

# 红移畸变对宇宙学空洞的影响\*

王 磊<sup>1,2</sup> 罗 煜<sup>1,3†</sup> 王 蕾<sup>1,3</sup> 戴才萍<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

(3 国家基础学科公共科学数据中心 北京 100190)

**摘要** 为探索红移畸变对空洞性质的影响,利用了一组星系形成半解析模拟星表数据,采用VIDE (Void Identification and Examination toolkit)算法寻找真实空间和红移空间的宇宙学空洞,根据空洞外墙结构处的星系运动速度将空洞分为“塌缩型”和“膨胀型”。结果表明:“塌缩型”空洞所占比例会随着空洞的尺度变大而减少,“膨胀型”空洞则与之相反,两类空洞的平均有效半径在实空间中相差20%，“塌缩型”空洞的平均径向密度轮廓显著高于“膨胀型”空洞。利用成员星系将两种空间中的空洞进行匹配,通过比较实空间和红移空间中空洞的数目分布,发现实空间和红移空间中空洞的数目差异与空洞大小有关,并且红移空间中有一半左右的空洞无法对应到实空间。对匹配空洞,红移畸变对“塌缩型”空洞的密度影响更大;对未匹配空洞,其密度轮廓与匹配空洞存在明显区别,并且实空间中未匹配空洞其壳层星系向空洞内部运动的趋势更加明显。

**关键词** 宇宙学: 宇宙大尺度结构, 星系: 距离和红移, 方法: 数值

**中图分类号:** P159; **文献标识码:** A

## 1 引言

宇宙空洞(void)占据着宇宙绝大部分体积,是由物质密度接近均匀各向同性分布的早期宇宙随时间演化而形成的低密结构,与墙(wall)、纤维(filament)、团块(cluster)等宇宙高密结构共同组成了复杂的宇宙网<sup>[1]</sup>。然而,受到观测条件和技术的限制,过去的宇宙学研究大多在高密区进行,通常的做法是利用物质成团来限制宇宙参数。比如Rozo等人利用星系成团的质量函数信息来限制中微子的质量<sup>[2]</sup>, Tinker等人则通过星系两点相关函数和星系团内的质量数目比来限制宇宙的平均密度 $\Omega_m$ 和物质密度的涨落强度 $\sigma_8$ <sup>[3]</sup>,这些研究都促使我们更加深入地了解宇宙。自Riess等人在1998年利用超新星的观测数据证明了宇宙正在加速膨胀<sup>[4]</sup>,并由此提出了暗能量推动着宇宙膨胀这一模型以来,暗能量的研究事业迎来了蓬勃发展,宇宙空洞便是研究暗能量的重要工具之一<sup>[5-7]</sup>。

Gregory等人在1978年首次发现宇宙空洞,给宇宙学研究提供了新的方向<sup>[8]</sup>。近年来,随着大量巡天项目的开展<sup>[9-13]</sup>,人们对空洞做出了深入细致的研究<sup>[14-16]</sup>。研究人员

2021-03-11收到原稿, 2021-04-23收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(U1931310)资助

†luoyu@pmo.ac.cn

发现可以通过空洞的统计性质来获取宇宙信息: 其内部和周围墙结构的引力势阱差异显著, 造成宇宙微波背景光子在通过两类势阱时能量会损失或增加, 这一现象可以用来研究线性的Integrated Sachs-Wolfe效应和非线性的Rees-Sciama效应, 进而探测暗能量的性质<sup>[17-18]</sup>; 空洞的丰度和内部动力学特征可以用来修正引力理论以及限制暗能量的状态方程<sup>[19-20]</sup>; 虽然单个空洞的形状与标准球差异大, 但多个空洞叠加后其形状近似标准球, 空洞这一叠加特性使我们可以通过Alcock-Paczynski检验(AP检验)来探索大尺度结构的生长<sup>[21-22]</sup>; 由于中微子质量对宇宙的成团有重要影响, 因此也可以通过中微子模拟数据中对空洞性质的统计与观测数据比较, 进而限制中微子质量<sup>[23-25]</sup>.

通过对大尺度成团的物理特征研究来提取宇宙信息, 进而限制宇宙学参数或对暗能量等未知领域的属性进行推测已成为当前热门的研究方向<sup>[26-27]</sup>. 赵飞等<sup>[28]</sup>将通过模拟星系和暗物质粒子找出的空洞进行对比, 初步探索了星系和暗物质在大尺度分布上的差异. 然而在观测中我们所能获得的是星系在红移空间中的位置分布, 受红移畸变的影响, 使我们得到的信息与宇宙真实的信息存在偏差<sup>[29-30]</sup>. 随着数值模拟的不断发展, 研究人员开始利用模拟的实空间星系样本产生红移空间中的样本来开展研究, 对比两种空间中所得信息的差异来不断构建和完善真实的宇宙学框架. Correa等<sup>[31]</sup>通过对比红移空间和实空间空洞的大小以及空洞中心的偏移来限制AP检验对宇宙大尺度结构敏感的参数值; 这对于我们从观测到认识真实的宇宙又前进了一步, 然而其AP检验采用的算法找出的空洞为球型, 不太符合一般空洞特征.

红移畸变会造成星系的分布沿观测者的视线方向偏移而产生“Fingers of God”和“Pancakes of God”效应, 这些效应对空洞性质的影响比较大. Pisani等人在2015年利用实空间和红移畸变后的样本对空洞性质做了统计分析后发现, 空洞的丰度和球平均密度轮廓受畸变影响小, 椭率和空洞半径变化达到了10%的水平, 并且空洞中心位置也存在明显的偏离<sup>[32]</sup>, 但他们的工作只在空洞大小范围上作出了限定和比较, 并没有区分不同类型的空洞受到红移畸变的影响. Ceccarelli等人在研究中采用了3倍空洞有效半径作为最大径向距离, 并利用最大径向距离的累积数密度比作为划分S型空洞和R型空洞的条件<sup>[33]</sup>. 但此类方法在划分空洞类型时只考虑到空洞周围的密度环境, 对空洞自身的运动不加以区分, 因此难以明确空洞自身的运动差异和空洞性质的关系, 以及红移畸变对不同运动类型的空洞造成的影响.

本工作将采用模拟星系数据找出的空洞, 把空洞墙附近的星系沿径向的运动作为划分条件, 将空洞分为“塌缩型”和“膨胀型”; 在实空间中对比这两种类型空洞的性质, 随后利用匹配算法找出对应红移空间中的空洞, 从而分析红移畸变对两种类型空洞产生的影响, 最后我们比较匹配空洞和未匹配空洞的差别. 本文结构如下: 第2部分介绍所使用的空洞结构算法; 第3部分介绍使用的数据样本; 第4部分第1节给出实空间中两种类型空洞的对比, 第2节给出匹配到红移空间中两种类型空洞受红移畸变的影响, 第3节对比匹配空洞和未匹配空洞的性质, 最后是总结和讨论.

## 2 空洞算法

我们采用的空洞算法是基于ZOBOV (ZOnes Bordering on Voidness)改良版的VIDE (Void Identification and Examination toolkit)算法<sup>[34]</sup>, 此算法基于生成维诺图来构建密

度场, 进而定义空洞. 首先围绕每个离散示踪粒子生成维诺体元, 生成的维诺体元要求其内部任意点到该粒子的距离比其他粒子距离更短, 体元体积的倒数就是该区域的密度值; 随后找到极小密度值点, 并以这些极小值点为中心向四周扩散, 扩散过程中不断合并相邻的更高密度体元, 并以这些被合并的区域为基准不断迭代, 直到合并的体元密度达到极大值为止, 这样就形成了以高密体元为边界并包含密度极小值点的局域低密区, 这些局域低密区可以被认为是空洞结构. 如果我们对局域低密区实施分水岭变换, 就能将相邻的小空洞并入大空洞中而形成空洞的等级结构, 由此产生父空洞和子空洞的关系; 父空洞有更小的局域密度极小值和更大的体积, 因此包含最小的局域密度极小值点的空洞拥有最大的体积以及更多的子空洞结构.

