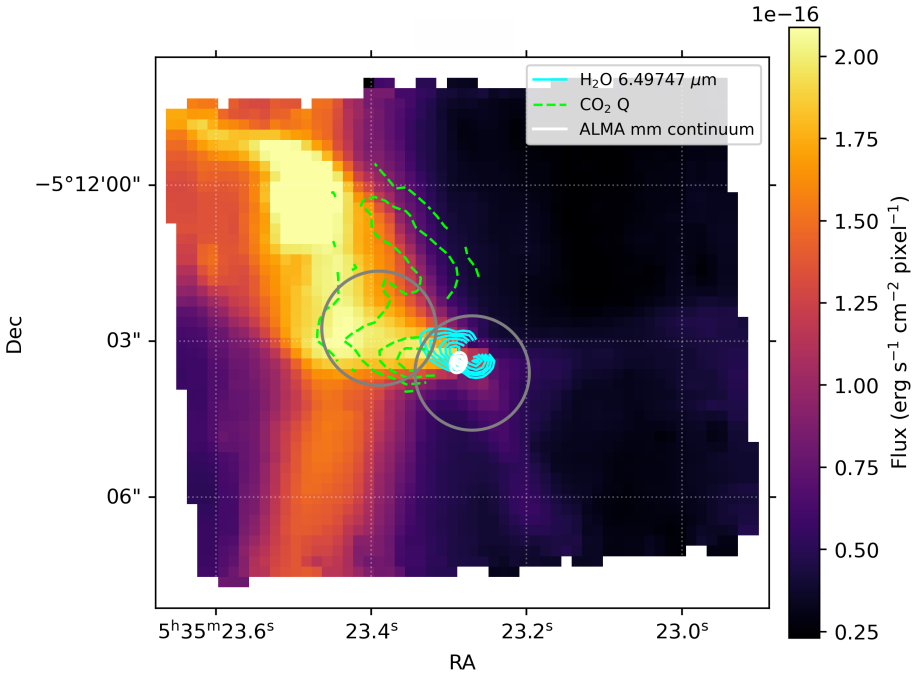
В направлении источника видны вращательные линии H_2 от S(1) до S(19) и колебательно-вращательные линии на коротких длинах волн. Набор вращательных линий H_2 позволяет построить диаграммы возбуждения отдельно для центральной апертуры и джета.

На увеличенных участках показаны серия линий CO (4,4–5,2 мкм), линии H_2O (6,0–7,5 мкм) и область полосы CO_2 около 15 мкм. В спектрах также обнаружено излучение OH.

Были также обнаружены запрещённые линии ионов: [Fe II], [Ni II], [Ne II], [Ne III], [Ar II].

