

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**

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

## 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  $z \approx 1100$  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 связанных 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 далеких 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 звездообразования. 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 материей 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 каждый 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  $\kappa_\gamma$  – 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



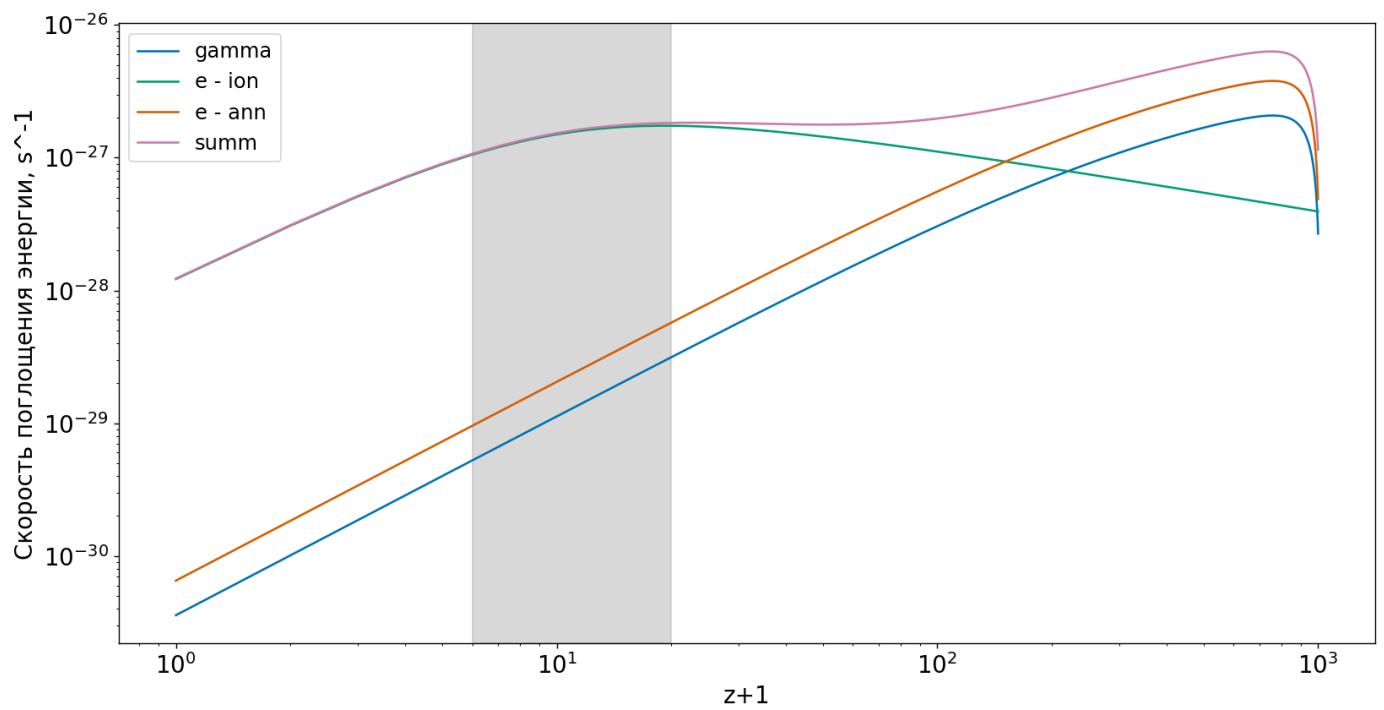


Рис.1. Скорость поглощения энергии для всех каналов излучения, и их сумма. Для масс ПЧД  $M = 5 \cdot 10^{16}$  г. Серой областью выделена эпоха реионизации.

## 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:  $\delta A = p dV = n_m T 3H V dt$ .

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

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  $\dot{\Omega}_{abs} = const$  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

