

4.

Luminosity distance 影响因素: 光子能量降低 $(1+z)$; 到达频率降低 $(1+z)$; 频率宽度变窄 $(1+z)$; 观测到的光子被红移。

5.

Einstein 场方程下的 Poisson 方程左侧前两项 (带 H) 在研究尺度($\sim a/k$) is comparable to or larger than the Hubble radius H^{-1} 时非常重要, 在小尺度下只有第三项, 变为普通 Poisson 方程。

7.

Non-linear perturbation theory 意义: 线性扰动理论仅适用于早期宇宙的小密度涨落, 而非线性理论描述引力坍缩形成的结构 (如星系、暗物质晕), 解决 $\delta \gg 1$ 的强非线性问题。

Lagrangian dynamics: 追踪粒子轨迹。

8.

Press-Schechter 基本逻辑:

1) 在质量尺度 M 上对线性密度场进行平滑 (常用球顶窗函数), 得到方差为 $\sigma^2(M)$ 的高斯随机场, 方差随尺度增大而减小 (小质量波动更大, 更容易坍缩);

2) 设定坍缩阈值 $\delta_c \approx 1.68$, 认为超过该值会形成暗物质晕。坍缩阈值基于拉格朗日坐标下的球状坍缩模型, 为增长方程中 $\Omega_m(a) = 1$, 收缩因子 $a \rightarrow 1$ 极限下对应的线性密度扰动阈值。

3) 超过阈值的概率分数推导晕的质量分布 dn/dM , 发现缺失因子 2, 云中云问题, 原因为 PS 理论仅统计了独立坍缩区域, 未考虑到实际上, 小尺度欠密度区可能嵌入大尺度过密度区, 被大晕吞噬。以及小质量晕可能被计入更大质量晕中, 导致重复统计。

随机游走 Excursion set 解决问题方法: 设定首次穿越条件, 只有当波动首次到达 δ_c 时认为该点属于对应质量 $M(S)$ 的晕, 后续跨越不重复计数, 避免小晕被大晕吞噬的重复统计。对于任意点, 随机游走轨迹最终必然在某个尺度首次穿越 δ_c , 对应某个晕的质量, 无需人为乘以因子 2。

功率谱: 密度扰动是高斯随机场, 满足统计均匀性与各向同性。无量纲功率谱 $\Delta^2(k)$, 表示尺度 k 上的扰动幅度。CDM 模型, $\Delta^2(k)$ 随 k 增大而增大 (小尺度扰动强)。

窗函数: 球顶窗函数 (tophat window function): 球内均匀, 球外为零。质量意义明确, 但 k 空间振荡;

高斯窗函数: 高斯分布。平滑无振荡, 但质量边界模糊;

傅里叶窗函数: 复杂, 按 sinc 函数衰减。严格 k 空间截断, 但实空间非局域。

11.

晕合并率 B : 质量 M_1, M_2 单位体积单位红移 (时间) 的合并事件数。

Conditional Halo (Progenitor) Mass Function: 较晚时间 t_1 质量为 M_1 的后代晕在较早时刻祖先晕的质量分布 (t_2, M_2)。

条件首次穿越分布: 轨迹首次穿过 S_1 对应势垒 ω_1 的前提下, 首次穿过更高势垒 ω_2 的概率密度分布。

Halo Formation time: 形成晕一半质量的时间。

Merger tree: 蒙特卡罗方法, 抽取祖先晕质量, 构建晕演化历史。

算法: LC93, 二元分支, 忽略 M_{\min} (以下被排除, 未量化吸积过程), 抽取 $\Delta S \rightarrow \Delta M$, 两个祖先晕分别为 $\Delta M, M_0 - \Delta M$, 低质量端祖先晕数量偏高。

SK99: 考虑 M_{\min} , 低于 ($\Delta M < M_{\min}$) 算弥散吸积, 高于则相减 ($M_{rem} = M - \Delta M$), 如还

大于($M_{rem} > M_{min}$)则继续减, 多重合并, 低质量端仍偏高, 但改善。多重合并物理框架不明确。

C00: 固定吸积质量 ΔM , 严格二元, 随机数决定单祖先晕还是双祖先晕, 高质量端祖先晕数偏低, 吸积简化。

Moving barrier: 势垒高度随尺度因子增大而降低, 反映宇宙膨胀导致坍缩阈值下降。早期高势垒, 大密度扰动坍缩, 小质量晕; 晚期低势垒, 小扰动坍缩, 大质量晕。解决固定势垒模型低估小质量晕的问题, 更准确描述晕的质量分层形成历史。

12.

