

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИЯ»

**ОТЧЕТ О НАУЧНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ
РАБОТЕ**

«Реионизация Вселенной первичными черными дырами»

Студент

Лагутин Дмитрий
Владимирович

Научный руководитель,

К.ф-м.н., доцент

Кириллов Александр
Александрович

Москва 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|----------------------------|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| ЦЕЛЬ РАБОТЫ..... | 6 |
| ИЗЛУЧЕНИЕ ПЧД | 7 |
| ТЕРМОДИНАМИКА..... | 10 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 12 |
| ЛИТЕРАТУРА | 13 |

Введение

Одним из ключевых этапов эволюции Вселенной после эпохи рекомбинации является космологическая реионизация — процесс повторной ионизации нейтрального водорода и гелия под действием ионизирующего излучения первых астрофизических источников. Реионизация оказывает существенное влияние на формирование крупномасштабной структуры, тепловую и ионизационную историю межгалактической среды (IGM), а также на наблюдаемые свойства реликтового микроволнового излучения. Несмотря на значительный прогресс в наблюдательной и теоретической космологии, вопрос о природе ионизирующих источников и деталях протекания реионизации остаётся открытым, что делает данную проблему актуальной и в настоящее время.

После окончания эпохи рекомбинации при красном смещении $z \simeq 1100$ Вселенная перешла в состояние, характеризующееся в основном нейтральной барионной материей. Этот период часто называют «тёмными веками», поскольку в нём отсутствовали источники интенсивного электромагнитного излучения. С формированием первых гравитационно связных объектов — звёзд, галактик и квазаров — начался процесс реионизации, в ходе которого нейтральный водород и гелий в межгалактической среде вновь ионизовались.

Современные наблюдения накладывают достаточно жёсткие ограничения на временные рамки реионизации. Анализ оптической толщины Томсоновского рассеяния реликтового излучения, полученный по данным спутников *Planck*, указывает, что реионизация была протяжённым процессом и в среднем завершилась при красных смещениях $z \sim 6-8$. Независимые ограничения следуют из спектров далёких квазаров, в частности из наблюдений эффекта Ганна–Петерсона, свидетельствующих о резком увеличении доли нейтрального водорода при $z \gtrsim 6$. Дополнительную информацию предоставляют наблюдения линии 21 см нейтрального водорода, которые в перспективе позволяют реконструировать пространственную и временную структуру реионизации.

Таким образом, в настоящее время считается, что реионизация началась при $z \sim 15-20$, носила протяжённый характер и завершилась к $z \sim 6$, однако точная ионизационная история, а также вклад различных источников в этот процесс остаются предметом активных исследований.

На сегодняшний день основными кандидатами на роль источников ионизирующего излучения считаются:

1. Ранние звёзды (Population III и Population II) — массивные и горячие звёзды первых поколений, эффективно излучающие в ультрафиолетовом диапазоне.
2. Молодые галактики — совокупный вклад звёздных популяций в галактиках, при условии достаточно большого коэффициента выхода ионизирующих фотонов из галактических гало.
3. Квазары и активные ядра галактик — мощные источники жёсткого ультрафиолетового и рентгеновского излучения, однако их наблюдаемая численность при больших красных смещениях, по-видимому, недостаточна для полной реионизации.

Несмотря на то, что звёздные источники в настоящее время считаются основным механизмом реионизации, в стандартных моделях сохраняются существенные неопределённости, связанные с начальными функциями масс звёзд, эффективностью образования звёзд, коэффициентом выхода ионизирующего излучения и обратной связью. В ряде работ отмечается, что для объяснения наблюдаемой оптической толщины и тепловой истории межгалактической среды может потребоваться дополнительный вклад источников, излучающих в рентгеновском диапазоне.

В этом контексте особый интерес представляют неклассические источники энергии, в частности первичные чёрные дыры, которые могут вносить дополнительный вклад в нагрев и ионизацию межгалактической среды на ранних этапах эволюции Вселенной.

Первичные чёрные дыры (ПЧД) — это чёрные дыры, которые могли образоваться в ранней Вселенной до начала звёздной эволюции, в отличие от астрофизических чёрных дыр, формирующихся в результате коллапса массивных звёзд. Возможные механизмы образования ПЧД включают гравитационный коллапс сверхплотных флуктуаций плотности, фазовые переходы в ранней Вселенной, распад топологических дефектов и другие неравновесные процессы в условиях высоких энергий.

