

Мазерное излучение H_2O активных ядер галактик и прецизионная космология.

докладчик Нестеренок Александр

План доклада:

- История вопроса;
- Мазерное излучение активных галактических ядер NGC 4258 и UGC 3789;
- Результаты численного моделирования генерации мазерного излучения H_2O .

Фундаментальные физические константы и прецизионная физика 2010

ФТИ им. Иоффе 2010

Космические H_2O -мазеры.

“maser” - **m**icrowave **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation

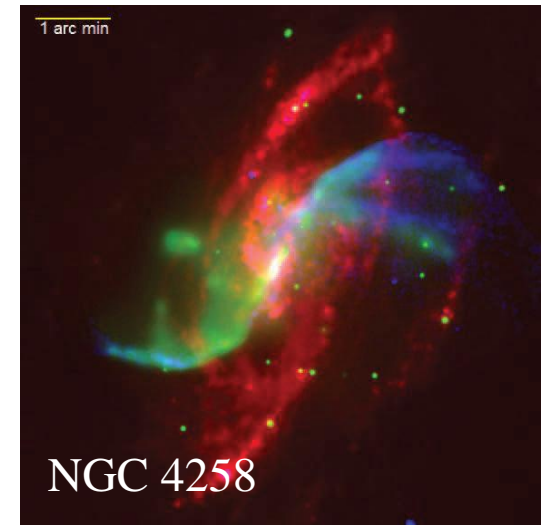
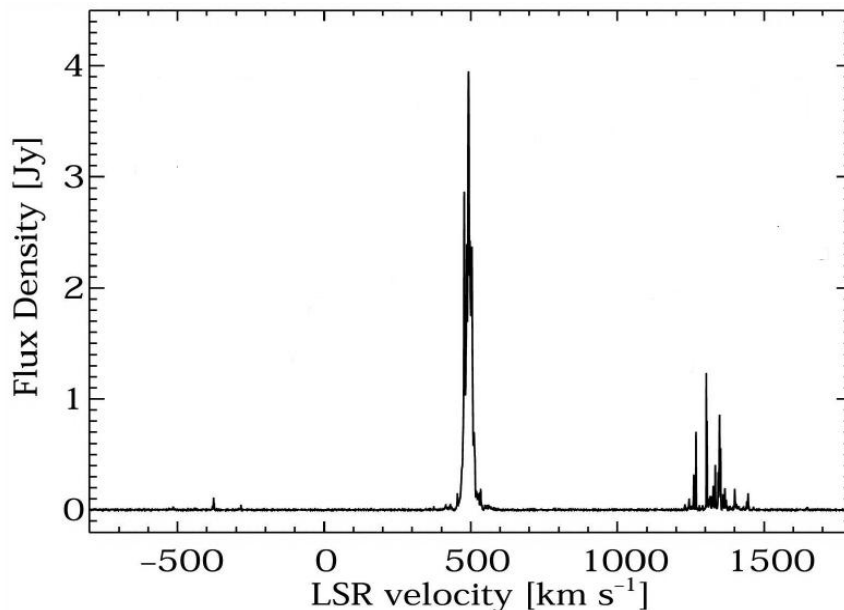
- 1968 г – открытие излучения H_2O на частоте 22.2 ГГц Ченгом и коллегами в направлении на области звездообразования Галактики,
- 1979 г – открытие мазерного излучения на частоте 22.2 ГГц в направлении на центральную область галактики NGC 4945 (дос Сантос и Лепине),
- 1995 г – открытие тонкого аккреционного диска в центральной области галактики NGC 4258 на основе данных интерферограммы мазерных источников (Миоши и др.),
- 1999 г – определение «геометрического» расстояния до галактики NGC 4258 (Гернштейн и др.),
- 2005 г – обнаружение миллиметрового мазерного излучения H_2O в активном ядре галактики NGC 3079 (Хамфрейз и др.),
- 2006 г – начало «Мегамазерного космологического проекта».
- 2009 г – открытие мазерного излучения 22.2 ГГц в квазаре MG J0414+05346 на $z = 2.66$ (Импелизери и др.),

Мазерное излучение H₂O от центральной области NGC 4258.