构建宇宙空洞的示踪粒子一般处在宇宙高密度区, 如星系、AGN (Active Galactic Nucleus)、高亮红星系等, 这些宇宙高密物质分布在小尺度上呈现非均匀各向同性, 使得用VIDE算法找到的空洞形状各异. 为方便统计, 对空洞中心的定义如下:

$$\mathbf{P}_v = \frac{1}{\sum_i V_i} \sum_i \mathbf{p}_i V_i, \quad (1)$$

上述公式中 $\mathbf{P}_v$ 代表空洞中心的坐标,  $V_i$ 是参与构成空洞结构的第 $i$ 个维诺图体元体积,  $\mathbf{p}_i$ 则是该体元所包含的粒子的空间位置. 为了衡量空洞尺度的大小, 定义与空洞体积 $V$ 相等的球的半径作为空洞的有效半径 $R_{\text{eff}}$ :

$$R_{\text{eff}} = \left( \frac{3}{4\pi} V \right)^{1/3}. \quad (2)$$

虽然找到的空洞形状很复杂, 但大体可以用惯性张量来刻画:

$$M_{xx} = \sum_{i=1}^{N_p} (y_i^2 + z_i^2), \quad (3)$$

$$M_{xy} = - \sum_{i=1}^{N_p} x_i y_i, \quad (4)$$

其中 $N_p$ 表示空洞成员粒子的数目,  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ 代表空洞成员粒子 $i$ 相对于空洞中心的坐标位置. 我们定义 $J_1$ 、 $J_3$ 分别代表惯性张量 $\mathbf{M}$ 的最小和最大特征值, 则利用惯性张量特征值定义空洞椭率:

$$\epsilon = 1 - \left( \frac{J_1}{J_3} \right)^{1/4}, \quad (5)$$

椭率 $\epsilon$ 的取值范围为 $0 < \epsilon < 1$ , 椭率越大空洞也就越扁. 本文将利用空洞中心、有效半径、椭率等参数对空洞的物理性质开展定量分析.

为了避免分水岭变换过程中空洞过度合并, VIDE算法对空洞扩张合并加入了限制条件, 即两个相邻空洞分割区域的密度 $n_{\text{link}}$ 若低于某个阈值则合并; 一般给的默认阈值为0.2倍的样本平均密度. 默认阈值设定为0.2并没有实际理论意义, 这是一个自由参数, 不同的阈值参数将影响到空洞的大小, 密度轮廓等统计性质<sup>[35]</sup>. 由于我们只对单个空洞的性质进行分析而不考虑空洞等级结构, 因此本工作将阈值设为零.

### 3 数据

本文使用的数据来自Luo等<sup>[36]</sup>的半解析模拟星表, 该星表基于ELUCID (Exploring the Local Universe with the Reconstructed Initial Density Field)高精度宇宙学模拟<sup>[37-38]</sup>, 模拟盒子大小为 $500 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ , 粒子数为 $3072^3$ , 宇宙学参数来自WMAP9 (Wilkinson Microwave Anisotropy)的探测结果<sup>[39]</sup>:  $\Omega_m = 0.282$ 、 $\Omega_\lambda = 0.718$ 、 $\Omega_b = 0.046$ 、 $n_s = 0.965$ 、 $h = 0.697$ 分别代表宇宙中的物质密度、辐射密度、重子物质密度、初始功率谱指数和哈勃常数. 利用FOF (Friends of Friends)算法找出大质量暗晕, 再采用subfind算法<sup>[40]</sup>找出暗晕中的子结构, 根据暗晕的合并历史以及相关的星系形成物理过程产生符合观测的星系. 为了研究红移畸变对空洞产生的影响, 设视线方向为 $x$ 轴:

$$\tilde{X} = X + v_x \times \frac{(1 + Z)}{H(Z)}, \quad (6)$$

$\tilde{X}$ 、 $X$ 分别代表红移空间和实空间中样本在 $x$ 轴上的位置,  $v_x$ 是星系沿 $x$ 轴向的速度,  $Z$ 为宇宙红移,  $H(Z)$ 为宇宙红移在 $Z$ 处的哈勃值, 其中位置和速度单位分别为 $h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 和 $h^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其余均为无量纲参数. 随后我们从红移 $Z = 2.03$ 到红移 $Z = 0$ 之间取出3个时刻的星系数据, 并筛选出星系的恒星质量大于 $10^8 h^{-1} M_\odot$  ( $M_\odot$ 代表太阳质量)的样本. 星系样本在红移 $Z = 0$ 时刻的个数为14676644, 相应的星系平均间隔为 $2.042 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ . 采样的结果如表1所示, 由于红移空间中的样本是由实空间经上述畸变所得, 因此对应每个红移的两种空间星系样本数目相同.

表1 不同红移处星系的样本数目( $N$ )与星系间的平均间隔( $d$ )

Table 1 The number ( $N$ ) and mean separation ( $d$ ) of galaxy sample at different redshifts

$Z$	$N$	$d/(h^{-1} \cdot \text{Mpc})$
2.03	13495546	2.100
1.05	15469496	2.007
0	14676644	2.042

### 4 结果与讨论

由于小空洞并不稳定, 其受到的泊松噪声影响大, 为了减少算法对空洞分辨的影响, 我们只对不同红移处其有效半径大于2倍平均粒子间隔的空洞数目做统计<sup>[32]</sup>, 并且由于大空洞数量少, 我们在研究中限制空洞大小范围在 $4.2-25.2 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ , 文章中变量的上标 $r$ 和 $s$ 分别代表实空间和红移空间. 图1展示了红移空间和实空间中空洞的数目分布, 左图为实空间中空洞数目的分布, 中图为红移空间中空洞数目的分布, 右图为红移空间和实空间在不同有效半径处空洞的数目比, 灰色点线则代表上述的比值为1, 3种颜色分别代表3个不同的宇宙学红移. 可以看到在不同的宇宙学红移下, 实空间中有效半径较小的空洞数目要比红移空间中的数目多, 而有效半径较大的空洞数目比红移空间中少. 也就是说红移畸变所得到的空洞数目与真实空间中的空洞数目有一定的差别, 并且这种差别因空洞的大小而发生变化.

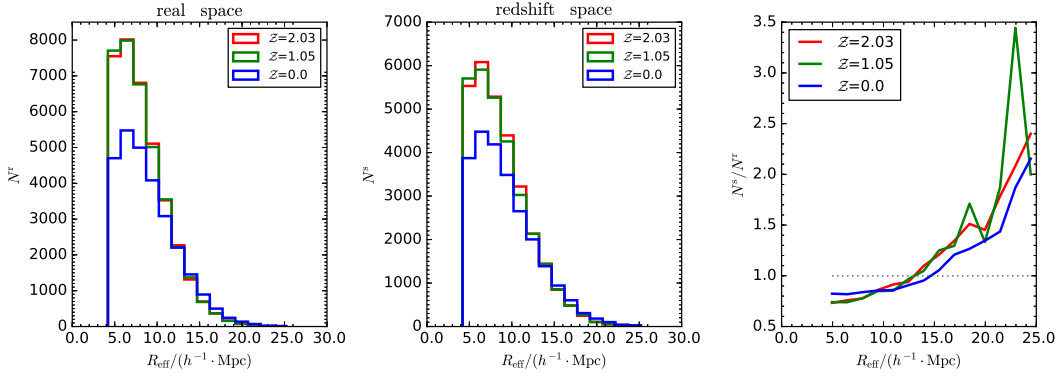


图 1 不同宇宙红移下空洞数目的分布. 左图为实空间, 中图为红移空间, 右图代表红移空间中的空洞数目与实空间中的空洞数目比, 灰色点线表示比值为 1, 不同颜色分别对应不同的红移.

Fig. 1 The voids' number distribution at different cosmological redshifts. The left panel shows the real space, middle panel shows the redshift space, and right panel indicates the ratio of voids number in redshift space to voids number in real space, the gray dotted line indicates the ratio is 1, different colors represent different redshifts.

