

# 物理科研实践期末成果总结

——2018 autumn semester

姓名：林渊野 学号：F17072910007 班级：F1707201

## Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Method</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Main Sequence</b>	<b>3</b>
3.1	SFR distribution . . . . .	3
3.2	Quench Cut . . . . .	4
3.3	MS at different $z$ . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Halo Property</b>	<b>5</b>
4.1	Fraction of Central Galaxy within Active Galaxy . . . . .	6
4.2	Halo Mass . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Metallicity</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>8</b>
6.1	Conclusion . . . . .	8
6.2	Question . . . . .	8
6.3	Future Improvement . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Appendix I</b>	<b>10</b>
7.1	Dex=0.1 . . . . .	10
7.2	Dex=0.3 . . . . .	11
7.3	Dex=0.5 . . . . .	12
7.4	Dex=0.7 . . . . .	13
7.5	Dex=1.0 . . . . .	14
7.6	Dex=1.5 . . . . .	15
<b>8</b>	<b>References</b>	<b>15</b>

# 1 Introduction

在宇宙天文学的研究范畴内，对于星系演化的过程，人们的研究工作目前还处于比较初步的范畴。相比较于大尺度宇宙结构，现在利用 CMG 等等技术，对宇观尺度上的演化有了较为深入认识，并且引入了参数描述这一过程；但对于星系演化的过程，其更为复杂，也更难以描述。

其主要的困难点在于，第一，观测结果十分有限；第二，模型建构难以进行，引入参数过多；事实上，我们对于每个星系，都只有现在观测者所接受到的数据，类比于一个胚胎的演化，到孩子长大的过程，我们现在能够得到的只是现在这一时刻，每一个处于胚胎或者人类的观测结果，相比于胚胎，我们可以通过对一个胚胎的演化进行追踪，从而研究其演化过程，而对于星系则不能如此，因为观测者的观测时间尺度远小于演化时间尺度，因此从观测角度对其进行研究是十分困难的。

从而人们希望从另外一个角度对星系演化进行探究，利用流体模拟对星系形成过程进行探究；如果模拟的结果与已观测到的结果相符，可以认为这个模拟结果是可能正确的。再从模拟结果中得到其他信息(可观测的信息)，利用模拟结果对观测进行指导。如果再观测结果与模拟结果相符，则认为模拟结果仍是可信的；倘若再模拟结果与观测不符，则认为需对模拟进行修正。其最终目标是对模拟进行不断的修正，使得模拟结果与观测结果在足够多的观测维度下，始终是符合的。那么人们就可以通过对这个星系形成的模拟过程进行探究，从而找到一个研究星系形成的方法。

## 2 Method

我的研究主要是针对对于 EAGLE 模拟结果进行分析，主要研究的是星系形成速率 (Star Formation Rate) 与星系的性质进行探究，包括星系的恒星质量 (Stellar Mass)，星系的金属锋度 (Metallicity)，以及其所处的暗物质晕 (halo) 的性质差异。对中央星系与卫星星系，以及对高星系形成率与低星系形成率星系的性质的探究。

我目前的研究主要针对以下模拟结果以及参数：

模拟模型：RefL      BoxSize: 100Mpc      initial Particle Number:1504<sup>3</sup>

Field	Unit	Description
GroupID	-	The number to identifier the FoF group
Redshift	-	Redshift at which the properties are computed
SnapNum	-	Snapshot number containing that halo
GroupMass	$M_{sun}$	Total Friends-of-Friends mass of the halo

Table 1: *RefL0100N1504<sub>FOF</sub>*

利用上述参数表，我的研究步骤如下：

1. **Find the MS:** 利用  $MassType_{star}$  与 StarFormationRate 条目，找到星系形成速率与恒星总质量的 Main Sequence, 并定义在 MS 上方的星系为 Galaxies above MS; 定义在 MS 下方的星系为 Galaxies below MS; 并通过 Quench Cut 定义 Active Galaxy(关于 Galaxies Above 与 Below 的定义范围在 Active 之内)
2. **Halo Property:** 利用 *SubGroupNumber* 条目探究 Central Galaxy 的占比; 利用 *GroupMass* 条目探究 Central Galaxies 的 StellarMass 与 HaloMass 之间的关系
3. **Metallicity:** 利用  $SFOxygen$  与  $SFHydrogen$  , 计算金属锋度与 StellarMass 的关系

Field	Unit	Description
GalaxyID	-	The number to identifier each galaxy
LastProgID	-	GalaxyID of the last progenitor of this galaxy
TopLeafID	-	GalaxyID of the last progenitor in the main progenitor branch
DescendantID	-	GalaxyID of the descendant of this galaxy
GroupID	-	The number to identifier the FoF group
Redshift	-	Redshift at which these properties
SnapNum	-	Snapshot number at which these properties are computed
SubGroupNumber	-	To identify the galaxy: Central Galaxy = 0; Otherwise > 0
$CentreOfMass_x$	cMpc	Co-moving position of the centre of mass.
$CentreOfMass_y$	cMpc	
$CentreOfMass_z$	cMpc	
$MassType_{star}$	$M_{sun}$	Total stellar mass.
StarFormationRate	$M_{sun}yr^{-1}$	Total star formation rate before any mass loss
$SF_{Hydrogen}$	-	Hydrogen particle mass fraction within Star-Forming Gas
$SF_{Oxygen}$	-	Oxygen particle mass fraction within Star-Forming Gas

Table 2: *RefL0100N1504<sub>subhalo</sub>*

### 3 Main Sequence

在天体观测中，结果显示 StellarMass 与 StarFormationRate 存在一个比较强的依赖关系，根据观测结果可以看到 StellarMass-StarFormationRate 中存在一个对角的 MainSequence，下面为尝试在 EAGLE 模拟中找到不同  $z$  处对应的 Main Sequence

#### 3.1 SFR distribution

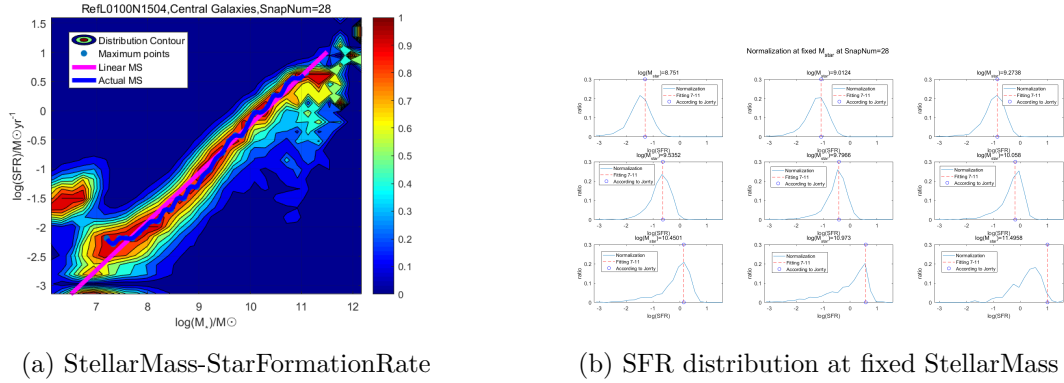


Figure 1: Main Sequence

如图一 (a) 所示，x 轴对应的是星系的恒星质量 ( $\log_{10}$ )，y 轴对应的是星系的恒星形成速率 ( $\log_{10}$ )，我设置 StarFormationRate=0 的 Galaxies 的 y 值为 -10；我对 StellarMass 进行分 Bin，set  $Width_{Bin} = 0.3$ ；图中颜色设置方式如图 b 所示，对于固定的 StellarMass(在一个 Bin 内)，对 SFR 的分布进行 Normalize，找到对应分布的分值对应的星系数量为  $Number_{Max}$ ，Ratio 定义为：