Мазерное излучение H₂O от центральной области галактики NGC 4258 было обнаружено Клаузеном и др. в 1984 г. «Изотропная светимость» в мазерной линии 22.2 ГГц составляла 120 солнечных светимостей. Сдвиг частоты излучения соответствовал скорости удаления галактики около 500 км/с.

Помимо центрального наиболее яркого источника Накай и др. в 1993 г обнаружили менее интенсивные, высокоскоростные компоненты излучения, скорости которых относительно центрального источника составляли около ± 1000 км/с.

Спектральная плотность потока излучения от центральной области NGC 4258.



По оси абсцисс отложена относительная скорость:

$$u = -c \left(\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \right)$$

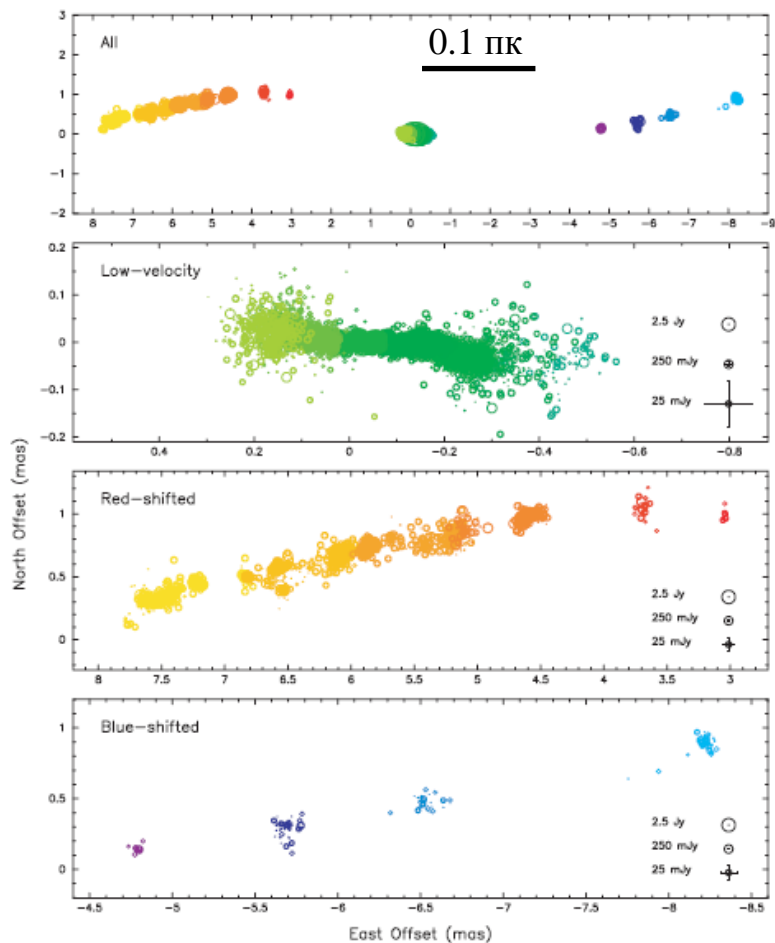
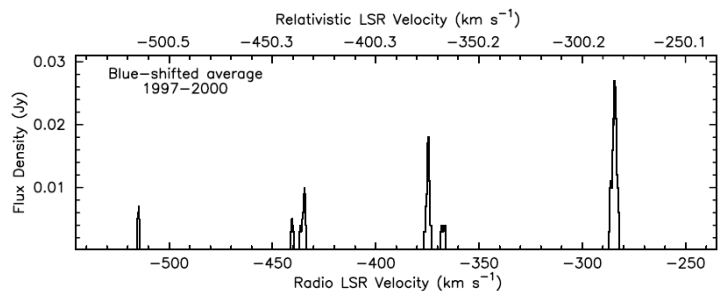
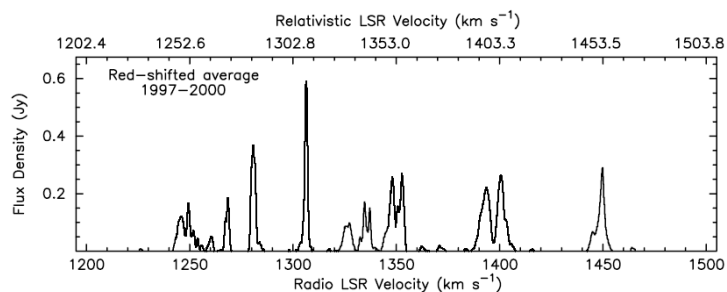
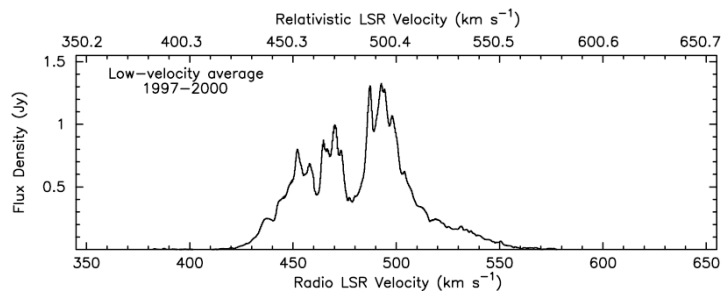
$\nu_0 = 22.235$ ГГц – частота перехода.

