

S-dual 模型产生的原初黑洞和次级引力波*

强琪超 彭智谦 郜青†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2023 年 4 月 14 日收到; 2023 年 5 月 17 日收到修改稿)

在 S-dual 暴涨模型中通过非正则动能项引入峰值函数, 可产生丰度可观的原初黑洞和次级引力波. 该模型分别在 10^{12} , 10^8 和 10^5 Mpc^{-1} 对原初密度扰动的功率谱进行放大, 产生了质量量级分别为 10^{-13} 太阳质量、地球质量、行星质量的原初黑洞, 以及峰值频率分别为毫赫兹、微赫兹、纳赫兹的次级引力波. 其中在 10^{-13} 太阳质量附近的原初黑洞可以解释全部的暗物质, 产生的次级引力波能被未来的空间引力波探测器探测到.

关键词: 暴涨模型, 原初黑洞, 次级引力波**PACS:** 04.30.-w, 98.80.Cq, 98.80.-k**DOI:** 10.7498/aps.72.20230605

1 引言

2016 年 2 月 11 日, 美国激光干涉引力波天文台 (LIGO) 宣布在 2015 年 9 月 14 日人类首次直接探测到了引力波^[1]. 这是 21 世纪物理学最重大的发现, 它宣告了引力波天文学时代的到来, 同时也为在强场和非线性区域检验引力理论提供了全新的手段. 该发现获得了 2017 年诺贝尔物理学奖. 这些引力波事件发现的黑洞有可能是原初黑洞. 暴涨时期的密度扰动在进入辐射为主时期, 就塌缩形成了原初黑洞^[2]及次级引力波^[3]. 原初黑洞可以解释暗物质^[4]以及第九行星^[5]等问题. 次级引力波作为随机引力波背景可以被脉冲星计时阵列 (PTA)^[6]以及未来的空间引力波探测器 LISA^[7], 太极^[8]和天琴^[9]等探测到. 近期有很多研究工作讨论能产生原初黑洞的暴涨模型.

要产生足够丰度的原初黑洞暗物质, 在小尺度上的扰动需要在 10^{-2} 量级^[10], 而在大尺度上又需要满足微波背景辐射限制的 10^{-9} 量级^[11]. 一部分研究工作考虑用具有拐点或是非最小耦合的暴涨模型来讨论在小尺度上对功率谱的放大. 在引入非

动能项的暴涨中如 K/G 暴涨模型, 有一种利用峰值函数来研究在小尺度上放大功率谱的新机制. 这种新的机制同时适用于 Higgs 暴涨和 T 暴涨模型, 且峰值函数和暴涨模型的函数形式都不会受到太大的限制, 同时产生的引力波可以是宽谱或窄谱.

S-dual 起源于对电荷和磁荷的狄拉克量子化条件, 其意味着在量子电动力学中和电荷弱耦合的理论与和磁单极强耦合的理论等价. 这种体现强弱对偶的 S-dual 后来被推广到 IIB 型超弦理论中. 对于 S-dual^[12] 暴涨模型, 伸缩子标量场 ϕ 的势函数在 S-dual 变换下, $g \rightarrow 1/g$ 或 $\phi \rightarrow -\phi$ 是不变的, 其中 $g \sim e^{\phi/M}$, M 是具有普朗克质量量纲的数值. S-dual 暴涨模型在一定置信度范围符合普朗克卫星的观测结果. 本文主要研究在带峰值函数的非正则动能项这种新的机制下, S-dual 暴涨模型产生的原初黑洞和次级引力波.