$$Ratio = Number_{sfr} / Number_{Max}$$

由此可以发现图 (a) 中，最大值点对应红色区域有一个对角线的分布，该分布就是我们想要找到的 Main Sequence

对应的蓝色的点为在每一个 Bin 中找到的 Maximum Point，紫色的直线为利用最大值点进行线性拟合找到的 Linear MS，蓝色的曲线为利用插值函数找到的经过每一个最大值点的 MS

图二 (b) 中对应的虚线为 Linear MS 与实际 MS 分布的差异，可以看到在高恒星质量端，分布的差别会比较大，这个结果在图一 (a) 中也能比较明显的看出

### 3.2 Quench Cut

利用 MS 我们可以在固定的恒星质量利用恒星形成速率对星系进行分类，将 Galaxy 分成 Above the MS 与 Below the MS；但是在分类之前，我们需要先定义活跃的星系 (Active Galaxy)，在图一 (b) 中可以看出，在 Galaxies Below the MS 的定义范围内，有很多低 sfr 的星系，对于这些星系我们认为是不重要的，因为这些星系的性质与高恒星形成率的星系有明显的不同，因此我们定义一个 Quench Cut，定义在 Cut 以外的星系为沉寂的，这类星系在之后的探究中会在第一步被剔除；

Quench Cut 的定义方法如下，利用插值函数法找到的 MS 分布，将函数曲线往下平移一定的数值，我们尝试定义不同的 cut 下，Active Galaxies 对应的 SFR distribution:

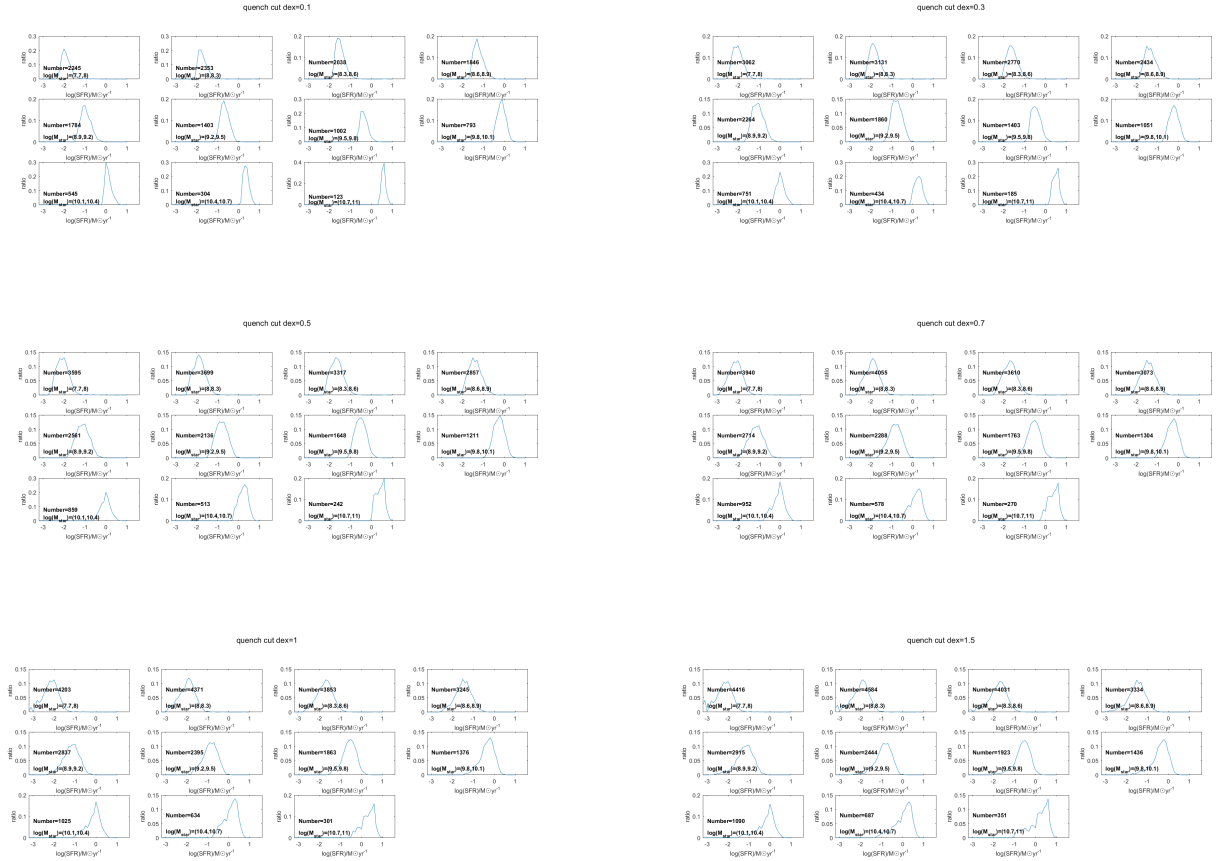


Figure 2: Different Quench Cut

可以看到在不同的 Cut 下的 SFR Distribution：我们想要的 cut 应该是这样的，在固定的 StellarMass 下，The Number of Galaxies Above the MS 与 Galaxies Below the MS 的数量尽可能接近，在这样的条件下，可以看到 0.7dex 与 1dex 的 cut 是比较理想的

### 3.3 MS at different z

根据以上对 Main Sequence 以及 Quenen Cut 的定义，可以 MS at different redshift:

