

УДК 524.527

## ГИГАНТСКАЯ ВСПЫШКА МАЗЕРА ВОДЯНОГО ПАРА В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ИСТОЧНИКЕ IRAS 18316-0602

© 2019 г. Л. Н. Вольвач<sup>1\*</sup>, А. Е. Вольвач<sup>1,2</sup>, М. Г. Ларионов<sup>3</sup>,  
Г. К. МакЛеод<sup>4</sup>, С. П. ван ден Хеever<sup>4</sup>, П. Волак<sup>5</sup>, М. Олеч<sup>5</sup>,  
А. В. Ипатов<sup>2</sup>, Д. В. Иванов<sup>2</sup>, А. Г. Михайлов<sup>2</sup>, А. Е. Мельников<sup>2</sup>,  
К. Ментен<sup>6</sup>, А. Беллоче<sup>6</sup>, А. Вейс<sup>6</sup>, П. Мазумдар<sup>6</sup>, Ф. Шуллер<sup>6,7</sup>

<sup>1</sup>Отдел радиоастрономии и геодинамики,  
Крымская астрофизическая обсерватория, Кацивели, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

<sup>4</sup>Радиоастрономическая обсерватория Хартебестхук, Крюгерсдорп, ЮАР

<sup>5</sup>Центр астрономии, факультет физики, астрономии и информатики,  
Университет Николая Коперника, Торунь, Польша

<sup>6</sup>Институт радиоастрономии Общества им. Макса Планка, Бонн, Германия

<sup>7</sup>Парижский университет Дидро, Гиф-сюр-Ивет, Франция

Поступила в редакцию 27.04.2018 г.; принята в печать 22.06.2018 г.

Представлены результаты длительного мониторинга галактического мазерного источника IRAS 18316-0602 (G25.65+1.05) в линии водяного пара (переход  $6_{16}-5_{23}$ , частота линии  $f = 22.235$  ГГц), выполненные на радиотелескопах РТ-22 (Симеиз), РТ-26 (ХартРАО), РТ-26 (Торунь). На РТ-22 источник эпизодически наблюдался с 2000 г., более регулярные наблюдения начаты в 2017 г. В объекте зарегистрирована самая мощная за всю историю наблюдений двойная вспышка, начавшаяся в сентябре 2017 г. и продолжавшаяся до февраля 2018 г. В большинстве своем мониторинг вспышки осуществлялся в ежедневном режиме. Детальное исследование изменения плотности потока излучения источника, в максимуме достигающего  $P \approx 1.3 \times 10^5$  Ян, позволило сделать важные научные выводы о возможном механизме излучения в линии водяного пара. Экспоненциальное нарастание плотности потока излучения в двойной вспышке свидетельствует о том, что мы имеем дело с ненасыщенным мазером вплоть до максимальных значений плотностей потоков излучения. Дополнительным аргументом в пользу такого состояния мазера является не очень высокая линейная поляризация ( $\approx 30\%$ ), почти вдвое более низкая, чем в таком известном галактическом киломазере, как Orion KL. Более точное расстояние, полученное для IRAS 18316-0602 (12.5 кпк), и значение плотности потока излучения в максимуме вспышки ( $\approx 1.3 \times 10^5$  Ян) делают этот источник самым мощным галактическим киломазером. Двойственная форма вспышки с экспоненциальными подъемами плотности потока излучения исключает возможность объяснения вспыхивающего явления эффектом направленности диаграммы излучения по отношению к наблюдателю. Физическую природу вспышки следует связать с внутренними параметрами среды, в которой находятся мазерные глобулы, излучающие в линии водяного пара. Быстрый экспоненциальный рост плотности потока излучения киломазера и экспоненциальные спады требуют наличия взрывного подъема плотности среды и потока квантов, приводящие к увеличению температуры от начального базового уровня в 10–40 К. Предложен механизм первичного энерговыделения в IRAS 18316-0602, который можно связать с кратной массивной звездной системой, находящейся на стадии эволюции, предшествующей главной последовательности. Вспышка в объекте может инициироваться гравитационным взаимодействием массивного компаньона с центральной звездой в периастре. В результате мощного гравитационного возмущения возможен сброс оболочки центральной сверхмассивной звезды, которая достигает аккреционного диска и создает взрывной подъем плотности и температуры в газовой-пылевой среде, где расположены мазерные глобулы.

DOI: 10.1134/S0004629919010067

\*E-mail: volvach@meta.ua

## 1. ВВЕДЕНИЕ

После открытия мазерного перехода  $6_{16}-5_{23}$  в молекуле водяного пара в 1969 г. было установлено, что мазерное излучение связано с III областями или с холодными звездами поздних спектральных классов [1].

В 1971 г. с участием 22-метрового радиотелескопа РТ-22 в Симеизе проведены первые в мире межконтинентальные РСДБ наблюдения источников в линиях водяного пара на частоте мазерного перехода  $6_{16}-5_{23}$  (частота линии  $f = 22.235$  ГГц). Достигнуто угловое разрешение радиоинтерферометра РТ-22 (Симеиз) — РТ-37 (Хайстек) 0.1 мсек дуги. В галактических объектах были найдены скопления  $H_2O$  источников и обнаружена мощная вспышка в комплексе W49. Быстрое изменение потока свидетельствовало о весьма небольших размерах области излучения. Этот вывод был подтвержден РСДБ наблюдениями, реализованными с максимальным угловым разрешением. Яркостная температура областей излучения  $H_2O$  достигала  $10^{16}$  К, что могло быть объяснено лишь мазерным механизмом [2].

В плотных оболочках протозвезд, где имеется нагрев среды, в том числе ударными волнами, протозвездными выбросами, или аккрецией вещества, содержание  $H_2O$  может составлять  $10^{-4}$  по отношению к плотности газа. Это на 4–5 порядков выше, чем среднее соотношение в Галактике [3–6]. Испаряясь при температурах около 100 К, молекулы воды становятся доминирующими в газовой составляющей протозвезд наравне с молекулой CO. Водяные мазеры оставляют следы в областях звездообразования в зонах III и указывают на появление новых протозвезд.

Мазер водяного пара  $H_2O$  (переход  $6_{16}-5_{23}$ ) в инфракрасном галактическом источнике IRAS 18316-0602 был обнаружен в марте 1989 г. в процессе проведения обзора выборки объектов из каталога IRAS Point Source Catalog (PSC), отобранных по определенным критериям. Основные требования к выбранным источникам включали положения, чтобы инфракрасные потоки объектов на 60 мкм  $F_{60}$  были не менее 100 Ян, и наклон спектра в диапазоне 12–60 мкм был достаточно крутой.

Работы проводились на 32-м радиотелескопе в Медине (Италия) группой исследователей, которые пронаблюдали 260 инфракрасных источников и в 17% из них обнаружили мазеры  $H_2O$ . Большинство мазеров были новыми, и среди них — мазер IRAS 18316-0602 [7].

Источник IRAS 18316-0602 связан со сверхкомпактной III областью G25.65+1.05 [8]. С целью нахождения спектрального распределения энергии излучения (SED) IRAS 18316-0602

исследовался в радиодиапазоне в непрерывном спектре на частотах 5 и 8 ГГц [9, 10]. Наблюдения объекта в субмиллиметровом диапазоне длин волн 450–1100 мкм проводились в 1995 г. [11, 12]. Линия CO была обнаружена в источнике на длине волны 2.6 мм в 1991 г. Мак Катчеоном [9]. С положительным результатом были также проведены наблюдения линий CS и  $NH_3$  [13, 14].

В ближнем ИК диапазоне наблюдения IRAS 18316-0602 были выполнены с целью обнаружения биполярных потоков от областей звездообразования [15]. Выделены потоки в линии III от молодых звездных образований больших масс, расположенных в центральной области ИК источника. Прослеживается связь между плотным газом, мазерным источником и массивной молодой звездой [16].

Как мазер  $H_2O$  и метанольный мазер, IRAS 18316-0602 протектирован в 1994–1996 гг. [17–19]. Исследователями отмечалось, что несмотря на ничтожную долю мощности мазера по отношению к болометрической светимости газово-пылевого облака ( $10^{-9}$ ), замечена корреляция между интенсивностью мазера  $H_2O$  и светимостью материнского облака в далеком инфракрасном диапазоне (60 мкм).

Во время открытия IRAS 18316-0602 его интегральный поток в линии  $H_2O$  был  $F_\nu \approx 1000$  Ян. По данным наших наблюдений временами поток падал до уровня около 10 Ян.

В работе представлены новые данные мониторинга IRAS 18316-0602 в линии водяного пара, выполненного на перечисленных радиотелескопах, в основном, в период с сентября 2017 г. по февраль 2018 г. В этот интервал времени в источнике произошла гигантская двойная супервспышка в линии водяного пара с рекордной амплитудой потока. Наблюдения, полученные, как правило, в ежедневном режиме, проводились вблизи кульминации источника с целью снижения влияния атмосферы.

## 2. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для приема и регистрации сигналов от источников в линии водяного пара на РТ-22 КрАО использовался модернизированный спектрально-поляриметрический радиометр с фурье-спектр анализатором параллельного типа, который имел 512 и (или) 2048 каналов и разрешение 8 и 2 кГц (105 и 26 м/с по лучевой скорости в линии  $H_2O$ ) соответственно [20]. Полученные при наблюдениях спектральные данные корректировались за поглощение в атмосфере и изменение эффективной площади радиотелескопа в зависимости от угла места.

Полоса приема информации составляла 4 МГц при использовании системы регистрации Марк-5В+. Программное обеспечение создано в отделе радиоастрономии КрАО. Шумовая температура системы  $T_{ш}$  и поглощение в атмосфере определялись по калибровочной ступеньке, “разрезам атмосферы” и фиксированным температурным перепадам на апертуре радиотелескопа. Шумовая температура  $T_{ш}$  варьировалась в пределах 150–200 К в зависимости от погодных условий. Калибровка по потоку осуществлялась с использованием источников DR21, Vir-A, Cug-A. Ширина диаграммы направленности радиотелескопа на 22 ГГц составляла 150". Чувствительность радиотелескопа была 13 Ян/К.

Прием данных можно было проводить как в круговой, так и линейной поляризациях. В последнем случае использовался поляризатор, работающий на эффекте Фарадея. Управление поляризатором производилось в автоматическом режиме. Цифровой выходной сигнал радиометра интегрировался в течение 3 мин при каждом повороте плоскости поляризации поляризатора на фиксированный угол и регистрировался при помощи спектр-анализатора. Антенная температура принимаемого излучения калибровалась по сигналу от генератора шума (ГШ). Значение температуры калибровочной ступеньки ГШ устанавливалось с использованием известного температурного перепада на апертуре радиотелескопа. Фиксированный температурный перепад обеспечивался согласованной нагрузкой на апертуре, находящейся при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

Приемная система, работающая на длине волны 1.35 см, устанавливалась во вторичном фокусе РТ-22. Перестраиваемые гетеродины, синхронизируемые высокостабильной частотой 5 МГц от водородного стандарта частоты VCH-1005, обеспечивали преобразование входных частот приема в промежуточную частоту с полосой 4 МГц [21]. Цикл наблюдений мазерных линий состоял в накоплении сигнала в течение 5–10 минут при наведении на источник (on) и при отведении с источника на 1° в сторону от источника (off). Циклы могли повторяться для достижения необходимого отношения сигнал/шум.