2 放大功率谱

在 S-dual 暴涨模型中, 引入非正则动能项, 作用量为

* 国家自然科学基金 (批准号: 12175184) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gaoqing1024@swu.edu.cn

$$S = \int dx^4 \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} R + X + G(\phi)X - V(\phi) \right], \quad (1)$$

其中 $8\pi G = 1$, $X = -g_{\mu\nu} \nabla^\mu \phi \nabla^\nu \phi / 2$. S-dual 暴涨模型的势函数^[12]为

$$V(\phi) = V_0 \text{sech}(\phi/M), \quad (2)$$

其中 $G(\phi) = G_p(\phi) + f(\phi)$, 峰值函数 $G_p(\phi)$ 为

$$G_p(\phi) = \frac{h}{1 + (|\phi - \phi_p|/w)^q}, \quad (3)$$

以及

$$f(\phi) = f_0 \text{sech}(\phi/M)^6 \tanh(\phi/M)^2. \quad (4)$$

在暴涨之后的低能标阶段, 非正则动能项 $G(\phi)$ 可以忽略, 就回到广义相对论的情况. 背景演化方程为

$$3H^2 = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) + \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 G(\phi), \quad (5)$$

$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 [1 + G(\phi)], \quad (6)$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{V_\phi + \dot{\phi}^2 G_\phi / 2}{1 + G(\phi)} = 0, \quad (7)$$

其中 $G_\phi = dG(\phi)/d\phi$, $V_\phi = dV/d\phi$.

在慢滚近似中, 曲率扰动方程为

$$\frac{d^2 u_k}{d\eta^2} + \left(k^2 - \frac{1}{z} \frac{d^2 z}{d\eta^2} \right) u_k = 0. \quad (8)$$

功率谱 P_ζ 和曲率扰动 ζ_k 的关系为

$$P_\zeta = \frac{k^3}{2\pi^2} |\zeta_k|^2 = \frac{H^4}{4\pi^2 \dot{\phi}^2 [1 + G(\phi)]} \approx \frac{V^3}{12\pi^2 V_\phi^2} [1 + G(\phi)]. \quad (9)$$

从上述等式中发现, 引入的非正则动能项 $G(\phi)$ 可以增强功率谱. 在峰值 ϕ_p 附近, $G(\phi)$ 的主要贡献来自于 $G_p(\phi)$ 且 $G(\phi) \approx h$, 所以功率谱可以通过增大 h 实现. 如果要把功率谱从 10^{-9} 的量级增大到 10^{-2} 的量级, h 至少是 10^7 . 另一方面, 暴涨结束时宇宙膨胀的 e 指数的倍数 N 为

$$N = \int_{\phi_c}^{\phi_*} \frac{V}{V_\phi} d\phi + \frac{V(\phi_p)}{V_\phi(\phi_p)} \int_{\phi_p + \Delta\phi}^{\phi_p - \Delta\phi} G_p(\phi) d\phi, \quad (10)$$

所以 $G_p(\phi)$ 同时也增大了 N , 且峰值函数对 N 的贡献约为 20, 其中 ϕ_* 和 ϕ_c 分别代表视界和暴涨结束时的 ϕ 数值. 峰值函数 $G_p(\phi)$ 在小尺度上增大了功率谱, 同时让 ϕ_* 更加接近 ϕ_c , 由于暴涨理论要求 N 的数值一般在 50—60 之间, 则在极慢滚之后的慢滚暴涨的 N_{eff} 只能是 40 左右. 在远离峰值时, 峰值函数可以忽略不计, 其中非正则动能项 $f(\phi)$ 起主导作用, 利用如下的变化形式:

$$d\Phi = \sqrt{1 + f(\phi)} d\phi. \quad (11)$$

结合 $U(\Phi) = V[\phi(\Phi)] = U_0 \Phi^{1/3}$ 以及 $U_0 = (9A^{24}/f_0)^{1/6}$ 把非正则标量场 ϕ 变换为正则标量场 Φ . 对于幂次势函数, $U(\Phi) = U_0 \Phi^{1/3}$, $N_{\text{eff}} \sim 40$, 得到谱指数 $n_s = 0.971$, 张标比 $r = 0.033$ 满足 2018 年普朗克卫星的观测限制结果. 所以在这种机制下, S-dual 暴涨既满足了大尺度上普朗克的限制结果又在小尺度上放大了功率谱. 求解背景方程 (5)—方程 (7) 和扰动方程 (8) 得到功率谱的数值解, 取 $f_0 = 7.34 \times 10^{54}$, $M = 0.1$, h, w, ϕ_p, ϕ_* 的数值见表 1. 表 1 中“S”代表 $q = 1$ 的窄谱, “WS”代表 $q = 5/4$ 的宽谱. 下标“1”, “2”, “3”分别代表峰值处于不同的位置, “1”代表峰值位置在 10^{12} Mpc^{-1} ($\text{Mpc} = 3.26 \times 10^6$ 光年), “2”代表峰值位置在 10^8 Mpc^{-1} , “3”代表峰值位置在 10^5 Mpc^{-1} . N, n_s, r 和峰值对应的尺度 k 的数值见表 1, 对应的功率谱如图 1 所示, 功率谱的数值见表 2, 结果表明 $n_s \approx 0.968$, $r \approx 0.04$, 与普朗克卫星的观测结果^[1]符合

$$n_s = 0.9649 \pm 0.0042 \text{ (68\% 置信度)},$$

$$r_{0.05} < 0.06 \text{ (95\% 置信度)}. \quad (12)$$

q 因子控制谱的宽窄形状和峰值 ϕ_p 的位置. 取不同的 ϕ_p 和 q 得到了不同的窄谱和宽谱功率谱.

表 1 模型参数及数值计算结果

Table 1. Model parameters and the numerical calculation results.

模型	$h/10^{11}$	$w/10^{-11}$	ϕ_p	ϕ_*	N	n_s	r	$k_{\text{peak}}/(10^5 \text{ Mpc}^{-1})$
S1	5.90	1.0	2.118	2.325	51.85	0.961	0.045	2.65×10^7
S2	5.82	1.0	2.104	2.313	51.25	0.963	0.045	1.81×10^4
S3	5.83	1.0	2.095	2.308	51.16	0.968	0.043	3.55
WS1	183	1.0	2.122	2.24	66.59	0.965	0.040	3.57×10^7
WS2	140	1.0	2.104	2.24	60.13	0.965	0.040	9.99×10^3
WS3	123	1.0	2.095	2.24	58.89	0.965	0.040	1.88

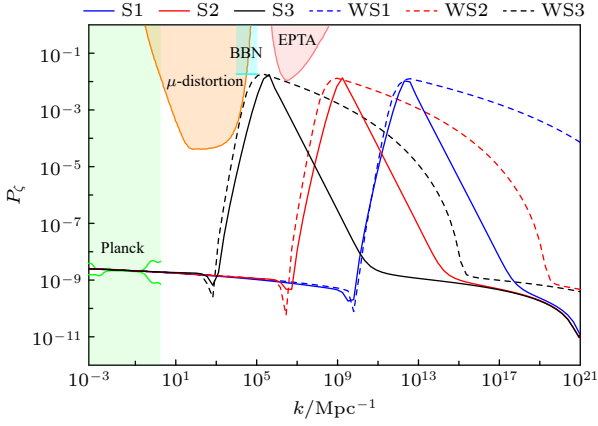


图 1 不同模型的功率谱. 实线代表 $q = 1$ 的模型, 虚线代表 $q = 5/4$ 的模型. 蓝色、红色和黑色分别代表峰值为 10^{12} , 10^8 和 10^5 Mpc^{-1} 的模型. 模型的参数和峰值见表 1, 峰值对应的功率谱数值见表 2. 浅绿色区域是被 CMB 观测结果排除的参数范围^[11], 粉色、天蓝色和橘色区域分别代表 EPTA^[6], BBN^[13], μ -distortion^[14] 排除的参数范围

Fig. 1. Power spectra of the different models. Implement the model representing $q = 1$, the dashed line represents the model of $q = 5/4$. Blue, red and black respectively represent the model with a peak value of 10^{12} , 10^8 and 10^5 Mpc^{-1} . Parameters and peak values of the model are in Table 1, and the power spectrum values corresponding to the peak value are in Table 2. The light green area is the parameter range excluded by the CMB observation results^[11], and the pink, sky blue and orange areas represent the parameter range excluded by EPTA^[6], BBN^[13] and μ -distortion^[14] respectively.

