



Реионизация Вселенной первичными черными дырами

14.04.02 – Ядерная физика и технологии

Студент:

Лагутин Дмитрий Владимирович

Научный руководитель:

к.ф-м.н., доцент НИЯУ МИФИ

Кириллов Александр Александрович



Реионизация Вселенной и проблема источников ионизации

Современные наблюдения спектров квазаров, анизотропии Реликтового излучения и изучение линии Лаймана показывают что реионизация происходила в промежутке красных смещений : $6 \leq z \leq 20$

На сегодняшний момент основными источниками реионизации считаются карликовые галактики, квазары и звезды популяции 3

Однако наблюдения показывают, что этих источников недостаточно для объяснения термического состояния газа

Необходимо рассмотрение дополнительных источников. Поэтому возникает вопрос могут ли первичные черные дыры внести дополнительный вклад ?

Цель работы

Целью данной научно-исследовательской работы является изучение вклада первичных чёрных дыр в процесс реионизации Вселенной.

В рамках работы рассматриваются различные модели массовых спектров ПЧД, механизмы поглощения энергии излучения Хокинга барионной материей и их вклад в эволюцию температуры барионного вещества как функции красного смещения.

Полученные результаты позволяют оценить, при каких параметрах спектра масс первичных чёрных дыр их влияние на реионизацию может быть существенным

