КИНЕМАТИКА И ФИЗИКА НЕБЕСНЫХ ТЕЛ том 28 № 2 2012

УДК 524.77, 524.78

Ю. Бабик[1], А. Елиїв[2, 3], О. Мельник[3, 4], В. Криводубський[4]

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка
пр. Глушкова 4, Київ 03127
babikyura@ukr.net
[2]Головна астрономічна обсерваторія НАН України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ 03680
[3]Інститут астрофізики та геофізики Льєзького університету, Бельгія
[4]Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
вул. Обсерваторна 3, Київ 04053

Розподіл маси у скупченні галактик Абель 2744

На основі архівних даних рентгенівської обсерваторії Chandra досліджено розподіл мас у скупченні галактик Абель 2744 (z = 0.308). Оцінено температуру гарячого газу у скупченні ($kT = 9.82\ ^{0.43}_{0.41}$ кеВ) та повну масу скупчення ($M_{200} = 2.22\ ^{0.13}_{0.12} \cdot 10^{15} M_\odot$) на відстані $R_{200} = 2.38\ ^{0.36}_{0.31}$ Мпк. Знайдено профілі густини та маси для темної матерії та міжгалактичного газу. Частки міжгалактичного газу та темної матерії у повній масі скупчення складають $15.4\ ^{1.3}_{1.3}$ *% та* $84.6\ ^{1.4}_{1.3}$ *% відповідно.*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ В СКОПЛЕНИИ ГАЛАКТИК АБЕЛЬ 2744, Бабык Ю., Элыив А., Мельник О., Криводубский В. — На основе архивных данных рентгеновской обсерватории Chandra исследовано распределение массы в скоплении галактик Абель 2744 (z = 0.308). Определены температура горячего газа в скоплении ($kT = 9.82\ ^{0.43}_{0.41}$ кэВ) и полная масса скопления ($M_{200} = 2.22\ ^{0.13}_{0.12} \cdot 10^{15} M_\odot$) на расстоянии $R_{200} = 2.38\ ^{0.36}_{0.31}$ Мпк. Найдены профили плотности и массы для темной материи и межгалактического газа. Доли межгалактического газа и темной материи в полной массе скопления составили $15.4\ ^{1.3}_{1.3}$ *% и* $84.6\ ^{1.4}_{1.3}$ *% соответственно.*

THE MASS DISTRIBUTION IN THE GALAXY CLUSTER ABELL 2744, by Babyk Yu., Elyiv A., Melnyk O., Krivodubskij V. — The mass distribution for the galaxy cluster Abell 2744 (z=0.308) is investigated on the basis of archival X-ray data of the Chandra observatory. The temperature of the hot gas in the cluster ($kT = 9.82\ ^{0.43}_{0.41}$ keV) and the cluster total mass for the radius $R_{200} = 2.38\ ^{0.36}_{0.31}$ Mpc ($M_{200} = 2.22\ ^{0.13}_{0.12} \cdot 10^{15} M_\odot$) are estimated. The density

© Ю. БАБИК, А. ЕЛИЇВ, О. МЕЛЬНИК, В. КРИВОДУБСЬКИЙ, 2012

and mass profiles for the intergalactic gas and dark matter are obtained. The fractions of the intergalactic gas and dark matter in the total mass of the cluster are $15.4^{1.3}_{1.3}$ *% and* $84.6^{1.4}_{1.3}$ *%, respectively.*

ВСТУП

Скупчення галактик — це найбільші гравітаційно зв'язані структури нашого Всесвіту. Скупчення мають діаметри від 2 до 10 Мпк та повну масу у межах 10^{13}—10^{15} мас Сонця. Оскільки скупчення почали формуватись досить давно (7—8 млрд років тому), то їх по праву вважають унікальними лабораторіями, в яких утворились та еволюціонують галактики [16, 26]. Скупчення галактик сформовані з газу та темної матерії, де частина газу, приблизно 1 % від повної маси скупчення, сконденсувалась у вигляді зір, а інша, приблизно 10—15 % від повної маси скупчення, є гарячим міжгалактичним газом, що світиться у рентгенівському діапазоні [4, 9, 27].

