

Некоторые итоги и перспективы наблюдений мазерных источников с наземно-космическими интерферометрами

Алексей Алакоз

АКЦ ФИАН

План доклада

- Космические мазеры
- Зачем нужен космический интерферометр?
- Методика наблюдений
- Space-VLBI миссии: TDRSS, VSOP, RadioAstron - методы и результаты
- Что мы теперь знаем?
- Возможные перспективы.

Космические мазеры в линиях молекул

- Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation
- Природные микроволновые лазеры на основе вынужденного излучения.
- Мазерам требуются очень специфические условия (например геометрия излучающей области, температура, плотность газа, концентрация молекул, наличие накачки и стока энергии)
- Наблюдаются в областях звездообразования, в кометах, в остатках сверхновых в Галактике, а также в аккреционных дисках, областях звездообразования, областях взаимодействия джетов и окружающей среды в других галактиках (мегамазеры)
- Могут быть очень яркими, компактными, узконаправленными - идеально подходят для исследования объектов, с которыми связаны, на радиоинтерферометрах с большими проекциями баз.
- Интересны сами по себе.
- Интересны как зонды для изучения свойств среды между наблюдателем и объектом (рассеяние)

Почему космос?

- Многие мазерные пятна не разрешаются даже на максимальных проекциях баз на наземных интерферометрах
- Переход на большую частоту – невозможен (линия только на определенной частоте. Другие линии – другая физика!
 - Нужно выносить антенну (ы?) в космос.
- Потенциально – наблюдения за пределами окон прозрачности.

Методика наблюдений - картографирование

Требуется хорошее заполнение UV плоскости.

- Низкая орбита, с коротким периодом
- Длинный, на несколько орбит, эксперимент (объект должен быть стабильным).

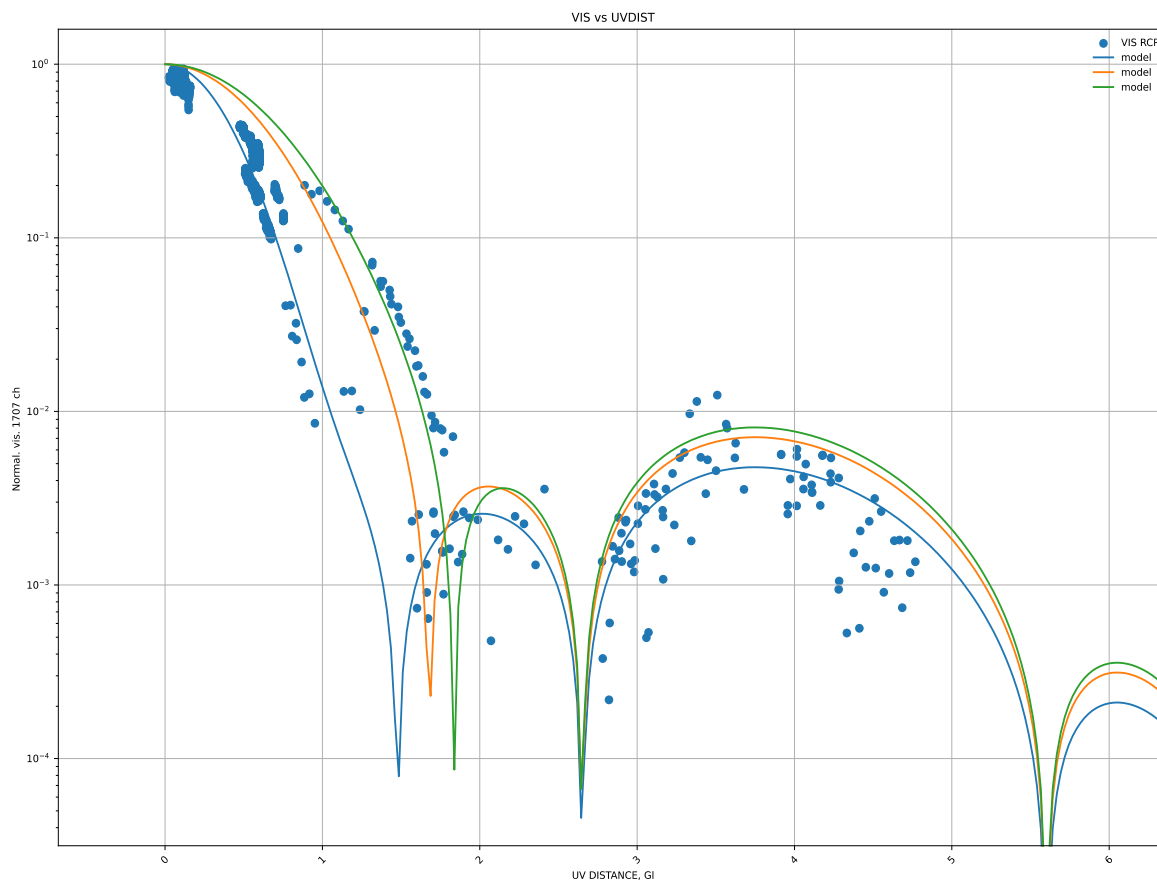
Как итог – карта мазерных деталей, структура и форма мазерных пятен.

Методика наблюдений – UV tracking

Наблюдения проводятся часто или непрерывно в пределах одной орбиты или ее части.

Цель – получить зависимость видности от проекции базы для большого диапазона длин баз.

Позволяет построить простые модели источника.



Методика наблюдений – одиночные наблюдения на разных проекциях баз.

Наблюдается несколько проекций (и ориентаций) баз с КРТ.

Цель – получить ограничения на яркостную температуру / размеры источника.

Позволяет построить совсем простые модели источника.

