

Перспективы наблюдений мазеров H_2O в терагерцовом диапазоне на “Миллиметроне”

Надежда Шахворостова

АКЦ ФИАН

Конференция “Субмиллиметровая и миллиметровая астрономия: цели и инструменты” 14-16 апреля 2025 г., г. Москва

Мазерный эффект в космосе

- **M**icrovawe
- **A**mplification by
- **S**timulated
- **E**mission of
- **R**adiation
- **Космический мазер** – усиление проходящего через космическую среду радиоизлучения за счет индуцированного испускания фотонов возбужденными атомами и молекулами среды.

- Космические объекты, в которых наблюдаются **мазеры**:

молекулярные облака, области звездообразования, молекулярные потоки, оболочки звезд поздних классов, остатки сверхновых, кометы, газовые диски в других галактиках (мегамазеры).

Мазерное излучение в космосе встречается у молекул:

- гидроксила **OH** (18 см), 1965 (“*Мистерий*”)
- водяного пара **H₂O** (1.35 см), 1969
- метанола **CH₃OH** (см, мм, субмм), 1970
- окиси кремния **SiO** (7 мм, 3.5 мм), 1974
- формальдегида **H₂CO** (6 см)
- CH, HCN, HC₃N, SiS, NH₃ и др.

Мазерный эффект в космосе

При условии, что обеспечена **перенаселенность** возбужденных уровней молекул, при прохождении через среду излучения определенной длины волны будет возникать эффект **усиления излучения**.

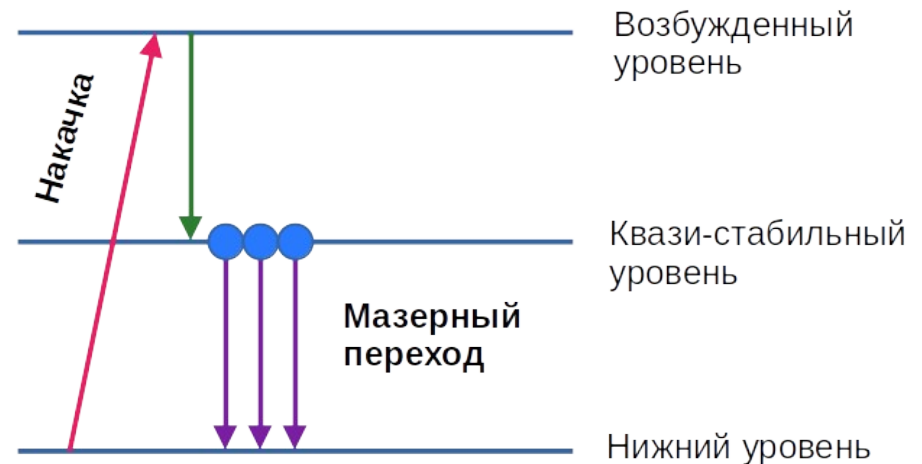
$$T_{\text{ex}} = \frac{\Delta E}{k \ln (n_1/n_2)}$$

$$T_{\text{ex}} < 0$$

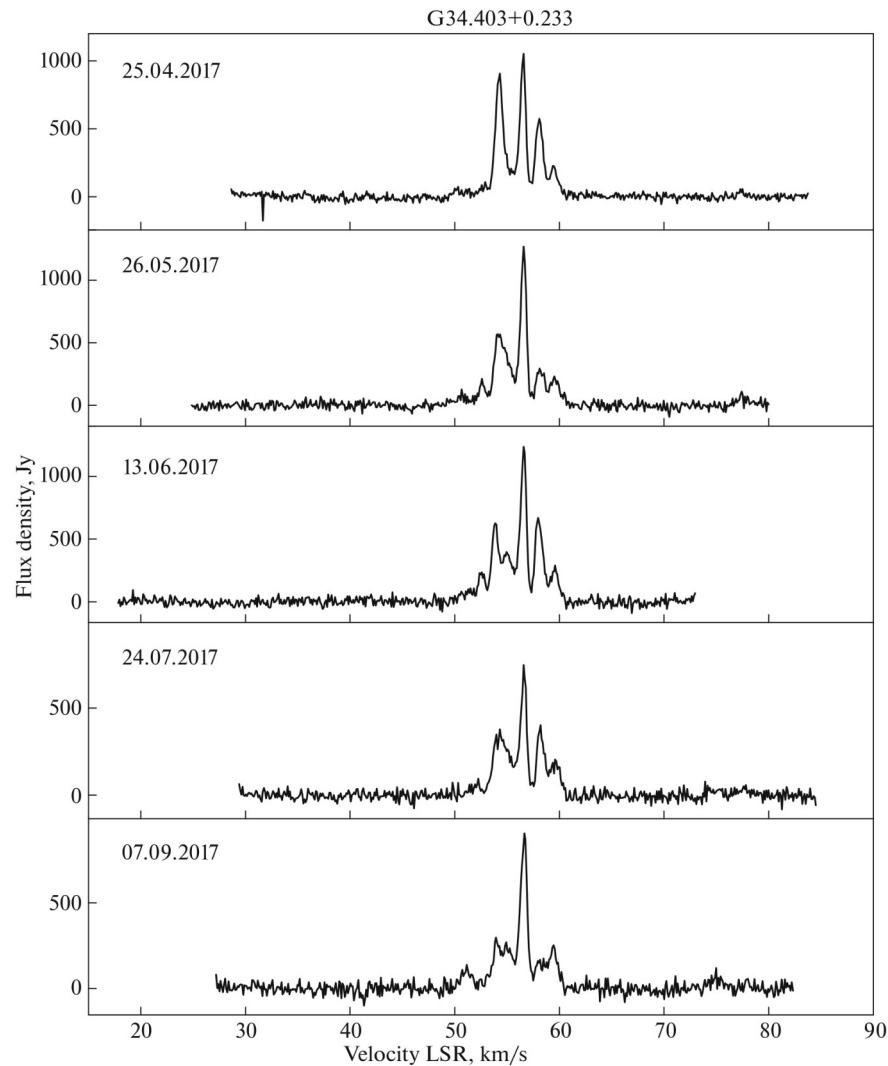
Требуется **накачка** уровней, т.е. источник энергии, который обеспечит перенаселенность квази-стабильного уровня.

Источники накачки (энергии):

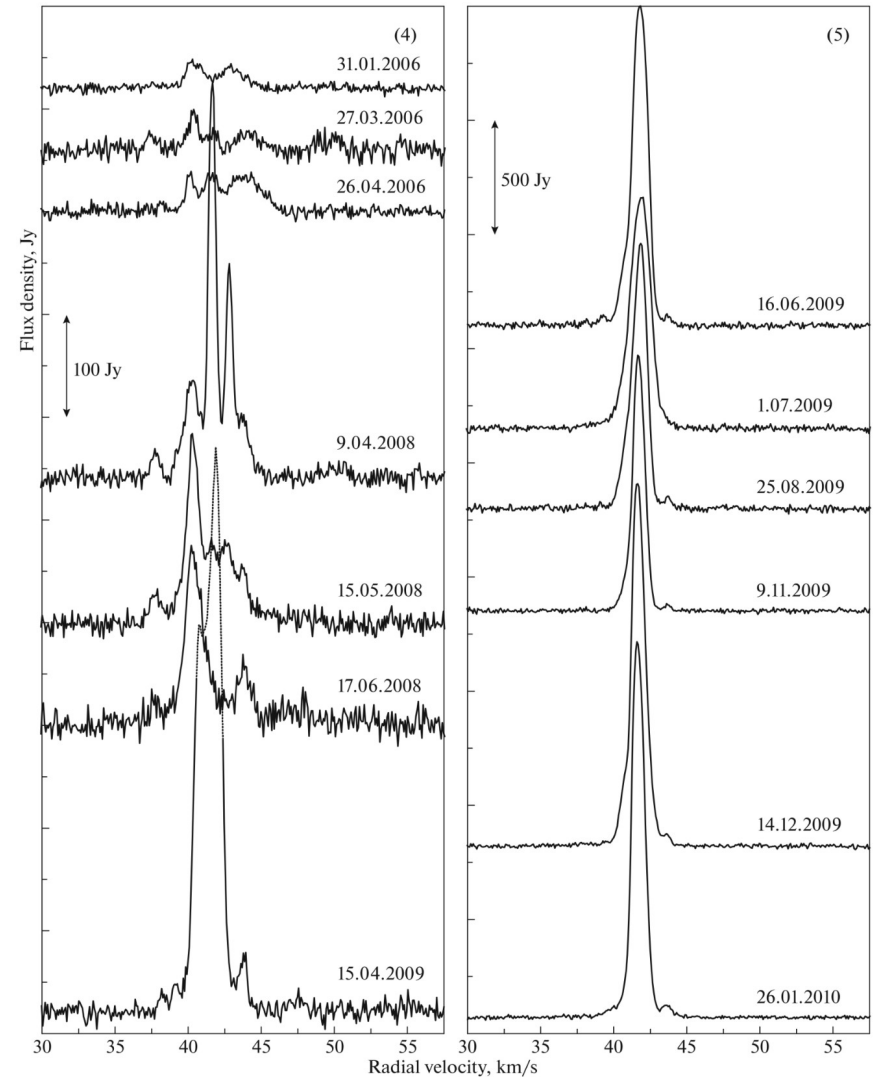
- Излучение звезд (радиативная накачка)
- Столкновения с другими молекулами (столкновительная накачка)