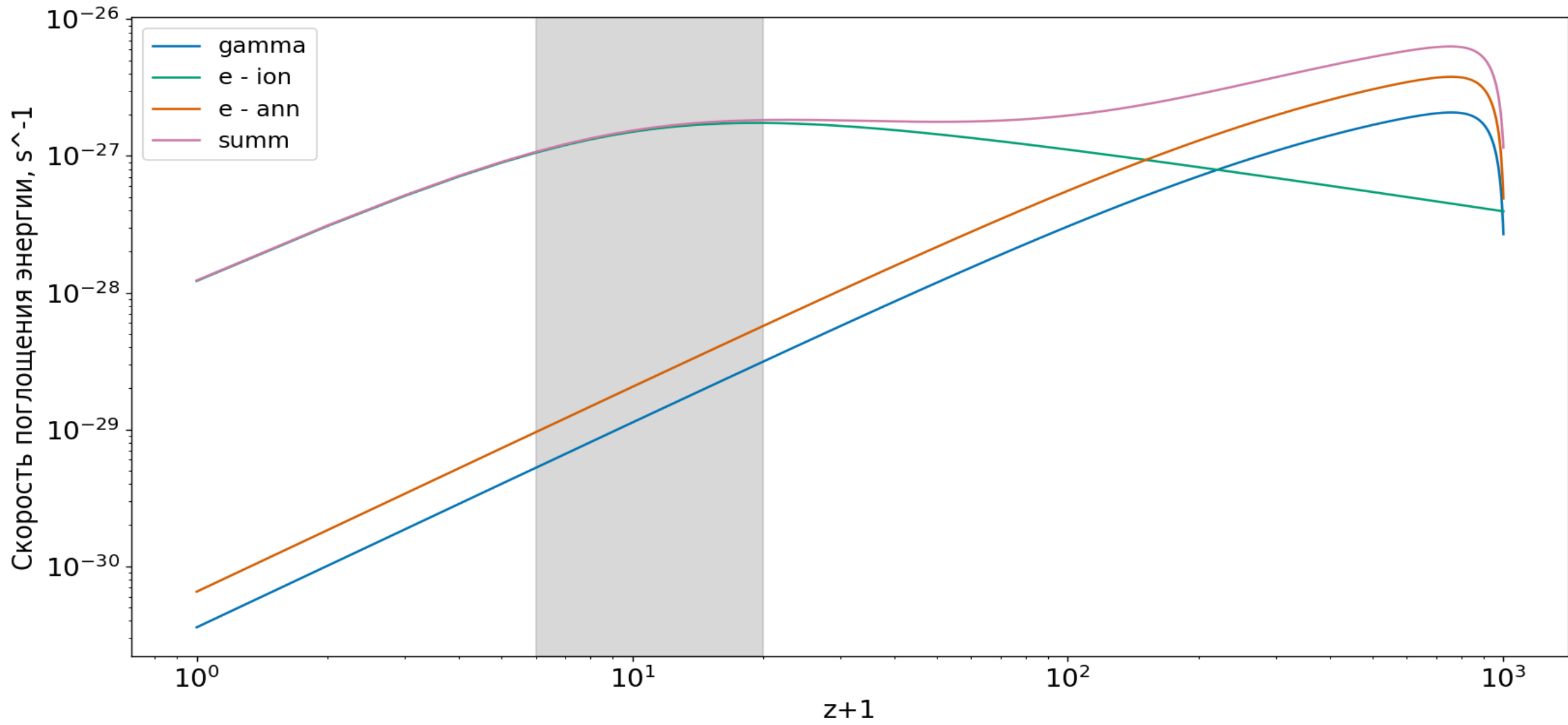
Излучение ПЧД



Каналы излучения ПЧД: $\pm e, \gamma$ – кванты, γ – кванты от аннигиляции электрон-позитронных пар

	Уравнение баланса энергии	Скорость поглощения энергии
$\pm e$	$\frac{d\delta\Omega_e(t)}{dt} = -\frac{r_{ion}\delta\Omega_e(t_0)}{E_0}\eta(\delta\Omega_e(t)) - \frac{\beta E_0}{\delta\Omega_e(t_0)}\delta\Omega_e^2(t) - H\delta\Omega_e(t)$	$\dot{\Omega}_{abs}^{(e-ion)}(z) = \kappa_e\dot{\Omega}_{ev}\frac{\omega_1}{E_0 + m_e}\frac{3\zeta(z)\tilde{z}^{\frac{3}{2}}}{2 + 3\zeta(z)}$
γ	$\frac{d\delta\Omega_\gamma(t)}{dt} = -\frac{\delta\Omega_\gamma(t)}{\tau_c} - H\delta\Omega_\gamma(t)$	$\dot{\Omega}_{abs}^{(\gamma)}(z) = \kappa_\gamma\dot{\Omega}_{ev}f_{abs}^{(\gamma)}(z)$
$\gamma - ann$		$\dot{\Omega}_{abs}^{(e-ann)}(z) = \kappa_e\dot{\Omega}_{ev}\frac{\omega_1}{E_0 + m_e}f_{abs}^{(\gamma)}(z)$

Первичные черные дыры и излучение



Температура барионного вещества как индикатор влияния ПЧД

Температура барионного вещества — это чувствительный параметр, который напрямую отражает дополнительный энерговклад.

Уравнение теплового баланса получено из первого закона термодинамики:

$$dQ = \delta A + dU \quad \delta A = p dV = n_m T 3 H V dt \quad dQ = \dot{\Omega}_{abs} \rho_c V dt - \langle \Delta E \sigma v \rangle_{m\gamma} n_\gamma n_e V dt$$

