



浙江工业大学
ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

本科生毕业论文答辩

重子声波振荡 的理论研究

2020级理学院，光电信息科学与工程02班

汇报学生：贺迎秋
指导老师：杨新娟

2024年05月26日

— 目 录 —

01

宇宙演化 & 重子声波振荡

研究背景、研究目的

02

线性微扰理论 & 线性物质功率谱

线性演化研究方法、研究结果

03

暗晕模型 & 非线性物质功率谱

非线性演化研究方法、研究结果

04

总结 & 展望

结论总结、进一步发展方向

宇宙演化从能量涨落开始

ρ_m : 物质密度

$\bar{\rho}_m$: 平均物质密度

δ_m : 物质涨落系数

$$\rho_m = \bar{\rho}_m(1 + \delta_m)$$

线性结构演化 → 非线性结构演化

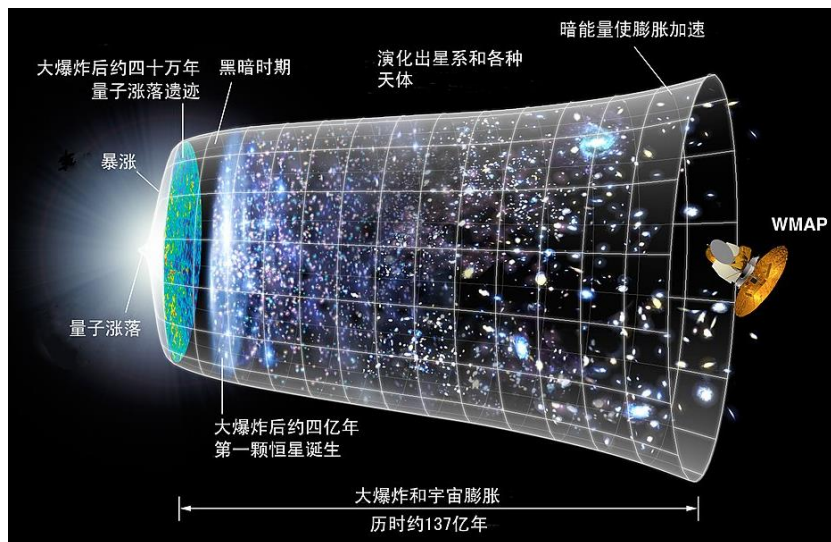


图1

$z \rightarrow \infty$

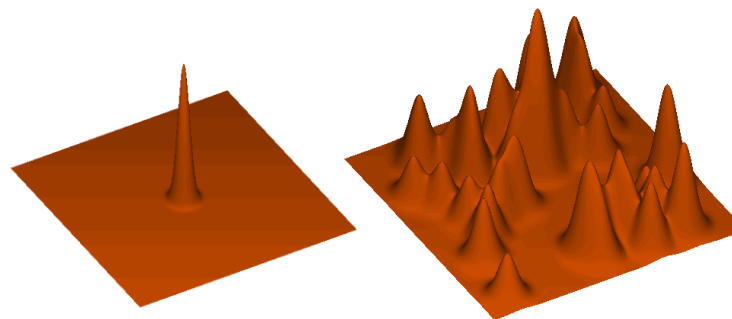


图2

$z \approx 1100$

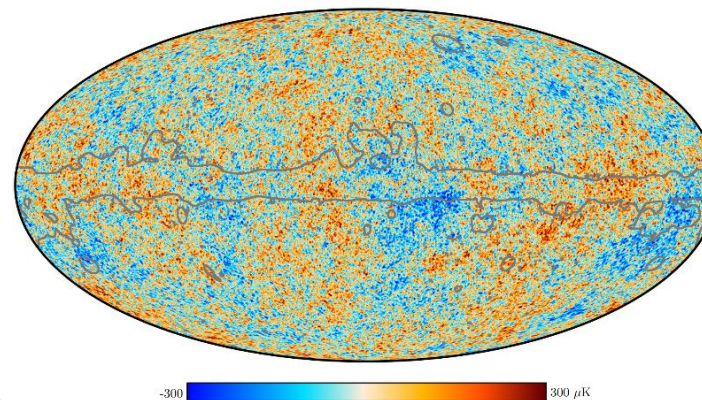


图3

$z = 0$

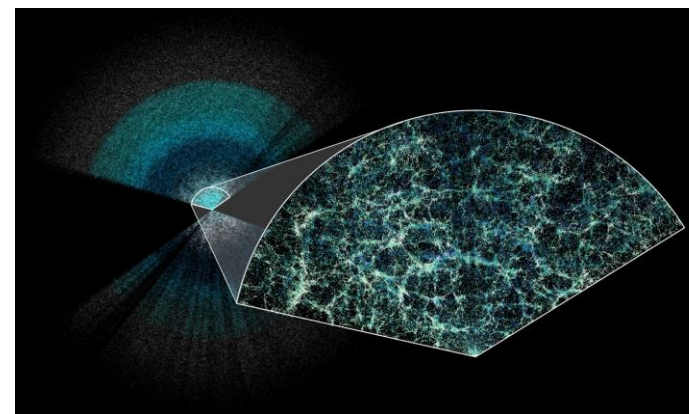


