

# Исследование переменности излучения мазеров в областях образования массивных звезд

Сергей А. Хайбрахманов<sup>1,2</sup>, Андрей М. Соболев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, <sup>2</sup>Уральский федеральный университет  
E-mail: [s.khaibrakhmanov@gmail.com](mailto:s.khaibrakhmanov@gmail.com)

## Введение

Мазеры метанола возникают в областях образования массивных звезд (Cragg et al., 2005, MNRAS, 360, 533) и могут дать информацию о свойствах как самой звезды, так и околозвездного вещества. Многие мазеры являются переменными. Поскольку мазеры метанола второго класса накачиваются инфракрасным излучением, их вспышечное поведение, как правило, ассоциируется с соответствующей переменностью источников излучения, в частности – молодых массивных звездных объектов (ММЗО), в окрестностях которых наблюдают мазеры. Переменность излучения звезд может быть вызвана как внутренними процессами, так и взаимодействием с околозвездным газом. Например, для объектов S255IR NIRS 3, NGC6334I, G358.93-0.03, G24.33+0.14 и G323.46-0.08 установлена непосредственная связь между вспышками мазерного излучения на 6.7 ГГц и вспышками светимости ММЗО, вероятно вызванными эпизодической аккрецией вещества из околозвездного аккреционного диска.

В настоящей работе рассматривается малоамплитудная короткопериодическая переменность вспыхивающих мазеров в ММЗО G33.641-0.228. Обсуждается переменность мазеров в G11.497-1.485 и G323.46-0.08.

## Сводка наблюдательных данных о G33.641-0.228

Область звездообразования G33.641-0.228 находится на расстоянии 4 кпк от Земли и характеризуется болометрической светимостью  $L_* = 1.2 \cdot 10^4 L_\odot$ , системная скорость объекта,  $v_{LSR}$ , составляет около 60 км/с (см. Fujisawa et al., 2012, PASJ, 2012, 64, 17). Согласно измерениям зеемановского расщепления линий метанола в данной области зарегистрировано магнитное поле интенсивностью  $B_m = 18$  мГс (Vlemmings, 2008, A&A, 484, 773). Всего в окрестности ММЗО на 6.7 ГГц зарегистрировано 6 мазерных пятен, пространственное расположение которых представляет собой дугу длиной примерно 650 а.е.

Согласно наблюдательным данным, компонента II ( $v_{LSR} = 59.3$  км/с) характеризуется нерегулярными вспышками, в процессе которых поток излучения возрастал в 4 – 25 раз в течение 1 – 3 дней и затем уменьшался до первоначального состояния за 5 – 25 дней. Заметной корреляции изменений блеска компоненты II и других компонент не наблюдалось.

Кривые блеска, построенные для ряда ярких вспышек, демонстрируют короткопериодические малоамплитудные колебания потока (см. рис. 1). Период этих «микроколебаний» составляет от нескольких часов до 1 – 2 дней, амплитуда – порядка 20 Ян.

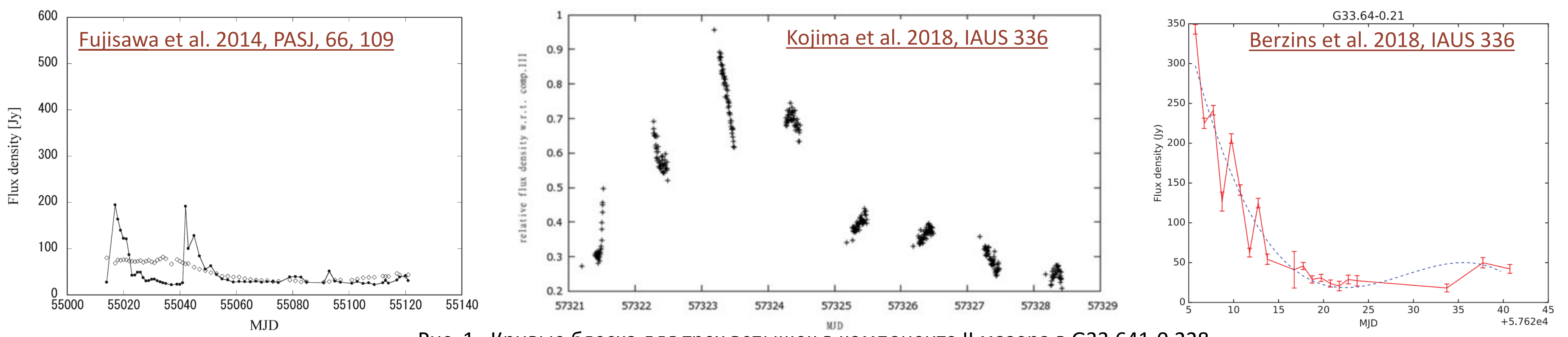


Рис. 1. Кривые блеска для трех вспышек в компоненте II мазера в G33.641-0.228.

