

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

---

**Кафедра Физика элементарных частиц**  
Отчет по НИРС на тему: Effects of dark atoms in structure formation.

**Место выполнения: НИЯУ МИФИ, кафедра «Физика элементарных частиц»**

Студент (номер группы): Карни Мд Вейс Ал (Б19-102) \_\_\_\_\_

Руководитель проекта: проф. Хлопов М. Ю. \_\_\_\_\_

Москва – 2022 г.

# Формирование крупномасштабной структуры ОНе темной материей

Благодаря упругим ядерным взаимодействиям его гелиевой составляющей с ядрами космической плазмы газообразный О-гелий находится в тепловом равновесии с плазмой и излучением на стадии доминирования излучения (RD), в то время как передача энергии и импульса от плазмы эффективна. Давление излучения, действующее на плазму, затем передается флуктуациям плотности О-гелиевого газа и преобразует их в акустические волны в масштабах до размера горизонта.

При температуре  $T < T_{od} \approx 1S_3^{2/3} \text{ eV}$  передача энергии и импульса от барионов к О-гелию неэффективна, потому что

$$n_B \langle \sigma v \rangle (m_p/m_o) t < 1,$$

where  $m_o$  является массой ОНе атом и  $S_3 = m_o/(1\text{TeV})$ . Здесь

$$\sigma \approx \sigma_o \sim \pi r_o^2 \approx 10^{-25} \text{ cm}^2,$$

и  $v = \sqrt{2T/m_p}$  это барионная тепловая скорость. Затем газообразный О-гелий отделяется от плазмы. Это начинает доминировать во Вселенной после  $t \sim 10^{12} \text{ s}$  at  $T \leq T_{RM} \approx 1\text{eV}$  и "атомы" О-гелия играют основную динамическую роль в развитии гравитационной нестабильности, вызывая образование крупномасштабной структуры. Сложная природа О-гелия определяет специфику соответствующего сценария со скрытой массой.

At  $T > T_{RM}$  общая масса газа О-Не с плотностью  $\rho_d = (T_{RM}/T)\rho_{tot}$  равен

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho_d t^3 = \frac{4\pi}{3} \frac{T_{RM}}{T} m_{Pl} \left( \frac{m_{Pl}}{T} \right)^2$$

в пределах космологического горизонта  $l_h = t$ . В период развязки  $T = T_{od}$ , эта масса сильно зависит от массы О-гелия  $S_3$  и дается с помощью

$$M_{od} = \frac{T_{RM}}{T_{od}} m_{Pl} \left( \frac{m_{Pl}}{T_{od}} \right)^2 \approx 2 \cdot 10^{44} S_3^{-2} \text{ g} = 10^{11} S_3^{-2} M_\odot,$$

где  $M_\odot$  это масса Солнца. О-гелий образуется только при  $T_o$  и его общая масса в пределах космологического горизонта в период его создания равна  $M_o = M_{od}(T_{od}/T_o)^3 = 10^{37} \text{ g}$ .

На третьем этапе перед развязыванием длина джнсов  $\lambda_J$  другого газа было ограничено снизу распространением звуковых волн в плазме с релятивистским уравнением состояния  $p = \epsilon/3$ , будучи порядка космологического горизонта и равным  $\lambda_J = l_h/\sqrt{3} = t/\sqrt{3}$ . После развязки на  $T = T_{od}$ , это сводится к  $\lambda_J \sim v_o t$ , где  $v_o = \sqrt{2T_{od}/m_o}$ . Хотя после отсоединения джнсовая масса в О-Не газе соответственно падает

$$M_J \sim v_o^3 M_{od} \sim 3 \cdot 10^{-14} M_{od},$$

следует ожидать сильного подавления колебаний на весах  $M < M_o$ , а также адиабатическое затухание звуковых волн в плазме RD для масштабов  $M_o < M < M_{od}$ . Это может обеспечить некоторое подавление мелкомасштабной структуры в рассматриваемой модели для всех

разумных масс О-гелия. Значение этого подавления и его влияние на формирование структуры нуждается в специальном изучении при детальном численном моделировании. В любом случае, это может быть не так сильно, как подавление свободной потоковой передачи в обычных сценариях теплой Темной материи (WDM), но можно ожидать, что качественно мы имеем дело с моделью Более теплой, чем холодная Темная материя.

При температуре  $T < T_{od} \approx 1S_3^{2/3} \text{keV}$  передача энергии и импульса от барионов к-гелию неэффективна, и газообразный О-гелий отделяется от плазмы. Это начинает доминировать во Вселенной после  $t \sim 10^{12} \text{ s}$  около  $T \leq T_{RM} \approx 1\text{eV}$  и "атомы" О-гелия играют основную динамическую роль в развитии гравитационной нестабильности, вызывая образование крупномасштабной структуры. Сложная природа О-гелия определяет специфику соответствующего сценария более теплой, чем холодная, темной материи.

Будучи отделенным от барионной материи, *OHe* газ не следует за образованием барионных астрофизических объектов (звезд, планет, молекулярных облаков...) и образует ореолы темной материи галактик. Легко видеть, что газообразный О-гелий не подвержен столкновениям из-за своей численной плотности, насыщая галактическую темную материю. Принимая среднюю плотность барионной материи, можно также обнаружить, что Галактика в целом прозрачна для О-гелия, несмотря на его ядерное взаимодействие. Только отдельные барионные объекты, такие как звезды и планеты, непрозрачны для него.

## 1. Список литературы

- [1] M. Yu. Khlopov, Fundamental Particle Structure in the Cosmological Dark Matter, Int. J. Mod. Phys. A 28, 133042 (2013) [arXiv:1311.2468].
- [2] M. Yu. Khlopov, Composite dark matter from 4th generation, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 83 , 3 (2006) JETP Lett. 83, 1 (2006) arXiv:astro-ph/0511796.
- [3] M. Yu. Khlopov, A. G. Mayorov, and E. Yu. Soldatov, The dark atoms of dark matter, Prespacetime J. 1, 1403 (2010) [arXiv:1012.0934].
- [4] M. Yu. Khlopov, A. G. Mayorov, and E. Yu. Soldatov, Towards Nuclear Physics of OHe Dark Matter, Bled Workshops Phys. 12(2), 94 (2011) [arXiv:1111.3577].
- [5] M. Yu. Khlopov, Physics of Dark Matter in the Light of Dark Atoms, Mod. Phys. Lett. A 26, 2823 (2011) arXiv : 1111.2838.