

- 1) И.И. Хабибуллин
- 2) X-ray emission from warm-hot intergalactic medium: the role of resonantly scattered cosmic X-ray background (Рентгеновское излучение тепло-горячего межгалактического газа: роль резонансного рассеяния космического рентгеновского фона)
- 3) Khabibullin I., Churazov E., 2019, MNRAS, 482, 4972, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019MNRAS.482.4972K>
- 4) Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Около половины барионного бюджета Вселенной в текущую эпоху приходится на теплую межгалактическую среду (WHIM), плотность которой превышает среднюю плотность лишь на один-два порядка, а температура достаточно высока для практически полной ионизации водорода и гелия. Как следствие, непосредственное детектирование такой среды затруднено из-за отсутствия лаймановских линий поглощения в спектре квазаров, видимых “на просвет”, и слабости ее собственного излучения. Собственное излучение WHIM обусловлено фотоионизацией космическим рентгеновским фоном, при этом основной вклад вносят линии высокоионизованных атомов наиболее распространенных тяжелых элементов (в первую очередь, кислорода), попадающие в мягкий рентгеновский диапазон, а также резонансным рассеянием на разрешенных переходах в тех же высокоионизованных атомах металлов. Максимально точное описание получающегося в итоге излучения принципиально важно для разработки методик обнаружения WHIM, в том числе используя результаты современных космологических моделирований, позволяющих предсказать металличность разных фаз межгалактической среды.

- 5) Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

Резонансное рассеяние в линиях разрешенных переходов проявляет себя в виде “линий поглощения” в спектре ярких фоновых рентгеновских источников, видимых “на просвет”. Если значительная доля фоновых источников может быть разрешена и исключена из сигнала, собранного с площадки, содержащей сгущение WHIM, оставшееся диффузное излучение должно включать рассеянное излучение изотропного рентгеновского фона. В результате, эффективно наблюдаемая излучательная способность среды может быть значительно усилена, существенно улучшая перспективы обнаружения сгущений WHIM малой плотности и меняя некоторые из его важных диагностических спектральных характеристик. Используя расчеты излучения такой среды в зависимости от параметров и привлекая данные космологических симуляций, можно выявить наиболее перспективные с наблюдательной точки зрения области фазового пространства WHIM.

- 6) Используемый подход, его новизна и оригинальность

В работе проведено аналитическое исследование и фотоионизационное моделирование рентгеновского излучения WHIM с учетом резонансного рассеяния для широкой области пространства параметров плотность-температура. В результате, описано усиление излучательной способности плазмы, изменение различных диагностических характеристик излучения (например, отношения линий и их эквивалентной ширины). Используя данные космологических симуляций *Magneticum*, рассмотрены перспективы детектирования излучения сгущений WHIM при помощи будущих рентгеновских миссий (в частности, *ATHENA* и *CPG/eROSITA*).

- 7) Полученные результаты и их значимость

Показано, что вклад резонансного рассеяния в несколько раз увеличивает излучательную способность WHIM в диапазоне 0.5-1 кэВ и в несколько десятков раз в области наиболее ярких резонансных линий (например, O VII). Выделены наиболее перспективные с наблюдательной точки зрения области пространства параметров WHIM. Показано, что детектирование рентгеновского излучения филаментарных структур WHIM в Локальной Вселенной возможно в результате наблюдения *CPG/eROSITA* продолжительностью около миллиона секунд.

**Рис.1.** *Левая панель.* Карта отношения рассеянной к собственной излучательной способности тепло-горячего межгалактического газа (в диапазоне 0.5-1 кэВ) на плоскости параметров плотность-температура. Черные контуры показывают область пространства параметров, в которой ожидается наибольшее количество гелиеподобного кислорода в Локальной Вселенной (на основе космологического гидродинамического моделирования Magneticum). Положения, отмеченные черным квадратом и треугольником, соответствуют параметрам, типичным для структур типа филаментов и “листов” в Локальной Вселенной.

*Правая панель.* Спектр мягкого рентгеновского излучения таких структур (синие и красные кривые, соответственно) на красном смещении  $z=0.1$  по отношению к полному рентгеновскому фону (черные кривые). Сплошные линии показывают ожидаемый сигнал после свертки со спектральной функцией отклика телескопа eROSITA обсерватории Спектр-РГ, пунктирные – свернутые с окном шириной 3 эВ. Также показаны уровни, соответствующие 1% фона и его 1-сигма флуктуациям, достижимым после наблюдения eROSITA продолжительностью 1 миллион секунд для спектральных каналов шириной 3 эВ и 30 эВ (см. подписи справа).