Свойства мазерных линий: яркость, узость, переменность

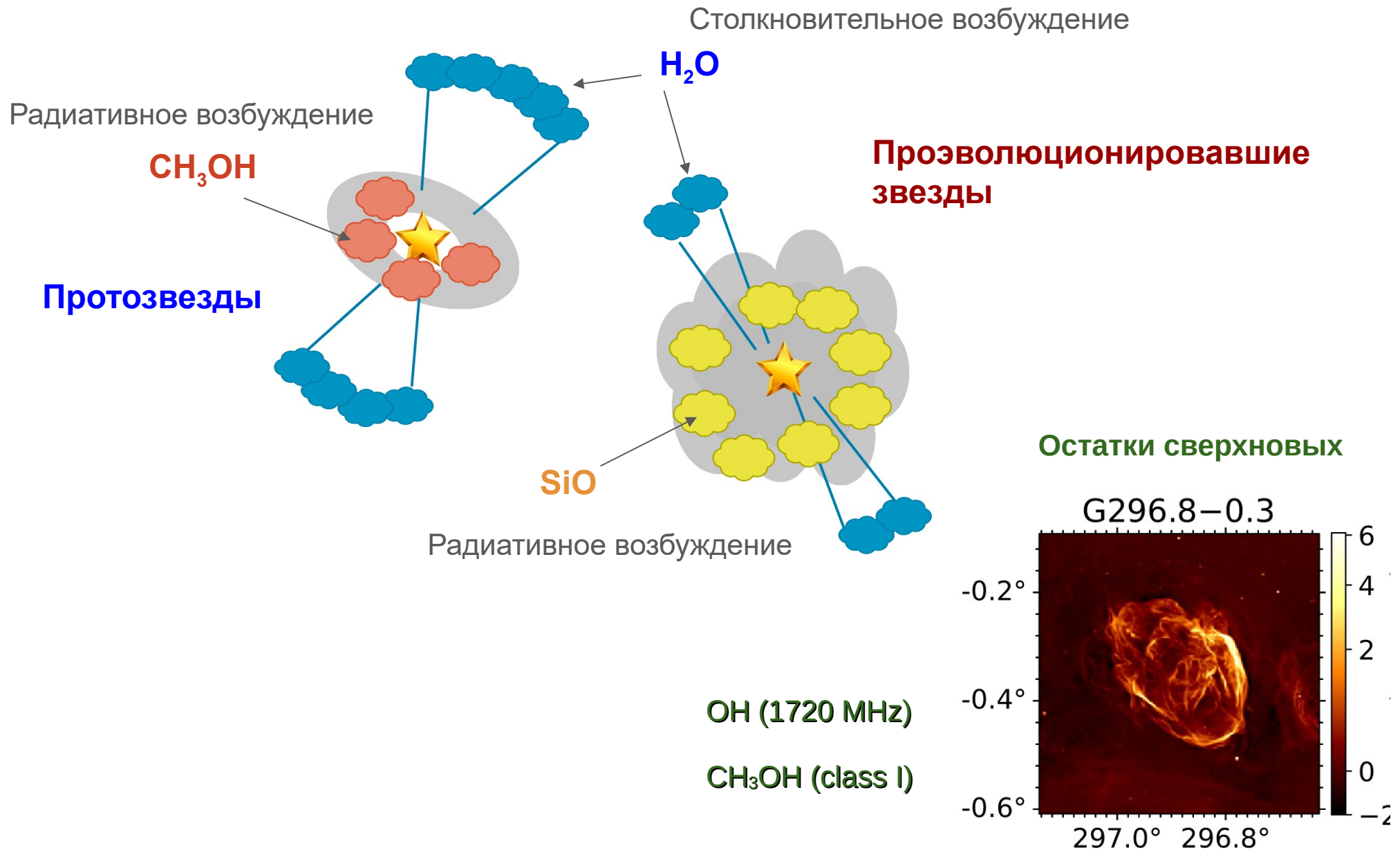


Shakhvorostova et al., Astronomy Reports, vol. 62, no 9, p. 584, 2018.



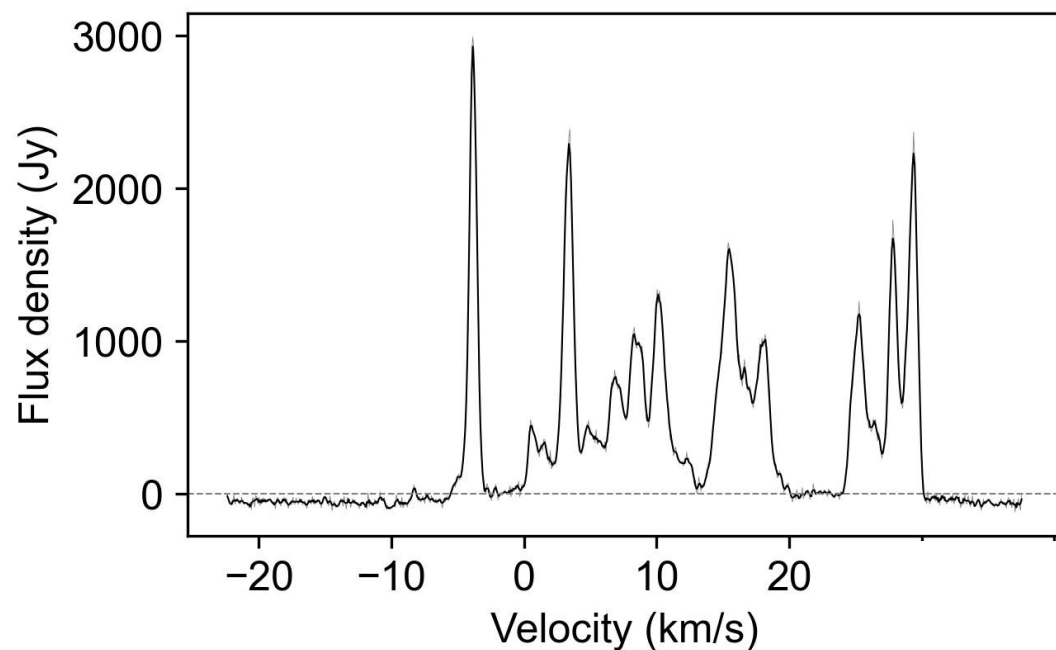
Lekht et al., Astronomy Reports, vol. 62, no. 3, p. 213, 2018.