图4

物质扰动



能量涨落



温度波动

在空间内传播

宇宙大尺度结构

图1: <https://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>

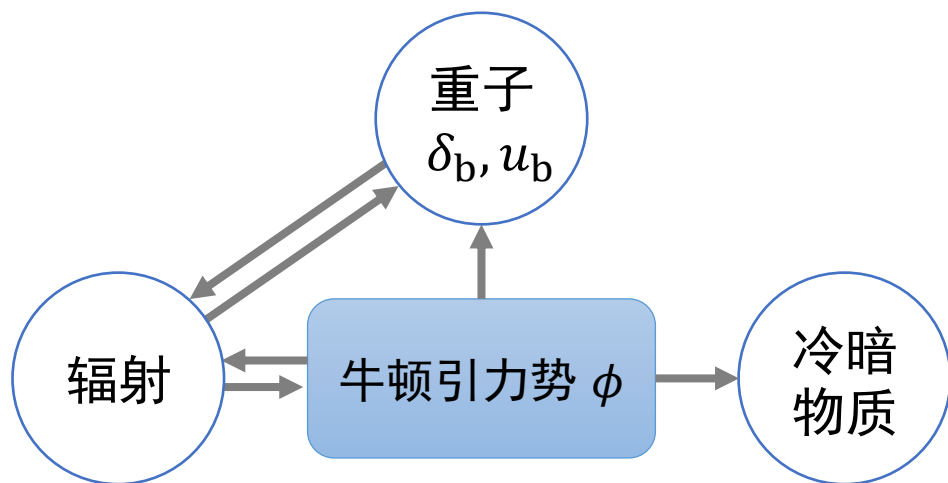
图2: <https://scienceblogs.com/startswithabang/2008/04/25/cosmic-sound-waves-rule>

图3: Planck Collaboration, Aghanim N, Akrami Y, et al. Astronomy & Astrophysics, 2020, 641: A1.

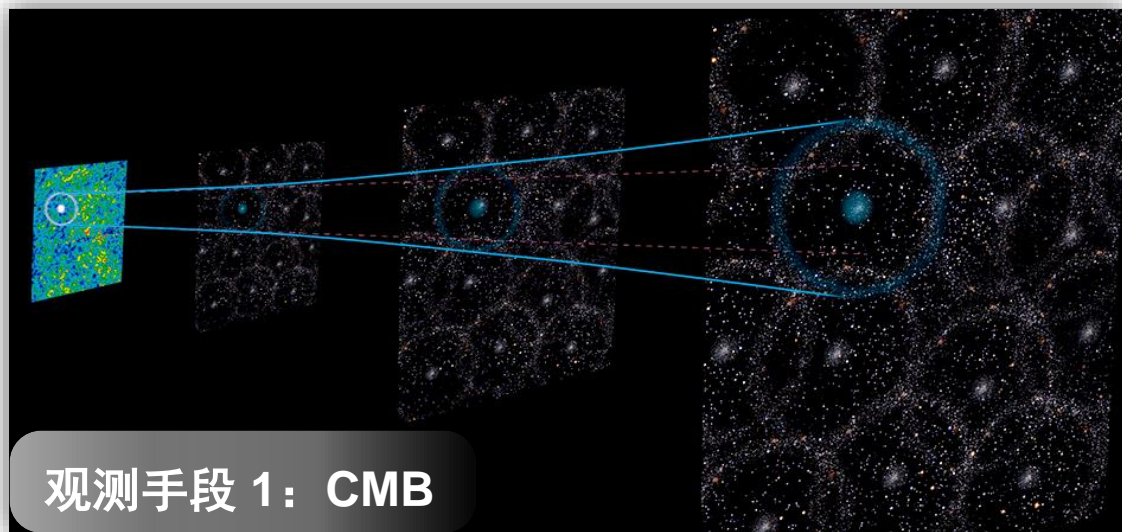
图4: <https://www.desi.lbl.gov/2024/04/04/desi-y1-results-april-4-guide/>

重子声波振荡 (Baryon Acoustic Oscillation, BAO)

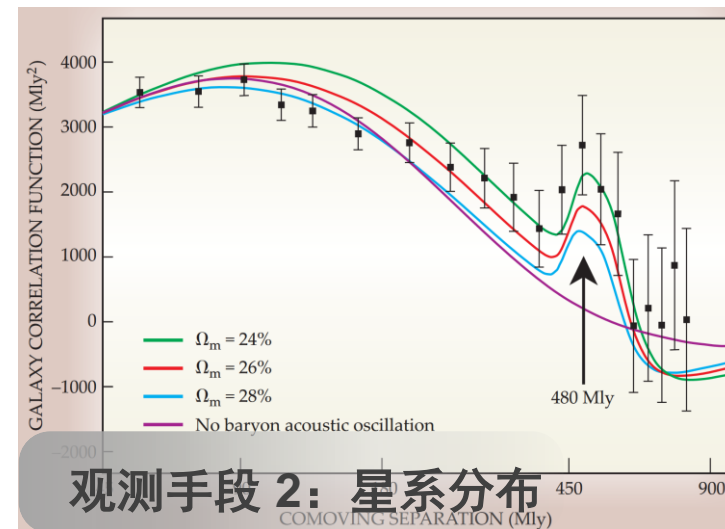
c_s : BAO传播速度
 t^* : BAO停止传播的时刻
 $a(t)$: 尺度因子
 δ_b : 重子涨落系数
 u_b : 重子本动速度



