



Исследования межзвёздных мазеров — результаты, проблемы, перспективы

*А.В.Лапинов¹⁾, Ю.А.Камаева^{1,2)}, Е.А.Трофимова¹⁾, А.К.Киселёв³⁾, Н.И.Лапин³⁾,
Д.А.Кондратьева³⁾, А.М.Толмачёв, Д.И.Суворин⁴⁾, Д.А.Ладейщиков⁵⁾,
А.В.Ипатов⁶⁾, И.А.Рахимов⁶⁾, С.А.Гренков⁶⁾, Т.С.Андреева⁶⁾*

¹⁾Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород,

²⁾ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Н. Новгород,

³⁾Мининский университет, Н.Новгород,

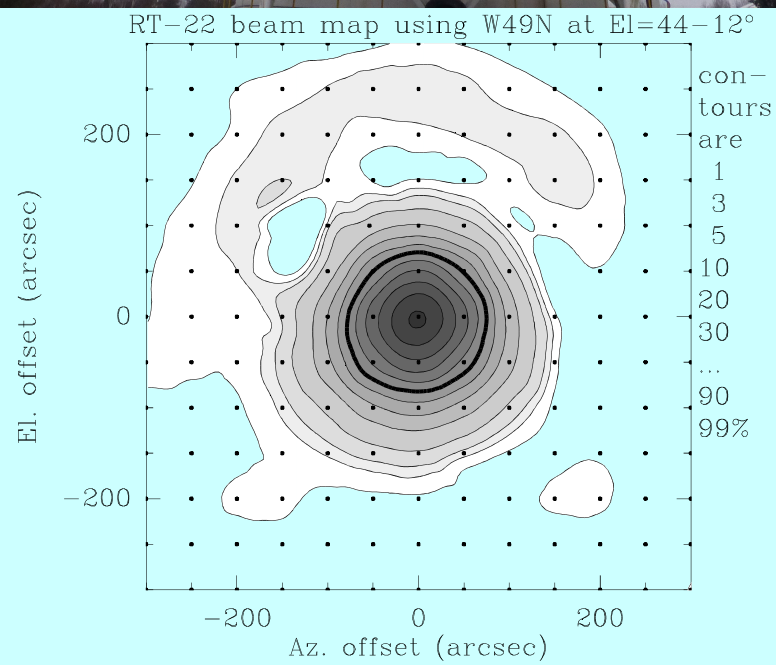
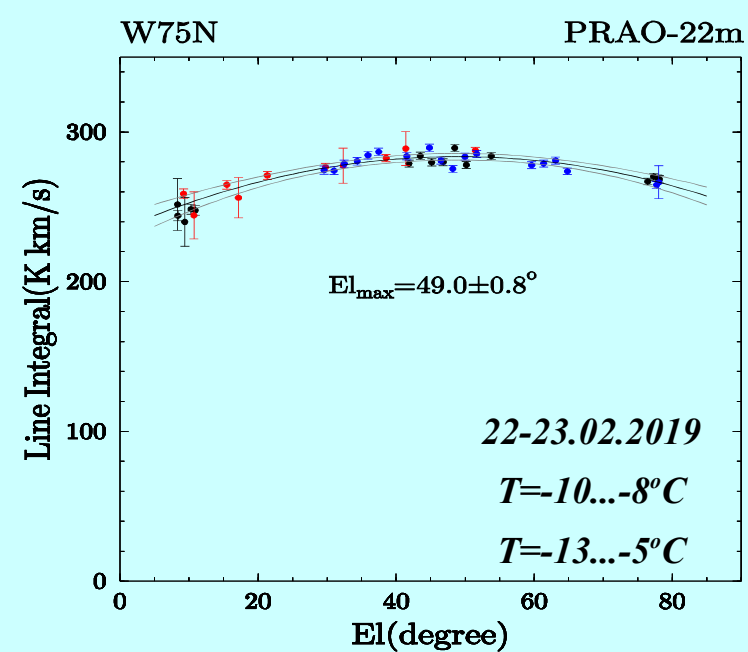
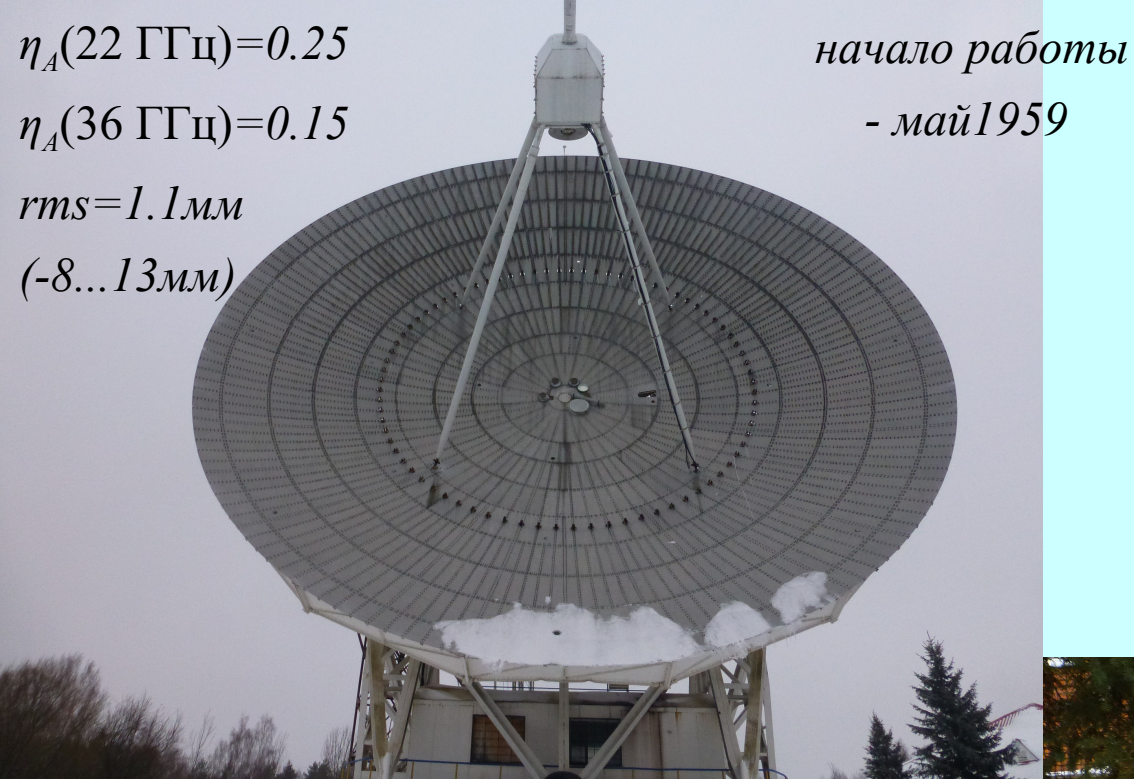
⁴⁾ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино,

⁵⁾Уральский федеральный университет, Екатеринбург,

⁶⁾Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург

При поддержке Российского научного фонда
проект № 24-12-00153, <https://rscf.ru/project/24-12-00153/>

16.04.2025



Павел Дмитриевич Калачёв (28.06.1911 – осень 1990)



По окончании Московского дирижаблестроительного ин-та работал в авиационной промышленности. Поступил на работу в лаб. колебаний ФИАН в 1948 будучи уже высококвалифицированным конструктором. Занимал должности гл. конструктора и зав. сектором радиотелескопов. Д-р тех. н., конструктор радиотелескопов. Заслуженный деятель науки и техники СССР (1982), Лауреат Премии имени А.С. Попова Президиума АН СССР (1977, совместно с А.Е. Саломоновичем) и Гос. премии СССР (1982).

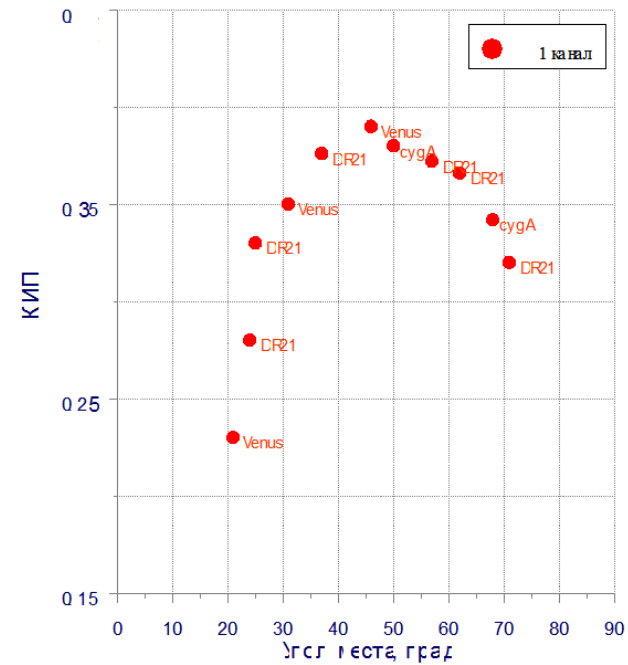
Интерферометр ИПА РАН



РТ-32м ИПА РАН, Светлое

$$\eta_A(22 \text{ GHz})=0.2...0.4$$


Зависимость КИП от угла места. Диапазон 1.35 см



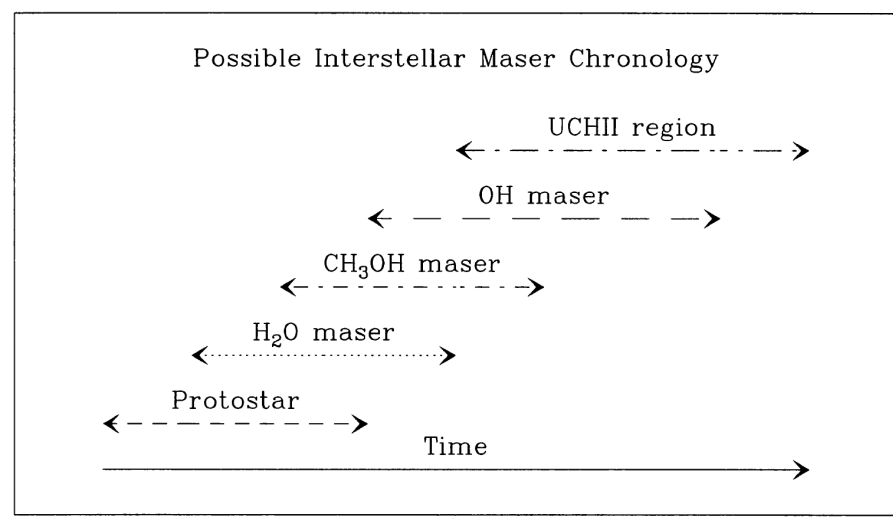
Контррефлектор
сфокусирован на
угле места 45 град.

Из доклада А.В. Ипатова (ВРК-2014, Пущино)

Чем вообще интересны космические мазеры

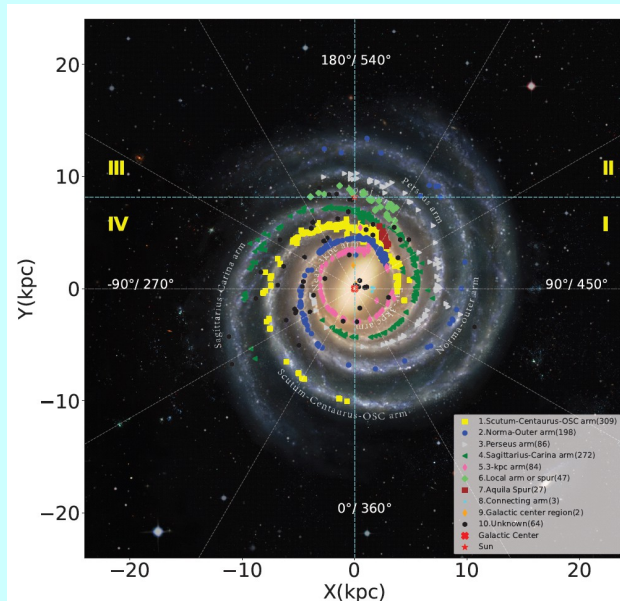
M.J.Reid 2002, ASP Conf. Ser. 206, 506

Области звездообразования

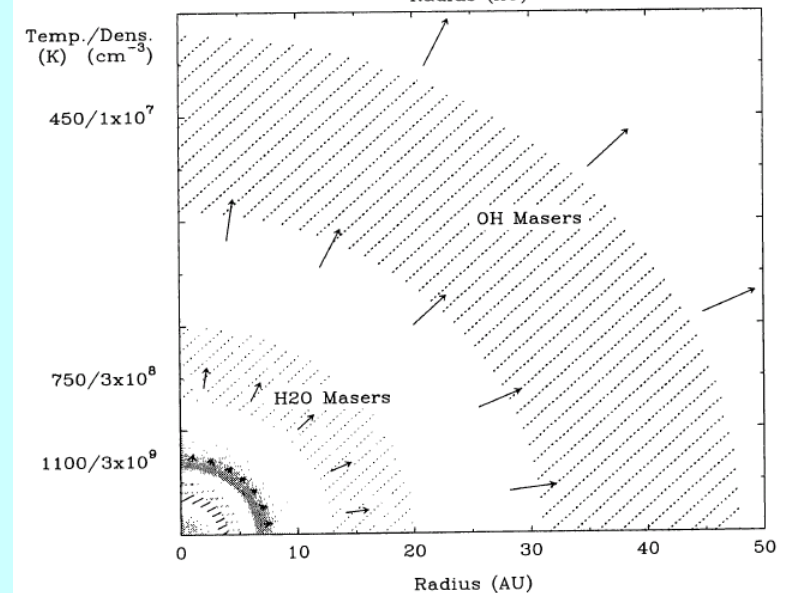
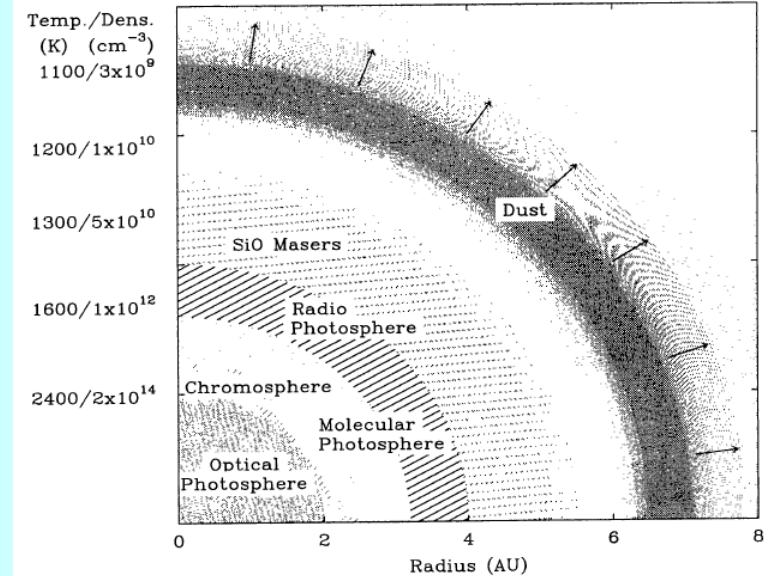