Темна матерія є найменш вивченою складовою скупчень. Перший доказ її існування був отриманий Цвіккі в 1937 р. [29] при спробі визначити масу скупчення Coma за дисперсією швидкостей галактик. Точний розподіл темної матерії у скупченнях ще не зрозумілий остаточно, оскільки вона не спостерігається безпосередньо. При вивченні розподілу темної матерії роблять припущення, що розподіл гарячого газу неявним чином пов'язаний з розподілом темної матерії умовою гідростатичної рівноваги. Є багато теоретичних моделей, що використовуються для дослідження розподілу темної матерії у скупченнях. Однією з найкращих є модель розподілу густини темної матерії Наварро — Френка — Вайта (НФВ) [19, 20]. Ця модель профілю темної матерії досить добре узгоджується зі спостережними даними [8, 28]. У роботі [22] для відтворення профілів маси у скупченнях використовувались моделі ізотермічної сфери, профіль Мура [18] та НФВ. Для великої вибірки скупчень було показано, що саме НФВ-профіль найкраще відтворює дані спостережень. Гарне узгодження теоретичного профілю НФВ з експериментальними даними було підтверджено і у подальших дослідженнях [21, 23].

Міжгалактичний газ є наступним за внеском компонентом у повну масу скупчення. Його частка складає 10—15 % від повної маси. В основному це іонізована воднево-гелієва плазма, збагачена важкими елементами з температурою в декілька кеВ. Маючи таку високу температуру, міжгалактичний газ випромінює у рентгенівському діапазоні. Спектр випромінювання має тепловий характер. Для апроксимації профілів густини газу у скупченнях часто використовується так звана -модель [10]: $_g(r)$ $(1 + r^2/r_c^2)^{3/2}$, де r_c — характерний радіус ядра скупчення, — нахил профілю рентгенівської яскравості скупчення (типові значення 0.6—0.9). У роботі [11] -модель було використано для пошуку залежності M — T для вибірки скупчень галактик. Ок-

рім як у дослідженнях з розподілу густини газу, цю модель широко застосовують для вивчення інших властивостей газу у скупченнях: так, у роботі [6] -модель було використано як аналог НВФ. У залежності від завдання дослідження її часто модифікують. У роботах [24, 25] застосовано двовимірну -модель та KBB-модель (узагальнена -модель лише для внутрішньої області об'єкта, що дозволяє точніше визначити максимуми профілів густини газу в ядрі) для знаходження поверхневої яскравості скупчення за рентгенівськими зображеннями. Було показано, що такі модифікації -моделі є дуже вдалими.

Точні оцінки повних мас скупчень дуже важливі для перевірки космологічних моделей [2]. Такі оцінки можливо зробити за допомогою рентгенівських спостережень гарячого міжгалактичного газу скупчень галактик [27].

Метою даної роботи є визначення вмісту та розподілу темної матерії у скупченні галактик Абель 2744, а також оцінка повної маси цього скупчення за даними спостережень космічної обсерваторії Chandra. В роботі також обговорюються інші властивості скупчення: світність, температура, розподіли густини та маси газу.

В обчисленнях використовувалися такі значення космологічних параметрів: H_0 = 73 км·с ^{1}Мпк ^{1}, $_m$ = 0.27 та = 0.73.

ДАНІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Спостереження скупчення Абель 2744 провадились у вересні 2001 р. інструментом ACIS-S рентгенівської обсерваторії Chandra (ObsID 2212). Тривалість експозиції складала 25140 с [5]. Центр скупчення має екваторіальні координати $= 00^h14^m19.529^s$ та = 30 23 30.24 та червоне зміщення z = 0.308. Скупчення A2744 налічує близько 300 галактик та має видимий діаметр 9 згідно з даними NED [nedwww.ipac.caltech.edu].

Оптичне зображення скупчення разом із рентгенівськими контурами показано на рис. 1, *а*. З попередніх досліджень відомо, що рентгенівське випромінювання можна простежити до радіуса 11 (3.7 Мпк) [15]. За даними спостережень космічних обсерваторій Chandra та XMM-Newton у роботах [14, 15] було показано, що рентгенівський максимум випромінювання припадає на точку з координатами $_{2000}$ = = $00^h14^m18.7^s$, $_{2000}$ = 30 23 16 . Рентгенівське випромінювання у A2744 характеризується наявністю численних субструктур. Зокрема, одна з них перебуває на відстані 150 від центра скупчення з північно-західного боку [14]. Згідно з даними [1] час охолодження скупчення A2744 ($0.3\cdot10^{11}$ років) значно більший за габблівський час, що свідчить про відсутність потоків охолодження у скупченні.