- 再结合时期光子和重子等成分相互作用形成声波振荡，于 $z \approx 1200$ 解耦
- 声波传播最大距离 \rightarrow 声学视界: $r_s = \int_0^{t^*} \frac{c_s(t)}{a(t)} dt$
- 于2005年在SDSS星系巡天样本中首次成功观测到BAO [2]



图源: <https://insidetheperimeter.ca/most-detailed-map-of-the-universe-ever-being-charted-by-desi/>



研究目的：

以重子声波振荡的声学特征为线索，
探讨在大尺度结构下宇宙线性和非线性的结构演化。

01

物质密度涨落

实际观测无法直接测量
物质的密度涨落。

$$\delta_{\text{m}}(\boldsymbol{x}) = \frac{\rho_{\text{m}}(\boldsymbol{x})}{\bar{\rho}_{\text{m}}} - 1$$

02

物质分布关系

测量物质（星系）之间的
空间分布统计关系。

$$\langle \delta(\boldsymbol{x}_1) \delta(\boldsymbol{x}_2) \rangle \Leftrightarrow \langle \delta(\boldsymbol{k}_1) \delta(\boldsymbol{k}_2) \rangle$$

微扰理论

$$\delta_m(\mathbf{x}) = \frac{\rho_m(\mathbf{x})}{\bar{\rho}_m} - 1$$



间接获取密度涨落在实空间上的分布信息

两点相关函数：

$$\xi(r) = \xi(|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|) \equiv \langle \delta(\mathbf{x}_1) \delta(\mathbf{x}_2) \rangle$$



Fourier 变换，空间 $r \rightarrow$ 模式 k （尺度）

物质功率谱：

$$P(k) \delta_D^{(3)}(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) = \langle \delta(\mathbf{k}_1) \delta(\mathbf{k}_2) \rangle$$

研究方法：

通过物质功率谱，研究不同尺度下的密度涨落分布特征和物质扰动强度，从而研究宇宙的结构演化，包括线性和非线性。

线性物质功率谱表达式

$$|\delta(k, z = \infty)|^2 \propto k^{n_s}$$

原初功率谱

形成于宇宙暴涨时期，由原初微小扰动形成的满足高斯分布的功率谱。

$$D_+(z) \equiv \frac{\delta(k, z)}{\delta(k, z = 0)}$$

增长因子

(线性) 描述了密度扰动从某一红移值到当前的演化。[3]