Jeans length 意义: 声波传递时间与 free-fall time 相当。

Jeans mass: 在 Jeans length 尺度体积内的质量。晕质量大于 Jeans mass, 引力主导塌缩, 否则压强抵抗塌缩。尺度大于 Jeans 尺度, 引力主导塌缩, 否则压强主导抵抗引力塌缩。

密度功率谱探针尺度 (k [h/Mpc]): CMB, 0.001-0.01; 2dF galaxies, 0.01-0.1; Galaxy abundance, 0.05-0.2; Weak lensing, 0.1-10; Ly α Forest, 1-10。

密度功率谱演化因素: 原初功率谱(由暴胀产生), 转移函数(编码视界进入和辐射-物质过渡的抑制效应), 线性增长因子(描述扰动在引力作用下的线性增长)。

重子声学振荡: 声视界尺度处的特征峰。

13.

Weak Lensing: the lensing deflection is small, this mapping is just a one-to-one and invertible distortion of the coordinates. (透镜体: 大尺度暗物质结构) (用于测宇宙暗物质、暗能量分布)

Strong lensing: larger deflections, a unique inverse mapping from source to lens plane may not exist, multiple imaging. (透镜体: 星系、星系团、黑洞) (用于测量质量、哈勃常数等)

Lensing cross section: the area around a given lens through which the undeviated light ray would need to pass to cause an amplification greater than certain value A.

Surface density: 透镜天体的质量在垂直于视线方向上的投影密度。

Micro lensing: 点质量透镜(黑洞、恒星)对致密点源的引力透镜效应, 仅观测到光度放大, 无法分辨多重像。透镜角尺度很小, 分辨率看不到图像畸变、分裂。(透镜体: 恒星、行星、黑洞等小天体) (用于探测系外行星、暗天体等)

Shear-shear correlation: 弱引力透镜中, 遥远星系光线传播被大尺度结构引力偏折, 使星系图像发生形变, 统计大量形变可以构造剪切场。

E 模式, B 模式: 只有 E 而不应有 B, 弱引力透镜中的剪切由标量引力势偏折光线引起, 只能产生梯度场 E-mode, 此为宇宙大尺度结构引起的真实形变信号, B-mode 为旋量成分, 不考虑系统误差与非引力影响下应为 0。

Limber 近似: 是一种宇宙学计算角功率谱的方法, 假设相关函数在视线方向上变化缓慢, 将三维功率谱简化为二维角功率谱的积分形式。适用于小角尺度, 高效估算投影场的角相关性, 忽略远距离之间相关性, 简化了计算。

19.

Collision rate: 根据位力定理估算, free fall 时标内 star 经历的碰撞事件数与 star 总数成反比, 当 star 总数很大时, 可认为系统无碰撞。

20.

Beta parameter: 星系团中星系(或暗物质晕)的速度弥散(反映引力势的深度)对应动能

与热气体动能(kT)比值, 上下同除以气体的平均粒子质量。通过比较光学数据(星系速度弥散)和 X 射线数据(气体温度、密度)推导的 β 值, 验证模型自洽性。

- 早期研究发现, 从光学数据(星系速度)和 X 射线数据(气体压力)独立估算的 β 值不一致(如光学推导的 β 偏大)。这可能是由于:
 - 各向异性速度分布(如径向轨道主导)。
 - 非热压力贡献(如湍流、磁场)。
 - 系统测量误差(如 X 射线温度拟合偏差)。
- Bahcall & Lubin (1994)的贡献:
他们通过改进数据分析和模型假设(如考虑气体温度梯度、各向异性修正), 显著减小了两类数据间的差异, 部分解决了矛盾。

21.

SZ effect: 星系团对 CMB 的直接作用: 星系团中的热电子与 CMB 光子发生逆康普顿散射, 高能电子将能量转移给低能 CMB 光子, 导致光子频率升高。低频($<217\text{ GHz}$), CMB 温度降低, (光子从低能区被散射到高能区, 低频“亏损”); 高频($>217\text{ GHz}$), CMB 温度升高(散射后的高能光子填充高频区。交叉频率 217 GHz , 无净效应)。

25.

