

УДК 524.7-17

Физические свойства рентгеновского газа в скоплении галактик CL0024+17

Ю.В. Бабык

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, пр. Глушкова 4, 03127, Киев
babikyura@gmail.com

Поступила в редакцию 19 декабря 2011 г.

Аннотация. Проведена обработка рентгеновских данных телескопа Chandra для скопления галактик CL0024+17 ($z = 0.39$). Оценена средняя температура скопления $kT = 4.35^{+0.51}_{-0.44}$ кеВ и построен профиль поверхностной яркости. Используя численное интегрирование и профиль плотности темной материи Наварро-Френка-Вайта (Наварро и др., 1995) для сферически симметричного скопления, газ которого находится в гидростатическом равновесии с полем скопления, построены профили масс и плотности для темной материи и газа. Оценено значение $M_{200} = 3.51^{+0.38}_{-0.47} \cdot 10^{14} Sun$ для распределения полной массы в скоплении на расстоянии $R_{200} = 1.24^{+0.12}_{-0.17}$ Мпк. Также был найден вклад темной материи в полную массу скопления, который составил $M_{200DM}/M_{tot} = 0.89$.

THE PHYSICAL PROPERTIES OF X-RAY GAS IN THE GALAXY CLUSTER CL0024+17, by Yu. V. Babyk. We performed X-ray data analysis of galaxy cluster CL0024+17 ($z = 0.39$) using data of Chandra observatory. We estimated the average temperature of cluster $kT = 4.35^{+0.51}_{-0.44}$ keV and built the surface brightness profile. We have used numerical simulations, Navarro-Frank-White (Navarro et al., 1995) density profile of dark matter, the spherically symmetric assumption and fact that gas, which emits in X-ray, are in hydrostatic equilibrium with cluster potential for reconstructed density and mass profiles for dark matter and gas. We determined the total mass of cluster as $M_{200} = 3.51^{+0.38}_{-0.47} \cdot 10^{14} Sun$ for radius $R_{200} = 1.24^{+0.12}_{-0.17}$ Mpc. Also, we estimated the fraction of dark matter in the total mass $M_{200DM}/M_{tot} = 0.89$.

Ключевые слова: скопления галактик, рентгеновский газ, темная материя

1 Введение

Скопления галактик состоят из темной материи, межгалактического газа и самих галактик. Они имеют размеры 3–5 Мпк и являются лабораториями для космологических исследований. В 1970-х гг. было обнаружено рентгеновское излучение горячего газа, заполняющего скопления. Исследование спектра излучения и распределения яркости позволило оценить температуру и распределение плотности газа. Оказалось, что в богатых скоплениях эти величины хорошо коррелируют со скоростями галактик и их распределением. В более бедных, наряду с общим рентгеновским фоном, выделяется излучение корон отдельных наиболее массивных галактик, гравитационный потенциал которых сравним с гравитационным потенциалом скопления как целого. Масса горячего газа в центральных областях не превосходит несколько процентов вириальной массы скопления, его плотность около

10^{-3} см^{-3} . Эти данные служат важным независимым подтверждением стационарности скоплений и приведенных оценок массы видимого и невидимого вещества в них. Подробные спектральные наблюдения нескольких наиболее ярких скоплений галактик показывают, что в горячем газе присутствуют высокоионизованные тяжелые элементы (напр., Fe^{+25}) с относительным содержанием около 0.1–0.3 солнечного. Это значит, что газ скоплений не является первичным и частично прошел переработку в звездах. Однако ныне невозможно сказать, как протекала эволюция горячего газа и его обогащение тяжелыми элементами. Скопления галактик наблюдаются вплоть до красных смещений $z \sim 2$ (Гобат и др., 2011).

Скопления являются яркими элементами крупномасштабной структуры Вселенной. Их изучение показывает, что богатые скопления, как правило, расположены в узлах, где сходятся несколько филаментов (Вихлинин и др., 2006). Более бедные скопления часто расположены вдоль филаментов больших сверхскоплений.