Наблюдения в обсерваториях ХартРАО (Южная Африка) и Торунь (Польша) в методическом плане были схожими с теми, которые проводились на РТ-22 в Симеизе. В ХартРАО использовалась 26-м антенна с криогенным радиометром на частоте 22.2 ГГц. Спектрометр с полосой 8 МГц имел разрешение по скорости 105 м/с. В обсерватории Торунь цифровой автокоррелятор на 4096 каналов имел разрешение по скорости около 26 м/с.

### 3. МОДЕЛЬ МАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА

Предположительно  $H_2O$  излучение возникает в плотных газовой-пылевых облаках компактных НII областей. Для случая известного киломазера W49 для обеспечения наблюдаемой инфракрасной светимости и создания существующей НII области как первичный источник энергии необходима одиночная звезда класса O5 [22]. Пыль, сосредоточенная в НII области, вероятно, имеет форму “коконов”, преобразующих фотоны звезды класса O5 в инфракрасное излучение [23]. Так как испарение  $H_2O$  происходит при температуре  $T \approx 100$  К, то радиационный нагрев пылинок со льдом приводит к возникновению водяного пара.

Звезда O5, имеющая светимость  $L \approx 5 \times 10^5 L_{\odot}$ , может разрушать пылевые частицы на расстоянии  $R_{НII} \approx 8 \times 10^{17}$  см и создавать компактную НII область [24]. Накачка водяных мазеров производится либо инфракрасным излучением пыли, либо УФ излучением центральной звезды, либо столкновениями [25]. Существование сильно переменных линий  $H_2O$ , скорее всего, связано с коротким временем жизни молекул водяного пара по сравнению с фотодиссоциационными процессами, происходящими в поле интенсивного ультрафиолетового излучения [26]. Температурные нестабильности в “коконах” пыли могут приводить даже к образованию значительных пылевых “глыб” [27]. Исчезновение деталей  $H_2O$  можно связать с пересыханием “источников” водяного пара [22]. В изложенной концепции мазеры  $H_2O$  локализируются в пылевом слое компактной НII области, расширяющейся, в первом приближении, со скоростью звука ( $v_s \approx 10$  км/с).

Можно также допустить, что индивидуальные детали в излучении  $H_2O$  принадлежат мало массивным протозвездам [28]. В этом случае дисперсия скоростей линий будет соответствовать разбросу кинетических энергий отдельных протозвезд в протоскоплении. Тогда общая масса скопления должна быть порядка  $M_c \approx 2 \times 10^3 M_{\odot}$  для установления его гравитационной границы ( $R \approx 1$  пк). Такие массы являются типичными для открытых галактических скоплений.

Интерферометрические наблюдения показывают, что мазеры  $H_2O$  тесно ассоциируются с субмиллиметровыми и инфракрасными источниками, подтверждая тезис о важности ИК излучения в осуществлении накачки мазеров. Плотная пылевая оболочка с температурой  $T \approx 40$  К, в которую вкраплены мазерные глобулы, может давать поглощение в видимом диапазоне до тысячи звездных величин. В инфракрасном диапазоне и на субмиллиметрах источник имеет менее заметную оптическую толщину  $\tau$  [11]. Для обеспечения максимального энерговыделения ИК источника необходимо, чтобы

$\tau$  не сильно превышала единицу. Видимо, такая ситуация и реализуется в мазерных объектах.

Явление вспышки не может быть объяснено единичным выбросом энергии, который увеличивает скорость накачки и затем приводит к вспышке, убывающей из-за диффузии [29]. Скорее всего, реализуется вариант, согласно которому облако водяного пара подвергается воздействию спорадических энергетических явлений, которые ведут к сильному увеличению скорости накачки, температуры и плотности мазерных облаков. Значительное возрастание интенсивности, в несколько сотен раз в течение вспышки, может быть объяснено ненасыщенным мазером, в котором определенным образом стимулируется скорость излучения [30]. В этом случае усиление мазера экспоненциально растет со скоростью накачки. Линейная поляризация отражает ключевую роль магнитного поля в создании физических процессов, приводящих к эффекту насыщения мазера.

Так, например, в источнике Oгion KL величина линейной поляризации растет линейно до миллиона Ян (60%) и далее остается постоянной с увеличением потока [30]. Для меньших значений потоков степень поляризации увеличивается пропорционально потоку, стимулируя скорость излучения и релаксацию [31]. Таким образом, в конечном счете, наблюдается процесс насыщения мазера H<sub>2</sub>O. Стадия ненасыщенного мазера может приводить к увеличению энергии накачки в несколько сотен раз.

В Oгion KL не обнаружено заметных изменений скорости линии 8 км/с и связанных с ней деталей [32], что может указывать на то, что эта деталь вспыхивает изолированным в пространстве способом.

#### 4. МОНИТОРИНГ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА IRAS 18316-0602 В ЛИНИИ H<sub>2</sub>O

Источник IRAS 18316-0602 не был выдающимся в каталоге IRAS, поэтому он сначала не привлек к себе особого внимания. Сверхмощные вспышки, произошедшие в IRAS 18316-0602 в конце 2016 г. и сентябре 2017 г. — феврале 2018 г., заставили изменить к нему отношение и задуматься над тем, каким образом такой обычный источник мог увеличить поток в линии водяного пара почти до  $1.3 \times 10^5$  Ян, то есть почти в тысячу раз?

По данным работы [33] IRAS 18316-0602 находится на расстоянии около 3.3 кпк от Солнца. В таком случае он должен иметь болометрическую светимость  $L_{\text{бол}} \approx 2.5 \times 10^4 L_{\odot}$ . Основная доля светимости, обеспеченная газовой-пылевым облаком, сосредоточена в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Это значение на

два порядка ниже светимости ярчайших объектов каталога IRAS. Столь невысокая светимость приводит к классу возбуждающей звезды В0 ( $T_{\text{эфф}} \approx 3 \times 10^4$  К) и сравнительно невысокой плотности газа  $n_{\text{H}} \approx 2 \times 10^4$  см<sup>-3</sup> [34].

Ситуация существенным образом изменилась после появления данных измерения динамических расстояний большого количества галактических мазерных объектов [35]. Новые данные о расстоянии до источника получены в 2011 г. с использованием методики анализа спектров нейтрального водорода HI в направлениях локализации мазеров метанола (6.7 ГГц). Из общей выборки метанольных мазеров были отобраны 442 источника, среди которых был и IRAS 18316-0602. Кинематические расстояния до источников определялись в рамках модели кривой галактического вращения при круговом движении объектов вокруг центра Галактики. При этом использовались уточненные данные скорости движения Солнца вокруг центра Галактики — 246 км/с. Согласно проведенным исследованиям, кинематическое расстояние до объекта G025.650+1.050 (IRAS 18316-0602) составляет 12.5 кпк. Важно, что это значение было определено для диапазона лучевых скоростей в этом мазерном источнике — 40.6–41.9 км/с. Близко к данному диапазону находятся линии водяного пара, которые вспыхивали в IRAS 18316-0602 в конце 2016 г. и сентябре 2017 г. — феврале 2018 г. По этим данным IRAS 18316-0602 находится за центром Галактики и является одним из самых далеких мазеров внутри нашей Галактики.

В соответствии с полученным расстоянием до мазера болометрическая светимость ИК источника  $L_{\text{бол}} \approx 5 \times 10^5 L_{\odot}$ . На основе этих данных, IRAS 18316-0602 находится в одном ряду с наиболее яркими представителями галактических ИК источников: IRAS 18507+0110 ( $L_{\text{бол}} \approx 7.5 \times 10^5 L_{\odot}$ ), IRAS 18314-0720 ( $L_{\text{бол}} \approx 1.0 \times 10^6 L_{\odot}$ ), IRAS 18449-0158 ( $L_{\text{бол}} \approx 1.8 \times 10^6 L_{\odot}$ ). При этом возбуждающую звезду следует классифицировать как O4 с эффективной температурой поверхности  $5.8 \times 10^4$  К. То есть мы можем иметь дело с массивным горячим гигантом в десятки солнечных масс, способным ионизовать плотную среду вокруг себя на расстоянии  $10^{17}$ – $10^{18}$  см.

Таким образом, источник IRAS 18316-0602 из разряда заурядных объектов переходит в категорию самого мощного галактического киломазера, превосходящего по мощности W49N и Oгion KL. Мы учли, что пиковое значение плотности потока в линии водяного мазера в полосе 50 кГц в рассматриваемом источнике в последней двойной вспышке в сентябре 2017 г. — феврале 2018 г. приблизилось к отметке  $1.3 \times 10^5$  Ян.

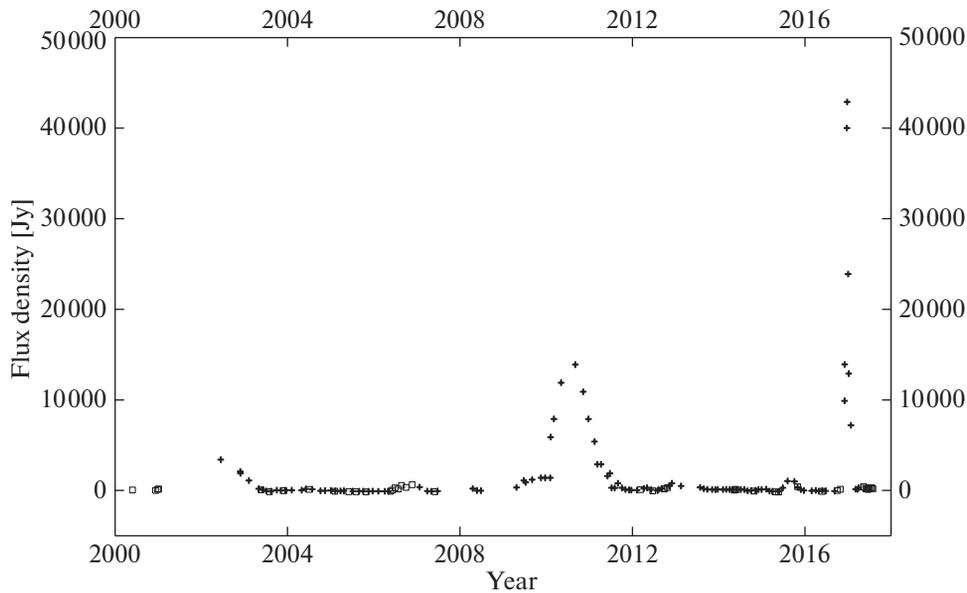


Рис. 1. Долговременный мониторинг IRAS 18316-0602 в линии водяного пара.

