インフレーション起源の スカラー型摂動から生じる重力波

黒柳 幸子(名古屋大学)

2018/11/2 第17回DECIGOワークショップ

インフレーション起源の重力波 インフレーション:宇宙の加速膨張期 138億年 38万年 CMB(宇宙背景放射) 現在 光子は飛び回る電子に 冒磁 0 0 よって散乱される

再加熱:インフレーション後の粒子生成

log(time)



<u>再加熱</u>

- スカラー場がポテンシャルの底で振動 しながら輻射に崩壊
- → 宇宙の膨張は物質優勢期と 同じように振る舞う $H \propto a^{-3/2}$



宇宙の膨張の歴史



スケールファクター(宇宙の膨張度合い) log(a) →

重力波の生成メカニズム

インフレーションにより引き伸ばされた時空の量子ゆらぎが古典化 → 重力波に



 $log(a) \rightarrow$

重力波の生成メカニズム



インフレーション起源の重力波のスペクトル



インフレーションモデルを変えると

再加熱の時期を変えると

TRH < 107GeV だとDECIGOで</th> インフレーション起源の重力波を検出できなくなる?

インフレーションが予言するもの

計量摂動 $ds^2 = a^2(\eta)[-(1 + 2\Phi)d^2\eta + [(1 - 2\Psi)\delta_{ij} + h_{ij}]dx^i dx^j]$ *インフレーションを*引き起こす スカラー型摂動 Φ, Ψ \rightarrow 重力ポテンシャル = 密度ゆらぎ CMB, 銀河サーベイで検証

インフレーションが予言するもの

計量摂動

 $ds^{2} = a^{2}(\eta) \left[-(1 + \underline{2\Phi})d^{2}\eta + \left[(1 - \underline{2\Psi})\delta_{ij} + h_{ij} \right] dx^{i} dx^{j} \right]$

スカラー型摂動 Φ, Ψ → 重力ポテンシャル = 密度ゆらぎ 観測と非常に良い一致 CMB. 銀河サーベイで検証

インフレーションが予言するもの

計量摂動

 $ds^{2} = a^{2}(\eta) \left[-(1 + \underline{2\Phi})d^{2}\eta + \left[(1 - \underline{2\Psi})\delta_{ij} + h_{ij} \right] dx^{i} dx^{j} \right]$

重力波の運動方程式

フェ石

11

$$h_{ij}'' + 2\mathcal{H}h_{ij}' - \nabla^2 h_{ij} = -4\hat{\mathcal{T}}_{ij}^{lm}\mathcal{S}_{lm}$$

$$S_{ij} \equiv 2\Phi\partial^{i}\partial_{j}\Phi - 2\Psi\partial^{i}\partial_{j}\Phi + 4\Psi\partial^{i}\partial_{j}\Psi + \partial^{i}\Phi\partial_{j}\Phi - \partial^{i}\Phi\partial_{j}\Psi - \partial^{i}\Psi\partial_{j}\Phi + 3\partial^{i}\Psi\partial_{j}\Psi - \frac{4}{3(1+w)\mathcal{H}^{2}}\partial_{i}(\Psi' + \mathcal{H}\Phi)\partial_{j}(\Psi' + \mathcal{H}\Phi) - \frac{2c_{s}^{2}}{3w\mathcal{H}^{2}}[3\mathcal{H}(\mathcal{H}\Phi - \Psi') + \nabla^{2}\Psi]\partial_{i}\partial_{j}(\Phi - \Psi)$$

Ŷ T_{ij}lm: TT ゲージへの射影

検出の可能性

検出の可能性

Assadullahi and Wands, PRD 79, 083511 (2009)