From M20
news on
05.03.2024

T.Yang et al.
2024 preprint
Tianma-65m,
Shanghai
1092 6.7-GHz
methanol
masers



Оболочки звёзд



Измерения расстояния до Ori-KL по линии $H_2O(6_{1,6} - 5_{2,3})$ при помощи интерферометра VERA (437 ± 19 pc) T.Hirota et al. 2007 PASJ 59, 897

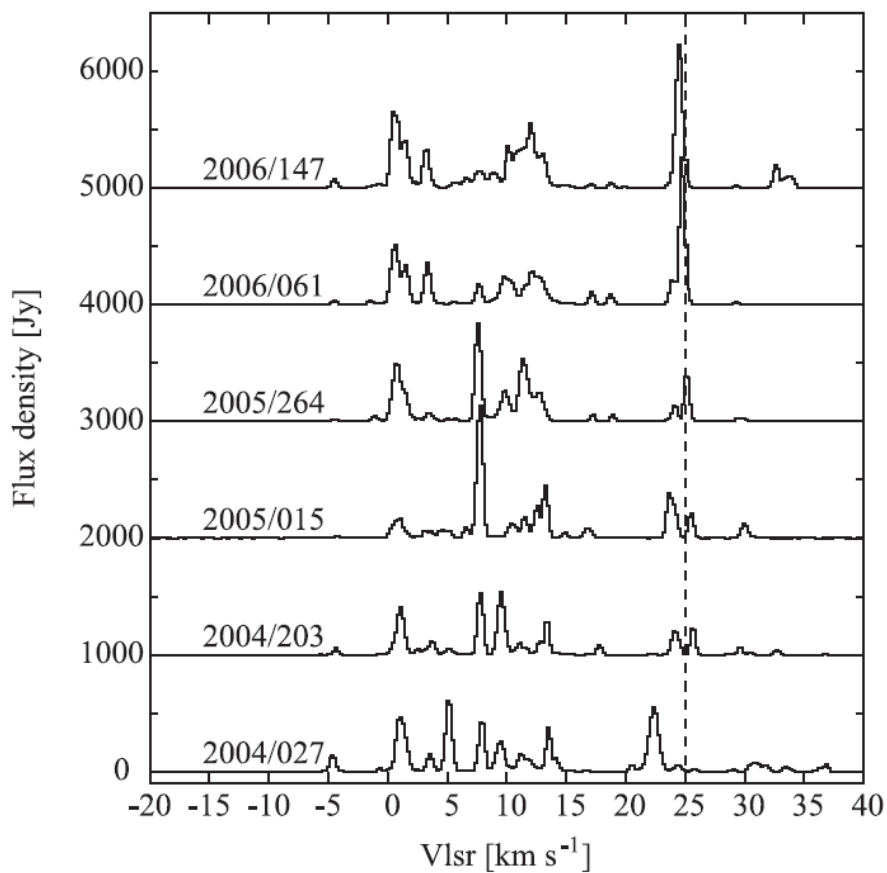
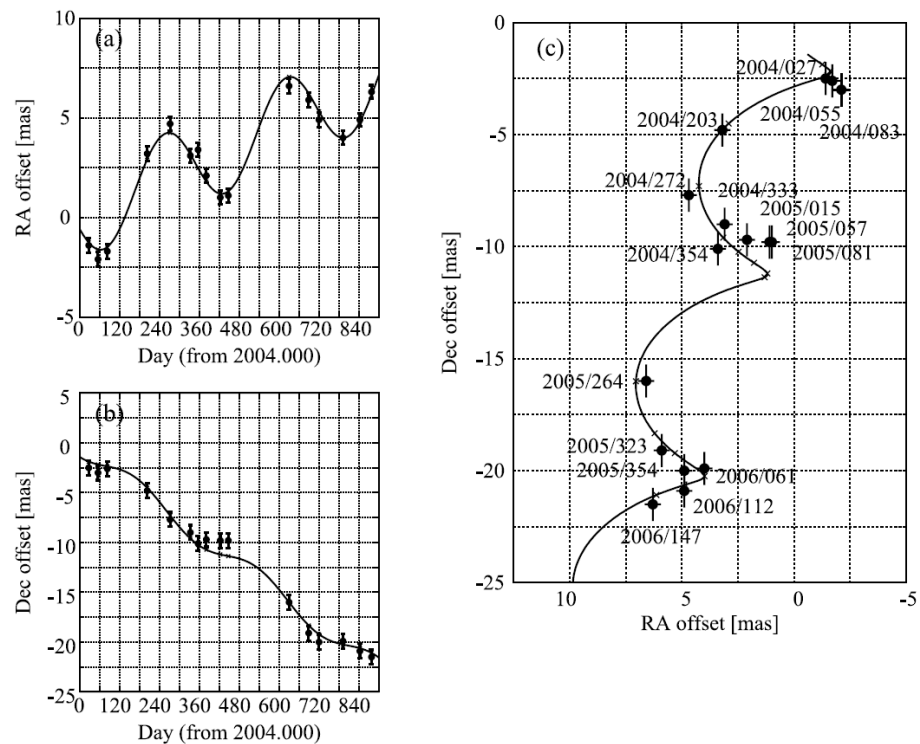
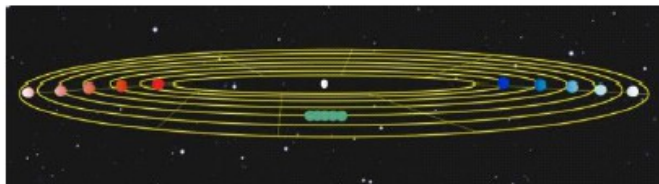
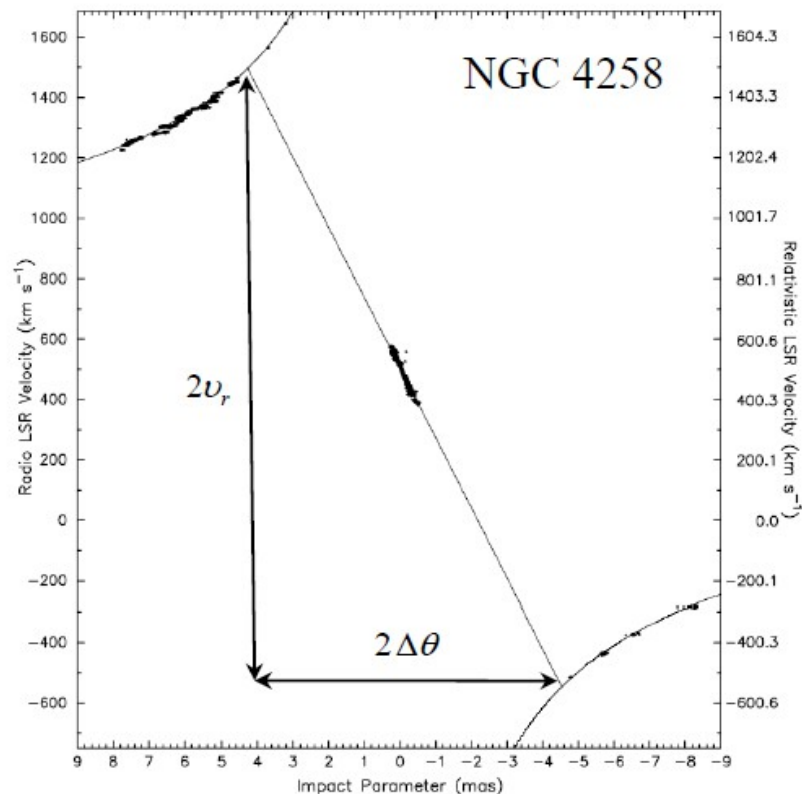


Fig. 1. Examples of scalar-averaged cross power spectra of Orion KL observed with the VERA Mizusawa–Iriki baseline (1267 km). The dashed line indicates the central velocity of the maser feature adopted for the parallax measurement in the present work at the LSR velocity of 25 km s^{-1} .



Parameter	Best-fit value
π	2.29(0.10) mas
$\mu_\alpha \cos \delta$	2.77(0.09) mas yr ⁻¹
μ_δ	-8.97(0.21) mas yr ⁻¹
σ_α	0.36 mas
σ_δ	0.74 mas

Определение расстояния до системы источников.

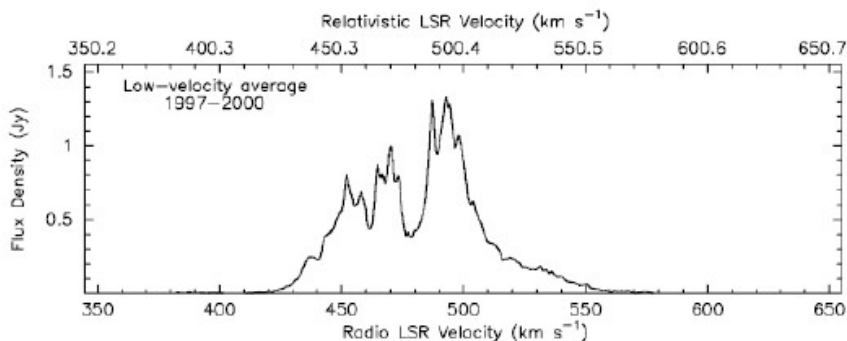


Угловое расстояние до аккреционного диска:

$$D = r / \Delta\theta = v_r^2 / (a \Delta\theta)$$

r – радиус орбиты, $\Delta\theta$ – угловой радиус орбиты, v_r – орбитальная скорость, a – центростремительное ускорение;

Центростремительное ускорение a определяется на основе изменения со временем доплеровских скоростей компонент излучения центрального источника:



«Геометрическое» расстояние до галактики NGC 4258 составило (Гернштейн и др. 1999):

$$D = 7.2 \pm 0.5 \text{ Мпк.}$$

Масса центрального тела системы, определённая по кривой вращения, составляет около $3.8 \times 10^7 M_\odot$.