Где обнаруживаются мазеры в Галактике?



Ярчайшие представители мазеров H_2O на 22 ГГц

OrionKL



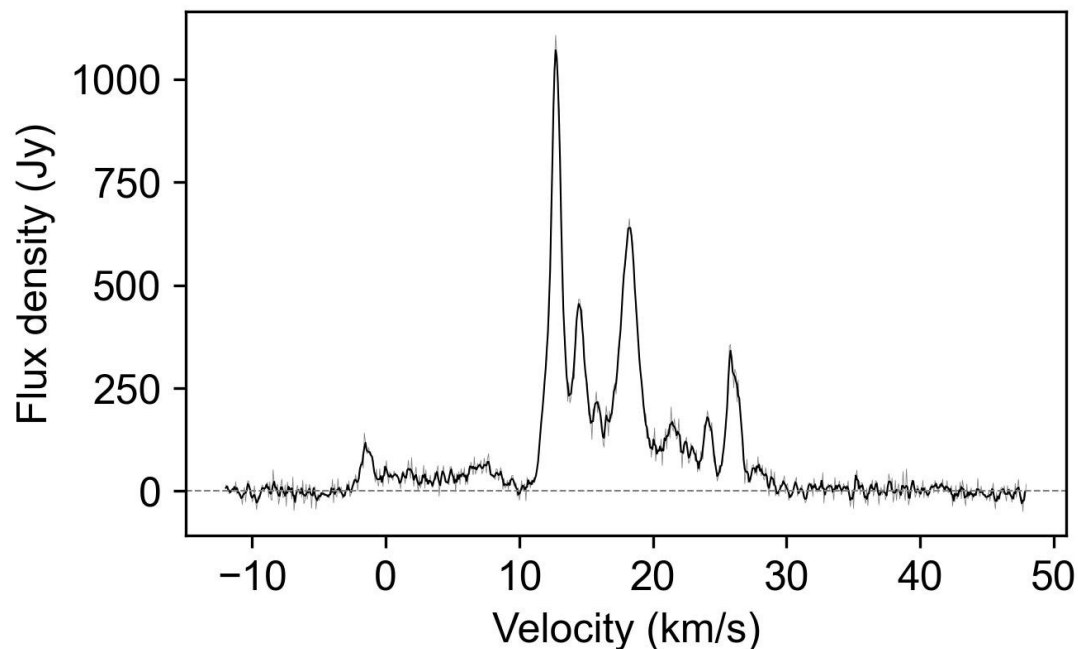
Область звездообразования
в созвездии Орион

26.03.2025, РТ-22 ПРАО

Звезда – красный сверхгигант
VY Canis Majoris в созвездии
Большого Пса

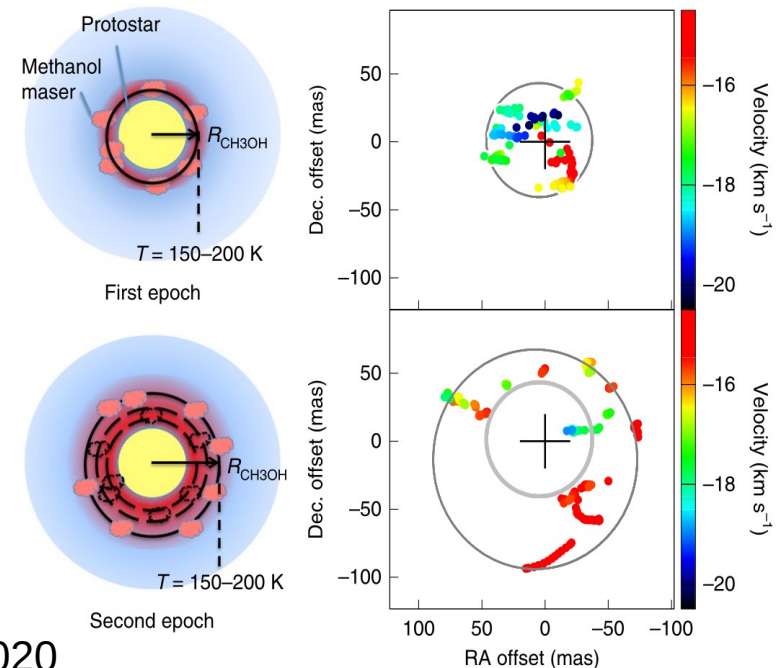
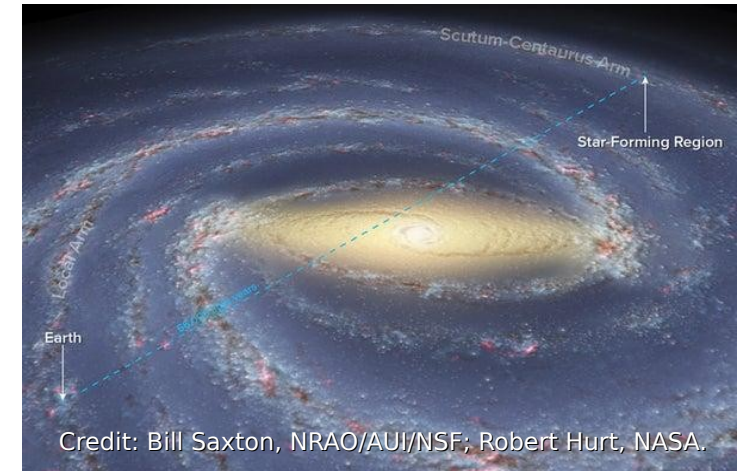
25.03.2025, РТ-22 ПРАО

VYCMa



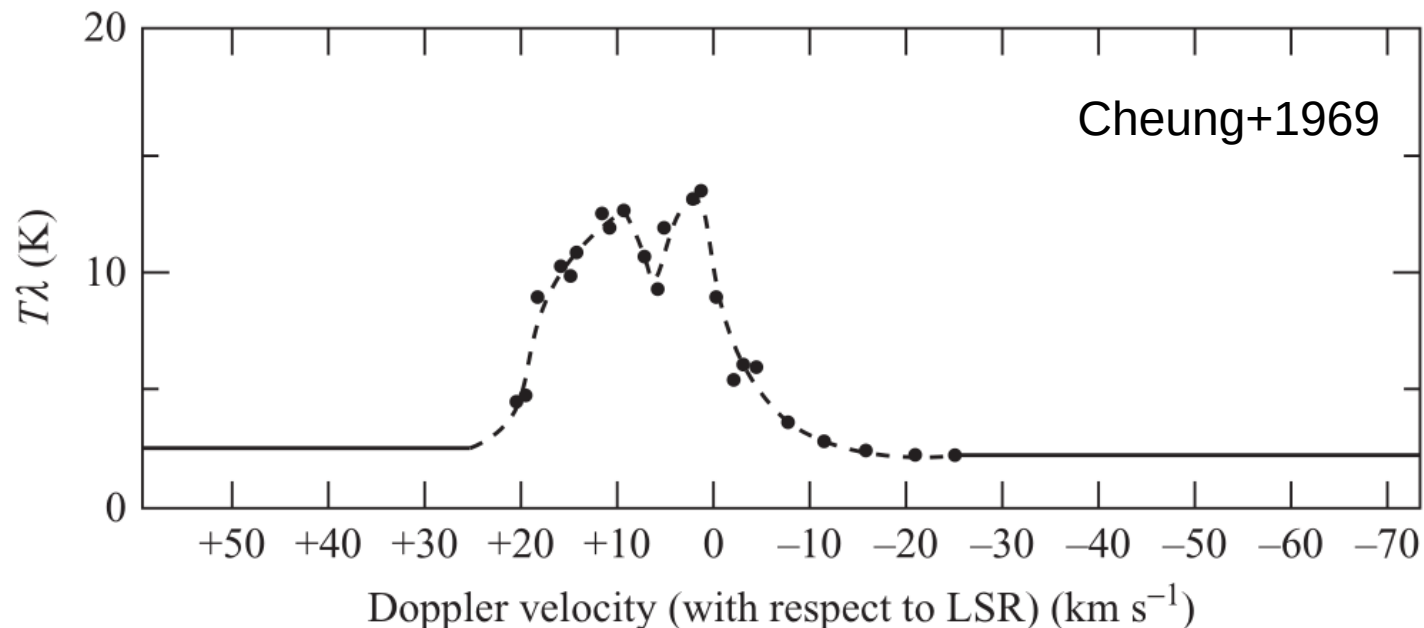
Мазеры – зонды межзвёздной среды

- Мазеры – зонды областей звездообразования (H_2O , CH_3OH sIMM, cIMM)
- Малый размер и большая яркость – видны с больших расстояний
- Видны в радио – позволяют заглянуть туда, куда нельзя заглянуть в оптике, ИК
- Доплеровские скорости – можно измерять 3D кинематику, отслеживать движение газа
- Вспышки мазеров – транзистентные явления в областях звездообразования
- Собственные движения – астрометрия (BeSSeL Survey)
- Мазеры OH и H_2O – рассеяние в межзвездной среде
- Оценка физических параметров среды, магнитных полей (OH)