Наблюдения за этим источником были начаты нами в 2000 г., но проводились эпизодически. В объекте не было зафиксировано серьезных подъемов плотности потока излучения. На рис. 1 показан график зависимости плотности потока в линии водяного пара в зависимости от эпохи наблюдений. Основная масса данных, показанных на графике, опубликована в работах [7, 36] (крестики), данные наших наблюдений помечены кружками. На рис. 1 видно, что в течение промежутка времени с 2000 г. по август 2017 г. произошли три изолированные большие вспышки с нарастающей по времени амплитудой. И хотя максимум вспышки 2002 г. не удалось прописать полностью, видно, что она была меньше следующего максимума в 2010–2011 гг. Вспышки конца 2016 г. по амплитуде больше двух предыдущих [36].

Наряду с увеличением амплитуды вспышек со временем отмечается обратная тенденция изменения длительности вспышки. Длительность вспышки 2002 г. составляла около 2 лет. Продолжительность процесса 2010–2011 гг. уменьшилась вдвое — до одного года. Всплеск потока в конце 2016 г. сократился до одного месяца. Нельзя исключить возможность, что мы имеем дело с разными объектами, вспыхивающими в 2002 г., 2010–2011 гг. и 2016 г.

Если на основе наблюдательных данных по длительному мониторингу амплитуды мазера  $\text{H}_2\text{O}$  допустить существование квазипериода, то его величина будет  $T_{\text{пер}} \approx 7\text{--}8$  лет. Но амплитуда супервспышек, которые очерчивают этот период, варьируется на порядок величины, нарастая с течением времени. Непросто указать физический процесс, разделенный по времени на 15 лет (время между

первой и третьей супервспышками), который объяснял бы наличие такой зависимости амплитуды со временем:

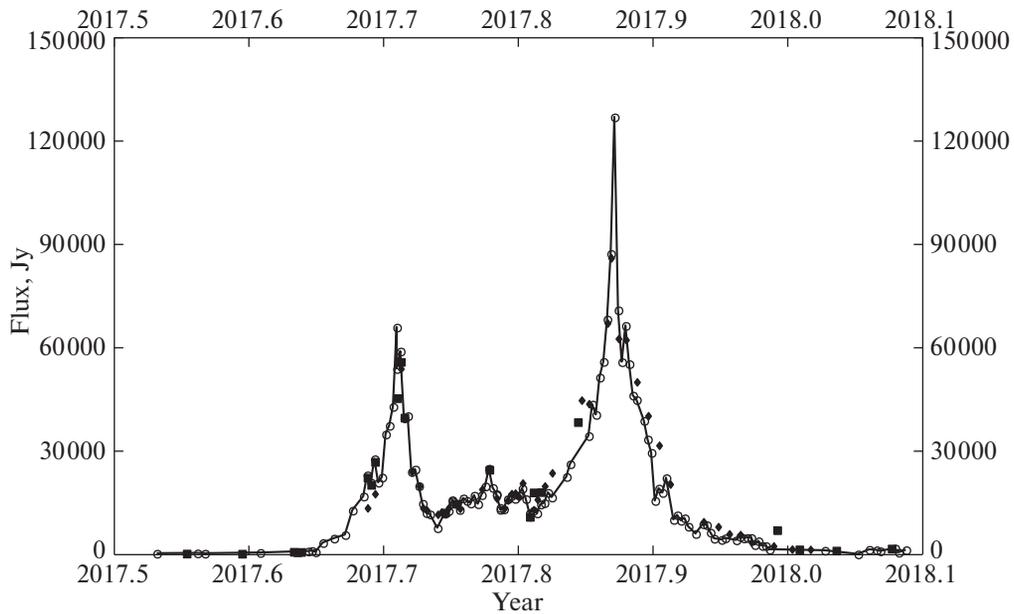
$$\log(A_2/A_1) \approx k \log \Delta T, \quad (1)$$

где  $A_2/A_1$  — отношение амплитуд последующей и предыдущей вспышек,  $\Delta T$  — время между вспышками в годах и  $k \approx 0.5$  — константа.

Квазигармонические изменения амплитуды мазера водяного пара на масштабах времени около 10 лет в объектах G59.78+0.06, Sh2-128 и Sh2-184 были отмечены авторами работы [37]. Возможный суперпериод 15–16 лет в W Нудрае также упоминался Рудницким, Лехтом и Берулисом [38]. В последнем случае авторы связывают этот период с изменениями активности центральной звезды.

С начала последней вспышки водяного мазера в источнике IRAS 18316-0602 в сентябре 2017 г. мониторинг объекта проводился нами в большинстве случаев ежедневно (рис. 2) [39, 40]. Кривая изменения спектральной плотности потока — двугорбая. Такая форма может свидетельствовать о том, что произошли резкие изменения в физических характеристиках областей излучения мазера водяного пара, в том числе связанные с внезапным впрыском энергии. Форма кривой изменения плотности потока со временем (экспоненциальный рост и падение потока, а также двойственность) исключает объяснение феномена вспышки эффектом диаграммы направленности излучения. Поэтому от такого объяснения переменной плотности потока излучения мазера водяного пара следует отказаться.

Отличительной особенностью последних гигантских вспышек в IRAS 18316-0602 являются



**Рис. 2.** Двойная вспышка мазерного излучения в источнике IRAS 18316-0602. Кружками обозначены данные PT-22 Симеиз, квадратами — данные HartRAO, ромбами — данные Торунь.

также их длительности, которые ощутимо меньше длительности двух первых вспышек (рис. 1). Суммарная длительность двойной вспышки 2017–2018 гг. и вспышки конца 2016 г. (15 месяцев) соизмерима с длительностью вспышки 2010–2011 гг. Если источник вспышек один и тот же, то это может быть связано с тем, что в первых двух супервспышках частота съема данных чрезвычайно низкая. Вспышка 2010–2011 гг. обозначена 7 точками, а 2002 г. — всего тремя. При такой скважности наблюдений, когда сбор данных осуществляется в интервалах в 2–3 мес., визуально может сложиться впечатление, что мы имеем дело со слившимися несколькими вспышками, когда процессы дезактивации мазера уступали место процессам его активации между съемом данных (рис. 1). Впрочем, не исключена вероятность того, что мощные вспышки мазера водяного пара в IRAS 18316-0602 происходили с 2002 г. с нарастающей амплитудой в соответствии с соотношением (1) и активировались разными источниками.

Гигантская вспышка мазера водяного пара в G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602), произошедшая в сентябре 2017 г. — феврале 2018 г., была четвертой по счету и самой мощной за все время наблюдения источника. Выполненный детальный по времени мониторинг плотности потока во время вспышки позволяет сделать важные выводы, связанные с анализом формы вспышки.

Форма вспышек не симметричная. Склоны двойной вспышки указывают на то, что их можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью (рис. 2). Экспоненциальная форма кривой

плотности потока мазера служит важнейшим признаком состояния мазера во время вспышки: он работает в ненасыщенном режиме, когда усиление мазера возрастает экспоненциально с ростом скорости накачки [30].

Форма центральной части мазерной линии вблизи максимальной фазы (снижающейся до 50 кГц) свидетельствует в пользу однокомпонентного источника, ответственного за основную долю увеличения плотности потока. Образцы записей линии водяного пара в IRAS 18316-0602 вблизи максимумов первой и второй вспышек 2017–2018 гг. показаны на рис. 3 и 4.

На склонах вспышек ниже 20 тысяч Ян становится очевидным, что объект, излучающий линию водяного пара, не является однокомпонентным, скорее, состоит как минимум из двух составляющих, одна из которых активируется в меньшей степени. Пример записи линии во вспышках до уровня 20 кЯн приведен на рис. 5 и 6.

На рис. 2 (построенном, как и все последующие рисунки, по максимумам плотности потока излучения в линии) четко просматривается вторая составляющая вспышки, имеющая колоколообразную форму. Полная длительность этой составляющей — 4 мес. Ее начало было в первых числах сентября 2017 г. Окончание этой составляющей вспышки — конец 2017 г. Амплитуда составляющей вспышки (20 кЯн) превышает амплитуду вспышек 2002 г. и 2010–2011 гг. в соответствии с выражением (1). Поэтому можно сделать вывод, что источник с колоколообразной формой вспышки 2017–2018 гг. в IRAS 18316-0602 идентичен тому,

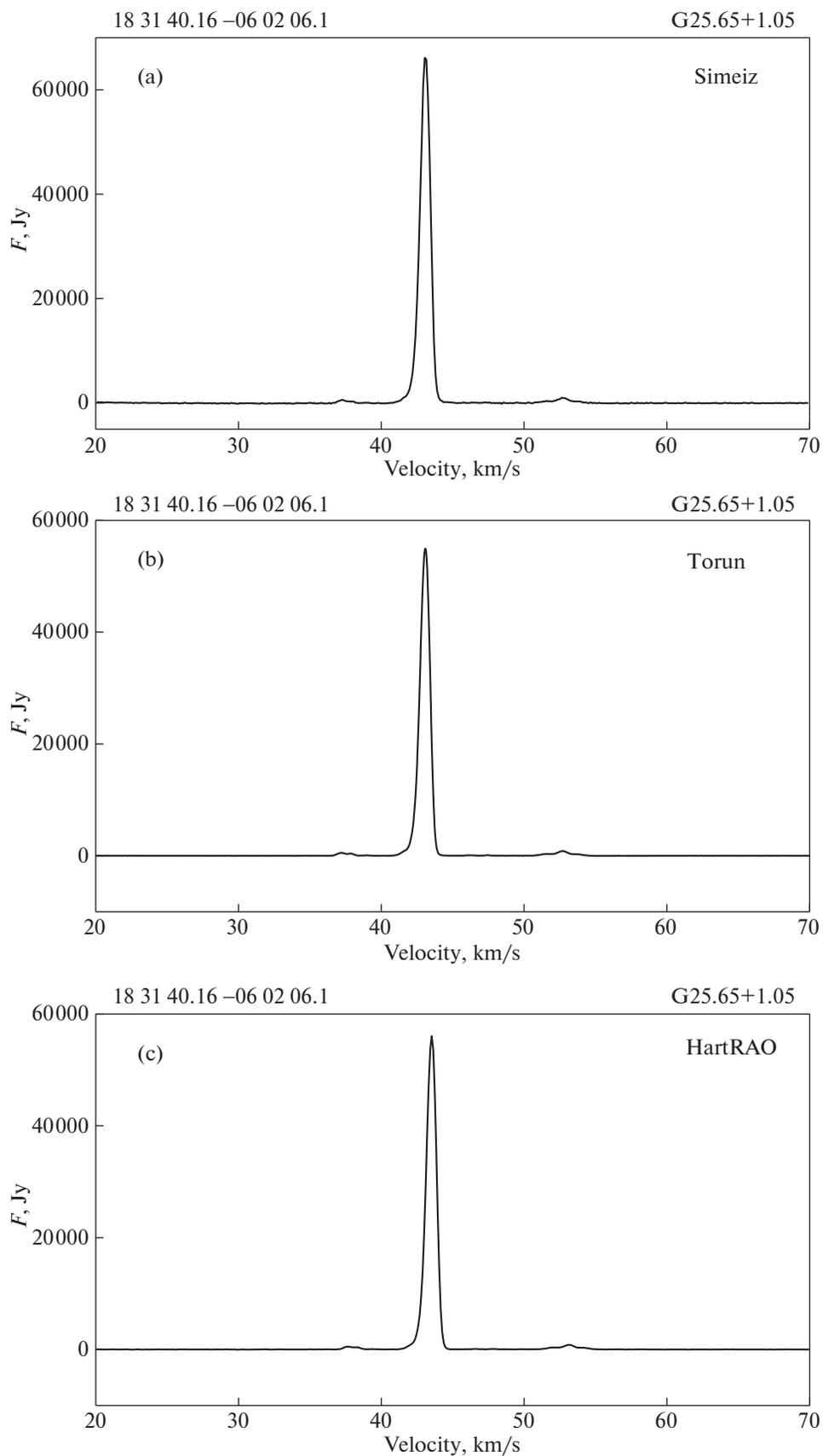


Рис. 3. Образец записи линии водяного пара в G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) в максимуме первой вспышки 2017–2018 гг.

