

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Государственный астрономический институт  
им. П.К. Штернберга

На правах рукописи

УДК 524.387

РАМИРЕС ЭРНАНДЕС Оскар

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАЗЕРА ВОДЯНОГО ПАРА  
В SAGITTARIUS B2**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук  
Лехт Евгений Евгеньевич  
(ГАИШ, Национальный институт  
астрофизики оптики и электроники,  
Тонанцинтла, Мексика)

**Официальные оппоненты:**

член-корреспондент РАН, доктор  
физико-математических наук  
Слыш Вячеслав Иванович  
(АКЦ ФИАН)

доктор физико-математических наук  
Чернин Артур Давидович  
(ГАИШ).

**Ведущая организация:**

Институт астрономии Российской  
академии наук

Защита состоится 15 июня 2006 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета по астрономии Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга МГУ по адресу: 119992, г. Москва, Университетский проспект, дом 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ

Автореферат разослан 10 апреля 2006 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук

АЛЕКСЕЕВ С.О.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

Первый космический мазер (явление усиления радиоволн за счет вынужденного излучения) был обнаружен в 1965 г [1], в области из газа OH, неподалеку от молодой звезды, в туманности Ориона. С тех пор были открыты сотни космических мазеров на разных молекулах в ряде различных астрономических объектов — от близких комет до удаленных галактик. Первые мазеры во вращательной линии  $6_{16} - 5_{23}$  молекулы  $H_2O$  на волне  $\lambda = 1.35$  ( $\nu = 22$  ГГц) были открыты в направлении известных источников мазерного радиоизлучения OH в областях звездообразования [2]. Межзвездные мазеры представляют собой сверхкомпактные области в молекулярных облаках, где интенсивность некоторых молекулярных эмиссионных линий может быть значительно усилена [3]. Как потом выяснилось, эти мазеры являются свидетельством раннего этапа формирования молодых звезд.

Предположение о связи космических мазеров с процессом звездообразования было высказано И.С. Шкловским еще в 1966 г., сразу после открытия мазеров OH. Сильные мазеры OH и  $H_2O$  были впервые обнаружены неподалеку от HII-областей, которые сопровождают процесс звездообразования. Близко расположенная к центру Галактики и являющаяся одной из ее основных областей формирования звезд, Sgr B2, ассоциируется с гигантским молекулярным облаком. Мазерное излучение водяного пара в линии 22 ГГц было обнаружено в Sgr B2 Вааком и Маером [4]. Структура источника Sgr B2 оказалась довольно сложной [5, 6], состоящей из ряда областей, в состав которых входят также мазерные пятна водяного пара, излучающие в линии 22 ГГц.

Исследование области Sgr B2, как и других областей, где формируются звезды, затруднен некоторыми факторами. В оптическом диапазоне процесс звездообразования доступен только в последней стадии, после того как уже возникший комплекс звезд разрушил родительское Гигантское молекулярное облако. Ранние стадии процесса образования звезд оптически недоступны из-за высокого поглощения света в коконе формирующейся звезды и в гигантском молекулярном облаке, содержащем этот кокон. Таким образом, исследования этих стадий звездной эволюции возможно проводить только в инфракрасном и радио диапазонах, где излучение проходит сквозь все слои

окружающей материи.

Во время коллапса формирующейся звезды, из молекулярного ядра может образоваться массивный молекулярный диск с массой до нескольких сотен масс Солнца. В дисках локализованы мазерные источники  $\text{H}_2\text{O}$ , например, как в области Sgr B2. Новорожденная звезда обладает сильным звездным ветром, и на некоторой стадии ее эволюции истечение газа из звезды может происходить в виде двух противоположных направленных джетов – биполярное истечение.

Мазеры  $\text{H}_2\text{O}$  характеризуются сложными спектрами с большим числом спектральных деталей, для которых ширина линии  $\sim 0.4 - 0.7$  км/с, а время жизни  $\sim 10^6 - 10^7$  с [7]. Согласно некоторым моделям [8, 9], мазеры  $\text{H}_2\text{O}$  локально создаются и накачиваются взаимодействием между сверхзвуковыми истечениями массы из молодой центральной звезды и сгустками материи в околозвездном облаке. Наиболее вероятный механизм накачки мазеров водяного пара — столкновительный в среде с  $T \sim 600$  К и  $n \sim 10^9$  см $^{-3}$  [10].