Чем ещё интересны мазеры

Sarma & Momjian 2011, ApJ 730, L5

Vlemmings 2008, A&A 484, 773

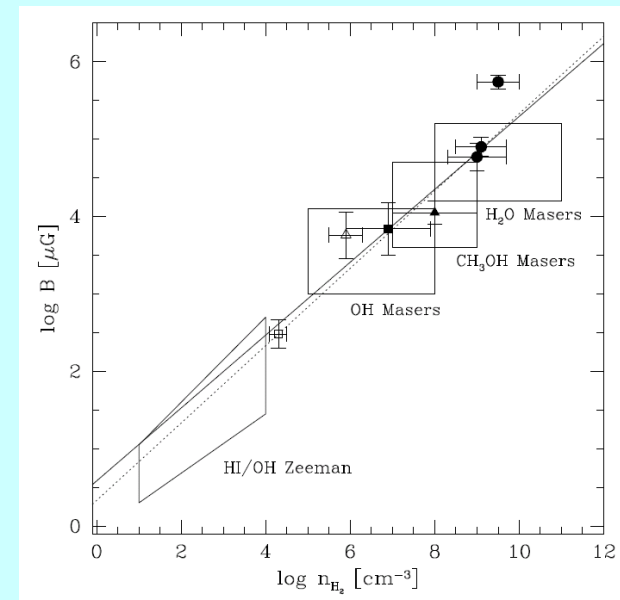
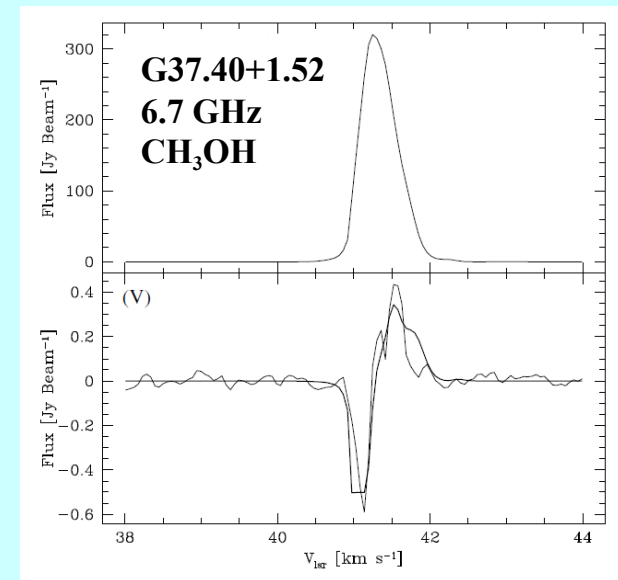
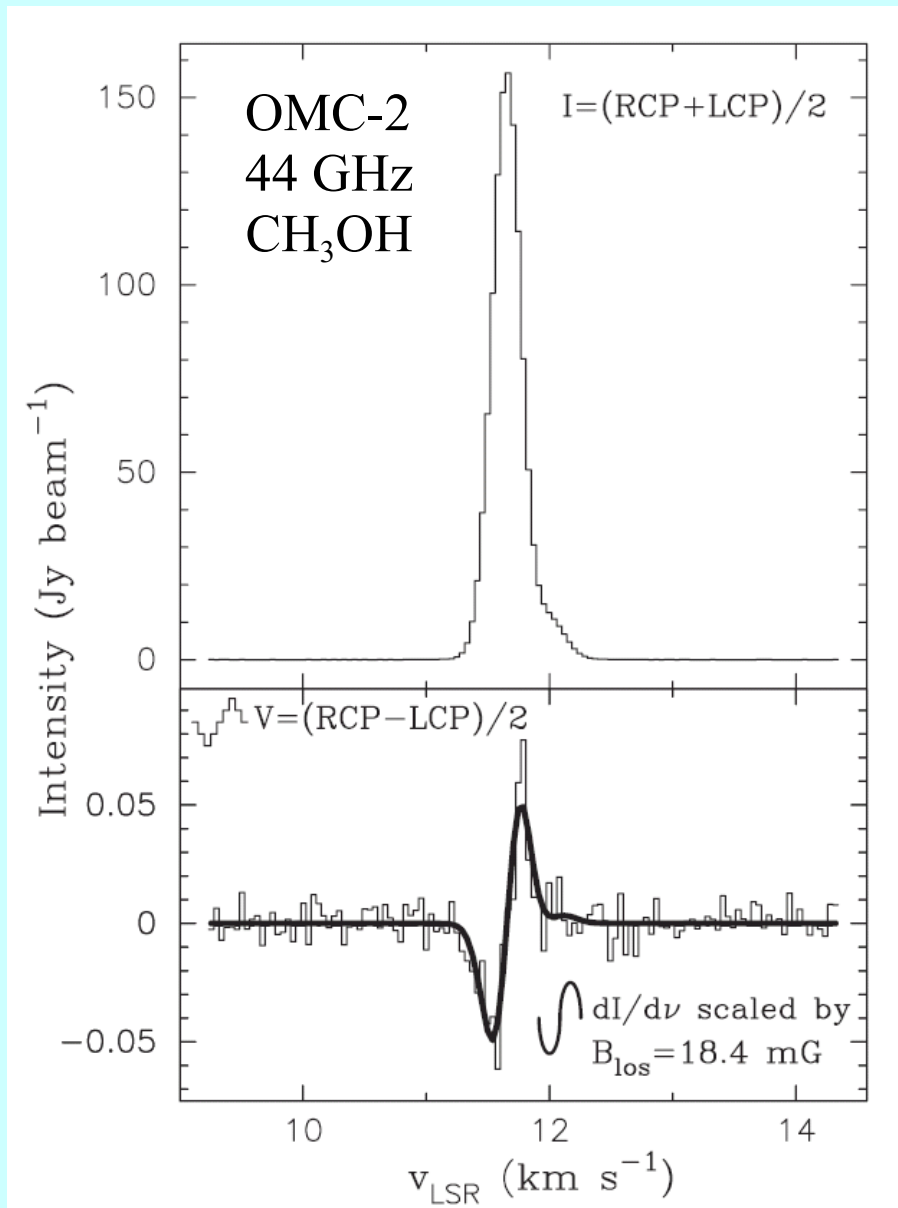
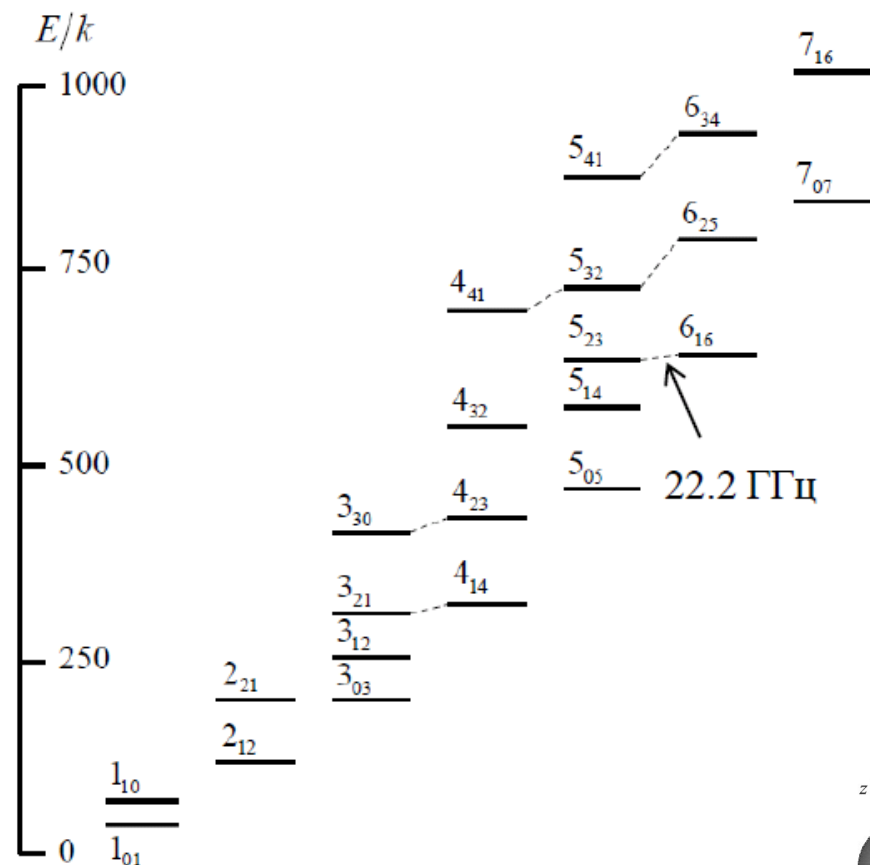


Схема вращательных энергетических уровней молекул орто- H_2^{16}O .

© А. Нестерёнок, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 2010



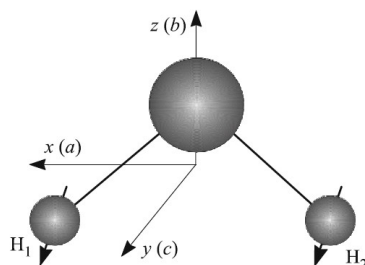
Мазерная линия на частоте 22.2 ГГц соответствует разрешенному электродипольному переходу между вращательными уровнями молекул орто- H_2^{16}O $6_{16} \rightarrow 5_{23}$.

В качестве основного механизма накачки космических H_2O -мазеров, как правило, рассматривается столкновительное возбуждение молекул H_2O на вышележащие уровни с последующей радиационной дезактивацией этих уровней.

Предполагаемые физические условия в источниках мазерного излучения H_2O :

$$n(\text{H}_2) \sim 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3},$$

$$T \sim 400 - 1000 \text{ К.}$$



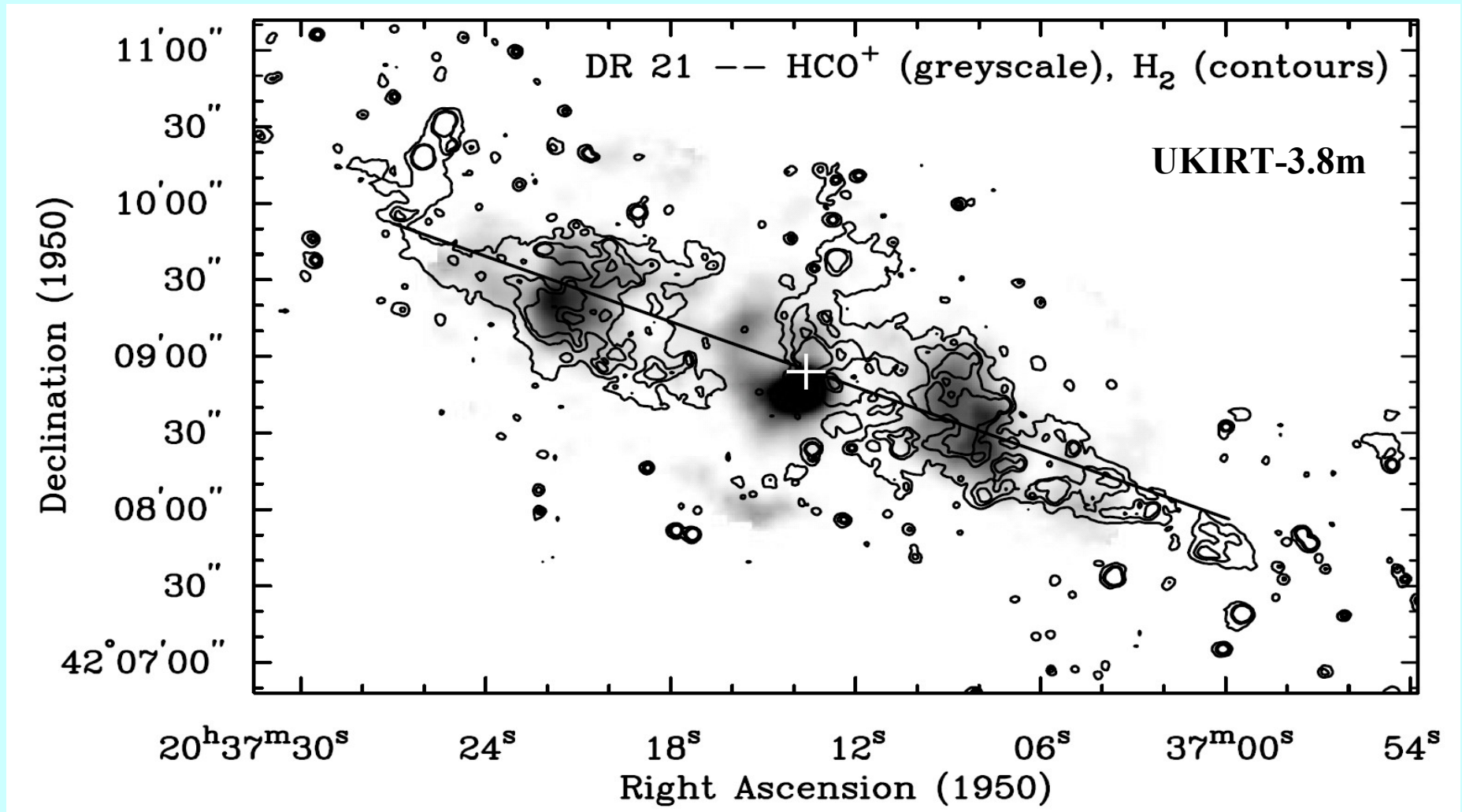
значения энергии указаны в кельвинах, k – постоянная Больцмана.

© П.Л. Чаповский, А.А. Мамрашев

$$I_a < I_b < I_c$$

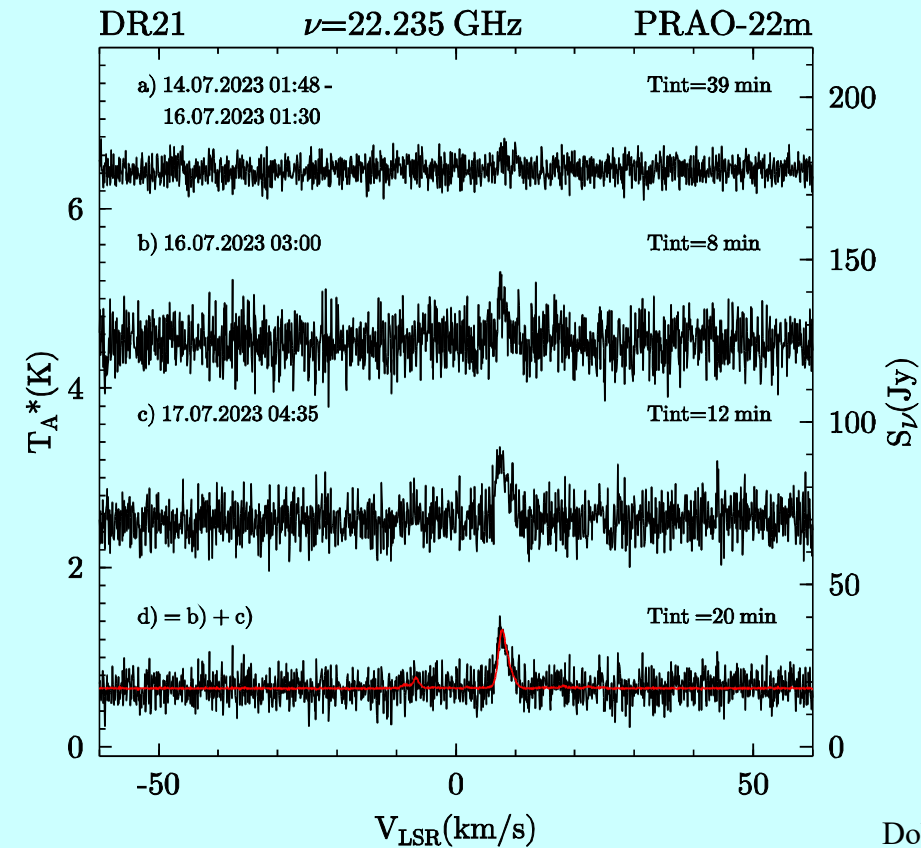
High-Resolution Observations of H I Zeeman Absorption toward DR21

Roberts D.A., Dickel H.R., Goss W.M. 1997 ApJ 476, 209

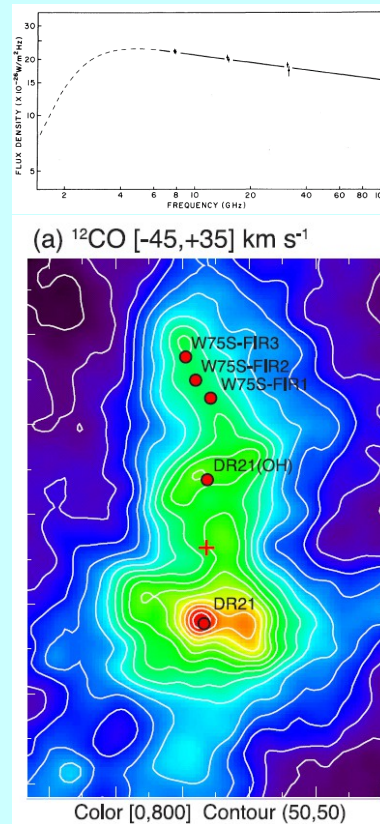


Large-scale molecular outflow (adapted from Garden & Carlstrom 1992, Fig. 9a). The gray-scale image represents HCO⁺ emission (Garden & Carlstrom 1992), and the contours represent shocked 2.2 μm H₂ emission (Garden, Russell, & Burton 1990) from the DR21 outflow. The diagonal line shows the location of the east-west outflow axis as determined from the H I observations of this paper. The white cross shows the estimated location of the origin of the H I outflow.

