

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МАТЕМАТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ

Околзвёдные мазеры.

Волобуева Мария Игоревна

11 ДЕКАБРЯ 2013 Г.

Содержание

1	Общие сведения о мазерах	2
1.1	Мазерный эффект	2
1.2	История открытия астрофизических мазеров	2
1.3	Типы мазеров	2
2	Наблюдения	3
2.1	Спектральные линии и классы звёзд	3
2.2	Размеры мазерных оболочек и их структура	5
2.3	Профили линий	8
2.4	Переменность	10
3	Модели и интерпретация наблюдений	14
3.1	Расположение мазерных областей в оболочке	14
3.2	Модель расширяющейся оболочки	15
3.3	Определение параметров оболочек	17
4	Список литературы	18

1 Общие сведения о мазерах

1.1 Мазерный эффект

Мазерный эффект - усиление интенсивности проходящего через космическую среду радиоизлучения за счёт индуцированного испускания резонансных фотонов возбуждёнными молекулами среды.

Мазерный эффект возникает при сильном отклонении населённостей уровней атомов или молекул от термодинамического равновесия. Распределение молекул по энергетическим уровням отклоняется от равновесного, описываемого формулой Больцмана. На верхнем уровне перехода, образующего спектральную линию, создаётся избыток населённости по отношению к нижнему уровню ("инверсия населённостей"). Проходящее радиоизлучение на частоте инвертированного перехода вызывает лавину вынужденных переходов и многократно усиливается. Создание инверсной населённости ("накачка") молекулярных уровней может производиться, например, ИК-излучением звёзд или воздействием ударных волн.

1.2 История открытия астрофизических мазеров

- В 1965 году группа учёных из США (Х. Уивер и др.) обнаружила в спектрах радиоизлучения некоторых источников (туманности Ориона, Стрелец В2, W3, W49 и др.) очень интенсивные узкие линии излучения с $\lambda = 18$ см. Первоначально полагали, что эти линии принадлежат неизвестному, но широко распространённому в космосе веществу - "мистериуму". Дальнейшие исследования показали, что линии принадлежат межзвёздному гидроксиду ОН, а их аномальные свойства (чрезвычайная узость и высокая интенсивность) обусловлены мазерным механизмом излучения.
- В 1969 году были открыты ещё более мощные источники космического мазерного излучения с $\lambda = 1.35$ см, соответствующие излучению молекул водяного пара H_2O .
- В 1974-75 гг. были обнаружены мазерные источники, работающие на молекулах оксида кремния SiO и метилового спирта CH_3OH .

1.3 Типы мазеров

В нашей и в соседних галактиках обнаружено несколько сотен космических мазеров. Их можно разделить на два основных типа:

- **Мазеры в областях звездообразования.**
Эти мазеры связаны с молодыми горячими ОВ-звёздами (возможно, также с прото-звёздами), и находятся на периферии плотных газово-пылевых комплексов. Они обладают наибольшей мощностью (до 10^{33} эрг/с), а их излучение сильно поляризовано.
- **Мазеры вблизи звёзд поздних спектральных классов.**
Они находятся в расширяющихся оболочках сильно проэволюционировавших холодных звёзд большой светимости, ИК-излучение которых и обеспечивает накачку. Эти мазеры более многочисленны, но их мощность меньше (до 10^{28} эрг/с).

В дальнейшем речь пойдёт именно о втором типе мазеров, то есть о мазерах в околозвёздных оболочках.

2 Наблюдения

2.1 Спектральные линии и классы звёзд

Мазерная эмиссия - один из случаев молекулярного радиоизлучения в околозвёздных оболочках.

Наиболее распространёнными источниками мазерного излучения являются следующие молекулы:

- гидроксил OH ($\lambda = 18$ см);
- водяной пар H_2O ($\lambda = 1.35$ см);
- оксид кремния SiO ($\lambda = 3.5$ мм, $\lambda = 7$ мм и др.);
- синильная кислота HCN ($\lambda = 3.3$ мм и др.).

Мазерное излучение характерно для протяжённых оболочек звёзд поздних спектральных классов, причём звёздам разных спектральных классов соответствуют мазеры на линиях разных молекул.

- Мазеры на линиях кислородосодержащих молекул (OH , H_2O , SiO) наиболее характерны для богатых кислородом звёзд класса М.
- Мазерные линии молекул SiO , помимо М-звёзд, наблюдаются так же и в циркониевых звёздах (S-звёздах).
- Мазерные линии молекул HCN найдены лишь в нескольких углеродных звёздах (C-звёздах).