## Анализ наблюдательных данных

В предположении о том, что температура в области образования мазера,  $T_m$ , определяется излучением звезды, можно получить оценку расстояния от звезды до области образования пятна

$$r_m = 1670 \text{ а. е.} \left( \frac{T_m}{100 \text{ К}} \right)^{-2} \left( \frac{L_*}{1.2 \cdot 10^4 L_\odot} \right)$$

Оценка плазменного параметра в области мазера

$$\beta = 0.01 \left( \frac{T_m}{100 \text{ К}} \right) \left( \frac{n_m}{10^6 \text{ см}^{-3}} \right) \left( \frac{B_m}{18 \text{ мГс}} \right)^{-2}$$

показывает, что магнитное поле является динамически сильным и может влиять на течение газа в рассматриваемой области. Если предположить, что вспышка мазера вызвана аккреционной вспышкой на поверхности звезды, то можно получить связь между соотношением светимостей звезды во

вспышечном и «спокойном» состояниях,  $f_b = L_b/L_*$ , и темпом аккреции вещества во время вспышки  $\dot{M}_b$ :

$$\dot{M}_b = 4.3 \cdot 10^{-4} \frac{M_\odot}{\text{год}} \left( \frac{M_*}{8 M_\odot} \right)^{-1} \left( \frac{T_*}{2 \cdot 10^4 \text{ К}} \right)^{-2} \left( \frac{L_*}{1.2 \cdot 10^4 L_\odot} \right)^{\frac{3}{2}} (f_b - 1)$$

Отсюда следует, что в зависимости от характеристик звезды и вспышки масса аккрецированного вещества может лежать в пределах от 0.01 до  $1 M_{\text{Юр}}$ . Образование сгустков планетных масс подтверждается оценкой джинсовской массы для околозвездного диска

$$M_c = 0.15 M_{\text{Юр}} \left( \frac{T}{100 \text{ К}} \right)^3 \left( \frac{n}{10^{11} \text{ см}^{-3}} \right)^{-2} \left( \frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-3} \left( \frac{H/r}{0.1} \right)^{-3}$$

где  $H/r$  – отношение толщины диска к его радиусу.

## Гипотеза о причине микропеременности

Падение вещества на звезду может приводить к ее колебаниям, которые будут выражаться в периодических изменениях ее радиуса и, следовательно, светимости. Период собственных сферически-симметричных колебаний звезды можно оценить как (Хайбрахманов и Соболев 2022)

$$P_0 = 19 \text{ ч} \left( \frac{R_*}{9 R_\odot} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{M_*}{8 M_\odot} \right)^{-1/2}$$

Оценка показывает, что массивная звезда может испытывать колебания с периодами от нескольких часов до нескольких дней. Эти значения согласуются с периодами микропеременности на кривых блеска мазера в G33.641-0.228.

Следует отметить, что если звезда является устойчивой относительно внешних возмущений, то обсуждаемые колебания будут затухать со временем. Это также согласуется с уменьшением амплитуды микроколебаний на кривых блеска мазера в объекте G33.641-0.228 (см. рис. 1). Если звезда является неустойчивой, внешнее воздействие может вызывать в ней самоподдерживающиеся колебания, подобные колебаниями цефеид, обусловленным  $\kappa$ -механизмом в зоне частичной ионизации гелия.

## Заключение и обсуждение

Мазеры в окрестностях ММЗО демонстрируют как периодические, так и нерегулярные вспышки светимости. Переменность с периодами в несколько десятков дней в объектах G323.46-0.08 и G11.497-1.485 может быть объяснена пульсационной неустойчивостью звезд, вызванной  $\kappa$ -механизмом в слое частичной ионизации гелия (Wolf et al, 2024, A&A, 688, A8). Переменность на более длительных масштабах – влиянием звездного компаньона в двойной системе (Parfenov & Sobolev, 2014, MNRAS, 444, 620).

Нерегулярная переменность мазеров в окрестностях ММЗО, вероятно, обусловлена эпизодической аккрецией из околозвездного диска. В этом случае переменность аккреции может быть связана с а) гравитационной фрагментацией диска и последующим образованием сгустков, мигрирующих в сторону звезды и аккрецирующих на нее (Meyer et al 2019, MNRAS, 482, 5459), б) перестановочной неустойчивостью на границе магнитосферы звезды, в) неустойчивостями в диске, например, магниторотационной неустойчивостью. Эти механизмы различаются характерными временами и темпами аккреции. Оценки темпов аккреции для вспыхивающего мазера в G33.641-0.228 показывают, что в этом объекте имели место события аккреции объектов планетных масс. Следовательно, околозвездный диск в G33.641-0.228 может быть протопланетным. Падение массивных сгустков на звезду может обуславливать затухающие короткопериодические колебания светимости звезд и, как следствие, переменность мазерных линий, наблюдающуюся в G33.641-0.228.