

《物理宇宙学》课程教学大纲

Physical Cosmology

课程编号: 70430213

课程名称: 物理宇宙学

英文名称: Physical Cosmology

课程类型: 研究生专业基础课

总学时: 48

学 分: 3

时间地点 (2024 秋): 周三第二大节 9:50-12:15, 新水利馆 301

适用对象: 天体物理专业及数理方向研究生或高年级本科生

先修课程: 基础物理四大力学。建议在观测天文学、热力学与统计物理、量子力学和广义相对论方面有一定知识基础 (已修或自学)。

负责教师/大纲制定人: 许丹丹

一、课程性质:

在清华大学天文学博士培养方案里, 本课程是一门天文基础类课程, 是天文和天体物理各个专业方向课程和前沿课程的基础课。

二、课程目标:

通过本课程的学习, 使学生:

- (1) 了解标准宇宙学模型的内涵、大爆炸理论的产生背景及经典观测证据;
- (2) 了解早期宇宙的热物理过程及观测特征, 其中包括:
 - 宇宙暴涨理论的发展历史、物理过程及经典观测证据;
 - 从中微子退耦到大爆炸原初核合成的物理过程;
 - 氢原子复合到宇宙微波背景辐射产生的物理过程;
 - 宇宙微波背景辐射揭示的重要物理图像。
- (3) 了解宇宙学框架下的各种距离与时间的定义;
- (4) 掌握描述宇宙时空几何与动力学演化的 **FRW** 度规和 **Friedmann** 方程; 会求解宇宙不同组分主导时期的动力学过程; 计算给定红移的宇宙距离和时间;
- (5) 了解宇宙结构的形成和线性演化;
- (6) 了解主流的宇宙学的探针 (观测方法论的基础和核心部分)。

三、课程内容:

本课程涵盖了现代宇宙学的基本内容, 包括宇宙学基础, 宇宙膨胀过程中的主要热历史和相变、宏观动力学演化、微观密度扰动到宏观结构的产生和演化, 及其在宇宙微波背景辐射和大尺度星系巡天上的观测特征。

1. 宇宙学理论的两条主线分别是：（1）在广义相对论框架下宇宙宏观平滑组分的热力学和动力学演化，以及（2）由微观量子涨落到宏观密度扰动最终带来的结构形成和其线性增长。
 - 在主线（1）的指引下，课程会涉及到：
 - a) 宇宙的早期热历史（包括大爆炸原初核合成、微波背景辐射的产生）；
 - b) 宇宙平滑组分的平均宏观动力学演化历史（暴涨、辐射、暗物质、暗能量主导的各个时期）。
 - 在主线（2）的指引下，课程会涉及到：
 - a) 暴涨阶段真空量子涨落，出视界变成宏观结构扰动；
 - b) 超视界结构线性演化：绝热 Adiabatic 扰动；
 - c) 亚视界结构线性演化：在辐射和物质主导阶段分别再入视界的差别。
2. 宇宙学观测的内容（观测关键方法论和前沿观测结果）：
 - 微波背景辐射及 SZ 效应
 - 大尺度星系巡天及重子声学振荡测量
 - 强、弱引力透镜观测
 - 莱曼 Ly alpha 的大尺度观测
 - 中性氢 21cm 辐射的观测
 - 引力波宇宙学

四、教学学时分配：

见后面教学日历。

五、课程评价/考核方式：

- 平时作业：5 次，共占 30%。
- 课堂分组报告（12.25）：占 10%。
- 期中考试：1 次，占 30%，闭卷**笔试**考试。
- 期末考试：1 次，占 30%，闭卷**口试**考试。

六、推荐参考书：

1. Kurki-Suonio Cosmology（电子教材）
2. Steven Weinberg, Cosmology, Oxford University Press, 2008
3. Scott Dodelson, Modern Cosmology, Academic Press, 2003

《物理宇宙学》教学日历（一共十五周）

第一周（9.11）：标准宇宙学模型简介

- 古代宇宙观
- 当今标准宇宙学模型的图像、发展历史及观测证据
- 宇宙大爆炸经典证据：星系退行，大爆炸核合成，宇宙微波背景辐射
- 宇宙暴涨理论经典证据：平坦，均匀各向同性（视界），磁单极子

第二周（9.18）：广义相对论回顾

- 广相理论概述和数学基础要求
- 张量的协变和逆变变换规律、度规张量
- 协变微商和仿射联络
- 平行移动和测地线方程

第三周（9.25）：整体演化主线之动力学演化-I:

- 复习 recap
- 曲率：Riemann 张量，Ricci 张量，曲率标量
- 能量-动量张量
- 爱因斯坦场方程

第四周（10.9）：整体演化主线之动力学演化-II:

- 宇宙学原理和 FRW 度规
- Friedmann 方程
- 斥力的引入和加速膨胀的宇宙
- 暗能量：宇宙学常数

第五周（10.16）：整体演化主线之动力学演化-III:

- 宇宙中的三种主要物质能量组分和演化阶段
- 距离：共动距离，角直径距离，光度距离，宇宙尺度
- 时间：回溯时间，共形时间，宇宙年龄
- 粒子视界、事件视界、宇宙视界
- 宇宙学红移 vs 多普勒红移的探讨

第六周（10.23）：整体演化主线之动力学演化-IV:

- 暴涨理论初探：起源，解决大爆炸宇宙学三个疑难
- 暴涨场和慢滚暴涨模型概论
- 暴涨宇宙时间简史

第七周（10.30 - 调课 10.26）：整体演化主线之早期热历史 - I:

- 宇宙热力学基础
- 早期相变、正反粒子湮灭、夸克时代和 QCD 相变
- 轻子时代：中微子退耦、中微子背景诞生及正反电子湮灭

第八周（11.6）：整体演化主线之早热历史 - II：

- 大爆炸核合成研究的历史发展
- 核子时代：大爆炸核合成，原初 He 丰度
- 辐射-物质密度相等时期

第九周（11.13）：整体演化主线之早期热历史 - III：期中考试（随堂）

- 宇宙微波背景辐射 CMB 发现历史及观测
- 氢原子复合、最后散射面
- 光子退耦、微波背景光子产生

第十周（11.20）：整体演化主线之早期热历史 - IV：

- CMB 各向异性、多级展开及角功率谱
- 小尺度功率谱：声学振荡及多普勒效应
- 大尺度功率谱：SW 效应

第十一周（11.27）：邀请报告 - 现代宇宙学观测及统计方法

第十二周（12.4）：扰动演化主线之微观扰动

- 高斯过程、量子涨落、QFT 的真空期望
- 由 Inflation 量子涨落到早期宇宙经典密度扰动

第十三周（12.11）：扰动演化主线之超视界宏观扰动：

- 物质密度线性微扰理论简介
- 超视界密度线性微扰（相对论性）
- 原初密度涨落、原初宇宙功率谱

第十四周（12.18）：扰动演化主线之亚视界宏观扰动：

- 亚视界的标量密度场的线性微扰
- 辐射场密度场的线性微扰
- 冷暗物质密度场的线性微扰
- 重子物质密度场的线性微扰

第十五周（12.25）：宇宙学探针（反转课堂）

- 微波背景辐射 CMB 和 SZ 效应
- 星系巡天及重子声学振荡
- 强和弱引力透镜
- Ly α 森林，Ly α 发射体
- 中性氢 21 厘米谱线
- 引力波宇宙学