由于红移畸变效应会导致运动星系的位置发生改变, 而位置的改变量由其沿视线方向的速度大小和宇宙学红移决定. 对于同一宇宙学红移下的不同空洞, 其空洞成员星系的运动情况会有所差别, 而这些运动差别一方面和空洞的密度结构有关, 另一方面在观测上会对空洞自身及其周围环境产生不同的影响. 为了简单起见, 我们将利用空洞墙附近的星系沿空洞径向的平均速度作为分辨不同空洞种类的依据: 若其平均速度朝向空洞中心, 则作为“塌缩型”空洞; 而平均速度远离空洞中心, 则为“膨胀型”空洞. 考虑到空洞会在共动坐标系下移动<sup>[41–42]</sup>, 因此我们在判别空洞属于“膨胀型”或是“塌缩型”时借鉴了 Ceccarelli 等人的方法<sup>[43]</sup>, 对空洞的整体移动速度做出如下定义:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{1}{\sum_i V_i} \sum_i \mathbf{v}_i V_i, \quad (7)$$

其中  $\mathbf{v}_i$  代表空洞第  $i$  个成员星系的速度, 我们扣除掉空洞的整体移动速度后, 利用距离空洞中心 0.9–1.1 倍有效半径壳层内的星系速度定义空洞边界的径向速度如下:

$$\hat{V} = \frac{\sum_j (\mathbf{v}_j - \bar{\mathbf{v}}) \cdot \mathbf{e}_j}{\hat{N}}, \quad (8)$$

$\mathbf{e}_j$  为壳层内第  $j$  个粒子相对于空洞中心位置的单位矢量,  $\hat{N}$  为壳层内粒子的总数.  $\hat{V} > 0$  代表“膨胀型”空洞,  $\hat{V} \leq 0$  代表“塌缩型”空洞. 这样划分的原因在于空洞的边缘壳层星系分布最密, 决定了空洞的性质及其演化<sup>[44]</sup>.

#### 4.1 实空间中两种类型空洞的比较

我们利用上述算法到实空间中将空洞分为“膨胀型”和“塌缩型”空洞, 其中“塌缩型”空洞数目占总空洞样本的 56%–58%, 体积占 33%–38%, 平均有效半径比“膨胀型”空

洞小24%–27%。不同有效半径处的空洞数目占比统计结果如图2所示, 实线和虚线分别代表“塌缩型”空洞和“膨胀型”空洞, 横坐标为空洞的有效半径, 纵坐标表示空洞的数目占总空洞数目的比例。从图中可以看到, “膨胀型”空洞占比随空洞有效半径的增大而增加, “塌缩型”空洞则与之相反, 我们看到从高红移到低红移“膨胀型”空洞的数目比例在减少, 而“塌缩型”空洞数目比例在增加。也就是说有效半径较小的空洞更倾向于塌缩, 而有效半径较大的空洞更倾向于膨胀, 但这种效应会随着红移降低而减弱。

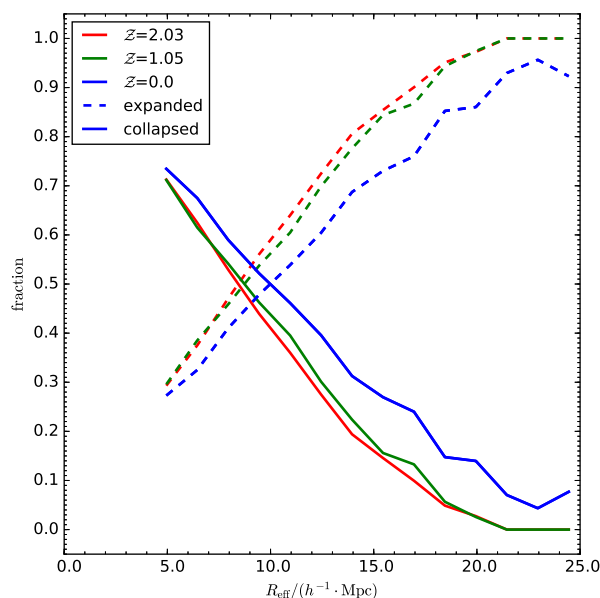


图 2 实空间中不同宇宙学红移下“膨胀型”空洞和“塌缩型”空洞的数目比例, 实线代表“塌缩型”空洞, 虚线代表“膨胀型”空洞。

Fig. 2 The number fraction of “expanded” voids and “collapsed” voids at different cosmological redshifts in real space, solid lines show “collapsed” voids, dashed lines show “expanded” voids.

对于这两类空洞, 我们给出其径向密度轮廓, 以展示其密度分布上的差异。我们按照空洞有效半径大小将空洞划分为3个区间:  $[4.2, 6.2]$ 、 $(6.2, 13]$ 、 $(13, 25.2]$  分别代表小、中、大型空洞, 并分别得到它们的平均径向密度轮廓, 上述区间单位均为  $h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 。如图3所示, 上图代表“塌缩型”空洞, 下图代表“膨胀型”空洞, 从左至右为3种不同大小的区间, 3种颜色代表不同的宇宙红移; 横坐标为归一化到空洞有效半径处的距离, 其中  $R$  代表以空洞中心为球心的球壳半径, 纵坐标为空洞球壳的星系数密度与总模拟样本平均数密度之比, 其中  $n$  代表空洞球壳的星系数密度,  $\bar{n}$  代表星系样本的平均数密度。可以看到在不同红移、不同有效半径范围内筛选出的“塌缩型”空洞, 其空洞内部空洞墙和空洞墙周围的密度比“膨胀型”空洞更高, 从空洞中心和空洞墙外到空洞墙附近的密度增长更快, 其高于宇宙平均密度部分的展宽更大, 密度的极大值处更接近于空洞的有效半径; 并且可以明显地看出“塌缩型”空洞在空洞墙及其附近都显著高于宇宙的平均密度, 而“膨胀型”空洞的密度接近或小于宇宙的平均密度, 即便在空洞墙附近也是如此。从高红移到低红移, 我们发现“塌缩型”空洞在墙附近及其以外的密度随时间增加, 而空洞内部密度在减小, 并且这些密度增长和减小的幅度会随空洞的尺度变化: 小空洞内部密度演化不

明显, 空洞墙及其周围演化剧烈, 大空洞内部及墙附近的演化都更明显. 对于“膨胀型”空洞, 在空洞内部、空洞墙及其附近的密度都随时间而减小. 由此我们认为“塌缩型”空洞处在高密环境, “膨胀型”空洞处于低密区, 并我们猜测它们的演化路径可能存在差异.