$$|\delta(k, z)|^2 = P_{\text{lin}}(k, z) \propto k^{n_s} T(k)^2 D_+(z)^2$$

归一化因子

利用方差进行归一化处理。

$$\sigma_R^2, R = 8$$

转移函数※

定义为不同尺度下，当前宇宙密度扰动的振幅与其初始值的比值。

$$T(k) \equiv \frac{\delta(k, z = 0)}{\delta(k, z = \infty)}$$

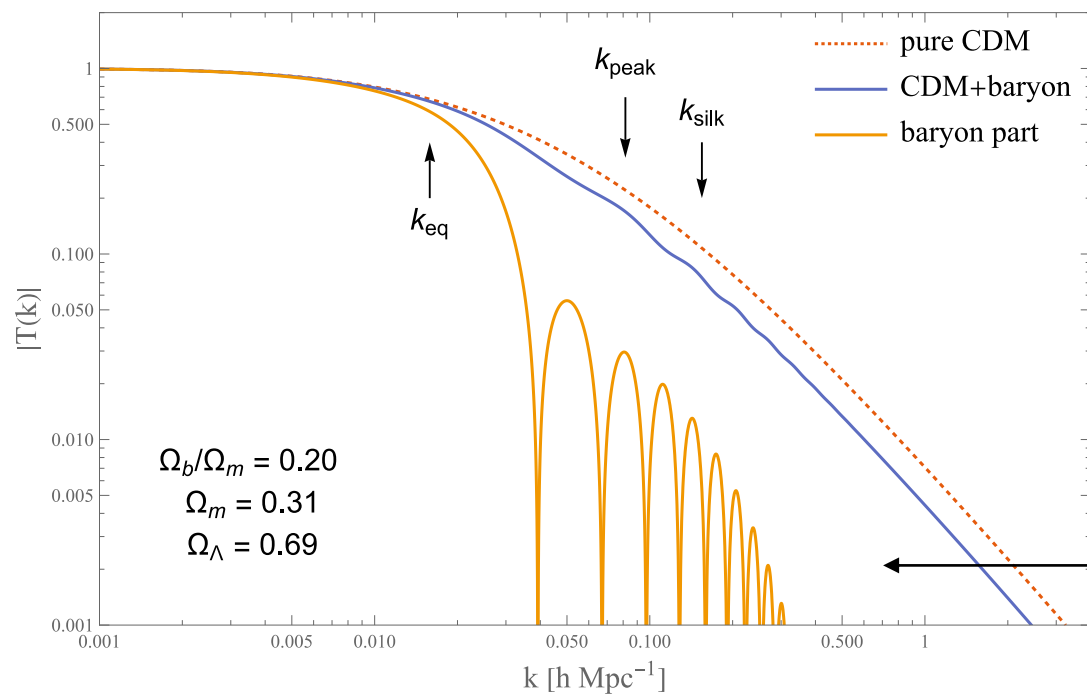
BAO的转移函数

$\Omega_{b/c}$: 重子/CDM能量密度参数

$T_{b/c}$: 重子/CDM的转移函数

$\alpha_{b/c}$: 重子/CDM的抑制因子

$\mathcal{D}(k)$: Silk 阻尼作用项



重子和暗物质互相不受干扰，因此转移函数可以写作：

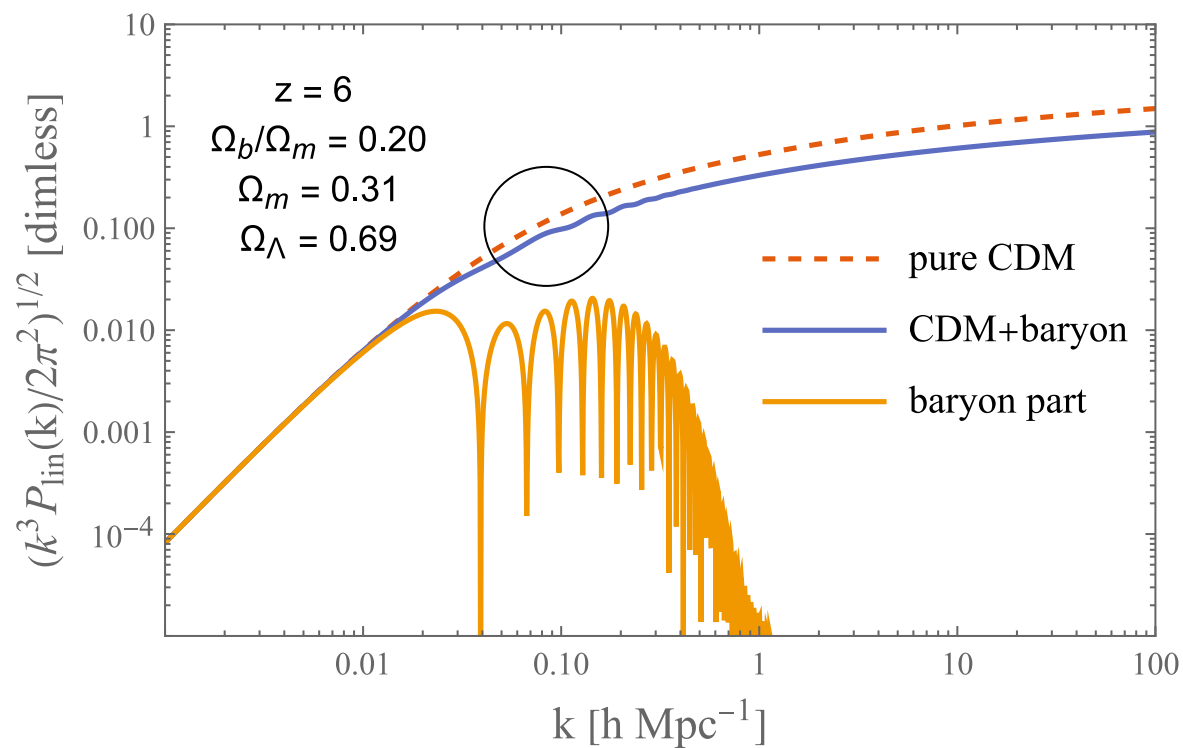
$$T(k) = \frac{\Omega_b}{\Omega_m} T_b(k) + \frac{\Omega_c}{\Omega_m} T_c(k)$$

$$T_b \rightarrow \alpha_b \frac{\sin(ks)}{ks} \mathcal{D}(k), \quad T_c \rightarrow \alpha_c \frac{\ln 1.8 \beta_c q}{14.2 q^2}$$

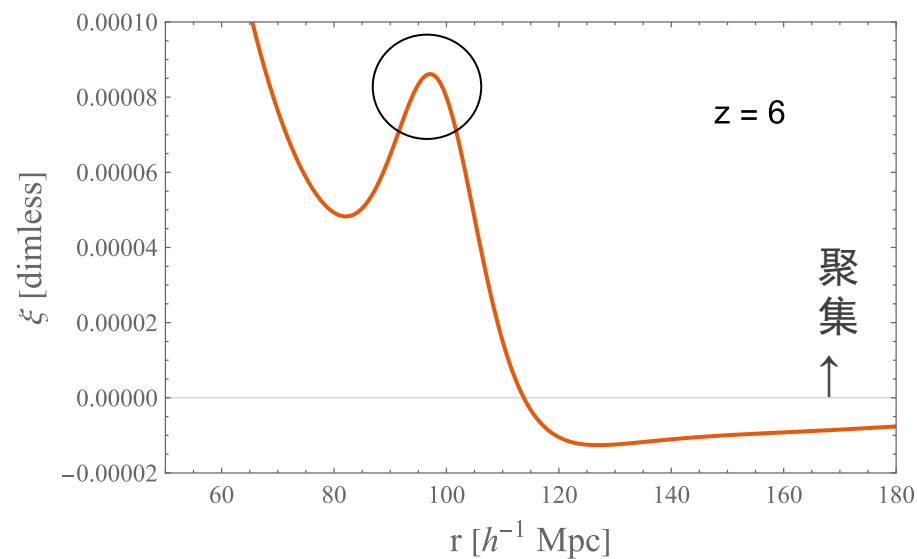
BAO的周期性振荡特征

* 数值模拟结合物理图像所得拟合表达式 [4]