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

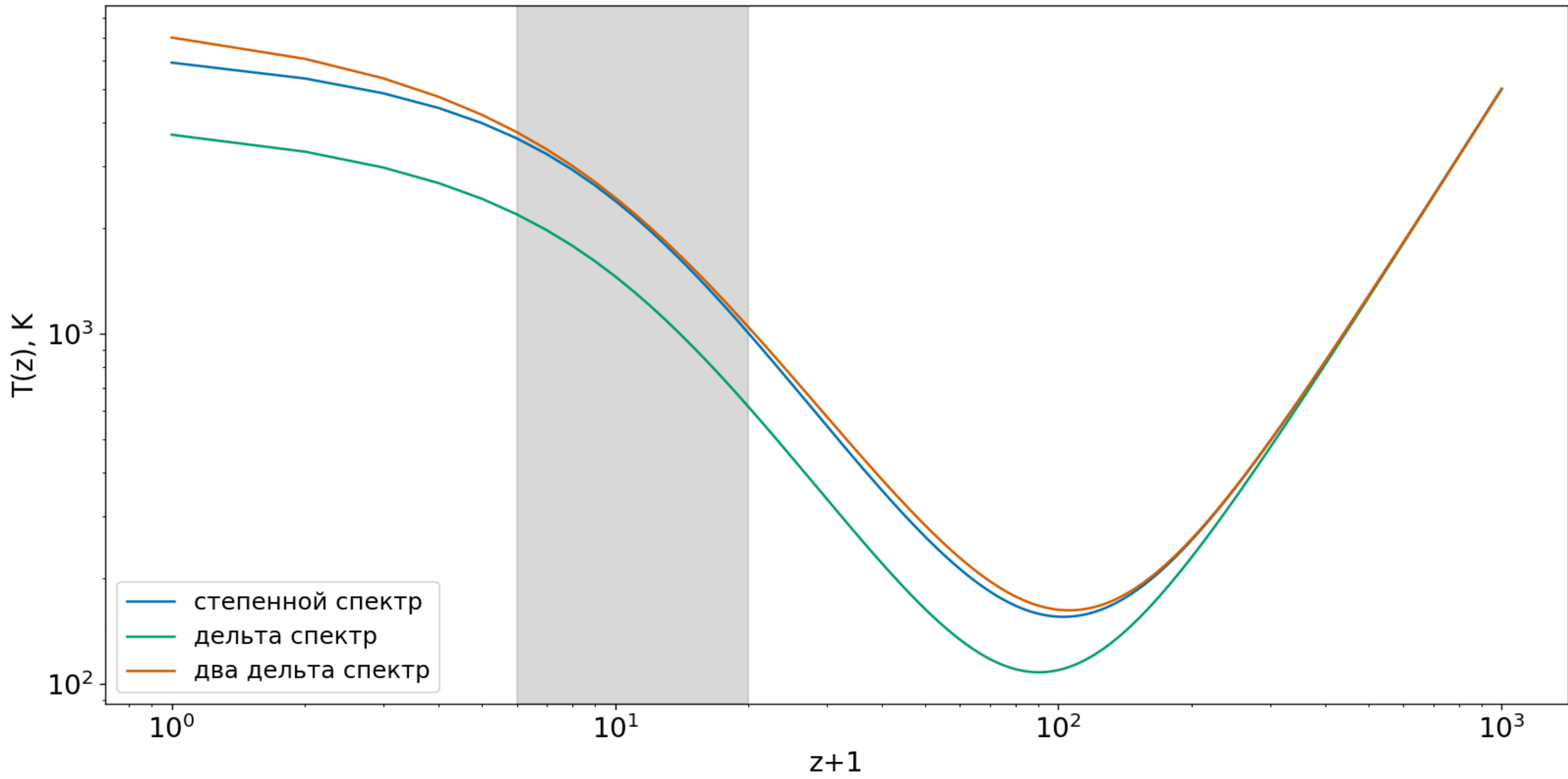
$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\dot{\Omega}_{abs} m_p}{3x_H \Omega_B (1+x_e)} - \frac{8\pi^2}{45} T_\gamma^4 \sigma_T \frac{x_e}{1+x_e} \frac{T - T_\gamma}{m_e} - 2HT$$

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

Рассматривались следующие спектры масс ПЧД:

δ – спектр $M = 5 \cdot 10^{16}$ г, 2δ – спектр $M = 5 \cdot 10^{16}$ г, $M = 7 \cdot 10^{16}$ г и степенной спектр M^α , $\alpha = -1$, $10^{15} < M < 10^{17}$ г

Результаты: температура $T(z)$



В данной работе 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. Можно заметить, что основной вклад в энергию поглощения дает электрон-позитронный канал излучения

Получена формула температуры барионной материи как функция времени 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.

- [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].