表 2 模型的峰值功率谱、原初黑洞质量、丰度和峰值频率的数值

Table 2. Peak power spectrum of the model, the mass, abundance and peak frequency of the primary black hole.

模型	$P_c(\text{peak})$	$M_{\text{peak}}/M_{\odot}$	$Y_{\text{PBH}}^{\text{peak}}$	f_c/Hz
S1	0.0128	5.23×10^{-13}	0.647	4.81×10^{-3}
S2	0.0137	1.13×10^{-6}	3.51×10^{-3}	3.02×10^{-6}
S3	0.0186	29.2	2.07×10^{-3}	6.22×10^{-10}
WS1	0.0127	2.88×10^{-13}	0.687	4.95×10^{-3}
WS2	0.0132	3.69×10^{-6}	6.15×10^{-4}	1.35×10^{-6}
WS3	0.0185	104.3	9.01×10^{-4}	2.96×10^{-10}

3 原初黑洞暗物质

在辐射为主时期, 在小尺度上由于引力塌缩形成的密度扰动, 重新进入视界之后就有可能形成原初黑洞. 忽略黑洞质量的增加以及减少, 原初黑洞在形成过程中的密度微元为

$$\beta(M) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sqrt{P_{\zeta}}}{\mu_c} \exp\left(-\frac{\mu_c^2}{2P_{\zeta}}\right). \quad (13)$$

现在原初黑洞暗物质的丰度为

$$Y_{\text{PBH}}(M) = \frac{\beta(M)}{3.94 \times 10^{-9}} \left(\frac{\gamma}{0.2}\right)^{1/2} \left(\frac{g_*}{10.75}\right)^{-1/4} \times \left(\frac{0.12}{\Omega_{\text{DM}} h^2}\right) \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{-1/2}, \quad (14)$$

其中 M_{\odot} 是太阳质量, $\gamma = 0.2$, 现在暗物质的能量密度 $\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.12$, 当 $T > 300 \text{ GeV}$ 时无量纲参数 $g_* = 107.5$; 当 $0.5 \text{ MeV} < 300 \text{ GeV}$ 时, $g_* = 10.75$, $\mu_c = 9\delta_c/4$ 且 $\delta_c = 0.4$. 峰值处对应的原初黑洞质量与峰值尺度因子 k_{peak} 之间的关系为

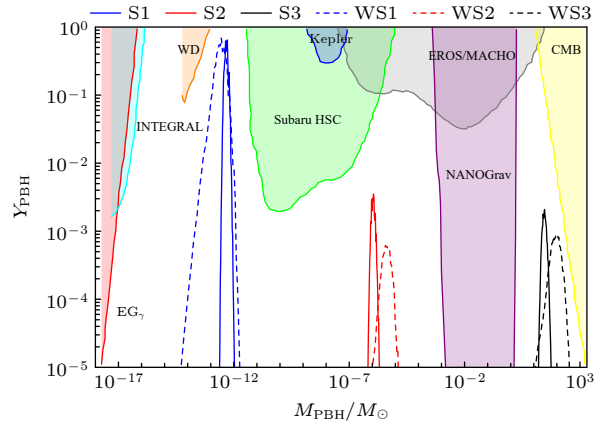


图 2 不同模型的原初黑洞丰度. 模型参数同表 1, 峰值对应的丰度和质量见表 2. 阴影区域表示不同观测结果的排除区域, 黄色区域是微波背景辐射的限制结果^[11] (CMB); 红色区域是利用银河系外 γ 射线观测原初黑洞蒸发的限制结果^[15] (EG_{γ}); 天蓝色区域是银河系中心 511 keV γ 射线的限制结果^[16] (INTEGRAL); 橘色区域是白矮星爆发的限制结果^[17] (WD); 绿色区域是源自 Subaru HSC 引力透镜事件的限制结果^[18] (Subaru HSC); 蓝色区域是开普勒卫星的限制结果^[19] (Kepler); 灰色区域是 EROS/MACHO 的限制结果^[20] (EROS/MACHO); 紫色区域是 2011 年 NANOGrav 数据的限制结果^[21] (NANOGrav)

