

学校代码: 10200

学号:



东北师范大学

本科毕业论文

论文中文标题

English title

学生姓名: 张三

指导教师: 李四

所在学院: 某某学院

所学专业: 某某某

东北师范大学

2017年 5 月

独 创 性 声 明

本人郑重声明: 所提交的毕业论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果. 据我所知, 除了特别加以标注和致谢的地方外, 论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果. 对本人的研究作出重要贡献的个人和集体, 均已在文中做了明确的说明. 本声明的法律结果由本人承担.

毕业论文作者签名:_____

日期:_____

摘 要

原初引力波的产生是所有暴涨模型的一个基本预言. 原初引力波信号包含着极早期宇宙丰富的信息, 它向我们打开了一扇了解宇宙起源和演化的窗口. 我们从标准宇宙学 (大爆炸宇宙学) 模型出发, 简略叙述了宇宙学的背景知识. 介绍了引力波和暴涨宇宙学的基本理论; 由此讨论了原初引力波的产生机制, 最后回顾了引力波探测的发展, 讨论了原初引力波的探测方式.

关键词: 引力波 原初引力波 暴涨模型 宇宙微波背景辐射

Abstract

The production of primordial gravitational waves(PGWs) is a basic prediction of all the inflation models. PGWs, which opens a window to understand the origins and evolution of the universe, encode unique information about the physics of the very early universe. We first introduce the background information of the standard cosmology model, gravitational waves, and then basic knowledge of cosmic inflation. From this, we discuss the production mechanism of primordial gravitational waves. Finally, we review the development of PGWs' detection.

keywords: Gravitational Waves Primordial Gravitational Waves Cosmic Inflation CM-B

目录

摘要	III
Abstract	V
目录	VI
引言	1
1 哇哈哈	3
1.1 符号约定	3
1.2 黑呦嘿	3
1.2.1 运动方程啊	3
1.2.2 标准宇宙学解	4
1.2.3 宇宙的历史	4
2 等等等等	7
3 原初引力波的探测	9
4 总结	11
参考文献	13
致谢	15

引言

2015 年 9 月 14 日,LIGO(Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory) 的引力波探测器探测到了由两个巨大黑洞合并产生的引力波信号 (Gravitational Waves, 以下简称 GWs)Abbott, et al. [2], 这是人类有史以来第一次直接探测到 GWs, 直接地验证了广义相对论的预言¹在三个月之后, LIGO 又一次探测到了 GWs[3]. 这两次成功的探测到引力波极大地激发了人们对引力波天文学的信心. 此后, 天文学家和宇宙学家认为探测到原初引力波将成为可能.

[illegible]

¹1974 年发现的 Hulse-Taaylor 双星系统是验证广义相对论的第一个间接证据.[5]

1 哇哈哈

啦啦啦阿拉拉阿拉拉啦啦阿拉拉啦啦啦啦啦啦啦啦啦啦啦啦啦啦

1.1 符号约定

- Einstein 求和约定:

$$a_i b^i \equiv \sum_{i=1}^3 a_i b^i = a_1 b^1 + a_2 b^2 + a_3 b^3 \quad (1.1)$$

$$V_\mu W^\mu \equiv \sum_{\mu=0}^3 V_\mu W^\mu = V_\mu W^\mu + V_\mu W^\mu + V_\mu W^\mu + V_\mu W^\mu \quad (1.2)$$

如(1.1)(1.2)式所示, 在一个求和式当中, 若同一个字母作为指标 (上标和下标) 重复出现两次, 则可以将求和号省略, 省略求和号后, 该式仍然表示求和. 英文字母作为求和指标表示从 1 到 3 求和, 希腊字母作为求和指标表示从 0 到 3 求和.

- 在本文中, 令光速 $c = 1$; Planck 常数 $\hbar = 1$.
- 用 Planck 质量 m_{Pl} 表示引力常数: $G \equiv (8\pi m_{Pl})^{-2}$.
- $\partial_\mu = (\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$, $\partial^\mu = \eta^{\mu\nu} \partial_\nu = (-\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$
- Mpc 表示秒差距, 是天文学上的长度单位.

1.2 黑哟嘿

1.2.1 运动方程啊

宇宙学原理¹是标准宇宙学模型的前提, 所以描述时空集合的度规 (FLRW 度规) 为:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right] \quad (1.3)$$

其中 t 是时间变量, $r - \theta - \phi$ 是球极坐标. k ² 代表空间曲率, 若 $k \leq 0$, 则 $0 < r < +\infty$, 若 $k > 0$, 则 $0 < r < 1/\sqrt{k}$. 通常调节坐标, 使得 $k = -1, 0$ 或 $+1$. $a(t)$ 是宇宙标度因子, 它的形式取决于宇宙内物质的属性.