Служит для выбора источников для дальнейших наблюдений

Космические РСДБ миссии: TDRSS

- TDRSS - первая успешная космическая РСДБ миссия

Наблюдались только активные ядра галактик до 2.15 ED :

1986

2.3 GHz:

24 наблюдалось

23 – дали лепестки

15 GHz:

11 из 23 дали лепестки

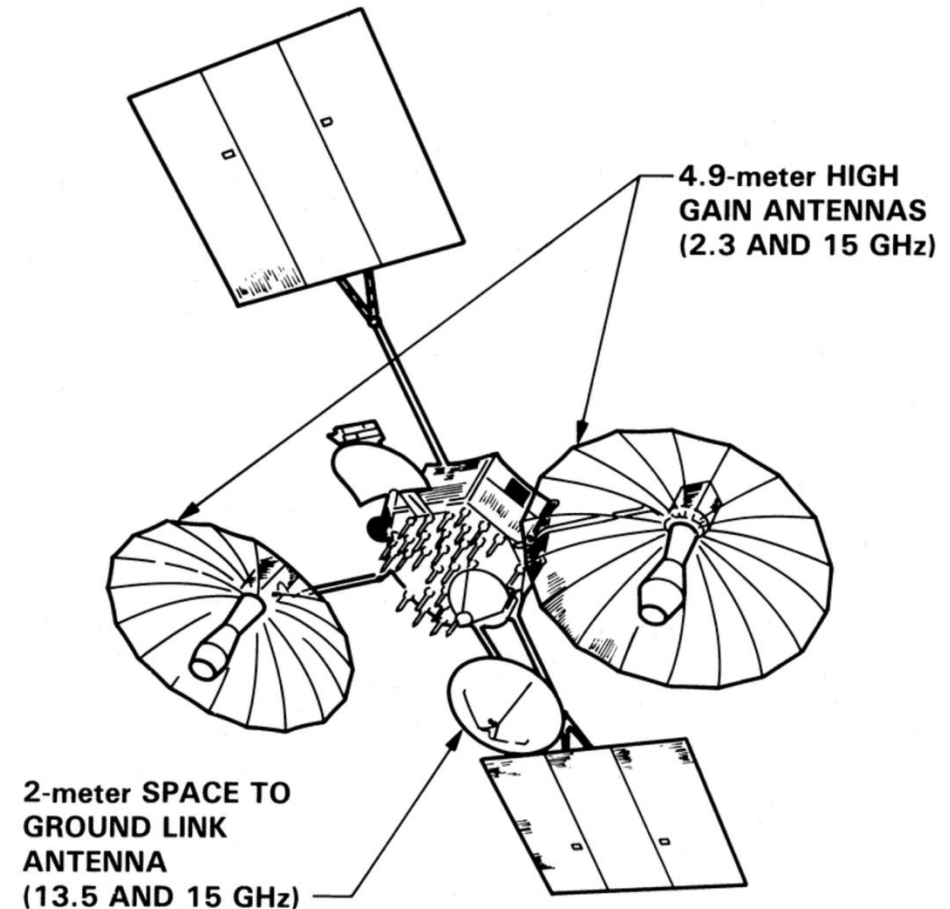


FIG. 1.—Geometry of the TDRSS spacecraft. The antennas used in the OVLBI experiment are labeled.

Космические РСДБ миссии – VSOP, 8 метров

VLBI Space Observatory Programme 1997-2003

Высота апогея 21 400 км, высота перигея 560 км, период обращения вокруг Земли около 6,3 часа.

Хотя он был разработан для наблюдений в трех диапазонах частот: 1,6 ГГц, 5,0 ГГц и 22 ГГц, было обнаружено, что чувствительность диапазона 22 ГГц существенно ухудшилась после вывода на орбиту.

Мазеры: G34.26+0.15 / W48 / Сер А в линиях 1667/1665 ОН (Slysh V.I., et al. , 2002, IAUS, 206, 105. doi:10.48550/arXiv.astro-ph/0105407)

Результат - карты и изображения отдельных мазерных пятен были получены с угловым разрешением 1 миллисек дуги, что в несколько раз превышает угловое разрешение, доступное на Земле. Мазерные пятна были разрешены лишь частично, и был получен нижний предел яркостной температуры 6×10^{12} К. Мазеры, по-видимому, расположены в направлении низкого межзвездного рассеяния.



VSOP – Результаты наблюдений мазеров

G34.26+0.15 Slysh V. et al., 2001, MNRAS, 320, 217. doi:10.1046/j.1365-8711.2001.03959.x

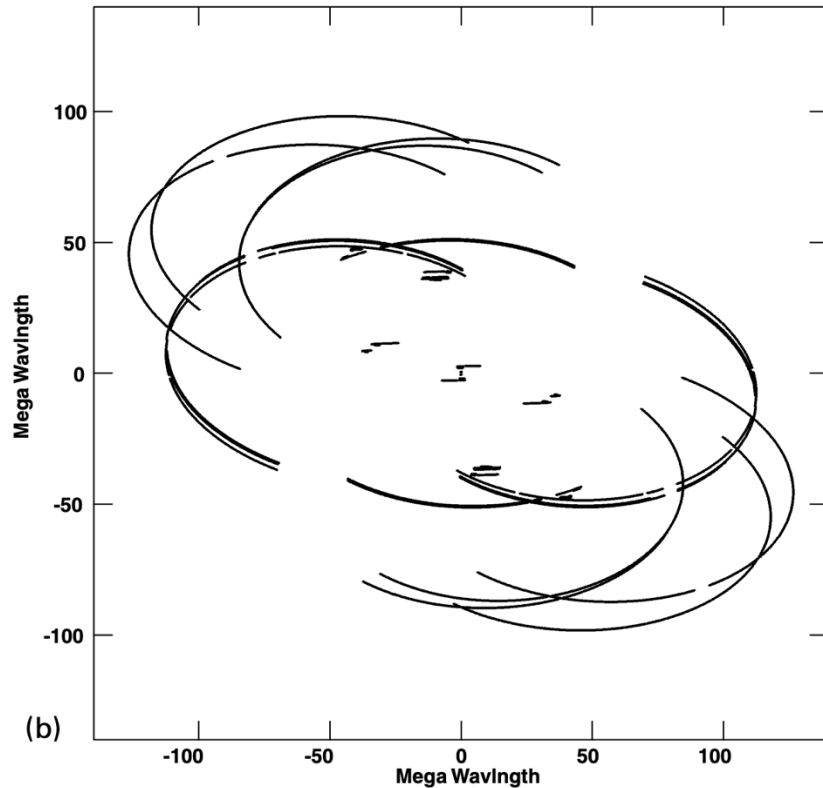


Figure 1. The uv -plane coverage for OH 34.26+0.15: (a) ground-only array (AT, BL, Mop, Sh, Tid, Usu); and (b) ground array plus *HALCA*. Note the different scales for (a) and (b).