Для початкової обробки даного спостереження було використано програмне забезпечення CIAO 4.2 [13]. Спочатку ми знайшли та видалили точкові джерела (галактики). Ми також не розглядали менш ма-

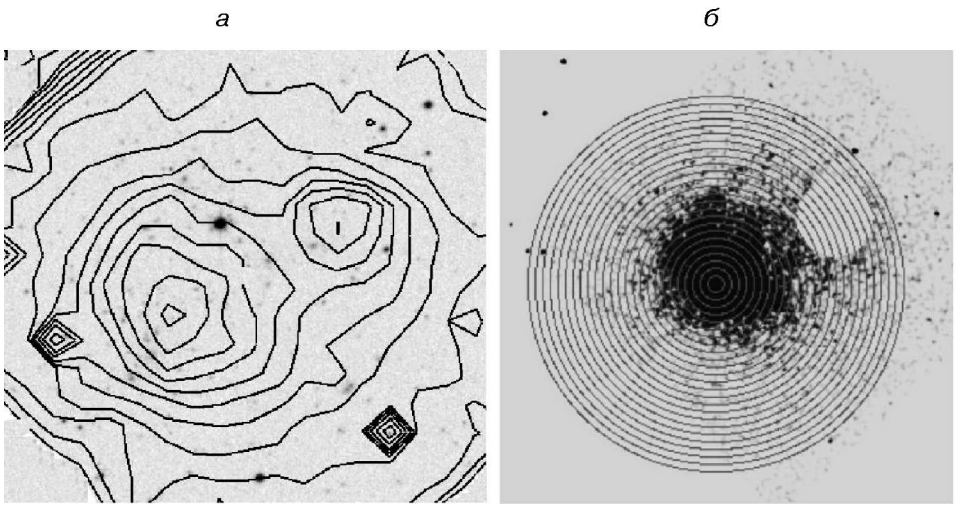

Рис. 1. Зображення скупчення A2744: *а* — оптичне зображення з рентгенівськими контурами Chandra (DSS: archive.eso.org/dss/dss), *б* — вигляд скупчення у рентгенівському діапазоні після видалення точкових джерел та розбиття на кільця

сивний компонент скупчення, з яким, ймовірно, більший компонент взаємодіє. Радіус видаленої області становить 0.8 .

Після цього ми розбили зображення на концентричні кільця однакової товщини (40 кпк) (рис. 1, *б*). Зовнішній радіус найбільшого кільця склав 900 кпк. Для кожного кільця окремо було побудовано спектр, який апроксимувався моделлю WABS*MEKAL у програмному середовищі Xspec 12.6 [3], тут параметр WABS використовувався для врахування галактичного поглинання (для скупчення A2744 n_H = = $1.6 \cdot 10^{20}$ см$^{-2}$ [7]); MEKAL — це модель, розроблена у роботі [17] для опису випромінювання, що приходить від гарячої дифузної плазми. Для кожного кільця було визначено температуру kT та параметр $norm \quad n_e n_H \, dV$, пропорційний добутку електронної та водневої концентрацій, для діапазону енергій 0.4—7.0 кеВ. При цьому усі інші параметри було зафіксовано. Вміст важких елементів було прийнято близьким до сонячного (Z = 0.3). Також було отримано значення потоку в діапазоні енергій 0.4—7.0 кеВ. У таблиці наведено значення параметрів kT та $norm$; N відповідає порядковому номеру кільця, відраховуючи від центра.

На рис. 2 показано спектр для одного з концентричних кілець скупчення, апроксимований моделлю MEKAL. На рис. 3 показано розподіл температури в кожному з кілець (від центра до периферії). Для подальшого моделювання ми вибрали значення середньої температури скупчення $T = 9.82^{0.41}_{0.43}$ кеВ, що відповідає суцільній горизонтальній лінії на рис. 3. Варто відімітити, що дане значення відповідає температурі скупчення A2744 для червоного зміщення z = 0.308 .

Таке значення температури у межах похибок узгоджується з даними роботи [14] (10.1 кеВ) та робіт [12, 15] ($9.3^{4.9}_{2.7}$ кеВ).

