

ОКОЛОЯДЕРНЫЙ ПЛОТНЫЙ ГАЗ В
ОН-МЕГАМАЗЕРНЫХ ГАЛАКТИКАХР.А.КАНДАЛЯН^{1,2}, М.М.АЛ-ЗЮТ²

Поступила 24 мая 2010

Принята к печати 8 сентября 2010

Обсуждаются свойства выборки внегалактических ОН мазерных источников в широком диапазоне спектра. На основе выборки 22 мазерных галактик показано, что ОН, HCN и рентгеновское излучения тесно связаны между собой. С другой стороны, эти излучения зависят от массы ядра галактики. Показано, что ширина линии излучения ОН обусловлена вращением околоядерного диска, в плотных областях которого и возникают ОН, HCN излучения. Рентгеновский нагрев может возбуждать молекулы ОН, HCN.

Ключевые слова: *мазеры - галактики; молекулы - галактики; рентгеновское излучение*

1. *Введение.* Молекула HCN имеет высокий дипольный момент ($\mu \sim 2.98 D$), поэтому ее линия излучения на волне $\lambda \sim 3.4$ мм ($J=1-0$) возникает в плотных слоях молекулярного газа ($n_{H_2} \geq 10^4$ см⁻³) в околоядерной области галактик (<1 кпк) и "отслеживает" (tracе) плотные области газа [1,2]. Как известно, мегамазерное излучение ОН и рентгеновское излучение также возникают в околоядерной области галактик. Поэтому, представляет определенный интерес исследование взаимосвязи этих трех излучений, с одной стороны, и их связь с массой ядра галактик, с другой.

В работе [3] было получено, что в ОН-мегамазерах относительная доля плотного газа высока ($L_{HCN}/L_{CO} > 0.07$). Однако в указанной работе число галактик с HCN излучением не велико, всего 8. В настоящее время (май, 2010) число мегамазеров с HCN излучением почти в два раза больше. Кроме этого, нас интересует взаимосвязь излучений молекул ОН и HCN от массы ядра галактики и роль рентгеновского излучения в плотных областях газа. Настоящая работа - это первая попытка исследования вышеуказанных вопросов в ОН-мегамазерах.

Наш анализ основан на непараметрических методах статистики, которые позволяют проводить более корректный анализ данных наблюдений, особенно, когда размер выборки не велик и нужно учитывать возможные эффекты селекции [4]. В разделе 2 обсуждается выборка мегамазеров. В разделе 3 приведен непараметрический метод корреляции Спирмана. В разделе 4 приведены результаты анализа. В разделе 5 обсуждаются

результаты настоящей работы.

2. *Выборка ОН-мегамазеров.* В настоящее время число мегамазеров составляет примерно 120 [5-10]. Из этого числа мы выделили те галактики, у которых известны либо излучение молекулы HCN, либо масса ядра. Число таких галактик оказалось 22 (табл.1). В табл.1 последовательно приведены: 1. Название галактики. 2. Красное смещение, z . 3. Ширина (FWHM) линии в системе покоя галактики, W , в км с⁻¹. 4. Светимость