Регулярные наблюдения в течение длительного времени (мониторинг) позволяют выявить долгопериодические процессы, связанные с эволюцией звезды на раннем этапе ее формирования. Поэтому весьма актуальными являются исследования переменности полного излучения  $\text{H}_2\text{O}$  в течение периода более 20 лет, а также поиск периодической активности вспышечного характера. В периоды вспышек, появляется возможность изучать структуры, как отдельных мазерных пятен, так и групп мазерных пятен, скоплений. Итоговым результатом исследования эволюции мазерного излучения является построение моделей мазерных источников – определение вида структур, в которых располагаются мазерные пятна, размеры структур, периоды активности центральных объектов и т.п.

## Цель диссертации

В работе преследовались следующие цели:

1. Обработка данных 23-летнего мониторинга мазерного источника  $\text{H}_2\text{O}$  в Sgr B2 и построение каталога спектров.
2. Исследование переменности полного излучения мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в Sgr B2. Выявление периодической переменности интегрального потока и центроида скоростей (средневзвешенной лучевой скорости).

3. Выделение отдельных спектральных компонентов и их отождествление с субисточниками в области Sgr B2, (N)и(M).

4. Анализ сильных вспышек (супервспышек) мазера H<sub>2</sub>O 1986–1987 гг. и 2004 г.

5. Интерпретация переменности излучения отдельных эмиссионных деталей и построение их моделей.

6. Построение модели мазера в области Sgr B2.

## **Научная новизна**

В данной диссертации впервые:

1. Проводится анализ спектров 23-летнего мониторинга источника Sgr B2 в мазерной линии 22 ГГц молекулы воды. Такой анализ включает интегральный поток и центроид скоростей, супервспышки 1986–1987 гг. и 2004 г., отдельные детали спектров и средние спектры (для интервалов 1982–1992 гг. и 1993–2003 гг.).

2. Найдены медленные вариации интегрального потока — для всего источника — с характерным временем больше времени мониторинга и с минимумом в 1992–1994 гг.

3. Обнаружены периодические вариации интегрального потока со средним периодом около 2 года.

4. Найдена медленная компонента изменений центроида скоростей с характерным временем более 22 лет, минимум которой приходится на 1996–1998 гг.

5. Найдена корреляция между 2-летними периодическими вариациями интегрального потока и центроида скоростей.

6. Проведен детальный анализ супервспышек 1986–1987 гг. и 2004 г. с разложением на отдельные компоненты, и проведено их отождествление.

7. Обнаружено чередование максимумов излучения источников N и M.

9. Найдена циклическая активности источника M со средним периодом 3 года.

## **Практическая и научная ценность**

Прежде всего, приведенные здесь результаты дают хорошую картину временного и, отчасти, пространственного поведения мазерного излучения источника Sgr B2 (источники M и N), включая медленные

и быстрые вариации мазерного излучения. С другой стороны, эти результаты представляют большой интерес для понимания структуры и поведения областей Sgr B2(N) и Sgr B2(M). В частности, они свидетельствуют о том, что в северном и в главном источниках мазерные пятна связаны с биполярными истечениями (вылетающие от формирующейся звезды).

Обнаружено, что многие мазерные пятна образуют структуры типа цепочек. В свою очередь, проведенный анализ представляет интерес для пополнения картины процесса звездообразования, поскольку исследованные мазерные пятна связаны с молодой, формирующейся звездой и, отчасти, их поведение связано с поведением самой звезды и коконом вокруг нее.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту**

1. Результаты исследования интегрального потока и центроида скоростей мазерного излучения в направлении источника Sgr B2. Для обоих найдены медленные вариации с минимумами в 1992–1994 гг. (для потока) и 1996–1998 гг. (для центроида скоростей), а также вариации с характерным временем больше 22-х лет и более быстрые вариации с периодом 2 года. Было найдено, что 2-летние периодические вариации обеих кривых коррелируют между собой.