Параметри моделі MEKAL для кожного кільця скупчення галактик A2744

Номер кільця	kT, кеВ	$norm$, 10^{-4} см$^{-5}$	Потік (0.3—7.0 кеВ), 10^{-20} Дж/м^2	χ^2
1	$9.86^{2.51}_{1.69}$	$3.16^{0.1}_{0.1}$	3.09	1.084
2	$13.16^{0.1}_{0.1}$	$4.26^{0.16}_{0.15}$	4.29	0.959
3	$10.47^{1.91}_{1.52}$	$5.05^{0.13}_{0.13}$	5.02	1.065
4	$8.39^{1.11}_{1.02}$	$5.56^{0.13}_{0.13}$	5.28	1.019
5	$10.16^{1.76}_{1.44}$	$5.90^{0.15}_{0.15}$	5.79	0.9099
6	$10.40^{1.82}_{1.53}$	$5.58^{0.14}_{0.14}$	5.49	1.041
7	$11.54^{2.87}_{2.01}$	$5.28^{0.17}_{0.15}$	5.25	0.6464
8	$10.68^{2.49}_{1.87}$	$4.67^{0.14}_{0.14}$	4.60	1.023
9	$9.36^{1.94}_{1.35}$	$4.35^{0.12}_{0.12}$	4.23	0.852
10	$8.40^{1.67}_{1.30}$	$4.09^{0.11}_{0.11}$	3.90	0.895
11	$10.42^{2.94}_{2.06}$	$3.56^{0.13}_{0.12}$	3.50	1.076
12	$8.82^{2.46}_{1.64}$	$2.99^{0.1}_{0.1}$	2.88	1.276
13	$9.04^{2.94}_{1.91}$	$2.65^{0.1}_{0.1}$	2.50	1.399
14	$8.53^{3.04}_{2.06}$	$2.26^{0.09}_{0.09}$	2.16	1.007
15	$8.14^{3.15}_{1.89}$	$2.02^{0.09}_{0.09}$	1.95	1.186
16	$9.28^{4.11}_{2.35}$	$1.90^{0.09}_{0.08}$	1.84	1.2
17	$9.37^{6.85}_{2.81}$	$1.66^{0.1}_{0.08}$	1.61	1.616
18	$8.65^{3.83}_{2.19}$	$1.62^{0.08}_{0.08}$	1.58	1.787
19	$7.52^{6.64}_{2.38}$	$1.34^{0.09}_{0.08}$	1.25	1.343
20	$6.08^{2.61}_{1.53}$	$1.19^{0.08}_{0.08}$	1.09	1.703

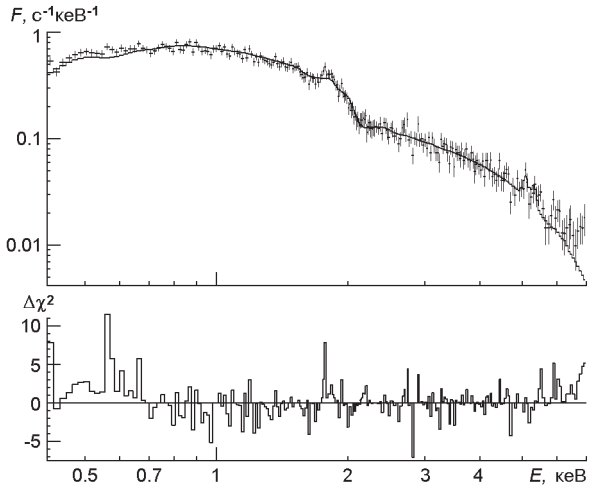

Рис. 2. Спектр одного з кілець скупчення A2744, апроксимований моделлю WABS*MEKAL

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОФІЛЮ ПОВЕРХНЕВОЇ ЯСКРАВОСТІ

Для знаходження розподілу гарячого газу та темної матерії в скупченні A2744 ми провели числове моделювання. Для профілю густини темної матерії було використано НФВ-модель у вигляді

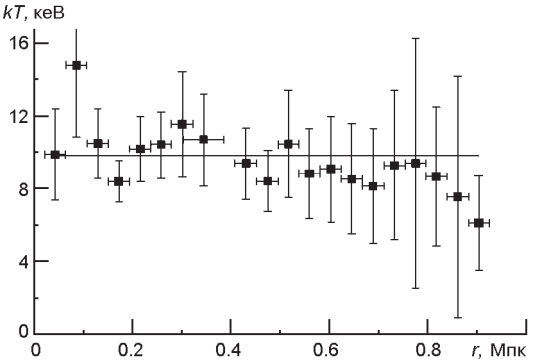

Рис. 3. Залежність температури від радіуса для скупчення галактик A2744

$$(r) \quad \frac{^{0}}{\frac{r}{r_s} \quad 1 \quad \frac{r}{r_s}^{2}}, \tag{1}$$