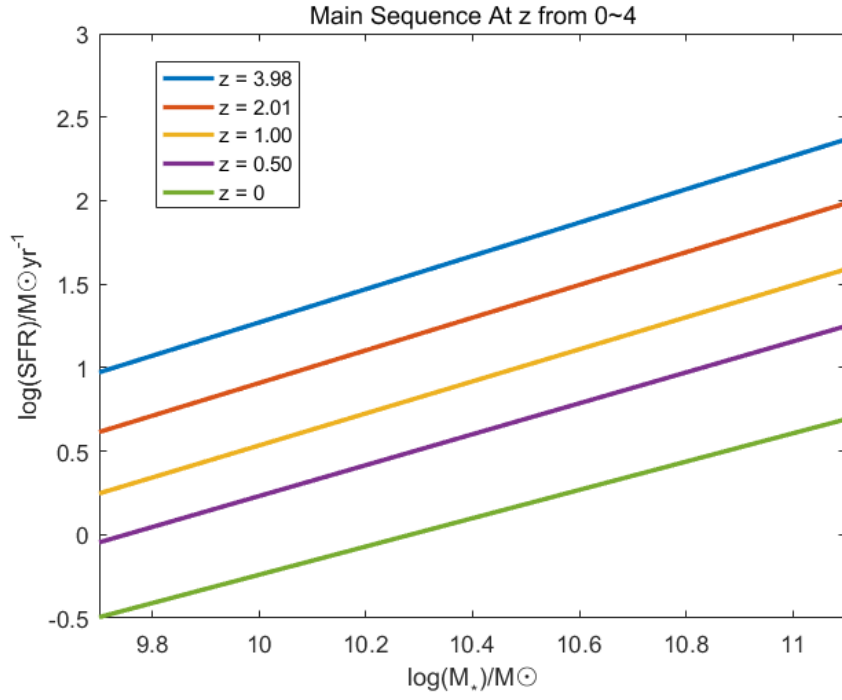


Figure 3: Main Sequence at different  $z$

如图三所示，可以看出，对于 high redshift 对应的 Main Sequence 分布更高，也就是说，随着时间的推移，在同一 StellarMass 的情况下，对应的 StarFormationRate 逐渐降低；拟合范围选取为 9.8-11.0：可观测的星系对应的 StellarMass 大部分位于这一范围内；

## 4 Halo Property

每一个星系都处于一个大的暗物质晕的结构中 (可以想象为果实在树上生长)，而在每一个暗物质晕中心有一个 Central Galaxy，通常认为 Central Galaxy 的性质与 Halo 的性质关系最为紧密，而 Satellite Galaxy 与 Halo 的性质则相对关系不大；

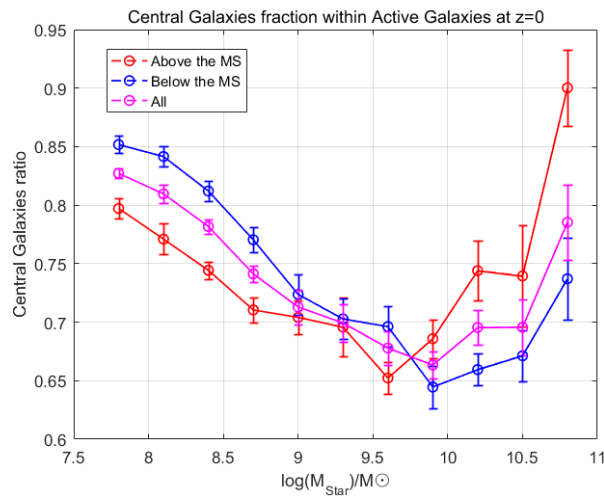


Figure 4: Central Galaxy Ratio

## 4.1 Fraction of Central Galaxy within Active Galaxy

如图四所示，是设置  $\text{quench cut dex}=0.7$  的情况下，对于活跃的星系，在不同的恒星质量下，中心星系所占的比例；红线对应的是 Above，蓝线对应 Below，粉线对应的是 All Galaxies；其中 ErrorBar 得出的方法如下，利用  $\text{RefL0100N1504}_{\text{subhalo}}$  中对应的  $\text{CentreOfMass}_x, \text{CentreOfMass}_y, \text{CentreOfMass}_z$ ，图中的 ErrorBar 的获得方法如图 1 所示：利用 Jackknife's Resampple Method：将宇宙分成八块相同的 Cubic：将每一小个 Cubic 除去，计算其他样本中的数据，利用这种方法得到八个数据：

$x_0$ : number of all active central galaxies

$y_0$ : the number of all active galaxies

$x_i$ : the central galaxies(active) in  $\text{cube}_i$

$y_i$  the active galaxies except in  $\text{cube}_i$

利用 Jackknife resample method 可以计算 Central Fraction Errorbar:

$$\theta_i = \frac{x_0 - x_i}{y_0 - y_i}; \bar{\theta} = \frac{1}{8} \sum (\theta_i)$$

$$se_{\hat{jack}} = \sqrt{\frac{n-1}{n} \sum (\theta_i - \bar{\theta})^2}$$

## 4.2 Halo Mass

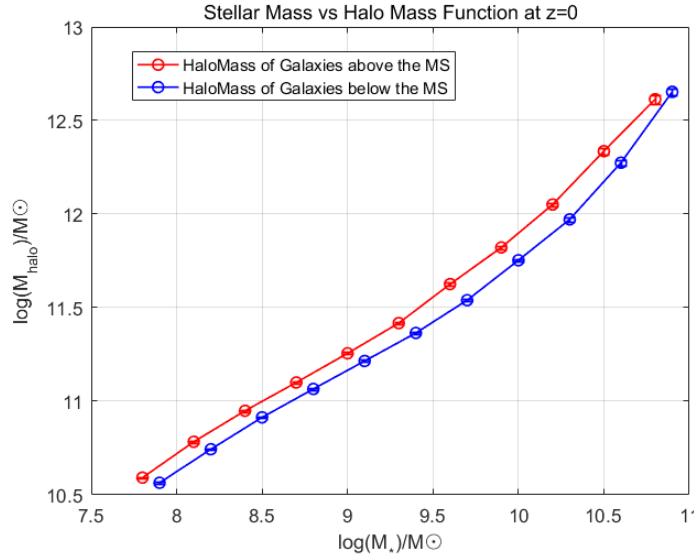


Figure 5: HaloMass-StellarMass Relationship

如图四 (b) 所示，横轴对应的为中心星系的恒星质量，纵轴对应的为中心星系所处的暗物质晕的质量，可以看到对于 Galaxy Above 对应的 HaloMass 在各个 bin 对应的平均值均要大于 Below 对应的值；这个方面是一个比较令人奇怪的点，因为在一般的星系模型中，由于 Feedback 等效应，对于处于较高质量暗物质晕中的 galaxies 的 StarFormationRate 会被一定程度上的抑制，因此在这种模型下的曲线应该是 Below 对应的 HaloMass 更高一些；当然影响 SFR 的效应远远不止 HaloMass 的 Feedback 这一种效应，但是 EAGLE 模拟下得到的该曲线是否与观测相符是一个十分值得验证的问题。

最为对比，可以简单的看一下中心星系和卫星系对应的 HaloMass-StellarMass 的点分布图：

如图六所示可以看到对于 Central Galaxy 有明显的相分离现象，而对于 Satellite 很明显二者之间关系不大，这与我们最初认为 Halo 的性质与 Central Galaxy 的性质更为紧密的假设是一