Мазеры H_2O на частоте 22 ГГц

- Из всего разнообразия мазеров H_2O исторически были открыты первыми мазеры на 22 ГГц в работе Cheung *et al.* (1969) в Орионе, Sgr B2 и W49N.
- С тех пор множество обзоров в линии 22 ГГц было проведено в направлении областей звездообразования и звёзд на поздних стадиях эволюции.



Мазеры H_2O на частоте 22 ГГц

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 163:124 (14pp), 2022 March

Ladeyschikov et al.

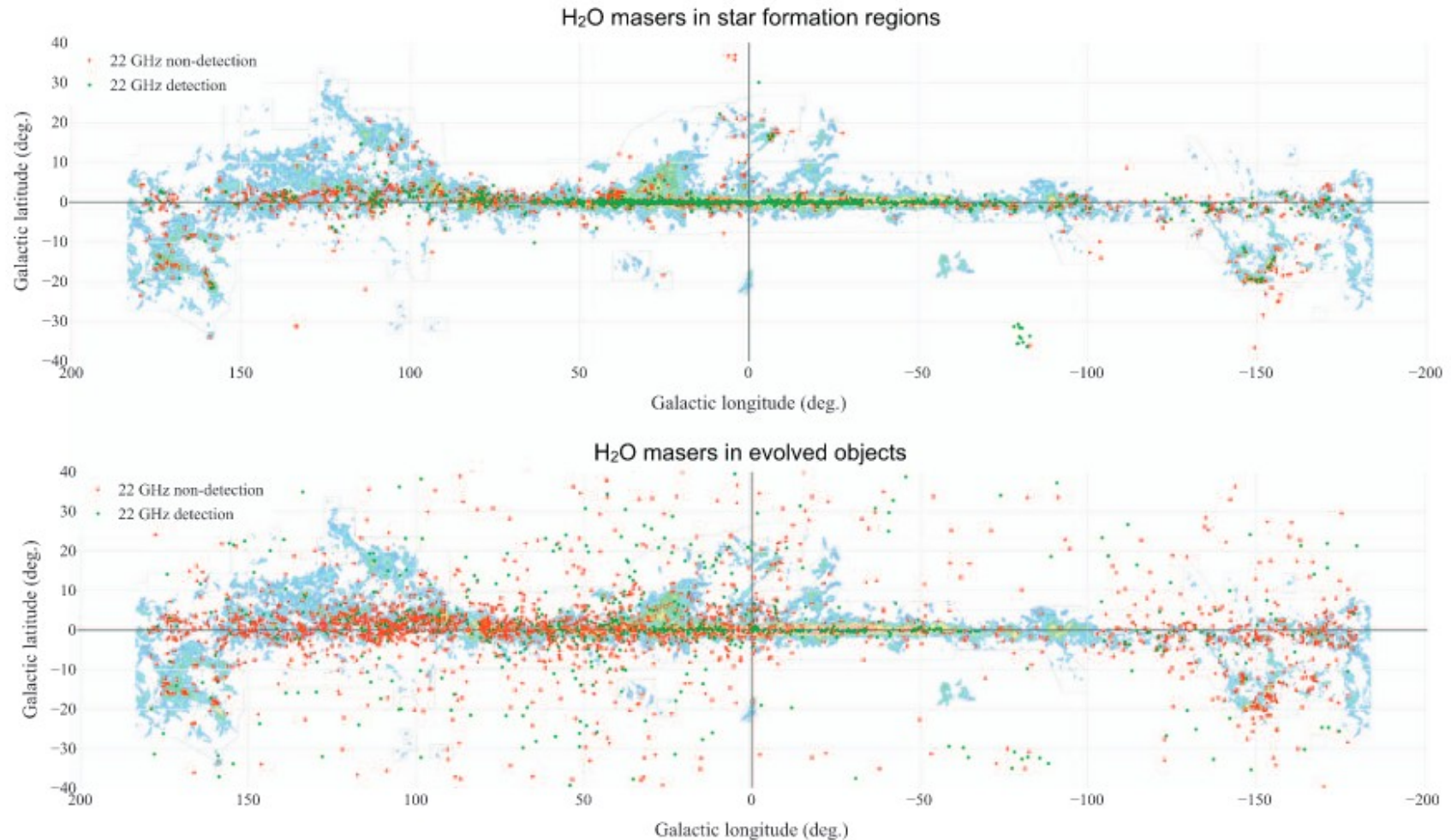


Figure 3. Distribution of H_2O masers in the Galaxy. Background CO images are taken from Dame et al. (2001). Green and red dots in the top and bottom panels are detections and nondetections, respectively.

Мазеры H_2O на других частотах

- Мазеры H_2O на частоте 22 ГГц – около 2700 детектирований согласно базе данных *maserdb.net*.
- Мазеры H_2O на остальных частотах – в сумме около 140 детектирований (в 20 раз меньше!)
- На данный момент наблюдались мазеры H_2O в 24 различных переходах.
- Очевидно, что мазерных линий много больше, но они не наблюдались в силу ограничений (атмосфера, наличие приемников) => вклад Миллиметрона может быть существенным!

Известные мазерные переходы H₂O

- Онлайн-база данных по мазерам Maserdb.net, описание можно найти в статье Ladeyschikov et al. AJ, Vol. 158, P. 233 (2019)
- Охват – более 97% данных из опубликованных статей.

Transitions of masers included in the database

Transition	Short freq.	Rest frequency (MHz)	Detected in	Det. obj.	Non-Det. obj.
6_{1,6} → 5_{2,3} View	22 GHz	22235.0798	EO, SFR	2675	6517
3_{1,3} → 2_{2,0} View	183 GHz	183310.087	SFR	24	7
10_{2,9} → 9_{3,6} View	321 GHz	321225.677	EO, SFR	34	1
5_{1,5} → 4_{2,2} View	325 GHz	325152.899	EO, SFR	25	1
17_{4,13} → 16_{7,10} View	355 GHz	354808.58		1	0
7_{5,3} → 6_{6,0} View	437 GHz	437346.664	EO	7	0
6_{4,3} → 5_{5,0} View	439 GHz	439150.7948	EO, SFR	11	0
4_{2,3} → 3_{3,0} View	443 GHz	443018.3546		2	0
6_{4,2} → 5_{5,1} View	470 GHz	470888.903	EO, SFR	5	0
5_{3,3} → 4_{4,0} View	474 GHz	474689.108	EO	5	0
5_{3,2} → 4_{4,1} View	620 GHz	620700.9549	EO, SFR	3	0
7_{4,3} → 6_{5,2} View	1.27 THz	1278265.922	EO	4	0
8_{2,7} → 7_{3,4} View	1.29 THz	1296411.055	EO, SFR	7	0
8_{4,5} → 7_{5,2} View	1.88 THz	1884887.891	EO	4	0

Мазерные переходы H₂O, потенциально наблюдаемые на ALMA

- Статья M.D. Gray *et al.*
MNRAS 456, 374–404 (2016)
- Предсказанные мазерные переходы в диапазонах наблюдений интерферометра ALMA (bands 2-10, кроме 4-го)
- Желтым цветом выделены переходы, которые уже были зарегистрированы в наблюдениях
- Первые обнаружения были сделаны на 10-м антенне Caltech Submillimeter Observatory (CSO)!