де $_0$ — характерна густина темної матерії, r_s — характеристичний радіус гало темної матерії, r радіус, для якого обчислюється густина. Знаючи розподіл густини темної матерії, можемо знайти її повну масу у межах певного радіуса:

$$M(\quad r) \quad 4 \quad _{0}^{r} (r \,)r^{2}dr \quad 4 \quad _{0}r^{3_s} \ \ln 1 \quad \frac{r}{r_s} \quad \frac{r}{r_s \quad r} . \tag{2}$$

Масивне гало темної матерії утворює гравітаційне поле, в якому формується розподіл гарячого газу. Гравітаційний потенціал темної матерії може бути знайдено за формулою

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

Усі наступні обчислення проводились з урахуванням умови гідростатичної рівноваги рентгенівського газу у скупченні та у припущенні, що система є ізотермічною (T_g = const). Ми можемо записати умову гідростатичної рівноваги у вигляді

$$P \qquad _g \quad (r), \tag{4}$$

де P та $_g$ — тиск та густина газу. Оскільки густина та тиск газу є дуже низькими, можна використати рівняння стану ідеального газу у вигляді $P = \ _g kT_g \ / (\ m_p)$. Тоді рівняння для невідомого розподілу густини газу матиме вигляд

$$\frac{_g}{_g} \qquad (r)\frac{m_p}{kT_g} . \tag{5}$$

Для відтворення поля густини гарячого газу потрібно проінтегрувати систему диференціальних рівнянь

$$\frac{1}{_g}\frac{_g}{x_i} \qquad \frac{m_p}{kT_g}\frac{(r)}{x_i}, \tag{6}$$

де x_i — декартові координати.

Після радіального відтворення густини газу $_g$ у скупченні знаходимо розподіл яскравості у рентгенівському діапазоні. Потік випромінювання, що приходить зі спостережуваних регіонів, пропорційний інтегралу квадрата густини гарячого газу ^2_g вздовж променя зору. Згідно з даними [27] для плазми у скупченні ми прийняли, що n_e/n_p = = 1.17 та $_g = 1.35 m_p n_p$, де n_e і n_p — електронна і протонна концентрації. Варто відзначити, що з моделювання ми можемо отримати густину газу з точністю до деякого сталого множника a, котрий залежить від граничних умов інтегрування (6). Тому істинна густина газу буде рівна $^{real}_g = a\ ^{sim}_g$, де $^{sim}_g$ — густина газу, отримана з моделювання. Отже, можемо записати $^{sim}_g$ $_g$ у рівнянні (6). Таким чином, величина емісії EM_{sim} може бути знайдена з моделювання:

$$EM_{sim} \quad n_e n_p dV \quad \frac{0.64}{m_p^2} \ (\ ^{sim}_g)^2 dV. \tag{7}$$

Використавши рівняння (7), знаходимо

$$norm_{sim} \quad \frac{EM_{sim} \ 10^{\ 14}}{4 \ [D_A(1 \quad z)]^2}, \tag{8}$$

де D_A — відстань за кутовим діаметром до скупчення A2744. Із спостережень ми отримали параметр $norm_{\text{MEKAL}}$, котрий апроксимували величинами $norm_{sim}$ із числового моделювання. Оскільки параметр $norm_{\text{MEKAL}}$ може бути виражений як

$$norm_{\text{MEKAL}} \quad \frac{0.64}{m_p^2} \ \frac{(\ ^{real}_g)^2 dV \ \ 10^{\ 14}}{4 \ [D_A(1 \quad z)]^2}, \tag{9}$$

то з урахуванням виразів (7)—(9) нормувальний множник a дорівнює

$$a \quad \sqrt{\frac{norm_{\text{MEKAL}}}{norm_{sim}}}. \tag{10}$$

Остаточно ми отримуємо густину гарячого газу $^{real}_g = a\ ^{sim}_g$ та визначаємо величину емісії EM_{real}, замінивши у рівнянні (7) $^{sim}_g$ на $^{real}_g$.