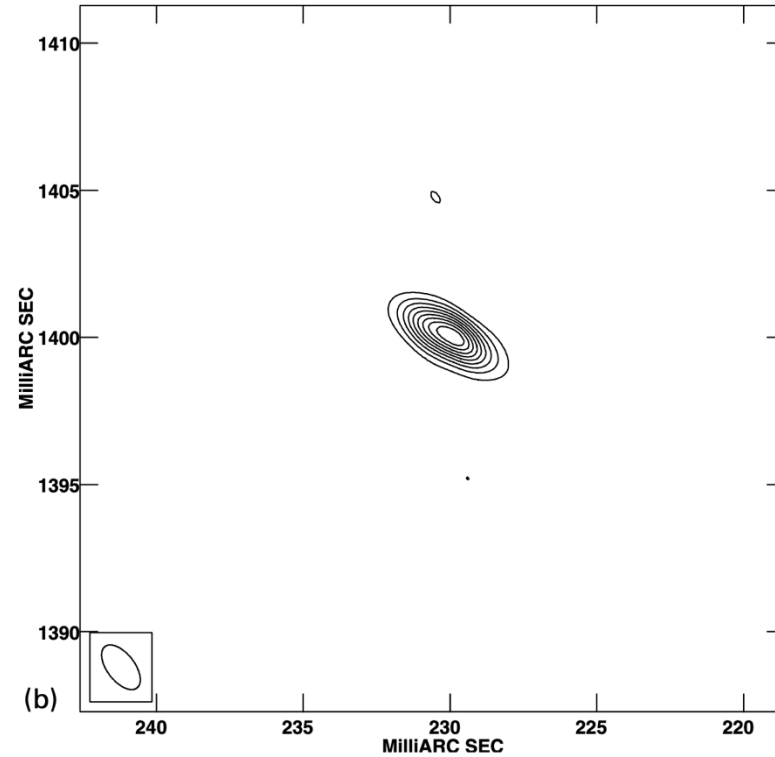
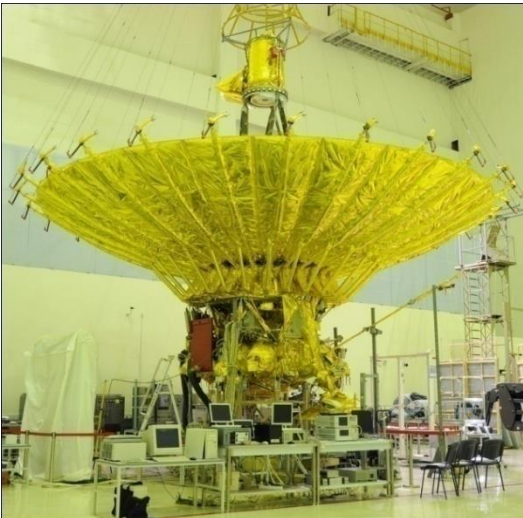
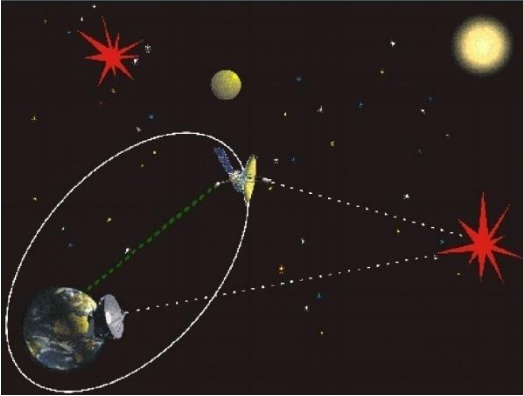


Figure 4. Maps of the 1665-MHz feature A at a radial velocity of 56.0 km s^{-1} : (a) ground-only array map – contours are $0.971 \times (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) \text{ Jy beam}^{-1}$; and (b) ground array plus *HALCA* – contours are $0.577 \times (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) \text{ Jy beam}^{-1}$. The synthesized beam is shown in the lower left corner. The offsets are relative to the correlating position: $\alpha = 18^{\text{h}}53^{\text{m}}18^{\text{s}}.67$, $\delta = 01^{\circ}14'58''.5$ (J2000.0).