$1 \text{ Ян} = 10^{-23} \text{ эрг}/(\text{с см}^2 \text{ Гц})$

Claussen and Lo, *Astrophys. J.* 308, pp. 592-598, 1984,
Nakai, *Nature* 361, pp. 45-47, 1993,
Yang et al., *Astroph. J.*, 660, pp. 1106-1117, 2007,
Moran, *Proc. A Celebration of NRAO's 50th Anniversary*
ASP Conference Series, p.87, 2008.

Пространственно-скоростная структура источников NGC 4258.

1995 г – начало исследований NGC 4258 с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ).



Miyoshi et al., Nature 373, pp. 127-129, 1995,
A. L. Argon et al., Astrophys. J. 659, pp. 1040-1062, 2007.

Модель аккреционного диска.

Проекция скорости источников на луч зрения в системе отсчета диска:

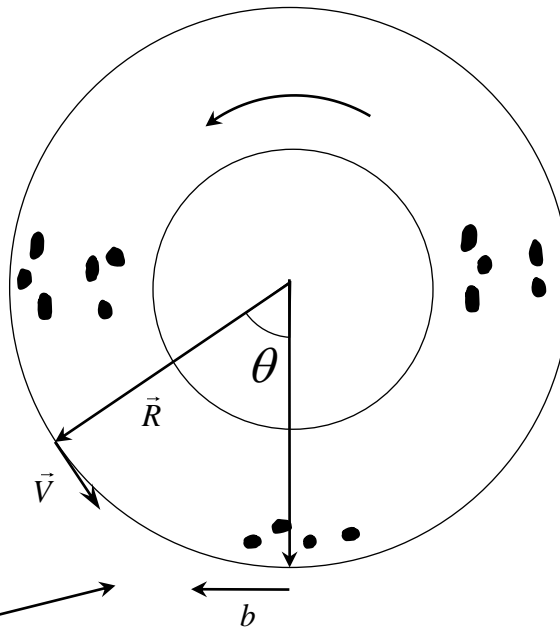
$$V_l = \sqrt{\frac{GM}{R}} \sin \theta$$