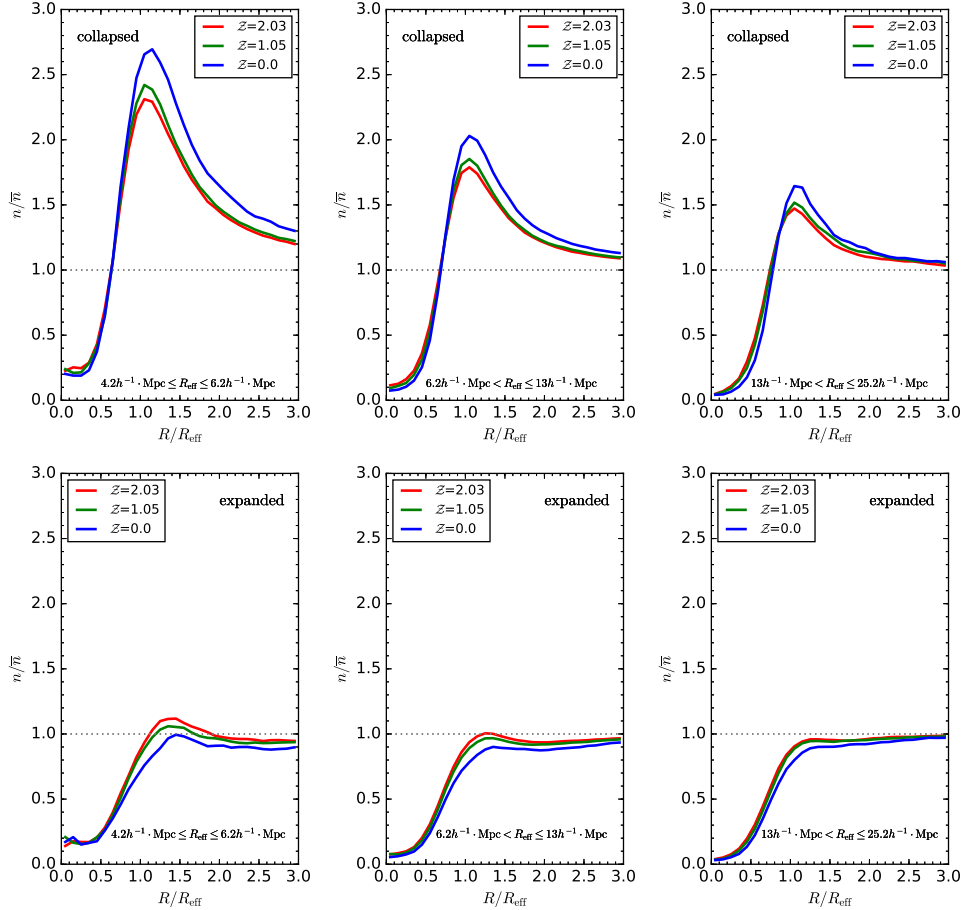


图 3 不同类型空洞平均密度轮廓的比较. 上3图和下3图分别表示“塌缩型”空洞和“膨胀型”空洞, 横坐标为空洞壳层到空洞中心的归一化距离, 纵坐标为星系样本平均数密度归一化后的空洞壳层数密度. 从左至右为3个不同大小区间内的空洞, 灰色点线代表星系样本平均密度.

Fig. 3 Comparison of mean density profile of different type voids. Upper 3 panels and lower 3 panels show “collapsed” voids and “expanded” voids respectively, the abscissa shows normalized distance from voids shell to voids center, and the ordinate indicates galaxy number density of the voids shell normalized by the average galaxy number density. There are three different void sizes ranging from left to right, grey dotted lines show the mean density of whole galaxy sample.

图4中我们统计了“膨胀型”和“塌缩型”空洞的椭率, 横坐标代表空洞的有效半径, 实线代表平均值, 误差棒表示 $1\sigma$ 的误差. 可以看到两种类型空洞的椭率差异并不明显, 其椭率值都随空洞的增大而减小. 从统计的均值上看, “膨胀型”空洞的平均椭率要高于“塌缩型”空洞, 也就是说“膨胀型”空洞较“塌缩型”空洞更扁, 我们认为“膨胀型”空洞更扁的原因在于其自身处于低密环境中, 空洞墙密度低且有向外膨胀的趋势, 更容易与周围的空洞融合贯通, 从而使其椭率增大.

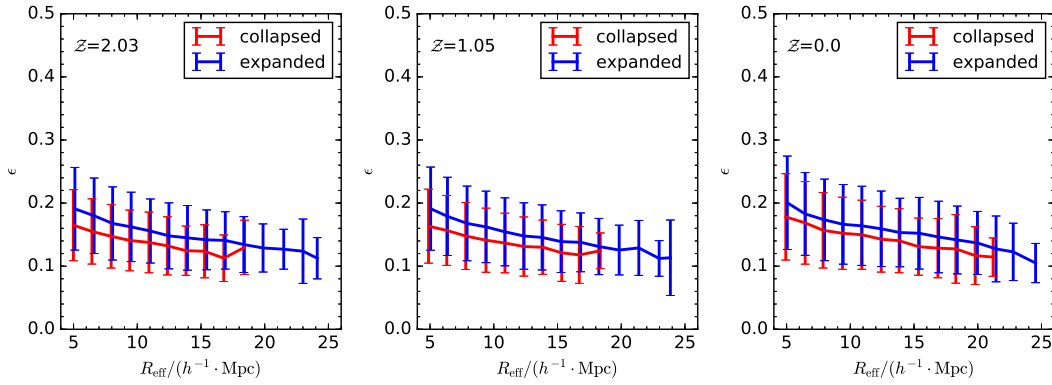


图 4 不同红移处不同类型空洞的椭率分布, 红线和蓝线分别为“塌缩型”空洞和“膨胀型”空洞的椭率平均值, 误差棒表示标准差.

Fig. 4 The ellipticity distribution of different type voids at different redshifts. Red lines and blue lines show the mean ellipticity of “collapsed” voids and “expanded” voids respectively, the error bar represents standard error.

#### 4.2 红移畸变对空洞产生的影响

为了探索红移畸变对空洞产生的具体影响, 我们利用实空间中的空洞去匹配红移空间中的空洞, 这样便能得到单个空洞在红移空间和实空间中的特征, 虽然红移畸变会导致所匹配到的空洞示踪星系不完全相同, 但通过对比空洞在两种空间中的性质差异, 将有助于我们更好地从观测到的空洞中提取真实的宇宙学信息, 进而更好地理解真实的宇宙. 由于红移空间和实空间中的星系样本相同, 因此我们用空洞成员星系进行匹配; 能满足匹配条件的空洞我们就认为能在实空间和红移空间中找到空洞对应体, 红移空间中不能成功匹配的空洞, 则表示其带有很少的真实宇宙信息. 具体算法是: 在红移空间中寻找和实空间空洞的位置相邻, 有效半径之差不超过20%, 并且所共同拥有的成员星系数目占红移空间中空洞星系数的40%以上的空洞, 即红移空间和实空间中每一对能匹配的空洞应当满足:  $|C^r - C^s| \leq R_{\text{eff}}^s + R_{\text{eff}}^r$ ,  $|R_{\text{eff}}^s - R_{\text{eff}}^r| \leq 20\% R_{\text{eff}}^s$ ,  $N_I^r \cap N_I^s \geq 40\% N_I^s$ ,  $C$ 代表空洞的中心位置, 下标I表示空洞成员星系的唯一标识, 选择20%和40%作为限制参数是为了让红移空间中的空洞能尽可能多地保留实空间空洞的信息, 并能满足统计要求.

按照上述算法匹配到总的空洞数目占实空间空洞样本的35%–44%; 其中“膨胀型”占匹配空洞数为54%–57%. 匹配空洞在红移空间和实空间中对应的大小如图5, 横坐标表示实空间中空洞的有效半径, 纵坐标代表匹配到的红移空间中的空洞有效半径, 红点为“塌缩型”空洞, 蓝点为“膨胀型”空洞, 黑色虚线表示匹配空洞的有效半径在红移空间和实空间中相等. 对于红移空间中匹配空洞而言, 大部分“塌缩型”空洞受到红移畸变影响使有效半径减小, 而“膨胀型”空洞只有50%左右会因红移畸变而变大, 空洞在实空间中的有效半径大于红移空间中的有效半径的比例如右下角子图所示, 横坐标为实空间空洞的有效半径, 纵坐标表示数目比, 可以看到“塌缩型”空洞在红移空间中半径减小的比例在各有效半径处几乎都占一半以上, 而“膨胀型”空洞在红移空间中有效半径减小则以中小型空洞为主; 同时有一些“塌缩型”和“膨胀型”空洞有效半径大小受红移畸变表现出相反的结果, 这可能与我们的空洞分类条件并不严格有关, 比如我们到的一个半径



为 $10.88 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 的“膨胀型”空洞中, 墙附近向空洞中心运动的星系数目占墙附近总星系数目的55%, 而向墙外运动的星系数目只占45%.