Радиоастрон 2011 – 2019



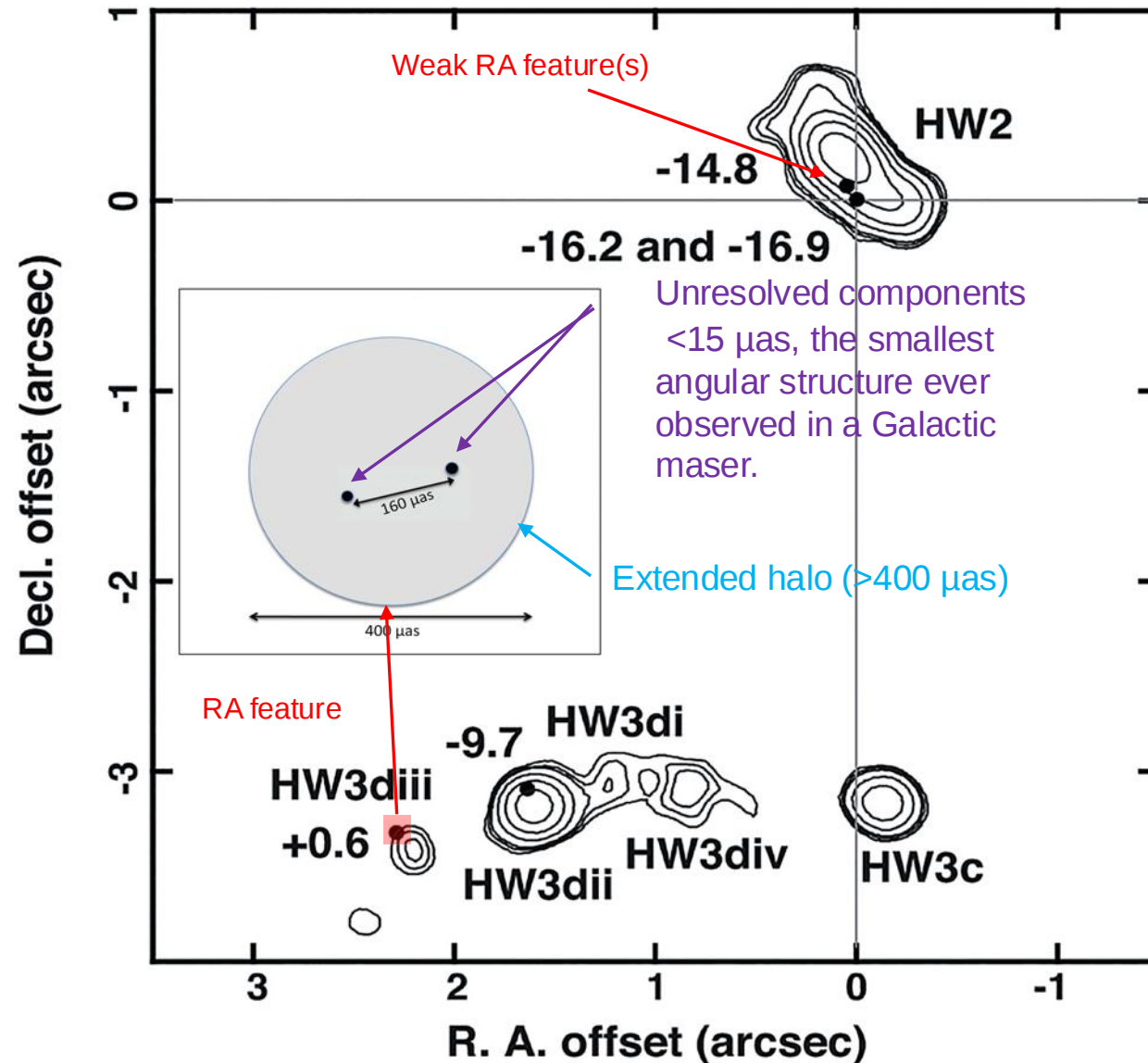
РадиоАстрон: базовая информация



- ✓ Космический радиотелескоп: диаметр 10 метров
- ✓ Запуск в 2011 г.
- ✓ Диапазоны частот: 0.3, 1.6, 5, 22 (18-25) ГГц
- ✓ Наивысшее разрешение (1.3 см): $\sim 7 \mu\text{as}$.
- ✓ Орбита: перигей 1-50,000 км, апогей $\sim 300,000$ км, период ~ 9 дней; эволюционирующая
- ✓ Пять методов определения параметров орбиты, включая доплер, лазерные измерения, РСДБ
- ✓ Требования на точность восстановления орбиты: расстояние до 500 м, скорость до 2 см/с.
- ✓ Ожидаемое время жизни: 5 лет
- ✓ Станции управления: Уссурийск, Медвежье озеро.
- ✓ Станции слежения: Пущино, Россия; Green Bank, США.
- ✓ Ширина потока научных данных с КРТ: 128 Mbps.
- ✓ Два метода временной синхронизации: по бортовому (незамкнутая петля) и наземному (замкнутая петля) водородному стандарту.
- ✓ Программные корреляторы: АКЦ, DiFX-Bonn, JIVE SFXC.

Sun-sized H_2O masers in Cepheus A:

Structures in a turbulent flow or a pair of overlapping clouds?



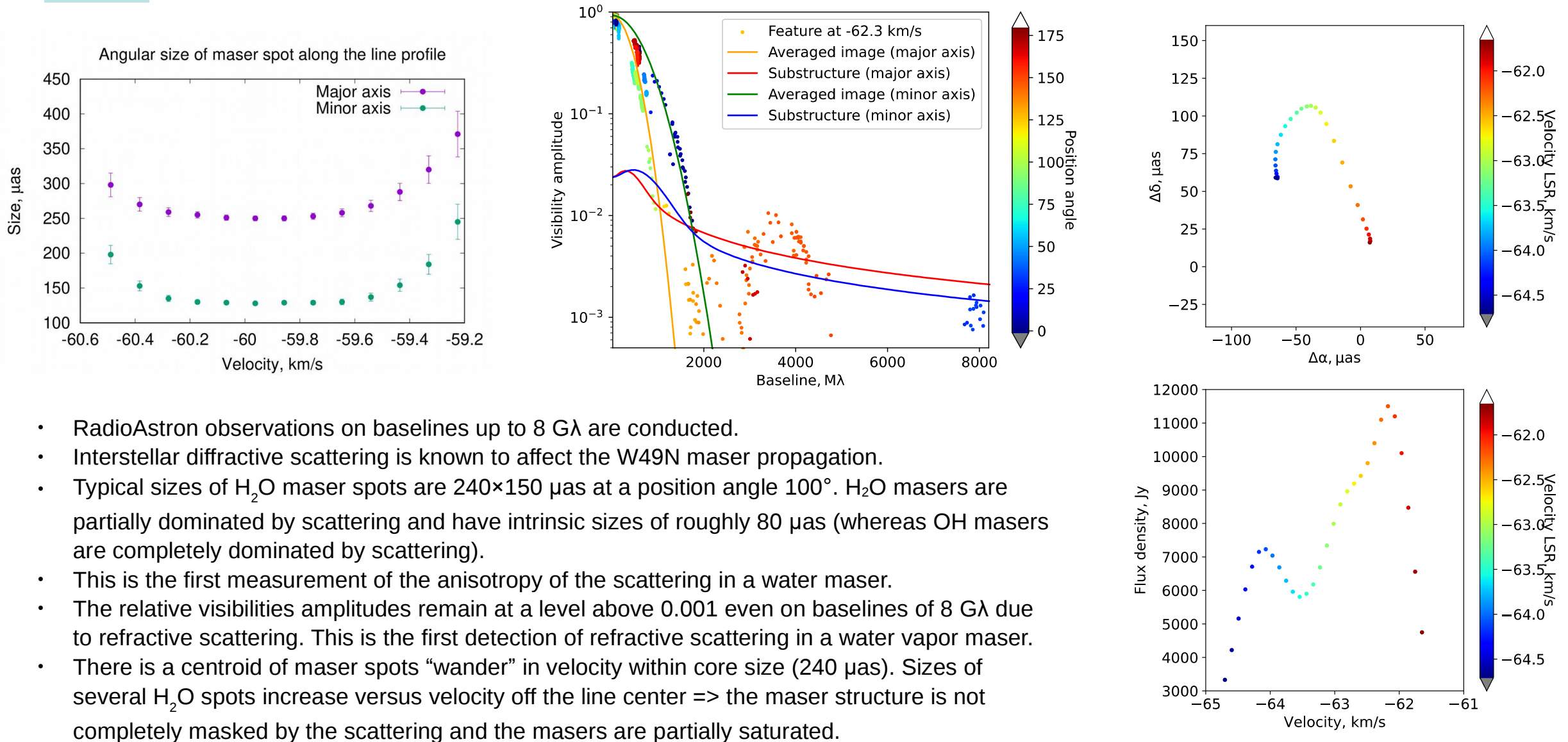
The contours show the extent of the continuum components taken from the 1.3 cm VLA image (adapted from Torrelles et al. 1998).