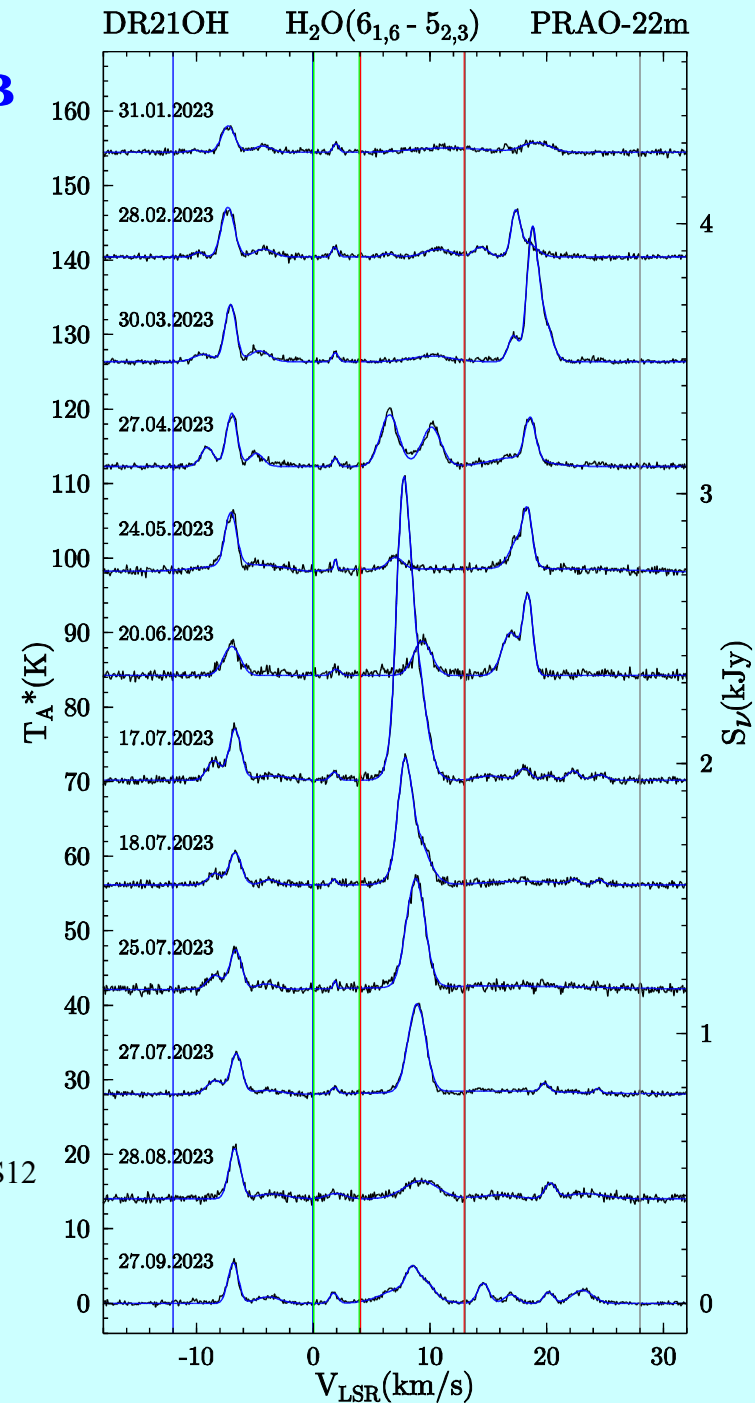
О вспышечной активности мазера H_2O в DR21OH (Лапинов и др. 2024 ПАЖ, т.50, с.82-89)



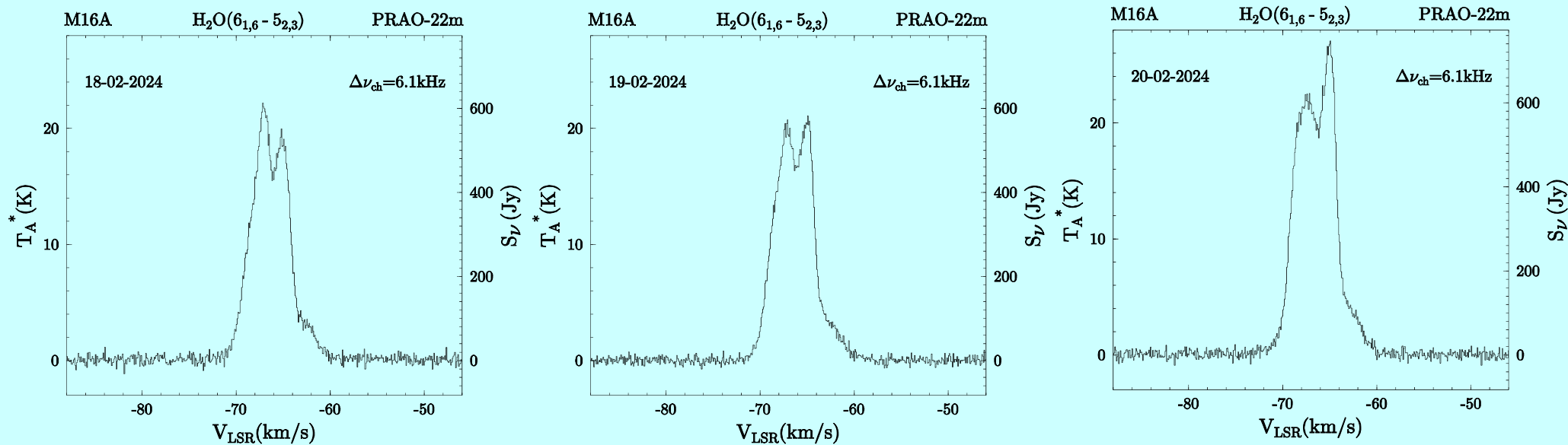
W.A. Dent 1972 ApJ 177, 93



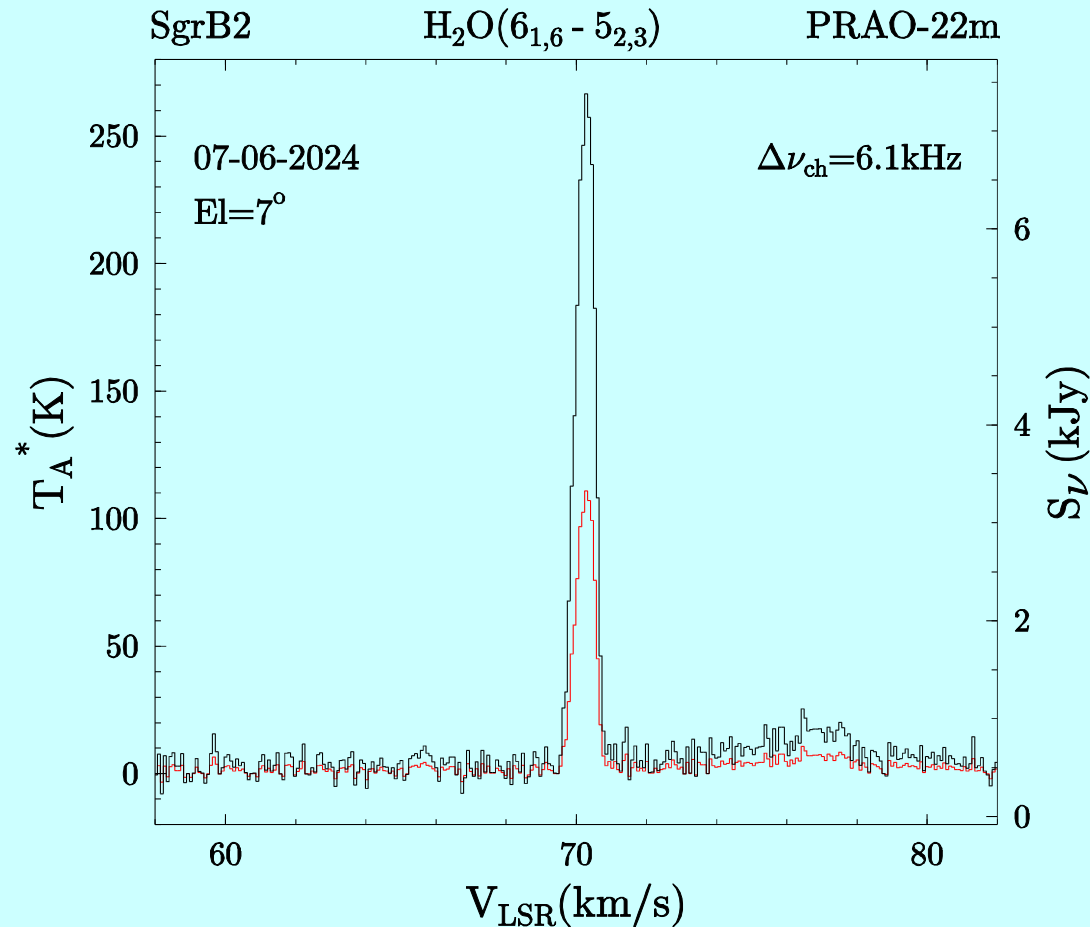
Dobashi K. et al. 2019 PASJ 71, S12



Пример быстрого изменения формы линий мазерного излучения в М16А (~ суток), накладывающий верхний предел на размер области излучения в доли астрономической единицы

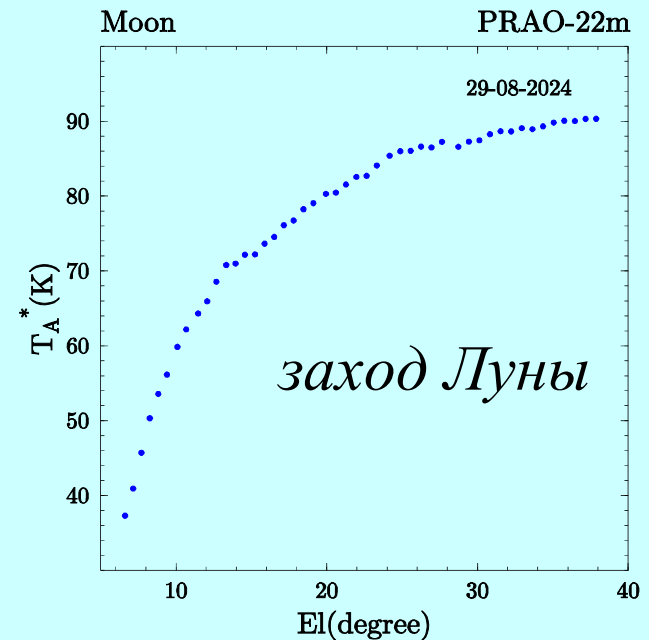
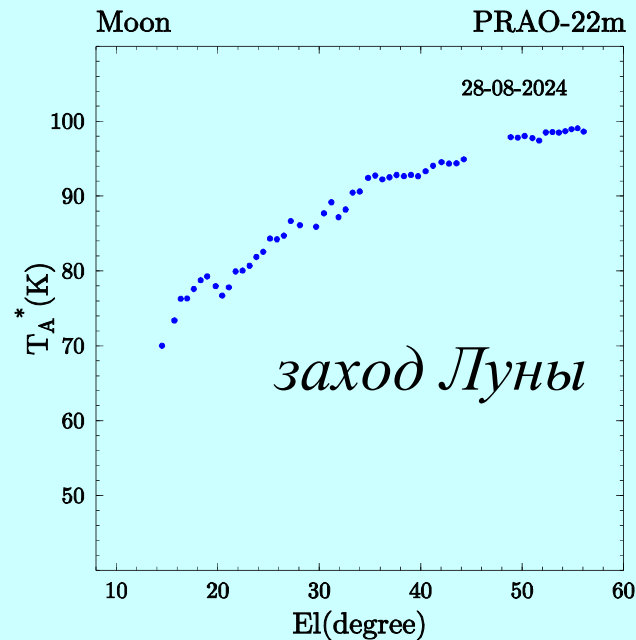
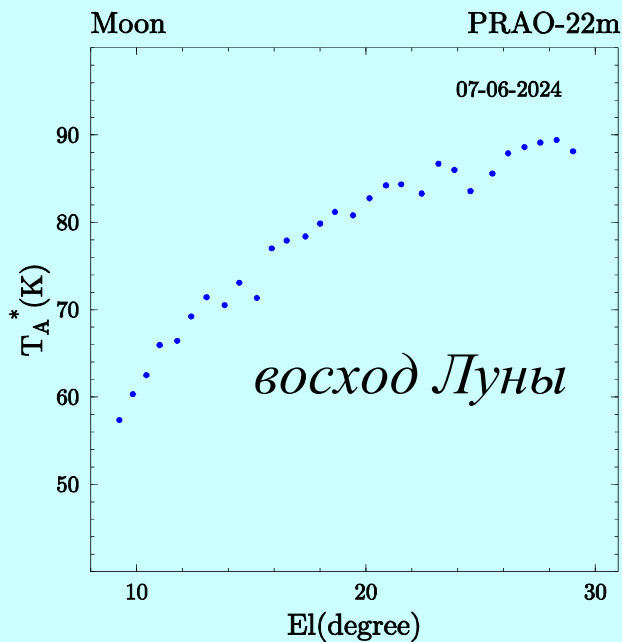


Пример масштаба ошибок, которые могли бы быть при оценке интенсивности мазерных источников на основе используемой методики коррекции поглощения на РТ-22 ПРАО



Красным показана интенсивность мазера в SgrB2 в июне 2024 г., рассчитанная по “стандартной” методике. Чёрным — после мониторинга поглощения атмосферы по Луне непосредственно после измерения мазера с предшествующей юстировкой антенны непосредственно по SgrB2.

