

УДК 524.64

ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ГАЛАКТИКИ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ

© 2019 г. Р. А. Кривонос*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: krivonos@cosmos.ru*

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Исследование центральной части Галактики представляет большой интерес для наблюдательной астрономии и астрофизики. Используя результаты наблюдений в рентгеновском диапазоне, в небольшой области галактического центра обнаружены остатки вспышек сверхновых, звездные скопления, рентгеновские двойные системы, а также нитевидные структуры (филаменты) нетеплового излучения. Однако самым интересным объектом для изучения является сверхмассивная черная дыра (СМЧД) Стрелец А* и ее ближайшее окружение, включая недавно открытое протяженное излучение (размером несколько парсек), и близлежащие молекулярные облака. В данной работе представлены предварительные результаты исследования свойств звездного населения в непосредственном окружении центральной СМЧД Стрелец А*. Используя данные орбитального рентгеновского телескопа НуСТАР и модель массы звездного населения центральной части Галактики, получены оценки удельной светимости на единицу звездной массы ближайшего окружения Стрельца А*, которые в несколько раз превышают аналогичную величину по всей Галактике.

DOI: 10.1134/S0367676519080246

ВВЕДЕНИЕ

Сверхмассивные черные дыры (СМЧД) с массами около 10^5 – 10^{10} масс Солнца были обнаружены в центрах многих галактик, включая Млечный путь. На данный момент не существует общепринятой теории образования и роста СМЧД. Доминирующей точкой зрения является то, что черная дыра увеличивает свою массу в основном за счет аккреции окружающего газа и слияния с другими черными дырами. Одним из важнейших элементов выстраиваемой физической картины является понимание структуры и состава центральных областей галактик и влияния этих факторов на рост и активность центральной СМЧД.

Ближайшая к нам из известных СМЧД располагается в области Галактического центра в положении радиосточника Стрелец А*. Масса центрального объекта составляет $\sim 4.3 \cdot 10^6$ массы Солнца [1]. Расстояние до объекта Стрелец А* составляет около 8.5 кпк, что позволяет детально исследовать ближайшее окружение СМЧД на всех доступных для наблюдений длинах волн. Наличие молекулярных облаков и пыли в диске Галактики не позволяет проводить наблюдения в оптическом диапазоне. Традиционные “окна прозрачности” для исследования центра Галактики располагаются в радио, инфракрасном и рентгеновском диапазонах электромагнитного спектра.

Наблюдения во всех трех диапазонах дополняют общую картину центральной части Галактики. В радиодиапазоне выявлена сложная пространственная структура радиосточника Стрелец А, в которой были обнаружены области нетеплового излучения. В инфракрасном диапазоне обнаружена область звездообразования в непосредственной близости к СМЧД, а также измерены орбиты звезд, находящиеся в ее гравитационном поле, по которым и была измерена масса центрального объекта. В рентгеновском диапазоне были обнаружены остатки вспышек сверхновых, звездные скопления, рентгеновские двойные системы, а также филаменты нетеплового излучения [2]. В последнее время появились данные атмосферных гамма-телескопов, работающих на высоких (>100 ГэВ) и сверхвысоких (>ТэВ) энергиях, с помощью которых были обнаружены области ускорения частиц космических лучей (КЛ) в Галактическом центре [3].

С помощью орбитальных телескопов было обнаружено рентгеновское излучение от молекулярных облаков в непосредственной близости от СМЧД, что, предположительно, указывает на то, что в очень недавнем прошлом (300–400 лет назад) Стрелец А* мог быть типичным активным галактическим ядром малой светимости ($1.5 \cdot 10^{39}$ эрг \cdot с $^{-1}$ в диапазоне 2–200 кэВ), которая в

миллион раз превышала современную светимость центра Галактики [4]. Предполагаемую прошлую активность Стрельца А* диагностировали по флуоресцентному излучению холодного или частично ионизированного газа молекулярных облаков в линии железа 6.4 кэВ [5], а также по жесткому рентгеновскому континууму на энергиях 20–40 кэВ. Наблюдения рентгеновского излучения, приходящего из молекулярных облаков в центральной области Галактики, показали распространение отраженного светового фронта, который сначала достиг ближних областей молекулярных облаков, а затем более отдаленных [6]. Измерения в мягком и жестком рентгеновских диапазонах показали, что модель с рентгеновским “эхом” прошлой активности Стрельца А* наилучшим образом согласуется с данными наблюдений.