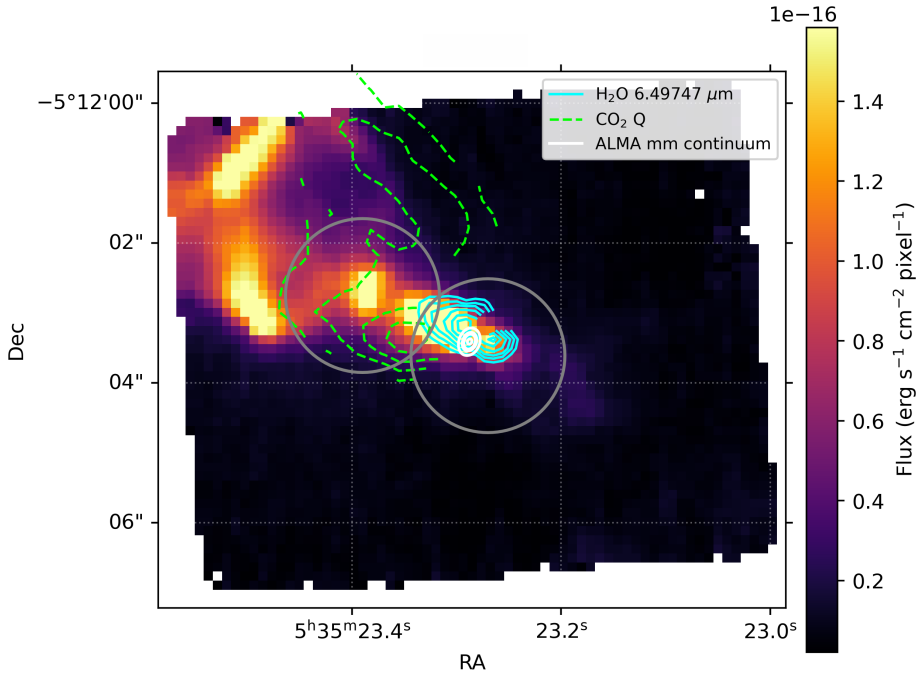
Карты интегральной интенсивности

H_2 0–0 S(2)



Низковозбуждённая линии, такие как S(2), прослеживают широкую область молекулярного выброса. К юго-востоку от его основной оси видна протяжённая структура.

H_2 0–0 S(8)



В высокоэнергетических линиях, например S(8), излучение сильнее сосредоточено вдоль оси выброса. К северо-востоку от источника различимы отдельные яркие участки, узлы.

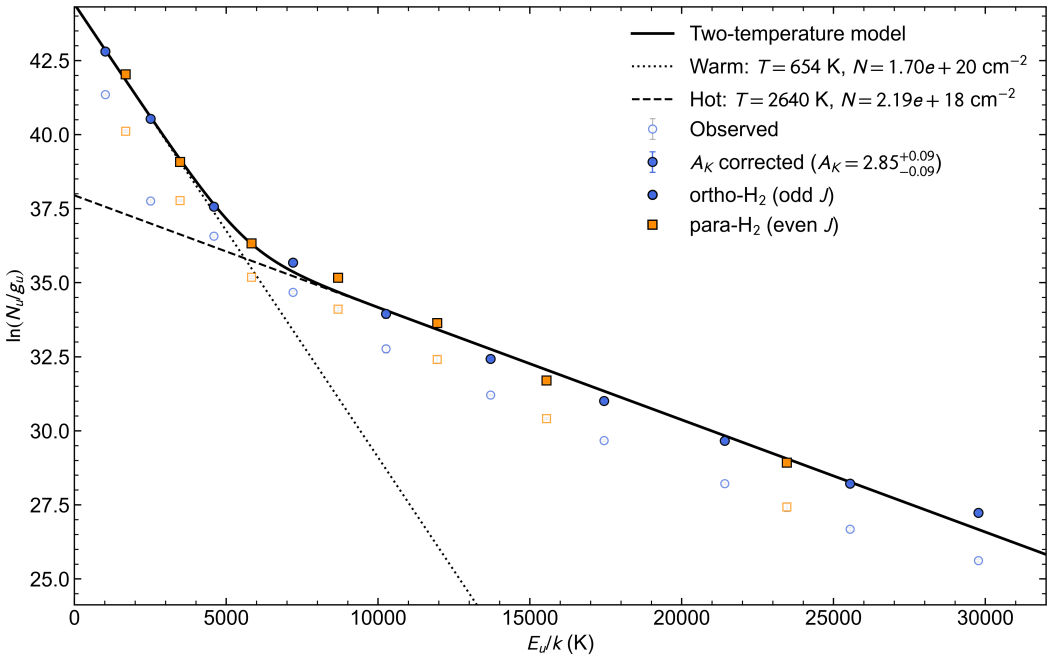
Апертура джета слева вверху, источника справа внизу (r = 1,1″).

Данные ALMA(0,87 мм): Tobin и др. (2020).

Вращательные диаграммы H_2

Вращательные диаграммы построены по линиям 0–0 S(1)–S(19). По оси X энергия верхнего уровня E_u/k (K), по оси Y — $\ln(N_u/g_u)$, где N_u — населённость уровня, g_u — его статистический вес.