线性 • 结果 I 线性功率谱&两点相关函数的BAO分析



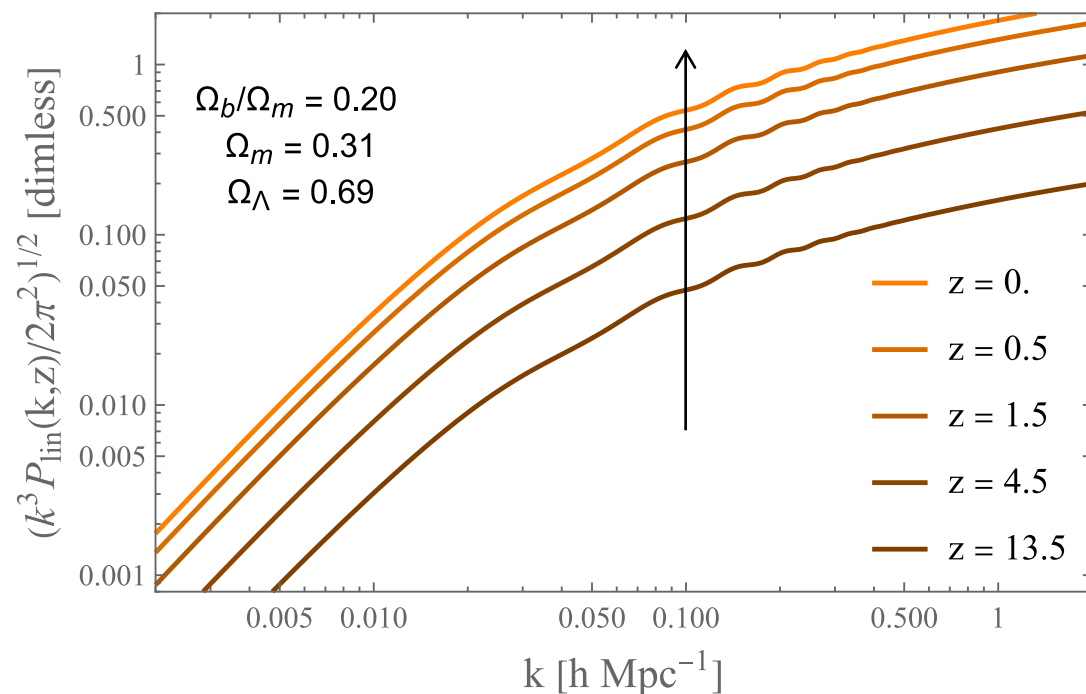
Fourier 变换



- BAO特征尺度: $k \approx 0.1 h \text{ Mpc}^{-1}$;
- BAO声学视界: $r \approx 100 h^{-1} \text{ Mpc}$.

线性 · 结果 II

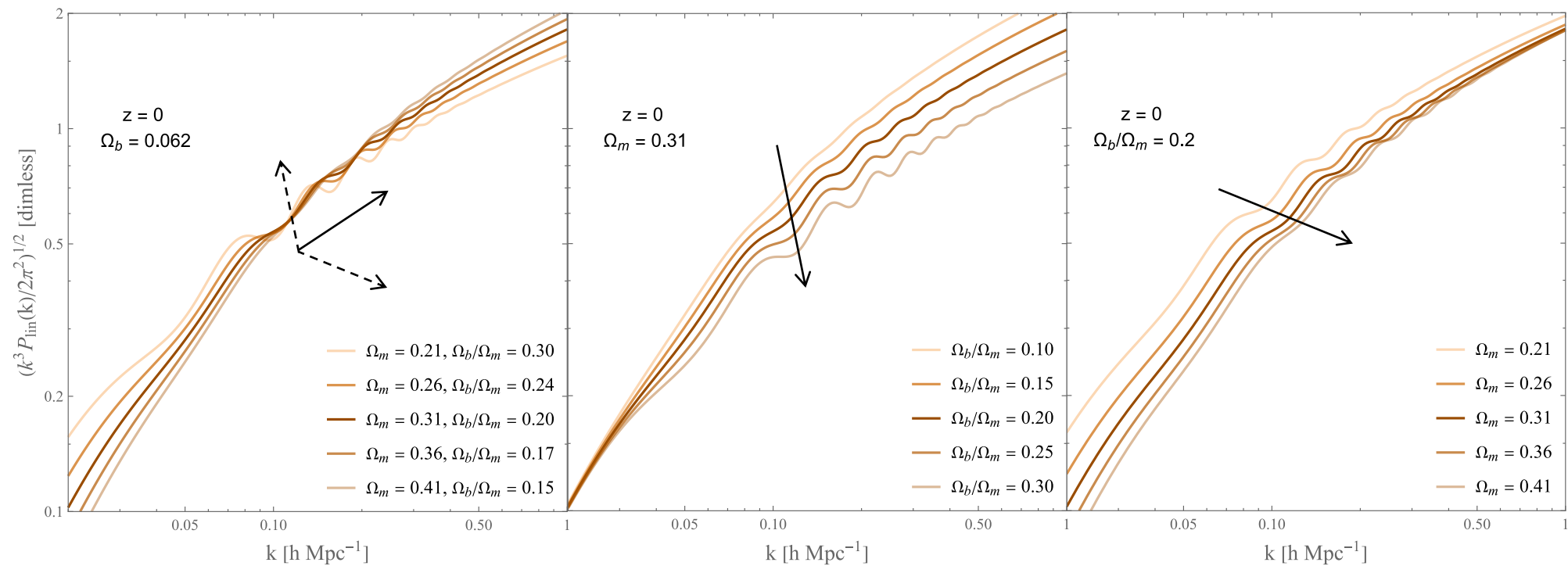
BAO随红移的变化



- 随着宇宙的演化（红移减小），所有尺度下的功率谱幅度均呈现上升趋势，物质扰动将会越来越强烈；
- BAO的特征尺度没有受到红移变化的影响，说明这个尺度被“冻结”在了宇宙大尺度结构中。