在一套坐标下 (r, θ, ϕ) , 若粒子 (若将宇宙当做一个系统, 则可将一个星系当做一个粒子) 的本动速度为 0, 则该粒子的坐标 (r, θ, ϕ) 将不随时间变化, 这样的坐标系称为共动坐标系.[6] 物理距离 (实际距离) 与共动距离的变换方式:

$$\text{物理距离} = a(t) \times \text{共动距离} \quad (1.4)$$

¹宇宙学原理: 宇宙是均匀和各向同性的. 详见 [4]

² $k < 0$ 表示开宇宙, $k = 0$ 表示平坦宇宙, $k > 0$ 表示闭宇宙.

宇宙的膨胀由宇宙内物质的属性所决定. 将宇宙看作理想流体, $\rho(t)$ 表示密度, $p(t)$ 表示压强. $\rho(t)$ 和 $p(t)$ 满足状态方程 $p = \omega\rho$, 其中 ω 是一个无量纲数. 对于辐射为主的宇宙, 状态方程为:

$$p = \frac{\rho}{3} \quad (1.5)$$

对于非相对论物质为主的宇宙:

$$p = 0 \quad (1.6)$$

描述膨胀宇宙的方程:

$$\text{Friedmann 方程:} \quad H^2 = \frac{1}{3m_{Pl}^2}\rho - \frac{k}{a^2} \quad (1.7)$$

$$\text{流体方程:} \quad \dot{\rho} = -3H(\rho + p) \quad (1.8)$$

其中 $\dot{\rho}$ 表示 ρ 的时间导数, $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$ 是哈勃参数. 在流体方程中, $3H\rho$ 表示体积膨胀导致的密度减少, $3Hp$ 表示膨胀时压强做功导致的能量减少.(1.7)和(1.8)两个方程可以合并成一个方程:

$$\text{加速方程:} \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6m_{Pl}^2}(\rho + 3p) \quad (1.9)$$

1.2.2 标准宇宙学解

当 $k = 0$ 时, 结合状态方程, Friedmann 方程和流体方程可以被求解:

$$\text{物质为主 } p = 0: \quad \rho \propto a^{-3} \quad a(t) \propto t^{2/3} \quad (1.10)$$

$$\text{辐射为主 } p = \rho/3: \quad \rho \propto a^{-4} \quad a(t) \propto t^{1/2} \quad (1.11)$$

可以看出在这两种情况下, 密度都随着 t^{-2} 而下降. 当 $k = 0$ 时, 我们可以令 a 在现在的值为 1, 使得物理尺度和共动尺度一致. 通过设置在 t_0 时刻的压强 p_0 , 可以确定比例常数.(在本文中, 从此之后带有下标 0 的物理量表示物理量现在的值)

当考虑宇宙学常数 Λ 时 (这时候宇宙的状态方程为 $p = -\rho$), 流体方程给出 $\dot{\rho} = 0$, 则 $\rho = \rho_0$, 所以 Friedmann 方程的解为:

$$a(t) \propto \exp Ht \quad (1.12)$$

1.2.3 宇宙的历史

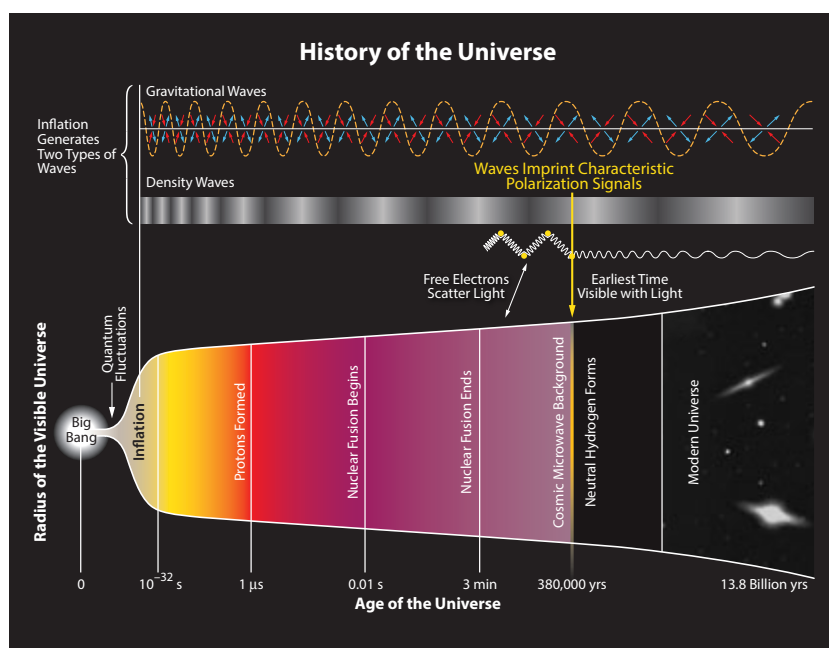


图 1.1: 宇宙的历史: 从大爆炸到现在 [引自 bicepkeck.org/media/History-of-the-Universe-BICEP2.pdf]