- *The Astrophysical Journal*, 856:60 (9pp), 2018 March 20 // Sun-sized Water Vapor Masers in Cepheus A, // A. M. Sobolev, et. al. // DOI: 10.3847/1538-4357/aab096

Fine structure and refractive scattering of the H₂O maser in star-forming region W49N

P-29

N.N. Shakhvorostova, J.M. Moran, A.V. Alakoz, H. Imai, C.R. Gwinn, A.M. Sobolev



Излучение мегамазера H₂O в NGC 4258 указывает на периодическую нестабильность диска

Willem A. Baan^{1;2;3}, Tao An³, Christian Henkel^{4;5}, Hiroshi Imai⁶, Владимир Костенко⁷, Andrej Sobolev⁸

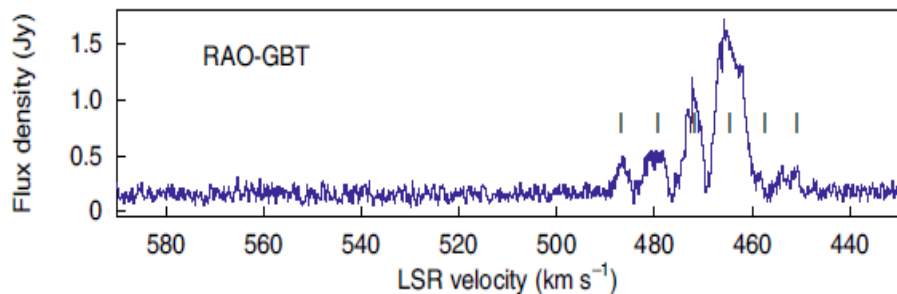


Рисунок 1

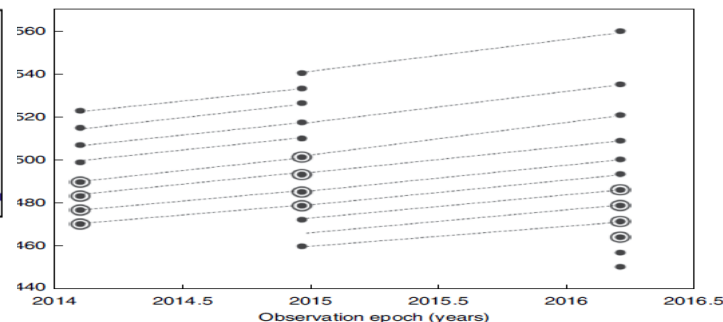


Рисунок 2

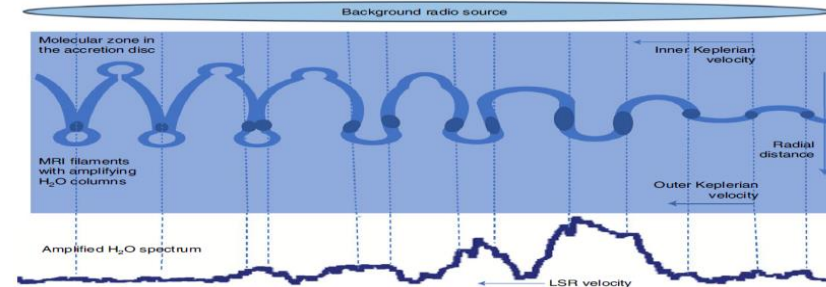


Рисунок 3

Излучение мегамазеров H₂O может возникать в тонких газовых дисках, окружающих массивные ядра галактик. Однако физические условия, ответственные за усиление излучения, неясны. В работе рассмотрены результаты наблюдений галактики NGC4258 с использованием орбитальной обсерватории РадиоАстрон с РСДБ базами Земля-Космос размерами 1.3, 9.5 и 19.5 диаметров Земли, что **соответствует рекордному угловому разрешению 11 и 23 мкс дуги**. Обработка данных на корреляторе АКЦ впервые показала наличие эволюционирующих областей H₂O внутри вращающегося центрального диска с радиусом около 0,126 пк. В феврале, декабре 2014 г., марте 2016 г. **в спектрах обнаружена эволюция скоростей спектральных компонент H₂O в NGC4258**

(рис. 1, 2) с быстро нарастающей и медленно спадающей активностью в газовых сгустках центрального диска NGC4258. Этот тип сдвиговой нестабильности компонент излучения предполагает механизм передачи радиального импульса и вязкости в накапливаемой массе диска. В работе показано, что *обнаруженная активность мегамазера H₂O в NGC4258 связана с неустойчивой магнито-вращательной активностью (MRI- (magneto-rotational instability), определяющей скорость акреции массы в центральном диске родительской галактики*. Рис. 3 иллюстрирует вариации яркости спектральных H₂O компонент, усиленных проявлением активности MRI.