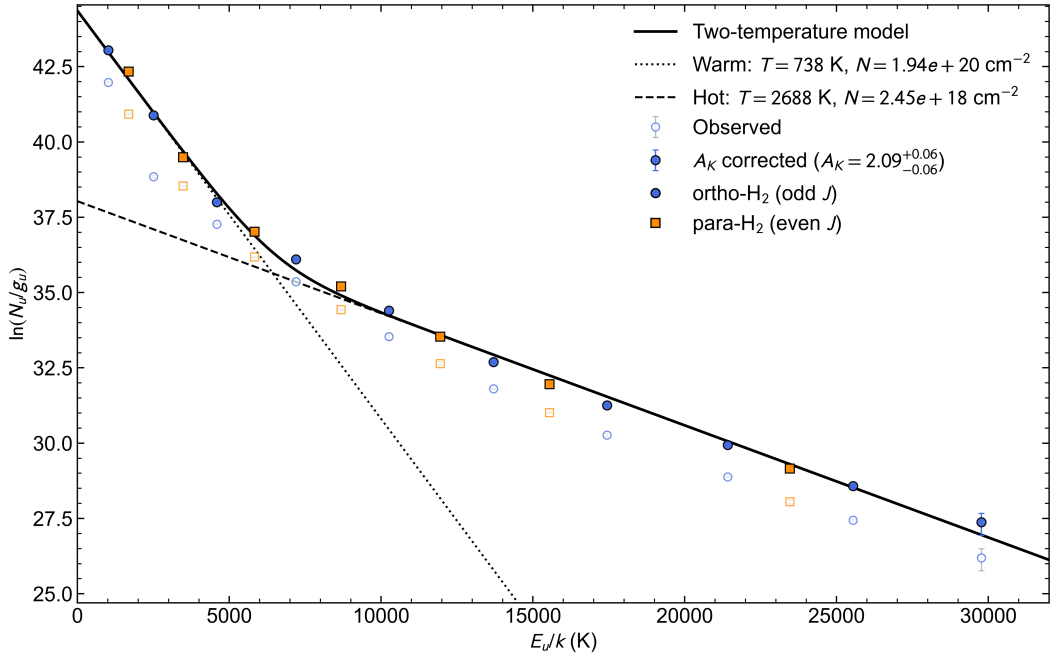
Центральный источник



Тёплая: T = [649 – 659] K, N = [1.53 - 1.88] × 10^{20} см$^{-2}$
Горячая: T = [2639 – 2641] K, N = [1.96 - 2.42] × 10^{18} см$^{-2}$