2 等等等等

3 原初引力波的探测

探测原初引力波, 原则上来说有两种方式, 直接探测 (利用引力波激光干涉仪) 和间接探测 (CMB 极化). 因为当前的引力波激光干涉仪探测装置的灵敏度还不足以探测到原初引力波, 而且正在建的地下探测装置 (投入运行之后有望达到原初引力波的灵敏度) 需要至少二三十年才能投入运行, 所以在未来十年内 CMB 极化实验时最有希望探测到原初引力波. 下面我们介绍 CMB 极化的相关原理和可测量的物理量以及当前的探测现状.[1]

4 总结

观测宇宙学在过去十几年的时间里取得了巨大的进展, 将宇宙学推入到精确宇宙学的黄金时代. 人们在引力波的探测上也取得了很大的进步, 不久前 LIGO 两次探测到来自黑洞合并的引力波信号, 这让人们认识到探测到原初引力波即将成为可能. 在这篇论文中, 我们介绍了理解原初引力波所需要的背景知识 (标准宇宙学理论的基本方程, 暴涨宇宙学的理论和原初引力波的产生机制等等); 回顾了引力波探测的发展历程, 介绍了当前原初引力波探测的现状.

暴涨理论成功的解决了标准宇宙模型的问题. 指数式的膨胀使得宇宙变得平坦. 度规的张量扰动导致了原初引力波的出现. 功率谱是一个可测量的参数, 包含着暴涨理论和量子涨落的信息. 功率谱给出了在穿越视界时刻的作为频率的函数的信号的功率. 在亚视界尺度下, 功率谱是振动的模式; 在超视界尺度下, 功率谱的尺度几乎是不变的. 标量功率谱与温度涨落有关, 并且依赖于标量场的势能 V 和慢滚参数 ϵ . 张量功率谱只依赖于标量场的势能, 所以对于张量功率谱的测量可以确定暴涨的能量尺度, 继而可以确定暴涨的势能和慢滚参数.

鉴于 PGWs 包含着早期宇宙十分重要的信息, 天文学家已经在计划探测 (直接和间接) 它们. 直到现在, 探测 PGWs 最有希望的方式是在 CMB 极化的各向异性行为上寻找 B 模式. 在更远的未来, 在 CMB 和宇宙大尺度结构上 PGW 的能量分布印记也能提供 PGW 的重要特征. 现在的数据只给出了张标比 r 的上限, 除了单场慢滚模型以外, 这也给其他的 PGWs 产生机制提供了可能性. 虽然现在尚未探测到 PGWs 的信号, 但是随着探测装置的升级和探测灵敏度的提高, 我们有理由相信不久之后将会探测到 PGWs.

这几个月经过对原初引力波相关的专著和文献的深入阅读和研究, 对原初引力波这一领域有了一定程度的理解. 同时由于作者之前并未学习过广义相对论和宇宙学等预备知识, 受能力所限, 本篇综述对原初引力波的讨论并不很深入, 覆盖的范围也并不太全面, 但是也能提供一个较为完整的图景. 恳求读者见谅.

参考文献

- [1] 龚云贵. 宇宙学基本原理 [M]. 湖南: 科学出版社, 2016.
- [2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical review letters. 2016, 116(6):061102.
- [3] Abbott B, Abbott R, Abbott T, et al. Gw151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence[J]. Physical Review Letters. 2016, 116(24):241103.
- [4] Cheng T P. Relativity, gravitation and cosmology: a basic introduction[M]. [S.l.]: Oxford University Press, 2010.
- [5] Hulse R, Taylor J. Discovery of a pulsar in a binary system[J]. Neutron stars, black holes, and binary X-ray sources. 1975, 48:433.
- [6] Mukhanov V. Physical foundations of cosmology[M]. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.

致谢

在本篇论文的完成过程中, 某某老师对我提出了很多建设性的指导建议, 细心地和某某老师, 吉大物理学院的某某老师以及中科院理论物理研究所的某某学长也给了我很大的帮助. 在此我由衷向某某老师, 某某老师, 某某老师和某某学长表示感谢.