Цикл работ по теме "Взаимодействие излучения и оттоков вещества аккрецирующих черных дыр с окружающей средой"

1) **Коллектив авторов: Р.А. Сюняев, И.И. Хабибуллин**
2) **"Взаимодействие излучения и оттоков вещества аккрецирующих черных дыр с окружающей средой"**
3) **Публикации:**

а) Khabibullin I.**,** Churazov E.**,** Ferrazzoli R., Kaaret P., Kolodziejczak J. J., Marin F., Sunyaev R., Svoboda J., Vikhlinin A., Barnouin T., Chen C.-T., Costa E., Di Gesu L., Di Marco A., Ehlert S. R., Forman W., Kim D. E., Kraft R., Peter Maksym W., Matt G., Poutanen J., Soffitta P., Swartz D. A., Agudo I., Angelo Antonelli L., Baldini L., Baumgartner W. H., Bellazzini R., Bianchi S., Bongiorno S. D., Bonino R., Brez A., Bucciantini N., Capitanio F., Castellano S., Cavazzuti E., Ciprini S., De Rosa A., Del Monte E., Di Lalla N., Donnarumma I., Doroshenko V., Dovciak M., Enoto T., Evangelista Y., Fabiani S., Garcia J. A., Gunji S., Hayashida K., Heyl J., Iwakiri W., Jorstad S. G., Karas V., Kislat F., Kitaguchi T., Krawczynski H., La Monaca F., Latronico L., Liodakis I., Maldera S., Manfreda A., Marscher A. P., Marshall H. L., Massaro F., Mitsuishi I., Mizuno T., Muleri F., Negro M., Ng C.-Y., O'Dell S. L., Omodei N., Oppedisano C., Papitto A., Pavlov G. G., Peirson A. L., Pesce-Rollins M., Petrucci P.-O., Pilia M., Possenti A., Puccetti S., Ramsey B. D., Rankin J., Ratheesh A., Roberts O. J., Romani R. W., Sgro C., Slane P., Spandre G., Tamagawa T., Tavecchio F., Taverna R., Tawara Y., Tennant A. F., Thomas N. E., Tombesi F., Trois A., Tsygankov S. S., Turolla R., Vink J., Weisskopf M. C., et al., "Polarization of reflected X-ray emission from the Sgr A molecular complex: Multiple flares, multiple sources?" A&A, 707, (2026), (https:dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202556768)

б) Churazov E., Khabibullin I. I.**,** Bykov A. M., Chugai N. N., Sunyaev R. A., Utrobin V. P., Zinchenko I. I., "Southern eROSITA bubble as a forward shock and the low-metallicity CGM. South-east side story" принята в печать в A&A, (2026), (https:dx.doi.org/10.48550/arXiv.2603.20740)

в) Sunyaev R., Khabibullin I., Churazov E**.,** Gilfanov M., Medvedev P., Sazonov S., "X-ray panorama of the SS 433/W50 complex by SRG/eROSITA" A&A, 707, (2026), (https:dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202557726)

4) Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Аккреция вещества на черные дыры сопровождается интенсивным выделением энергии в виде рентгеновского излучения и коллимированных оттоков вещества с близкими к релятивистским скоростям. Понимание их взаимного влияния, а также их воздействия на окружающую среду на Галактических масштабах является одной из наиболее значимых задач современной астрофизики. В нашей Галактике особый интерес представляют черные дыры звездных масс, аккрецирующие в сверхкритическом режиме, и сверхмассивная черная дыра Sgr A* в ее центре. Изучение этих объектов при помощи различных методов современной рентгеновской, радио и гамма-астрономии позволяет получить представление о физических процессах, определяющих это взаимодействие.

5) Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

В случае сверхкритических источников, требуются теоретические модели, которые позволили бы описать наблюдения новейших обсерваторий в рентгеновском и гамма-диапазоне, в частности свойства поляризации рентгеновского излучения, а также протяженные области, излучающие нетепловое рентгеновское излучение и гамма-излучение сверхвысоких энергий. В случае Sgr A* интерес представляет история прошлой активности на масштабе от сотен до миллионов лет. В данном случае новейшие рентгеновские наблюдения отражения излучения от молекулярных облаков в Центральной Молекулярной Зоне и таких глобальные структур как Рентгеновские Пузыри позволяют нам восстановить возраст и энергетику наиболее интенсивных эпизодов активности сверхмассивной черной дыры.

6) Используемый подход, его новизна и оригинальность

Глубокие поляриметрические наблюдения протяженного рентгеновского излучения области центра Галактики позволяют проверить гипотезу о том, что оно вызвано отражением излучения вспышки Sgr A* более чем столетней давности, а также определить положение “отражателя” вдоль луча зрения. Картирование и спектроскопия протяженного излучения Рентгеновских Пузырей по данным обзора неба обсерватории СРГ позволяют построить физическую модель эпизода активности в центре Галактики несколько миллионов лет назад, используя морфологию, размер, температуру, поверхностную яркость, и параметр неравновесности ионизационного состояния горячего газа. Глубокие наблюдения туманности W50, окружающей канонический сверхкритический источник SS 433, телескопом eROSITA позволили получить уникальную по своей полноте карту диффузного рентгеновского излучения, а также провести его спектроскопию и определить ключевые параметры плазмы.

7) Полученные результаты и их значимость

а) Измерения степени и направления поляризации рентгеновского излучения молекулярного комплекса Sgr A по данным глубоких наблюдений обсерватории IXPE подтверждают сценарий его облучения вспышкой Sgr A*, произошедшей 170 лет назад и имевшей светимость более чем в миллион раз выше по сравнению с уровнем излучения в “спокойном” состоянии. В то же время, поляризация излучения наиболее яркой центральной области облака демонстрирует значимо отличные свойства, что может быть указанием на несколько эпизодов облучения и потенциально облучения источником, отличным от Sgr A*. Такой источник может быть связан со вспышкой транзиентного источника в молодом звездном скоплении Арки. Таким образом, чувствительность поляризации к геометрии облучения позволила обнаружить, что картина отражения излучения от молекулярных облаков в Центре Галактики может быть значительно сложнее, чем было принято считать.

б) В отличие от сложной рентгеновской и радио структуры, наблюдаемой в области Северного полярного шпура, юго-восточная часть пузырей eROSITA может быть достаточно хорошо описана как сферическая ударная волна, вероятно, созданная кратковременным выделением энергии в Галактическом центре. В рамках этой модели физический радиус пузыря составляет 7-8 кпк, а возраст вспышки 5-8 млн лет. Последняя величина, вероятно, является нижним пределом истинного возраста. Видимый сегмент фронта ударной волны (расположенный на расстоянии 10-12 кпк над диском Галактики и на сопоставимом расстоянии от Солнца) в настоящее время расширяется со скоростью 700 км/с в газе с плотностью $n_e \sim 3e\text{-}4$ см$^{-3}$, причем содержание тяжёлых элементов в этом газе низкое: 0.1-0.2 относительного Солнечного. В отличие от ограничений, получаемых из величин, проинтегрированных вдоль луча зрения, эти оценки фактически являются локальными изменениями свойств межзвездной галактической среды.

в) Данные глубоких рентгеновских наблюдений демонстрируют тесную связь между тепловой и нетепловой компонентами W50 на масштабах от долей парсека, представленных узкими и яркими в рентгеновском диапазоне филаментами, до всей протяжённости туманности $\gtrsim$ 100 пк. Эти данные также позволили нам полностью охарактеризовать пару почти симметричных, вытянутых структур с резкими границами, ориентированных вдоль оси орбиты двойной системы, которые ярко выражены в гамма-излучении очень высоких энергий. Полученная картина взаимодействия энергичных истечений с окружающей средой прокладывает путь для будущих целенаправленных многоволновых наблюдений и специализированного численного моделирования.