线性 • 结果III

BAO随重子和总物质参数的变化



- $\Omega_b / \Omega_m \rightarrow$ 主要影响BAO的振荡强度;
- $\Omega_m \rightarrow$ 主要影响BAO的特征尺度。

* $\Omega_b + \Omega_c = \Omega_m$, $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$

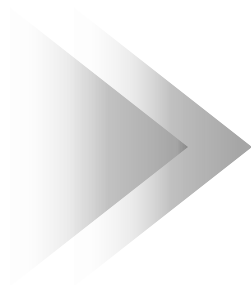
02

线性结构演化

宇宙早期, 物质增长。

BAO特征尺度:

$$k \approx 0.1h \text{ MPC}^{-1}$$



03

非线性结构演化

宇宙后期, 星系形成。

BAO特征尺度?

暗物质晕模型 (Dark Matter Halo Model)

暗晕： 围绕着星系或星系团的、由暗物质组成的球形区域，它们不可见，但通过引力影响可见物质的分布。

$$\rho_{\text{HM}}(\mathbf{x}) = \sum_{\text{halos } i} \rho_{\text{h}}(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|, M_i)$$

$$\langle \delta_{\text{h}}(\mathbf{k}, M) \delta_{\text{h}}(\mathbf{k}', M') \rangle = \delta_D^{(3)}(\mathbf{k} - \mathbf{k}') P_{\text{h}}(k, M, M')$$

ρ_{h} : 相同质量暗晕的密度

ρ_{HM} : 所有质量暗晕的密度

M_i : 暗晕的质量

$P_{\text{h}}(k, M, M')$: 暗晕功率谱

n : 暗晕数密度

建立模型(半解析)的三个要素:

1. 相同质量的暗晕，其密度随暗晕半径大小的分布 → 密度轮廓[5] $y(k, M)$
2. 不同质量下的暗晕的数目 → 质量函数[6] $\frac{dn}{d \ln M}$
3. 某一质量的暗晕数目相对于平均值的偏差 → 暗晕偏差 $b_1(M)$



$$P_{\text{HM}}(k)$$

[5] Sheth R K, Tormen G. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1999, 308(1): 119-126.

[6] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. The Astrophysical Journal, 1996, 462: 563.

非线性物质功率谱表达式

$$P_{\text{HM}}(k) = \frac{1}{\rho_{\text{m}}^2} \int dM \frac{dn}{d \ln M} \int dM' \frac{dn}{d \ln M'} y(k, M) y(k, M') P_{\text{h}}(k, M, M')$$

$$P_{\text{h}}(k, M, M') = b_1(M) b_1(M') P_{\text{lin}}(k) + P_{\text{N}}(M, M')$$

$$P_{\text{N}}(M, M') = \frac{1}{dn/d \ln M} \delta_D^{(1)}(\ln M - \ln M')$$



$$P_{\text{HM}}(k) = P_{2\text{h}}(k) + P_{1\text{h}}(k)$$

$$P_{2\text{h}}(k) = [\mathcal{B}_1(k)]^2 P_{\text{lin}}(k), \quad \mathcal{B}_1(k) = \frac{1}{\rho_{\text{m}}} \int d \ln M \frac{dn}{d \ln M} M b_1(M) y(k, M),$$
$$P_{1\text{h}}(k) = \frac{1}{\rho_{\text{m}}^2} \int d \ln M \frac{dn}{d \ln M} M^2 [y(k, M)]^2.$$

$P_{2\text{h}}(k)$: 2-晕项, 考虑了不同质量的暗晕通过引力作用相互聚合的影响, 因此和 $P_{\text{lin}}(k)$ 有关;