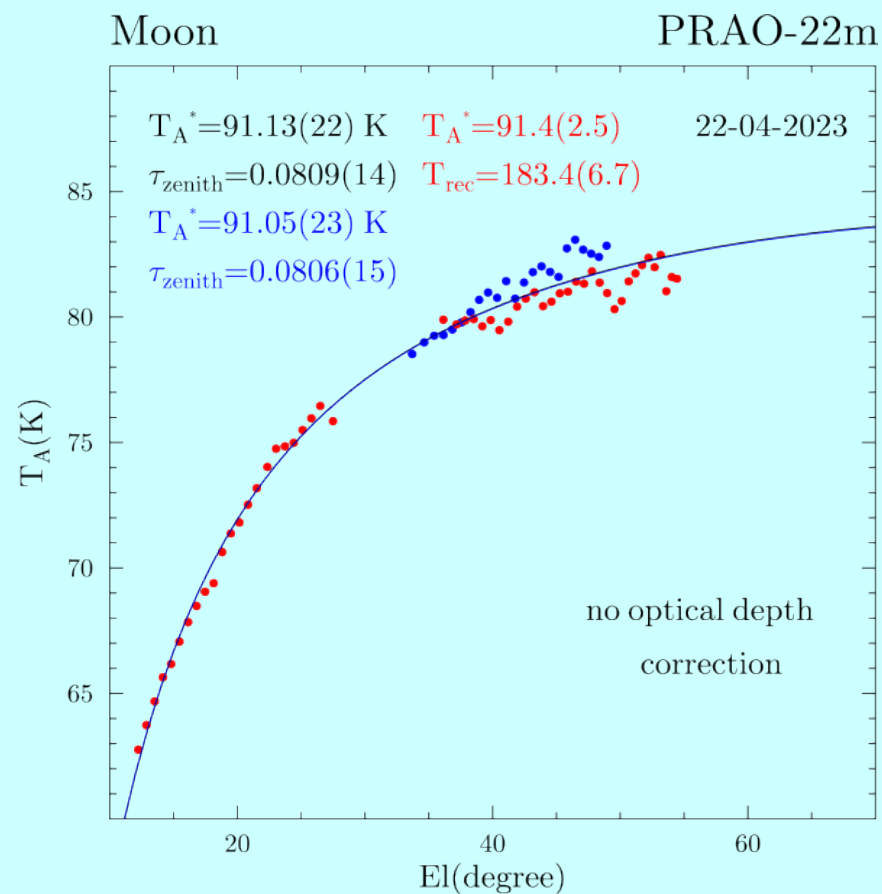
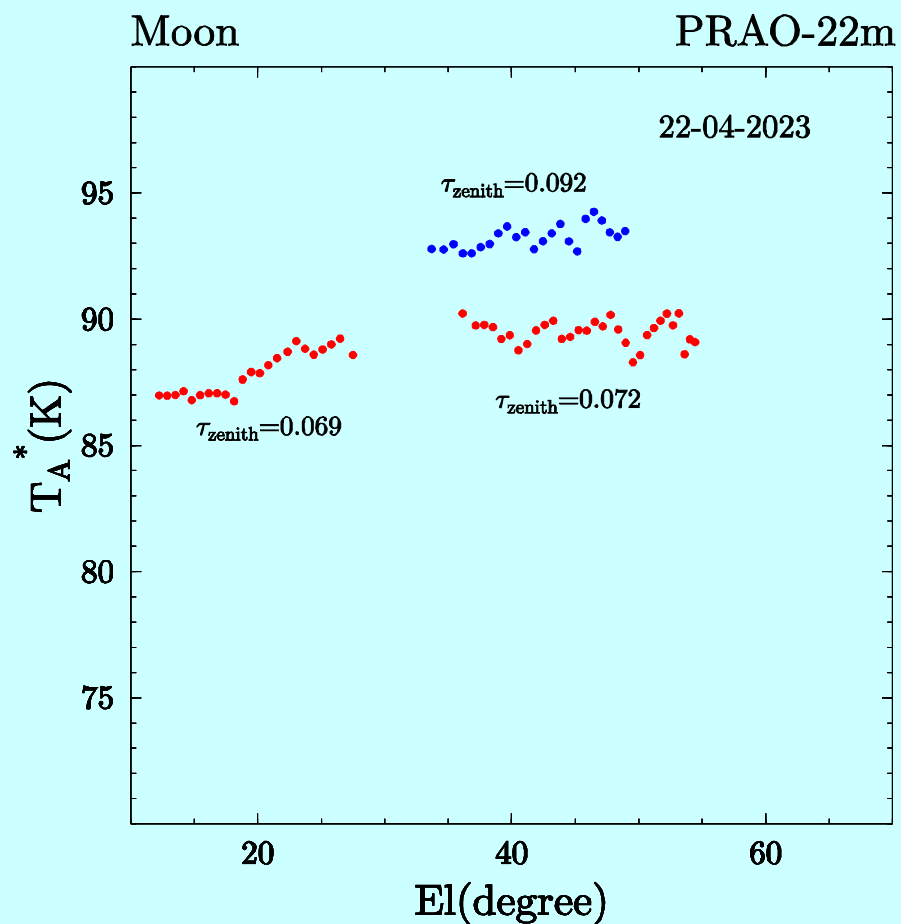
Поведение от угла места яркостной температуры Луны, “скорректированной” на поглощение атмосферы по существующей на РТ-22 ПРАО методике. При правильной коррекции все точки должны быть выстроены горизонтально.



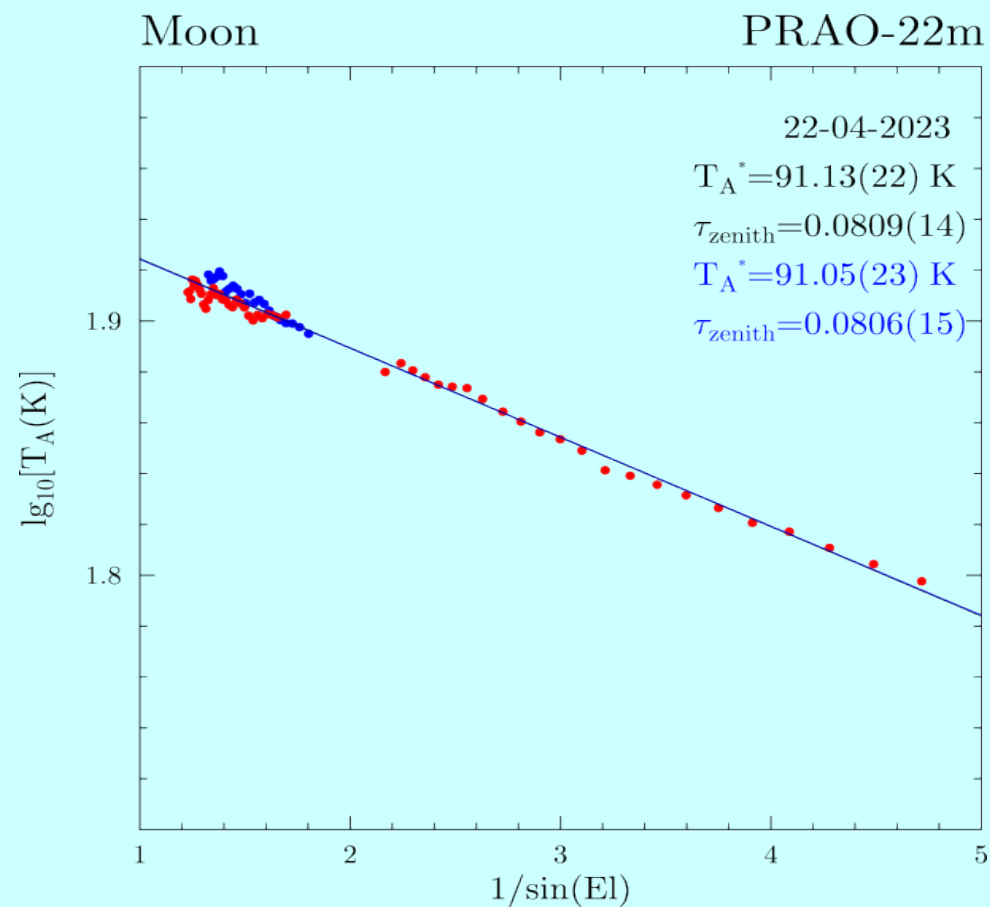
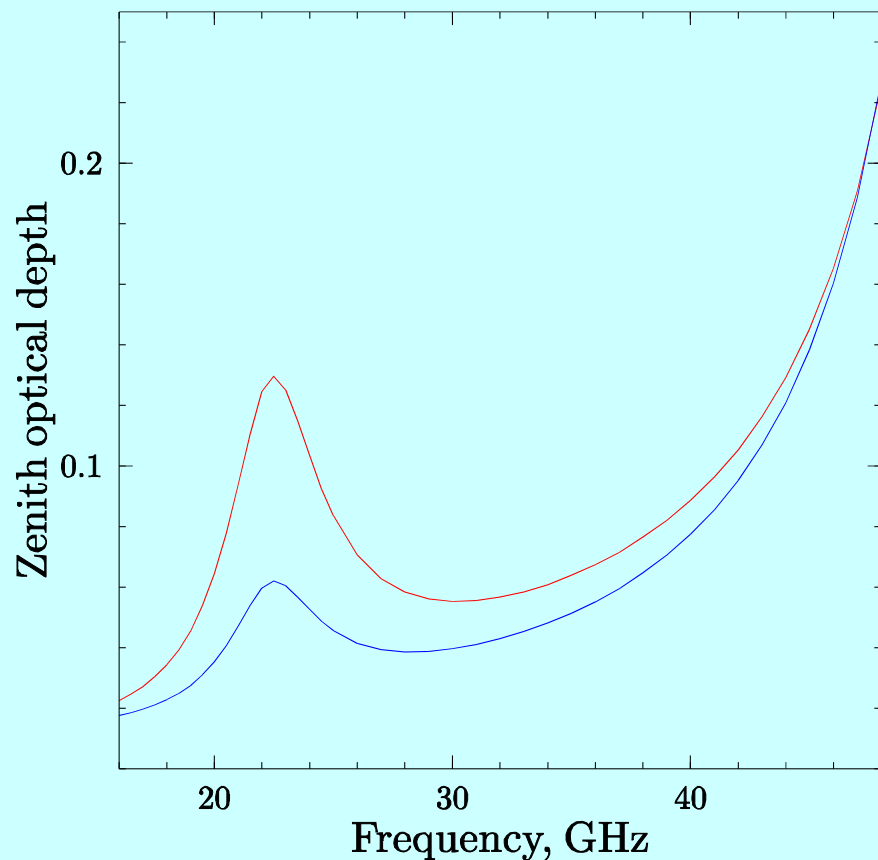
Примеры расхождений в оптической толщине в зените на частоте 22.235 ГГц, рассчитанной по методике из книги В.К.Конникова, Е.Е.Лехт, Н.А.Силантьев, Практическая радиоастрономия: Учебное пособие. МГУ, 2011 г. на основе приземных метеоданных, и нашими определениями методом наименьших квадратов в ходе разрезов по Луне.

Дата	Расчёт по формуле А.М.Толмачёва	Измерения по Луне
7.06.2024	0.138	0.243
8.08.2024	0.118	0.233
9.08.2024	0.131	0.233
0.08.2024	0.117	0.235

Измерения яркостной температуры Луны с учётом и без поглощения в атмосфере на 22.235 ГГц

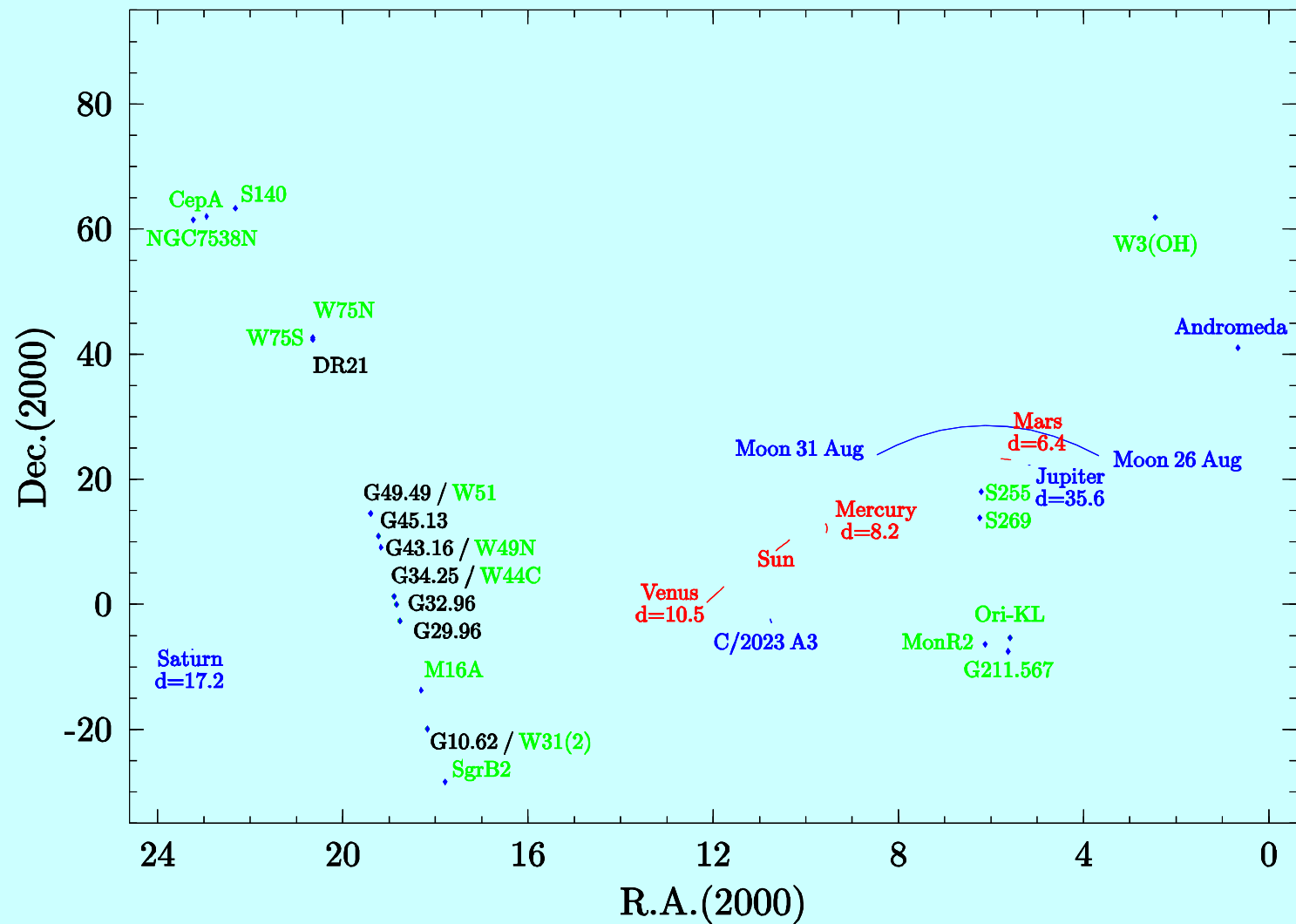


Измерения яркостной температуры Луны с учётом и без поглощения в атмосфере на 22.235 ГГц



Положения на небе источников при оптимальном расположении Луны для определения поглощения атмосферы

Данная картина, повторяющаяся в отношении Луны каждые 4 недели, позволяет максимально эффективно распределять наблюдательное время между измерениями мазеров и мониторингом атмосферы. Зелёным показаны яркие мазеры H_2O .