Некоторые мазерные линии, наблюдающиеся в околозвёздных оболочках:

Молекула	Переход	Частота, МГц
ОН	${}^2\Pi_{3/2}, J = 3/2, F = 1-2$	1612.231
	$F = 1-1$	1665.402
	$F = 2-2$	1667.359
H ₂ O	<i>ortho</i> 6 ₁₆ -5 ₂₃	22235.080
	<i>para</i> 3 ₁₃ -2 ₂₀	183310.0906
	<i>ortho</i> 10 ₂₉ -9 ₃₆	321225.64
	<i>para</i> 5 ₁₅ -4 ₂₂	325152.919
	<i>ortho</i> 1 ₁₀ -1 ₀₁	556936.002
SiO	$v = 0, J = 1-0$	43423.798
	$v = 0, J = 2-1$	86846.891
	$v = 0, J = 10-9$	434120.31
	$v = 1, J = 1-0$	43122.027
	$v = 1, J = 2-1$	86243.350
	$v = 1, J = 5-4$	215596.037
	$v = 2, J = 1-0$	42820.539
	$v = 2, J = 2-1$	85640.373
	$v = 2, J = 5-4$	214088.594
$v = 3, J = 1-0$	42519.33	

2.2 Размеры мазерных оболочек и их структура

Слои вещества, излучающие в радиолиниях молекул, расположены в околозвёздной оболочке, дальше от центра звезды, чем фотосферные слои, создающие молекулярные полосы поглощения в видимом и ИК-диапазоне. Мазерное излучение молекул прослеживается на расстояниях от $R \approx 3 \cdot 10^{13}$ см (то есть практически от фотосферы) до $R \approx 10^{16}$ см и даже 10^{17} см. То есть, мазерные оболочки могут достигать размеров в несколько сотен и даже тысяч астрономических единиц, что позволяет разрешить их с помощью наземных радиоинтерферометров (например, таких как MERLIN).

Картографирование радиоизлучения молекул с высоким угловым разрешением при помощи интерферометров позволяет проследить структуру околозвёздной оболочки, распределение вещества и поле скоростей в ней.

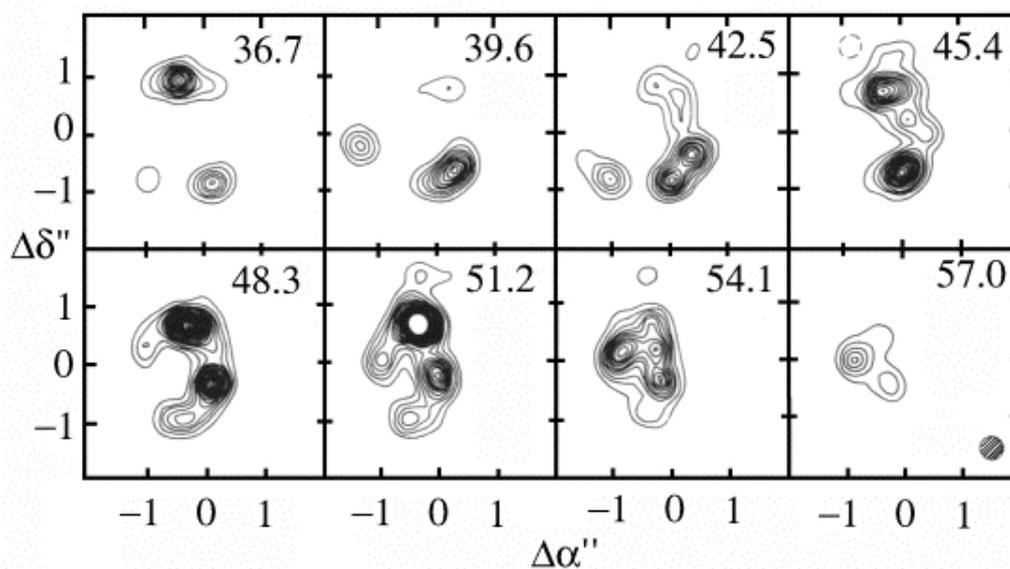


Рис. 1: Карты распределения радиоизлучения в мазерной линии гидроксила OH сверхгиганта VY CMa на разных лучевых скоростях.¹