Таблица 1

СПИСОК 22 ОН МЕГАМАЗЕРОВ

IRAS	z	W (км с ⁻¹)	$\log L_{\text{OH}}$ (L_{\odot})	$\log L_{2-10\text{кэВ}}$ (эрг с ⁻¹)	$\log L_{\text{HCN}}$ (К км с ⁻¹ пк ²)	$\log M_{\odot}$ (M_{\odot})	Ссылки
00509+1225	0.061	410	2.31			7.26	[14]
01418+1651	0.027	110	2.75	40.48		6.85	[15]
09320+6134	0.039	120	1.80	41.68	9.00		
10173+0828	0.048	39	2.41	39.15		6.90	[16]
11010+4107	0.035	200	2.09	40.67	8.60		
11257+5850	0.010	246	1.18	41.37	8.32		
11506-3851	0.011	120	1.50		8.50		
12071-0444	0.128	233	2.68	41.12		7.46	[17]
12112+0305	0.073	280	3.11	41.20	9.03		
12243-0036	0.007	70	-0.14	39.25	7.65		
12540+5708	0.042	290	2.87	42.43	9.27	8.95	[18]
13428+5608	0.038	141	2.60	42.36	9.18	8.18	[19]
15065-1107	0.006	102	-0.18		6.96		
15107+0724	0.013	150	1.03		8.15		
15327+2340	0.018	117	2.49	40.91	8.96	7.08	[20]
16300+1558	0.242	130	2.87			7.52	[17]
17208-0014	0.042	164	2.99	41.33	9.58	8.37	[16]
20550+1656	0.036	112	2.05		8.35		
22025+4205	0.014	152	0.62		8.24		
22491-1808	0.077	171	2.49	40.88		7.42	[17]
23234+0946	0.128	263	2.63			7.39	[17]
23365+3604	0.064	299	2.77	41.50	9.18	7.57	[16]

мазерного излучения, L_{OH} в солнечных единицах. 5. Рентгеновская светимость в диапазоне 2-10 кэВ, $L_{2-10\text{кэВ}}$, в эрг с⁻¹. Данные рентгеновского излучения взяты из работы [11]. 6. HCN светимость, L_{HCN} , в К км с⁻¹ пк². Такая необычная единица светимости L_{HCN} связана со спецификой спектральных наблюдений в миллиметровом диапазоне, где часто интенсивность линии выражается как интеграл яркостной температуры по скоростям излучения [12]. Данные наблюдений HCN были взяты из работ [1,2,13]. 7. Масса предполагаемой черной дыры, M_{\odot} , в солнечных единицах. 8. Ссылки на массы черных дыр. Светимость молекулы HCN была вычислена, согласно формуле [12]

$$L_{\text{HCN}} = 3.25 \cdot 10^7 \cdot S_{\text{HCN}} \cdot \Delta V \cdot v^{-2} \cdot D_L^2 \cdot (1+z)^{-3},$$

где $S_{\text{HCN}} \cdot \Delta V$ - интегральная плотность потока в единицах Ян км с⁻¹, v - наблюдаемая частота линии в ГГц, D_L - расстояние в Мпк, z - красное смещение. Светимости L_{OH} , $L_{2-10\text{мВ}}$ и D_L были вычислены, согласно формулам, приведенным в работе [21]. Постоянная Хаббла принята $H_0 = 75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

3. Ранговая корреляция Спирмана и частные коэффициенты корреляции. Одним из способов оценки коэффициента корреляции между двумя переменными является непараметрический метод Спирмана [22]. В этом методе вместо значений самих переменных x и y используются их ранги (порядковый номер, когда переменные расположены в порядке нарастания). Коэффициент корреляции между рангами можно вычислить согласно формуле:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{x_i} - \bar{R}_x)(R_{y_i} - \bar{R}_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{x_i} - \bar{R}_x)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (R_{y_i} - \bar{R}_y)^2}},$$

где R_{x_i} и R_{y_i} - ранги i -го элемента переменных x и y , соответственно. $\bar{R}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{x_i}$ и $\bar{R}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{y_i}$ - средние значения рангов переменных x и y , соответственно. Для больших n ($n > 10$) коэффициент Спирмана имеет t -распределение Стьюдента $(n-2)^{1/2} \rho / (1-\rho^2)^{1/2}$.