Finger-of-God (FOG) 效应是由于星系在局域尺度上的随机速度弥散(peculiar velocities)导致的一种红移空间畸变现象。这些随机运动使得星系在红移空间中的分布沿视线方向被拉伸, 形成“手指状”结构。

物理成因: 星系在星系团等高密度区域内具有较大的随机速度(如维里运动), 导致其红移不仅包含宇宙学膨胀分量, 还包含随机速度分量。这种速度弥散使得红移空间的距离测量偏离真实空间的距离。

功率谱修正项: Gaussian, Lorentzian, Squared Lorentzian, 在小尺度上抑制功率谱, 尤其是沿视线方向。

Kaiser 方法是线性理论下描述大尺度红移空间畸变的模型, 由 Kaiser (1987) 提出, 关注宇宙大尺度结构中的相干速度场(如塌缩或膨胀运动)。

物理成因: 星系在引力作用下沿大尺度密度场运动, 形成与密度扰动相关的线性速度场, 红移空间的星系分布因这种运动被压缩或拉伸(沿视线方向)。

功率谱修正项在大尺度上增强功率谱, 尤其是沿视线方向。

Kaiser 效应主导大尺度(线性区), FOG 效应主导小尺度(非线性区)。Kaiser 源于相干速度场(引力驱动), FOG 源于随机速度弥散(维里运动)。

Scoccimarro 的模型基于非线性扰动理论。全尺度(含非线性区), 分离密度/速度关联项, 更物理的 FOG 模型。从速度场统计直接推导阻尼形式, 复杂(需数值模拟或扰动理论高阶计算)。

26.

Reionization: $z < 1100$, the universe becomes neutral and transparent after cosmic recombination. Quasar absorption spectra: the IGM at $z < 6$ is highly ionized.

宇宙再电离是指宇宙中中性氢(HI)被重新电离的过程, 主要由第一代恒星、星系和类星体

的紫外辐射驱动。发生在宇宙大爆炸后约 4 亿年至 10 亿年之间（红移 $z \approx 6-20$ ），标志着宇宙从“黑暗时代”过渡到现代星系和恒星主导的透明宇宙。

观测证据：

Ly α 森林：通过高红移类星体的吸收光谱，发现 $z < 6$ 时星际介质（IGM）高度电离，吸收线的快速增加表明 $z \approx 6$ 时再电离结束。

宇宙微波背景辐射（CMB）：CMB 光子的散射表明再电离是一个渐变过程。Planck 卫星数据支持再电离完成于 $z \approx 8.5$ 。

Ly α 发射体：第一代星系周围的 Ly α 光子被中性氢散射，其光度函数的高光度端突起表明再电离是非均匀的“泡状”过程。

直接观测手段：21 厘米中性氢谱线

氢原子基态超精细结构跃迁（频率 1420 MHz，波长 21 cm），可用于探测中性氢的分布和状态，揭示再电离时空演化。应用：测量中性氢的丰度、温度、速度及磁场。通过红移 21 厘米线研究再电离时代和“黑暗时代”。

现有设备：LOFAR、MWA、PAPER、GMRT

未来设备：HERA、SKA1-Low、FAST。

挑战：射频干扰、电离层影响、银河系前景辐射、校准和热噪声、阵列设计优化。

术语：Redshift frequency, Brightness temperature (用 Rayleigh-Jeans 公式反映 intensity), Differential brightness temperature relative to CMB. 自旋温度：描述氢原子超精细能级分布，受 CMB 辐射、碰撞和 Ly α 光子散射影响，大于 CMB 温度发射，小于为吸收。

21 厘米谱线是天文学中一种强大的观测手段，具有以下用途：

速度测量：谱线的位移可以反映视线方向上的气体速度（多普勒效应）。

中性氢丰度：谱线强度可推算中性氢原子数量（该谱线非常微弱）。

气体温度：通过谱线轮廓的多普勒展宽可推断气体温度。

磁场测量：利用塞曼效应（Zeeman splitting）可探测磁场强度。

宇宙学研究：红移后的 21 厘米线能探测“黑暗时代”（Dark Ages）、再电离时期（EoR）以及再电离后的宇宙演化。

三维成像：21 厘米断层扫描（21cm tomography）可覆盖极大宇宙体积，绘制中性氢分布图。

再电离的宇宙学意义

约束宇宙学参数：21 厘米观测可精确测量宇宙曲率、中微子质量等。

研究第一代天体：再电离由第一代恒星和星系驱动，类星体贡献较小($z > 6$ 时数量不足)。

补充：SW effect

Non-Integrated SW effect：早期宇宙引力势不均匀导致 CMB 光子温度涨落，CMB 光子从势阱逃离红移，从势垒脱离蓝移，发生于最后散射面，辐射主导晚期，物质主导早期。

Integrated SW (ISW) effect：发生于最后散射面与地球之间。CMB 光子穿过随时间变化的引力势发生额外的温度涨落。晚期 ISW 发生于宇宙进入暗能量主导之后，引力势因为宇宙加速膨胀而衰减，CMB 光子穿过势阱时获得净能量变化（红移或蓝移）。早期 ISW 则发生于辐射主导到物质主导的过渡时期。