С другой стороны, известно, что окрестности СМЧД являются местом ускорения частиц КЛ, и их вклад в ионизацию молекулярных облаков (с последующим излучением в линии железа 6.4 кэВ) нельзя полностью исключить. При данном механизме ионизации нейтральной среды ожидается степенная форма спектра на энергиях выше 10 кэВ, что отличается от комптоновского “бугра” при облучении рентгеновским излучением.

Среди молекулярных облаков центра Галактики наибольший интерес, прежде всего в виду своей изолированности, представляют крупное (45 парсек в поперечнике) газопылевое облако Стрелец B2 [4, 7] и компактное молекулярное облако вблизи звездного скопления Лучник [8–10]. Оба облака позволяют провести относительно простые модельные расчеты отражения светового фронта и определить прошлую активность СМЧД в Стрельце А*.

Молекулярное облако около звездного скопления Лучника известно своим нетепловым рентгеновским континуумом, а также флуоресцентным излучением в линии железа 6.4 кэВ [11]. Природа этого излучения до конца не известна. В работе [12] построили карту молекулярного облака в линиях железа 6.4 кэВ, и сделали предположение о столкновительной ионизации частицами КЛ низких энергий. Далее, в работе [8] впервые исследовали излучение облака на энергиях выше 10 кэВ, но однозначного вывода о природе излучения сделать не смогли из-за плохого качества данных (скопление Лучник не являлось целью наблюдений). Последующие исследования [10] показали, что рентгеновский поток от облака в линии 6.4 кэВ и континууме понижается с 2012 г., что указывает на ионизацию облака от возможной вспышки Стрельца А*. Новые данные наблюдений 2015 г. показали, что поток от облака продолжает снижение [9], подтверждая гипотезу отраженного светового фронта.

Важным открытием ближайшего окружения СМЧД в центре Галактики является недавнее об-

наружение протяженного излучения вблизи Стрельца А* обсерваторией НуСТАР на энергиях выше 20 кэВ [13]. Протяженное излучение имеет эллипсоидную форму с размерами 8×4 парсек с центром в направлении на положение радиосточника Стрелец А* и ориентировано параллельно Галактической плоскости. Спектр излучения характеризуется степенной формой с наклоном $\Gamma = 1.2-1.9$. На данный момент не существует убедительного объяснения природы этого излучения, но наиболее популярной гипотезой является интегральное излучение большого числа каталитических переменных с массой белого карлика (БК) ~ 0.9 масс Солнца, что превышает среднюю массу БК по Галактике (~ 0.6 массы Солнца, см. [14, 15]). Такие объекты способны излучать достаточно жесткий спектр и могли образоваться в достаточном количестве в плотном звездном окружении вблизи СМЧД. Таким образом, подтверждение звездной модели с более тяжелыми БК проливает свет на особенности звездообразования в области Галактического центра. В данной работе исследовано пространственное распределение звездного населения с оценкой излучательной способности (отношение светимости к звездной массе), что поможет определить происхождение протяженного излучения Стрельца А*.

МАССОВАЯ МОДЕЛЬ ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ

Масса центральной части Галактики в основном определяется галактическим утолщением (балджем), которое состоит из старых звезд на поздних этапах звездной эволюции, движущихся по вытянутым орбитам. Наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне показали, что галактический балдж имеет форму трехосного эллипсоида с ближним к нам концом на положительных галактических долготях. Размер большой оси эллипсоида составляет около 3 кпк. Внутри примерно 2 кпк межзвездный газ образует так называемый газовый диск с массой примерно $4 \cdot 10^7$ масс Солнца [16]. Внутри диска находится центральная область звездообразования. На расстояниях несколько сотен парсек от центра Галактики межзвездный газ уплотняется в плотные газопылевые облака так называемой Центральной Молекулярной Зоны (ЦМЗ). В центральной области находится центральное пылевое облако диаметром около 30 парсек.

Концентрация звездного населения резко увеличивается к центру. На расстоянии около килопарсека звездная плотность составляет несколько солнечных масс в кубическом парсеке, в центре — более 300 тыс. солнечных масс в кубическом парсеке. Согласно наблюдениям ближнего инфракрасного диапазона, звездное население центральной части Галактики состоит из двух компонент:

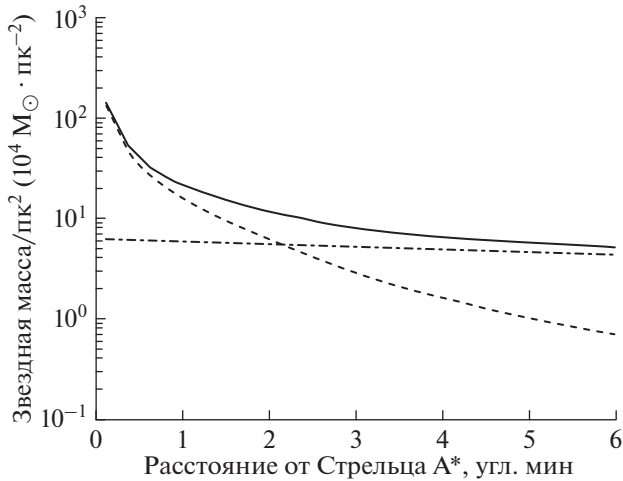


Рис. 1. Радиальный профиль звездной массы центральной части Галактики. Центральное звездное скопление и центральный звездный диск представлены штриховой и штрихпунктирной линией соответственно. Суммарный профиль – сплошная линия.

центральное звездное скопление и центральный звездный диск.

Центральное звездное скопление хорошо определяется на расстояниях больше 1 парсека и до 20 парсек от Стрельца А* со степенным распределением плотности от центра, с показате-

лем степени -1.8 . На расстоянии меньше одного парсека от центра, индекс уплощается и становится около -1.2 . Масса, заключенная в центральном парсеке составляет $0.5-2.0 \cdot 10^6$ масс Солнца (кроме массы СМЧД).

Центральный звездный диск состоит в основном из холодных звезд и простирается до внешнего радиуса около 230 парсек, возможно имеет понижение плотности на расстоянии 120 парсек от центра; содержит основную массу центрального звездного утолщения.

Предполагается, что данные компоненты образуют так называемое центральное звездное утолщение. В работе [17] была составлена аналитическая модель плотности звездного населения в зависимости от расстояния центра, которая изображена на рис. 1.

РЕНТГЕНОВСКАЯ СВИТИМОСТЬ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА НУСТАР

Протяженное жесткое рентгеновское излучение центральной части Галактики было обнаружено с помощью телескопа НУСТАР на энергиях 20–40 кэВ в работе [13]. Мы провели анализ этого же набора данных и построили карту центральной части Галактики в диапазоне 20–40 кэВ, представленную на рис. 2. На основе этой карты мы построили радиальный профиль рентгенов-

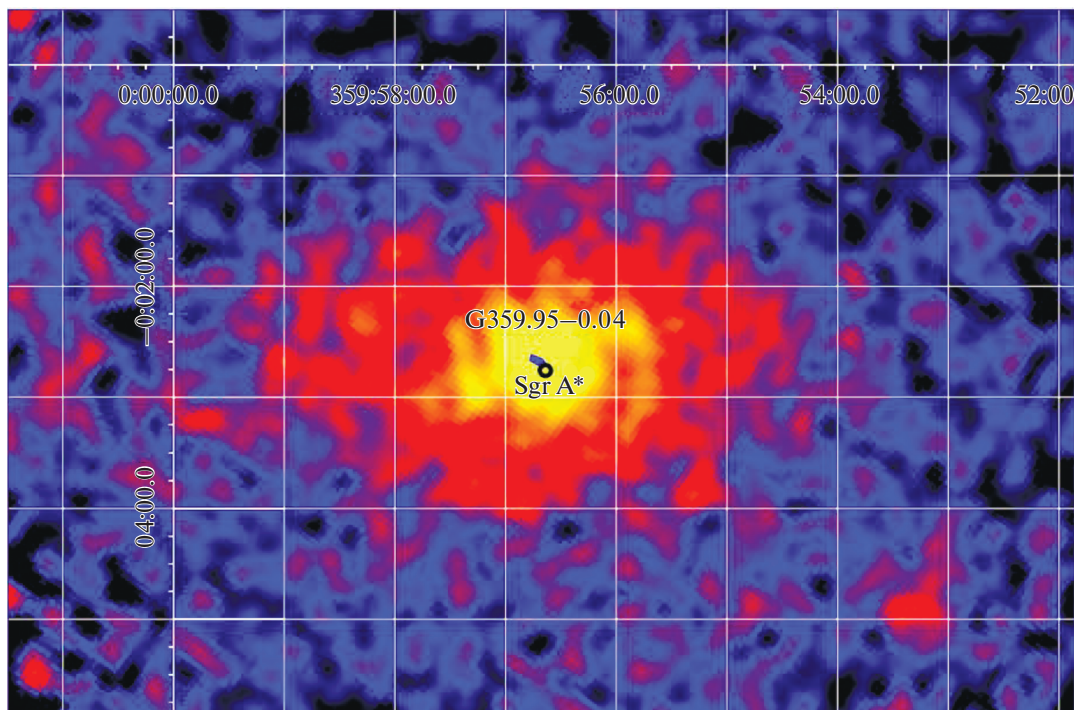


Рис. 2. Карта центральной части Галактики (в прямоугольной галактической проекции) в рентгеновском диапазоне 20–40 кэВ по данным орбитального телескопа НУСТАР. Размер пикселя изображения составляет 3.5 угловых секунды. Черный кружок – центральная СМЧД Стрелец А*. Синяя область – расположение нетеплового филамента G359.95–0.04.