$P_{1\text{h}}(k)$: 1-晕项, 相同质量的暗晕内部的密度扰动, 影响了非线性结构的演化。

$y(k, M)$: 密度轮廓

$dn/d \ln M$: 质量函数

$b_1(M)$: 暗晕偏差

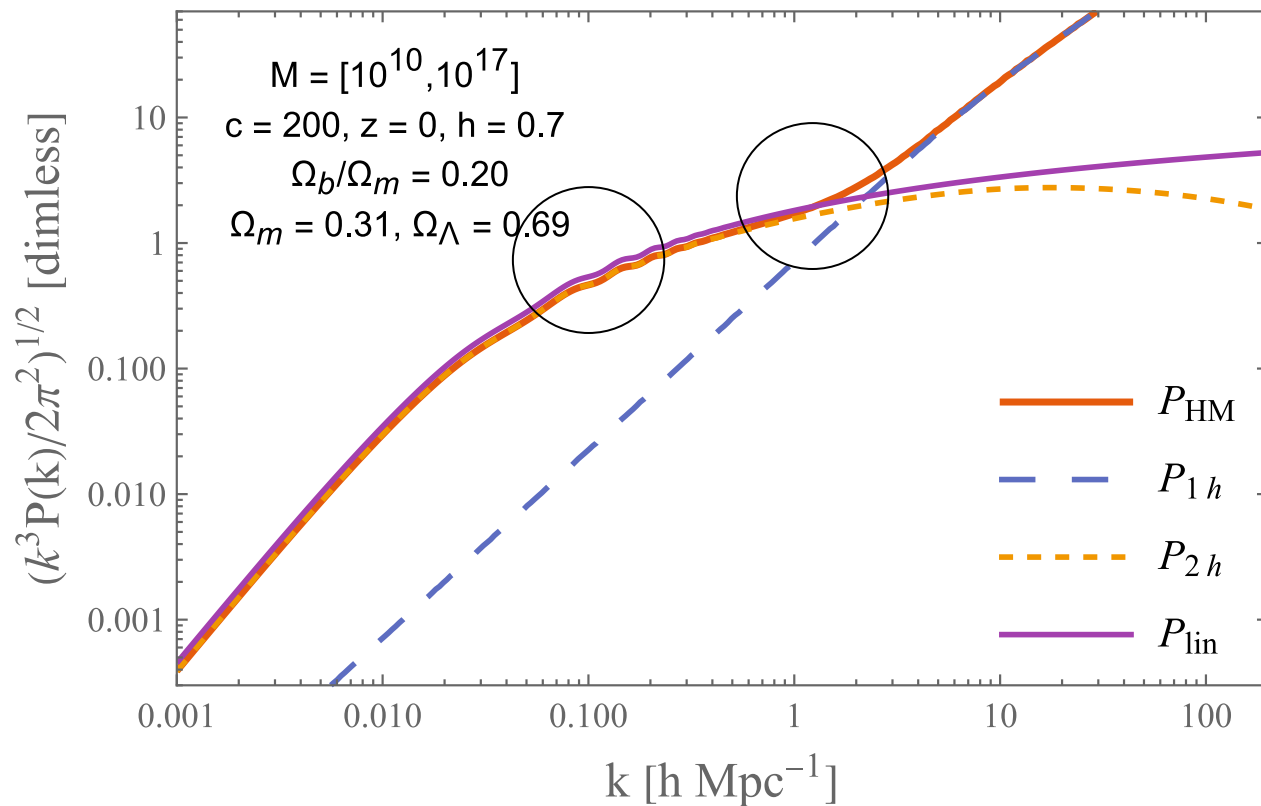
$P_{\text{lin}}(k)$: 线性功率谱

$P_{\text{N}}(M, M')$: 噪声功率谱

$P_{\text{HM}}(k)$: 暗晕功率谱

非线性 · 结果 I

非线性功率谱的BAO分析



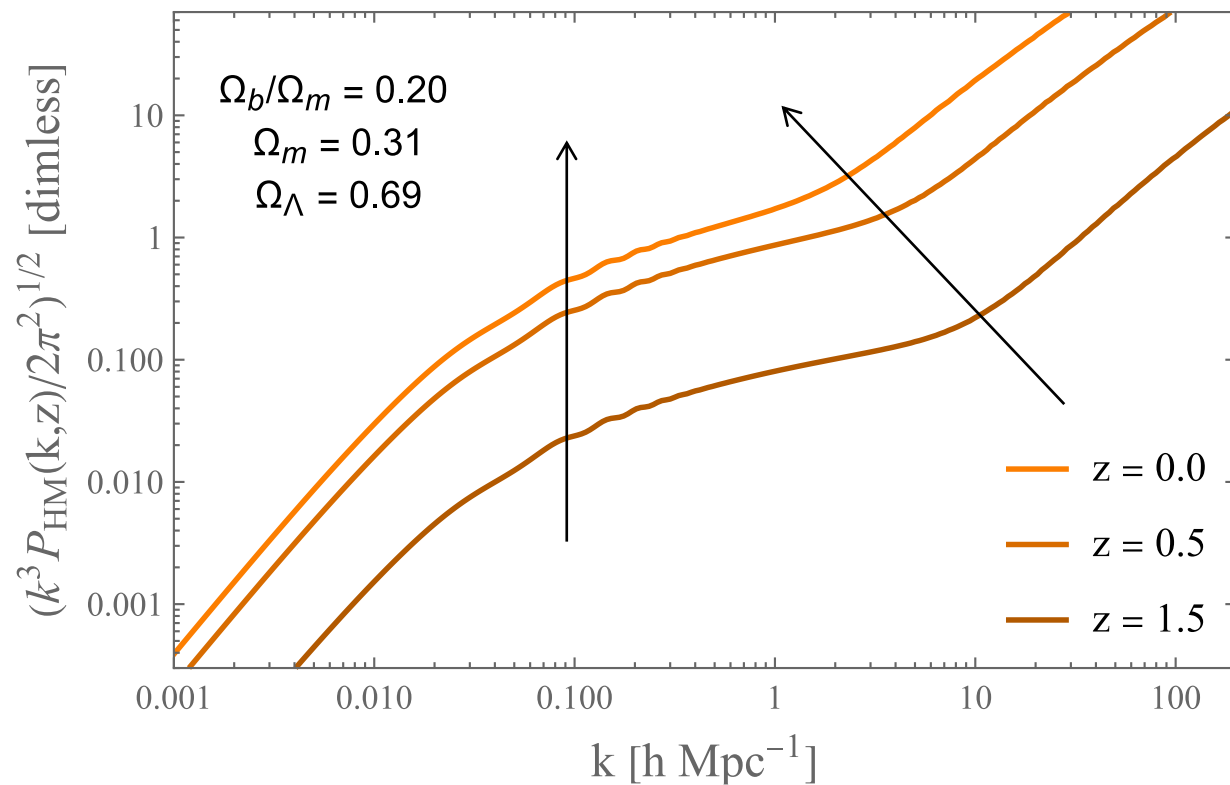
- BAO在小尺度上缺失，初步得出非线性演化对此无影响；

- 线性→非线性转折点：

$$k \approx 1 h \text{ Mpc}^{-1} \quad (z = 0)$$

非线性 · 结果 II