物質優勢期ならば大きな高周波数帯で大きな重力波が期待できる

重力波の運動方程式

フェ石

11

$$h_{ij}'' + 2\mathcal{H}h_{ij}' - \nabla^2 h_{ij} = -4\hat{\mathcal{T}}_{ij}^{lm}\mathcal{S}_{lm}$$

$$S_{ij} \equiv 2\Phi\partial^{i}\partial_{j}\Phi - 2\Psi\partial^{i}\partial_{j}\Phi + 4\Psi\partial^{i}\partial_{j}\Psi + \partial^{i}\Phi\partial_{j}\Phi - \partial^{i}\Phi\partial_{j}\Psi - \partial^{i}\Psi\partial_{j}\Phi + 3\partial^{i}\Psi\partial_{j}\Psi - \frac{4}{3(1+w)\mathcal{H}^{2}}\partial_{i}(\Psi' + \mathcal{H}\Phi)\partial_{j}(\Psi' + \mathcal{H}\Phi) - \frac{2c_{s}^{2}}{3w\mathcal{H}^{2}}[3\mathcal{H}(\mathcal{H}\Phi - \Psi') + \nabla^{2}\Psi]\partial_{i}\partial_{j}(\Phi - \Psi)$$

Ŷ T_{ij}lm: TT ゲージへの射影

重力波の運動方程式

$$h_{ij}'' + 2\mathcal{H}h_{ij}' - \nabla^2 h_{ij} = -4\hat{\mathcal{T}}_{ij}^{lm}\mathcal{S}_{lm}$$

ソース項 非等方圧を無視すると $\Pi(0-0) \rightarrow \Phi = \Psi$

$$\Phi O 運動方程式$$

$$\Phi'' + 3(1 + c_s^2) \mathcal{H} \Phi' - c_s^2 \Delta \Phi + (2\mathcal{H}' + (1 + 3c_s^2)\mathcal{H}^2) = 0$$

$$(aH)^2 \qquad (C_s k)^2 \qquad C_s: 音速$$

$$\bigoplus \left\{ \begin{array}{c} \Phi = \text{ constant for } C_s k << aH \\ \Phi \propto a^{-2} \text{ for } C_s k >> aH \end{array} \right.$$

重力波の運動方程式

$$h_{ij}'' + 2\mathcal{H}h_{ij}' - \nabla^2 h_{ij} = -4\hat{\mathcal{T}}_{ij}^{lm} \mathcal{S}_{lm}$$

ソース項 非等方圧を無視すると $\Pi^{(1)}=0 \rightarrow \Phi=\Psi$

の運動方程式

 $\Phi'' + 3(1 + c_s^2)\mathcal{H}\Phi' - c_s^2\Delta\Phi + (2\mathcal{H}' + (1 + 3c_s^2)\mathcal{H}^2) = 0$

(aH)² (c_sk)² c_s: 音速

$$\Phi \propto a^{-2}$$
 for **C**_sk>>aH

物質優勢期なら長い間ソース項が減らない

輻射優勢期: C_s=1/3 物質優勢期: C_s~0

<u> Φとhの時間進化の様子</u>

<u> Φとhの時間進化の様子</u>

重力波のスペクトル

 $T_R=10^{10}GeV$

Saito & Yokoyama, PRL 102, 161101 (2009)

Saito & Yokoyama, PRL 102, 161101 (2009)

応用編:原始ブラックホール生成時に生じる重力波

Saito & Yokoyama, PRL 102, 161101 (2009)

Alabidi et al., JCAP 09 017 (2012)

応用編:原始ブラックホール生成時に生じる重力波

応用編:瞬間的な再加熱の際に生じる重力波

瞬間再加熱 (Preheating)

スカラー場がポテンシャルの底で振動 しながら輻射に崩壊

→ スカラー場 φ が崩壊先の場 χ
 と共鳴振動を起こすと
 粒子生成が一気に進む。

応用編:瞬間的な再加熱の際に生じる重力波

Garcia-Bellido & Figueroa, PRL 98, 061302 (2007)

まとめ

インフレーションの予言

時空の量子ゆらぎ起源の重力波

+ スカラー型ゆらぎ → 2次のスカラー摂動起源の重力波

インフレーション後の物質優勢期が長ければ2次摂動起源の
 重力波強度は大きくなる

→ 通常考えられている時空の量子ゆらぎ起源の重力波と相補的

スカラー型摂動が初期から大きいようなインフレーションが
 あれば原始ブラックホール生成と共に重力波も生成される

再加熱のモデルは様々で、大きな重力波を生成するモデルも多い。DECIGOを通して再加熱モデルを検証できる。