OPR = 2.81

Джет



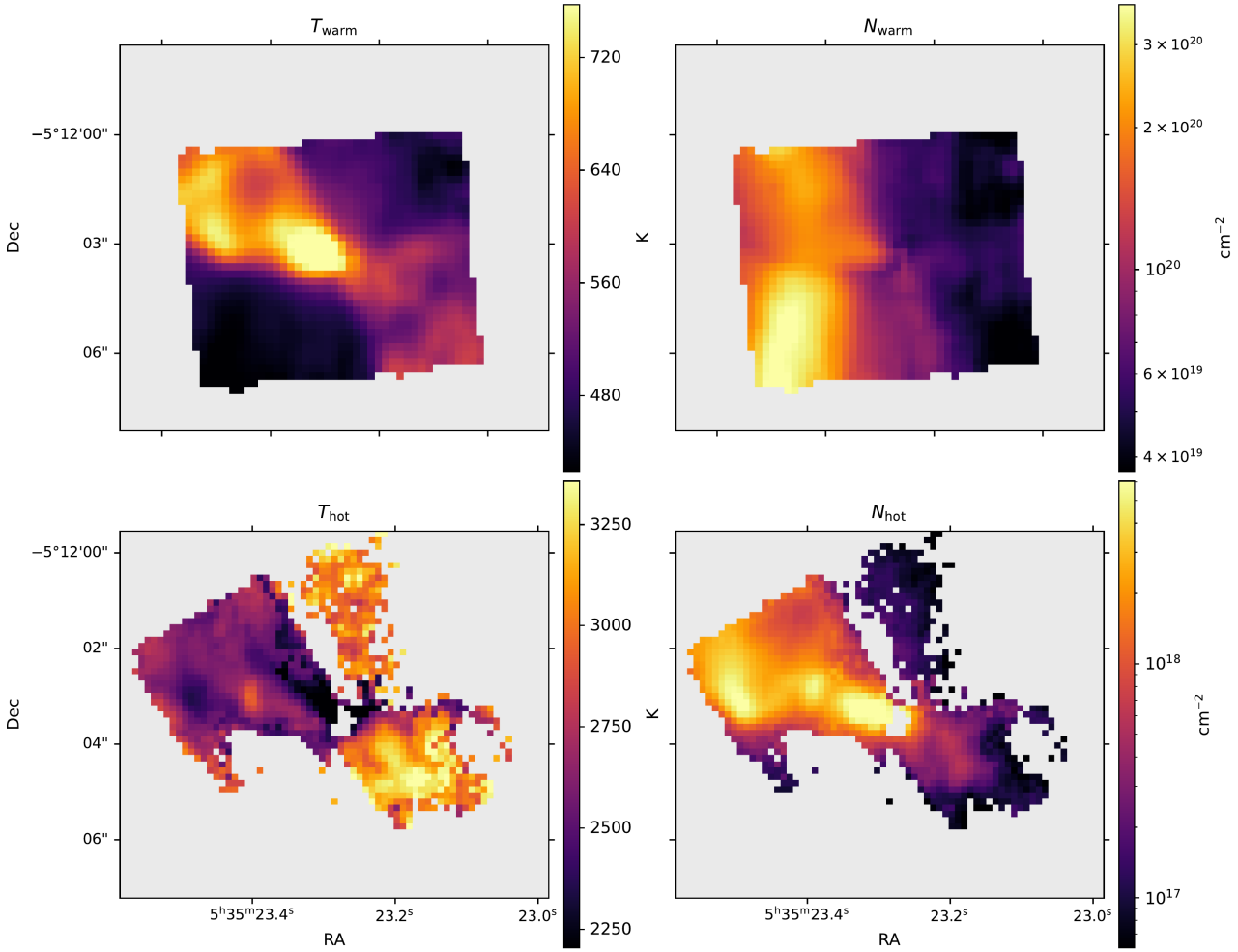
Тёплая: T = [732 – 741] K, N = [1.85 - 2.05] × 10^{20} см$^{-2}$
Горячая: T = [2607 – 2745] K, N = [2.40 - 2.59] × 10^{18} см$^{-2}$

OPR = 2.66

OPR — отношение N(орто-H_2) к N(пара-H_2). По линиям S(1)–S(8) получили значения, близкие к высокотемпературному пределу 3.

Точки апроксимации после поправки на поглощение измеренное по методу Francis и др. (2025). Сплошная кривая: сумма двух компонент в ЛТР.

Карты температуры и лучевой концентрации H_2



Слева температура возбуждения T (K), справа лучевая концентрация N (см$^{-2}$). Сверху тёплая компонента, снизу горячая.

Тёплая компонента

S(2)–S(5), угловое разрешение 0.475″. T ≈ 400–850 K, N ≈ 3 × 10^{19} – 4 × 10^{20} см$^{-2}$. Тёплый газ прослеживается вдоль основной оси истечения и в протяжённой структуре к юго-востоку.

Горячая компонента

S(8)–S(17), разрешение 0.196″. По пикселям карты T ≈ 1800–4900 K, N ≈ 2 × 10^{16} – 2 × 10^{19} см$^{-2}$. Максимумы лучевой концентрации лежат вдоль оси истечения.