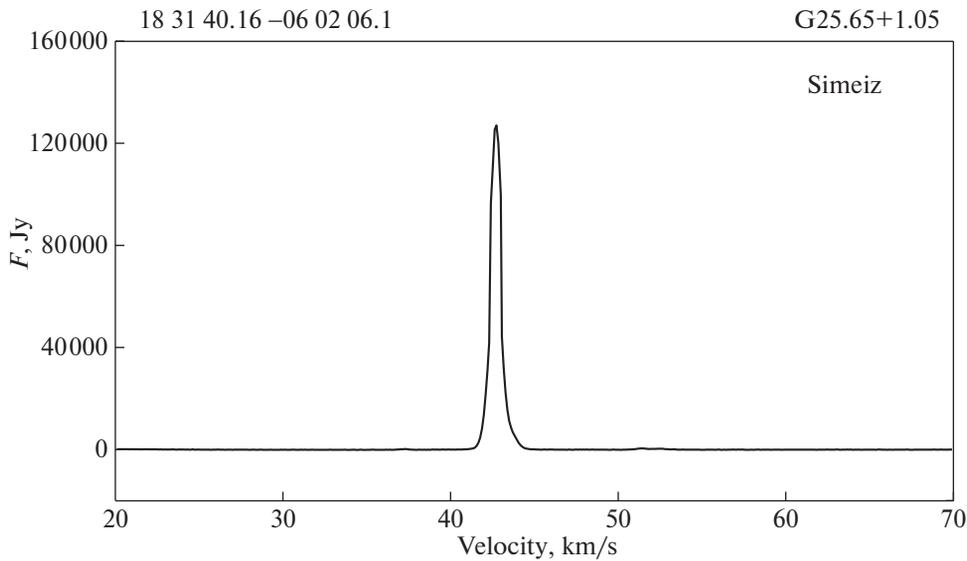


Рис. 4. Образец записи линии водяного пара в G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) в максимуме второй вспышки 2017–2018 гг.

который был во вспышках 2002 г. и 2010–2011 гг., но амплитуда вспышки (20 кЯн) в полтора-два раза больше амплитуды вспышки 2010–2011 гг.

Ясно также, что узкая двойная экспоненциальная вспышка мазерного излучения 2017–2018 гг., как и вспышка конца 2016 г., имеет отличную природу от вспышек 2002 г. и 2010–2011 гг. Это четко просматривается на нашей двойной вспышке, которая совместила в себе оба источника всех предыдущих вспышек. Дополнительной отличительной особенностью вспышки 2017–2018 гг. является ее двойственная природа.

Как и в случае вспышки 2016 г. [36], в рассматриваемой нами вспышке 2017–2018 гг. наблюдается зависимость ширины линии от амплитуды вспышечного явления.

В координатах  $(\ln F, \Delta V^{-2})$  эта зависимость представлена на рис. 7, где  $F$  — плотность потока в максимуме линии в Янских, а  $\Delta V$  — ширина линии на уровне 0.5 в км/с. Экспериментальные данные нанесены точками. График аппроксимирован прямой линией. В максимуме активности линия строго симметрична и идеально описывается гауссианой. Это также показывает, что мазер находится в ненасыщенном состоянии. Данные, однако, не носят ярко выраженного характера. Сходные результаты были получены и для гигантской вспышки в Орион KL [41, 42], где было сделано заключение о том, что мазер находится в ненасыщенном состоянии вплоть до почти максимальной амплитуды вспышки.

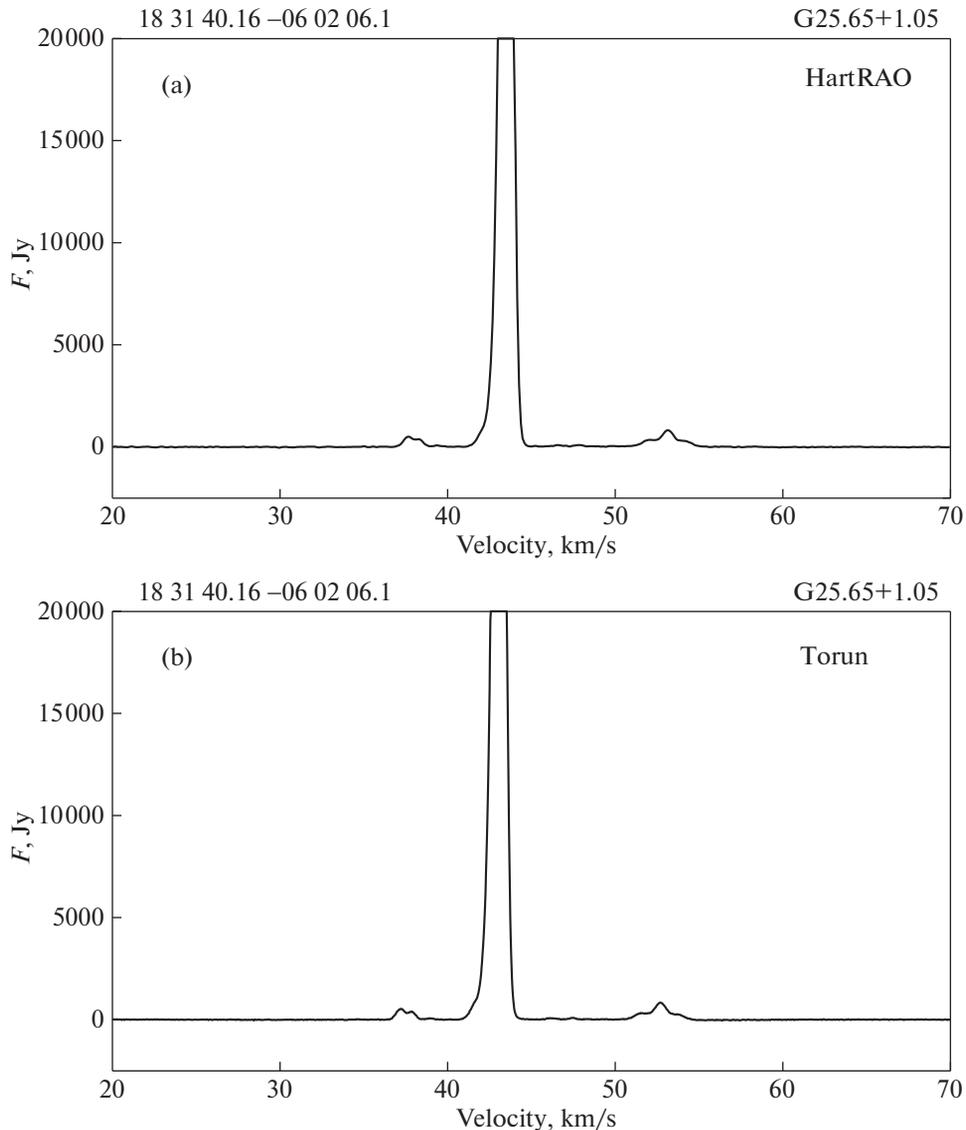
Следует также отметить, что лучевая скорость мазерной линии двух разных рассмотренных составляющих вспышки 2017–2018 гг. практически

одна и та же и равна около 42.8 км/с. Значит, зоны излучения должны находиться на близком расстоянии. Близкие мазерные глобулы излучают мазерную линию на близких лучевых скоростях, но характеристика изменения амплитуды линий различна. Не очень понятно, как единый внешний источник накачки мазера может работать таким различным способом? По-видимому, объяснение следует искать в различии характеристик мазерных глобул, которые излучают различным способом, создавая различие в амплитуде и длительности вспышки.

Гигантская амплитуда вспышки (около 130 кЯн) и расстояние до источника (12.5 кпк) делают киломазер IRAS 18316-0602 самым мощным в нашей Галактике. Как и в случае W49, для обеспечения наблюдаемой инфракрасной светимости как первичный источник энергии необходима одиночная звезда не ниже класса O5, даже, возможно, O4. Кратные звезды в центре туманности также могут обеспечить наблюдаемую инфракрасную светимость с классом самой массивной звезды O5. Это одни из самых массивных звезд в Галактике.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В IRAS 18316-0602

В соответствии с принятой методикой наблюдений (см. раздел 2) 17 сентября 2017 г. в фазе первого максимума двойной вспышки объекта IRAS 18316-0602 была измерена его линейная поляризация в линии водяного пара. При каждом повороте плоскости поляризации поляризатора на фиксированный угол выходной сигнал радиометра интегрировался в течение 3 мин при помощи



**Рис. 5.** Образец записи линии водяного пара в G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) в максимуме первой вспышки 2017–2018 гг. до уровня 20 кЯн.

спектр-анализатора. Наблюдения проводились в меридиане, поэтому полученный позиционный угол максимума амплитуды соответствует позиционному углу линейной поляризации в источнике, который равен  $-22^\circ$ .

Значение величины линейной поляризации вычислялось по формуле:

$$P\% = (P_{\text{мак}} - P_{\text{мин}}) / (P_{\text{мак}} + P_{\text{мин}}), \quad (2)$$

где  $P_{\text{мак}}$  — максимальное значение плотности потока в линейной поляризации,  $P_{\text{мин}}$  — минимальное значение плотности потока в линейной поляризации.