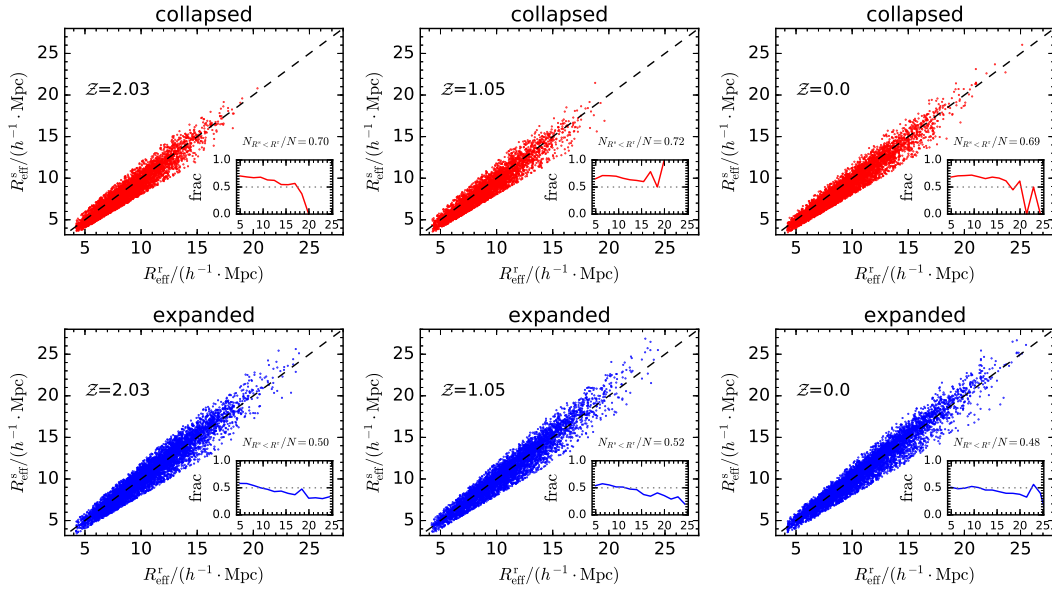


图5 匹配空洞在实空间和红移空间中的尺度分布. 上3图为“塌缩型”空洞, 下3图为“膨胀型”空洞, 横坐标为空洞在实空间中的有效半径, 纵坐标为匹配空洞在红移空间中的有效半径. 右下角标注表示红移空间中的有效半径小于实空间有效半径的空洞所占比值, 黑色虚线代表空洞有效半径在红移空间和实空间中相等. 子图纵坐标表示空洞在实空间中的半径大于红移空间中的半径的数目占比, 横坐标表示空洞在实空间的有效半径.

Fig. 5 The size distribution of matched voids in real space and in redshift space. Upper 3 panels present “collapsed” voids, lower 3 panels present “expanded” voids, abscissa indicates voids effective radius of the real space, ordinate indicates voids effective radius of the redshift space, labels in the lower right show the fraction of the matched voids whose effective radius in redshift space less than in real space, black dashed lines represent voids’ effective radius in real space are equal to the voids’ effective radius in redshift space. In the subgraph, the ordinate shows the number fraction of voids whose radius in real space is larger than that in redshift space, and the abscissa shows voids effective radius in real space.

图6中我们给出不同有效半径处匹配到的空洞数目占比, 左图为在红移空间中匹配到的空洞数目( $N^s(\text{matched})$ )与空洞总数目的比值; 中图为在实空间中匹配到的空洞数目( $N^r(\text{matched})$ )与空洞总数目的比值; 右图为实空间中匹配到的“膨胀型”(“塌缩型”)空洞数目( $N_k^r(\text{matched})$ )与总的“膨胀型”(“塌缩型”)空洞数目( $N_k^r$ )的比值, 下标k代表“膨胀型”空洞或者“塌缩型”空洞, 分别用点线或实线表示. 从图中可以看到能匹配空洞比例与空洞尺度有关, 空洞尺度越大, 能匹配的概率就越高, 匹配空洞与空洞的类型没有显著关系.

我们对比了两种空间中已经匹配了的空洞性质, 探索红移畸变对已匹配空洞产生的影响. 图7中给出了两种空洞的密度轮廓受到红移畸变的影响, 实线和虚线分别代表两种类型空洞的密度轮廓平均值, 红色和蓝色则表示红移空间和实空间. 从空洞尺度上看, 大空洞受到红移畸变影响比较小, 小空洞受到的影响较大; 从空洞类型上看, “塌缩型”空洞受红移畸变影响大, 而“膨胀型”空洞受到的影响则比较小; 从时间演化上看, 红移空间中的空洞墙密度随时间演化而逐渐小于实空间. 由于红移畸变会造成运动星系位置的重新

分布, 因此空洞受到畸变的影响不仅和其组成星系的位置分布有关, 还与星系的运动速度和空洞的大小有关.

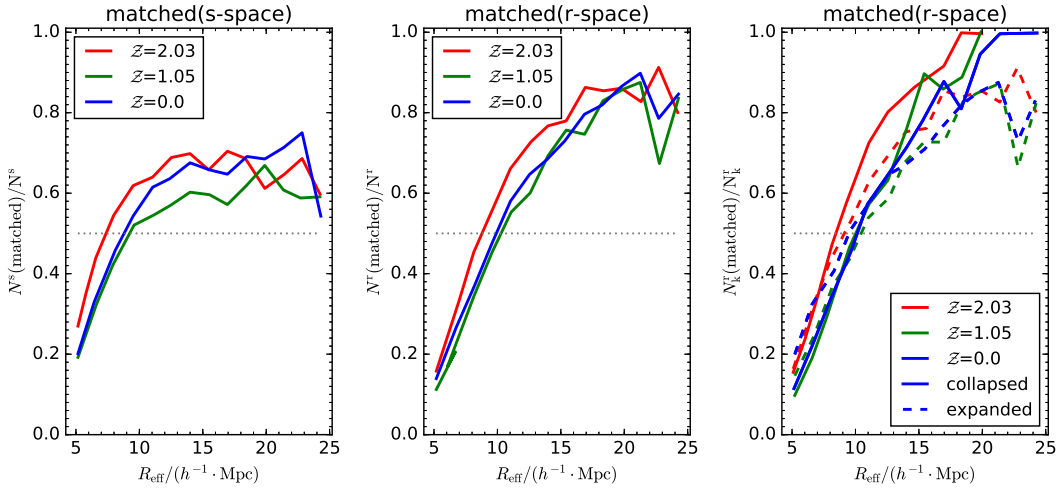


图 6 不同红移下匹配空洞占总空洞的比值. 左图和中图分别代表红移空间和实空间, 右图为实空间中匹配到的“膨胀型” (“塌缩型”) 空洞与总的“膨胀型” (“塌缩型”) 空洞的比例, 虚线代表“膨胀型” 空洞, 实线代表“塌缩型” 空洞, 灰色点线值为 0.5.

Fig. 6 The fraction of matched voids to total voids at different redshifts. Left panel and middle panel shows results in redshift space and in real space respectively, right panel indicates the fraction of matched “expanded” (“collapsed”) voids in real space, solid lines describe “collapsed” voids and dashed lines describe “expanded” voids, the value of grey dotted lines are 0.5.

我们用  $\mathcal{V}$  代表空洞的径向速度轮廓, 如图 8 所示. 若空洞壳层周围的星系整体向空洞中心运动, 则空洞壳层在红移空间中的密度一般比实空间高, 而如果整体向远离空洞中心的方向运动, 则壳层在红移空间中的密度更低, 但这种效应在不同的条件下会产生不同的结果; 对于“塌缩型”小空洞来说, 空洞尺度小, 向空洞中心运动的星系在红移空间沿空洞中心交叉翻转, 因此空洞内部密度变化不会很大; 对于中型大型“塌缩型”空洞来说, 空洞内部壳层朝墙运动的速度从高红移到低红移逐渐减小, 因此红移空间中的空洞内部密度轮廓在高红移处稍低于实空间, 而在低红移处要略微高于实空间, 这种轻微的改变是由星系的运动速度和空洞本身的大小决定. 对于“膨胀型”空洞而言, 空洞星系运动造成的红移畸变相对于空洞大小并不明显, 所以密度轮廓差异较小; 但对“塌缩型”空洞的墙外来说, 壳层整体向空洞中心运动速度大, 因此红移空间中的空洞墙外密度显著高于实空间. 我们发现对于“塌缩型”空洞, 其空洞墙上的演化与速度曲线的红移畸变效应相悖, 通过研究发现, 空洞墙附近的星系从高红移到低红移, 星系的运动速度弥散逐渐变大, 红移畸变会将空洞墙上的星系投影到周围环境中, 从而使得红移空间中的空洞墙密度随红移减小而逐渐低于实空间.