2. Результаты анализа супервспышек 1986–1987 гг. и 2004 г. Эти вспышки оказались разного характера и принадлежат разным источникам (N и M соответственно). Обе вспышки связаны со значительным повышением активности нескольких деталей и, видимо, связаны с молекулярными истечениями. Во вспышке 1986–1987 гг. имело место последовательное возбуждение мазерных пятен.

3. Результаты анализа средних спектров мазерного излучения. Были построены средние спектры для интервалов 1982–1992 гг. и 1993–2003 гг. Оказалось, что они обнаруживают неплохое подобие, как по амплитуде, так и по своей структуре.

4. Результаты анализа отдельных спектральных деталей. Были рассмотрены их основные характеристики: ширина линии, переменность потока, принадлежность к конкретному источнику (N или M), дрейф по лучевой скорости.

5. Модель источника, построенная после анализа всех результатов.

Оказалось, что как в источнике N, так и в источнике M, мазерные пятна связаны с молекулярными истечениями и некоторые из них образуют структуры типа цепочки. Молекулярные истечения и приводят к всплескам излучения этих, компактно сгруппированных пятен.

## **Апробация результатов**

Результаты, приведенные в данной диссертации, были доложены на Ломоносовских чтениях (май 2004 г.), на ВАК 2004 (июнь 2004 г.) и на международном симпозиуме "Астрономия 2005". По теме диссертации опубликовано 3 статьи в Астрономическом журнале. Имеются также две публикации в сборниках тезисов докладов.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, приложения, списков рисунков и таблиц, и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 125 страницы и содержит 34 рисунка и 7 таблиц. Список цитируемой литературы включает 87 наименований.

## **Содержание диссертации**

**Во введении** описаны области формирования звезд, процесс звездообразования, области III и космические мазеры. Описана также связь между процессом звездообразования и мазерными источниками. Изложена роль космических мазеров, как орудия исследования областей звездообразования, и состояние этой проблемы на данный момент. Показана актуальность работы, изложена постановка задачи и показан личный вклад в результатах работы.

**В первой главе** описывается параболический радиотелескоп, в частности, РТ-22 Пушинской радиоастрономической обсерватории. Приведены основные характеристики антенны, аппаратного комплекса и режима их работы. Описаны также факторы, влияющие на работу радиотелескопа и способы улучшения его работы.

**Во второй главе** изложены методы наблюдений, использованные при получении спектров источника Sgr B2: методы "ON-ON" и "ON-OFF". Второй метод использовался во время сильной вспышечной активности мазера. Приводятся также факторы, искажающие спектры,

и способы их устранения: корректировка за доплеровское смещение линий, исправление базовых линий, учет поглощения радиоизлучения в атмосфере. Учет поглощения очень важен, поскольку высота источника над горизонтом не превышала  $6^\circ - 7^\circ$ . Так как область Sgr B2 состоит из двух основных субисточников, разделенных по углу всего лишь на  $45''$  (ширина диаграммы антенны на 1.35 см составляет  $2.6'$ ), был использован метод наблюдений в нескольких точках с интервалами между ними  $45''$ . Это позволило провести отождествление эмиссионных деталей с соответствующими субисточниками.

**В третьей главе** приведено описание области Sgr B2. Дана пространственная картина в целом, а также двух основных подобластей, Sgr B2(M) и Sgr B2(N), в которых находятся НII-области, биполярные истечения и мазерные пятна водяного пара. Приводятся их основные физические характеристики, а также основные признаки звездообразования, наблюдаемые в них.

Представлены результаты обработки и анализа данных радионаблюдений мазерного излучения молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  в линии 22 ГГц, полученных при мониторинге на параболическом радиотелескопе РТ-22 Пуцинской радиоастрономической обсерватории в период 1982-2004 гг. Спектры, исправленные за поглощение в атмосфере Земли, охватывают лучевые скорости  $\approx 40 - 80$  км/с (с начала 2002 г. диапазон скоростей был расширен до  $V_{\text{LSR}} \approx 20 - 25$  км/с).