Максимальное значение величины линейной поляризации составило около 30%, что почти вдвое меньше в сравнении с максимальными значениями

величин линейно поляризованного потока излучения во время мощных вспышек в известных киломазерах, как W49 и Orion KL. Так, в Orion KL во время гигантской вспышки мазера водяного пара в 1980 г. процент линейной поляризации достигал почти 60% [43, 44]. Линейный рост поляризации с увеличением плотности потока мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в сотни раз до указанного уровня во вспышке 1980 г. является индикатором ненасыщенного мазера, действовавшего в Orion KL, при котором преобладает стимуляция скорости излучения, и усиление мазера возрастает экспоненциально со скоростью накачки [30]. С ростом плотности потока во вспышке 1980 г. от  $10^6$  Ян до максимального значения  $2.2 \times 10^6$  Ян процент поляризации остается неизменным. В этом

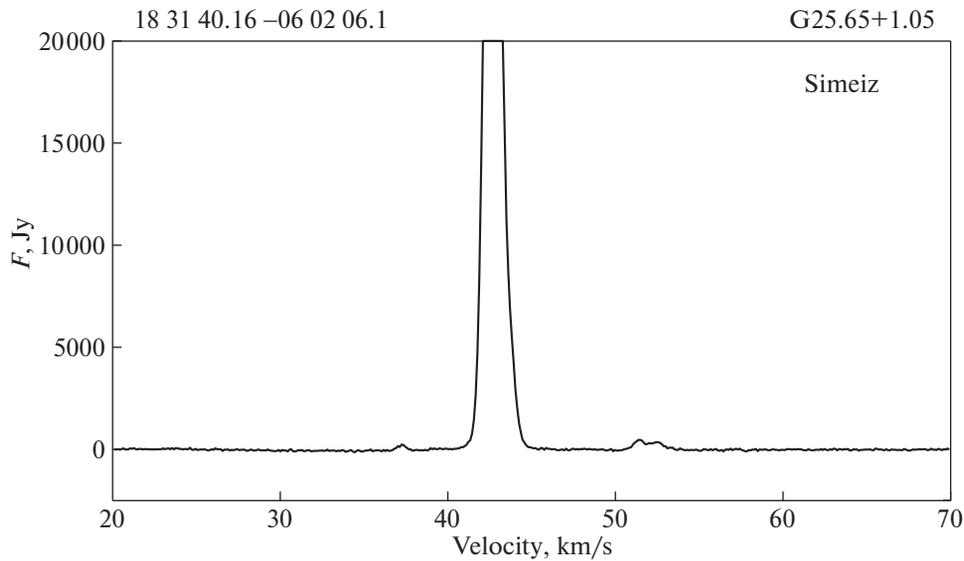


Рис. 6. Образец записи линии водяного пара в G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) в максимуме второй вспышки 2017–2018 гг. до уровня 20 кЯн.

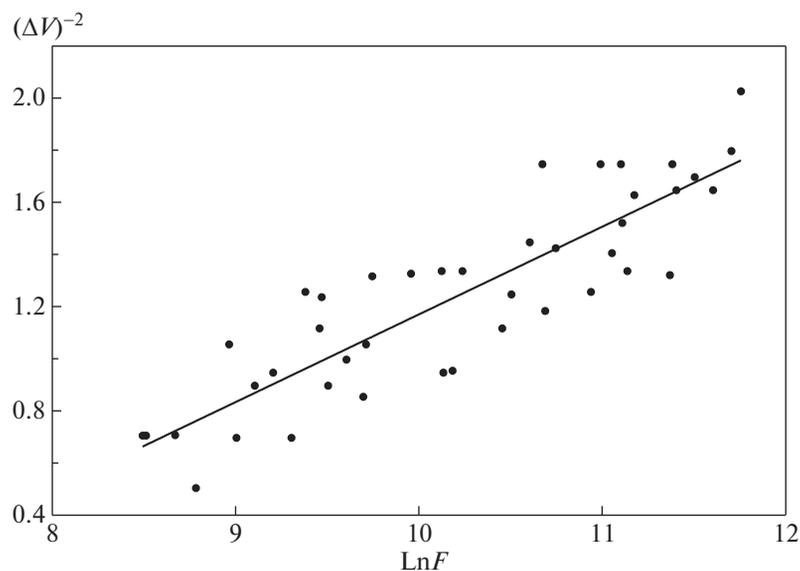


Рис. 7. Зависимость ширины линии мазера водяного пара от потока во время вспышки в G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) в сентябре 2017 г. — феврале 2018 г.

случае усиление мазера растет линейно со скоростью накачки, и мазер становится насыщенным.

В случае источника IRAS 18316-0602 во вспышке 2017–2018 гг. процент линейной поляризации вдвое меньше, чем в Orion KL во время супервспышки 1980 г. Поэтому естественно предположить, что мазер во время вспышки сентября 2017 г. — февраля 2018 г. в источнике IRAS 18316-0602 находился в ненасыщенном состоянии. Это является дополнительным аргументом в пользу ненасыщенного состояния мазера водяного пара в

IRAS 18316-0602 в дополнение к экспоненциальной форме кривой изменения плотности потока.

Кроме того, свидетельством в пользу ненасыщенного состояния мазерного усиления служит поведение ширины линии мазера водяного пара. Согласно модели профиля линии мазера, предложенной в работе [45], в случае ненасыщенного мазера ширина линии уменьшается с увеличением плотности потока по закону:

$$\log P = A + B\Delta\nu^{-2}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{мак}}$  — значение плотности потока вспышки,

$\Delta\nu$  — ширина линии мазера водяного пара в процессе вспышки. Наблюдательные данные не противоречат этому соотношению, но точность не позволяет сделать однозначные выводы.

Таким образом, во время двойной гипервспышки мазера водяного пара в IRAS 18316-0602 в 2017–2018 гг. мы имеем основные условия существования ненасыщенного мазера. Во время возрастания плотности потока излучения наблюдается его экспоненциальный рост. Это происходит как для первой, так и для второй вспышек. Затем происходит экспоненциальный спад потока, также в обеих вспышках. Измерен не очень высокий процент линейной поляризации в максимуме плотности потока вспышки.

## 6. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Интерферометрическую структуру мазеров водяного пара получают из наземных и наземно-космических РСДБ наблюдений. В случае IRAS 18316-0602 до последней вспышки 2017–2018 гг. мы такими данными не располагали. Если же говорить о структуре и физических характеристиках области, в которой находится вспыхивающий мазер  $\text{H}_2\text{O}$  в таком известнейшем киломазере, как Orión KL, то можно отметить, что в компактной области размерами в одну угловую секунду (около 500 а.е.) находятся, как сам киломазер, так и центральные области ИК источника IRc5. Рядом расположен и субмиллиметровый источник излучения С29 [46]. Связанный с объектом радиоисточник картографирован на VLY [47]. В той же области находится масса других молекулярных линий. Газо-пылевое облако, излучающее как ИК источник, служащий накачкой для  $\text{H}_2\text{O}$  мазера, разогрето ударными волнами, идущими от внешнего источника [48]. Таким источником может быть звезда раннего спектрального класса.

Размер пятна мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в Orión KL  $0.95 \times 0.40$  а.е. Пиковое значение потока около  $10^6$  Ян, что соответствует яркостной температуре  $1.2 \times 10^{14}$  К. При полосе линии 0.6 км/сек изотропная светимость  $L = 2.4 \times 10^{-4} L_\odot$  [49].

Почему именно в таких областях вспыхивает мазер  $\text{H}_2\text{O}$  и в линиях, которые близки по скорости к средним значениям скорости движения основной массы газа, в которой находится сам мазер? Должны быть созданы специфические и, возможно, конфигурационные условия для мазерной накачки в области, где он находится. Именно такие условия возникают там, где скорость не сильно отличается от средней скорости по молекулярному облаку [50]. Одним из важнейших условий мазерной вспышки может также быть взаимодействие мазерной

глобулы с биполярными выбросами из молодой протозвезды [51].

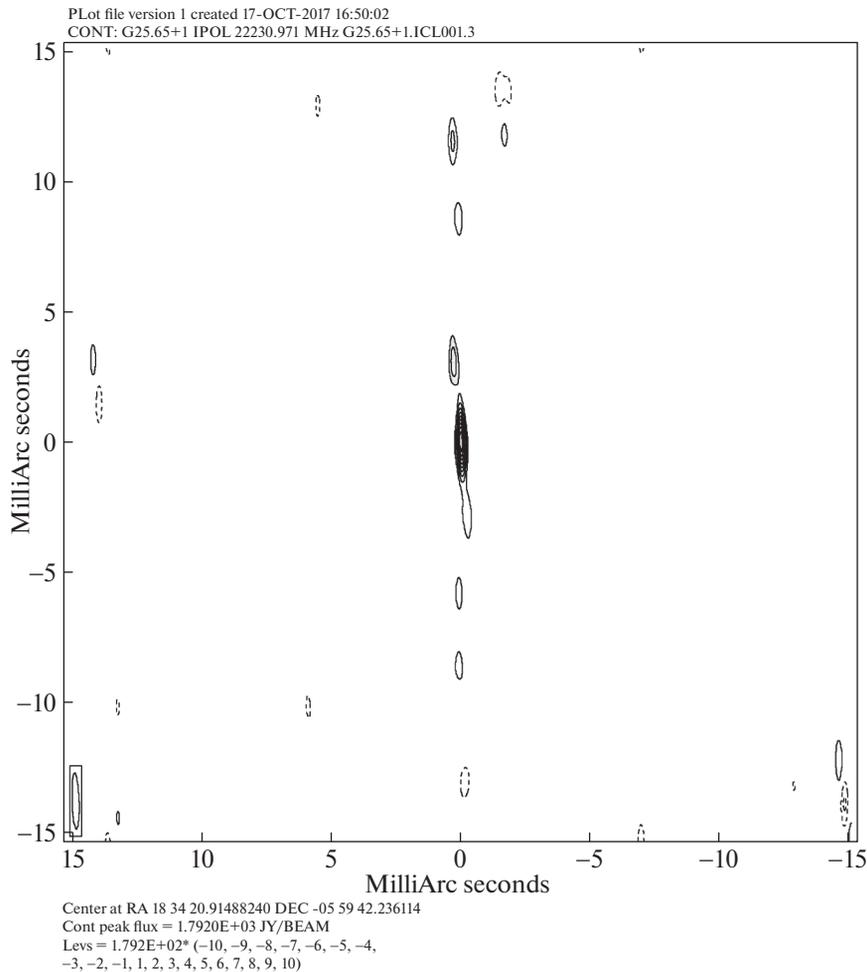
Важной информацией является локализация мазеров относительно центра субмиллиметрового облака. По данным наблюдений Orión KL на системе ALMA, полученным с разрешением  $0.3''$  ( $\approx 160$  а.е.), супермазер находится внутри субмиллиметрового ядра не далее 160 а.е. от его центра [50].

По данным работ [52] на основе изучения структуры и собственного движения узлы мазерного излучения во время вспышки в Orión KL расположены вдоль линии северо-запад — юго-восток перпендикулярно низкоскоростным выбросам в источнике.

Размер мазерного пятна в максимуме вспышки 2012 г. в Orión KL в максимальной фазе этой вспышки составил  $2.26 \times 0.95$  мсек дуги, что соответствует линейному размеру около 0.4 а.е. Это указывает, что размеры глобул мазеров водяного пара могут быть меньше астрономической единицы. Соответствующая яркостная температура и светимость:  $T_{\text{я}} = 1.2 \times 10^{14}$  К и  $L = 2.4 \times 10^{-4} L_\odot$ . Размеры мазерных глобул водяного пара в Orión KL во время супервспышки 1998 г., измеренные системой VLBI, оказались даже менее 0.1 а.е. Описанные условия, по-видимому, должны быть схожими во всех существующих галактических киломазерах, которым является и IRAS 18316-0602.