¹http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/2_3.html#ris2_21

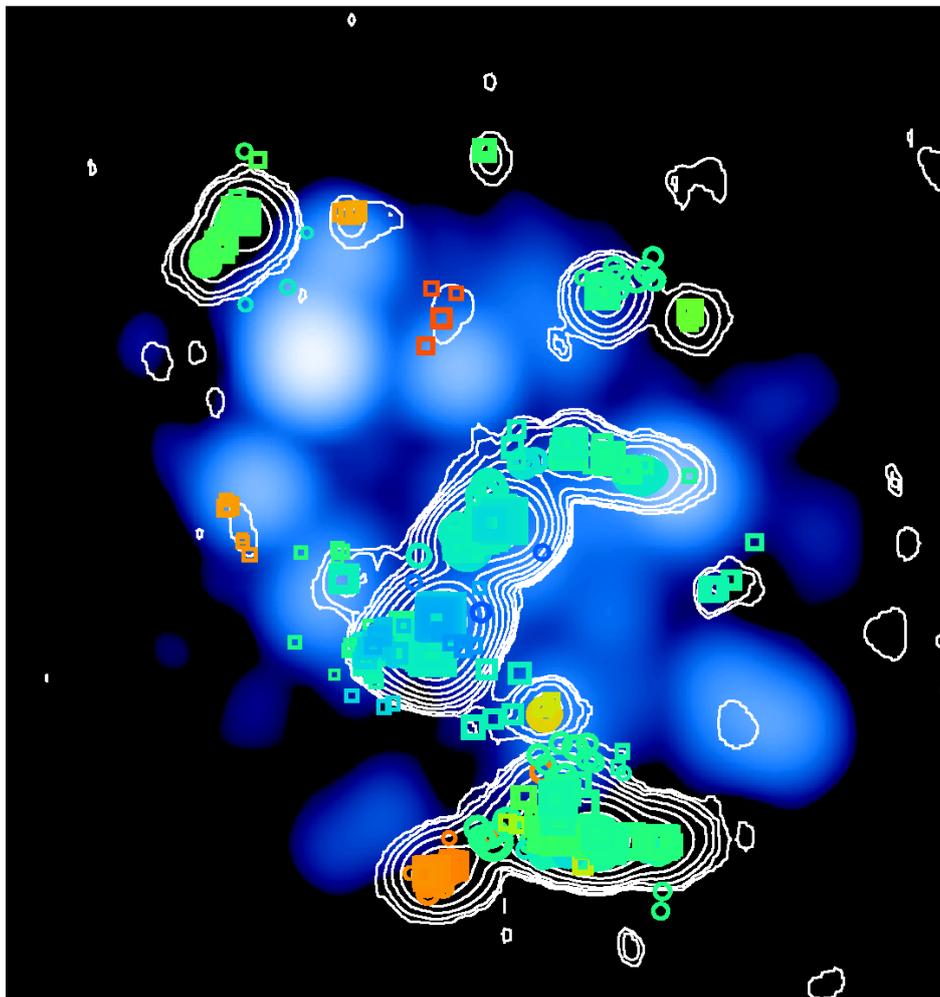


Рис. 2: Карта мазерной эмиссии оболочки звезды S Per в линии водяного пара H_2O на частоте 22 ГГц.² Символами обозначены местоположения гидроксильных мазеров OH. Линейный размер изображения составляет порядка 370 а.е.

²http://www.jb.man.ac.uk/news/2007/cauldrons/SPER_WATER_OH.png

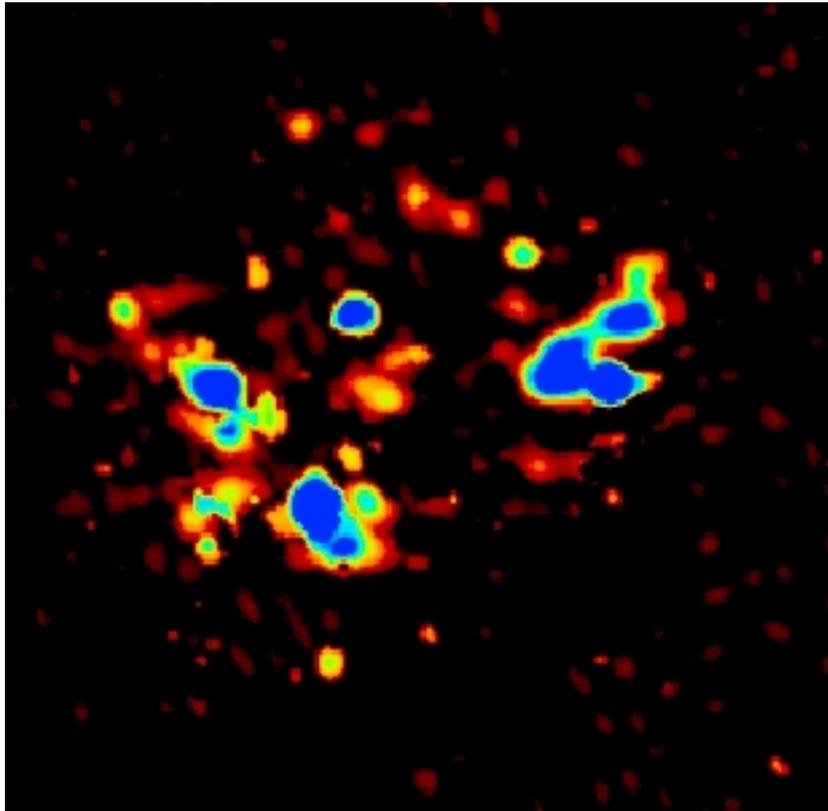


Рис. 3: Карта мазерной эмиссии оболочки звезды ИК Тау в линии водяного пара H_2O на частоте 22 ГГц, полученная с помощью наземного интерферометра MERLIN.³

³<http://www.jb.man.ac.uk/research/spectralline/RSG.jpg>

2.3 Профили линий

Типичный профиль линий околозвёздных мазеров (особенно это характерно для линии гидроксила ОН 1612 МГц) состоит из двух максимумов, отстоящих друг от друга по лучевой скорости на величину от 5 до 60 км/с, и "провала" между ними.