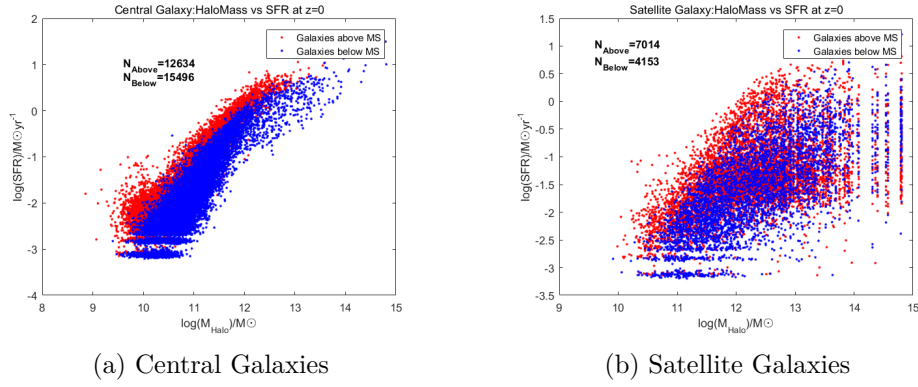


Figure 6: SFR-HaloMass Relationship

致的；

## 5 Metallicity

在宇宙观测学中，最主要的就是对光谱进行分析；因此对可以利用对接受谱线的分析可以很容易得到星系的金属丰度，因此研究 EAGLE 模拟中的金属丰度，并与实际观测进行对比也是一个很有意义的方面：在宇宙学的定义中，比 He 重的元素均定义为 Metal；对金属丰度 (Metallicity) 的定义如下：

$$Metallicity = 12 + \log_{10}\left(\frac{Particle_O}{Particle_H}\right)$$

其中  $Particle_O, Particle_H$  代表在 Star-Forming Gas 中 O 原子 (离子) 的数量与 H 原子 (离子) 的数量：

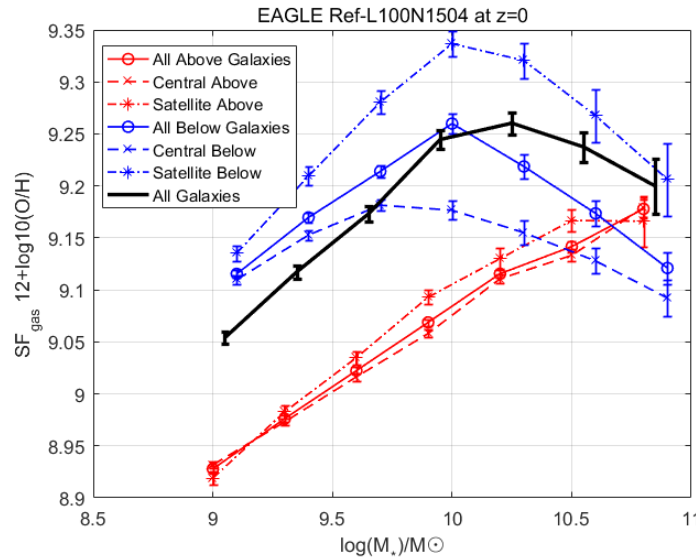


Figure 7: StellarMass-Metallicity Relationship

如图七所示，蓝线对应的为 Below，红线对应 Above 数据， $\times, *, o$  分别对应 Central, Satellite and All Galaxies，黑线对应的为所有 Active 星系的拟合结果；结果可以看出：

1. Below the MS 对应的金属丰度要明显高于 the Galaxies Above the MS



2. 对于 Galaxies Above the MS, 金属锋度的分布对于 CG 以及 SG 几乎没有区别; 比较令人惊异的是对于 Below, Satellite 的星系的金属锋度要明显高于 Central

## 6 Discussion

我的研究工作主要是基于通过 EAGLE 宇宙模拟结果的分析, 找到物理量之间的相关性, 并指导观测, 与结果进行对比, 从而验证模型的正确性, 并尝试对模型进行相关修正:

### 6.1 Conclusion

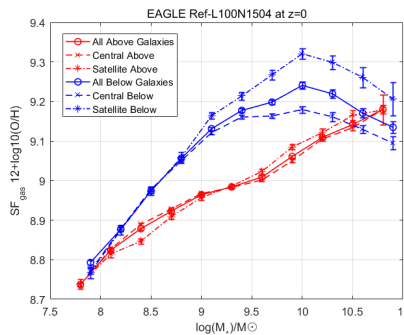
根据以上的结果, 我们得到的一些结论如下:

1. **Main Sequence:** 星系的恒星质量与恒星形成速率相图中存在一个 Main Sequence, 且随着时间的推移, MS 逐渐下降;
2. **Central Galaxies Ratio:** 活跃的星系中, 中心星系的占比比较大 (65% – 90%), 且在高质量端 (样本多), 高恒星形成率的中心星系占比比低恒星形成率高; 在低质量端则相反;
3. **Halo Mass:** 高恒星形成率中心星系对应的 Halo Mass 质量高于低恒星形成率中心星系;
4. **Metallicity:** 低恒星形成率星系对应的金属锋度要高于高恒星形成率的星系, 且在低恒星形成率的星系中, 卫星星系的金属分度与中心星系有较大的区别 (明显高于), 但在高恒星形成率中则几乎没有差别;

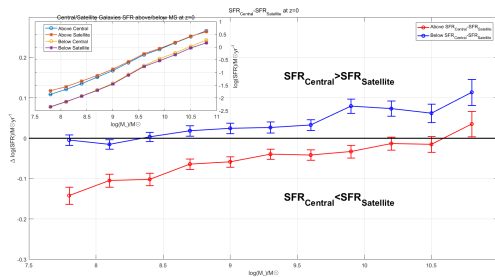
### 6.2 Question

在上述结果中, 比较值得探讨 (存疑) 的为 3、4 两点:

1. **Halo Mass:** 在一般的星系形成模型中, HaloMass 越高一般认为对应着模型结构更为成熟, 所对应的恒星形成速率应相对较低, 在附录中可以看出, 当我们改变 Quench cut 时, 若将 SFR 更低的星系纳入分析范围, 会发现蓝线 (Below) 逐渐上移, 也就意味着较低的 SFR 对应较高的 HaloMass, 与模型相符; 而 EAGLE 模拟结果显示, 高恒星形成速率的中心星系对应的 Halo Mass 更高, 这一点是十分值得探讨, 并且是可以与观测结果进行相关对比的;
2. **Metallicity:** 观测结果中显示, 对于低恒星形成率的星系, 卫星星系的金属锋度明显高于中心星系, 由于金属锋度与恒星形成速率有很强的相关性, 金属性越强对应的 SFR 越低, 一个猜想是在 StellarMass Bin 内, 卫星星系的平均 SFR 有可能低于中心星系



(a) Metallicity



(b) StarFormationRate

Figure 8: Metallicity-SFR

如图八 (b) 所示, 子图中展示的是 Above Central, Above Satellite, Below Central, Below Satellite 对应的 StellarMass-SFR 分布, 图中显示在低质量端, Above Central 的 SFR 要低