Анализ данных показал, что происходили сильные изменения структуры спектров, которые всегда состояли из большого числа компонентов (более 30). Ширина линии большинства эмиссионных деталей составляла  $\sim 0.8 - 2$  км/с при ошибках измерений от  $\pm 0.01$  до  $\pm 0.02$  км/с. Точность определения  $V_{\text{LSR}}$  составляла  $\pm 0.02$  км/с для сильного излучения ( $> 300$  Ян) и  $\pm 0.03$  км/с для более слабого излучения.

Ввиду того, что основные группы исследуемых мазерных пятен, М и N, разнесены между собой по склонению на  $45''$ , а диаграмма направленности РТ-22 превышает эту величину ( $2.6'$ ), они воспринимаются почти как один объект. Для отождествления основных спектральных компонентов мазерного излучения с источниками М и N были применены два метода. Наши данные сравнивались с данными других работ, например [5], для близких эпох наблюдений. Кроме того, в разные эпохи нами были проведены специальные наблюдения



в нескольких точках вдоль линии, соединяющей источники М и N.

Для оценки активности мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  в целом были проведены исследования вариаций интегрального потока и центра скорости. Найдена корреляция переменности данных параметров. Обнаружены три вида переменности:

1. медленные, которые превышают период мониторинга;
2. средние, имеющие период примерно 2 г.;
3. быстрые вариации.

В течение 23-летнего мониторинга имели место две супервспышки (1986–1987 гг. и 2004 г.), излучение в которых достигало почти 4000 Ян. Проведено отождествление компонентов вспышек. Первая вспышка принадлежит источнику N, а вторая источнику M. Обсуждается их природа, которая оказалась разной. Причиной этого может быть различие в структуре источников N и M. Общим является то, что скопления мазерных пятен каждого источника связаны с молекулярными потоками вещества.

В данной главе проводится также анализ излучения основных спектральных деталей. Изучается эволюция во времени их потоков и лучевой скорости. Обнаружен разный характер дрейфа лучевых скоростей для разных деталей. Обсуждаются возможные причины наблюдаемого характера переменности лучевых скоростей. Получено, что некоторые спектральные детали (мазерные пятна) имеют структуру в виде неоднородных волокон или цепочек. Мазерные пятна могут образовывать отдельные, достаточно компактные скопления.

В 1992-1993 гг. имел место минимум мазерного излучения. Для периодов до и после минимума были построены средние спектры. Они показали, что, несмотря на разные вариации излучения, оба спектра обнаруживают неплохое подобие, как по амплитуде, так и по своей структуре. Повторяемость компонентов в средних спектрах разных эпох может быть при существовании достаточно стабильных структурных образований в источниках.

Обсуждается циклическая активность мазера. Обнаружено поочередное преобладание излучения северного (N), либо центрального (M) источника и найден период активности излучения для основного источника (M), который составляет около 3 лет.

В главе также приводится модель для области Sgr B2. Для источника N построена двумерная картина, показывающая мазерные

пятна  $\text{H}_2\text{O}$ , биполярные истечения, аккреционный диск и области ИП. Обсуждаются возможные модели, объясняющие наблюдаемые профили линий и разнообразные характеры эволюции как отдельных эмиссионных деталей, так и групп деталей с близкими лучевыми скоростями.

Для объяснения наблюдаемой переменности профилей (поток, лучевая скорость и ширина линии) предлагается модель, в которой мазерные пятна имеют вытянутую форму и в них присутствуют мелкомасштабные турбулентные движения вещества. Это приводит к уширению спектральной линии и в некоторых случаях к ее асимметрии. Вытянутые пятна могут распадаться на отдельные сгустки вещества, которые являются звеньями цепочек. В этом случае ударная волна, возникающая при взаимодействии распространяющегося от звезды (или скопления звезд) звездного ветра с плотной средой, последовательно проходит через элементы цепочки, возбуждая в них мазерное излучение. В других случаях, мазерные пятна имеют вытянутую форму (волокно) без заметной фрагментации на отдельные плотные сгустки материи. Кроме того, возможна модель пятна в виде сгустка вещества, которое под воздействием звездного ветра от звезды может ускоряться, а при его ослаблении может тормозиться околосредой.

В периоды вспышечной активности не наблюдались заметные задержки между максимумами потоков эмиссионных деталей с близкими лучевыми скоростями, что возможно в случае образования этими деталями компактных групп.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации, и сделаны некоторые обобщения.

