

《粒子宇宙学理论选题》教学大纲

鲜于中之
清华大学物理系

课程名：粒子宇宙学理论选题

英文课程名：Theoretical topics in particle cosmology

总学时：32

教材：自备讲义

参考书：

[1] Scott Dodelson, Fabian Schmidt: *Modern Cosmology*, Second Edition, Academic Press, 2021

[2] Daniel Baumann, Liam McAllister: *Inflation and String Theory*, Cambridge University Press, 2015

授课对象：研究生和高年级本科生

预备知识：建议同学已修或自学过《广义相对论》和《量子场论》，具有相关基础知识。

课程说明：作为理论课程，以黑板板书讲授为主，课堂讨论为辅。中文讲授，英文版书。

考核方式：作业与大作业

课程目的：利用宇宙学和天文学观测研究粒子物理和宇宙演化中的基本问题，是基础物理学重要的新兴交叉方向。本课程以粒子宇宙学的若干前沿理论专题为线索，为同学们介绍相关方向的基本知识，重要的理论基础和方法，以及当前和今后的重要问题。希望同学通过本课程的学习，掌握粒子宇宙学的基本常识，深化对基本理论的理解，提高理论推导的动手能力，熟悉理论研究的基本方法，为进入研究工作做好准备。

中文简介：2022 春季学期的课程聚焦于暴涨宇宙学与粒子物理的交叉方向。具体内容包括基本粒子物理与宇宙学初步、慢滚暴涨的动力学、扰动论和观测量、原初引力波与原初黑洞、暴涨宇宙的粒子理论模型、 dS 时空的基本性质与量子场论、Schwinger-Keldysh 路径积分、宇宙关联函数、非高斯性、宇宙学对撞机物理。

英文简介：The course for the 2022 spring semester will focus on the interplay between the inflationary cosmology and particle physics. The topics include basics of fundamental particle physics and cosmology, dynamics of slow-roll inflation, perturbation theory and observables, primordial gravitational wave and primordial black hole, particle models of cosmic inflation, quantum field theory in dS spacetime, Schwinger-Keldysh path integral, cosmic correlators, non-Gaussianity, cosmological collider physics.

Detailed Plan

(30 CH in total, 1 CH = 1 class hour = 45 min)

Chapter 1. Basics of Particle Physics and Cosmology (4CH)

1.1 Introduction to the course and basics of fundamental particle physics (2CH)

The standard model of particle physics New physics beyond the standard model

1.2 Basics of cosmology (2CH)

Basic observational facts in cosmology Brief review of general relativity A homogeneous and isotropic spacetime: Friedmann-Robertson-Walker metric Friedmann equation Background dynamics of an expanding universe Puzzles of thermal big-bang cosmology Primordial universe: inflation and alternatives

Chapter 2. Inflationary Cosmology (8CH)

2.1 Dynamics of slow-roll inflation (1CH)

Inflaton Slow-roll condition Reheating and preheating e-folding number of inflation

2.2 Perturbation theory and observables of cosmic inflation (3CH)

ADM decomposition SO(3) decomposition of metric perturbations Gauge symmetry and gauge conditions Scalar perturbation and its quantization Adiabatic mode and isocurvature mode* From primordial fluctuations to observables: Weinberg theorem*

2.3 Primordial gravitational wave and primordial black hole (2CH)

Quantization of tensor mode Lyth bound Introduction to gravitational wave cosmology* Formation and basic properties of primordial black holes*

2.4 Models of cosmic inflation (2CH)

Power-law chaotic inflation Starobinsky model and modified gravity Higgs inflation and particle physics Axion inflation and string cosmology Beyond single-field slow roll Warm inflation*

Chapter 3. Quantum Field Theory in de Sitter (dS) Spacetime (8CH)

3.1 Basic properties of dS (2CH)

dS and its inflation patch Isometries of dS Imbedding distance and geodesic distance Causal structure and Penrose diagram Geodesic incompleteness and symmetry breaking of inflation patch

3.2 Quantum states and fields in dS (4CH)

Quantization of a massive scalar and its asymptotic behavior Inflation-driven particle production One-particle states: unitary irreducible representations of SO(4,1) dS/CFT? Bunch-Davies vacuum and α vacua Temperature of Bunch-Davies vacuum

3.3 Schwinger-Keldysh path integral (2CH)

- Review of path integral
- Expectation values as a path integral with closed path
- Vacuum and its prescription
- Feynman rules
- Derivative coupling*
- Wavefunction formalism*