$$\sin \theta \approx 1$$

$$V_l = \pm \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

$$\sin \theta \approx \frac{b}{R}$$

$$V_l = \sqrt{\frac{GM}{R}} \frac{b}{R}$$

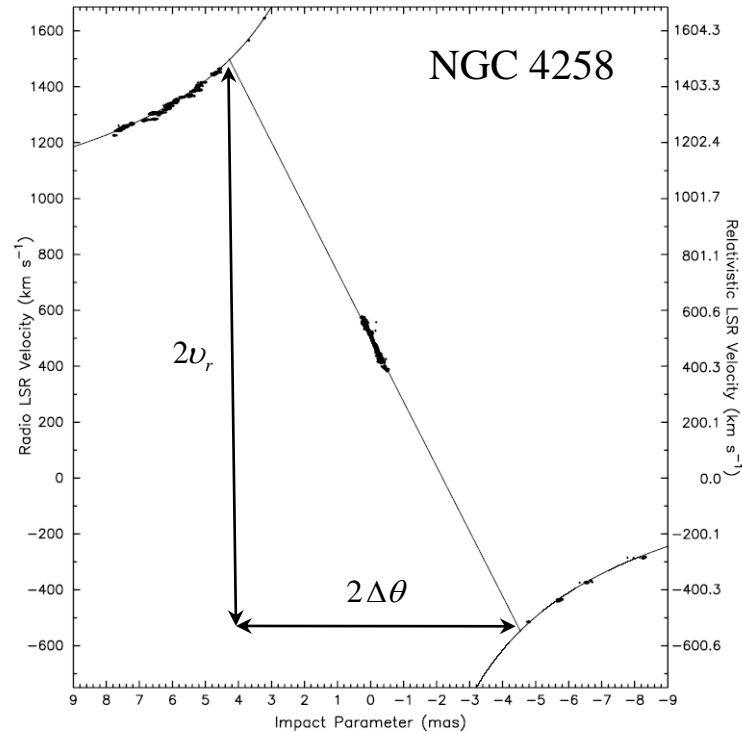


b – расстояние в плоскости диска от прямой, проходящей через центр диска и наблюдателя.



наблюдатель

Определение расстояния до системы источников.

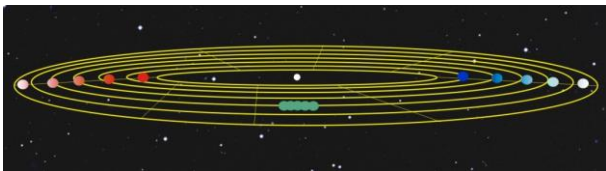
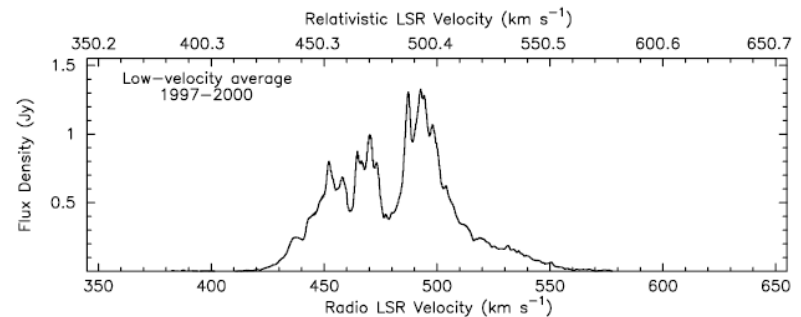


Угловое расстояние до аккреционного диска:

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

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

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



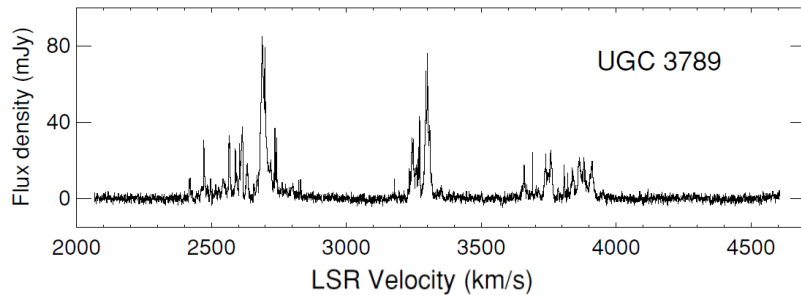
«Геометрическое» расстояние до галактики NGC 4258 составило (Гернштейн и др. 1999):

$$D = 7.2 \pm 0.5 \text{ Мпк.}$$

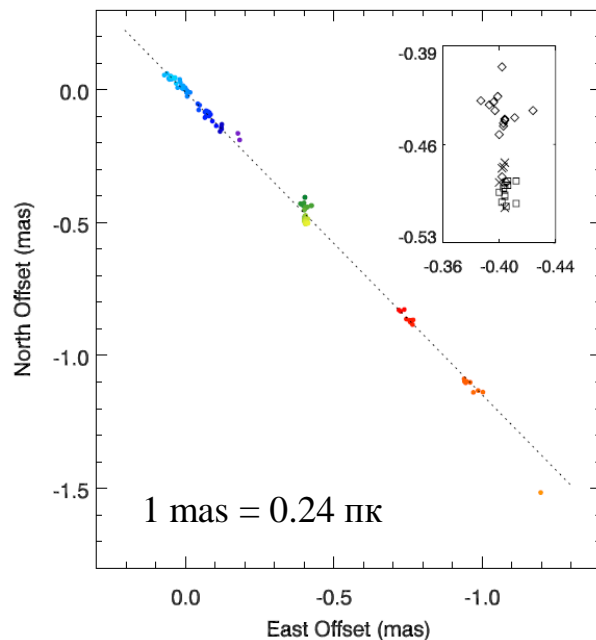
Масса центрального тела системы, определённая по кривой вращения, составляет около $3.8 \times 10^7 M_{\odot}$.