Теперь перейдем к частным коэффициентам корреляции. Предположим, мы имеем три случайных переменных x , y , z и они взаимокоррелированы. Нас интересует коэффициент корреляции между переменными x и y , когда переменная z фиксирована. Иначе говоря, мы хотим вычислить "частный" коэффициент корреляции между x и y , вычитая коэффициент корреляции между x и z , с одной стороны, и y и z , с другой. Такой коэффициент корреляции называется частным коэффициентом корреляции и определяется согласно формуле:

$$\rho_{xy.z} = \frac{\rho_{xy} - \rho_{xz}\rho_{yz}}{\sqrt{(1-\rho_{xz}^2)(1-\rho_{yz}^2)}},$$

где $\rho_{xy.z}$ - частный коэффициент корреляции между x и y при фиксированной переменной z , ρ_{xy} , ρ_{xz} и ρ_{yz} - коэффициенты корреляций между соответствующими переменными. Вероятность распределения частных коэффициентов корреляции также подчиняется t -распределению Стьюдента и в случае трех переменных имеет следующий вид: $(n-4)^{1/2} \rho / (1-\rho^2)^{1/2}$. Аномальные значения случайных переменных не влияют на ранговые коэффициенты корреляции Спирмана, поэтому, когда выборка данных

неоднородна и малочисленна - непараметрический метод предпочтительнее, чем параметрический метод Пирсона.

4. *Анализ результатов.* Согласно статистике Колмогорова-Смирнова практически все параметры, приведенные в табл.1, имеют распределения отличные от нормального распределения. Поэтому в случае нашей выборки мегамазеров применение непараметрических методов регрессии и корреляции вполне оправдано [4]. В первую очередь мы вычислили ранговые коэффициенты корреляции Спирмана между параметрами, приведенными в табл.1, включая красное смещение. В тех случаях, когда переменные какой-то пары также зависят от красного смещения (так называемый эффект Малмквиста), мы использовали частные коэффициенты корреляции Спирмана, чтобы исключить эффект Малмквиста из рассматриваемой корреляции. После такого анализа мы выделили те пары переменных, которые показывают значимые коэффициенты корреляции (под значимостью корреляции мы подразумеваем вероятность случайной корреляции между переменными $P \leq 0.05$).

В табл.2 приведены результаты статистического анализа, где указаны наиболее значимые частные корреляции Спирмана ρ , с учетом эффекта

Таблица 2

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИЙ И РЕГРЕССИИ

	$\log M_c$	$\log L_{\text{HCS}}$
$\log L_{\text{OH}}$	$N = 12$ $\rho = 0.62$ $P = 0.03$ $S = 0.26$ $I = 0.73$ $0.03 \leq S \leq 0.53$ $d = -0.04$	$N = 15$ $\rho = 0.85$ $P = 2 \cdot 10^{-4}$ $S = 1.54$ $I = -11.23$ $1.02 \leq S \leq 1.97$ $d = -0.3$
$\log L_{\text{HCS}}$	$\log W$ $N = 15$ $\rho = 0.57$ $P = 0.03$ $S = 2.35$ $I = 3.49$ $0.42 \leq S \leq 4.73$ $d = -0.13$	$\log L_{2-10\text{GB}}$ $N = 10$ $\rho = 0.65$ $P = 0.04$ $S = 0.36$ $I = -5.89$ $0.05 \leq S \leq 0.79$ $d = -0.13$
$\log L_{2-10\text{GB}}$	$\log M_c$ $N = 9$ $\rho = 0.92$ $P = 5 \cdot 10^{-4}$ $S = 1.27$ $I = 31.68$ $0.55 \leq S \leq 1.95$ $d = 0$	

Малмквиста. Пары переменных, для которых коэффициенты корреляции Спирмана мало значимы, не приведены в табл.2. Там приведены результаты линейной регрессии Кендалла-Теила [4] (наклон, S ; точка пересечения, I ; 95% доверительный интервал наклона и медианное отклонение, d). Если медианное отклонение d близко к нулю, то линейная регрессия является подходящим приближением. В табл.2 $\log L_{\text{OH}}$, $\log L_{\text{HCN}}$ и $\log L_{2-10\text{кэВ}}$ являются зависимыми переменными, а остальные параметры - независимыми. В частности, линия регрессии между $\log L_{\text{OH}}$ и $\log L_{\text{HCN}}$ имеет следующий вид:

$$\log L_{\text{OH}} = 1.54 \log L_{\text{HCN}} - 11.23.$$

Зависимости параметров мазерного излучения (L_{OH} и W) от рентгеновского излучения нами были рассмотрены в наших предыдущих работах (см., например, [11] там же ссылки).