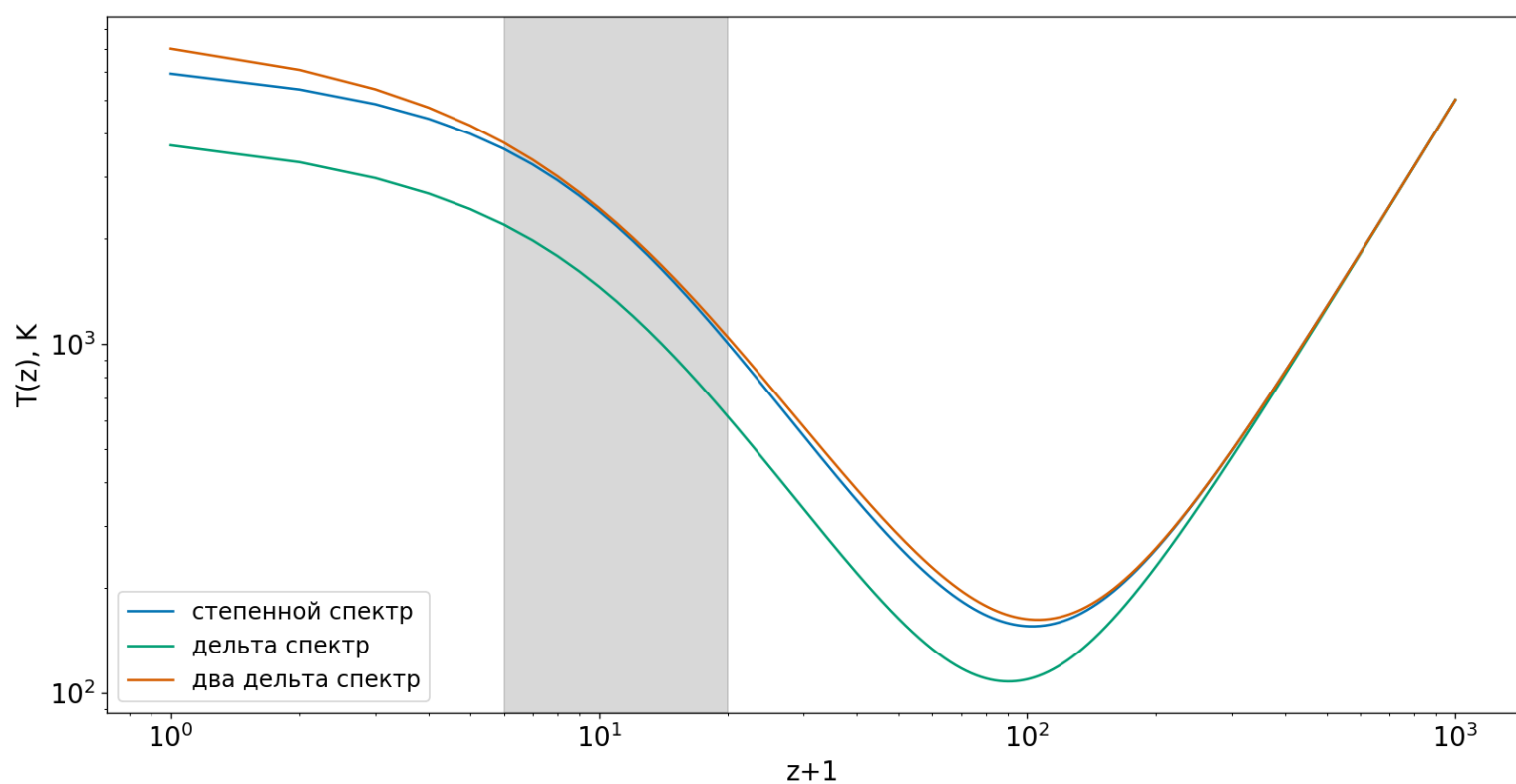


Рис.2. Температура барионной материи в зависимости от красного смещения, для трех спектров масс ПЧД:  $\delta$  – спектр  $M = 5 \cdot 10^{16} \text{ г}$ ;  $2\delta$  – спектр  $M = 5 \cdot 10^{16}, M = 7 \cdot 10^{16} \text{ г}$ ; степенной спектр масс  $M^\alpha$ ,  $\alpha = -1, 10^{15} < M < 10^{17}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

## Заключение

В данной работе были получены результаты, сделанные в работе [1]. Были изучены каналы излучения ПЧД:  $\pm e$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma - ann$ . Получены формулы для скорости поглощения энергии каждого из каналов излучения как функции от красного смещения. На Рис.1 представлены результаты расчетов для  $\delta$  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:  $\delta$  – спектр  $M = 5 \cdot 10^{16}$  г;  $2\delta$  – спектр  $M = 5 \cdot 10^{16}$ ,  $M = 7 \cdot 10^{16}$  г; степенной спектр масс  $M^\alpha$ ,  $\alpha = -1$ ,  $10^{15} < M < 10^{17}$  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.