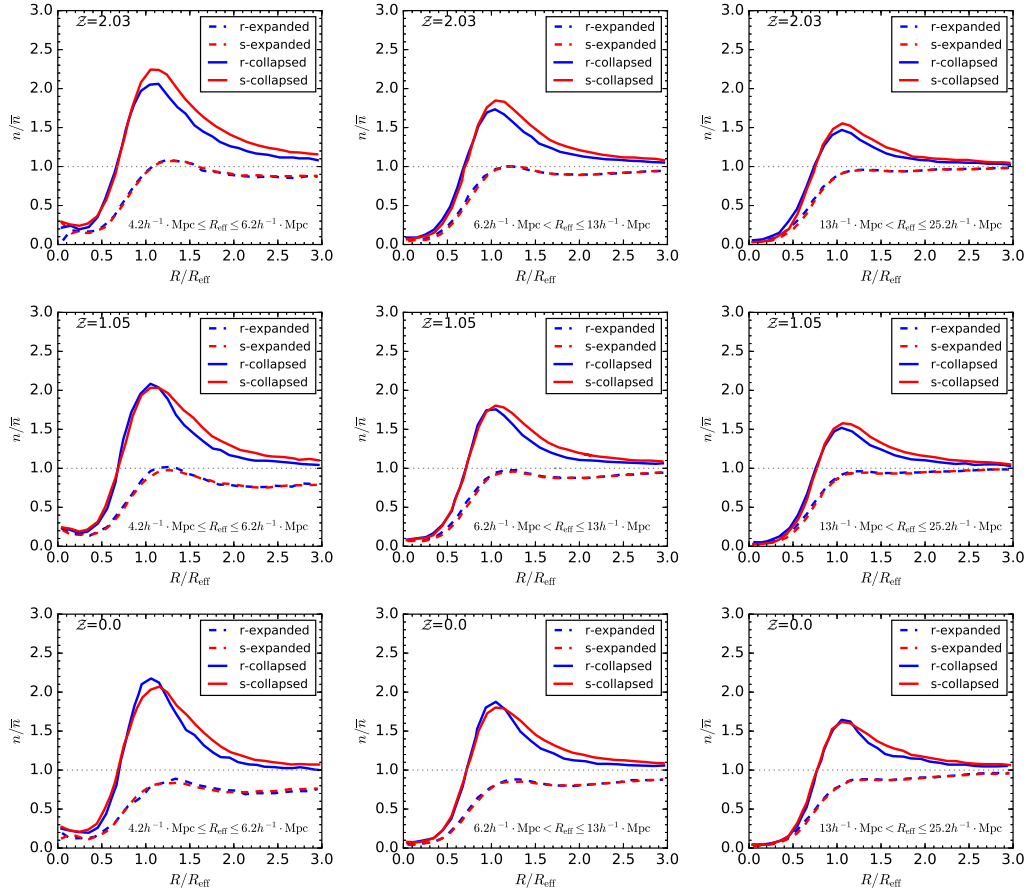


图 7 两种空间中匹配空洞的平均密度轮廓. 实线和虚线分别代表“塌缩型”与“膨胀型”空洞, 蓝线和红线分别代表实空间和红移空间.

Fig. 7 The mean density profile of matched voids in two spaces. Solid lines and dashed lines indicate “collapsed” and “expanded” voids respectively in two spaces, blue lines and red lines represent real space and redshift space respectively.

### 4.3 匹配空洞和未匹配空洞的对比

在实际观测中, 如果我们能确定那些受红移畸变影响小而能匹配到实空间的空洞, 我们便能利用这些空洞来提取部分宇宙学信息, 然而根据算法红移畸变会产生一批在实空间中无法匹配的空洞, 从而引入虚假信息. 许多研究利用观测到的密度场来尝试还原宇宙的真实物质分布<sup>[45–46]</sup>, 但这种利用密度重构速度场的方法并不直接. 我们打算利用模拟数据中匹配的空洞和未匹配的空洞的统计特征来做对比, 以说明匹配空洞和未匹配空洞的特征, 这里未匹配空洞有效半径范围与匹配空洞保持一致.

图9中我们给出红移空间和实空间中匹配空洞和未匹配空洞的平均密度轮廓, 实线代表已匹配空洞, 虚线代表未匹配空洞, 蓝线为实空间, 红线为红移空间. 可以看到在红移空间中未匹配空洞其平均密度轮廓要整体高于匹配空洞, 并且这种差别会随着红移的减小而增加; 这种趋势也出现在实空间中的中小型空洞中, 但对于实空间中的大型空洞而言, 未匹配空洞相比匹配空洞, 其墙内的平均密度轮廓要更低, 墙外更高. 由于未匹配

空洞受红移畸变影响剧烈,那么在实空间中这些空洞的运动应当与匹配空洞的运动有所差别.图10中我们给出了实空间中匹配与未匹配空洞的速度轮廓,可以看到未匹配到的中小型空洞其周围的星系速度要比匹配空洞向空洞中心的运动速度更大;对大型空洞来说,空洞内部星系运动相差不大,但空洞墙外的星系运动则有较大变化.我们认为对未匹配到的中小型空洞来说,空洞成员星系主要向空洞内部流动,并且速度更大,红移畸变所造成的星系位置变化更加明显,从而使实空间中这些组成空洞结构的成员星系在红移空间中变得更加分散.一方面是利用生成的维诺体元密度梯度寻找空洞的算法难以在此处实现;另一方面,我们的匹配算法在附近找到符合条件的空洞也较为困难.对于大空洞来说,未匹配的空洞内部密度较低内部成员星系少,在和匹配空洞相近的速度条件下受到的影响更大,能成功匹配的概率也较低.

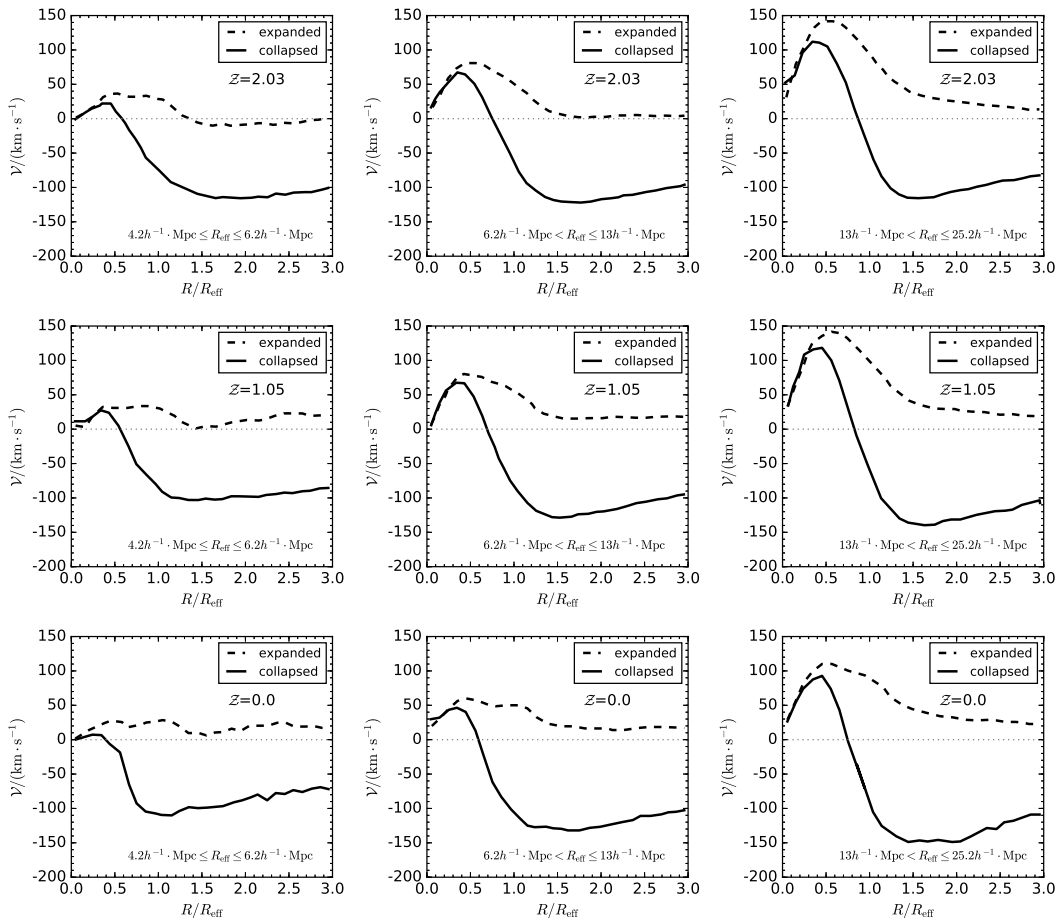


图 8 两种类型空洞的径向速度轮廓,实线为“塌缩型”空洞,虚线为“膨胀型”空洞,灰色点线值为0.当速度大于0或小于0时,该壳层处的星系可以被认为是远离空洞中心或朝向空洞中心的方向运动,绝对值越大代表运动速度越大.