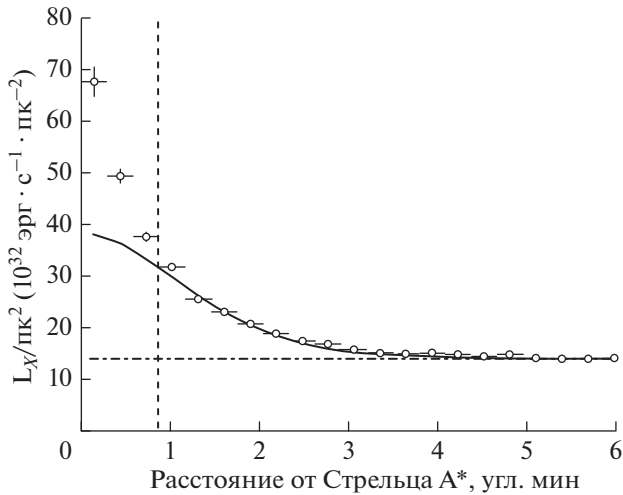


Рис. 3. Радиальный профиль рентгеновской светимости ближайшего окружения Стрельца A* в диапазоне 2–10 кэВ. Черная сплошная кривая – радиальный профиль пространственной модели излучения. Вертикальная штриховая линия – радиус отбора данных, внутри которого заметен вклад нетеплового филамента G359.95–0.04. Штрихпунктирная линия – уровень фоновой засветки, которая оценивалась на расстоянии больше 4 угл. мин от центра.

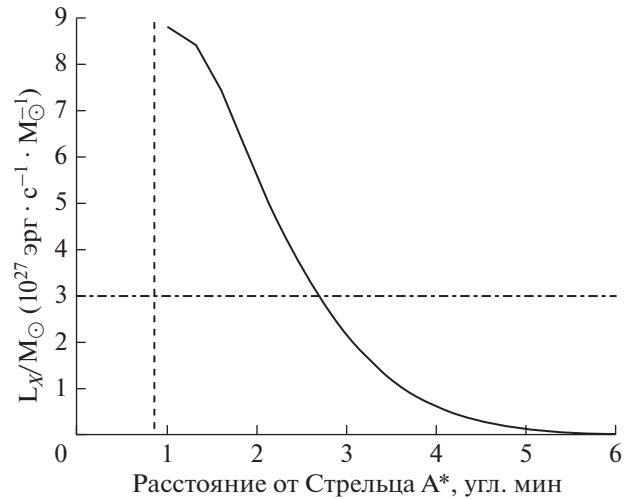


Рис. 4. Удельная рентгеновская светимость на единицу звездной массы, как функция расстояния от центра Галактики (сплошная кривая). Вертикальная штриховая линия – радиус отбора данных. Горизонтальная штриховая линия – удельная светимость звездного населения в окрестностях Солнца в диапазоне 2–10 кэВ из работы [18].

ской светимости центра Галактики (рис. 3), из которого видно, что светимость сильно возрастает при приближении к центральной области, где расположена СМЧД Стрелец A*. Отметим, что перед оценкой светимости наблюдаемый поток был пересчитан из диапазона 20–40 кэВ в стандартный рентгеновский диапазон 2–10 кэВ для сравнения с другими работами. Для преобразования потока использовался спектр протяженного излучения из статьи [13]. В центральной части заметный вклад в общий рентгеновский поток вносит известный нетепловой филамент G359.95–0.04, который имеет жесткий рентгеновский спектр и расположен в 9 угловых секундах от Стрельца A*. Чтобы избежать вклада от этого источника, мы исключили круговую область с радиусом 50 угловых секунд из дальнейшего анализа.

Далее мы использовали двухмерную модель протяженного излучения Стрельца A* [13], чтобы получить радиальный профиль, показанный на рис. 3 гладкой кривой. Модель протяженного излучения также включает плоскую фоновую засветку, нормировка которой определялась на расстоянии больше 4 угл. мин от центра.