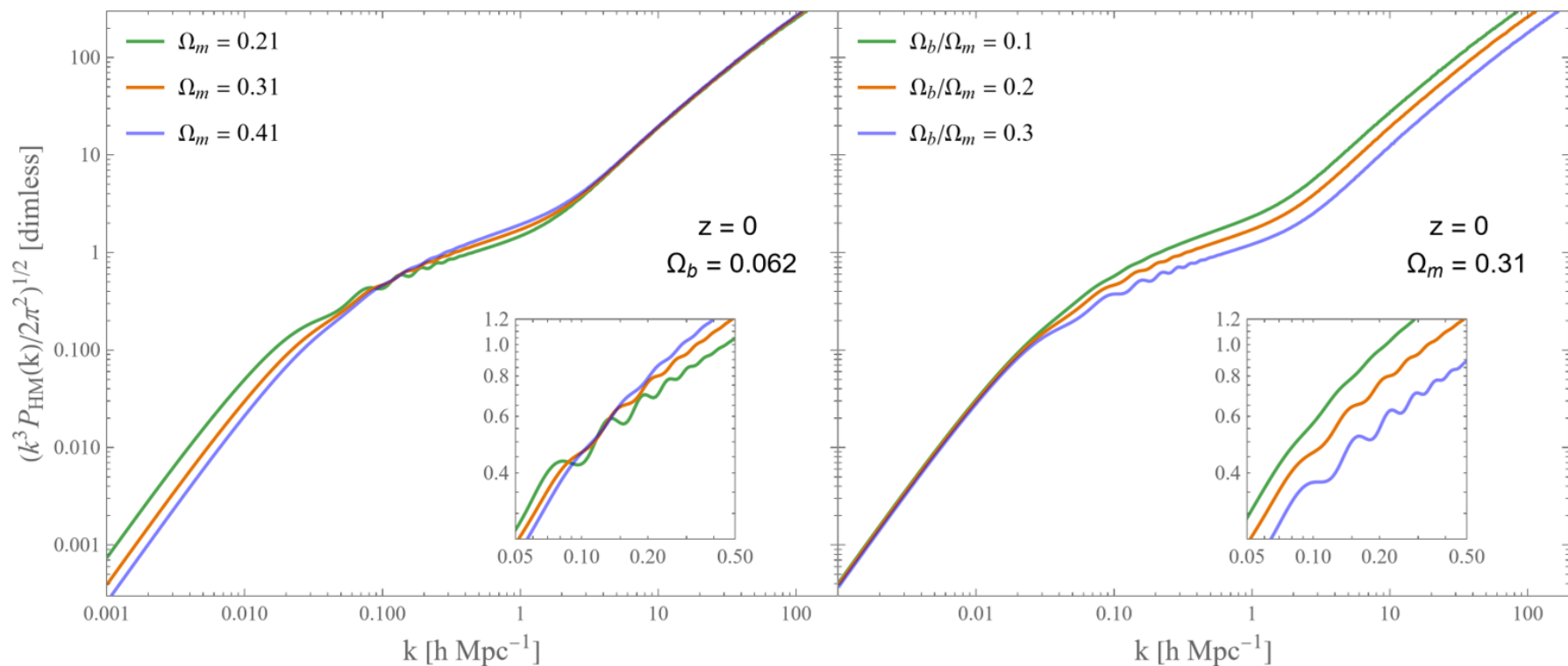
BAO随红移的变化



- 转折点随宇宙演化向更大尺度（低 k ）偏移，符合非线性演化特征。

非线性 · 结果III

BAO随重子和总物质参数的变化



- 进一步说明了BAO特征尺度不受非线性演化的影响。

总结&展望

01 重子和暗物质的引力相互作用影响了大尺度结构的形成；
BAO的特征尺度： $k \sim 1h \text{ Mpc}^{-1}$ ，声学视界： $r \approx 100h^{-1} \text{ Mpc}$ 。

02 BAO特征尺度不受红移影响，可用于测量红移和距离的关系；
改变物质的参数会影响BAO大小和尺度，因此可以用于标准宇宙学模型的检验。

03 结合最新的大型星系巡天（如DESI, Euclid...）观测数据，
进一步探究限制宇宙学参数的影响因素。

谢谢大家！

请各位老师进行批评指正

2020级理学院光信02班

汇报人：贺迎秋

2024年05月26日