于 Satellite；而在高质量端二者相近；而在低质量端，Below Central 的 SFR 与 Satellite 相近，而在高质量端 Central 要高于 Satellite；对比左右两图，倘若假设 SFR 只与 Metallicity 相关，仍无法得到结论（对于 Above 区域的 Galaxy Metallicity 几乎没有区别）；

### 6.3 Future Improvement

1. 作 StellarMass-SFR 图时，由于 StellarMass Bin 具有一定的宽度，因此会有一些问题：在同一个 Bin 内最低恒星质量的星系与最高恒星质量的星系性质存在一定差异，一个 Improvement 的方法是，将 y 轴的  $\log_{10}(\text{SFR})$  可以改为  $\log_{10}(\text{sSFR}) = \log_{10}(\text{SFR}/\text{StellarMass})$ ，从而可以增加 Distribution 分布的有意义性；
2. 关于金属丰度的取值问题：由于在观测中 Aperture 是一定的，因此 EAGLE 中更有意义的数数据也应如此，可以选定一个星系中心，选择一固定大小的 Aperture，计算在该 Aperture 下的金属丰度，而不是计算整个星系（星系边界也为 EAGLE 模拟人为定义）的金属丰度；
3. 对于第二个 Question，目前的另外一个猜想可以认为是这样的，对于卫星星系，由于其受到 Halo 的 Feedback 效应，其会更少的吸收来自与 CGM 的气体 (Star-Forming fuel)，因此 H 元素的补充被切断，而内部仍然在不断的进行恒星形成的过程，从而使得卫星星系的 Metallicity 不断上升；验证该猜想的一个方法如下：可以探究卫星星系距离 Halo 中心的距离  $r_p$  与 Metallicity 的分布曲线，如果其为一正相关曲线，说明该猜想具有一定的科学性；

## 7 Appendix I

设置不同的 Quencut, 观察以上研究结果是否有明显变化: 设置 Dex 分别为 0.1,0.3,0.5,0.7,1.0,1.5:

### 7.1 Dex=0.1

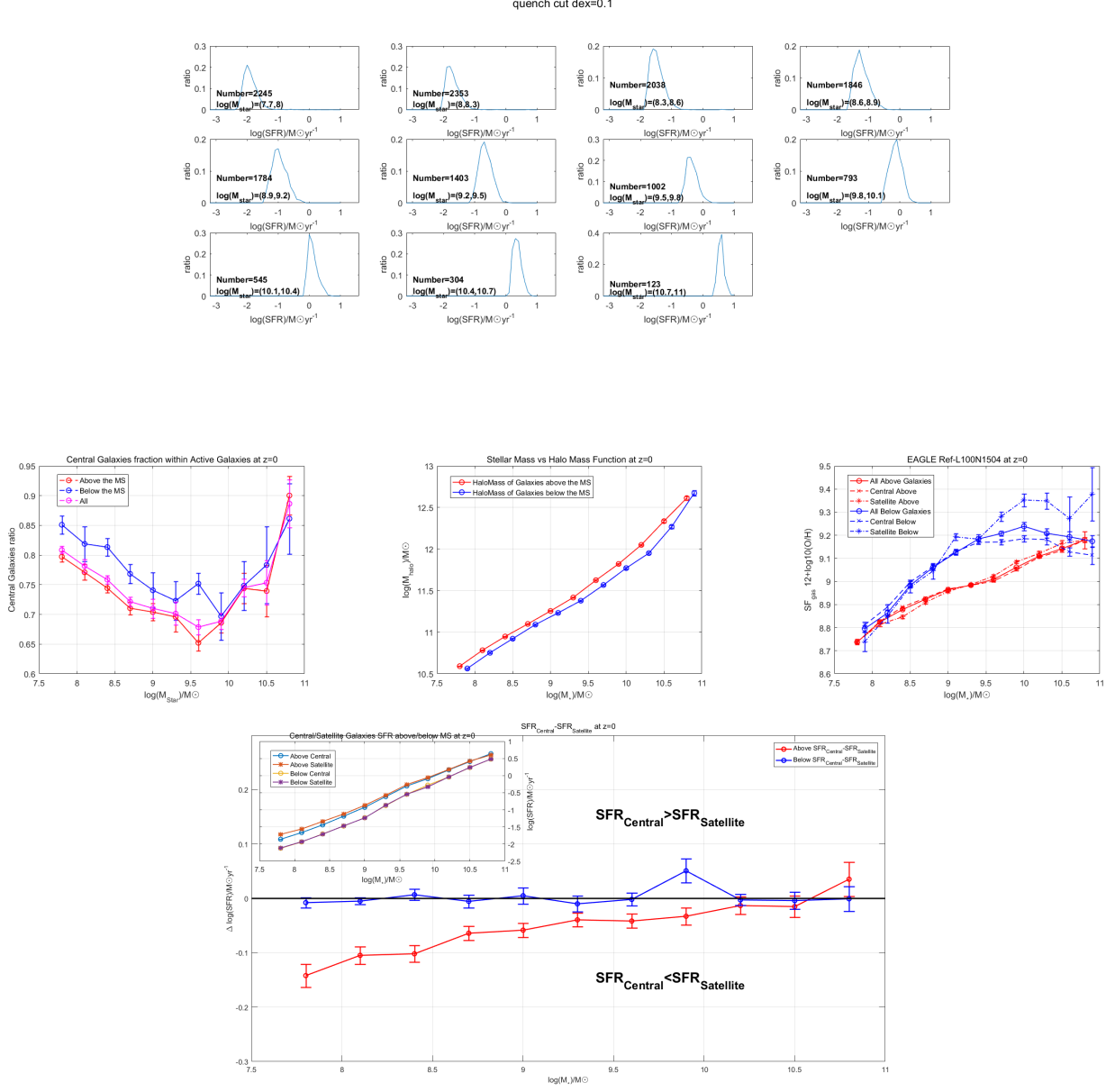


Figure 9: 0.1 Dex Below MS

## 7.2 Dex=0.3

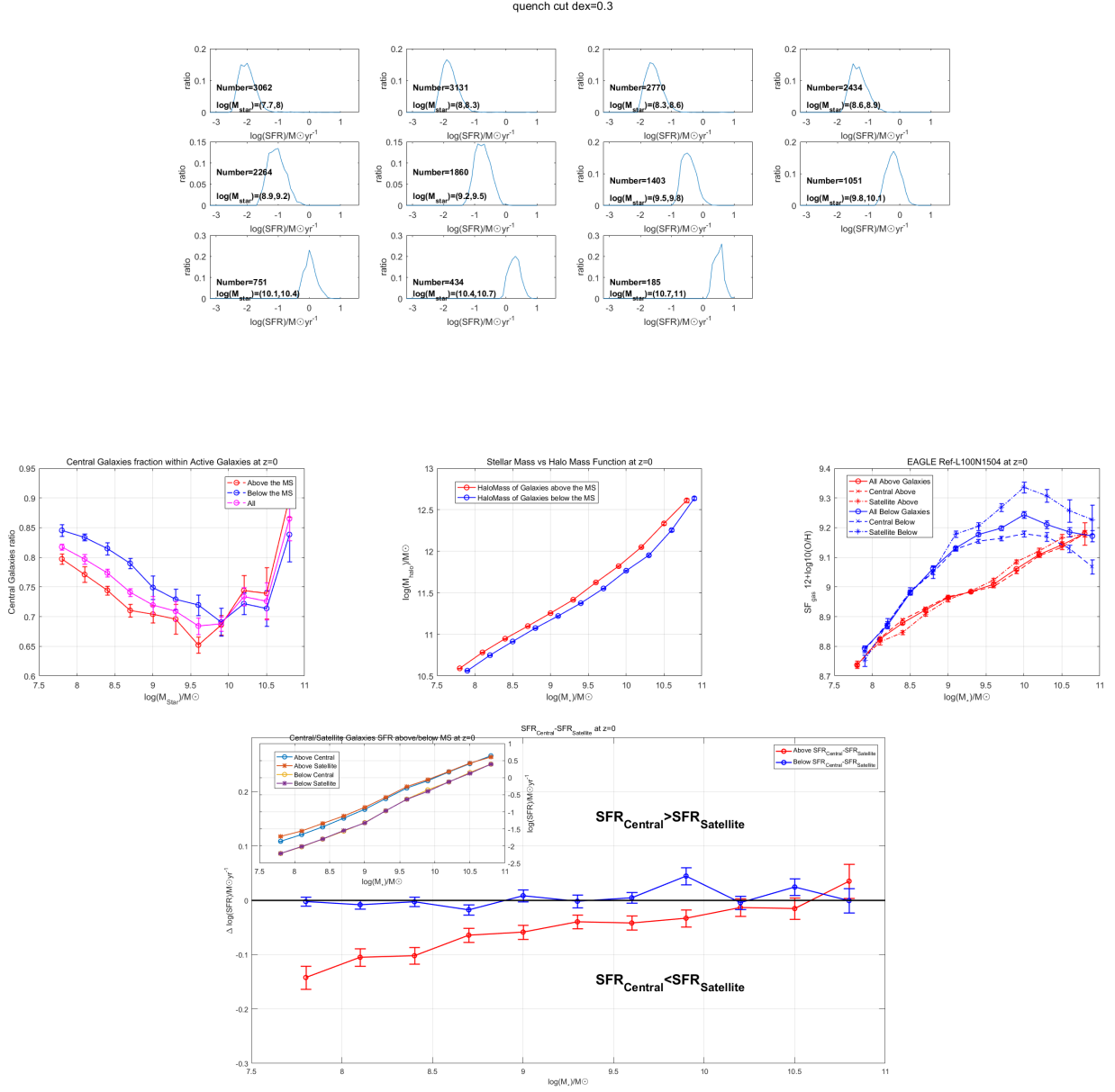


Figure 10: 0.3 Dex Below MS

## 7.3 Dex=0.5

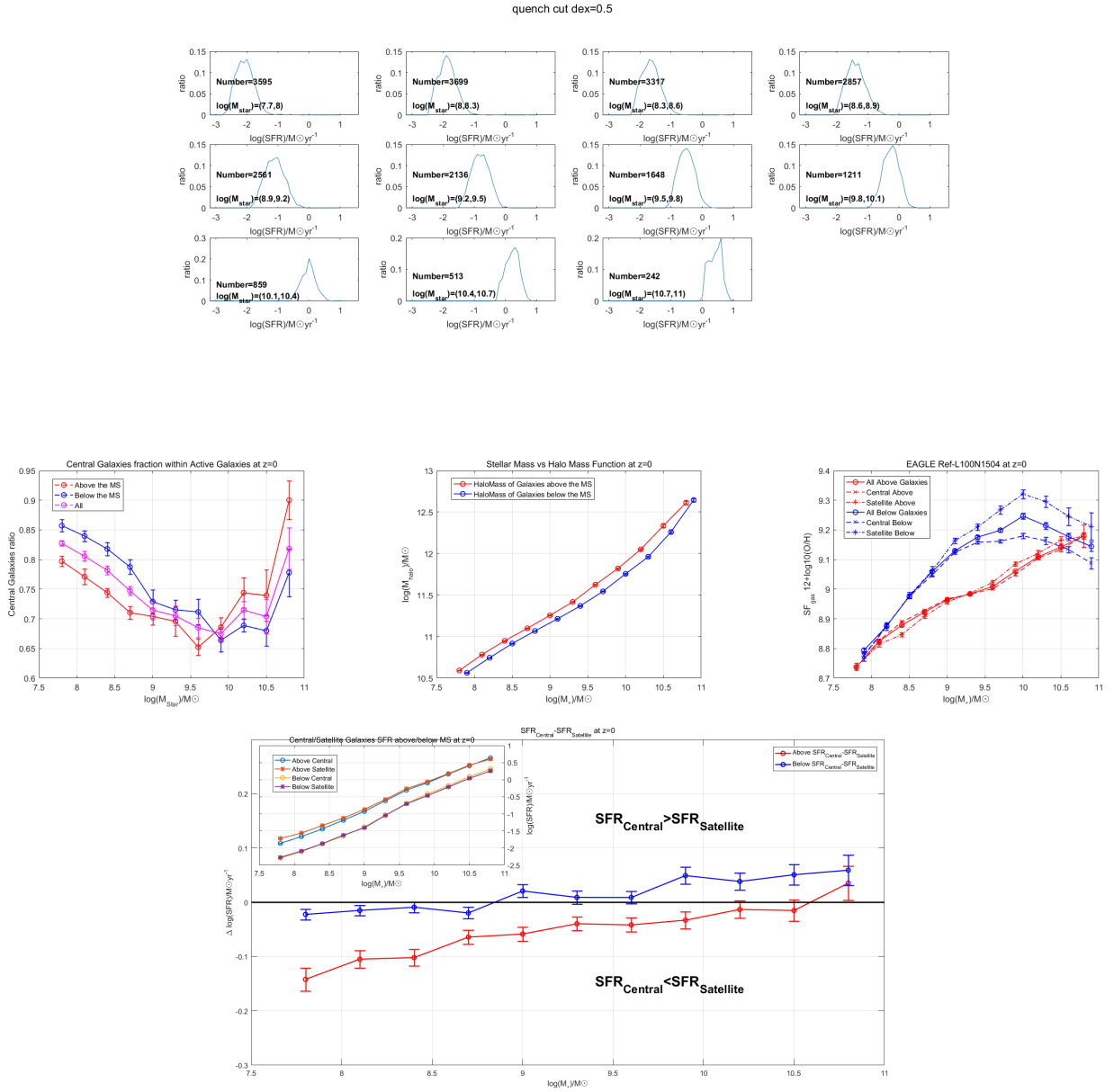


Figure 11: 0.5 Dex Below MS

## 7.4 Dex=0.7

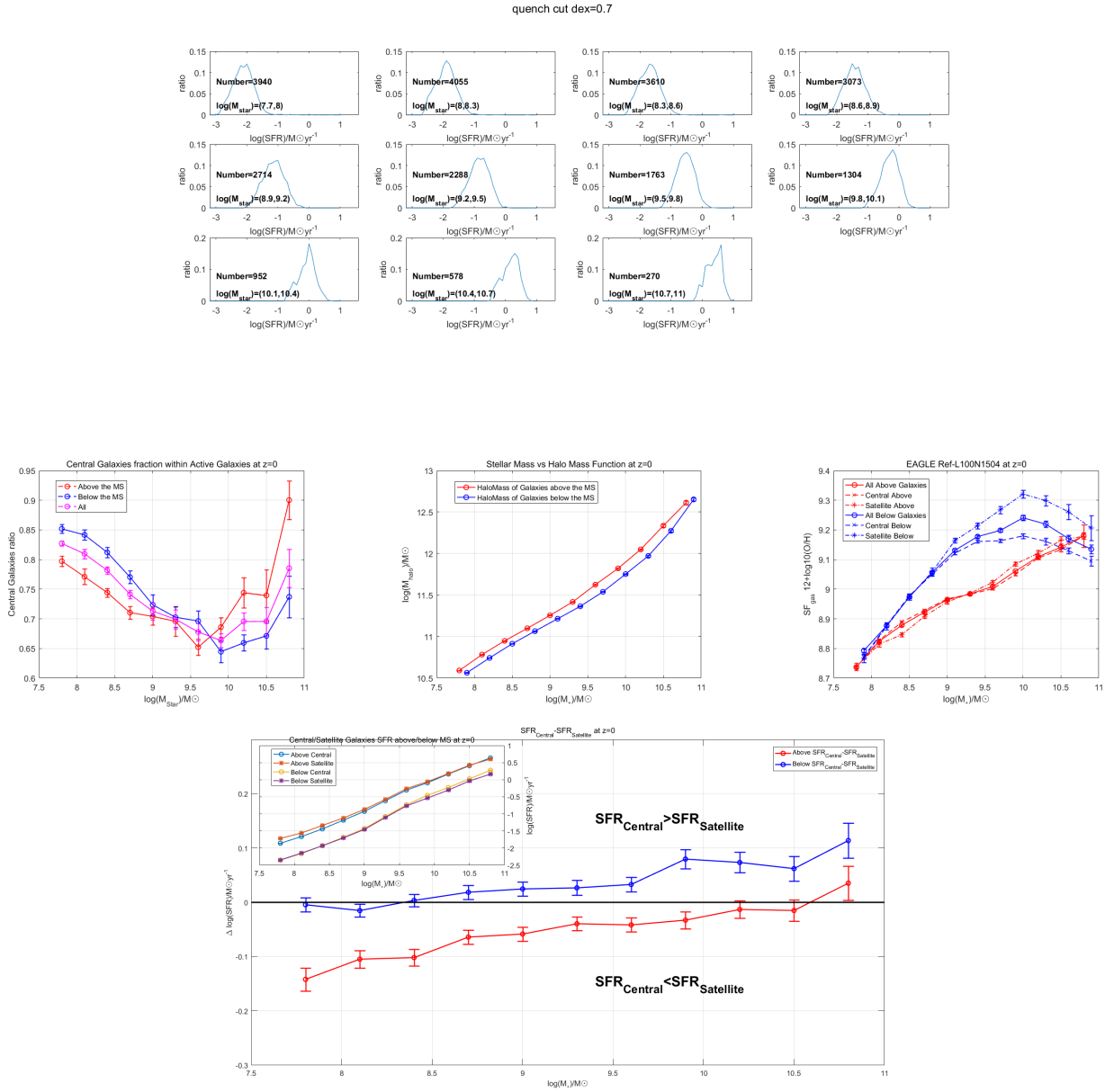


Figure 12: 0.7 Dex Below MS

## 7.5 Dex=1.0

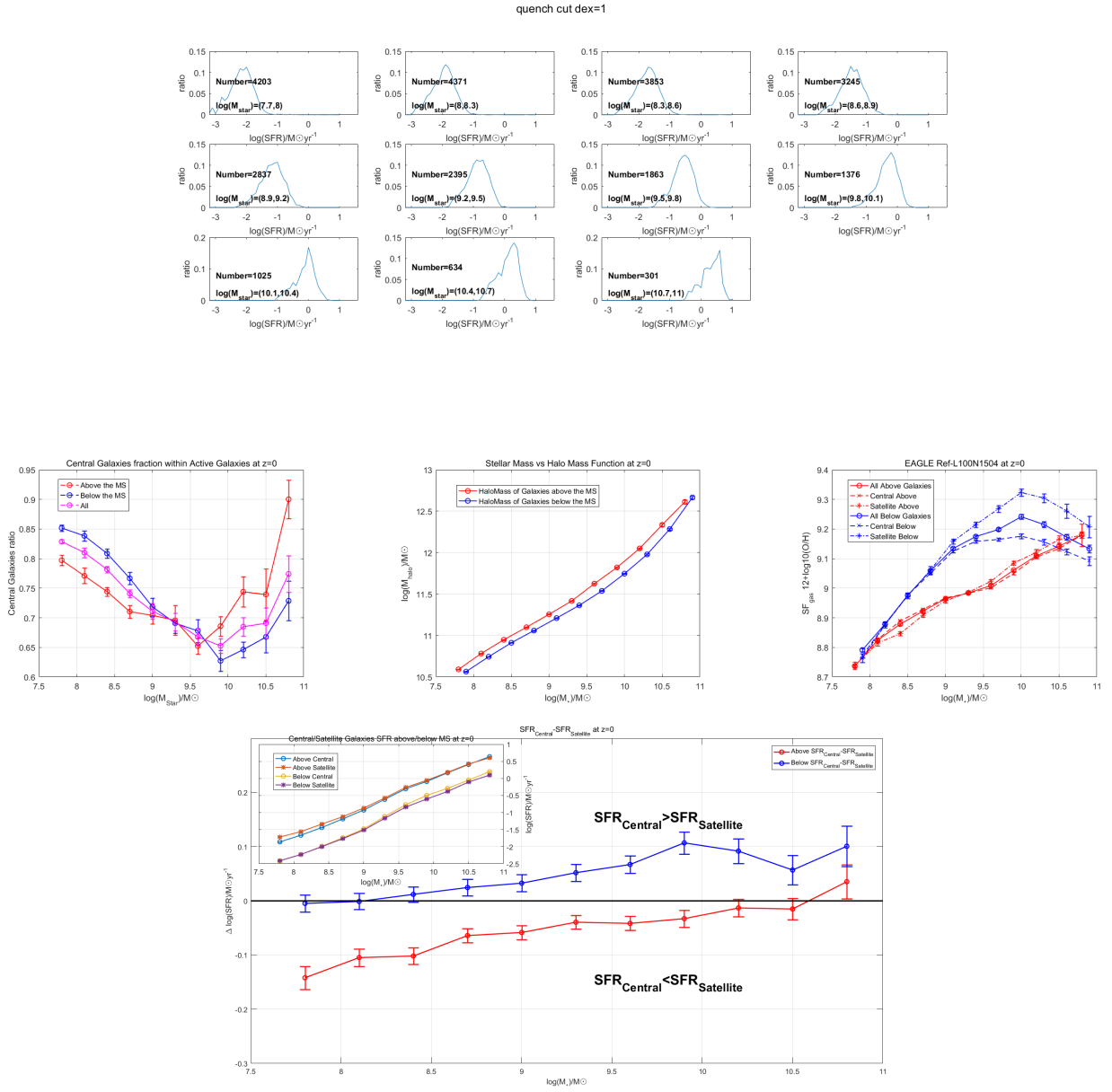


Figure 13: 1.0 Dex Below MS

## 7.6 Dex=1.5

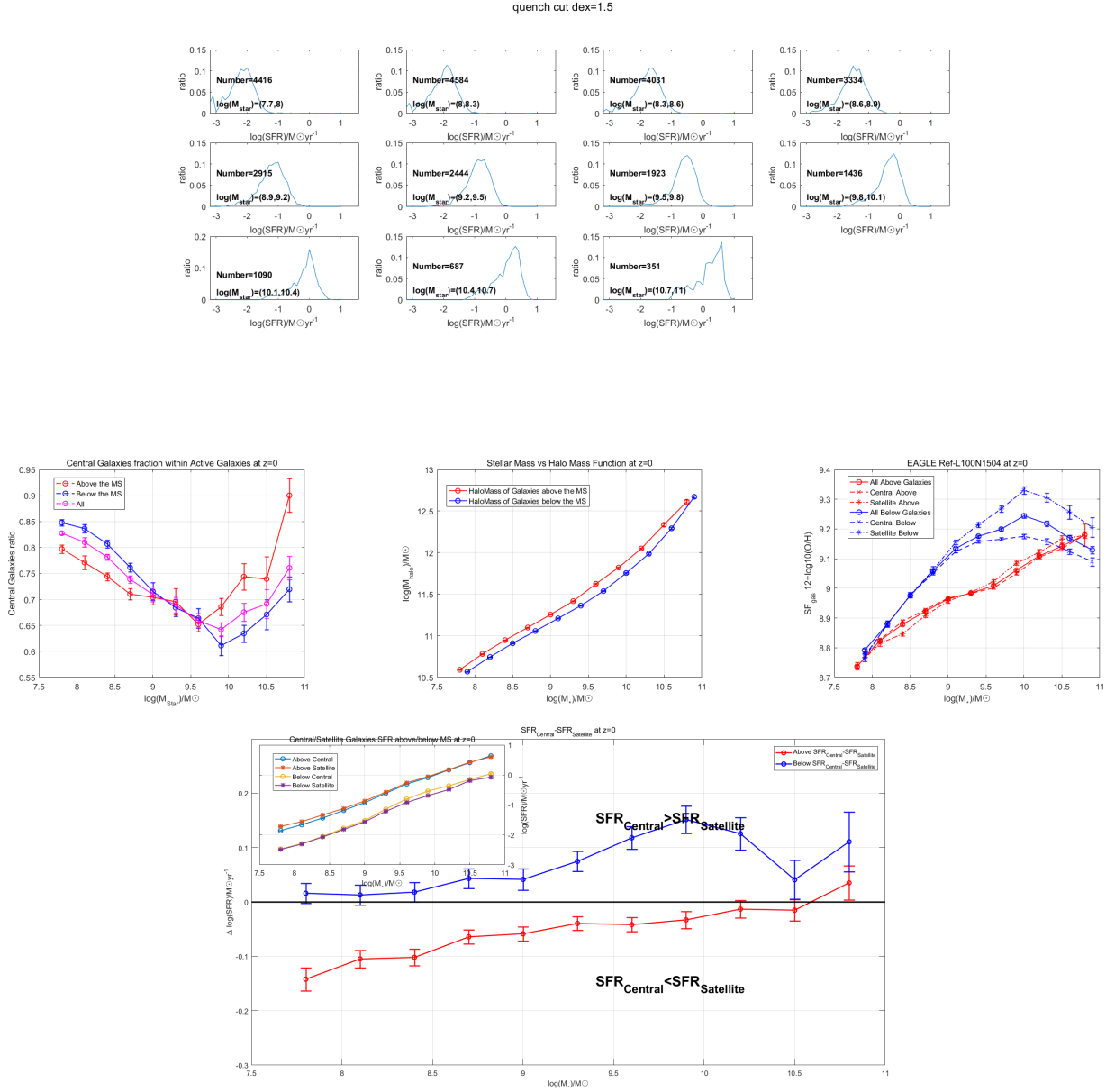


Figure 14: 1.5 Dex Below MS

## 8 References

1. The eagle simulations of galaxy formation:Public release of particle data,The EAGLE team,arXiv:1706.0 [astro-ph.GA] 29 Jun 2017