Авторы посвящают статью памяти своего коллеги Николая Кардашева, человека великого видения, который с научной неутомимостью реализовывал миссию РадиоАстрон.

- **Публикации:** [1] Willem A. Baan et al. The H₂O MegaMaser emission in NGC4258 indicative of a periodic disc instability, Nature Astronomy volume 6, pages 976–983 (2022) Article Published: 30 June 2022

Итоги наблюдений (все годы):

Space-ground detections (ESP-AO6) :

WATER MASERS IN OUR GALAXY:

Cepheus A, W3OH, W3IRS5, W49N, Orion, W51, OH043.8-00.13,
G25.65+1.05,NGC2071

OH MASERS IN OUR GALAXY (SFR):

Onsala 1, W75N

EXTRAGALACTIC WATER MASERS: NGC4258, NGC3079

-
-
- ~166 observing sessions in total, at least 45 succesful, including 10 perigee imaging and all-orbit uv tracking sessions.
 - 35 sources observed, 12 detected on space-ground baselines
 - Successful detections: ~ 34 % of observed sources, ~30% of scans

Немного статистики:

SFR H₂O (22GHz):

- > 9 ED W49N & G25.65+0.15
Angular resolution $\sim 23 \mu\text{as}$
- Orion water maser: linear resolution $\sim 4 \times 10^6 \text{ km}$
- Cepheus A $\sim 15 \mu\text{as}$ & $\sim 1.5 \times 10^6 \text{ km}$

Water Megamasers:

NGC4258 – up to 26.7 ED ($8 \mu\text{as}$ or $\sim 60 \text{ a.u.}$)

Several detections > 19 ED ($< 11 \mu\text{as}$)

NGC3079 – up to 13 ED ($17 \mu\text{as}$)

Что узнали нового?

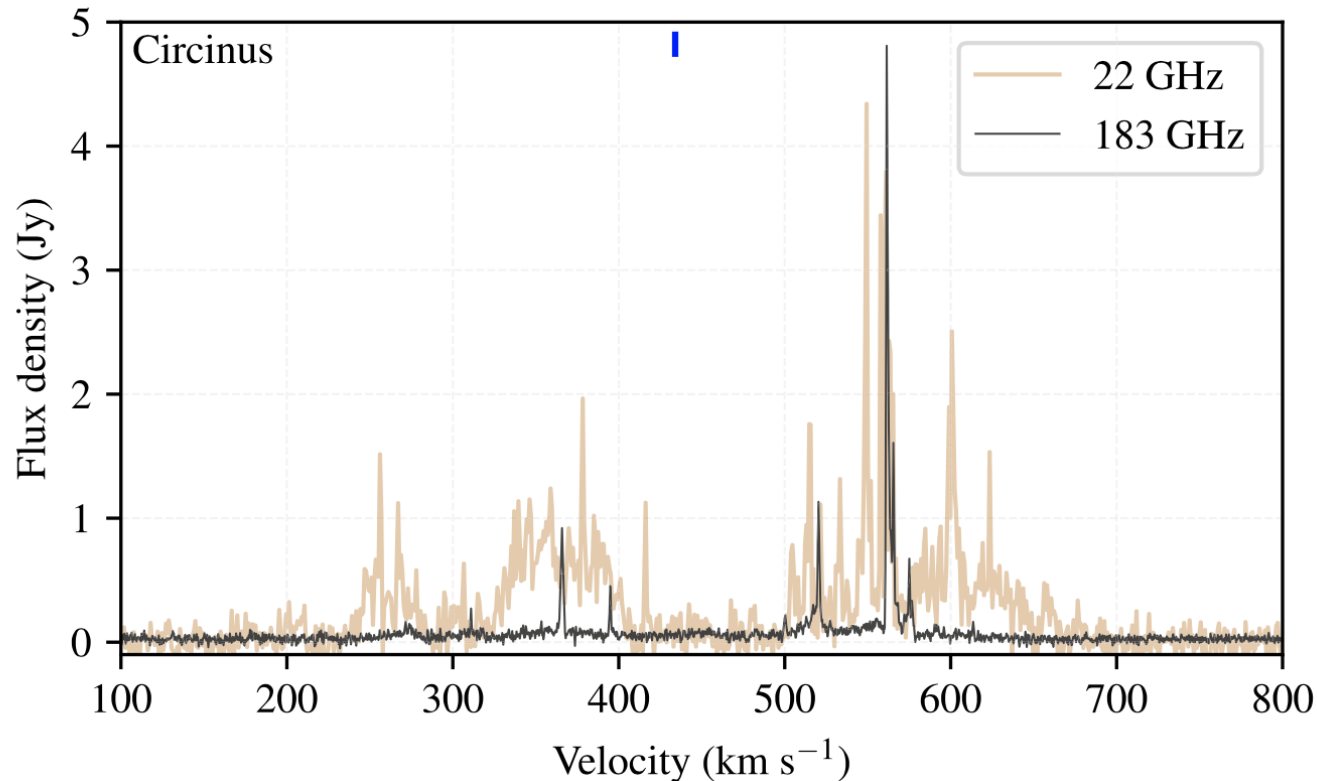
- Космические VLBI-наблюдения H_2O и OH мазеров показывают, что яркие детали часто остаются неразрешенными при проекциях, которые значительно превышают 1 ED. Рекордное разрешение для наблюдений мазеров – мегамазер в NGC4258 ~8 микросекунд дуги при проекции базы 26,7 ED.
- Обнаружено анизотропное рассеяние в мазерах H_2O (W49N)
- Обнаружена рефракционная субструктура рассеяния (W49N)
- Наиболее компактными, как и ожидалось, являются переменные компоненты. Вероятные причины всплеск – наложение компонент. Наименьшие размеры пятен могут соответствовать мелкому масштабу турбуленции (размер ячеек).

Что дальше?

- Изучение тонкой структуры галактических мазеров OH и H₂O и эффектов рассеяния – картографирование на базах от 1 до 10 ED.
- Наблюдения мегамазеров H₂O – необходимо более высокое разрешение для возможного расширения проекта Megamaser Cosmology Project на более далекие галактики.
- Астрометрия? Необходима большая точность орбиты + возможность наблюдать калибратор фазы в поле зрения/ быстрое переключение между объектами
- UV-tracking – по-прежнему актуально для ряда задач, там, где пока изображение получить сложно (большие проекции баз)

Что дальше?

