

Ограничения на спектры мощности скалярных возмущений и индуцированных гравитационных волн в моделях инфляции с первичными черными дырами



Национальный исследовательский
Томский государственный университет

Даниил Фроловский
daniylfrolovsky@yandex.kz

Предлагается простая аналитическая аппроксимация спектра мощности (PS) скалярных возмущений в моделях инфляции, включающих образование первичных черных дыр (ПВН), которая представляет собой сумму PS в приближении медленного скатывания (необходимого для описания реликтового излучения в соответствии с измерениями) и логнормальной аппроксимации для пика в PS (необходимого для образования ПВН). Для каждого положения пика в PS найдены ограничения на параметры аппроксимации, в том числе и на ширину пика.

Спектры первичных возмущений определяются возмущениями FLRW-метрики,

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) (\delta_{ij} + h_{ij}(r)) dx^i dx^j, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$h_{ij}(r) = 2\zeta(r)\delta_{ij} + \sum_{a=1,2} g^{(a)}(r)e_{ij}^{(a)}(r), \quad (2)$$

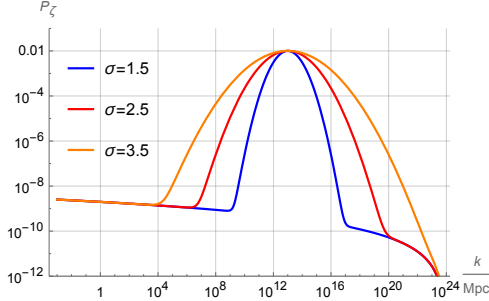
где $e_i^{i(a)} = 0$, $g_j^{(a)} e_i^{j(a)} = 0$, $e_{ij}^{(a)} e^{ij(a)} = 1$.

Первичный спектр $P_\zeta(k)$ скалярных возмущений определяется двухточечным коррелятором скалярных возмущений,

$$\langle \zeta^2(\mathbf{r}) \rangle = \int dk \frac{P_\zeta(k)}{k}, \quad d \log k = -dN. \quad (3)$$

Предлагается следующая аппроксимация:

$$P_\zeta(N) = P_0 (N - N_0)^2 + A \frac{\exp\left(-\frac{(N - N_P)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma}. \quad (4)$$



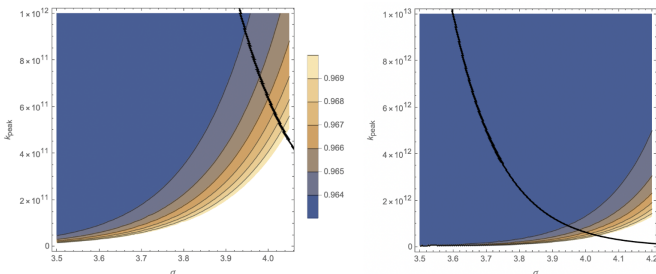
Согласно текущим измерениям CMB миссиями Planck/BICEP/Keck,

$$n_s = 0,9649 \pm 0,0042 \text{ (68\% C.L.)}, \quad r < 0,036 \text{ (95\% C.L.)}, \quad (5)$$

где n_s – наклон PS. В предлагаемой аппроксимации

$$n_s = 1 - \frac{d \ln P_\zeta(N)}{dN} = 1 - \frac{2(N - N_0) - \frac{A(N - N_P)e^{-\frac{(N - N_P)^2}{2\sigma^2}}}{P_0 \sqrt{2\pi}\sigma^3}}{\frac{Ae^{-\frac{(N - N_P)^2}{2\sigma^2}}}{P_0 \sqrt{2\pi}\sigma} + (N - N_0)^2}. \quad (6)$$

Плоскость $n_s(\sigma, k_{peak})$, построенная согласно (6), иллюстрирует ограничения на параметры. Для параметров из области над черной кривой правый конец пика выходит за конец инфляции.



Массы ПВН можно оценить из соотношения

$$\frac{M(k)}{M_\odot} \simeq 10^{-16} \left(\frac{k}{10^{14} \text{ Мпс}^{-1}} \right)^{-2}. \quad (7)$$

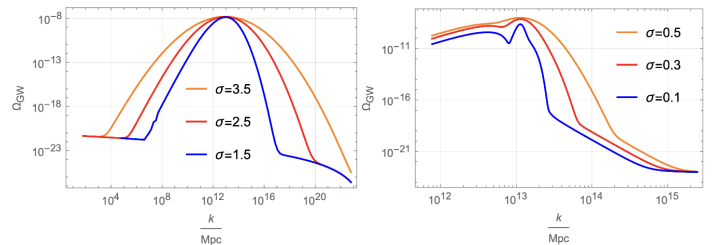
Ограничения сверху на возможные значения ширины пика σ при фиксированных k_{peak} и длительности инфляции N_e или n_s приведены в таблице:

$M_{ПВН}, g$	$k_{peak}, \text{Мпс}^{-1}$	σ
10^{21}	$1,41 \cdot 10^{12}$	$\leq 3,89$
10^{20}	$4,46 \cdot 10^{12}$	$\leq 3,73$
10^{19}	$1,41 \cdot 10^{13}$	$\leq 3,56$
10^{18}	$4,46 \cdot 10^{13}$	$\leq 3,40$
10^{17}	$1,41 \cdot 10^{14}$	$\leq 3,23$

Спектр индуцированных гравитационных волн (GW) получается с использованием стандартной формулы во втором порядке по возмущениям:

$$\Omega_{GW}(k) = \frac{\Omega_{r,0}}{32} \int_0^\infty dv \int_{|1-v|}^{1+v} du \frac{\mathcal{T}(u,v)}{u^2 v^2} P_\zeta(vk) P_\zeta(uk), \quad (8)$$

$$\mathcal{T}(u,v) = \frac{1}{4} \left[\frac{4v^2 - (1 + v^2 - u^2)^2}{4uv} \right]^2 \left(\frac{u^2 + v^2 - 3}{2uv} \right)^4 \times \left[\left(\ln \left| \frac{3 - (u+v)^2}{3 - (u-v)^2} \right| - \frac{4uv}{u^2 + v^2 - 3} \right)^2 + \pi^2 \Theta(u+v-\sqrt{3}) \right]. \quad (9)$$



При значениях $\sigma < 1$ GW-спектр не представим в виде суммы вкладов пика и плоской части. В этом случае становятся значительными перекрестные члены в уравнении (8), вследствие чего изменяется форма спектра.

Перечень публикаций:

- D. Frolovsky, S. V. Ketov // Astronomy (2023) Vol. 9(6), 294.
- D. Frolovsky, S. V. Ketov // Universe (2023) Vol. 2, 47-57.
- D. Frolovsky, S. V. Ketov, S. K. Saburov // Frontiers in Physics (2022) Vol. 10, 1005333.
- D. Frolovsky, S. V. Ketov, S. K. Saburov // Mod. Phys. Lett. A. (2022) Vol. 37(21), 2250135.