АЧХ фильтров на входе коррелятора в полосе 3.125, 6.25, 12.5 и 50 МГц

Спектральные наблюдения с автокоррелятором

Файл Параметры наблюдений Автокоррелятор Частота Юстировка Мерцания Регистрац

80 из 80

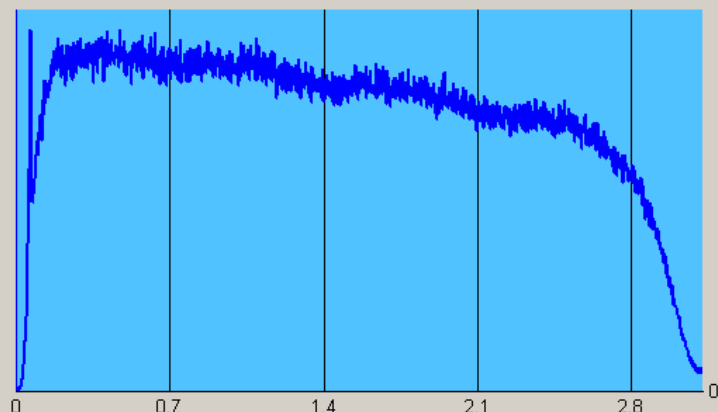
29 из 80

0 из 80

Накопление ГШ

Накопление OFF

Накопление ON



Азимут

A : 315гр 19м 27.7с Н
Арасч: 315гр 19м 31.8с Нрасч:
ошибка: 0гр 0м 4.2с оши

фиксированный масштаб

Xmin 0

Xmax

Ymin 0

Ymax

☒ использовать

вывести график

☒ текущий

Рисовать

Спектральные наблюдения с автокоррелятором

Файл Параметры наблюдений Автокоррелятор Частота Юстировка Мерца

80 из 80

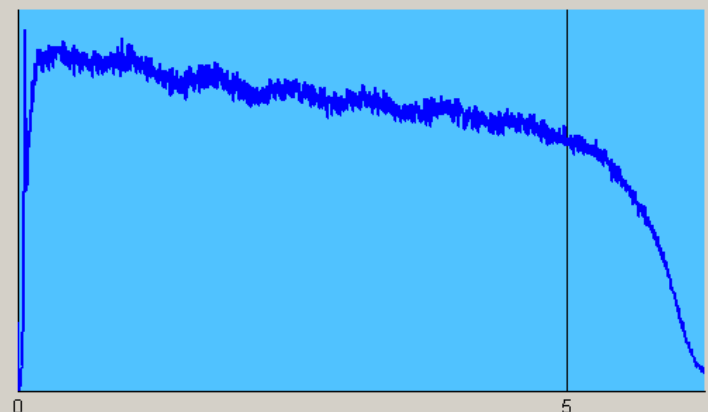
39 из 80

0 из 80

Накопление ГШ

Накопление OFF

Накопление ON



Азимут

A : 307гр 43 Н
Арасч: 307гр 43 Нрасч:
ошибка: 0гр оши

фиксированный масштаб

Xmin 0

Ymin 0

☒ использовать

вывести график

☒ текущий

Рисовать

Спектральные наблюдения с автокоррелятором

Файл Параметры наблюдений Автокоррелятор Частота Юстировка Мерцания Регистрация

80 из 80

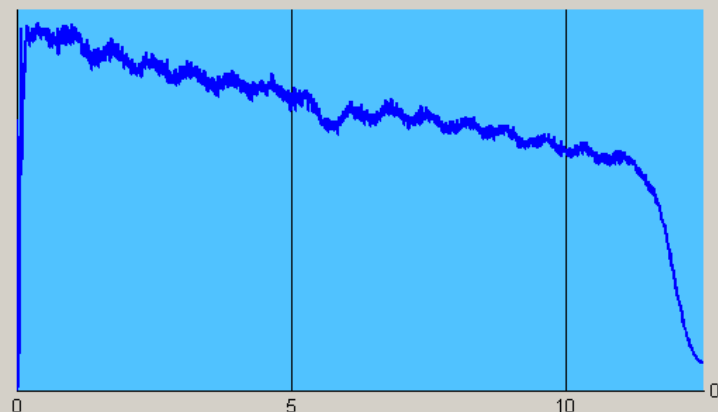
37 из 80

0 из 80

Накопление ГШ

Накопление OFF

Накопление ON



Азимут

A : 305гр 50м 15.7с Н Угол
Арасч: 305гр 50м 20.9с Н : 5
ошибка: 0гр 0м 5.2с ошибк:

фиксированный масштаб

Xmin 0

Xmax 1

Ymin 0

Ymax 1

☒ использовать

вывести график

☒ текущий

☐ средний

Рисовать

Спектральные наблюдения с автокоррелятором

Файл Параметры наблюдений Автокоррелятор Частота Юстировка Мер

80 из 80

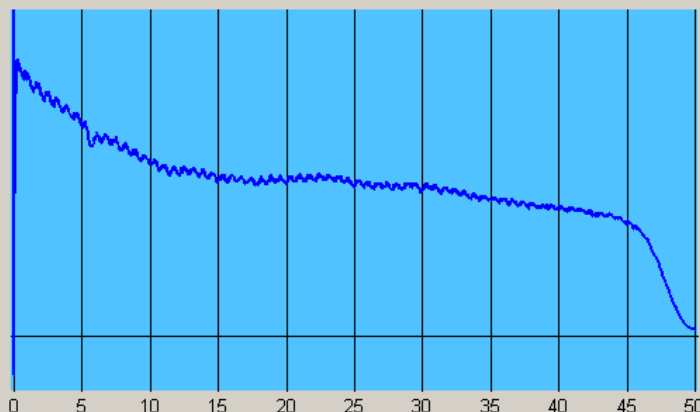
6 из 80

0 из 80

Накопление ГШ

Накопление OFF

Накопление ON



Азимут

A : 295гр Н
Арасч: 295гр Нрасч:
ошибка: 0 ошибк:

фиксированный масштаб

Xmin 0

Ymin 0

☒ использовать

вывести график

☒ текущий

☐ средний

Рисовать

Накопление

Температура

Запустить

Остановить

Тлевого

330.4

Тправого

259.4

быстрый доступ

Накопление

Температура

Запустить

Остановить

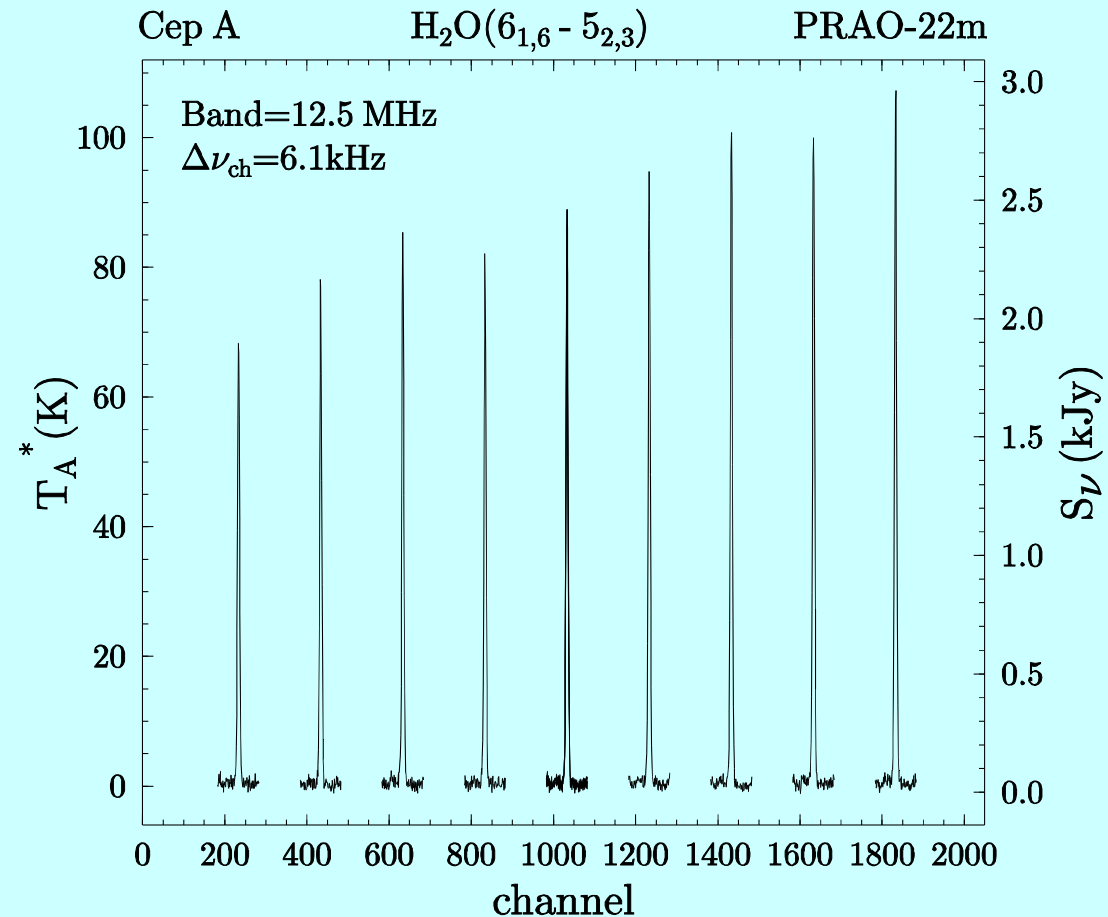
Тлевого

342.6

Тправого

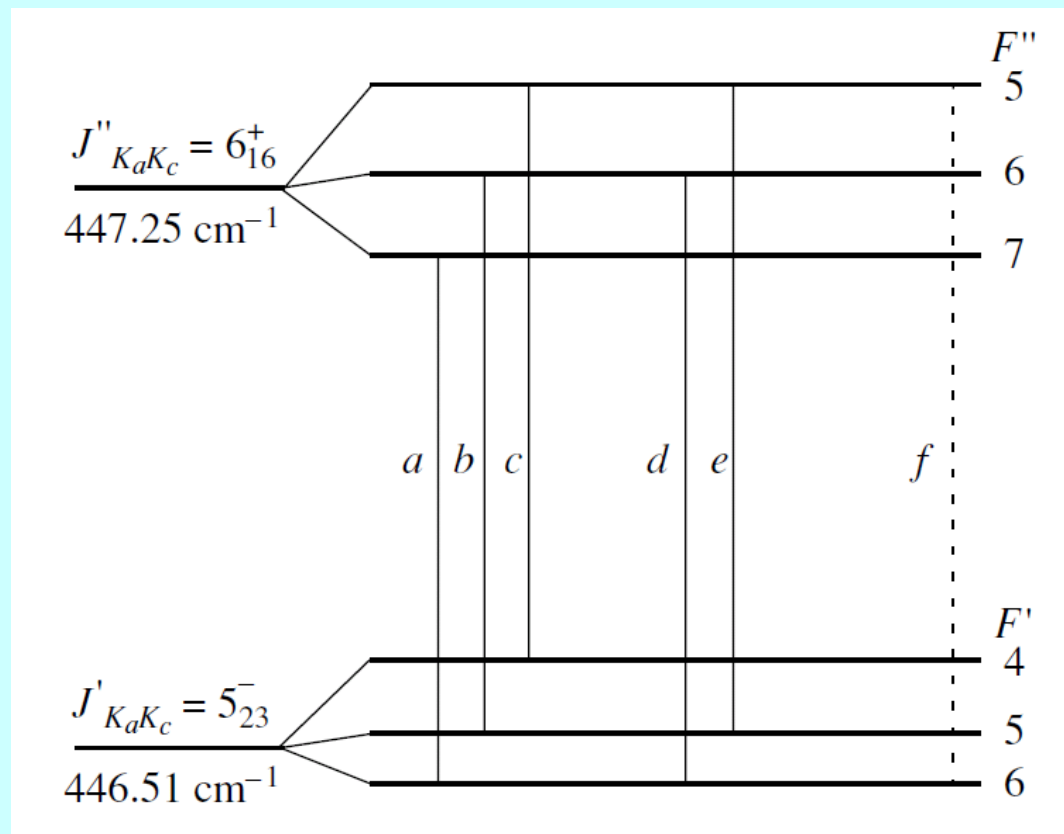
271.6

Пример зависимости интенсивности мазерной линии от положения внутри анализатора спектра, обусловленный игнорированием формы АЧХ на входе автокоррелятора



Формализм сверхтонкого расщепления молекулы H_2O

Варшалович и др. 2006



$$\Delta E_F(J) = A_J X(J, F) + B_J Y(J, F),$$

$$\sum_F (2F + 1) \Delta E_F = 0.$$

$$X(J, F) = F(F + 1) - J(J + 1) - I(I + 1),$$

$$Y(J, F) = X(X + 1) - \frac{4}{3} J(J + 1) I(I + 1).$$

Предшествующие исследования

1. Д.А. Варшалович, А.И. Иванчик, Н.С. Бабковская, Письма в АЖ, т.32, No.1, с.32-41 (2006).
2. S. Kukolich, J. Chem. Phys. 50, 3751 (1969).
3. H. Bluysen, A. Dymanus, and J. Verhoeven, Phys. Lett. 24A, 482 (1967)

Коламбус, июнь 2013



John Muentner (in the right) obtained the most precise hf constants for HC_3N :

$$eQq_N = -4319.24(1) \text{ kHz}, C_N = 0.976(1) \text{ kHz}$$

R.L. DeLeon and J.S. Muentner, 1985, J.Chem.Phys. 82, 1702
as well as

$$\mu_0(\text{H C}_3\text{N}) = 3.73172(1) \text{ D}$$

R.L. DeLeon and J.S. Muentner, 1985, JCP 82, 1702

$$\mu_0(\text{NH}_3) = 1.47179(15) \text{ D}$$

M.D. Marshall and J.S. Muentner, 1981, JMS 85, 322



Steve Kukolich (in the right) obtained the most precise frequencies for NH_3 :

$$\text{NH}_3 \text{ J,K}=1,1 \quad \nu_{\text{inv}} = 23694.495487(48) \text{ MHz}$$