РЕЗУЛЬТАТИ

У використаній нами моделі НФВ є два вільних параметри $_0$ та r_s. Перебираючи їх у прийнятних межах, ми підбирали таку пару значень, яка найкраще підходить для опису спостережного профілю скупчення. Використовуючи ^{2}-тест, ми знайшли область значень $_0$ та r_s з рівнем достовірності 90 %: $r_s = 1.38\ ^{0.56}_{0.34}$ Мпк, $_0 = 1.05\ ^{0.50}_{0.38}\ 10^{\ 23}$ кг/м^3; $^2 = 1.1$ (хрестик на рис. 4).

Ці значення добре узгоджуються із даними [14] ($r_s = 1.1\ ^{0.3}_{0.4}$ Мпк та $_0 = 1.2\ ^{0.4}_{0.6}\ 10^{\ 23}$ кг/м^3). Вони були використані для апроксимації профілю яскравості скупчення.

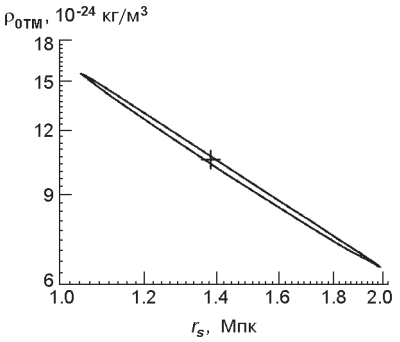

Рис. 4. Область значень густини темної матерії $_0$ та характеристичного радіуса r_s з рівнем достовірності 90 % для скупчення галактик A2744

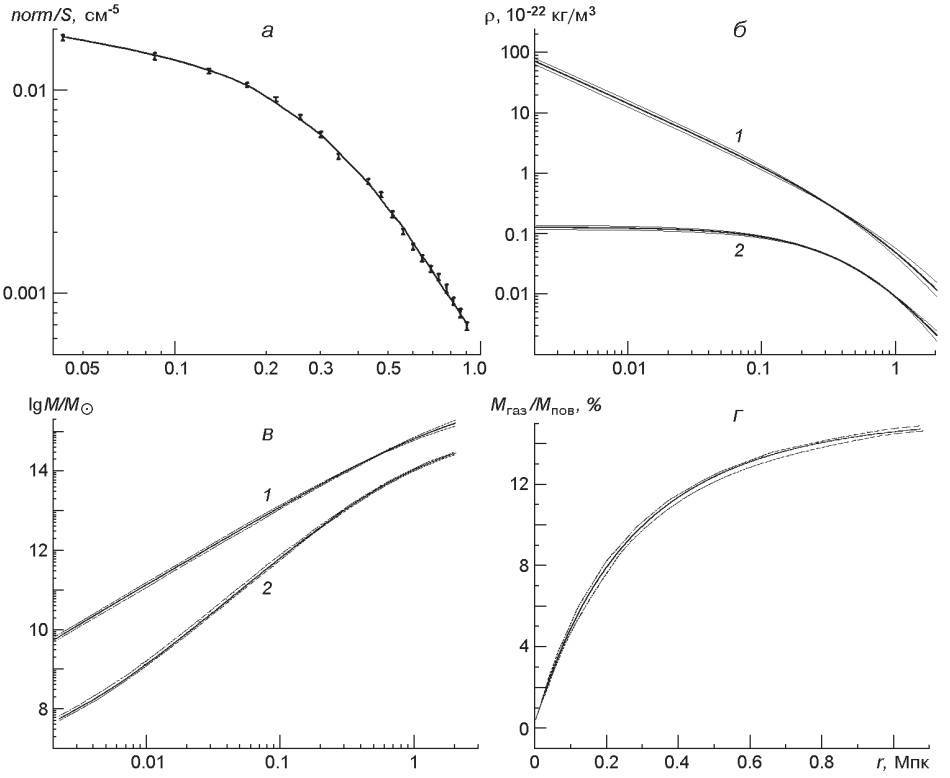

Рис. 5. Отримані розподіли деяких параметрів скупчення галактик A2744: *а* — профіль яскравості (точки — спостереження, лінія — апроксимація нашою моделлю), *б, в* — розподіли густини та маси темної матерії (1) та гарячого міжгалактичного газу (2), *г* — частка маси газу у повній масі скупчення