Fig. 2. Primary black hole abundance of different models. Model parameters are the same as Table 1, and the abundance and quality corresponding to the peak are listed in Table 2. Shaded areas represent exclusion areas for different observations: the yellow area is the result of the restriction of microwave background radiation^[11] (CMB); the red area is the result of the restriction of the primary black hole evaporation observed by the extragalactic ray^[15] (EG_{γ}); the sky blue region is the result of 511 keV ray limitation at the center of the galaxy^[16] (INTEGRAL); the orange area is the result of the limit of the white dwarf star explosion^[17] (WD); the green area is the limiting result of the gravitational lens event from Subaru HSC^[18] (Subaru HSC); the blue area is the limited result of Kepler satellite^[19] (Kepler); the grey area is the result of the limitation of EROS/MACHO^[20] (EROS/MACHO); the purple area is the result of the limitation of NANOGrav 2011-year data^[21] (NANOGrav).

$$M(k) = 3.68 \left(\frac{\gamma}{0.2} \right) \left(\frac{g_*}{10.75} \right)^{-1/6} \left(\frac{k_{\text{peak}}}{10^6 \text{Mpc}^{-1}} \right)^{-2} M_{\odot}. \quad (15)$$

将计算功率谱得到的数值结果代入方程 (13) 到方程 (15) 中, 得到了原初黑洞的丰度以及峰值对应的质量, 结果在表 2 和图 2 中. 不同的参数模型对应不同的峰值位置, 不同的峰值位置分别产生了不同质量的原初黑洞暗物质, 且都满足目前的观测结果限制. 模型分别产生了质量为 $10^{-13} M_{\odot}$, $10^{-6} M_{\odot}$, $10 M_{\odot}$ 的原初黑洞暗物质. 行星质量 $10 M_{\odot}$ 左右的原初黑洞可以解释 LIGO/Virgo 观测到的引力波事件. 质量在 $10^{-13} M_{\odot}$ 附近的原初黑洞丰度接近 1, 可以用来解释全部的暗物质. 质量在 $10^{-6} M_{\odot}$ 附近的原初黑洞可以解释第九行星.

4 次级引力波

第一级和第二级的扰动混合在一起, 一级标量扰动会导致产生二级张量扰动. 在小尺度上的扰动达到 10^{-2} 量级, 在这么强的扰动下重新进入视界之后, 张量和标量的非线性耦合会产生次级引力波. 二级张量扰动 h_k 为

$$h_k'' + 2\mathcal{H}h_k' + k^2 h_k = 4S_k, \quad (16)$$

其中一级标量扰动 S_k 为

$$S_k = \int \frac{d^3 \tilde{k}}{(2\pi)^{3/2}} e_{ij}(k) \tilde{k}^i \tilde{k}^j \left[2\Phi_{\tilde{k}} \Phi_{k-\tilde{k}} + \frac{4}{3(1+w)} \mathcal{H}^2 \times (\Phi_{\tilde{k}}' + \mathcal{H}\Phi_{\tilde{k}}) (\Phi_{k-\tilde{k}}' + \mathcal{H}\Phi_{k-\tilde{k}}) \right], \quad (17)$$