ν (GHz)	Transition ($J'_{K'_a, K'_c} - J_{K_a, K_c}$)	Spin (o/p)	A-value (Hz)	Band	Known
67.804	(4 _{1,4} –3 _{2,1})*	o	1.950(–7)	2	N
96.261	(4 _{4,0} –5 _{3,3})*	p	4.76(–7)	3	Y(M89)
183.31	3 _{1,3} –2 _{2,0}	p	3.65(–6)	5	Y(C90)
232.69	(5 _{5,0} –6 _{4,3})*	o	4.76(–6)	6	Y(M89)
268.15	(6 _{5,2} –7 _{4,3})**	o	1.53(–5)	6	Y(T10)
293.66	(6 _{6,1} –7 _{5,2})*	o	7.22(–6)	7	Y(M06)
297.44	(6 _{6,0} –7 _{5,3})*	p	7.51(–6)	7	Y ^a (K13)
321.23	10 _{2,9} –9 _{3,6}	o	6.16(–6)	7	Y(M90a)
325.15	5 _{1,5} –4 _{2,2}	p	1.17(–5)	7	Y(M90b)
331.12	(3 _{2,1} –4 _{1,4})**	o	3.38(–5)	7	Y ^a (K13)
336.23	(5 _{2,3} –6 _{1,6})*	o	1.08(–5)	7	Y(F93)
354.81	17 _{4,13} –16 _{7,10}	o	9.21(–6)	7	Y(F93)
390.13	10 _{3,7} –11 _{2,10}	p	8.51(–6)	8	N
437.34	7 _{5,3} –6 _{6,0}	p	2.15(–5)	8	Y(M93)
439.15	6 _{4,3} –5 _{5,0}	o	2.82(–5)	8	Y(M93)
443.02	7 _{5,2} –6 _{6,1}	o	2.23(–5)	8	Y(M08)
470.89	6 _{4,2} –5 _{5,1}	p	3.48(–5)	8	Y(M93)
474.69	5 _{3,3} –4 _{4,0}	p	4.82(–5)	8	Y(M08)
488.49	6 _{2,4} –7 _{1,7}	p	1.38(–5)	8	N
620.70	5 _{3,2} –4 _{4,1}	o	1.11(–4)	9	Y(H10)
645.77	9 _{7,3} –8 _{8,0}	p	4.62(–5)	9	N
645.91	9 _{7,2} –8 _{8,1}	o	4.62(–5)	9	N
658.01	(1 _{1,0} –1 _{0,1})*	o	5.57(–3)	9	Y(M95)
863.84	10 _{8,3} –9 _{9,0}	o	9.46(–5)	10	N
863.86	10 _{8,2} –9 _{9,1}	p	9.46(–5)	10	N
906.21	9 _{2,8} –8 _{3,5}	p	2.22(–4)	10	N

Мазерные переходы H₂O, потенциально наблюдаемые на SOFIA

ν (GHz)	Transition ($J'_{K'_a, K'_c} - J_{K_a, K_c}$)	Spin (o/p)	A-value (Hz)	Band
1269.3	13 _{3, 11} –12 _{4, 8}	p	5.57(–4)	L1 _{lo}
1278.5	7 _{4, 3} –5 _{5, 2}	o	1.55(–3)	L1 _{lo}
1295.6	8 _{2, 7} –7 _{3, 4}	o	1.07(–3)	L1 _{lo}
1308.5	8 _{4, 5} –9 _{1, 8}	o	2.60(–4)	L1 _{lo}
1321.8	6 _{2, 5} –5 _{3, 2}	o	2.33(–3)	L1 _{lo}
1345.0	7 _{4, 4} –8 _{1, 7}	p	2.55(–4)	L1 _{lo}
1435.8	9 _{4, 6} –10 _{1, 9}	p	3.33(–4)	L1 _{hi}
1440.3	7 _{2, 6} –6 _{3, 3}	p	2.30(–3)	L1 _{hi}
1885.0	8 _{4, 5} –7 _{5, 2}	o	7.40(–3)	L2
1901.9	12 _{3, 10} –11 _{4, 7}	o	2.75(–3)	L2

- Статья M.D. Gray *et al.* MNRAS 456, 374–404 (2016)
- Желтым цветом выделены переходы, которые уже были зарегистрированы в наблюдениях.
- Единичные наблюдения (и обнаружения!!). так как были выбраны единичные объекты: VY Canis Majoris, o Ceti (Mira), R Crateris, W Hua, U Her, NGC 7538-IRS1