Интерферометрические эксперименты по наблюдению IRAS 18316-0602 были выполнены в сентябре 2017 г. в виде серии 6 последовательных ежедневных сессий на интерферометре, в состав которого вошли три 32-м радиотелескопа РСДБ-комплекса “Квazar-КВО” и 22-м радиотелескоп РСДБ станции Симеиз. В РСДБ наблюдениях начало полосы было установлено на частоте 22 229 МГц, длительность сканов исследуемого источника составляла 20 мин. В качестве калибратора был выбран источник 3C454.3, который наблюдался сканами по 5 или 20 мин в начале, середине и конце сеанса. Корреляционная обработка данных РСДБ наблюдений проводилась на программном корреляторе DiFX 2.4.1 в ИПА РАН на гибридном блейд-серверном кластере. На рис. 8 приведена карта, полученная 27 сентября 2017 г., когда источник находился в фазе после прохождения первого из двойных максимумов плотности потока излучения.

На приведенной карте 1 мсек дуги соответствует линейному масштабу около 20 а.е. Данный масштаб получен из расчета того, что расстояние до источника составляет 12.5 кпк. При таком разрешении трудно рассчитывать на выделение отдельных глобул, но общая картина распределения излучения данной области просматривается достаточно



**Рис. 8.** Интерферометрическое изображение IRAS 18316-0602, полученное на базе “КВАЗАР-Симеиз” 27 сентября 2017 г.

четко. Видна яркая центральная деталь, которую естественно связать с глобулой (или компактными глобулами), в которых произошла уникальная по своей мощности вспышка мазера водяного пара. Все остальные детали значительно уступают ей по амплитуде.

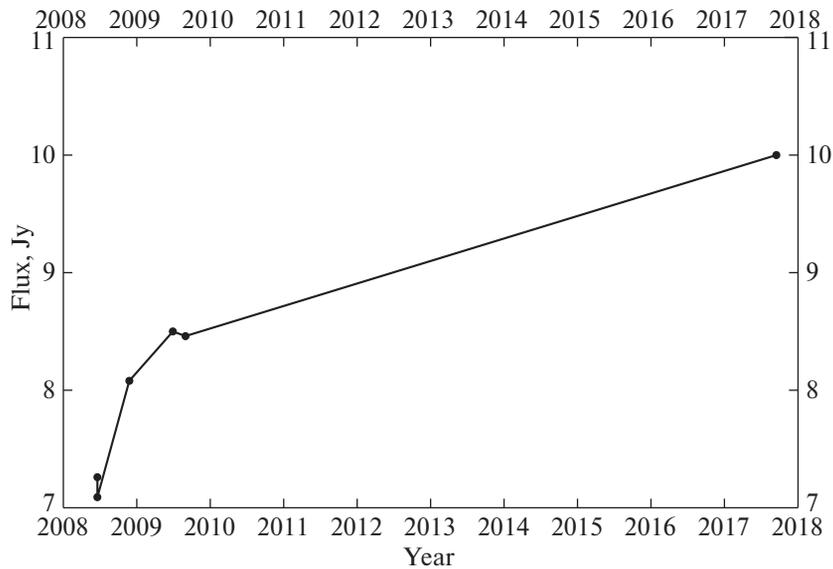
Реализованное разрешение не дает возможности выделить две компоненты излучения, связанные с двумя разными по форме вспышками: одна из которых является центральной деталью на рис. 2, вторая — колоколообразной формы и меньшей амплитуды. Тем не менее интерферометрические данные подтверждают наши выводы о том, что разные глобулы, ответственные за разные части формы вспышки, близки друг к другу и находятся в компактной области. Полученные данные не противоречат результатам наблюдений других выдающихся галактических источников мазерного излучения, по которым компактные области НП имеют размеры  $l_{\text{НП}} \approx 10^{16}$  см [56]. Следовательно, молекулярные диски, где могут располагаться мазерные глобулы,

имеют размеры порядка  $l_{\text{disc}} \approx 10^{17}$  см ( $\approx 10^4$  а.е.) и более.

Можно сделать вывод, что интерферометрические данные, полученные во время вспышки мазера водяного пара в IRAS 18316-0602, подтверждают наличие компактных глобул, ответственных за мощнейший подъем плотности потока излучения в этом источнике.

## 7. СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ В СВЯЗИ С НАБЛЮДЕНИЕМ МАЗЕРА ВОДЯНОГО ПАРА В IRAS 18316-0602

Наблюдения галактического источника G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) были проведены на длине волны 870 мкм вблизи максимума первой вспышки мазера водяного пара 15 сентября и 16 сентября 2017 г. при благоприятных погодных условиях на большой болометрической камере “APEX” (LABOCA, [57]).



**Рис. 9.** Долговременные изменения плотности потока излучения G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) на длине волны 870 мкм, полученные на большой болометрической камере АРЕХ.

Оптимизация фокуса телескопа была выполнена с использованием планеты Сатурн, поправки наведения определены по ближайшему точечному источнику J1743-038. Как калибраторы потока, были использованы Сатурн, горячее молекулярное ядро G34.26+0.15 и G10.62-0.38. Два из этих галактических источников наблюдались оба дня перед G25.65+1.05 и после него.

Долговременное изменение плотности потока излучения G25.65+1.05 на длине волны 870 мкм показано на рис. 9. За время наблюдений за этим источником, с 2008 по 2018 г. спектральная плотность потока возросла на 40% — с 7 Ян до 10 Ян. Половина этого подъема произошла ко времени начала вспышки 2010 г. (до 8.5 Ян), вторая половина (до 19 Ян) зафиксирована во время первой (двойной) вспышки 2017 г. (15–16 сентября 2017 г.).

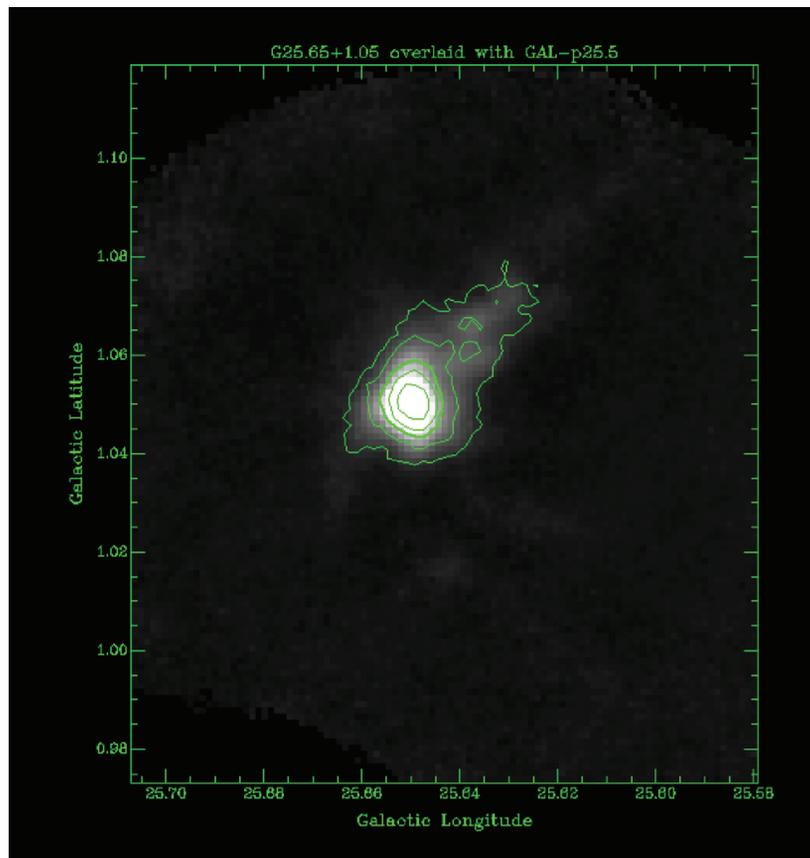
Субмиллиметровый поток источника, который является продолжением ИК излучения, изменился во время вспышек мазера водяного пара на десятки процентов. Данный наблюдательный факт может свидетельствовать в пользу того, что первичным источником активности может быть центральная массивная звезда, скрытая от нашего взора гигантским поглощением в оптическом диапазоне длин волн, которое может составлять даже сотни звездных величин.

Важным является вопрос, предшествовал ли подъем субмиллиметрового потока началу вспышек мазеров водяного пара? Судя по графику на рис. 9, это так. Мы видим, что к началу 2010 г. поток уже возрос до уровня 8.5 Ян и достиг некоторого

локального максимума. С этого момента началась вспышка мазера водяного пара 2010–2011 гг. К сожалению, далее данные субмиллиметровых наблюдений отсутствуют до сентября 2017 г., когда произошла мощнейшая вспышка, в максимуме которой спектральная плотность субмиллиметрового потока уже составляла 10 Ян. Таким образом, можно резюмировать, что подъем субмиллиметрового потока излучения, а с ним, возможно, и ИК потока связан со вспышками мазерного излучения, сопровождая его, или даже опережая эти вспышки.

На рис. 10 показана карта источника G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602), полученная с большой болометрической камерой в сентябре 2017 г. во время вспышки мазерного излучения. На рис. 11 показана карта G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602), полученная как фрагмент каталога ATLASGAL. Разрешение карты дано красным кружком в левом нижнем углу рисунка. Размеры источника и его ориентация определяются голубым эллипсом. Зеленым цветом обозначена локализация других источников, найденных в обзоре галактической плоскости. Размеры изображения  $5' \times 5'$ . Точность координат в каталоге не позволяет сравнить координаты источника с интерферометрическими положениями. Совпадение координат можно констатировать на уровне нескольких угловых секунд. Это соответствует десяткам тысяч а.е. с учетом расстояния до G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602).

На рис. 12 приведено изображение G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602), полученное в среднем участке инфракрасного диапазона с использованием полосовых фильтров IRAC (3.6 мкм, 4.5 мкм,



**Рис. 10.** Изображение G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602), полученное на длине волны 870 мкм с большой болометрической камерой APEX.

5.8 мкм, 8.0 мкм). Данные взяты из GLIMPSE Legacy Project. Разрешение изображения показано красным кружком в левом нижнем углу рисунка. Источник расположен в центре карты. В пределах ошибок координат положения субмиллиметрового и ИК источников совпадают, что не противоречит физическим условиям, которые реализуются в молодых галактических объектах.

На рис. 13 показано изображение G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602), полученное в среднем участке инфракрасного диапазона с использованием фильтров космического телескопа WISE (3.4 мкм, 4.6 мкм, 12 мкм, 22 мкм). Разрешение изображения показано красным кружком в левом нижнем углу рисунка. Источник расположен в центре карты. Карты, полученные в ИК диапазоне, соответствуют друг другу.

#### 8. К ВОПРОСУ ОБ ИСТОЧНИКАХ ПЕРВИЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ IRAS 18316-0602

Положения, изложенные в этом разделе, носят дискуссионный характер.