Мазерное излучение H_2O от центральной области UGC 3789.

Спектральная плотность потока излучения UGC 3789 в линии 22.2 ГГц.



Пространственная структура источников.



Скорость удаления галактики UGC 3789 в локальной системе отсчета составляет около 3325 км/с. Особенности спектра мазерного излучения UGC 3789 указывают на то, что, аналогично NGC 4258, излучение рождается в дифференциально-вращающемся аккреционном диске.

Радиусы вращения «голубых» высоко-скоростных источников лежат в диапазоне от 0.08 до 0.16 пк, а скорости вращения достигают 800 км/с. «Красные» источники простираются на расстояния от 0.11 до 0.3 пк от центра и имеют скорости до 650 км/с.

Масса центрального тела системы, определённая по кривой вращения, составляет около $1.1 \times 10^7 M_{\odot}$.

«Геометрическое» расстояние до системы UGC 3789 составило:

$$D = 49.9 \pm 7.0 \text{ Мпк.}$$

Мегамазерный космологический проект Megamaser Cosmology Project

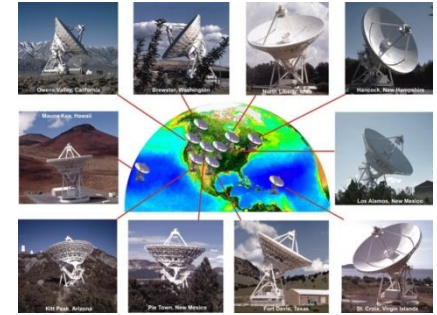
- поиск источников мазерного излучения, подобных NGC 4258, и определение «геометрического» расстояния до таких систем. Это позволит откалибровать шкалы расстояний, основанные на других методах (цефеиды, метод Талли-Фишера, сверхновые Ia и др.), и кроме того, независимо определить постоянную Хаббла.

Цель проекта – определение постоянной Хаббла с точностью до 3%.

