

**1) Авторы: П. С. Медведев, С. Ю. Сазонов, М. Р. Гильфанов** отдел 52 ИКИ РАН.

2) Название:

"Диффузия гелия в период формирования первых галактик."  
("Helium diffusion during formation of the first galaxies").

3) Ссылки: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 459, Issue 1, p.431-440, 06.2016

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.459..431M>

4) Предсказания теории первичного нуклеосинтеза становятся все более точными. Измерения фона реликтового излучения обсерваторией им. Планка позволили определить с высокой точностью отношение количества барионов и протонов в ранней Вселенной. Эти и другие космологические измерения, а также улучшения в цепочке расчетов первичного нуклеосинтеза позволили ограничить ожидаемое значение обилия гелия в пределах одной десятой процента. С другой стороны, прямые измерения первичного обилия гелия в зонах III с низкой металличностью в карликовых галактиках достигли точности в один процент. Можно надеяться на то, что дальнейший прогресс в методах наблюдений позволит улучшить точность прямых измерений обилия гелия до 0.1%. Сравнение таких данных с космологическими предсказаниями позволит провести критическую проверку теории первичного нуклеосинтеза и возможно найти отклонения от ее предсказаний. В таком случае будет важно учесть влияние астрофизических явлений, которые могли влиять на обилия гелия и других первичных элементов в ходе эволюции Вселенной. Одним из таких явлений является диффузия элементов в эпоху космической реионизации.

5) В работе решается задача о влиянии диффузии на обилие первичных элементов в период формирования структур в ранней Вселенной. Основным приоритетом работы было определение надежного ограничения на амплитуды эффектов вносимых диффузией легких элементов. Такие эффекты были впервые изучены в работе Medvigy, Loeb (2001). Однако, авторами этой работы был рассмотрен лишь линейный режим роста флуктуаций плотности. Поэтому очень важно определить какова роль диффузии на последующих стадиях формирования структур.

6) Нами были рассмотрены две стадии формирования структур с массами, значительно превышающими критическую массу Джинса: 1) фаза до первичного коллапса возмущений плотности, эта стадия включает в себя линейный и нелинейный режимы роста; 2) последующая аккреция вещества на вириализованный объект. Для описания аккреции газа на протогалактику во время второй стадии использовалось самоподобное решение из работы (Bertschinger 1985). Для определения темпа диффузии элементов в газе использовалась разработанная в предыдущих наших работах схема расчета (Штыковский, Гильфанов 2010; Медведев, Сазонов, Гильфанов 2014). При этом, в отличие от этих работ (где рассматривалась задача о диффузии элементов в находящемся в гидростатическом равновесии горячем газе скоплений галактик), в данном случае исследуется диффузия на фоне адвекционно-доминированного течения газа (приближение свободного падения), так как именно в таком режиме должно происходить формирование структур в рассматриваемой задаче.

7) Коэффициент диффузии атомов в нейтральном газе на несколько порядков выше, чем для заряженных ионов в плазме. Поэтому даже при низкой температуре газа во Вселенной до начала эпохи реионизации или на ее самых ранних стадиях ( $z \sim 10$ ) гравитационная седиментация элементов тяжелее водорода могла бы быть эффективной. Наши расчеты показали, что диффузия в холодном и близком к нейтральному первичном газе приводит к приросту относительного обилия гелия порядка  $10^{-4}$  внутри первых формирующих звезды минигало с массами  $10^5$ - $10^6 M_{\odot}$  на  $z \sim 10$ . Ионизация газа резко увеличивает сечение взаимодействия частиц, препятствуя диффузии. Однако за счёт сильной зависимости коэффициента диффузии в плазме от температуры, диффузия в горячем ионизованном газе может быть значительно эффективнее, чем диффузия в холодном и нейтральном газе до начала реионизации. Учитывая все эти возможности, мы рассмотрели ряд сценариев: формирование первых интересных астрофизических объектов (минигало, в которых могли образовываться первые звезды) на "заре" реионизации, когда газ во Вселенной оставался очень холодным (холоднее реликтового излучения) и нейтральным, формирование последующих более крупных объектов, когда газ во Вселенной уже был подогрет до определенной степени первыми астрофизическими объектами (в том числе субкосмическими лучами от первых сверхновых), формирование протогалактик и более массивных структур в эпоху реионизации Вселенной, когда межгалактический газ уже находился в высокой степени ионизации. Оказалось, что во всех этих режимах диффузия должна приводить к увеличению обилия гелия и других первичных элементов в формирующихся объектах, а амплитуда эффекта зависит от ионизационного и теплового состояния межгалактического газа, достигая величины порядка десятых долей процента.

Таким образом, будущие высокоточные измерения отклонений в обилии гелия и других первичных элементов от предсказываемых теорией первичного нуклеосинтеза значений могли бы дать дополнительную независимую информацию об истории нагрева и реионизации Вселенной.