2. The origin of scatter in the star formation rate - stellar mass relation,Jorryt Matthee1, Joop Schaye11 Leiden Observatory, Leiden University, P.O. Box 9513, NL-2300 RA Leiden, The Netherlands,arXiv:1805.05956v1 [astro-ph.GA] 15 May 2018
3. Galaxy metallicity scaling relations in the EAGLE simulations,Mar'ia Emilia De Rossi , Richard G. Bower , Andreea S. Font , Joop Schaye and Tom Theuns,arXiv:1704.00006 [astro-ph.GA] 21 Aug 2017



4. A HIGHLY CONSISTENT FRAMEWORK FOR THE EVOLUTION OF THE STAR-FORMING “MAIN SEQUENCE” FROM  $Z=0-6$ , arXiv:1405.2041v2 [astro-ph.GA] 2 Jul 20
5. The dependence of the galaxy mass-metallicity relation on environment and the implied metallicity of the IGM, Ying-jie Peng<sup>1,2</sup>, Roberto Maiolino<sup>1,2</sup>, Accepted for publication in MNRAS, submitted on June 26, 2013
6. The Large, Oxygen-Rich Halos of Star-Forming Galaxies Are A Major Reservoir of Galactic Metals, J. Tumlinson,<sup>1\*</sup> C. Thom,<sup>1</sup> J. K. Werk,<sup>2</sup> J. X. Prochaska,<sup>2</sup> T. M. Tripp,<sup>3</sup> D. H. Weinberg,<sup>4</sup> M. S. Peeples,<sup>5</sup> J. M. O’ Meara,<sup>6</sup> B. D. Oppenheimer,<sup>7</sup> J. D. Meiring,<sup>3</sup> N. S. Katz,<sup>3</sup> R. Dave,<sup>8</sup> A. B. Ford,<sup>8</sup> K. R. Sembach, arXiv:1111.3980v1 [astro-ph.CO] 16 Nov 20