Fig. 8 The radial velocity profile of two types of voids. Solid lines present “collapsed” voids, dashed lines present “expanded” voids, the value of grey dotted lines are 0. Galaxies in this shell can be considered moving depart from or head towards voids’ center when velocity is larger than 0 or less than 0. The absolute value is bigger, the galaxies move faster.

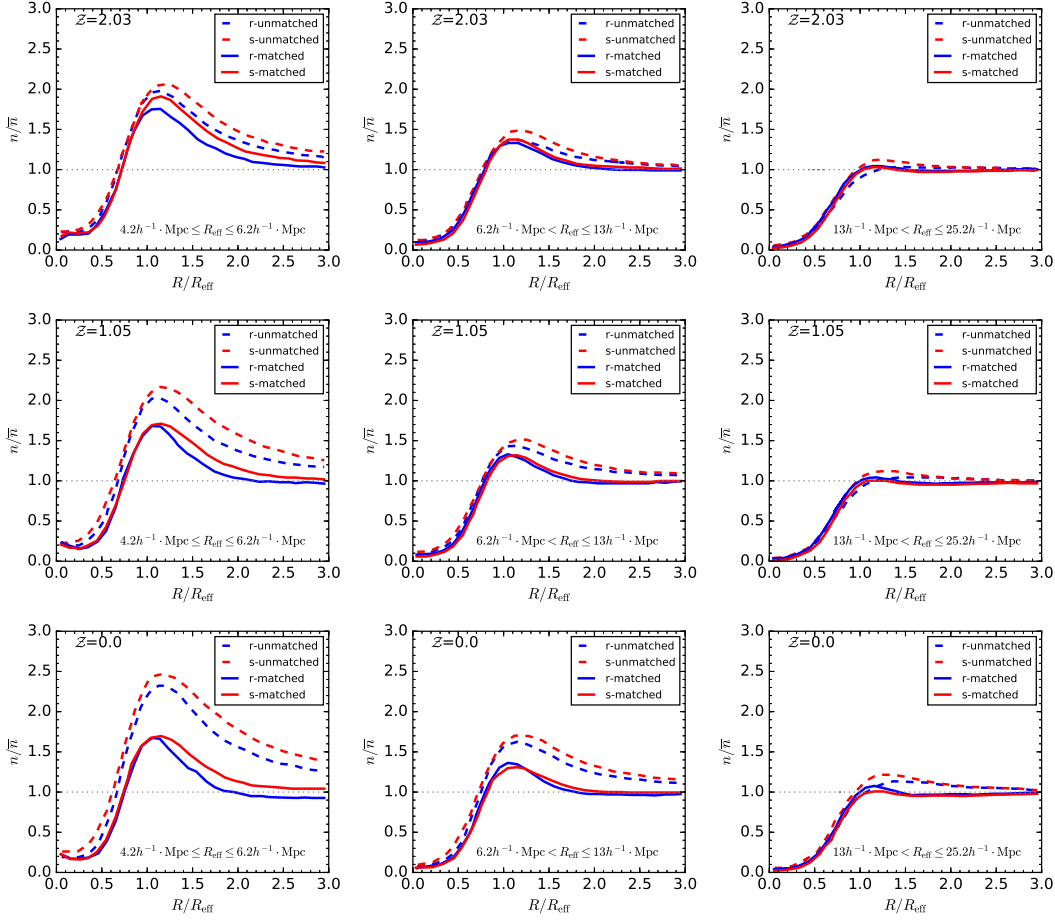


图9 类似于图7, 此图为实空间和红移空间中匹配空洞(实线)和未匹配空洞(虚线)的平均密度轮廓, 蓝线和红线分别代表实空间和红移空间。

Fig. 9 Same as Fig. 7, picture shows the mean density profile of matched (solid line) and unmatched (dashed line) voids in real space and redshift space, blue lines and red lines represent real space and redshift space respectively.

## 5 结论

本工作中, 我们利用半解析模型产生的3个不同红移的模拟星表作为研究的星系样本, 利用VIDE算法找出样本空间中的空洞, 根据空洞墙周围的星系运动情况将空洞划分成“膨胀型”和“塌缩型”, 并对这两种类型的空洞作出统计比较. 从统计结果上看, “塌缩型”空洞的平均密度轮廓高于“膨胀型”空洞. 这种趋势与利用密度划分的R型和S型空洞相近<sup>[33]</sup>; 我们粗略地发现了这两种类型空洞的演化趋势不同, 即“膨胀型”空洞在演化中其空洞墙、空洞内部的星系数密度都在减小, 而“塌缩型”空洞在演化中空洞内部星系数密度随时间减小, 空洞墙上的密度却随时间增加; “膨胀型”空洞墙上的密度低, 而又处于低密环境中, 更容易和邻近的空洞融合贯通, 因此“膨胀型”空洞的椭率比“塌缩型”空洞更大.

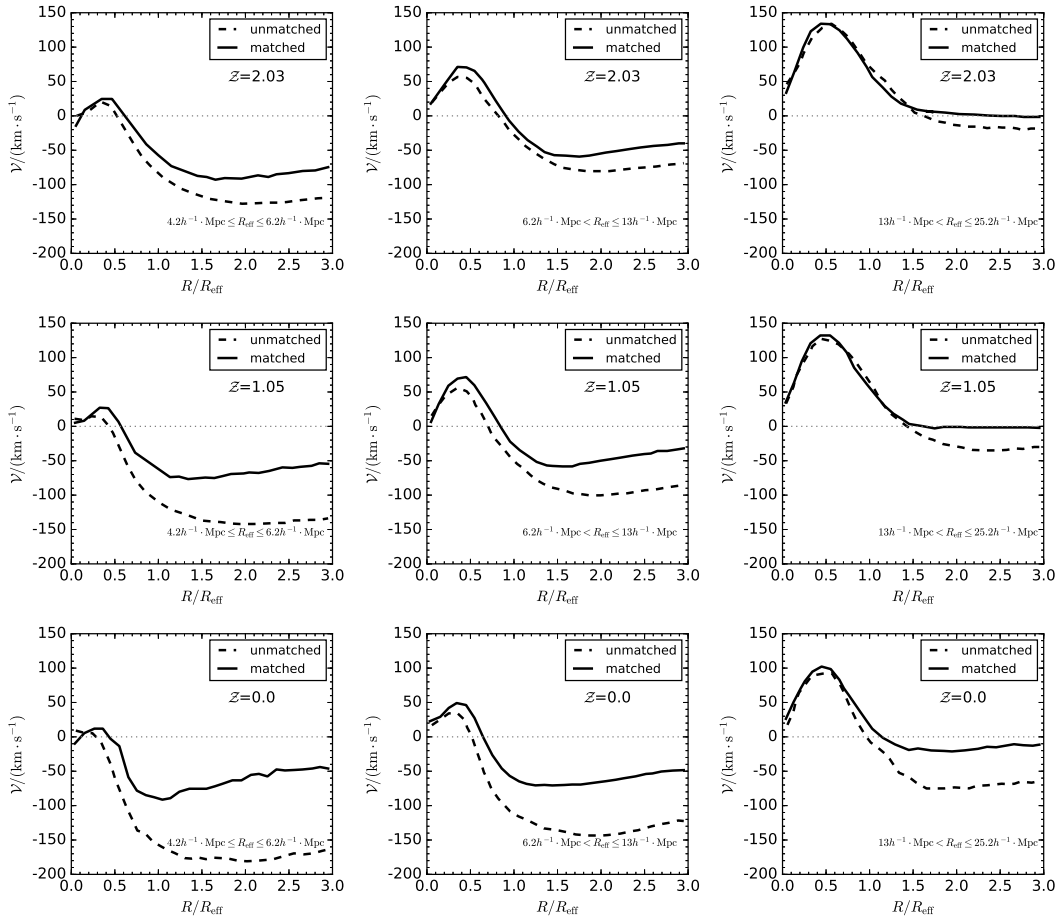


图 10 类似于图8, 图中为实空间中匹配空洞(实线)和未匹配空洞(虚线)的平均速度轮廓。

Fig. 10 Same as Fig. 8, panels describe the mean velocity profile of matched voids (solid lines) and unmatched voids (dashed lines) in the real space.