Figure 1. from SOFIA/GREAT Discovery of Terahertz Water Masers

null 2017 APJ 843 94 doi:10.3847/1538-4357/aa7568

<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa7568>

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

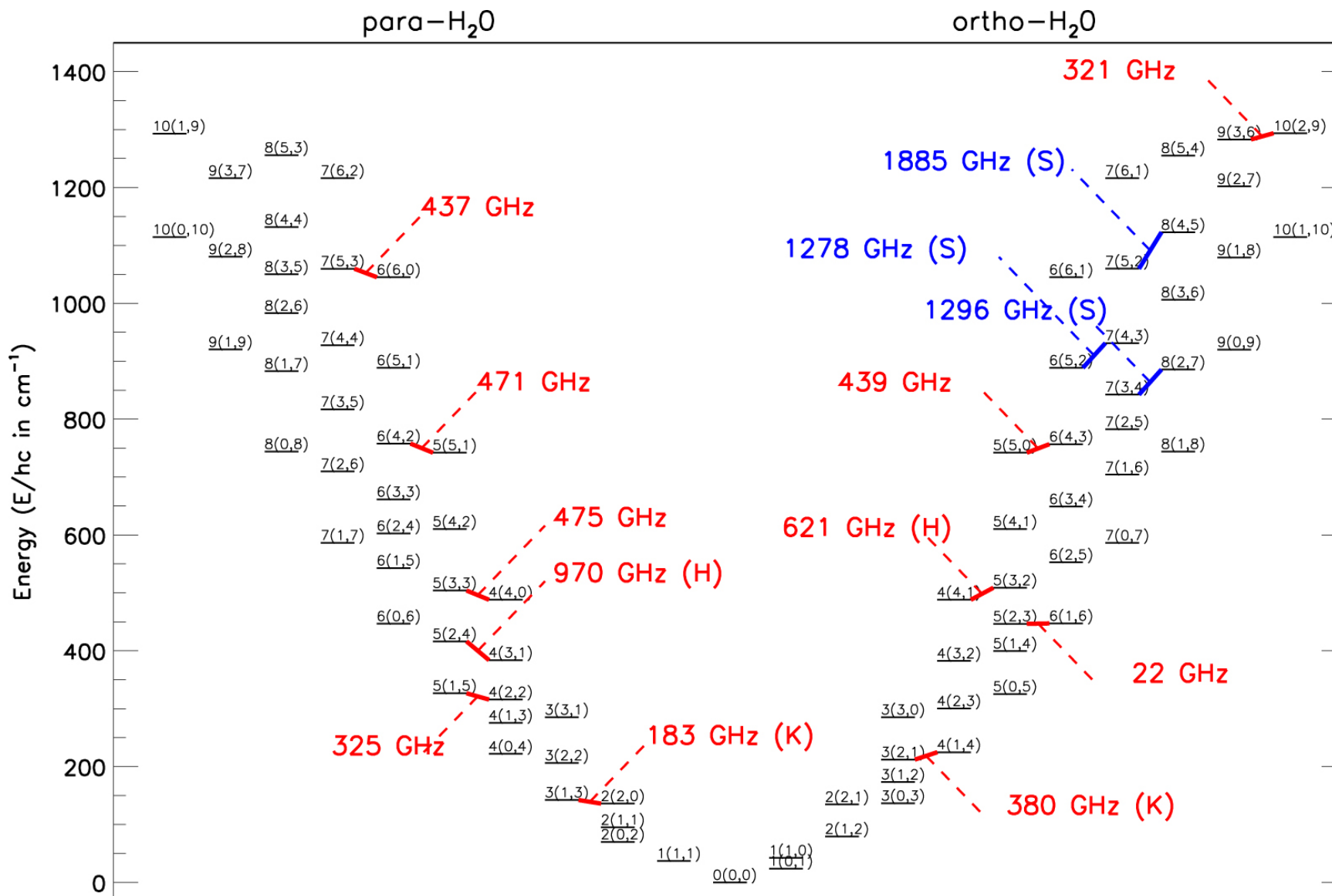
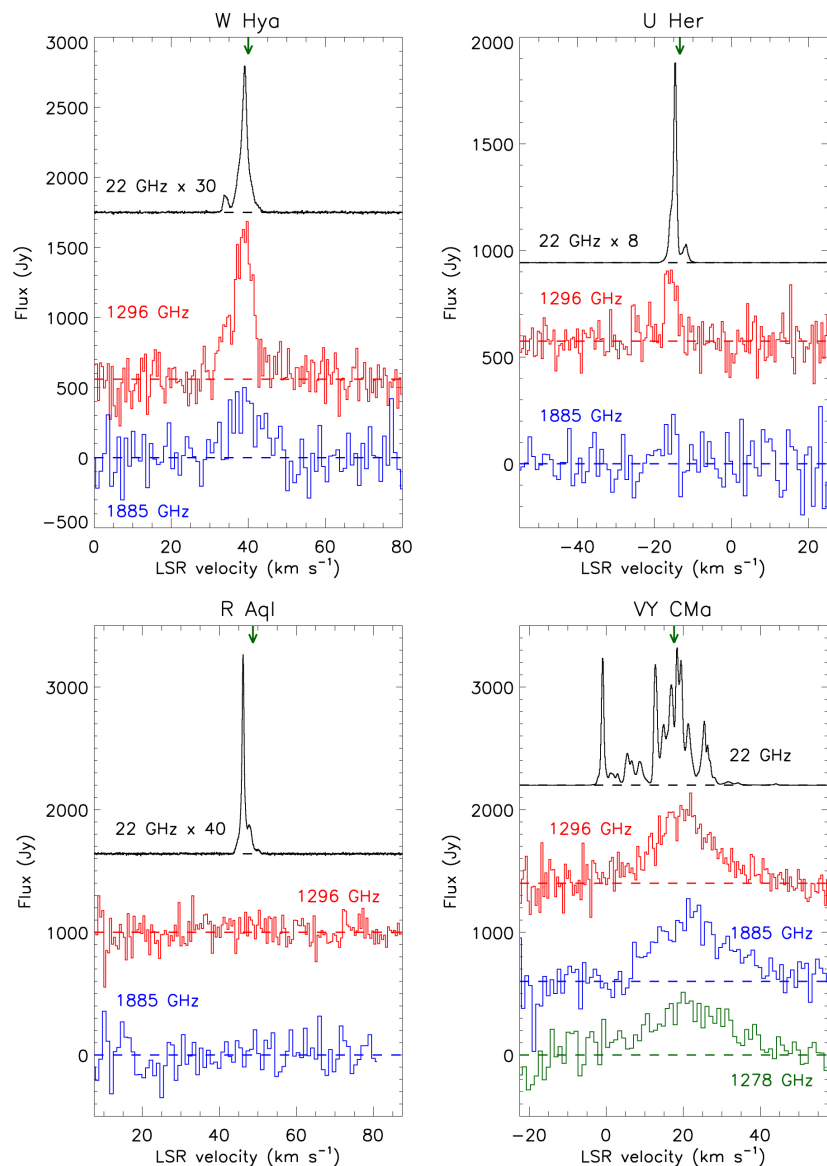
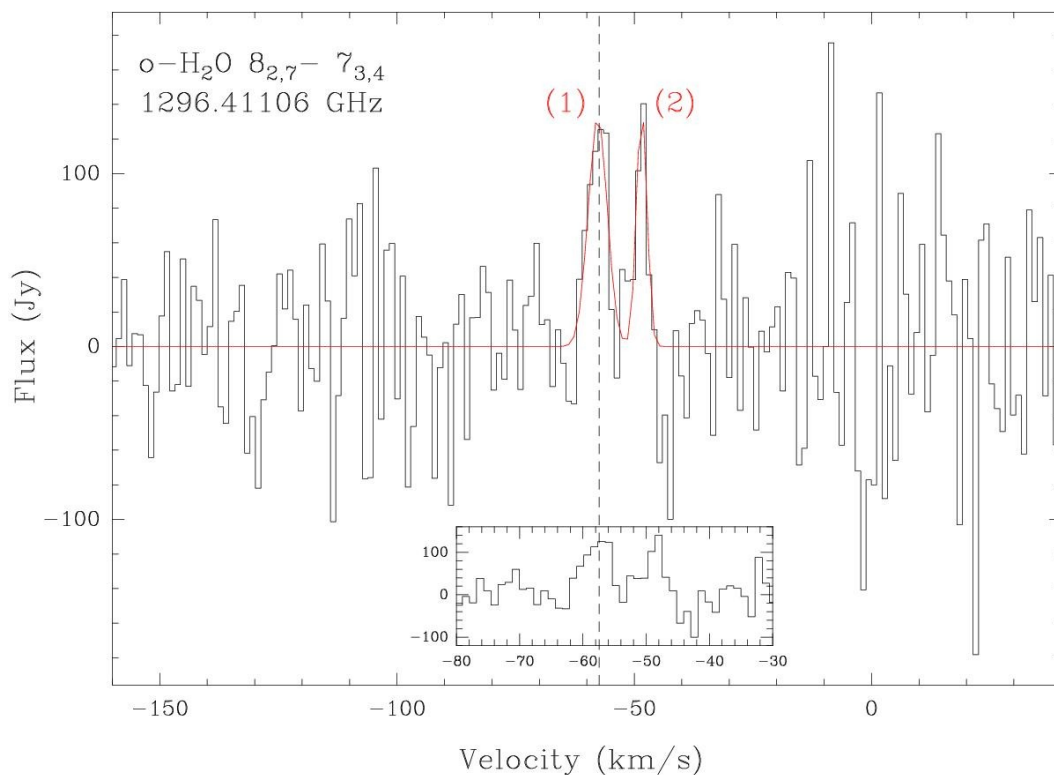


Figure 2. from SOFIA/GREAT Discovery of Terahertz Water Masers
 null 2017 APJ 843 94 doi:10.3847/1538-4357/aa7568
<https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa7568>
 © 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.