В нашей работе мы использовали рентгеновские данные обсерватории Chandra для изучения физических характеристик скопления CL0024+17, таких как температура, плотность, масса и др. Данное скопление – одно из самых удаленных скоплений ($z = 0.39$), которое было обнаружено Цвикки в 1959 году, и на данный момент одно из наиболее изучаемых. В нем исследуют внутренние динамические свойства (Диаферро и др., 2005), рентгеновское излучение (Ота и др., 2004; Дженг и др., 2005), а также сильное (Комерфорд и Натараджан, 2007; Броджерст и др., 2000) и слабое (Кнейб и др., 2003; Хоекстра, 2007) гравитационное линзирование.

В работе представлен один из методов определения полной массы скопления и его составляющих с использованием условия термодинамического равновесия газа в составе скопления. Для распределения плотности темной материи был использован профиль Наварро-Френка-Вайта (Наварро и др., 1995) как один из наиболее распространенных и точных для описания распределения плотности (Буоте и др., 2004).

Мы использовали следующие космологические параметры: $H_0 = 73 \text{ км/с/Мпк}$, $\Omega_M = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$.

2 Обработка данных

Для нашего исследования мы использовали архивные данные телескопа Chandra (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov>). Объект CL0024+17 наблюдался 10 сентября 2000 года при помощи Advanced CCD Imaging Spectrometer. Температура ПЗС-матрицы была 120 градусов Цельсия. Время экспозиции составило 40 ксек. Обработка данных наблюдений проводилась при помощи программного пакета CIAO 4.2 с использованием калибровочных файлов CALDB 4.3. Ота и др. (2004) обнаружили пик рентгеновского излучения в точке с координатами 00:26:36.0, +17:09:45.9 (J2000), это излучение прослеживается до радиуса в $2'$ от центра. После того как изображение было очищено от точечных источников, оно было разбито на концентрические кольца толщиной в 0.25 кпк. Для всех колец был получен спектр, который фитировался с помощью модели MEKAL (Мюв и др., 1985, 1986; Лейдахл, 1995). Это модель, которая описывает излучение от горячей водородно-гелиевой плазмы. При фитировании учитывалось галактическое поглощение, для этого скопления оно составило $n_H = 4.22 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (Диккей и др., 1990). Также мы определили рентгеновскую светимость нашего скопления в пределах диапазона энергий 0.4 – 7.0 кеВ, она составила $2.22 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/см}^2/\text{с}$. В результате фитирования было получено значение температуры и параметра Norm, который пропорционален электронной и протонной концентрациям. Распределение температуры представлено на рис. 1. Средняя температура по всему скоплению составила $4.35_{-0.44}^{+0.51} \text{ кеВ}$. Для сравнения Ота и др. (2004) нашли температуру $4.47_{-0.54}^{+0.83} \text{ кеВ}$, что хорошо согласуется с нашим значением.

3 Определение массы

Мы использовали численное моделирование для определения распределения газа и темной материи в скоплении галактик CL0024+17. Для профиля плотности темной материи был выбран профиль

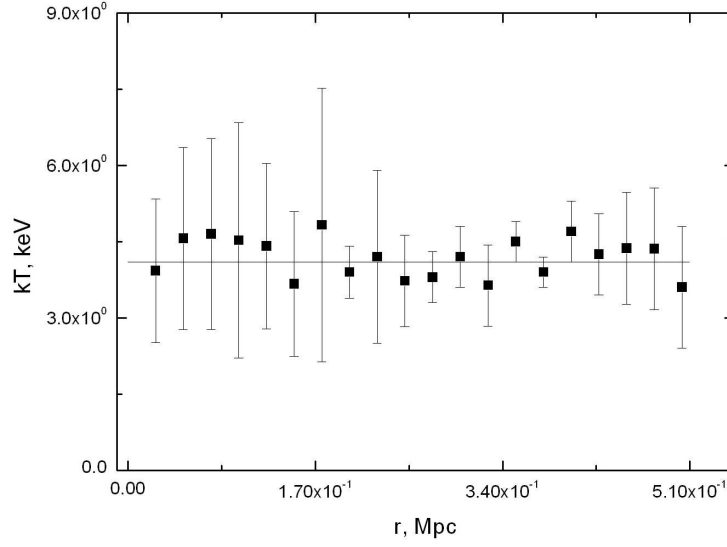


Рис. 1. Распределение температуры в каждом кольце

Наварро-Френка-Вайта в следующем виде:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s}\right)\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}, \quad (1)$$