红移畸变改变了星系样本的位置分布, 对空洞的数目分布、密度轮廓都会产生影响, 与实空间相比, 红移空间中的小空洞数目更少, 大空洞的数目更多. 我们使用匹配算法发现大空洞更容易匹配成功, 小空洞则与之相反, 因此在红移空间中我们应当选择  $10 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$  (5倍的粒子平均间隔) 以上的空洞作为探索宇宙真实结构的空洞样本, 因为这种有效半径较大的空洞能匹配到实空间中的几率更高. 利用匹配空洞, 我们分别统计了“塌缩型”和“膨胀型”空洞受红移畸变的影响, 发现红移畸变对“膨胀型”空洞的密度轮廓影响小; 对“塌缩型”空洞的墙以及墙以外的密度影响大, 而对其内部密度影响小.

利用匹配算法筛选出的空洞和未匹配空洞相比, 匹配到的中小型空洞的平均密度轮廓要低于未匹配空洞; 在大型空洞中, 匹配空洞其内部星系密度更高, 空洞墙以外密度更低. 从速度轮廓上看, 未匹配到的中小型空洞其空洞内部和空洞墙周围的星系向空洞中心运动的速度更大, 而大型空洞中空洞墙外的星系向空洞中心运动的速度更大. 我们在观测中要尽量挑选尺度大的空洞来提取宇宙信息, 这些空洞受到的红移畸变影响比较小, 从而能获得更多实空间中宇宙物质分布的信息.

**致谢** 感谢康熙老师和李国亮老师对本工作的指导, 感谢聂麟、韦成亮的技术支持和讨论, 感谢国家基础科学数据中心模拟数据库的支持.

### 参考文献

- [1] Cautun M, van de Weygaert R, Jones B J T, et al. *IAUS*, 2016, 308: 47
- [2] Rozo E, Rykoff E S, Bartlett J G, et al. *arXiv:1302.5086*
- [3] Tinker J L, Sheldon E S, Wechsler R H, et al. *ApJ*, 2012, 745: 16
- [4] Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. *AJ*, 1998, 116: 1009
- [5] Rezaei Z. *ApJ*, 2020, 902: 102
- [6] Lee J, Park D. *ApJ*, 2009, 696: L10
- [7] Pisani A, Sutter P M, Hamaus N, et al. *PhRvD*, 2015, 92: 083531
- [8] Gregory S A, Thompson L A. *ApJ*, 1978, 222: 784
- [9] York D G, Adelman J, Anderson J E Jr, et al. *AJ*, 2000, 120: 1579
- [10] Colless M, Dalton G, Maddox S, et al. *MNRAS*, 2001, 328: 1039
- [11] Abbott T, Aldering G, Annis J, et al. *arXiv:stro-ph/0510346*
- [12] Sánchez C, Clampitt J, Kovacs A, et al. *MNRAS*, 2017, 465: 746
- [13] Zandivarez A, Merchán M E, Padilla N D. *MNRAS*, 2003, 344: 247
- [14] Mao Q Q, Berlind A A, Scherrer R J, et al. *ApJ*, 2017, 835: 161
- [15] Chantavat T, Sawangwit U, Wandelt B D. *ApJ*, 2017, 836: 156
- [16] Patiri S G, Betancort-Rijo J E, Prada F, et al. *MNRAS*, 2006, 369: 335
- [17] Nishizawa A J. *PTEP*, 2014, 2014: 06B110
- [18] Kovács A, Sánchez C, García-Bellido J, et al. *MNRAS*, 2019, 484: 5267
- [19] Cai Y C, Padilla N, Li B J. *MNRAS*, 2015, 451: 1036
- [20] Verza G, Pisani A, Carbone C, et al. *JCAP*, 2019, 2019: 040
- [21] Sutter P M, Pisani A, Wandelt B D, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 2983
- [22] Sutter P M, Lavaux G, Wandelt B D, et al. *ApJ*, 2012, 761: 187
- [23] Massara E, Villaescusa-Navarro F, Viel M, et al. *JCAP*, 2015, 2015: 018
- [24] Schuster N, Hamaus N, Pisani A, et al. *JCAP*, 2019, 2019: 055
- [25] Kreisch C D, Pisani A, Carbone C, et al. *MNRAS*, 2019, 488: 4413
- [26] Burenin R A, Vikhlinin A A. *AstL*, 2012, 38: 347
- [27] Batista R C, Marra V. *JCAP*, 2017, 2017: 048
- [28] 赵飞, 罗煜, 韦成亮. *天文学报*, 2019, 60: 34
- [29] Kaiser N. *MNRAS*, 1987, 227: 1
- [30] Zu Y, Zheng Z, Zhu G T, et al. *ApJ*, 2008, 686: 41
- [31] Correa C M, Paz D J, Sánchez A G, et al. *MNRAS*, 2021, 500: 911
- [32] Pisani A, Sutter P M, Wandelt B D. *arXiv:1506.07982*
- [33] Ceccarelli L, Paz D, Lares M, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 1435
- [34] Neyrinck M C. *MNRAS*, 2008, 386: 2101
- [35] Nadathur S, Hotchkiss S, Diego J M, et al. *MNRAS*, 2015, 449: 3997
- [36] Luo Y, Kang X, Kauffmann G, et al. *MNRAS*, 2016, 458: 366
- [37] Wang H Y, Mo H J, Yang X H, et al. *ApJ*, 2016, 831: 164
- [38] Wang H Y, Mo H J, Yang X H, et al. *ApJ*, 2014, 794: 94
- [39] Hinshaw G, Larson D, Komatsu E, et al. *ApJS*, 2013, 208: 19
- [40] Springel V, White S D M, Tormen G, et al. *MNRAS*, 2001, 328: 726
- [41] Wojtak R, Powell D, Abel T. *MNRAS*, 2016, 458: 4431
- [42] Lambas D G, Lares M, Ceccarelli L, et al. *MNRAS*, 2016, 455: L99
- [43] Ceccarelli L, Ruiz A N, Lares M, et al. *MNRAS*, 2016, 461: 4013
- [44] Ruiz A N, Paz D J, Lares M, et al. *MNRAS*, 2015, 448: 1471

[45] Erdoğdu P, Lahav O, Huchra J P, et al. MNRAS, 2006, 373: 45

[46] Shi F, Yang X H, Wang H Y, et al. ApJ, 2016, 833: 241

## The Influence of Redshift Distortion on the Cosmic Voids

WANG Lei<sup>1,2</sup> LUO Yu<sup>1,3</sup> WANG Lei<sup>1,3</sup> DAI Cai-ping<sup>1,3</sup>

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3 National Basic Discipline Public Science Data Center, Beijing 100190)

**ABSTRACT** In order to investigate redshift distortion effect on voids, VIDE (Void Identification and Examination toolkit) algorithm is used to find cosmic voids in real space and redshift space based on a mock galaxy catalog produced by the semi-analytical galaxy formation model. The voids can be divided into “collapsed” type and “expanded” type, according to the galaxy velocity on the void wall. The results show that the fraction of the “collapsed” voids decrease as the voids size grows, while “expanded” voids are contrary. The effective radius of two type voids differs by 20% in real space and mean radial density profile of “collapsed” void is significant higher than “expanded” voids. Using the member galaxies to match the voids in two spaces, the comparison of the voids number distributions of two space shows that the difference of voids number between them is related to the void size, and half of the voids in redshift space can not matched to the voids in real space. For the matched voids, the redshift distortion has stronger effect on the density profile of the “collapsed” voids; for the unmatched ones, their density profile is clearly different, and the infall movement of galaxies on their shell is more obvious in real space.

**Key words** cosmology: large-scale structure of universe, galaxies: distances and redshifts, methods: numerical