式中, $\mathcal{H} = aH$, 辐射为主时期 $w = p/\rho = 1/3$, $e_{ij}(k)$ 是张量扰动, Φ 是规范不变的巴丁势函数. 辐射为主时期次级引力波的能量密度为

$$\begin{aligned} \Omega_{\text{GW}}(k, \eta) = & \frac{1}{6} \left(\frac{k}{aH} \right)^2 \int_0^{\infty} dv \int_{|1-v|}^{1+v} du \left\{ \left[\frac{4v^2 - (1-u^2+v^2)^2}{4uv} \right] \right. \\ & \times \overline{I_{\text{RD}}^2(u, v, x \rightarrow \infty)} P_{\zeta}(kv) P_{\zeta}(ku) \left. \right\}, \quad (18) \\ \overline{I_{\text{RD}}^2(u, v, x \rightarrow \infty)} = & \frac{1}{2x^2} \\ & \times \left\{ \left[\frac{3\pi(u^2+v^2-3)\Theta(u+v-\sqrt{3})}{4u^3v^3} + \frac{T_c(u, v, 1)}{9} \right]^2 \right. \\ & \left. + \left[\frac{\tilde{T}_s(u, v, 1)}{9} \right]^2 \right\}, \quad (19) \end{aligned}$$

式中, Θ 为 Heaviside 函数. $T_c(u, v, 1)$ 和 $\tilde{T}_s(u, v, 1)$ 在文献 [10] 中给出. 现在次级引力波的能量密度为

$$\Omega_{\text{GW}}(k, \eta_0) = \Omega_{\text{GW}}(k, \eta) \frac{\Omega_r(\eta_0)}{\Omega_r(\eta)}, \quad (20)$$

其中 Ω_r 是辐射的能量密度. 利用方程 (19), 将图 1 中的功率谱代入方程 (18) 和方程 (20) 中, 得到了现在次级引力波的能量密度, 结果如图 3 所示. 峰值对应的频率见表 2. 从表 2 结果可以得到, 峰值的频率分别为毫赫兹、微赫兹和纳赫兹. 模型“WS1”, “WS2”, “WS3”对应比较宽的峰值范围, 产生了宽谱的次级引力波. 能够产生行星质量黑洞的模型“WS3”已经被 EPTA 的观测结果排除. 产生地球质量左右黑洞的模型“WS2”可以解释第九行星, 产生的次级引力波可能被未来的空间探测器 LISA, 太极和天琴探测到. 产生 $10^{-13} M_{\odot}$ 质量黑洞的模型“S1”和“WS1”, 可以解释丰度接近 1 的暗物质, 同时产生的次级引力波峰值的能量密度为 10^{-8} 左右, 比原初引力波能量密度 10^{-16} 的量级要强很多, 也可能被未来的空间探测器 LISA、太极和天琴探测到.

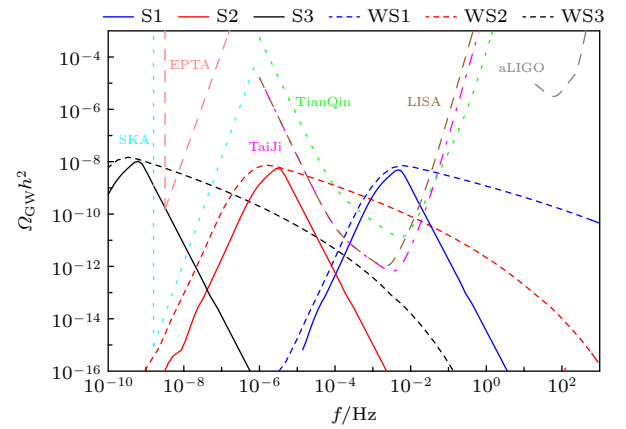


图 3 次级引力波的能量密度. 模型参数同表 1, 峰值对应的丰度和质量在表 2 列出. 橘色虚线表示 EPTA 的限制结果^[6]; 天蓝色虚线表示 SKA 的限制结果^[22]; 绿色虚线表示天琴的限制结果^[9]; 紫色虚线表示太极的限制结果^[8]; 棕色虚线表示 LISA 的限制结果^[7]; 灰色虚线表示 aLIGO 的限制结果^[23]

Fig. 3. Energy density of secondary gravitational waves, the model parameters are the same as Table 1, and the abundance and quality corresponding to the peak are listed in Table 2. The orange dotted line represents the limit result of EPTA^[6]; the sky blue dotted line represents the limit result of SKA^[22]; the green dotted line represents the limit result of Tianqin^[9]; the purple dotted line represents the limit result of Taiji^[8]; the brown dotted line represents the limit result of LISA^[7]; the gray dotted line represents the limit result of aLIGO^[23].