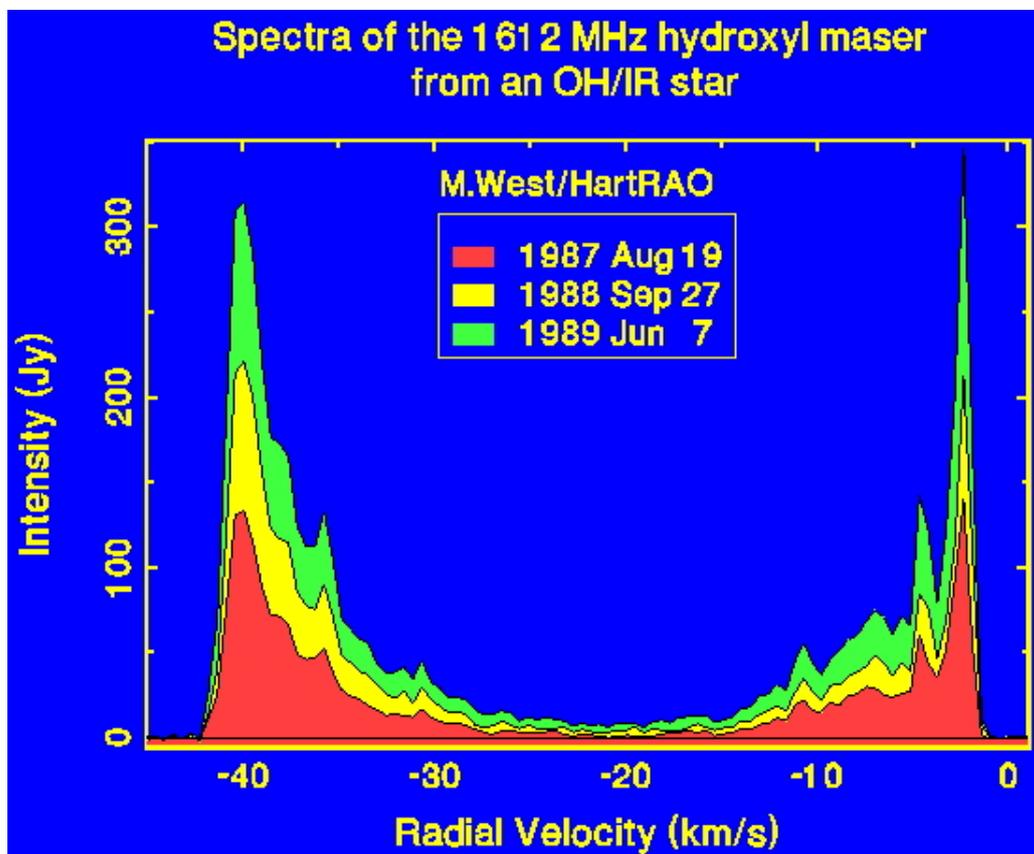


Рис. 4: Характерный U-образный профиль мазерной линии гидроксила ОН источника ОН357.3-1.4 (звезды типа ОН/IR).⁴

⁴<http://www.hartrao.ac.za/spectra/ohir.gif>

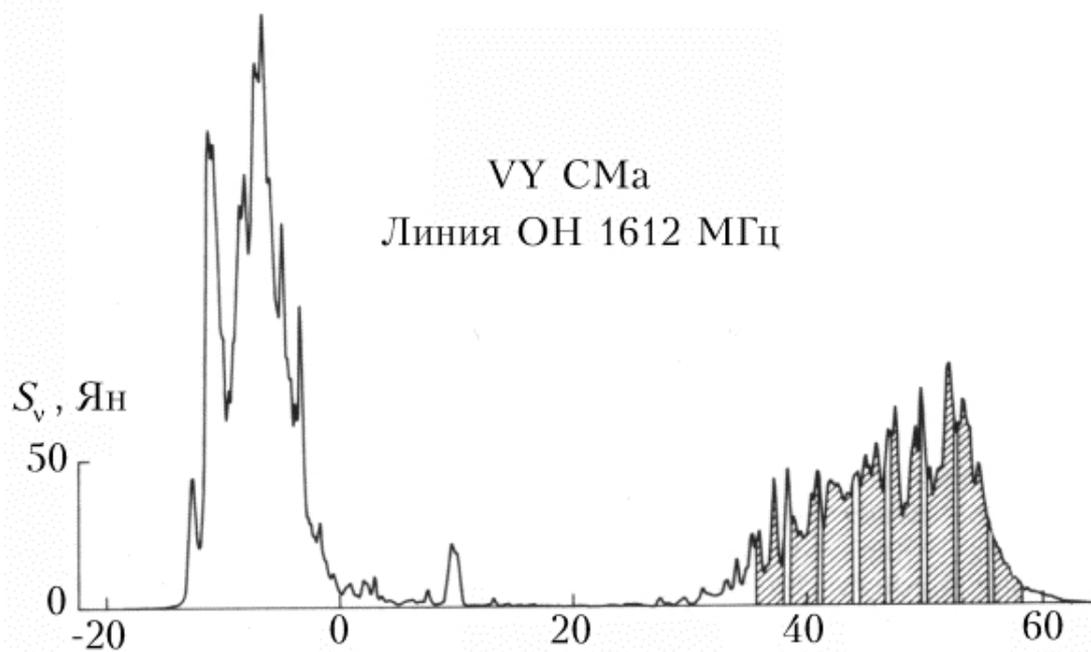


Рис. 5: Профиль мазерной линии гидроксила OH в оболочке сверхгиганта VY CMa.⁵
Примечание: закрашенные "столбики" в правой части профиля соответствуют картам радиоизлучения на Рис. 1.