18 hf components, $\sigma_v = 0.61 \text{ m/s}$

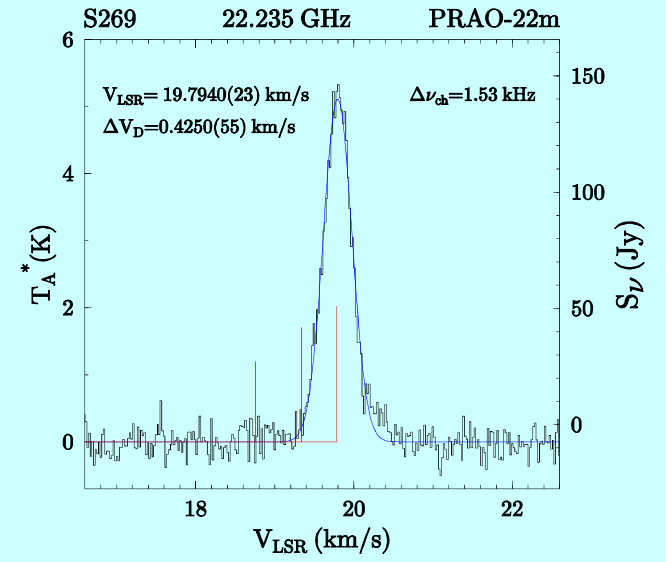
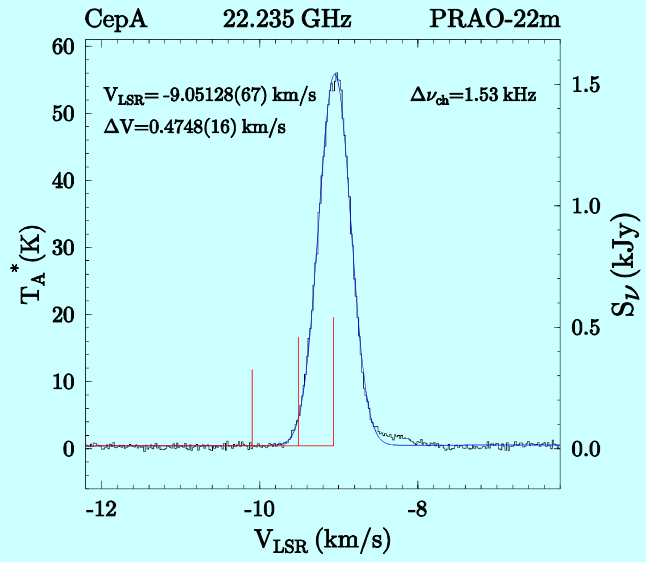
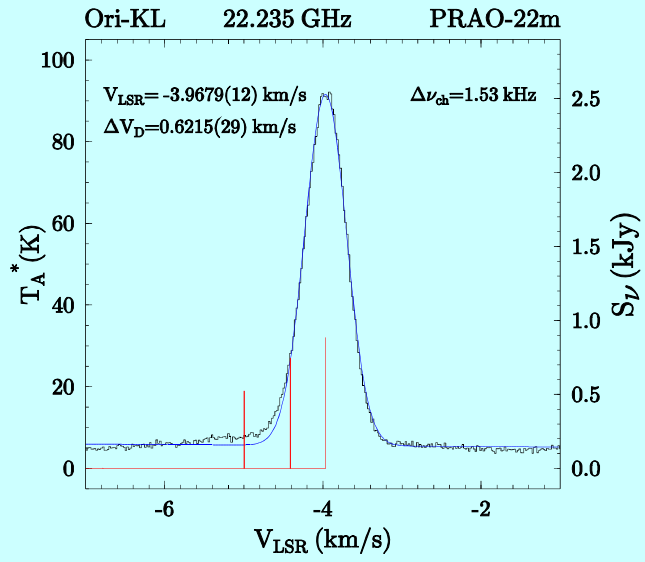
S.G. Kukolich, 1967, Phys.Rev. 156, 83

International Symposium on Molecular Spectroscopy
68th Meeting - June 17-21, 2013

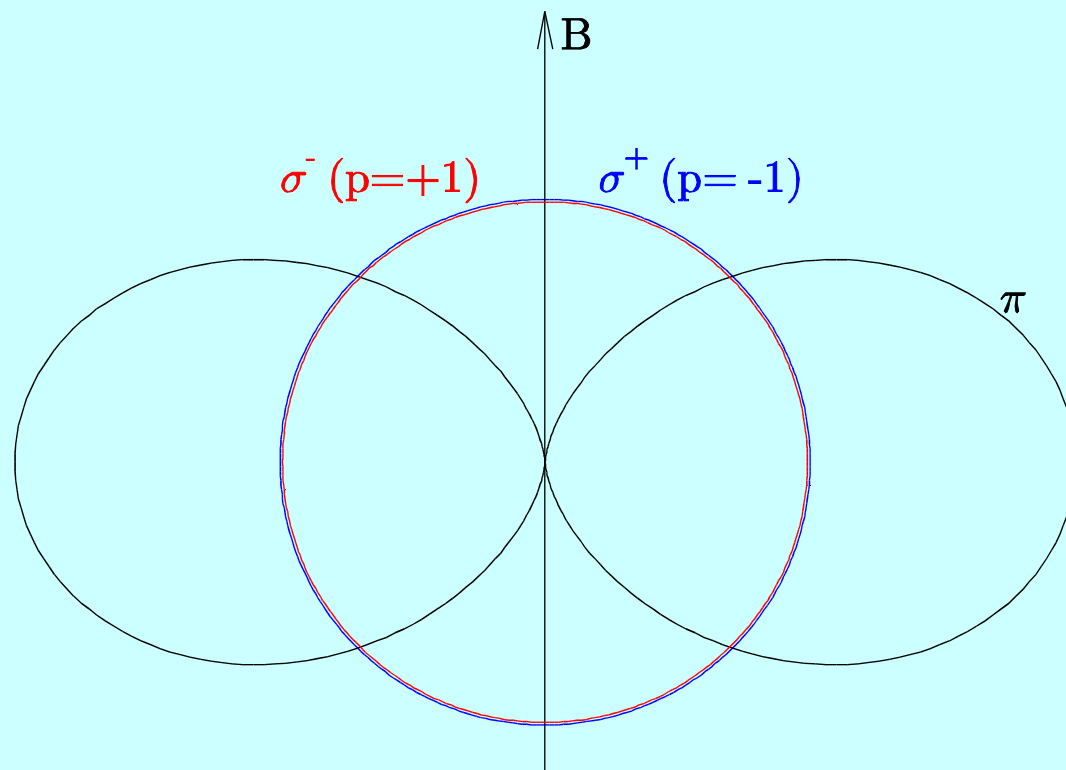
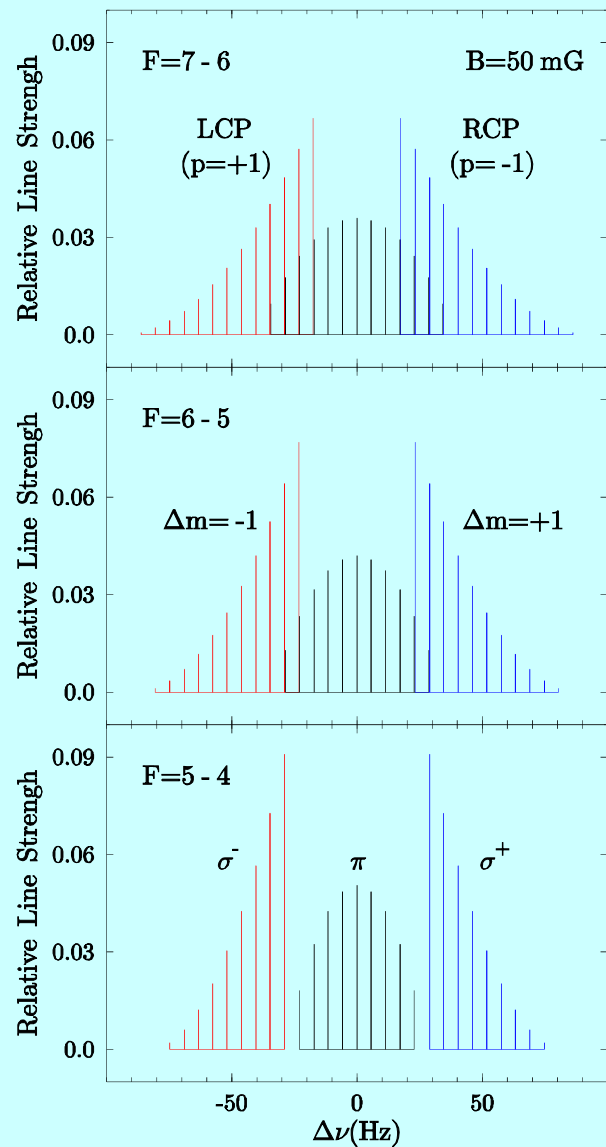
Рассчитанные частоты сверхтонких компонент в переходе $J_{K_a,K_c}=6_{1,6}-5_{2,3}$ молекулы H_2O с учётом спин-вращательного и спин-спинового взаимодействия

Переход	Частота	σ	Сдвиг	σ	Отн. вес	Ссылка
	(кГц)	(кГц)	(км/с)	(км/с)		
F=7– 6	22 235 044.002	0.026	0.48330	0.00035	0.38461538	Наша работа
F=6– 5	22 235 077.063	0.026	0.03754	0.00035	0.32407407	Наша работа
F=5– 4	22 235 120.341	0.025	-0.54597	0.00033	0.27272727	Наша работа
F=6– 6	22 235 252.795	0.720	-2.33183	0.00970	0.00925926	Наша работа
F=5– 5	22 235 297.849	0.614	-2.93928	0.00828	0.00925926	Наша работа
F=5– 6	22 235 473.581	0.947	-5.30865	0.01277	0.00006475	Наша работа
ν_0	22 235 079.847	0.018	0	0	1	Наша работа
ν_0	22 235 079.846	0.050	0	0	1	Kuk, 1969
ν_0	22 235 080.452	0.037	0	0	1	BDV, 1967

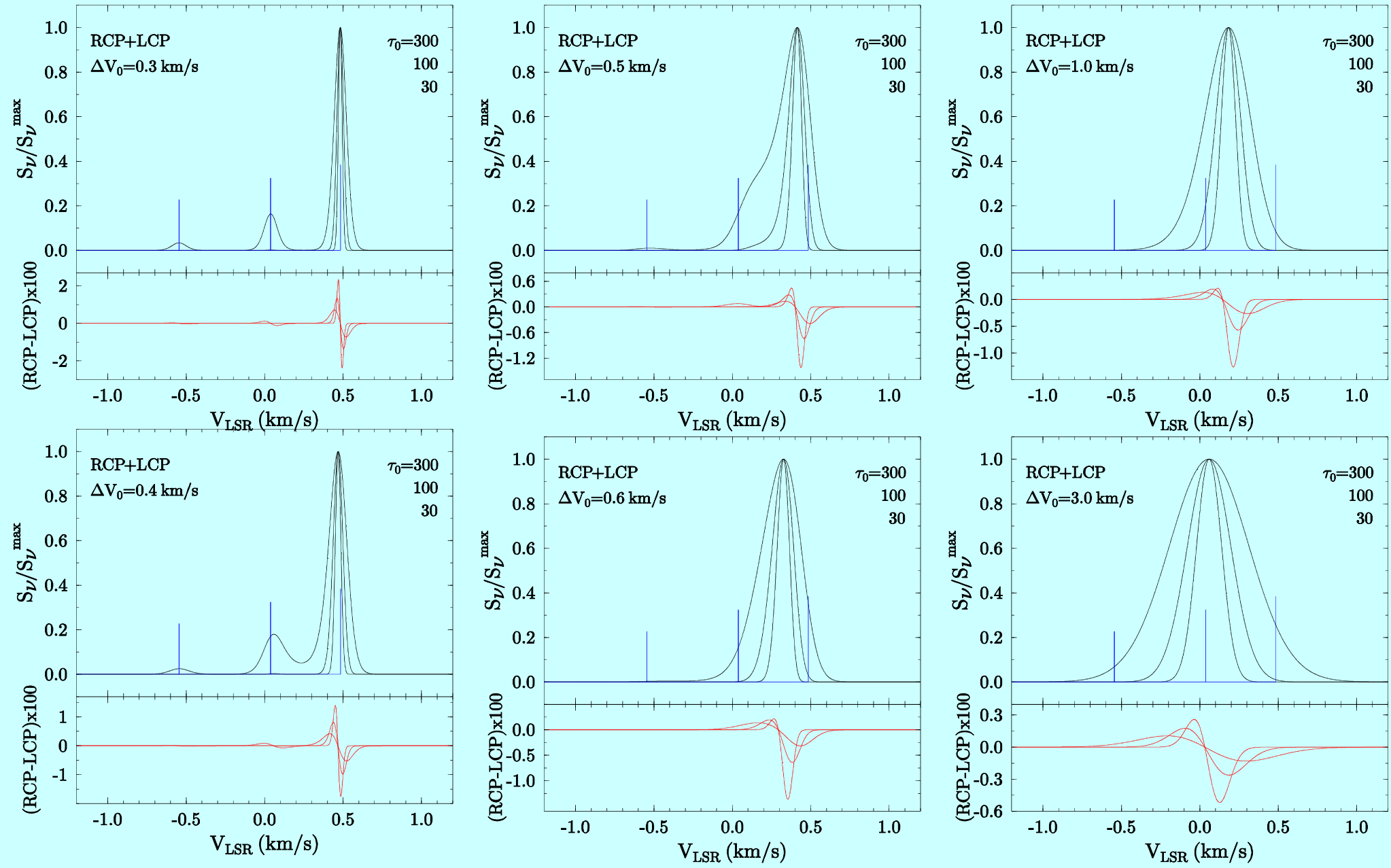
Примеры измерений на РТ-22 ПРАО наиболее узких мазерных линий в переходе $J_{K_a,K_c} = 6_{1,6} - 5_{2,3}$ молекулы H_2O



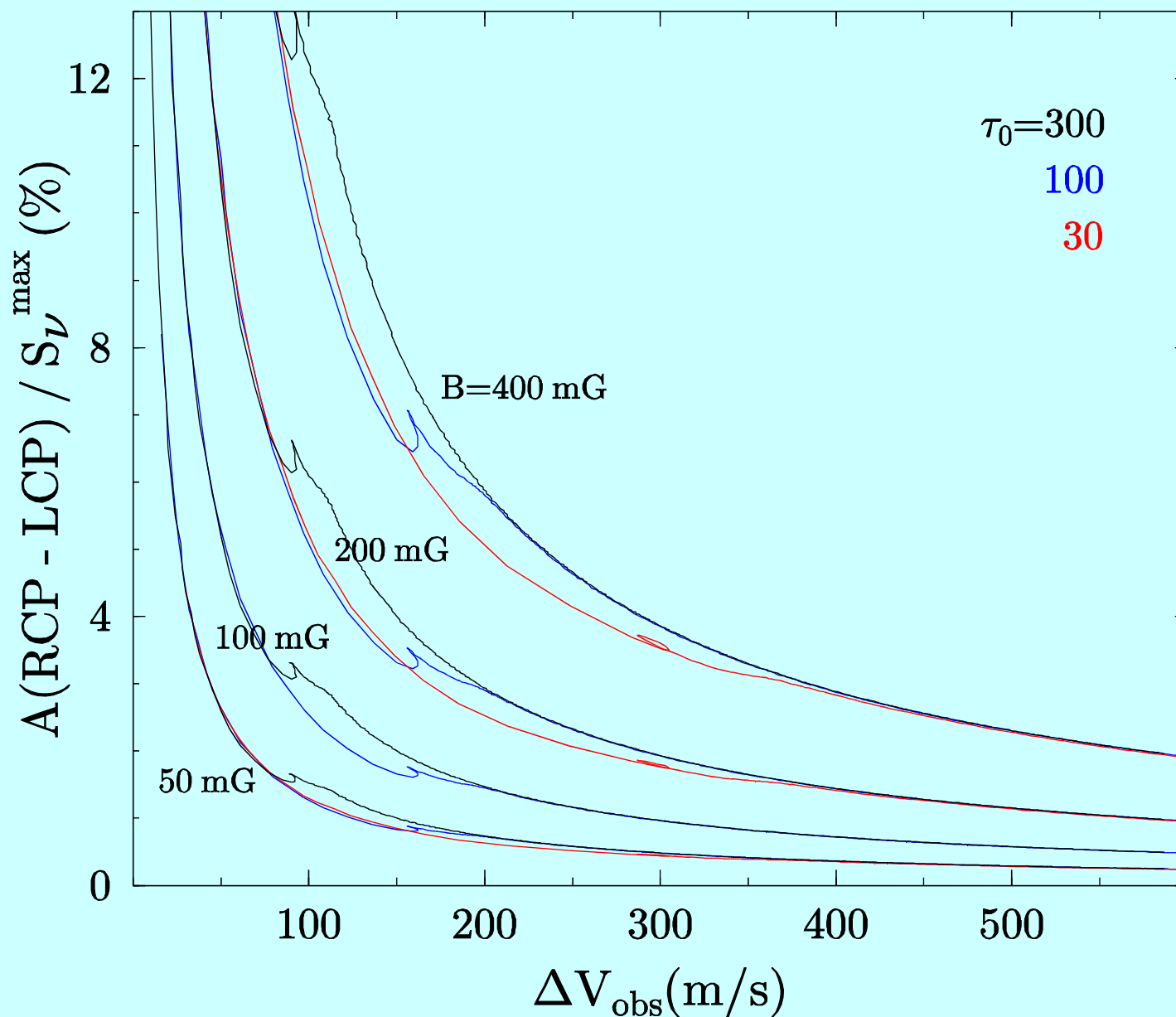
Эффект Зеемана в переходе $J_{K_a, K_c} = 6_{1,6} - 5_{2,3}$ молекулы H_2O с учётом спин-вращательного и спин-спинового взаимодействия