**В приложении** излагаются теоретические модели мазеров, насыщенных и ненасыщенных, сферических и цилиндрических, а также механизмов накачки.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Лехт Е.Е., Рамирес Эрнандес О., Толмачев А.М., Берулис И.И. "Мазерное излучение  $\text{H}_2\text{O}$  в направлении Sagittarius B2: Результаты мониторинга 1982–1992 гг." // *Астрономический журнал*, 2004, т. 81, No. 3, с. 195–208.

2. Лехт Е.Е., Рамирес Эрнандес О., Толмачев А.М. "Некоторые результаты 22-летнего мониторинга источника Sagittarius B2 в линии 1.35 см". // *Астрономический журнал*, 2004., т. 81, No. 12, с. 1059–1073.

3. Рамирес Эрнандес О., Лехт Е.Е., Толмачев А.М. "Сильная вспышка мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в Sagittarius B2(M)". // *Астрономический журнал*, 2005, т. 81, No. 12, с. 874–880.

## **ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА В РАБОТАХ В СОАВТОРСТВЕ**

### **Статья 1.**

Участие в составлении каталога спектров  $\text{H}_2\text{O}$  источника Sgr B2 периода 1982-1992 гг. - корректировка спектров за инструментальные эффекты и поглощение излучения в атмосфере Земли. Отождествление эмиссионных деталей супервспышки 1986-1987 гг. Построение модели мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в Sgr B2(N).

### **Статья 2.**

Участие в составлении каталога спектров периода 1993-2004 гг. (при этом автор принимал участие в наблюдениях 2001-2004 гг. и реализовал разработанный им метод разделения излучения в тесном двойном источнике, Sgr B2(N) и Sgr B2(M)). Обработка спектров по методике, аналогичной в статье 1. Отождествление спектральных компонентов на их принадлежность источникам Sgr B2(N) и Sgr B2(M). Анализ переменности интегрального потока и центра скорости.

### **Статья 3.**

Участие в наблюдениях по программе мониторинга в 2004 г. Отождествление эмиссионных деталей (аналогично статье 2). Обнаружение и исследование циклической переменности излучения мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в Sgr B2(M) со средним периодом 3 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Weaver H., Williams D.R.W., Dieter N.H. & Lum W.T. // Observations of a Strong Unidentified Microwave Line and of Emission from the OH Molecule // Nature, 1965, 208, 29-31.
- [2] Cheung A.C., Rank D.M., Townes C.H., Thornton D.D. & Welch W.J. // Detection of water in interstellar regions by its microwave radiation // Nature, 1969, 221, 626.
- [3] Ghavamian P. // An Introduction to Astrophysical Masers // [www.physics.rutgers.edu/~parviz/masers.html](http://www.physics.rutgers.edu/~parviz/masers.html)
- [4] Waak J.A. & Mayer C.H. // H<sub>2</sub>O source in Sagittarius B2 // Ap. J., 1974, 189, 67.
- [5] Kobayashi H., Ishiguro M., Chikada Y., Ukita N., Moirita K., Okumura S., Kasuga T. and Kawabe R. // Distribution of the H<sub>2</sub>O masers in the Sagittarius B2 core // Publ. Astron. Soc. Japan, 1989, 41, 141.
- [6] Gaume R.A., Claussen M.J., De Pree C. G., Gross W. M. and Meringer D. M. // The Sagittarius B2 star-forming region. I. Sensitive 1.3 centimeter continuum observations // Ap. J., 1995, 449, 663.
- [7] Эвретт Ю. // На переднем крае астрофизики, М.: Мир 1979, с. 405–458 (перевод с английского: Frontiers of astrophysics, E.H. Avrett, Harvard university press, 1976).
- [8] Genzel R. // Strong interstellar masers // in: Masers, molecules and mass outflows in star forming regions, ed. A. D. Haschik, Westford, MA: Haystack Obs., 1986, p. 233.
- [9] Tarter J.C., Welch W.J. // A cloud collision model for water maser excitation // Ap. J., 1986, 305, 467.
- [10] Рудницкий Г.М. // Конспект лекций по курсу "Радиоастрономия", Нижний Архыз 2001.