На рис. 5, *а* показано відповідний спостережуваний профіль поверхневої яскравості скупчення (точки) та його апроксимація нашою моделлю (суцільна лінія). На рис. 5, *б* показано промодельовані профілі густини темної матерії (1) та міжгалактичного газу (2). Ми знайшли значення радіуса R_{200} та повної маси M_{200} у межах цього радіуса. Радіус R_{200} — це відстань від центра скупчення, у межах якої значення повної густини у 200 разів перевищує значення критичної густини. Оскільки критична густина складає $_c = 1.335\ 10^{-26}$ кг/м^3 для $z = 0.308$ ($_{cr}(z) = 3E(z)^2 H_0^2/(8\ G)$, де $E^2(z) = \ _m(1\ \ z)^3 +\ \ $), то шукане зна-

чення густини 200 $_c$ відповідає радіусу 2.38 $^{0.36}_{0.31}$ Мпк. Для радіуса R_{200} було знайдено повну масу скупчення M_{200} 2.22 $^{0.13}_{0.12}$ $10^{15} M_\odot$. Значення маси темної матерії та газу на R_{200} склали відповідно 1.88 $^{0.18}_{0.21}$ $10^{15} M_\odot$ та 3.31 $^{0.17}_{0.25}$ $10^{14} M_\odot$. На рис. 5, *в* представлено розподіл маси темної матерії (1) та газу (2) для скупчення A2744.

На рис. 5, *г* показано частку маси газу у повній масі скупчення. Видно, що внесок газу у повну масу скупчення A2744 у в межах R_{200} становить 15.4 $^{1.3}_{1.3}$ %, а темної матерії — 84.6 $^{1.4}_{1.3}$ %. Отримані значення узгоджуються з даними [1] у таких самих межах: $M_{gas}/M_{total} = 0.15$ $^{0.12}_{0.11}$. Між тим у роботі [14] отримано 8—12 %.

ВИСНОВКИ

У результаті обробки спостережних даних рентгенівської обсерваторії Chandra отримано такі значення параметрів скупчення галактик Абель 2744.

1. Середня температура газу у скупченні становить кеВ.

2. Значення характеристичних параметрів скупчення (густини темної матерії та характеристичного радіуса): $_0 = (1.05$ $^{0.50}_{0.38}) 10^{23}$ кг/м^3 та $r_s = 1.38$ $^{0.56}_{0.34}$ Мпк.

3. Значення густини темної матерії, міжгалактичного газу та повної маси M_{200} в області з радіусом R_{200} (2.38 $^{0.36}_{0.31}$ Мпк від центра скупчення): $_{DM} = 8.19$ $^{1.65}_{1.69}$ 10^{25} кг/м^3, $_g = 1.44$ $^{0.39}_{0.25}$ 10^{25} кг/м^3 та M_{200} = 2.22 $^{0.13}_{0.12}$ $10^{15} M_\odot$ відповідно.

4. Внесок газу та темної матерії у повну масу скупчення: 15.4 $^{1.3}_{1.3}$ % та 84.6 $^{1.4}_{1.3}$ % відповідно.

Дане дослідження було зроблено за допомогою архівних даних Chandra та програмного забезпечення Chandra X-ray Center (CIAO4.2). Автори висловлюють подяку команді проекту Chandra за створення високоякісного архіву рентгенівських спостережень. Дякуємо рецензенту за ретельну перевірку рукопису та корисні зауваження.

Робота частково підтримана цільовою комплексною програмою «Космомікрофізика» НАН України.

1. *Allen S. W., Fabian A. C.* The relationship between cooling flows and metallicity measurements for X-ray-luminous clusters // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1998.—**297**.—P. 63—68.

2. *Allen S. W., Schmidt R. W., Fabian A. C.* The X-ray virial relations for relaxed lensing clusters observed with Chandra // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2001.—**328**.—P. 37—41.

3. *Arnaud K.* Astronomical data analysis software and systems // ASP conf.—1996.—**101**.—P. 17.

4. *Boehringer H., Norbert W.* X-ray spectroscopy of galaxy clusters // Astron. and Astrophys. Rev.—2010.—**18**.—P. 127—196.

5. *Boschin W.* A deep cluster survey in Chandra archival data. First results // Astron. and Astrophys.—2002.—**396**.—P. 397—409.

6. *Cavaliere A., Fusco-Femiano R.* X-rays from hot plasma in clusters of galaxies // Astron. and Astrophys.—1976.—**49**.—P. 137—144.

7. *Dickey J. M., Lockman F. J.* H I in the Galaxy // Ann. Rev. astron. and astrophys.—1990.—**28**.—P. 215—261.