Потоки ~500-1000 Ян

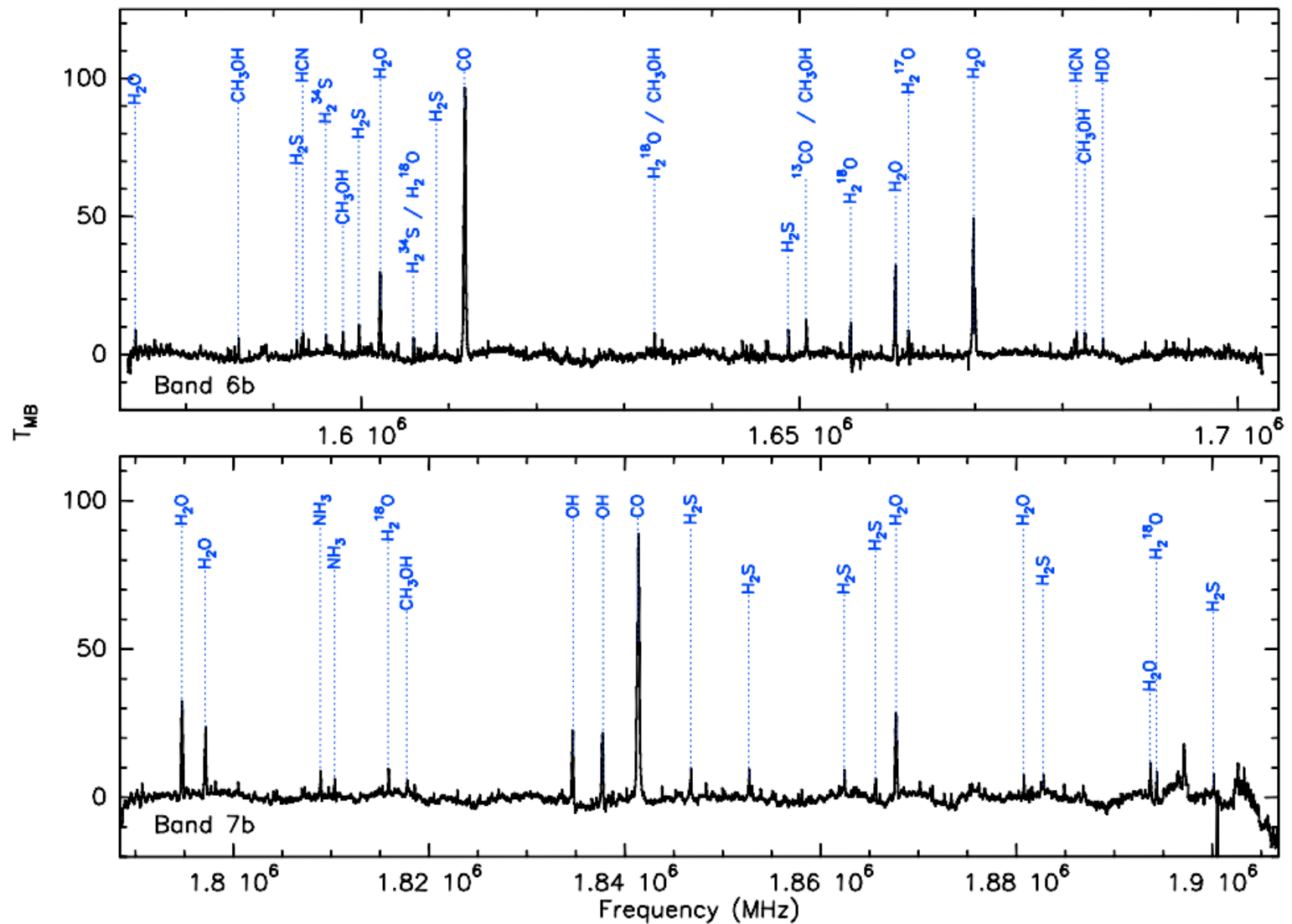
Наблюдения на SOFIA



NGC 7538 IRS1
 o-H₂O 1296 ГГц

Наблюдения на Herschel

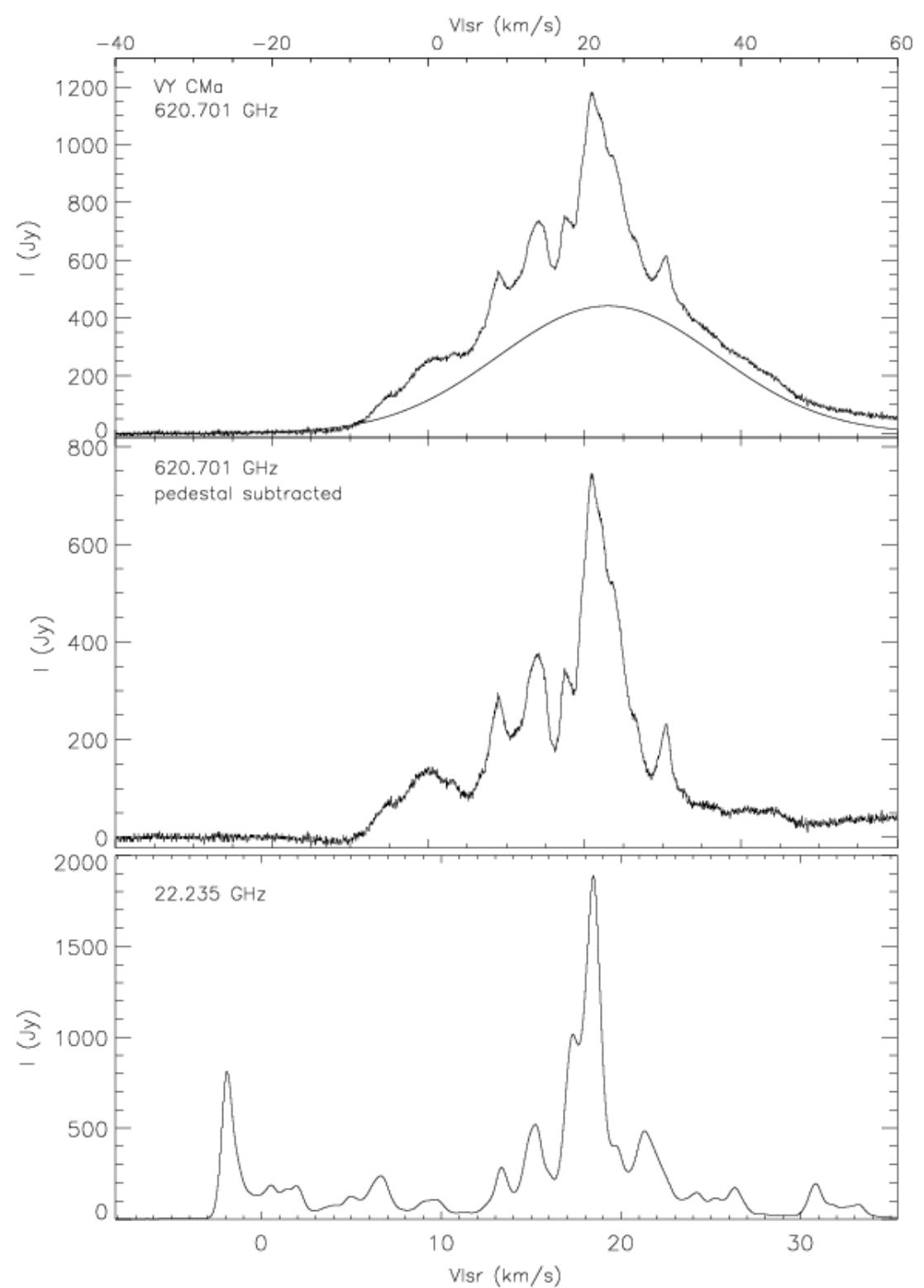
Orion KL



N. R. Crockett et al. A&A 521, L21 (2010)

Herschel observations of EXtra-Ordinary Sources (HEXOS): The Terahertz spectrum of Orion KL seen at high spectral resolution

- Наблюдения мазеров H_2O в VY CMa на частоте 620.7 ГГц на телескопе Гершеля (HIFI)
- Статья – M. Harwit et al. A&A 521, L51 (2010)