где ρ_0 – характеристическая плотность темной материи, r_s – характеристический радиус гало темной материи, а r – радиус, в пределах которого вычисляется плотность. Массу темной материи можно найти, используя следующую формулу:

$$M(< r) = 4\pi \int_0^r \rho(r') r'^2 dr' = 4\pi \rho_0 r_s^3 \left[\ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right) - \frac{r}{r_s + r} \right]. \quad (2)$$

Массивное гало темной материи создает гравитационное поле, в котором формируется распределение горячего газа. Сам потенциал может быть найден как:

$$\frac{d\phi}{dr} = G \frac{M(< r)}{r^2}. \quad (3)$$

Далее нами предполагалось гидростатическое равновесие газа в скоплении и изотермическое распределение температуры $T_g = const$. Само условие выглядит следующим образом:

$$\nabla P = -\rho_g \nabla \phi(r), \quad (4)$$

где P и ρ_g – давление и плотность газа соответственно. Так как плотность и давление малы, мы использовали уравнение идеального газа в виде $P = \frac{\rho_g k T_g}{\mu m_p}$. В результате было получено уравнение для неизвестного распределения газа:

$$\frac{\nabla \rho_g}{\rho_g} = -\nabla \phi(r) \frac{\mu m_p}{k T_g}. \quad (5)$$

Для воспроизведения поля плотности газа мы проинтегрировали систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial x_i} = -\frac{\mu m_p}{k T_g} \frac{\partial \phi(r)}{\partial x_i}, \quad (6)$$

где $x_i = (x, y, z)$ – декартовы координаты. Имея радиальное распределение плотности газа ρ_g в скоплении, можно найти распределение поверхностной яркости.

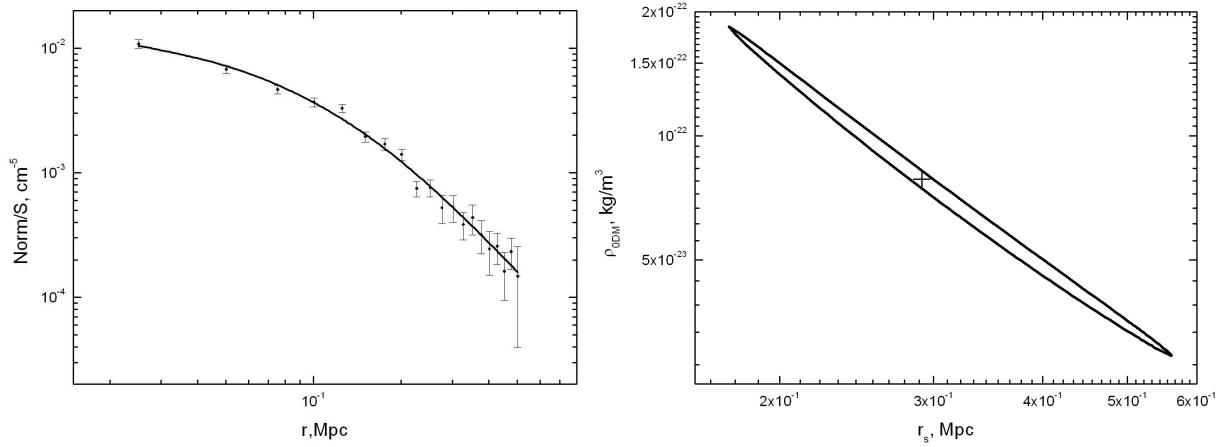


Рис. 2. Слева – профиль поверхностной яркости, справа – распределение характеристических параметров