Вообще говоря, спектры мазерного излучения могут иметь довольно сложный вид, так как в оболочке может располагаться несколько излучающих областей с разными лучевыми скоростями, линии которых будут накладываться друг на друга.

⁵http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/2_3.html#ris2_21

2.4 Переменность

Как уже упоминалось выше, околозвёздные мазеры находятся в оболочках звёзд большой светимости, находящихся на поздних этапах эволюции.

На стадии красного гиганта или асимптотической ветви гигантов (АВГ) многие звёзды пульсационно неустойчивы и испытывают колебания блеска с периодами в несколько сотен суток. Такие звёзды относятся к долгопериодическим переменным (ДПП). Они разделяются на две группы:

- переменные типа Миры Кита (мириды);
- полуправильные переменные (обозначаются SR - от англ. Semiregular).

Мириды - звёзды АВГ с амплитудами переменности блеска в визуальной области больше 2.5^m . Рекорд принадлежит яркой мириде χ Cyg, её амплитуда в визуальных лучах достигает 11^m . Изменения блеска мирид происходит более или менее регулярно. Периоды большинства мирид находятся в интервале от 150 до 600 суток.

Амплитуды полуправильных переменных меньше 2.5^m , а кривые блеска отличаются меньшей регулярностью, чем у мирид. Полуправильные переменные делятся на несколько подтипов:

- SRa - гиганты поздних спектральных классов (M, C или S) с хорошо выраженной периодичностью. Амплитуда и формы кривой блеска могут заметно меняться от цикла к циклу. Периоды лежат в пределах от 35 до 1200 дней. Большинство подобных звёзд отличается от мирид лишь меньшей амплитудой изменения блеска.
- SRb - гиганты поздних спектральных классов (M, C или S) с плохо выраженной периодичностью. Средняя продолжительность цикла лежит в диапазоне от 20 до 2300 дней. У части звёзд наблюдается наличие одновременно нескольких периодов изменения блеска.
- SRc - сверхгиганты поздних классов (M, C или S) с амплитудами около 1^m и периодами от 30 до нескольких тысяч дней.
- SRd - гиганты и сверхгиганты промежуточных спектральных классов F, G, или K с амплитудами изменения блеска от 0.1^m до 4^m и периодами от 30 до 1100 дней.

Систематические обзоры неба в линии OH 1612 МГц позволили обнаружить большое количество (свыше 1000) мазерных радиоисточников, часть из которых была отождествлена с известными ДПП. Остальные источники оказались очень слабыми в оптическом диапазоне. В дальнейшем они были отождествлены с ИК-источниками и составили новый класс объектов - звёзды типа OH/IR. Эти звёзды имеют толстые околозвёздные оболочки, практически непрозрачные в видимой области спектра, так что визуальные величины звёзд OH/IR больше $17-20^m$, в то время как ИК-величины значительно ярче. OH/IR-звёзды тоже переменны, их периоды составляют несколько сот или даже тысяч суток.

Изменения блеска звезды в инфракрасном диапазоне приводят к переменности мазерного излучения, так как меняется мощность ИК-накачки.

При этом "синий" пик линии меняется синхронно с вариациями ИК-блеска звезды, в то время как переменность "красного" пика запаздывает относительно кривых блеска звезды и "синей" части профиля.