5 结 论

在 S-dual 模型中, 通过引入非正则动能项的机制, 实现在小尺度上对功率谱的放大, 同时产生丰度可观的原初黑洞以及可以被未来空间探测器探测到的次级引力波. 在这种机制下, 功率谱在大尺度上满足观测限制, 且在小尺度上被放大到 10^{-2} 量级. 取不同 q 数值时, 在不同峰值位置产生的引力波可以是宽谱或窄谱. 不同的 ϕ_p , 分别对应着不同尺度位置 10^{12} , 10^8 和 10^5 Mpc^{-1} 对功率谱的放大. 产生了质量量级分别为 10^{-13} 太阳质量、地球质量、行星质量的原初黑洞, 以及峰值频率分别为毫赫兹、微赫兹、纳赫兹的次级引力波. 行星质量的原初黑洞可以解释被 LIGO/Virgo 探测到的黑洞, 地球质量的原初黑洞可以解释第九行星, 10^{-13} 太阳质量的原初黑洞可以解释全部的暗物质. 纳赫兹的次级引力波可以被 PTA 探测到, 毫赫兹的次级引力波可被未来的空间探测器探测到. 通过本文的研究, 验证了引入非正则动能项的机制适用于 S-dual 模型.

参考文献

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102
- [2] Hawking S 1971 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **152** 75
- [3] Gao Q, Gong Y G, Long J 2021 *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* **60** 86 (in Chinese) [郜青, 龚云贵, 龙江 2021 中山大学学报 (自然科学版) **60** 86]
- [4] Carr B, Kuhnel F 2020 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **70** 355
- [5] Scholtz J, Unwin J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 051103
- [6] Inomata K, Nakama T 2019 *Phys. Rev. D* **99** 043511
- [7] Danzmann K 1997 *Class. Quantum Grav.* **14** 1399
- [8] Hu W R, Wu Y L 2017 *Natl. Sci. Rev.* **4** 685
- [9] Luo J, Ai L H, Ai Y L, et al. 2021 *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* **60** 1 (in Chinese) [罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽等 2021 中山大学学报 (自然科学版) **60** 1]
- [10] Lu Y Z, Gong Y G, Yi Z, et al. 2019 *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **12** 1
- [11] Akrami Y, Arroja F, Ashdown M, et al. 2020 *Astron. Astrophys.* **641** A10
- [12] Anchordoqui L A, Barger V, Goldberg H, et al. 2014 *Phys. Lett. B* **734** 134
- [13] Inomata K, Kawasaki M, Tada Y 2016 *Phys. Rev. D* **94** 043527
- [14] Fixsen D J, Cheng E S, Gales J M, et al. 1996 *Astrophys. J.* **473** 576
- [15] Carr B J, Kohri K, Sendouda Y, et al. 2010 *Phys. Rev. D* **81** 104019
- [16] Dasgupta B, Laha R, Ray A 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 101101
- [17] Graham P W, Rajendran S, Varela J 2015 *Phys. Rev. D* **92** 063007
- [18] Niikura H, Takada M, Yasuda N, et al. 2019 *Nature Astron.* **3** 524
- [19] Griest K, Cieplak M, Lehner M J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 181302
- [20] Tisserand P, Guillou L L, Afonso C, et al. 2007 *Astron. Astrophys.* **469** 387
- [21] Chen Z C, Chen Y, Huang Q G 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 251101
- [22] Moore C, Cole R, Berry C 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 015014
- [23] Aasi J, Abbott B P 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 074001

Primordial black holes and secondary gravitational waves produced by S-dual inflation model*