8. *Demarco R., Magnard F., Durret F., Marquez I.* A study of dark matter halos and gas properties in clusters of galaxies from ROSAT data // Astron. and Astrophys.—2003.—**407**.—P. 437—451.

9. *Ebeling H. Voges W., Bohringer H., et al.* Properties of the X-ray-brightest Abell-type clusters of galaxies (XBACs) from ROSAT All-Sky Survey data. I // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1996.—**281**.—P. 799—829.

10. *Evrard A. E., Metzler C. A., Navarro J. F.* Mass estimates of X-ray clusters // Astrophys. J.—1996.—**469**.—P. 494—507.

11. *Finoguenov A., Reiprich T. H., Bohringer H.* Details of the mass-temperature relation for clusters of galaxies // Astron. and Astrophys.—2001.—**368**.—P. 749—759.

12. *Frederiksen T. F., Hansen S. H., Host O., et al*. Determining all gas properties in galaxy clusters from the dark matter distribution alone // Astrophys. J.—2009.—**700**.—P. 1603—1608.

13. *Fruscione A., McDowell J. C., Allen G. E., et al.* CIAO: Chandra's data analysis system // Proc. SPIE.—2006.—**6270**.—P. 62701V.—(Observatory operations: Strategies, processes and systems / Eds D. Silva, R. Doxsey).

14. *Govoni F., Feretti L., Bohringer H., et al*. Radio and X-ray diffuse emission in six clusters of galaxies // Astron. and Astrophys.—2001.—**376**.—P. 803—819.

15. *Kempner J. C., David L. P*. A Chandra view of the multiple merger in Abell 2744 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2004.—**349**.—P. 385—392.

16. *Makino N., Asano K.* Cluster mass estimate and a cusp of the mass-density distribution in the clusters of galaxies // Astrophys. J.—1999.—**512**.—P. 9—20.

17. *Mewe R., Kaastra J. S., Liedahl D. A*. Update of MEKA: MEKAL // Legacy.—1995.—**6**.—P. 16.

18. *Moore B., Quinn T., Governato F., et al.* Cold collapse and the core catastrophe // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1999.—**310**.—P. 1147—1152.

19. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D.* Simulations of X-ray clusters // Mon. Notic. Roy Astron. Soc.—1995.—**275**.—P. 720—740.

20. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D*. The structure of Cold Dark Matter Halos // Astrophys. J.—1996.—**462**.—P. 563—575.

21. *Pointecouteau E., Arnaud M., Kaastra J., et al*. XMM-Newton observation of the relaxed cluster A478: Gas and dark matter distribution from $0.01R_{200}$ to $0.5R_{200}$ // Astron. and Astrophys.—2004.—**423**.—P. 33—47.

22. *Pointecouteau E., Arnaud M., Pratt G. W.* Probing the dark matter profile of hot clusters and the M — T relations with XMM-Newton // Adv. Space Res.—2005.—**36**.—P. 659—662.

23. *Pointecouteau E., Arnaud M., Pratt G.W*. The structural and scaling properties of nearby galaxy clusters. I. The universal mass profile // Astron. and Astrophys.—2005.—**435**.—P. 1—7.

24. *Pratt G. W., Arnaud M.* The mass profile of A1413 observed with XMM-Newton: Implications for the M — T relation // Astron. and Astrophys.—2002.—**394**.— P. 375—393.

25. *Pratt G. W., Arnaud M.* XMM-Newton observation A1413 // ASP Conf. Proc.—2003.—**301**.—P. 555.— (Matter and Energy Clusters of Galaxies).

26. *Sadat R*. Cluster of galaxies and mass estimates // From Quantum Fluctuations to Cosmological Structures: Proc. of the International School in Astrophysics. — Casablanca, Morocco, 1997.—P. 18.

27. *Vikhlinin A., Forman W., Jones C*. Outer regions of the cluster gaseous atmospheres // Astrophys. J.—1999.—**525**.—P. 47—57.

28. *Wu X., Xue Y*. On the radial density profile of intracluster gas tracing the isothermal dark halo with a finite core // Astrophys. J.—2000.—**542**.—P. 578—587.

29. *Zwicky F*. On the masses of nebalue and of clusters of nebulae // Astrophys. J.—1937.—**86**.—P. 217—246.

Надійшла до редакції 13.03.11