Chapter 4. Cosmic Correlators (10CH)

4.1 Non-Gaussianity (3CH)

- Bispectrum of single-field slow-roll inflation
- Local non-Gaussianity
- Soft limits, consistency relation, OPE
- Effective field theory of inflation*
- Equilateral non-Gaussianity
- Theoretical estimates and observational status

4.2 Cosmological collider physics (3CH)

- A discovery channel of new physics: soft limits of cosmic correlators
- Example: tree level exchange of a massive scalar
- Signal and background
- Signal strength
- Signal from loop diagrams
- Spin and angular dependence
- Examples of new physics signals*

4.3 More advanced topics* (4CH)

- Distortion of particle spectrum in inflation
- Infrared issues of dS QFT
- Nonperturbative aspects of light fields in the IR
- Dynamical renormalization group
- Superhorizontal effective field theory and stochastic inflation
- Computing cosmic correlators

*Conditional

课程计划

(共 30 学时, 1 学时 = 45 分钟)

第一章 粒子物理与宇宙学基础 (4 学时)

1.1 课程引论与基本粒子物理初步 (2 学时)

□ 粒子物理标准模型 □ 超越标准模型的新物理

1.2 宇宙学初步 (2 学时)

□ 宇宙学的基本观测事实 □ 广义相对论回顾 □ 均匀和各向同性时空: Friedmann-Robertson-Walker 度规 □ Friedmann 方程 □ 宇宙膨胀的背景动力学 □ 热大爆炸宇宙学的疑难问题 □ 原初宇宙: 暴胀与其他

第二章 暴涨宇宙学 (8 学时)

2.1 慢滚暴涨的动力学 (1 学时)

□ 暴涨子 □ 慢滚条件 □ 重加热和预加热 □ 暴涨的 e 重数

2.2 暴涨宇宙的扰动论和观测量 (3 学时)

□ 时空的 ADM 分解 □ 度规扰动按 $SO(3)$ 分解 □ 规范对称性和规范条件 □ 标量扰动及其量子化 □ 绝热模式和等曲率模式* □ 从原初扰动到宇宙学观测量: Weinberg 定理*

2.3 原初引力波与原初黑洞 (2 学时)

□ 张量模式的量子化 □ Lyth 界限 □ 引力波宇宙学简介* □ 原初黑洞的形成与基本性质*

2.4 暴涨宇宙的粒子理论模型 (2 学时)

□ 幂律混沌暴涨 □ Starobinsky 模型与修改引力 □ Higgs 暴涨与粒子物理 □ 轴子暴涨与弦宇宙学 □ 单场慢滚之外 □ 暖暴涨*

第三章 de Sitter (dS) 时空的量子场论 (8 学时)

3.1 dS 时空的基本性质 (2 学时)

□ dS 时空的几何结构及其暴涨区域 □ dS 时空的对称性 □ 嵌入距离和测地距离 □ 因果性结构与 Penrose 图 □ 暴涨宇宙的测地不完备性与 dS 对称性破缺

3.2 dS 时空中的量子态和场 (4 学时)

□ 标量场的量子化和渐近行为 □ 暴涨驱动的粒子产生 □ 单粒子态: $SO(4,1)$ 的不可约酉表示 □ dS/CFT? □ 真空态: Bunch-Davies 真空和 α 真空 □ Bunch-Davies 真空的温度

3.3 Schwinger-Keldysh 路径积分 (2 学时)

- 路径积分回顾 □ 期望值作为闭合路径的路径积分 □ 真空态与 $i\epsilon$ 规定 □ Feynman 规则
- 导数耦合* □ 波函数方法*

第四章 宇宙关联函数 (10 学时)

4.1 非高斯性 (3 学时)

- 单场慢滚暴涨的双谱 □ 局域非高斯性 □ 软极限、自洽关系、OPE □ 暴涨的有效场论*
- 等边非高斯性 □ 非高斯性的理论估计和实验观测

4.2 宇宙学对撞机物理 (3 学时)

- 新物理的发现通道：宇宙关联函数的软极限 □ 算例：重标量粒子的树图信号 □ 信号和背景
- 信号的强度 □ 圈图中的信号 □ 自旋和角度依赖 □ 新物理信号举例*

4.3 若干前沿问题* (4 学时)

- 粒子谱在暴涨宇宙中的畸变 □ dS 场论的红外问题 □ 轻场的红外非微扰性质 □ 动力学重整化群 □ 超视界的有效场论与随机暴涨 □ 宇宙关联函数的计算

*酌情选讲