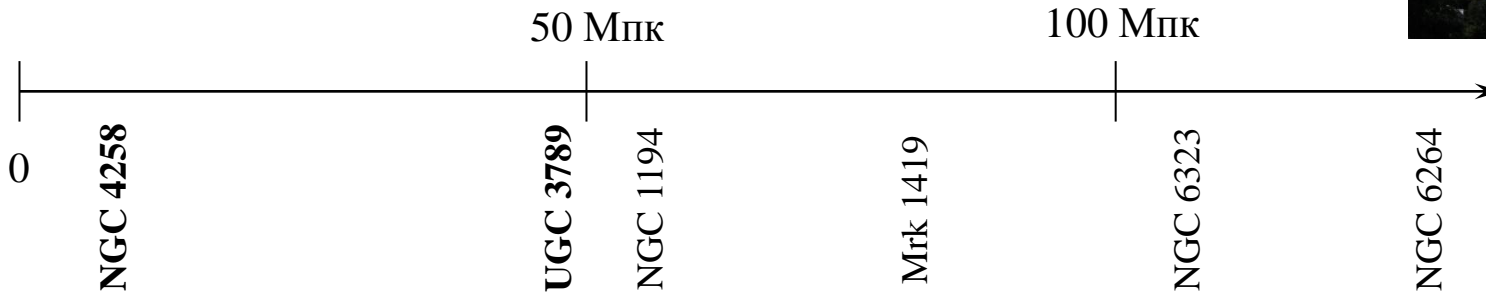
Green Bank Telescope



VLBA

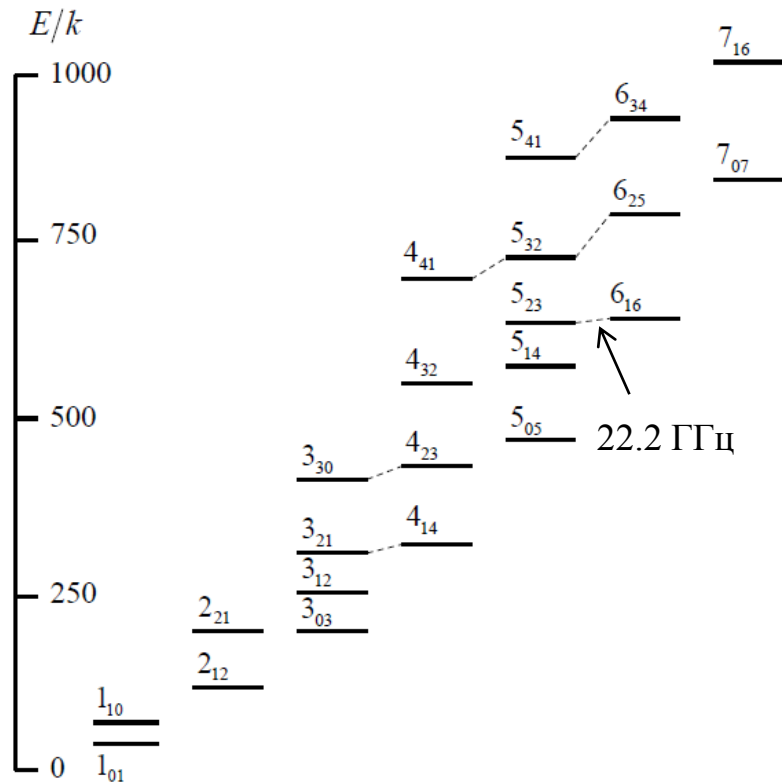


Radio Telescope Effelsberg



NGC 4258: $D = 7.2 \pm 0.5$ Мпк (Гернштейн и др. 1999),
 UGC 3789: $D = 49.9 \pm 7.0$ Мпк,
 $H_0 = 69 \pm 11$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ (Браатс и др. 2010)

Схема вращательных энергетических уровней молекул орто-Н₂¹⁶О.



Мазерная линия на частоте 22.2 ГГц соответствует разрешенному электродипольному переходу между вращательными уровнями молекул орто-Н₂¹⁶О 6₁₆ → 5₂₃.

В качестве основного механизма накачки космических Н₂О-мазеров, как правило, рассматривается столкновительное возбуждение молекул Н₂О на вышележащие уровни с последующей радиационной дезактивацией этих уровней.

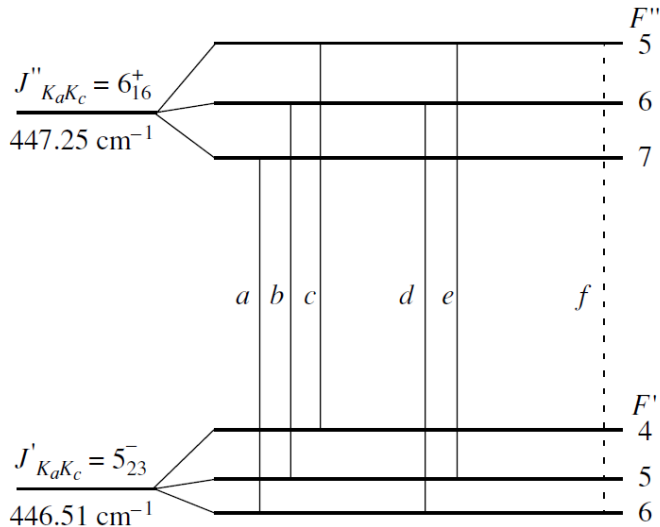
Предполагаемые физические условия в источниках мазерного излучения Н₂О:

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

$$T \sim 400 - 1000 \text{ К.}$$

значения энергии указаны в кельвинах,
 k – постоянная Больцмана.

Спектральный профиль коэффициента усиления в линии 22.2 ГГц.