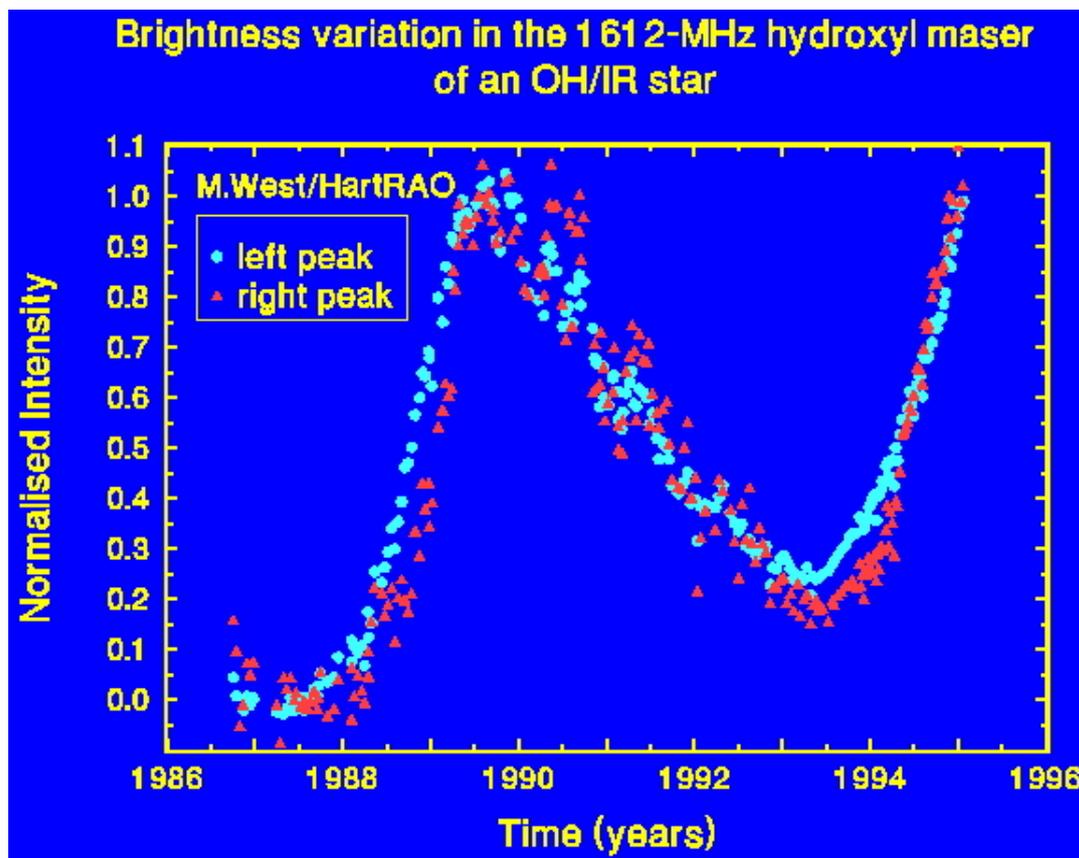


Рис. 6: Вариации блеска мазерного излучения гидроксила OH в оболочке звезды V1185 Sco (звезды типа OH/IR).⁶

⁶<http://www.hartrao.ac.za/spectra/ohirlc.gif>

Примеры долгопериодических переменных, в оболочках которых наблюдаются мазерные линии водяного пара H_2O .

Название	Тип перемен- ности	P , d
Y Cas	M	413
WX Psc	M	660
V669 Cas	M?	...
S Per	SRc	822
R Tri	M	267
RU Ari	M	354
IK Tau	M	470
W Eri	M	377
RS Eri	M	296
R Tau	M	321
T Lep	M	368
NV Aur	M	635
BW Cam	M	...
U Aur	M	408
AW Tau	M	654
U Ori	M	368
AP Lyn	M	...
U Lyn	M	434
GX Mon	M	527
VY CMa	Lb	...
Z Pup	M	509
QX Pup	M	...
HU Pup	SRa	238
U Pup	M	318
R Cnc	M	362
X Hya	M	301
R LMi	M	372
R Leo	M	310
R Crt	SRb	160
S Crt	SRb	155
T Vir	M	339
U CVn	M	346

Название	Тип перемен- ности	P , d
R T Vir	SRb	155
W Hya	SRa	361
RU Hya	M	332
RX Boo	SRb	340
RS Vir	M	354
Y Lib	M	276
S CrB	M	360
WX Ser	M	425
FS Lib	M	415
U Her	M	406
V697 Her	M	475
V2108 Oph	SR:	...
VX Sgr	SRc	732
IRC-10414
V1111 Oph	M	...
RW Lyr	M	504
R Aql	M	284
V3880 Sgr	M	510
RT Aql	M	327
V391 Cyg	M	405
RR Aql	M	395
SY Aql	M	356
DR Cyg	M	314
V1489 Cyg	M	1280
UX Cyg	M	565
UU Peg	M	456
AM Cep	M	333
SV Peg	SRb	145
V627 Cas	SR:	...
R Peg	M	378
PZ Cas	SRc	925
R Cas	M	430

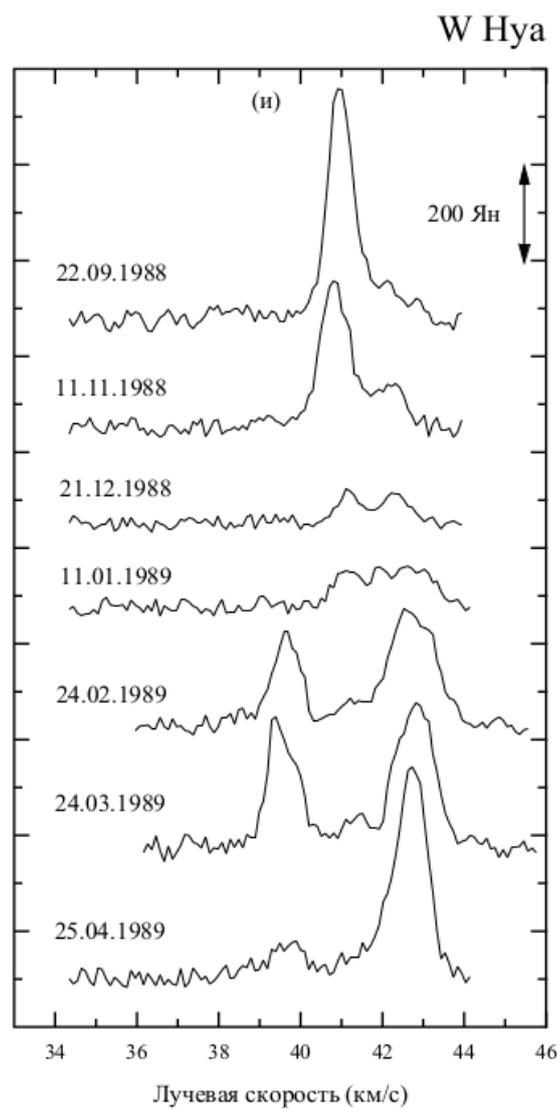


Рис. 7: Переменность профиля мазерной линии H_2O в спектре звезды W Hya.⁷

⁷Рудницкий Г.М., Физические процессы в долгопериодических переменных звёздах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.03.02 / Рудницкий Георгий Михайлович. - М., 2010. - 250 с., рис. П2.50