Массы первичных чёрных дыр могут охватывать широкий диапазон — от планковских масштабов до астрофизических значений, при этом именно ПЧД с массами $M \sim 10^{15} - 10^{17}$ г являются особенно интересными в контексте реионизации. Такие объекты обладают ненулевой скоростью испарения за счёт излучения Хокинга, что приводит к непрерывному выделению энергии в виде различных частиц.

Излучение Хокинга носит квантовый характер и приводит к тому, что чёрная дыра излучает как почти чёрное тело с температурой

$$T_{BH} \propto \frac{1}{M}$$

где M — масса чёрной дыры. В спектре излучения присутствуют фотоны, электроны, позитроны и, при достаточно высокой температуре, более тяжёлые частицы. Эти компоненты способны эффективно передавать энергию барионной среде, вызывая нагрев и частичную ионизацию межгалактического газа.

Важным свойством ПЧД является то, что их вклад в энерговыделение может быть распределён по широкому диапазону красных смещений и не привязан напрямую к процессам звёздообразования. Это делает их потенциально значимым дополнительным источником ионизации, особенно на ранних этапах реионизации или в сценариях, где стандартные астрофизические источники оказываются недостаточными.

Цель работы

Целью данной научно-исследовательской работы является изучение вклада первичных чёрных дыр в процесс реионизации Вселенной и анализ их влияния на тепловую и ионизационную историю межгалактической среды. В рамках работы рассматриваются различные модели массовых спектров ПЧД, механизмы поглощения энергии излучения Хокинга барионной материи и их вклад в эволюцию температуры газа как функции красного смещения.

Полученные результаты позволяют оценить, при каких параметрах спектра масс первичных чёрных дыр их влияние на реионизацию может быть существенным, а также определить направления дальнейших исследований в данной области.

В первую очередь необходимо изучить излучение ПЧД и температуру барионной материи как функции красного смещения. Задача заключалась в получении результатов проделанных в работе [1].

Излучение ПЧД

Механизм излучения ПЧД основан на механизме излучения Хокинга. ПЧД имеет три канала излучения: электроны и позитроны, гамма-кванты, гамма-кванты полученные в результате аннигиляции электрон-позитронных пар. Рассмотрим в отдельности каждые из каналов.

Фотоны:

Основным процессом взаимодействия фотона от испарения в рассматриваемом энергетическом диапазоне ($\omega \sim 0,5...5$ МэВ) является комптоновское рассеяние.

Пусть порция энергии $\delta\Omega_\gamma(t_0) = \kappa_\gamma \dot{\Omega}_{ev} dt_0$ на единицу вещества во Вселенной выделяется ПЧД в момент t_0 . Где κ_γ – доля фотонов в потоке испарения, $\dot{\Omega}_{ev}$ – общая скорость испарения. Изменение во времени этой порции определяется комптоновским рассеянием и красным смещением:

$$\frac{d\delta\Omega_\gamma(t)}{dt} = -\frac{\delta\Omega_\gamma(t)}{\tau_C} - H\delta\Omega_\gamma(t), \quad (1)$$

Где $H = \frac{2}{3} \frac{1}{t_U} \tilde{z}$ – параметр Хаббла. Решение уравнения (1) в переменной

$\tilde{z} = \left(\frac{t_U}{t}\right)^{\frac{2}{3}}$ дается в виде:

$$\delta\Omega_\gamma(z_0, z) = \frac{\tilde{z}}{\tilde{z}_0} \exp\left(-\frac{\tilde{z}_0^{\frac{3}{2}} - \tilde{z}^{\frac{3}{2}}}{\tilde{z}_C^{\frac{3}{2}}}\right) \cdot \kappa_\gamma \dot{\Omega}_{ev} dt_0, \quad (2)$$

Интегрирование уравнения (2) по t_0 в интервале $t_i(z_i) < t_0(z_0) < t(z)$, дает полную энергию фотонов от испарения, присутствующую в момент $t(z)$, $\Omega_\gamma(z)$. Значение $\dot{\Omega}_{abs}^{(\gamma)}(z) = \frac{\Omega_\gamma(z)}{\tau_C}$ дает скорость полного поглощения в зависимости от z .

$$\dot{\Omega}_{abs}^{(\gamma)}(z) = \kappa_\gamma \dot{\Omega}_{ev} f_{abs}^{(\gamma)}(z) \quad (3)$$

$$f_{abs}^{(\gamma)}(z) = \int_z^{z_i} \frac{\tilde{z}}{\tilde{z}_0} \exp \left(-\frac{\tilde{z}_0^{\frac{3}{2}} - \tilde{z}^{\frac{3}{2}}}{\tilde{z}_C^{\frac{3}{2}}} \right) \frac{3t_U d\tilde{z}_0}{2\tilde{z}_0^{\frac{5}{2}} \tau_C} \quad (4)$$

Электроны и позитроны:

Электроны и позитроны от испарения ПЧД должны испытывать потери энергии из-за рассеяния на фотонах РИ, ионизации и красного смещения.