ν GHz	λ μm	o/p	v_{up} (v_1, v_2, v_3)	v_{low} (v_1, v_2, v_3)	Rot_{up} (J_{Ka}, J_{Kc})	Rot_{low} (J_{Ka}, J_{Kc})	T_{up} K	τ/τ_{22}
516.23018	580.734	p	(0,2,0)	(0,2,0)	2 _{2,0}	3 _{1,3}	4747.98	0.49
530.34286	565.280	o	(0,0,0)	(0,0,0)	14 _{3,12}	13 _{4,9}	3671.04	0.42
534.24045	561.156	p	(0,0,0)	(0,0,0)	18 _{4,14}	17 _{7,11}	6369.75	3.6
540.75406	555.397	o	(1,0,0)	(1,0,0)	1 _{1,0}	1 _{0,1}	5321.34	0.91
546.69052	548.376	p	(0,1,0)	(0,1,0)	5 _{2,4}	4 _{3,1}	2912.32	2.5
554.05526	541.087	o	(0,2,0)	(0,2,0)	3 _{1,2}	2 _{2,1}	4797.82	0.37
556.84175	538.380	o	(0,2,0)	(0,2,0)	3 _{3,0}	4 _{2,3}	5009.95	0.29
557.98548	537.276	o	(0,0,0)	(0,0,0)	19 _{4,15}	18 _{7,12}	6980.73	2.82
563.94516	531.599	p	(1,0,0)	(0,2,0)	8 _{0,8}	7 _{5,3}	6285.41	1.82
566.49747	529.203	o	(0,2,0)	(0,2,0)	8 _{2,7}	7 _{3,4}	5858.35	4.80
571.91369	524.192	o	(0,0,0)	(0,0,0)	12 _{6,7}	13 _{3,10}	3474.27	0.52
593.70815	504.949	p	(0,1,0)	(0,1,0)	9 _{2,8}	8 _{3,5}	3871.20	3.95
598.49487	500.911	o	(1,0,0)	(0,0,1)	9 _{2,7}	9 _{2,8}	6931.69	0.31
753.74777	397.737	o	(0,2,0)	(1,0,0)	6 _{6,1}	5 _{5,0}	6848.41	0.57
766.79360	390.968	p	(0,0,0)	(0,0,0)	11 _{5,7}	12 _{2,10}	2820.32	0.91
775.49588	386.582	p	(0,2,0)	(0,2,0)	2 _{0,2}	1 _{1,1}	4635.71	1.66
788.04615	380.425	o	(0,0,1)	(1,0,0)	7 _{2,6}	7 _{2,5}	6405.98	0.41
793.61632	377.754	o	(0,2,0)	(0,2,0)	1 _{1,0}	1 _{0,1}	4606.87	6.49
820.22402	365.500	o	(0,0,1)	(1,0,0)	5 _{1,5}	5 _{1,4}	5865.78	1.04
823.67060	363.971	o	(1,0,0)	(0,0,1)	5 _{3,2}	4 _{3,1}	5976.63	0.49
832.69841	360.025	p	(1,0,0)	(1,0,0)	9 _{2,8}	8 _{3,5}	6786.90	0.41
841.05071	356.449	o	(0,0,0)	(0,0,0)	10 _{5,6}	11 _{2,9}	2472.87	1.15
847.45203	353.757	o	(0,2,0)	(1,0,0)	9 _{5,4}	8 _{4,5}	6884.11	0.34
854.04981	351.024	o	(0,0,0)	(0,0,0)	12 _{5,8}	13 _{2,11}	3273.78	0.46
899.30212	333.361	p	(0,1,0)	(0,1,0)	2 _{0,2}	1 _{1,1}	2395.53	6.03
1080.23873	277.524	p	(1,0,0)	(0,0,1)	7 _{4,4}	7 _{2,5}	6566.61	2.23
1085.01419	276.302	o	(0,2,0)	(0,2,0)	8 _{3,6}	7 _{4,3}	6078.28	3.2
1086.46274	275.934	p	(1,0,0)	(1,0,0)	1 _{1,1}	0 _{0,0}	5313.86	0.62
1099.29823	272.712	o	(1,0,0)	(1,0,0)	6 _{3,4}	5 _{4,1}	6176.58	0.49
1101.13030	272.258	p	(0,0,0)	(0,0,0)	11 _{6,6}	12 _{3,9}	3029.89	0.39
1109.59787	270.181	p	(0,0,0)	(0,0,0)	9 _{5,5}	10 _{2,8}	2068.93	1.52
1153.12682	259.982	o	(0,0,0)	(0,0,0)	3 _{1,2}	2 _{2,1}	249.436	0.41
1158.32385	258.815	o	(0,0,0)	(0,0,0)	6 _{3,4}	5 _{4,1}	933.742	0.85
1172.52583	255.680	p	(0,0,0)	(0,0,0)	7 _{4,4}	6 _{5,1}	1334.83	0.27
1205.78910	248.627	p	(0,1,0)	(0,1,0)	1 _{1,1}	0 _{0,0}	2352.37	2.10
1228.30364	244.069	o	(1,0,0)	(1,0,0)	8 _{2,7}	7 _{3,4}	6511.90	0.67
1307.96330	229.205	o	(0,0,0)	(0,0,0)	8 _{4,5}	9 _{1,8}	1615.34	1.7
1312.04322	228.492	o	(1,0,0)	(0,0,1)	6 _{4,3}	6 _{2,4}	6322.70	5.6
1322.06480	226.760	o	(0,0,0)	(0,0,0)	6 _{2,5}	5 _{3,2}	795.521	2.5
1344.67616	222.947	p	(0,0,0)	(0,0,0)	7 _{4,4}	8 _{1,7}	1334.83	2.1
1349.66583	222.123	p	(1,0,0)	(1,0,0)	7 _{2,6}	6 _{3,3}	6263.37	1.08
1358.25249	220.719	o	(0,0,1)	(0,2,0)	7 _{2,6}	6 _{6,1}	6405.98	0.31
1361.28260	220.227	o	(1,0,0)	(0,2,0)	5 _{2,3}	5 _{5,0}	5893.15	1.80
1362.64126	220.008	o	(1,0,0)	(1,0,0)	6 _{2,5}	5 _{3,2}	6042.03	0.80
1903.64426	157.483	o	(0,0,0)	(0,0,0)	12 _{3,10}	11 _{4,7}	2823.63	0.51

Теоретические расчеты

Линии H₂O, которые:

- попадают в диапазоны ММ
- потенциально могут быть инвертированы

Всего около ~45 линий

Gray+2016

Численные коды для расчетов переноса излучения с учетом мазерного эффекта

- **RADEX** (Van der Tak et al. 2007;
<https://var.sron.nl/radex/radex.php>)
- **MOLPOP-CEP** (Asensio Ramos and Elitzur 2018;
<https://github.com/aasensio/molpop-cep>)
- **MMOLG** (Yates et al. 1997; Gray et al. 2016)

Численные коды для расчетов переноса излучения с учетом мазерного эффекта

- Проведено сравнение результатов расчетов с помощью RADEX с результатами расчетов с помощью MMOLG из статьи Gray et al. (2016) при некоторых наборах параметров среды.
- В качестве теста проанализированы линии на частотах 22 и 1322 ГГц.
- Для следующих параметров получилось неплохое согласие (есть инверсия, близкое значение отношения оптической толщины линий):
 $n(\text{H}_2)=10^8\text{-}10^9 \text{ см}^{-3}$; $T_{\text{kin}}=1000 \text{ K}$; $f(\text{H}_2\text{O})=0.0001$
- Тесты кода MOLPOP-CER пока в процессе...

Прогноз возможного наблюдательного времени для Миллиметрона

- Программа может включать в себя наблюдения 30 объектов (25 - области звездообразования, 5 - околозвездные оболочки) в 46 линиях.
- Исходя из среднего ожидаемого потока в линиях 10 Ян км/с , время накопления, согласно каликулятору чувствительности ММ, составляет около 10 минут.
- Общее время = $(30 \text{ источников}) * (46 \text{ линий}) * (10 \text{ мин}) = 2760 \text{ минут} = 230 \text{ часов}$.

Что нам это дает?

- Возбуждение тех или иных мазеров зависит от условий в среде. Поэтому если в одном источнике наблюдается несколько типов мазеров, то они зондируют разные области одного и того же источника.
- Уточнение моделей накачки.
- Дальнейшее изучение физики явления с опорой на новые наблюдения.

Спасибо за внимание!