- Переход на наблюдения более высоких частот мазерных переходов H₂O – 183, 321, 325, 380 ГГц.



Dominic W. Pesce *et al* 2023 *ApJ* **948** 134

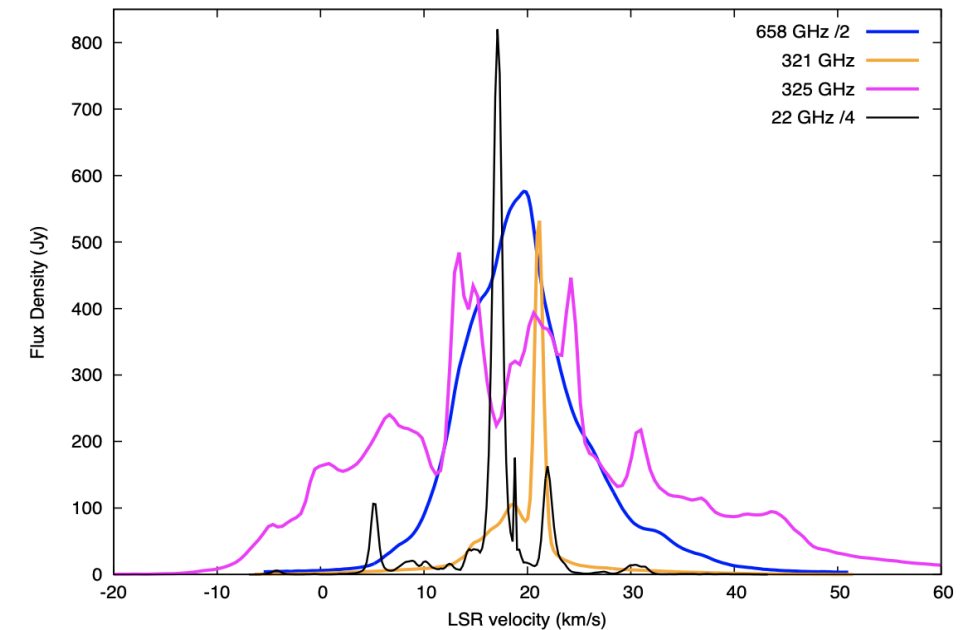


Fig. 2. Integrated water maser spectra, derived from the interferometric image cubes, measured in square boxes of width 0''.75, 1''.0 and 0''.4 at 321, 325, and 658 GHz, centred on VY. The 658 GHz spectrum is scaled by 0.5 and the 22 GHz spectrum by 0.25.

Richards A.M.S. *et al.*, 2014, *A&A*, 572, L9.

doi:10.1051/0004-6361/201425024

Что дальше?

Tarchi, A., et al.: A&A, 688, L18 (2024)