Уравнение аналогичное (1) для электронов и позитронов дается в виде:

$$\frac{d\delta\Omega_e(t)}{dt} = -\frac{r_{ion}\delta\Omega_e(t_0)}{E_0}\eta(\delta\Omega_e(t)) - \frac{\beta E_0}{\delta\Omega_e(t_0)}\delta\Omega_e^2(t) - H\delta\Omega_e(t), \quad (5)$$

Решение уравнения (5) дается в виде:

$$\dot{\Omega}_{abs}^{(e-ion)}(z) = \kappa_e \dot{\Omega}_{ev} \frac{\omega_1}{E_0 + m_e} \frac{3\zeta(z)\tilde{z}^{\frac{3}{2}}}{2 + 3\zeta(z)}, \quad (6)$$

Фотоны от аннигиляции:

Скорость поглощения энергии излучения фотонов от аннигиляции электрон-позитронных пар определяется выражением:

$$\dot{\Omega}_{abs}^{(e-ann)}(z) = \kappa_e \dot{\Omega}_{ev} \frac{\omega_1}{E_0 + m_e} f_{abs}^{(\gamma)}(z), \quad (7)$$

Результаты расчетов представлены на Рис.1

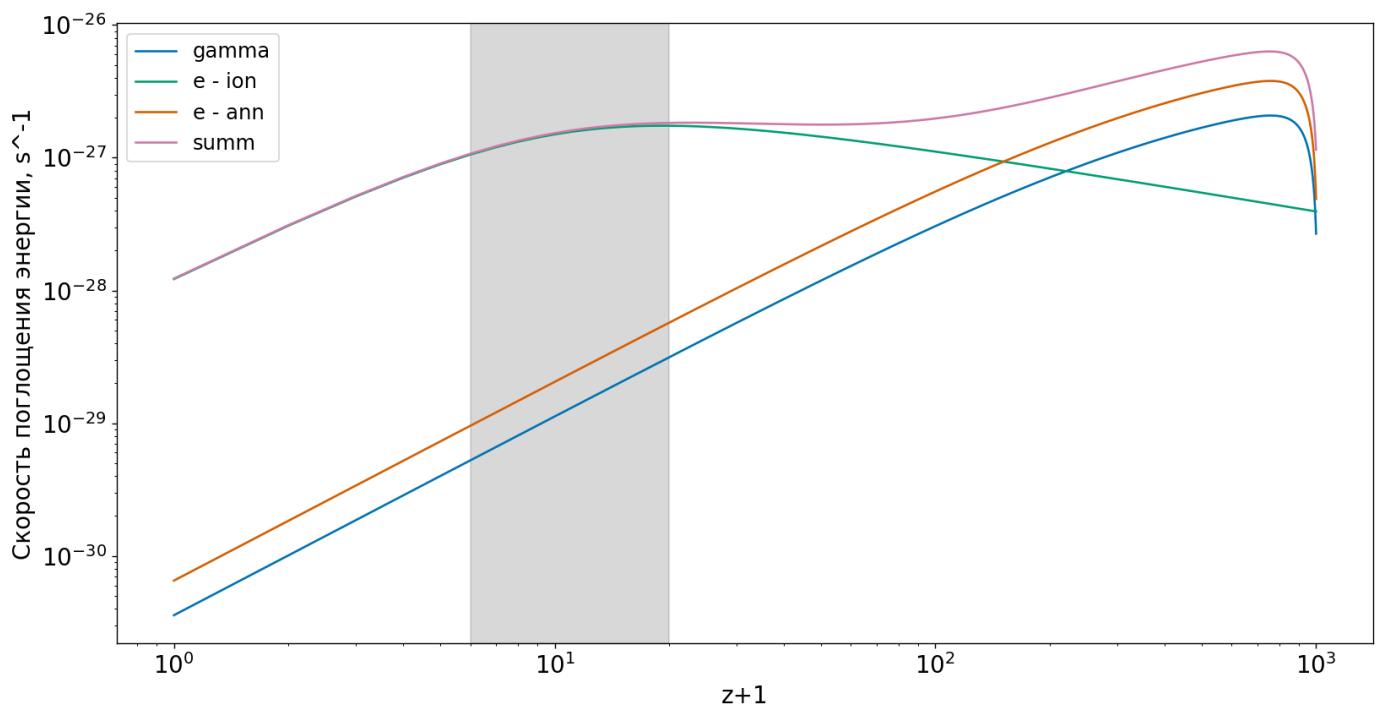


Рис.1. Скорость поглощения энергии для всех каналов излучения, и их сумма. Для масс ПЧД $M = 5 \cdot 10^{16} g$. Серой областью выделена эпоха реионизации.