Гигантские вспышки мазера водяного пара должны быть обеспечены мощными источниками первичного энерговыделения, приводящие к подъему плотности потока излучения в линии в сотни раз. К таким источникам можно отнести ИК излучение молекулярного газово-пылевого облака, в которое погружены мазерные конденсации, и/или система мощных ударных волн, распространяющихся от центрального звездного объекта. Мазерные линии могут возбуждаться также биполярными выбросами. При этом остается неясным, чем именно инициируется активность центральных звездных объектов, среди которых могут быть как звезды поздних спектральных классов, типа T Tauri, так и массивные звезды ранних спектральных классов, находящиеся на подступах к главной последовательности.

Существует ряд гипотез относительно механизмов инициации излучения в линии водяного пара в галактических источниках, которые связаны как с изменением температуры пыли, так и с плотностью фотонного потока, идущего от центрального источника.

Гигантские вспышки мазеров водяного пара в галактических киломазерах (Orion KL, W49, IRAS

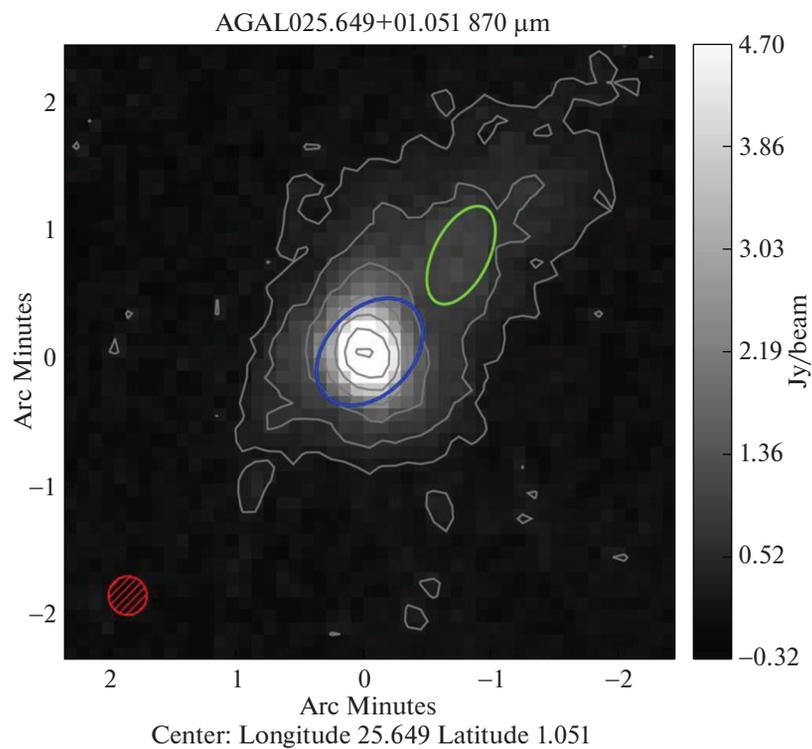


Рис. 11. Изображение G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) из каталога ATLASGAL.

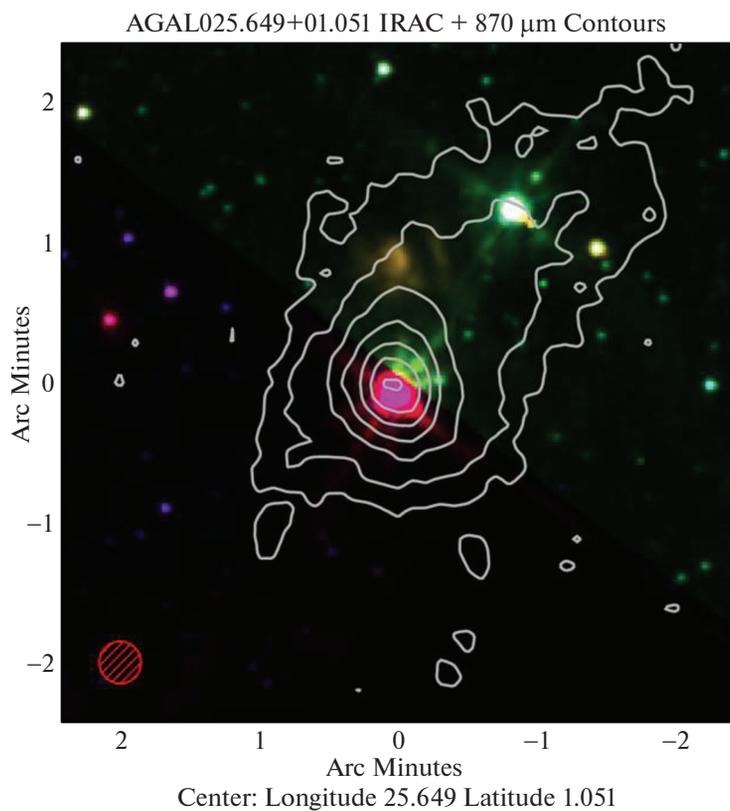
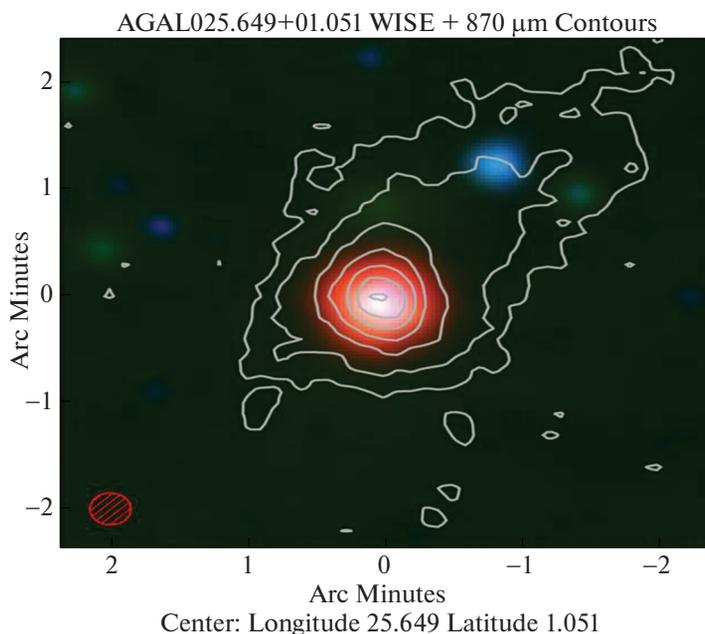


Рис. 12. Изображение G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) в среднем участке инфракрасного диапазона (3.6 мкм, 4.5 мкм, 5.8 мкм, 8.0 мкм).



**Рис. 13.** Изображение G25.65+1.05 (IRAS 18316-0602) в среднем участке инфракрасного диапазона (3.4 мкм, 4.6 мкм, 12 мкм, 22 мкм).

18316-0602) происходят редко, не чаще одного раза в 5–10 лет. Какие физические процессы инициируют эти вспышки, при которых плотности потоков излучения в линиях могут возрастать в сотни раз? Не вызывает сомнений, что основное энерговыделение в системе обеспечивается массивными звездами ранних спектральных классов, находящимися на стадии, предшествующей главной последовательности. Процесс формирования и эволюции таких звезд, как правило, скрыт от наших глаз из-за гигантского поглощения в оптическом диапазоне в направлении на такие звездные комплексы. Спектры излучения в ИК-диапазоне имеют максимумы в далекой инфракрасной области, что указывает на заметное поглощение на этих волнах. И только радиодиапазон позволяет разглядеть компактные НП области, свидетельствующие о наличии массивных звезд ранних спектральных классов, обеспечивающих ионизацию окружающего пространства вплоть до расстояний  $10^{18}$  см от центральной сверхмассивной звезды. Тем не менее остается вопрос о том, единственная звезда ионизирует окружающее пространство, или их несколько.

Известно, что около половины звезд в галактиках — двойные и кратные системы. Скорее всего, они сформировались в процессе эволюции газопылевого облака фрагментацией его на составные части. Принципиальным моментом в такой ситуации является взаимодействие этих кратных систем в плане возможности инициации источников первичного энерговыделения в газопылевых облаках. Как такие источники приводят к гигантским вспышкам в киломазерах водяного пара?

Среди основных механизмов возбуждения мазеров  $H_2O$  отмечаются радиационный и столкновительный механизмы. Первый обеспечивается посредством трансформации квантов центральной звезды в инфракрасный источник туманности, а второй — через систему ударных волн, проходящих сквозь среду, где расположены мазерные глобулы. При этом остается вопрос, что собой представляют источники гигантского энерговыделения, взрывным образом обеспечивающие такие мощные вспышки мазеров водяного пара?

Последняя двойная вспышка мазера  $H_2O$  в IRAS 18316-0602, в ходе которой он находился в ненасыщенном состоянии, наводит на мысль, что процесс такой активации мазера осуществлялся в течение месяца, после чего происходил экспоненциальный спад плотности потока излучения. Каким процессом могла осуществляться такая накачка молекул  $H_2O$  в изолированной мазерной глобуле? На то, что глобула была единственной, указывает факт наличия узкой линии излучения на фиксированной частоте. Такие параметры излучения в линии должны обеспечить высокая плотность глобулы, ее значительная масса и большой перепад температуры, сохраняющийся в течение заметного промежутка времени, порядка одного месяца. Назвать физический процесс, приводящий к изменению характеристик мазерной глобулы с сохранением ненасыщенного состояния мазера в течение десятков дней и заканчивающийся так же неожиданно, как и начинающийся, по-видимому, не так-то просто.

Мощный звездный ветер, скорее всего, не может быть источником такого первичного энерговыделения из-за сравнительно низких энергетических характеристик. Механизм аккреции не очень подходит из-за того, что последние вспышки конца 2016 г. и 2017–2018 гг. в IRAS 18316-0602 по длительности похожи между собой, и представить такую регулярную аккрецию просто не логично.

Предлагались также модели горячего плотного материала во вращающемся аккреционном диске [50] или пульсационно нестабильные массивные звезды [53]. При этом за предполагаемую периодичность могут быть ответственны сталкивающиеся звездные ветры двойных звезд [54].

В наблюдаемом нами источнике действительно просматривается некий квазирегулярный процесс, как по длительности вспышки, так и по интервалам между вспышками. Вспышки в IRAS 18316-0602, произошедшие в 2002–2003 гг., 2010 г. и в конце 2016 — (2017–2018 гг.), не исключают наличие квазипериода взрывной активности примерно в 7 лет.

Кроме всего прочего, имеется возможность существования двойных вспышек. Кроме двойной вспышки в IRAS 18316-0602 (2017–2018) гг. двойная вспышка наблюдалась в Orion KL в 1979–1980 гг. [55].

Частичные многократные сбросы оболочек звезды в принципе могут обеспечить энергетику процесса. Так, при скорости перемещения сброшенной оболочки  $v \approx 5 \times 10^7$  см/с (500 км/с), за месяц она переместится на расстояние  $l \approx 1.5 \times 10^{14}$  см (10 а.е.), что существенно превышает размеры мазерных глобул. Чтобы мазерная глобула находилась в активированном состоянии, необходимо иметь размеры сброшенной оболочки около 10 а.е. Если оболочка имеет меньшие размеры, то скорость сброса оболочки должна быть ниже. Отметим, что при взрывах сверхновых скорость движения вещества может достигать значений  $v \approx 10^9$  см/с. Таким образом, рассмотренный механизм активации мазерного излучения весьма вероятен.