РЕНТГЕНОВСКАЯ УДЕЛЬНАЯ СВИТИМОСТЬ НА ЕДИНИЦУ ЗВЕЗДНОЙ МАССЫ

На рис. 4 показан радиальный профиль удельной рентгеновской светимости в диапазоне 2–10 кэВ на единицу звездной массы в центральной

части Галактики. Для получения данного профиля мы использовали пространственную модель протяженного излучения Стрельца A* [13] и модель массы звездного населения в центре Галактики [17]. Излучательная способность звездного населения достигает величины $\sim 9 \cdot 10^{27}$ эрг \cdot с $^{-1}$ M_{\odot}^{-1} на расстоянии одной угловой минуты от Стрельца A*, что в три раза превышает значение $\sim 3 \cdot 10^{27}$ эрг \cdot с $^{-1}$ M_{\odot}^{-1} в окрестности Солнца [18], которая в свою очередь хорошо согласуется с аналогичной величиной по всей Галактике [19, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Центральная часть Млечного Пути отличается большой плотностью звезд, что наделяет эту область Галактики уникальными свойствами. Исследование рентгеновского излучения центра Галактики позволяет лучше узнать свойства звездного населения в двойных системах и закономерности их формирования в тесном звездном окружении.

В данной работе был впервые построен радиальный профиль удельной рентгеновской светимости протяженного излучения в непосредственной близости от галактического центра, где находится СМЧД Стрелец A*. Для оценки звездной массы мы использовали модель звездного населения из работы [17] и данные рентгеновского телескопа NuSTAR в диапазоне 20–40 кэВ. Показано, что излучательная способность протяженного излучения Стрельца A* в диапазоне 2–10 кэВ в три

раза превышает аналогичное значение в окрестности Солнца и в среднем по Галактике, где рентгеновская светимость определяется в основном излучением аккрецирующих БК. Повышенное значение удельной рентгеновской светимости может быть вызвано увеличенной долей аккрецирующих двойных систем с БК в центре Галактики.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 16-02-00294.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gillessen S., Eisenhauer F., Fritz T.K. et al.* // *Astrophys. J. Lett.* 2009. V. 707. № 2. P. 114.
2. *Muno M.P., Bauer F.E., Baganoff F.K. et al.* // *Astrophys. J. Suppl.* 2009. V. 181. № 1. P. 110.
3. *Aharonian F., Akhperjanian A.G., Aye K.M. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 425. P. L13.
4. *Revnitsev M.G., Churazov E.M., Sazonov S.Yu. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 425. P. L49.
5. *Sunyaev R.A., Markevitch M., Pavlinsky M.* // *Astrophys. J.* 1993. V. 407. № 2. P. 606.
6. *Ponti G., Terrier R., Goldwurm A. et al.* // *Astrophys. J.* 2010. V. 714. № 1. P. 732.
7. *Terrier R., Ponti G., Belanger G. et al.* // *Astrophys. J.* 2010. V. 719. № 1. P. 143.
8. *Krivonos R.A., Tomsick J.A., Bauer F.E. et al.* // *Astrophys. J.* 2014. V. 781. № 2. P. 11.
9. *Krivonos R., Clavel M., Hong J. et al.* // *Month. Not. Royal Astron. Soc.* 2017. V. 468. № 3. P. 2822.
10. *Clavel M., Soldi S., Terrier R. et al.* // *Month. Not. Royal Astron. Soc. Lett.* 2014. V. 443. № 1. P. L129
11. *Wang Q.D., Dong H., Lang C.* // *Month. Not. Royal Astron. Soc.* 2006. V. 371. P. 38.
12. *Tatischeff V., Decourchelle A., Maurin G.* // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 546. P. A88.
13. *Perez K., Hailey Ch.J., Bauer F.E. et al.* // *Nature.* 2015. V. 520. № 7549. P. 646.
14. *Krivonos R., Revnitsev M., Churazov E.* // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 463. № 3. P. 957.
15. *Turler M., Chernyakova M., Courvoisier T.J.-L. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 512. P. 13.
16. *Burton W.B., Liszt H.S.* // *Astrophys. J.* 1978. V. 225. P. 815.
17. *Launhardt R., Zylka R., Mezger P.G.* // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 384. P. 112.
18. *Sazonov S., Revnitsev M., Gilfanov M. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 450. № 1. P. 117.
19. *Revnitsev M., Sazonov S., Gilfanov M. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 452. № 1. P. 169.