Термодинамика

Проведем оценку температуры барионной материи. Для этого рассмотрим первый закон термодинамики $dQ = \delta A + dU$, для произвольного количества вещества $n_H V$.

Расширение Вселенной рассматривается как работа газа: $\delta A = pdV = n_m T 3HV dt$.

$$\text{Внутренняя энергия газа } dU = \frac{3}{2}d(pV) = (p = n_m T, n_m V \approx \text{const}) = \frac{3}{2}n_m V dT.$$

Прирост тепла $dQ = \dot{\Omega}_{abs} \rho_c V dt - \langle \Delta E \sigma v \rangle_{m\gamma} n_\gamma n_e V dt$, где второй член учитывает обмен энергией между РИ и веществом (электронами), $\langle \Delta E \sigma v \rangle_{m\gamma} n_\gamma = \frac{4\pi^2}{15} T_\gamma^4 \sigma_T \frac{T - T_\gamma}{m_e}$.

Подставляя все в первый закон термодинамики и упрощая получим:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\dot{\Omega}_{abs} m_p}{3x_H \Omega_B (1 + x_e)} - \frac{8\pi^2}{45} T_\gamma^4 \sigma_T \frac{x_e}{1 + x_e} \frac{T - T_\gamma}{m_e} - 2HT, \quad (8)$$

В основном важны первый и третий члены. Если предположить, что $\dot{\Omega}_{abs} = \text{const}$ и пренебречь x_e в первом пределе. То решение уравнения (8) без второго члена будет иметь вид:

$$T(t) = \frac{2\dot{\Omega}_{abs} m_p}{7x_H \Omega_B} \cdot t \left(1 - \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{7}{3}} \right) + T_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (9)$$

Где $T_0 = T(t_0)$ – начальное значение

Значение x_e определяется по формуле Саха:

$$\frac{x_e^2}{1 + x_e} \approx \frac{1.6 \times 10^{28} T^{\frac{3}{2}}}{\tilde{z}^3} \exp \left(-\frac{13,6}{T} \right), \quad (10)$$