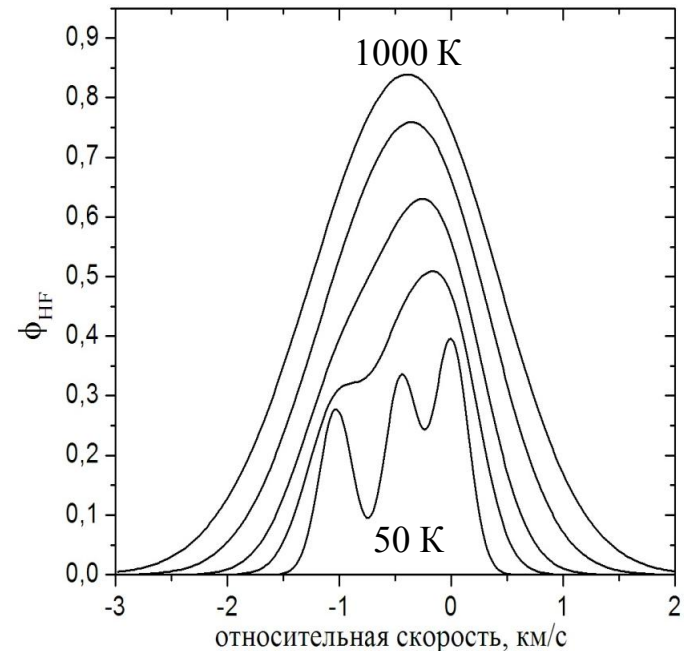
Ядерный спин ^{16}O равен 0, ядерный спин протона $\frac{1}{2}$. Существует две модификации молекулы H_2^{16}O – орто и пара с суммарным ядерным моментом $\mathbf{I} = 1$ и 0, соответственно.

Уровни молекул орто- H_2O расщеплены на три подуровня: $F = J - 1, J, J + 1$, где J - вращательный угловой момент молекулы, а $\mathbf{F} = \mathbf{J} + \mathbf{I}$ - суммарный угловой момент системы.

Спектральный профиль коэффициента усиления в линии 22.2 ГГц с учётом сверхтонкого расщепления сигнальных уровней для температур (снизу вверх) 50, 150, 300, 600, 1000 К.