5. *Обсуждение.* Как уже отмечалось, в мегамазерных галактиках мазерное, рентгеновское и HCN излучения образуются в околоядерной области. Поэтому, можно ожидать, что эти излучения должны зависеть друг от друга, кроме этого они могут зависеть от массы ядра галактики. Массу ядра можно оценить, если предположить, что в центре галактики находится аккреционный диск и предполагаемая черная дыра. К сожалению, другие предположения о ядре галактики не позволяют оценить массу ядра. На рис.1 приведена зависимость $\log L_{\text{OH}}$ от $\log M_c$ для мегамазеров, где указана линия регрессии Кендалла-Теила. На рис.2 приведена зависимость $\log L_{\text{OH}}$ от $\log L_{\text{HCN}}$, где также указана линия регрессии Кендалла-Теила. Эта последняя зависимость очень тесная и разброс точек относительно линии регрессии не велик (см., также, табл.2). Результаты табл.2 и работы [11] отчетливо показывают, что разные индикаторы плотного газа (L_{OH} , L_{HCN}) в околоядерной области мегамазеров тесно связаны между собой, и они,

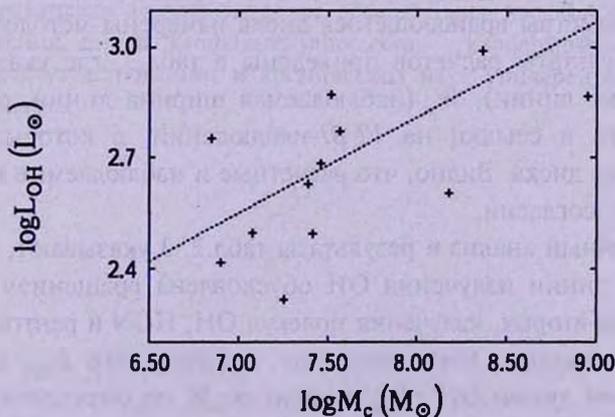


Рис.1. Связь между мегамазерным излучением и массой ядра. Линия регрессии Кендалла-Теила указана (см., табл.2).

в свою очередь, зависят от рентгеновского излучения и массы ядра. Остановимся на взаимосвязи между рентгеновским излучением и массой ядра галактик. Согласно табл.2,

$$\log L_{2-10\text{кэВ}} = 1.27 \log M_c + 31.68.$$

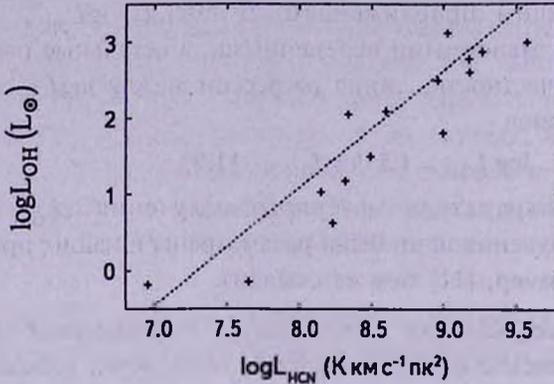


Рис.2. Связь между мегамазерным и HCN светимостями. Линия регрессии Кендалла-Тейла указана (см., табл.2).