Перечисленные соображения приводят к мысли о том, что источником квазипериодической активности могут быть тесные кратные массивные звездные системы. В частном случае это могут быть тройные звезды. Квазипериод определяется временной стабильностью системы, в которой третье тело и сам аккреционный диск нарушают условие гармоничности и, следовательно, стабильности периода вспышек.

Можно оценить параметры орбиты компаньонов системы для достижения наблюдаемых характеристик вспышек мазера водяного пара в IRAS

18316-0602. Используя законы небесной механики, получим, что для массивной центральной звезды массой  $30M_{\odot}$  в паре с менее массивным объектом, находящимся на эллиптической орбите с полуосью в 25 а.е., период обращения вокруг общего центра тяжести составит около 8 лет. Именно такой квазипериод между гипертвспышками мазера водяного пара и наблюдается в системе IRAS 18316-0602. В периастре системы происходит мощное гравитационное возмущение оболочки сверхмассивной звезды, приводящее к частичному ее сбросу.

Сброшенная оболочка, достигая аккреционного диска, где расположены мазерные глобулы, создает мощную систему ударных волн, что приводит к взрывному повышению температуры в мазерной глобуле и ее плотности. В связи с этим наблюдается экспоненциальный рост накачки мазера в течение всего времени прохождения оболочки. После окончания активации мазера происходит экспоненциальное падение плотности потока излучения за счет падения плотности пара  $H_2O$ , температуры и плотности вещества мазерной глобулы.

Пока мы достоверно не знаем, является ли двойственность вспышки закономерным явлением. Если это подтвердится, необходимо найти физическую основу для объяснения этого явления.

## 9. ВЫВОДЫ

1. Выполнен длительный мониторинг галактического киломазера IRAS 18316-0602 (G25.65+1.05) в линии водяного пара (переход  $6_{16}-5_{23}$ , частота линии  $f = 22.235$  ГГц) с использованием радиотелескопа РТ-22 КрАО, РТ-26 (Хартрао), РТ-26 (Торунь).

2. Мониторинг объекта позволил получить детальную форму кривой плотности потока излучения во время уникальной двойной вспышки, продолжавшейся с сентября 2017 г. по февраль 2018 г.

3. Экспоненциальный подъем плотности потока излучения во время первой и второй частей двойной вспышки дает возможность с уверенностью утверждать, что киломазер во время всей вспышки вплоть до максимальных потоков находился в ненасыщенном режиме. Дополнительным свидетельством этому заключению может быть не очень высокое значение процента линейной поляризации ( $\approx 30\%$ ), более низкое, чем в другом известном галактическом киломазере Orion KL.

4. Форма линии во время вспышки свидетельствует о том, что она произошла в изолированном источнике на частоте, близкой к той, на которой происходили предыдущие мощные вспышки в 2002 г., 2010 г. и в 2016 г.

5. Вспышка 2017–2018 гг. обнаружила существование двух близких источников мазерного излучения в источнике IRAS 18316-0602, которые имеют разные характеристики излучения в линии водяного пара. Более слабый из этих источников мог быть ответственным за вспышки 2002 г. и 2010–2011 гг.

6. Предложен подход к интерпретации источника первичного энерговыделения в системе, приводящий к вспышке киломазера и увеличивающий его поток в сотни раз.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Национальному научному центру Польши, грант 2016/21/В/ST9/01455. Работа частично поддержана Программой 28 РАН: “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей” и грантом РФФИ 18-42-910018.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, D. D. Thornton, and W. J. Welch, *Nature* **221**, 626 (1969).
2. Б. Ф. Бурке, К. Д. Джонстон, В. А. Ефанов, Б. Д. Кларк и др., *Астрон. журн.* **49**, 465 (1972).
3. M. Harwit, D. A. Neufeld, G. J. Melnik, and M. J. Kaufman, *Astrophys. J. Lett.* **497**, L105 (1998).
4. C. Ceccarelli, E. Caux, G. J. White, S. Molinari, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **331**, 372 (1998).
5. B. Nisini, M. Benedettini, T. Giannini, E. Caux, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **350**, 529 (1999).
6. S. Maret, C. Caccarelli, E. Caux, A. G. G. M. Tielens, and A. Castels, *Astron. and Astrophys.* **395**, 573 (2002).
7. F. Palla, J. Brand, R. Casaroni, G. Comoretto, and M. Felli, *Astron. and Astrophys.* **246**, 249 (1991).
8. S. Kurtz, E. Churchwell, and D. O. S. Wood, *Astrophys. J. Supp.* **91**, 659 (1994).
9. W. H. McCutcheon, P. E. Dewdney, R. Purton, and T. Sato, *Astron. J.* **101**, 1435 (1991).
10. S. Kurtz and P. Hofner, *Astron. J.* **130**, 711 (2005).
11. T. Jenness, P. F. Scott, R. Padman, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **276**, 1024 (1995).
12. W. H. McCutcheon, T. Sato, C. R. Purton, H. E. Matthews, and P. E. Dewdney, *Astron. J.* **110**, 1762 (1995).
13. L. Bronfman, L. A. Nyman, and J. May, *Astron. and Astrophys. Supp.* **115**, 81 (1996).
14. S. Molinari, J. Brand, R. Casaroni, and F. Palla, *Astron. and Astrophys.* **308**, 573, (1996).
15. S. P. Todd and S. K. Ronsay Howat, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **367**, 238 (2006).
16. E. L. Gibb, D. C. Whittet, A. C. A. Boogert, and A. G. G. M. Tielens, *Astrophys. J. Supp.* **151**, 35 (2004).
17. J. Brand, R. Casaroni, P. Caselli, M. Catarzi, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Supp.* **103**, 541 (1994).
18. D. J. van der Walt, M. J. Gaylard, and G. C. Macleod, *Astron. and Astrophys. Supp.* **110**, 81 (1995).
19. C. Codella, M. Felli, and V. Natale, *Astron. and Astrophys.* **311**, 971 (1996).
20. Н. С. Нестеров, А. Е. Вольвач, И. Д. Стрепка, В. М. Шульга, В. И. Лебедь и А. М. Пилипенко, *Радиофизика и радиоастрономия* **5**, 320 (2000).
21. А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, И. Д. Стрепка, А. В. Антюфеев, В. В. Мышенко, С. Ю. Зубрин и В. М. Шульга, *Изв. Крымской Астрофиз. обс.* **104**, 72 (2009).
22. T. M. Heckman and W. T. Sullivan, *Astrophysical Letters* **17**, 105, (1976).
23. F. D. Kahn, *Astron. and Astrophys.* **37**, 149 (1974).
24. W. K. Hartmann, *Astrophys. J. Lett.* **149**, L87 (1967).
25. P. Goldreich and J. Kwan, *Astrophys. J.* **191**, 93 (1974).
26. I. J. Stief, B. Donn, S. Glicker, E. F. Gentien, and J. E. Mentall, *Astrophys. J.* **171**, 21 (1972).
27. F. D. Kahn, *Astron. and Astrophys.* **37**, 149 (1974).
28. F. O. Clark, D. Buhl, and L. E. Snyder, *Astrophys. J.* **190**, 545, (1974).
29. B. F. Burke, T. S. Giuffrida, and A. D. Haschick, *Astrophys. J. Lett.* **226**, L21, (1978).
30. P. Goldreich, D. A. Keeley, and J. J. Kwan, *Astrophys. J.* **179**, 111 (1973).
31. P. Goldreich, D. A. Keeley, and J. J. Kwan, *Astrophys. J.* **182**, 55 (1973).
32. N. L. Cohen and S. H. Zisk, *BAAS* **12**, 507 (1980).
33. S. J. Chan, T. Henning, and K. Schreyer, *Astrophys. J. Supp.* **115**, 285, (1996).
34. B. Mookerjea, S. K. Ghosh, *J. Astrophys. Astron.* **20**, 1 (1999).
35. J. A. Green and McClure-Griffiths, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **417**, 2500 (2011).
36. Е. Е. Лехт, М. И. Пашенко, Г. М. Рудницкий и А. М. Толмачев, *Астрон. журн.* **95**, 224 (2018).
37. R. Valdetaro, F. Palla, J. Brand, R. Casaroni, G. Comoretto, M. Felli, and F. Palagi, *Astron. and Astrophys.* **383**, 244 (2002).
38. G. M. Rudnitskii, E. E. Lekht, and I. I. Berulis, *Astronomy Letters* **25**, 398 (1999).
39. A. E. Volvach, L. N. Volvach, M. Gordon, E. E. Lekht, G. M. Rudnitskij, and A. M. Tolmachev, *Astronomer's Telegram*, 10728 (2017).
40. L. N. Volvach, A. E. Volvach, M. G. Larionov, G. C. MacLeod, S. P. van den Heever, P. Wolak, M. Olech, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, Issue 1, L90 (2019).
41. T. Omodaka, T. Maeda, M. Miyoshi, A. Okudaira, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **51**, 333 (1999).
42. T. Shimoikura, H. Kobayashi, T. Omodaka, P. J. Diamond, L. I. Matveyenko, and K. Fujisawa, *Astrophys. J.* **634**, 459 (2005).
43. Z. Abraham, N. L. Cohen, R. Ophel, J. C. Raffaelli, and S. H. Zisk, *Astron. and Astrophys.* **100**, 10 (1981).

44. Z. Abraham, J. W. S. Vilas Boas, and L. F. del Ciampo, *Astron. and Astrophys.* **167**, 311 (1986).
45. P. Goldreich and J. Kwan, *Astrophys. J.* **190**, 27 (1974).
46. D. N. Friedal, and S. L. Widicus Weaver, *Astrophys. J.* **742**, 64 (2011).
47. M. Felly, E. Churchwell, T. L. Wilson, and G. B. Taylor, *Astron. and Astrophys.* **98**, 137 (1993).
48. S. Okumura, T. Yamashita, and S. Saco, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 823 (1999).
49. T. Hirota, M. Tsuboi, and Y. Kurono, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, 106 (2014).
50. T. Hirota, M. K. Kim, and Y. Kurono, *Astrophys. J. Lett.* **739**, 59 (2011).
51. G. Garay, J. M. Moran, and A. D. Haschick, *Astrophys. J.* **338**, 244 (2011).
52. T. Shimoikura, H. Kobayashi, T. Omodaka, P. J. Diamond, L. I. Matveyenko, and K. Fujisawa, *Astrophys. J.* **634**, 459 (2005).
53. S. Parfenov and A. M. Sobolev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **444**, 620 (2014).
54. K. Inayoshi, K. Sugiyama, and T. Hosokawa, *Astrophys. J.* **773**, 70 (2013).
55. J. P. Maswanganye, M. J. Gaylard, S. Goedhart, D. J. Walt, van der Booth R. S., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **446**, 2730 (2015).
56. R. Genzel, D. Dowens, J. M. Moran, K. J. Johnston, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **78**, 239 (1979).
57. G. Siringo, E. Kreysa, A. Kovács, F. Schuller, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **497**, 945 (2009).