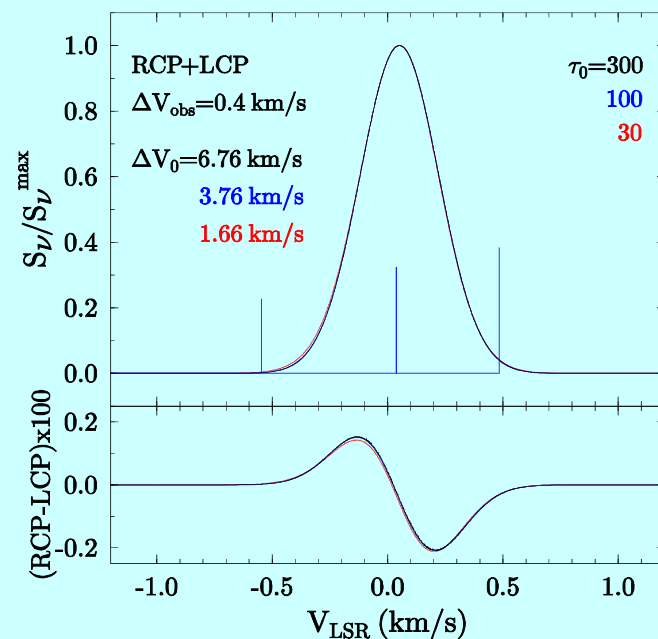
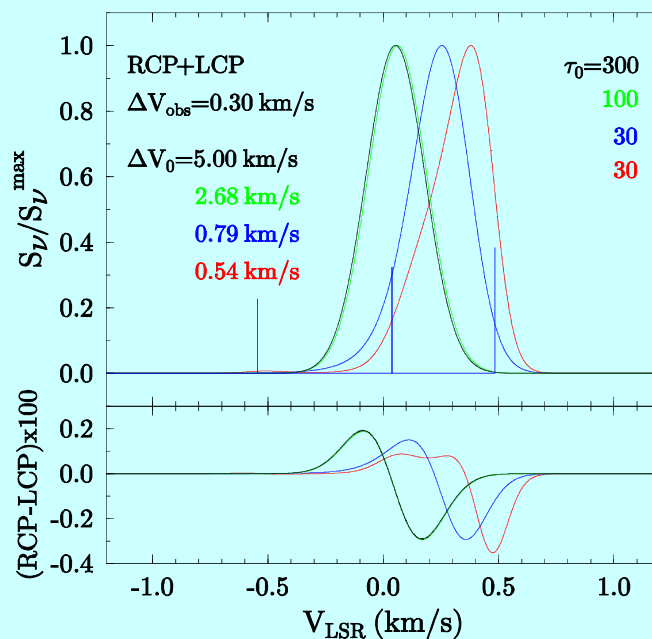
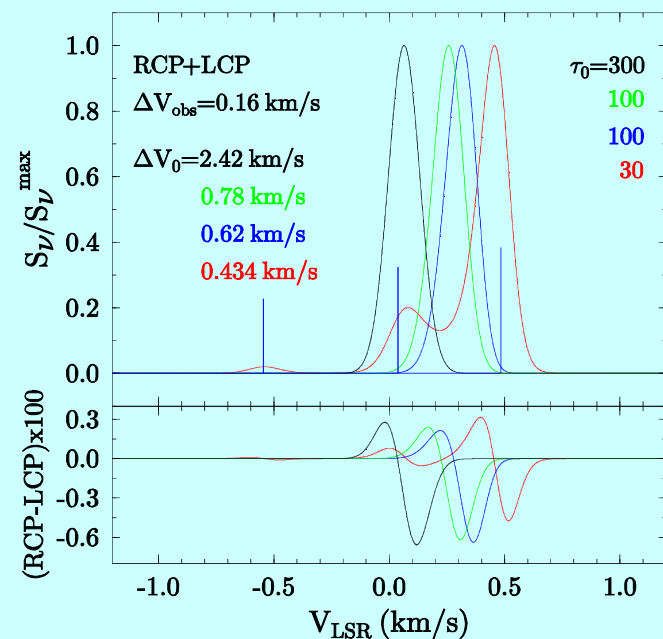
Модельные профили линий в переходе $J_{\text{Ka,Kc}}=6_{1,6}-5_{2,3}$ молекулы H_2O при наблюдениях вдоль линий магнитного поля при разных значениях ΔV_0 и τ



Чувствительность измерений магнитного поля в переходе $J_{K_a, K_c} = 6_{1,6} - 5_{2,3}$
 молекулы H_2O от ΔV_{obs} и τ



Модельные профили линий в переходе $J_{K_a,K_c}=6_{1,6}-5_{2,3}$ молекулы H_2O при наблюдениях вдоль линий магнитного поля при разных значениях ΔV_{obs} и τ



РТ-15 в ЗИМЁНКАХ

<https://ipbatman.blogspot.com/2020/05/astronomicheseskaya-observatoriya-v-zimenkah.html>

Sanna et al. 2017A&A603_A94

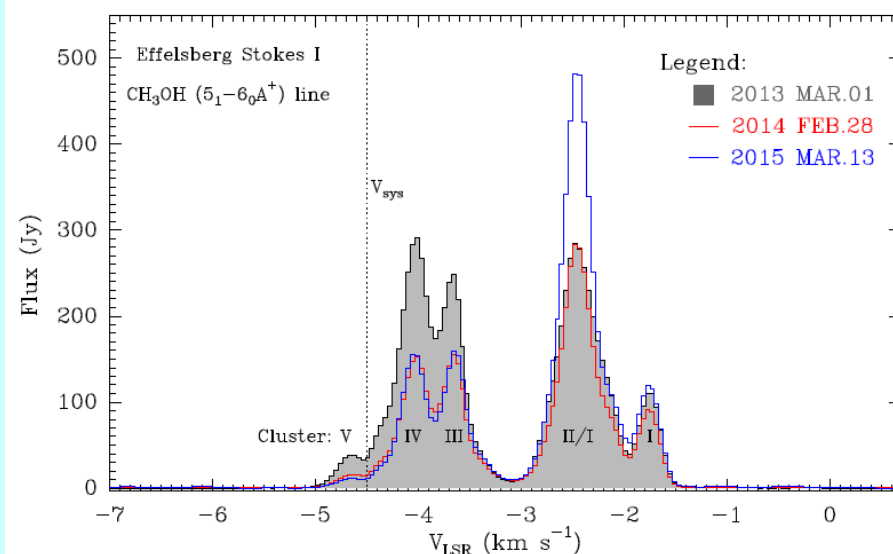
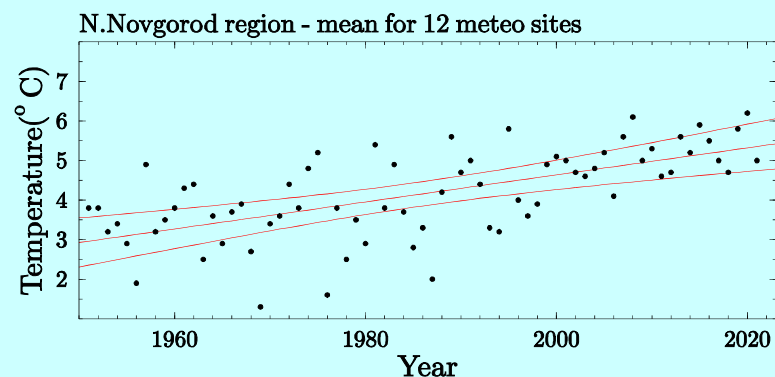
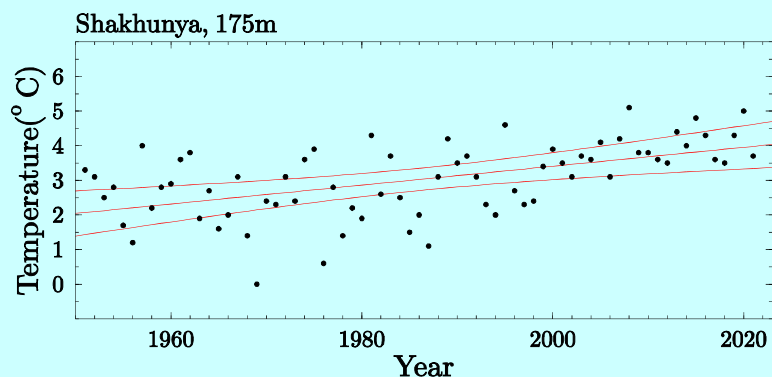
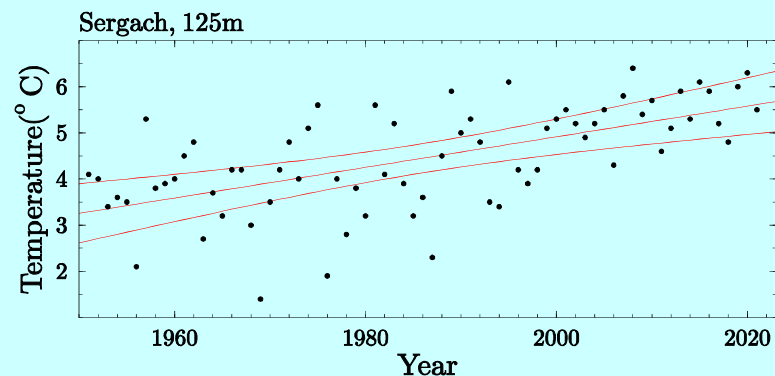
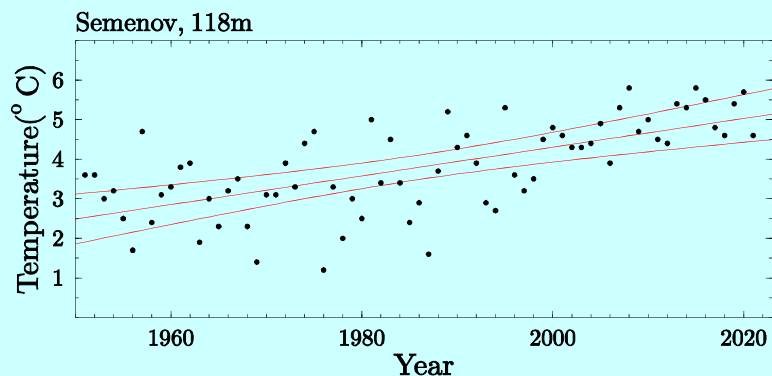
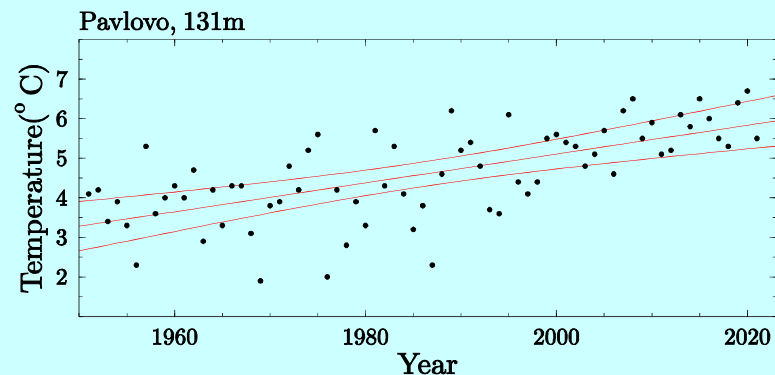
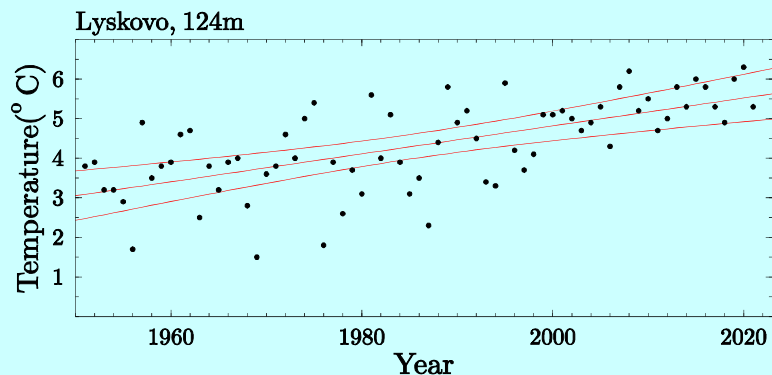


Fig. 1. Effelsberg total-power spectra toward Cepheus A HW2 obtained from the EVN observations at C band. Observing dates are indicated in the top right corner. The dotted vertical line indicates the rest velocity (V_{sys}) of the HW2 object. According to Fig. 2, maser emission associated with the different clusters is also indicated.

Поведение среднегодовой температуры в Нижегородской обл.



Видно, что разброс точек обусловлен реальными среднегодовыми флуктуациями температуры, а не шумом.

Вид на юг с места предполагаемого
строительства радиотелескопа в Н.Новгороде
диапазона длин волн до 3 мм



Yebes 40m Observatory, Spain
(1999 - 2007)



National Astronomical Research
Institute of Thailand, Mon 3 Feb 2020



Спасибо за внимание!