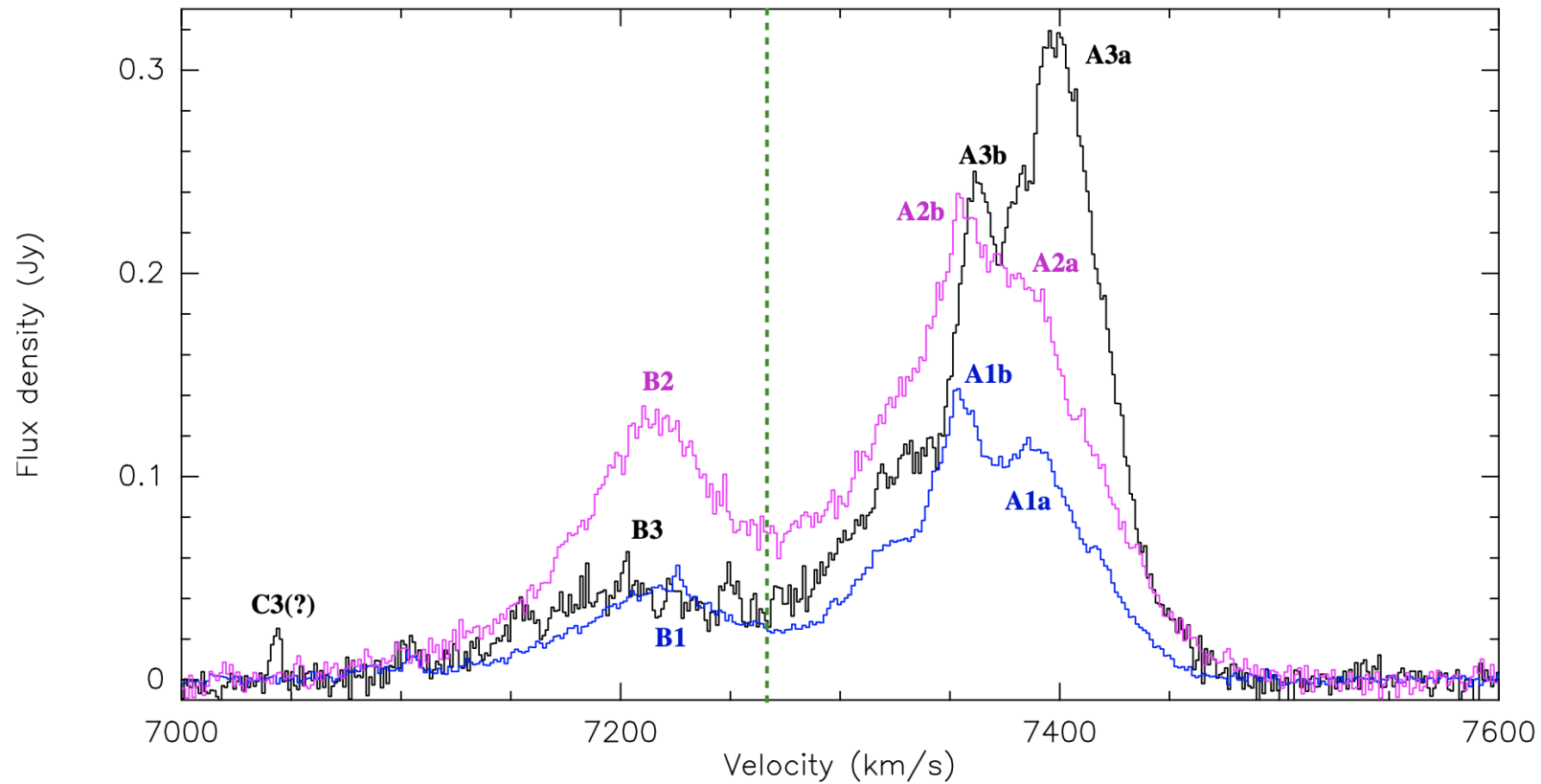


Fig. 3. Comparison of the spectra of the maser emission at 22 (black), 183 (blue), and 380 (magenta) GHz in TXS 2226, after smoothing the spectra to the coarsest spectral resolution of the 183 GHz data ($\Delta v \sim 1.6 \text{ km s}^{-1}$). The dashed green line indicates the systemic velocity of the galaxy in the radio convention (7270 km s^{-1}).

Спасибо за внимание!!!

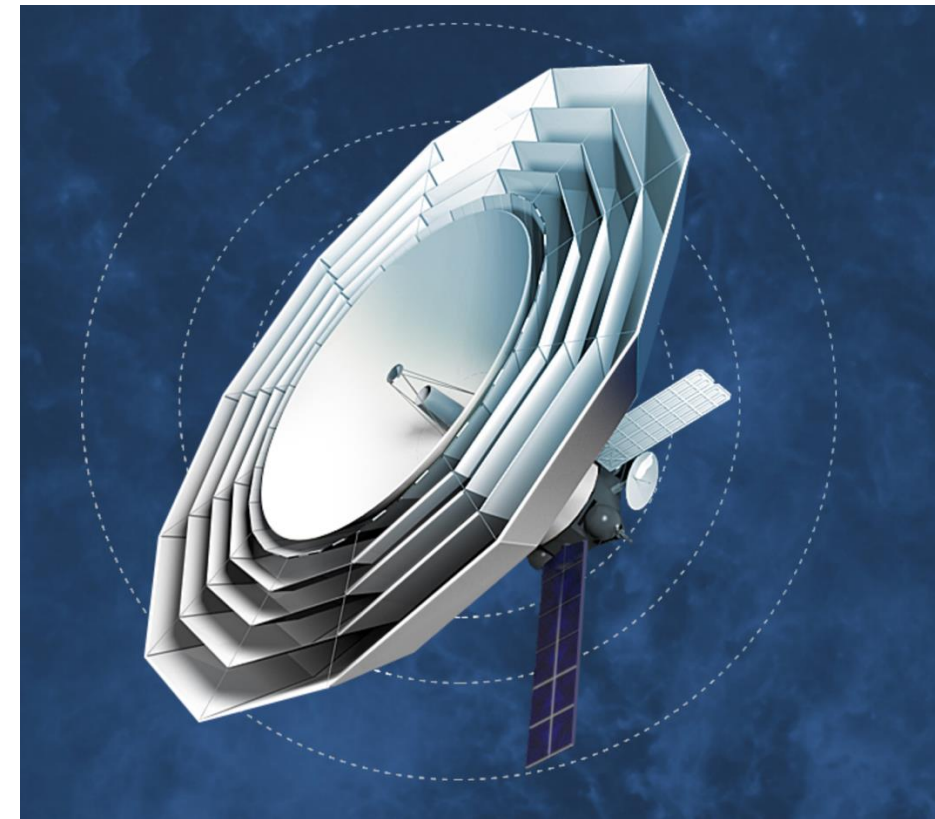
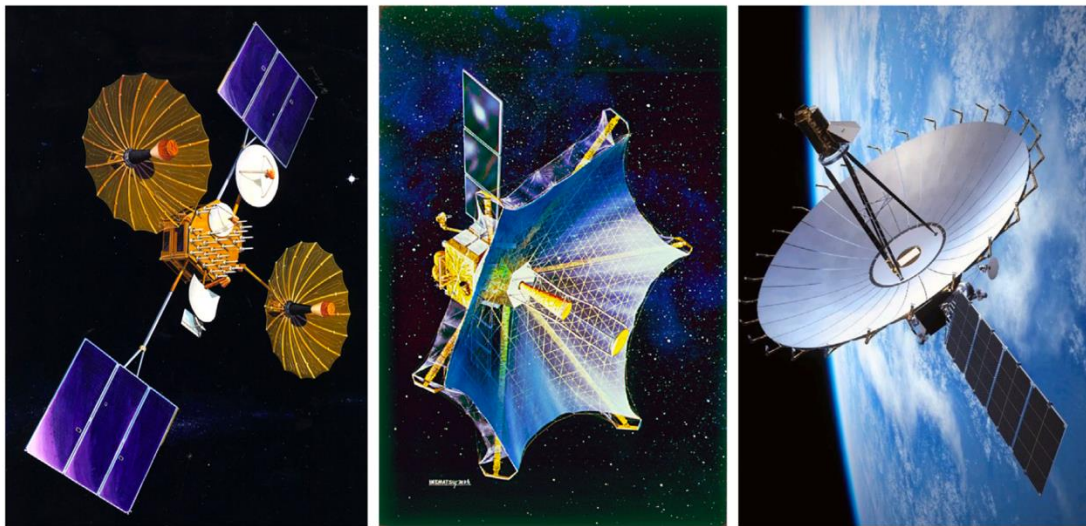


Fig. 1. Artist's impressions of: (*left panel*) Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS) spacecraft, picture credit: NASA; (*central panel*) Highly Advanced Laboratory for Communication and Astronomy (HALCA) of the VLBI Space Observatory Program (VSOP), picture credit: JAXA; (*right panel*) Spektr-R spacecraft of the RadioAstron mission, picture credit: Lavochkin Scientific and Production Association.

Please cite this article as: L. I. Gurvits, Space VLBI: from first ideas to operational missions, *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.042>