В работе [11] нами было показано, что $L_{2-10\text{кэВ}} = kW^S$, где $k = 10^{35.53}$ и $S = 2.56$. Кроме этого, если предположить, что в мегамазерах ширина линии W , в первую очередь, обусловлена кеплеровским вращением околоядерного диска, то $W \sim (GM_c/R)^{1/2}$ [23], где G - гравитационная постоянная, R - радиус диска. Следовательно, из последних двух выражений можно записать $L_{2-10\text{кэВ}} \sim k(GM_c/R)^{S/2}$, или $L_{2-10\text{кэВ}} \sim M_c^{2.56/2} = M_c^{1.28}$. Удивительно, но совершенно разные подходы вычислений наклона зависимости между $L_{2-10\text{кэВ}}$ и M_c дают практически одинаковый результат (1.27 и 1.28). Кроме этого, используя уравнение (2) работы [23], можно вычислить ожидаемые ширины линий у 4-х галактик, для которых необходимые параметры вращающегося диска измерены методом VLBI-наблюдений. Результаты расчетов приведены в табл.3, где указаны W_p (расчетная ширина линии), W_n (наблюдаемая ширина линии, согласно VLBI-наблюдений) и ссылки на VLBI-наблюдений, в которых также указаны параметры диска. Видно, что расчетные и наблюдаемые ширины линии в хорошем согласии.

Вышеприведенный анализ и результаты табл.2, 3 указывают, что, во-первых, ширина линии излучения OH обусловлена вращением околоядерного диска. Во-вторых, излучения молекул OH, HCN и рентгеновское излучение взаимосвязаны. Интересен еще тот факт, что L_{HCN} и $L_{2-10\text{кэВ}}$ зависят от ширины линии OH (L_{OH} зависит от W по определению, так как интенсивность излучения OH - это плотность потока интегрирования по скоростям), которая характеризует поле скоростей вращающегося диска,

хотя HCN и рентгеновское излучения представляют пространственно разные компоненты околоядерной области. HCN и OH представляют молекулярную часть диска, а рентгеновское излучение – высокотемпературную плазму,

Таблица 3

РАСЧЕТНЫЕ И НАБЛЮДАЕМЫЕ ШИРИНЫ ЛИНИИ OH

Название	W_p (км с ⁻¹)	W_n (км с ⁻¹)	Ссылки
IRAS 01418+1651111 Zw 35	39	30-40	[15,24]
IRAS 12540+5708 Mkn 231	216	214	[18,25]
IRAS 13428+5608 Mkn 273	132	141	[19]
IRAS 15327+2340 Arp 220	27	20-40	[20,26]

которая находится ближе к центру галактики. Возможно, что рентгеновское излучение каким-то образом стимулирует возбуждение линий излучения HCN и OH, например, рентгеновский нагрев околоядерного молекулярного облака [27]. В этом случае можно ожидать взаимосвязь между молекулярным и рентгеновским излучениями. Нам кажется, что этот вопрос требует детального рассмотрения.

6. *Заключение.* Мы исследовали выборку внегалактических OH-мазерных источников в широком диапазоне спектра. В нашем анализе мы использовали непараметрический метод линейной регрессии и корреляции. Перечислим основные результаты нашей работы: 1) OH, HCN и рентгеновское излучения тесно связаны между собой. С другой стороны, они зависят от массы ядра галактики. 2) Ширина линии излучения OH обусловлена вращением околоядерного диска галактики, в плотных слоях которого и возникают OH, HCN молекулы. Возможно, что рентгеновское излучение стимулирует возбуждение линий излучения молекул OH и HCN.

¹ Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна, Армения, e-mail: kandalyan@yahoo.com kandalyan@aabu.edu.jo

² Институт астрономии и космических наук университета Ал Ал-Бейт, Иордания

CIRCUM-NUCLEAR DENSE GAS IN
OH-MEGAMASER GALAXIESR.A.KANDALYAN^{1,2}, M.M.AL-ZYOUT³

The broadband properties of a sample of extragalactic OH maser sources are discussed. Based on a sample of 22 maser galaxies it is shown that there are tight relationships between the OH, HCN and X-ray emissions. On the other hand, these emissions depend on the core's mass of galaxy. It is shown, that line-width of OH emission is due to rotation of circum-nuclear disk, in dense regions of which arise the OH, HCN emissions. The X-ray heating may excite OH and HCN molecules.