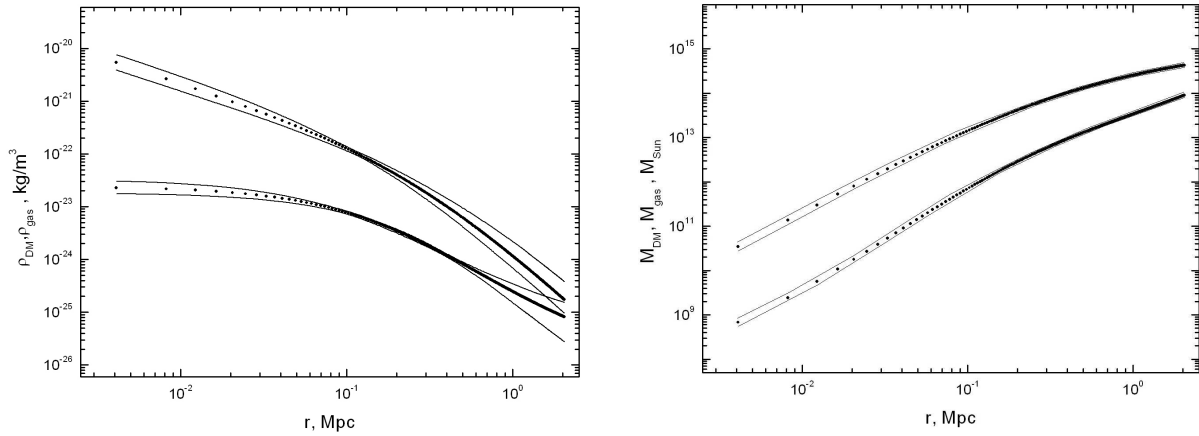


Рис. 3. Слева – профиль плотности для темной материи (вверху) и для газа (внизу), справа – распределение массы для темной материи (вверху) и для газа (внизу)

3.1 Профиль поверхностной яркости

Для двух свободных параметров ρ_0 и r_s мы определили потенциал и плотность газа, используя которые был построен профиль поверхностной яркости, который изображен слева на рис. 2. Точки соответствуют наблюдательным данным, а прямая – нашей модели.

4 Результаты и выводы

Мы использовали значения ρ_0 и r_s для реконструирования плотности и массы профилей для темной материи и газа (рис. 3).

Мы реконструировали интегральный профиль полной массы скопления, с помощью которого нашли полную массу скопления M_{200} для соответствующего радиуса R_{200} . Мы нашли, что $R_{200} = 1.24^{+0.12}_{-0.17}$ Мпк и $M_{200} = 3.51^{+0.38}_{-0.47} \cdot 10^{14} M_{Sun}$, а для темной материи и газа – $M_{200} = 3.09^{+0.37}_{-0.33} \cdot 10^{14} M_{Sun}$ и $M_{200} = 4.56^{+0.86}_{-0.49} \cdot 10^{13} M_{Sun}$ соответственно. То есть доля газа в полной массе составила 11 %.

В данной статье был представлен анализ богатого скопления галактик CL0024+17 на основе спектрального анализа наблюдений телескопа Chandra. Мы использовали рентгеновские свойства горячего газа для измерения полной массы скопления, а также ее компонент – темной материи и газа. Мы построили радиальное распределение температуры и нашли, что средняя температура скопления составляет $4.35^{+0.51}_{-0.44}$ кеВ. Также была найдена полная масса скопления $M_{200} = 3.51^{+0.38}_{-0.47} \cdot 10^{14} M_{Sun}$ и доля каждой из компонент в составе скопления. Для темной материи она составила 89 %, тогда как для газа – 11 %. Мы пришли к заключению, что рентгеновские данные межгалактического газа дают неплохие результаты при определении потенциала скопления.

Благодарности

Работа частично поддержана в рамках целевой комплексной программы “Космомикрофизика” НАН Украины.

Литература

- Бродхерст и др. (Broadhurst T. et al.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 534. P. 15.
Буоте (Buote D.) // *International Astronomical Union Symposium.* 2004. V. 220. P. 149.
Вихлинин и др. (Vikhlinin A. et al.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 640. P. 691.
Дженг и др. (Zhang Y.-Y. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 429. P. 85.
Диаферлио и др. (Diaferio A. et al.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 628. P. 97.
Диккей и др. (Dickey J. et al.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1990. V. 28. P. 215.
Гобат и др. (Gobat R. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 526. P. 133.
Кнейб и др. (Kneib J.-P. et al.) // *Astrophys. J.* 2003. V. 598. P. 804.
Комерфорд, Натараджан (Comerford J., Natarajan P.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 379. P. 190.
Лейдахл (Liedahl D.A.) // *Astrophys. J.* 1995. V. 438. P. 115.
Мюв и др. (Mewe R. et al.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1985. V. 62. P. 197.
Мюв и др. (Mewe R. et al.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1986. V. 65. P. 511.
Наварро и др. (Navarro J.F. et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1995. V. 275. P. 720.
Ота и др. (Ota N. et al.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 601. P. 120.
Хокстра (Hoekstra H.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 379. P. 317.