3 Модели и интерпретация наблюдений

3.1 Расположение мазерных областей в оболочке

В околозвёздной оболочке имеет место иерархическое расположение мазерных областей, излучающих в линиях различных молекул. Такое расположение отражает распределение физических условий (плотности, температуры, потока излучения), необходимых для возбуждения того или иного мазера. Мазеры SiO (а в некоторых углеродных звёздах - мазеры HCN), для возбуждения которых требуются наиболее высокие температура и плотность, расположены ближе всего к фотосфере звезды, в пределах $R \approx 1 - 2$ а.е. Далее следуют мазеры H₂O ($R \approx 3 - 10$ а.е.), мазеры в главных линиях OH 1665 и 1667 МГц и, наконец, мазеры в сателлитной линии OH 1612 МГц ($R \approx 300 - 1000$ а.е.).

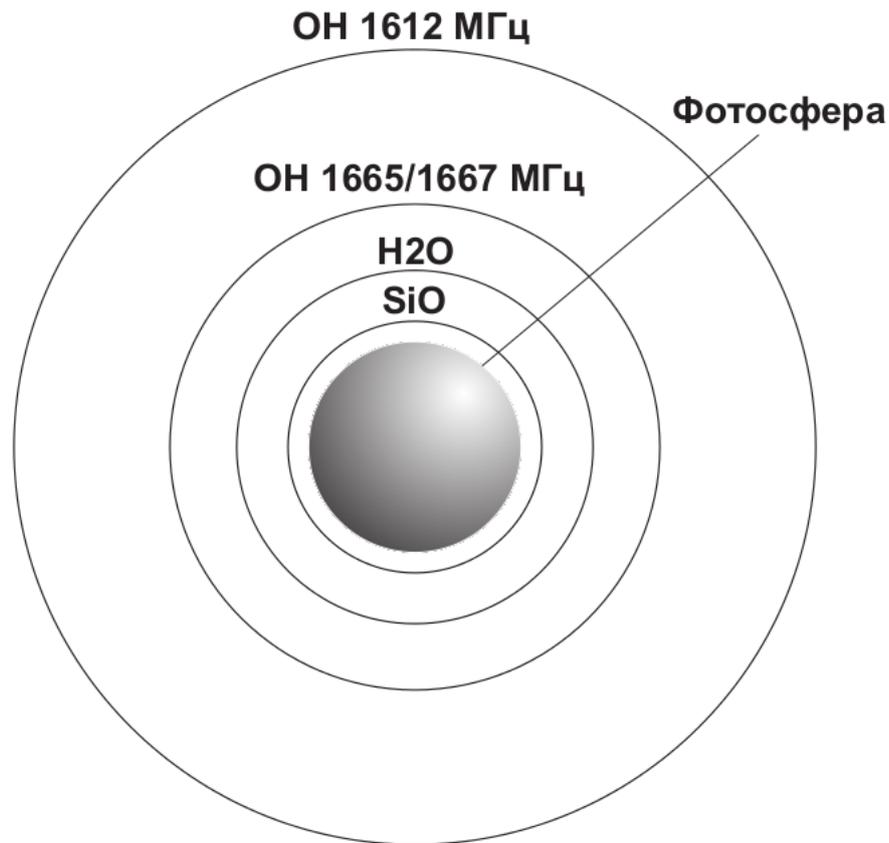


Рис. 8: Иерархия мазерных областей.⁸

⁸Рудницкий Г.М., Физические процессы в долгопериодических переменных звёздах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.03.02 / Рудницкий Георгий Михайлович. - М., 2010. - 21 с., рис. 1.10

3.2 Модель расширяющейся оболочки

U-образная форма профиля и фазовое запаздывание на кривых блеска находят объяснение в модели расширяющейся оболочки, в которой локализованы мазерные молекулы.

Лучевая скорость звезды V_* находится посередине профиля между двумя пиками. Пик на отрицательной скорости (на скорости V_{blue} , имеющий "синее смещение" относительно V_*) образуется в околозвёздном газе, приближающемся к наблюдателю, на ближней стороне околозвёздной оболочки. Излучение на положительных скоростях (с "красным смещением" на скорости V_{red}) поступает с дальней стороны оболочки. Разность скоростей крайних точек профиля есть удвоенная скорость расширения оболочки: $V_{\text{red}} - V_{\text{blue}} = 2V_{\text{exp}}$.