Key words: *maser-galaxies:molecules- galaxies:X-ray emission*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Y.Gao, P.M.Solomon, Astrophys. J. Suppl. Ser., 152, 63, 2004.*
2. *Y.Gao, P.M.Solomon, Astrophys. J., 606, 271, 2004.*
3. *J.Darling, Astrophys. J., 669, L9, 2007.*
4. *Р.А.Кандалян, М.М.Ал-Зют, Астрофизика, 53, 363, 2010.*
5. *J.-M.Martin, PhD thesis, University de Paris VII, France, 1989.*
6. *J.-M.Martin, L.Bottinelli, M.Dennefeld et al., C.R. Acad. Sci., Paris, 308 (II), 287, 1989.*
7. *L.Stavely-Smith, R.P.Norris, J.M.Chapman et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 258, 725, 1992.*
8. *W.A.Vaan, J.J.Salzer, R.D.LeWinter, Astrophys. J., 509, 633, 1998.*
9. *J.Darling, R.Giovanelli, Astron. J., 124, 100, 2002.*
10. *M.X.Fernandez, E.Momjian, C.J.Salter, T.Ghosh, Astron. J., 139, 2066, 2010.*
11. *Р.А.Кандалян, В.В.Амбарян, Х.А.Сабат, Астрофизика, 50, 171, 2007.*
12. *P.M.Solomon, D.Downes, S.J.E.Radford, J.W.Barrett, Astrophys. J., 478, 144, 1997.*
13. *W.A.Vaan, C.Henkel, A.F.Loenen, A.Baudry, T.Wiklind, Astron. Astrophys., 477, 747, 2008.*
14. *M.Vestergaard, Astrophys. J., 571, 733, 2002.*
15. *Y.M.Pihlstrom, J.E.Conway, R.S.Booth, P.J.Diamond, A.G.Polatidis, Astron. Astrophys., 377, 413, 2001.*
16. *N.Murray, E.Quataert, T.A.Thompson, Astrophys. J., 618, 569, 2005.*
17. *K.M.Dasgra, L.J.Tacconi, R.I.Davies et al., Astrophys. J., 638, 745, 2006.*
18. *A.M.S.Richards, R.J.Cohen, G.H.Cole et al., in "Galaxies and their*

- Constituents at the Highest Angular Resolutions", Proceedings of IAU Symp., 205, 2001, ed. R.T. Schilizzi, (Manchester, UK), 212.
19. *J.A.Yates, A.M.S.Richards, M.M.Wrigh* et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 317, 28, 2000.
 20. *E.Rovilos, P.J.Diamond, C.J.Lonsdale, C.J.Lonsdale, H.E.Smith*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 342, 373, 2003.
 21. *R.A.Kandalyan*, Astron. Astrophys., 404, 513, 2003.
 22. *W.L.Conover*, Practical Non-parametric Statistics, 2nd Ed., New York, John Wiley and Sons, 1980.
 23. *Р.А.Кандалян*, Астрофизика, 48, 421, 2005.
 24. *A.S.Trotter, J.M.Moran, L.J.Greenhill, X.Zheng, C.R.Gwinn*, Astrophys. J., 485, L79, 1997.
 25. *H.R.Klockner, W.A.Vaan, M.A.Garrett*, Nature, 421, 821, 2003.
 26. *C.J.Lonsdale, P.J.Diamond, H.E.Smith, C.J.Lonsdale*, Astrophys. J., 493, L13, 1998.
 27. *D.A.Neufeld, P.R.Maloney, S.Conger*, Astrophys. J., 436, L127, 1994.