Где T в эВ

Результаты расчетов представлены на Рис.2

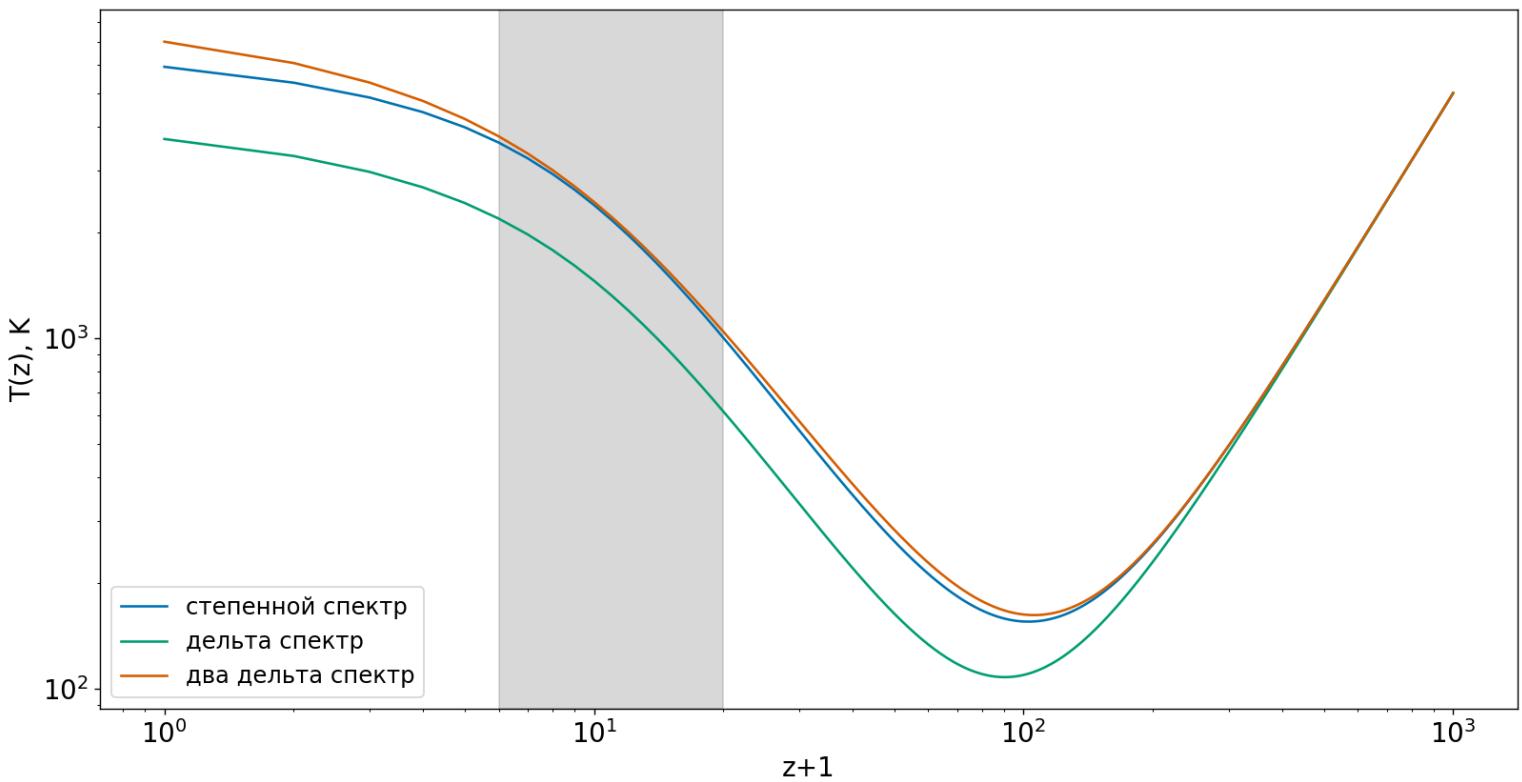


Рис.2. Температура барионной материи в зависимости от красного смещения, для трех спектров масс ПЧД: δ – спектр $M = 5 \cdot 10^{16}$ г; 2δ – спектр $M = 5 \cdot 10^{16}, M = 7 \cdot 10^{16}$ г; степенной спектр масс M^α , $\alpha = -1$, $10^{15} < M < 10^{17}$ г. Серой областью выделена эпоха реионизации

Заключение

В данной работе были получены результаты, проделанные в работе [1]. Были изучены каналы излучения ПЧД: $\pm e$, γ , $\gamma - ann$. Получены формулы для скорости поглощения энергии каждого из каналов излучения как функции от красного смещения. На Рис.1 представлены результаты расчетов для δ спектра масс ПЧД ($M = 5 \cdot 10^{16}$ г). Можно заметить, что основной вклад в энергию поглощения дает электрон-позитронный канал излучения.

Получена формула температуры барионной материи как функция времени. На Рис.2 представлены результаты расчетов для трех видов спектра масс ПЧД: δ – спектр $M = 5 \cdot 10^{16}$ г; 2δ – спектр $M = 5 \cdot 10^{16}$, $M = 7 \cdot 10^{16}$ г; степенной спектр масс M^α , $\alpha = -1$, $10^{15} < M < 10^{17}$ г.

Литература

- [1] K. M. Belotsky and A. A. Kirillov, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 01 (2015) 041, arXiv: 1409.8601 [astro-ph.CO].
- [2] K. M. Belotsky, A. A. Kirillov, N. O. Nazarova and S. G. Rubin, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 02 (2017) 063, arXiv: 1702.06338 [astro-ph.CO].
- [3] B. J. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda and J. Yokoyama, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 118 (2021) 103847, arXiv:2002.12778 [astro-ph.CO].
- [4] B. J. Carr and A. M. Green, *arXiv e-prints* (2024), arXiv:2406.05736 [astro-ph.CO].
- [5] R. Barkana and A. Loeb, “In the beginning: the first sources of light and the reionization of the universe,” *Phys. Rep.* 349 (July, 2001) 125–238, arXiv:astro-ph/0010468.
- [6] J. S. Bolton and M. G. Haehnelt, “The observed ionization rate of the intergalactic medium and the ionizing emissivity at $z \geq 5$: evidence for a photon-starved and extended epoch of reionization,” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 382 (Nov., 2007) 325–341, arXiv:astro-ph/0703306.