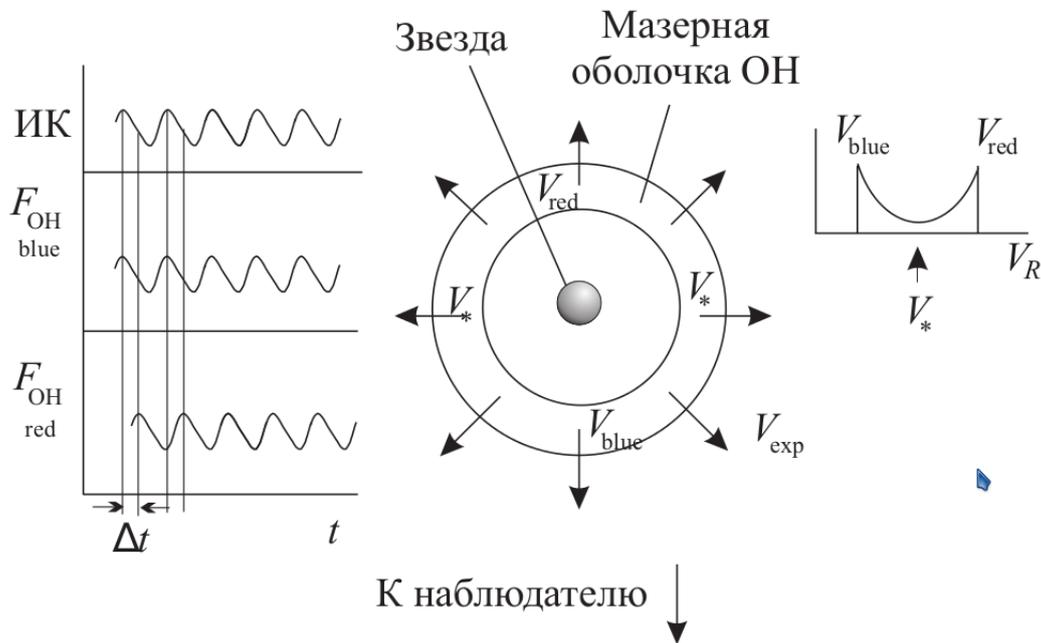


Рис. 9: Модель расширяющейся оболочки.⁹

⁹http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/2_3.html#ris2_20

Модель расширяющейся оболочки объясняет U-образную форму профиля мазерных линий.

Если θ_s - угловой радиус оболочки, то излучение, соответствующее лучевой скорости V , будет поступать от кольца с радиусом

$$\theta = \theta_s \sqrt{1 - \left(\frac{V - V_*}{V_{\text{exp}}} \right)^2}.$$

Излучение на скоростях вблизи лучевой скорости V_* - более слабое, так как оно поступает от лимбовой области в виде кольца вокруг звезды, где велик градиент скоростей вдоль луча зрения и мазерное усиление меньше.

Модель подтверждается наблюдениями мазеров с высоким угловым разрешением. Интерферометрические карты для лучевых скоростей $V_R \approx V_{\text{red}}$ и $V_R \approx V_{\text{blue}}$ показывают яркое пятно в направлении оптического изображения звезды, а изображения для V_R , близких к V_* , имеют вид колец (часто неправильной формы или незамкнутых, вследствие неоднородности оболочки).

3.3 Определение параметров оболочек

По величине фазового запаздывания кривых переменной "синего" и "красного" пиков можно определить линейный размер мазерной оболочки вдоль луча зрения.

Пусть Δt - величина относительного фазового запаздывания, c - скорость света, тогда радиус оболочки

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2}.$$

Полученные таким способом радиусы оболочек составляют $(0.5 - 45) \cdot 10^{16}$ см, что согласуется с интерферометрическими наблюдениями.

Если кроме величины относительного фазового запаздывания имеется интерферометрическая карта мазера, то по ней можно оценить максимальный угловой размер оболочки θ_s в картинной плоскости. Принимая гипотезу о сферической симметрии оболочки, получаем оценку расстояния до объекта:

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{\theta_s}.$$

Этим методом были определены радиусы околозвёздных оболочек для нескольких десятков звёзд и получены независимые оценки расстояний до них.

4 Список литературы

- Рудницкий Г.М., Физические процессы в долгопериодических переменных звёздах: дис. на соискание учёной степени д-ра физ.-мат. наук: 01.03.02 // Рудницкий Георгий Михайлович. - М., 2010.- 406 с.
- Deguchi, S. Water maser and envelope of infrared stars. // Publications of the Astronomical Society of Japan, 1977, Vol. 29, p. 669-681.
- Engels, D. Catalogue of late-type stars with OH, H₂O or SiO maser emission // Astronomy and Astrophysics Supplement Series, June 1979, vol. 36, p. 337-345.
- Elitzur, M.; Goldreich, P.; Scoville, N. OH-IR stars. II. A model for the 1612 MHz masers. // Astrophysical Journal, 1976, Vol. 205, p. 384-396.
- Harvey, P.M.; Bechis, K.P.; Wilson, W.J.; Ball, J.A. Time Variations in the OH Microwave and Infrared Emission from Late-Type Stars // Astrophysical Journal Supplement, 1974, vol. 27, p.331-357.
- Reid, M.J.; Moran, J.M. Masers. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1981, Vol. 19, p.231-276.
- Reid, M.J.; Muhleman, D.O.; Moran, J.M.; Johnston, K.J.; Schwartz, P.R. The structure of stellar hydroxyl masers // Astrophysical Journal, 1977, May 15, Part 1, vol. 214, p. 60-77.
- Самусь, Н.Н. Переменные звёзды. URL: http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/2_3.html.
- Мазерный эффект (в космосе). URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1188438>.