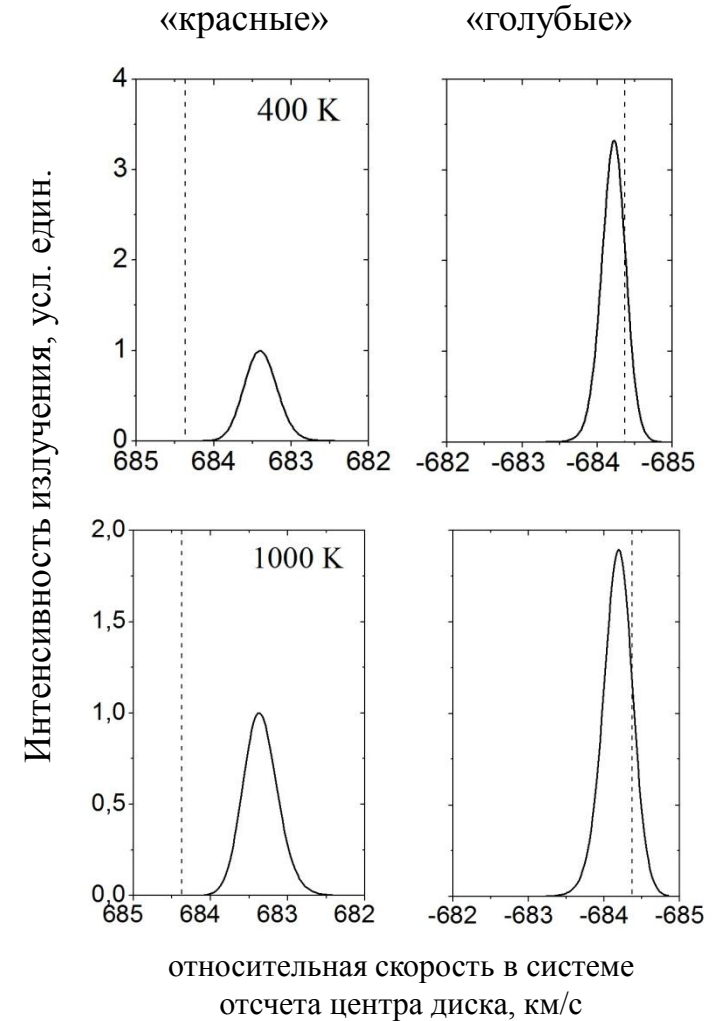
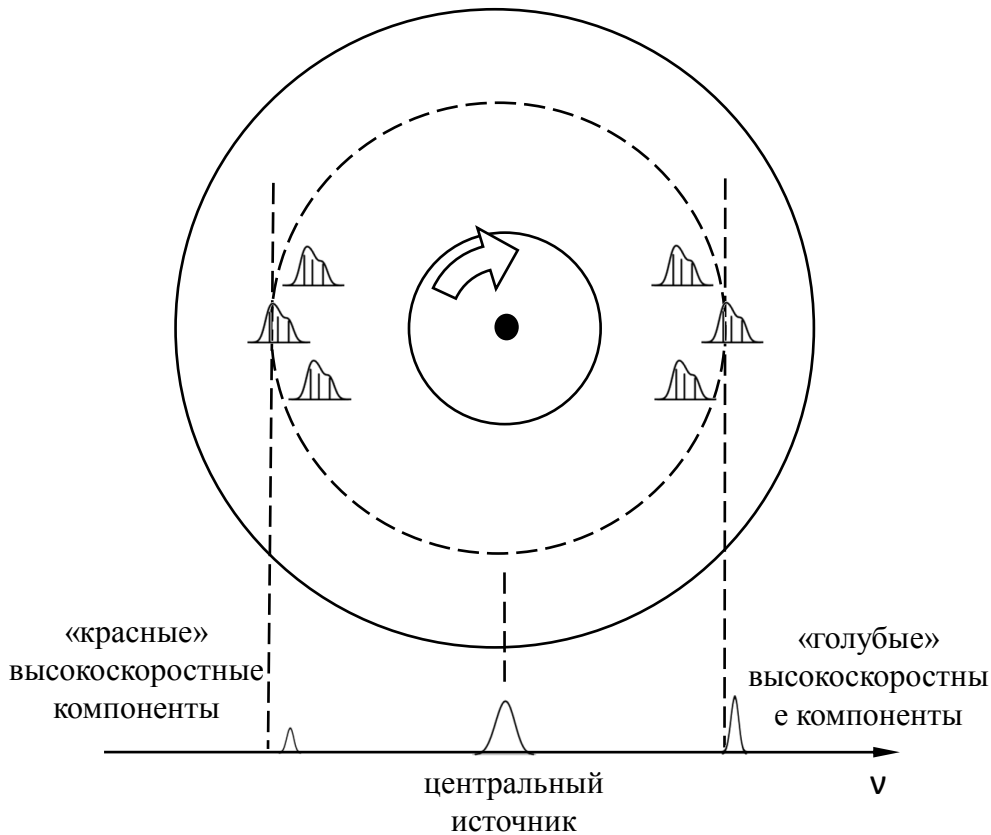
Профиль нормирован следующим образом:

$$\int \phi_{HF}(v) dv = \sqrt{\pi} \Delta v_D$$



Интенсивность излучения высокоскоростных источников.

Схема, демонстрирующая изменение частоты излучения газа при его движении по окружности:



Параметры, используемые в расчетах :
 масса центрального тела $1.1 \times 10^7 M_{\odot}$ (система UGC 3789)
 радиус орбиты 0.1 пк
 скорость вращения 684.4 км/с
 оптическая толща в мазерной линии ~ 25

Выводы.

Сверхтонкое расщепление сигнальных уровней мазерной линии H_2O на частоте 22.2 ГГц приводит к дополнительному уширению спектрального профиля коэффициента усиления, а также к его асимметрии.

Асимметрия профиля может быть одной из причин наблюдаемой в системах UGC 3798 и других повышенной яркости «голубых» высокоскоростных компонент излучения по отношению к «красным».

Асимметрия спектрального профиля относительно частоты максимума профиля приводит к дополнительному сдвигу частот линий, сравнимому с релятивистскими поправками к классическому эффекту Доплера в рассматриваемых задачах.