Qiang Qi-Chao Peng Zhi-Qian Gao Qing[†]

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 14 April 2023; revised manuscript received 17 May 2023)

Abstract

It is discussed in this work to produce primordial black hole (PBH) dark matter (DM) and scalar induced secondary gravitational waves by using the enhancement mechanism with a peak function in the non-canonical kinetic term in S-dual inflation. It is shown explicitly that the power spectrum for the primordial curvature perturbation can be enhanced at 10^{12} , 10^8 and 10^5 Mpc^{-1} , respectively, that the primordial black hole dark matter with peak mass around 10^{-13} solar mass, the Earth's mass and the stellar mass are generated, respectively, and that the scalar induced gravitational wave with peak frequency around mHz, μHz and nHz are created, respectively. The primordial black hole with the mass scale 10^{-13} solar mass can make up almost all the dark matter and the associated scalar induced secondary gravitational waves is testable by spaced based gravitational wave observatory.

The amplitude of primordial curvature perturbations on a small scale can become large by the enhancement mechanism with a peak function in the non-canonical kinetic term. We apply the enhancement mechanism to S-dual inflation to produce abundant PBHs and observable scalar induced gravitational waves (SIGWs). The power spectrum on a large scale is consistent with observational constraint, and the power spectrum on a small scale is enhanced to the 0.01. It is possible that either sharp peak or broad peak possesses a different peak shape for the peak function by choosing a different value of q . By adjusting the peak position ϕ_p in the peak function, the power spectrum is enhanced on a different scale, henceforth associated with the generation of SIGWs with a different peak frequency, PBHs with different mass are produced. We choose three different values of ϕ_p to obtain enhance power spectrum at 10^{12} , 10^8 and 10^5 Mpc^{-1} , respectively. The enhanced curvature perturbation produces PBH DM with peak mass around 10^{-13} solar mass, the Earth's mass and the stellar mass, and SIGW with peak frequency around mHz, μHz and nHz, respectively. The stellar mass PBHs may explain black holes observed by LIGO/Virgo collaboration, and the earth-mass PBHs may explain the planet 9. The PBH with the mass scale 10^{-13} solar mass can make up almost all the dark matter. The SIGW with the peak frequency around nHz is testable by pulsar timing array observations, and SIGW with the peak frequency around mHz is testable by space based GW observatory. The results show that the enhancement mechanism with a peak function in the non-canonical kinetic term works for S-dual inflation.

Keywords: inflation models, primordial black holes, secondary gravitational waves

PACS: 04.30.-w, 98.80.Cq, 98.80.-k

DOI: [10.7498/aps.72.20230605](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230605)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12175184).

† Corresponding author. E-mail: gaoqing1024@swu.edu.cn



S-dual模型产生的原初黑洞和次级引力波

强琪超 彭智谦 郜青

Primordial black holes and secondary gravitational waves produced by S-dual inflation model

Qiang Qi-Chao Peng Zhi-Qian Gao Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 160401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230605

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230605>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

环面黑洞的热力学函数

Thermodynamic functions of toroidal black holes

物理学报. 2022, 71(11): 110401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212370>

引力彩虹时空中Kerr黑洞的熵谱和面积谱

Entropy spectrum and area spectrum of Kerr black hole in gravity's rianbow

物理学报. 2018, 67(6): 060401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172374>

面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统

Laser intensity noise evaluation system for space-based gravitational wave detection

物理学报. 2022, 71(20): 209501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220841>

临界中性Gauss-Bonnet-anti-de Sitter黑洞复杂度演化

Evolution of complexity for critical neutral Gauss-Bonnet-anti-de Sitter black holes

物理学报. 2021, 70(3): 030401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201286>

面向第三代地基引力波探测的激光源需求分析

Laser parameters requirement for third-generation ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2022, 71(16): 164203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220552>

膝区宇宙线广延大气簇射次级成分的特征

Properties of secondary components in extensive air shower of cosmic rays in knee energy region

物理学报. 2022, 71(24): 249601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221556>