Горячая компонента указывает на высокую вспышечную активность протозвезды и показывает ударные узлы в истечении

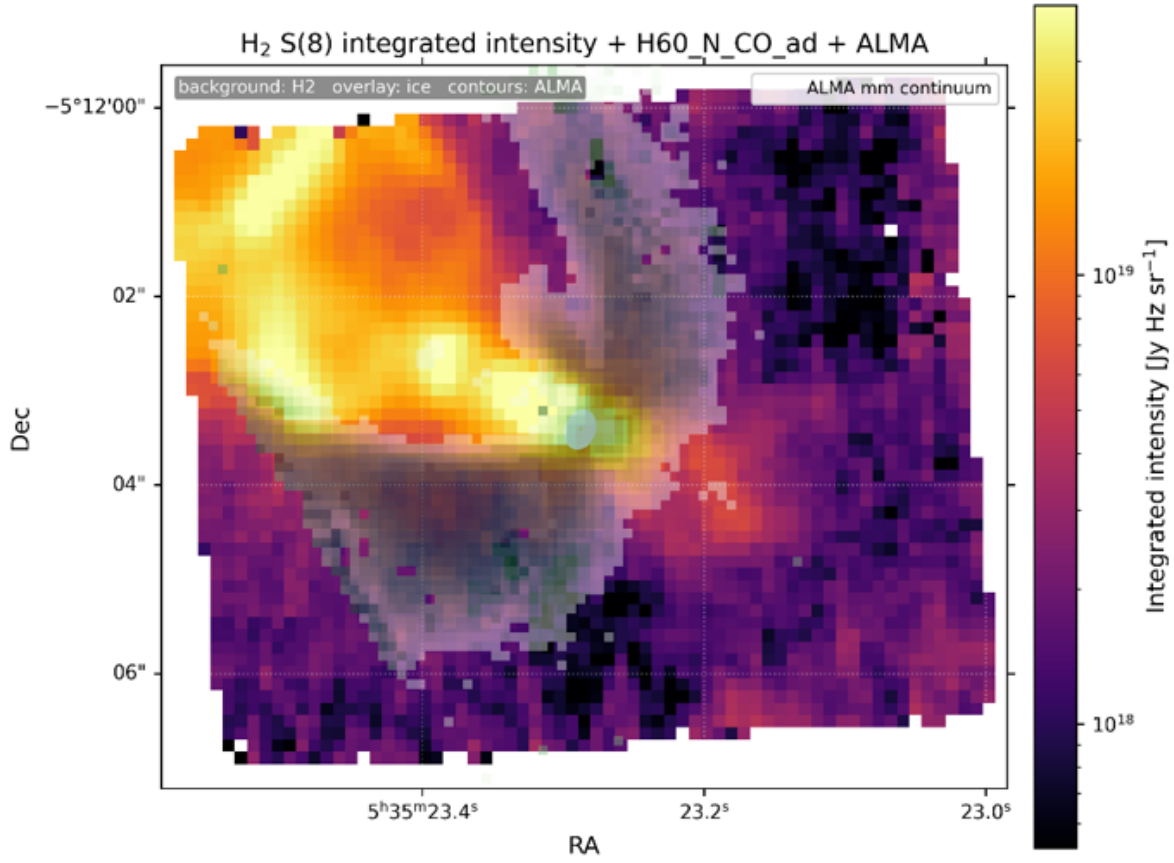
Заключение

- Были впервые получены карты лучевых концентраций и температуры молекулярного водорода в направлении протозвезды класса 0. Двухтемпературная модель хорошо описывает кривизну диаграмм и у источника, и в джете. Тёплая компонента содержит больше H_2 вдоль луча зрения.

- Горячая компонента указывает на высокую вспышечную активность протозвезды и показывает ударные узлы в истечении. Более тёплая компонента показывает оболочку истечения.

- Газ нагревает ударные волны внутри джета или там, где он встречает оболочку. Юго-восточная структура может быть стенкой широкой полости или боковым крылом головной ударной волны. В обоих случаях излучение ожидается и вне оси.

- Карта излучения молекулярного водорода согласуются с картой льда CO указывая на области испарения CO.



Интегральная интенсивность H2 и лёд CO [Петрашкевич и др. (2026).]