

# 『How was the Hubble sequence 6 Gyrs ago?』

東北大学大学院理学研究科天文学専攻 M1

本田和志

今回私は、Delgado-Serrano, R.; Hammer, F.; Yang, Y. B.; Puech, M.; Flores, H.; Rodrigues, M. の論文、『How was the Hubble sequence 6 Gyrs ago?』を紹介する。

この論文は、60 億年前と現在のハッブル系列を関連付けることを目的とし、そのために  $z=0$  程度の近傍銀河 (SDSS survey) と、 $z=0.65$  程度の遠方銀河 (GOODS survey) のサンプルを、同様の基準 ( $M_J(AB) < -20.3$  など) で選択し、それらを同様の方法で分類したものである。

## 1. Introduction

まず、ハッブル分類とは何か、ということについて説明する。ハッブル分類とは、1936 年に E. Hubble が提唱した、銀河の形態分類である。これは、可視光の写真乾板を用いて、主にバルジや円盤の外観的な形状によって分類したものであり、分類には大きく分けて、楕円銀河 (E)、レンズ状銀河 (S0)、渦巻銀河 (Sp) などの規則銀河と、構造が不規則な不規則銀河 (Irr) がある。

この論文では、そのハッブル分類の様子が、過去 (数 10 億年前) においてどのようなものであったかを知り、さらにそれを現代のものと関連付けることを目的としている。そしてそのために、遠方の銀河を観測し、分析、分類し、それらの遠方銀河と同じ質量を持つ近傍の銀河についても、同様にハッブル系列を作成し、比較した。

その際に注意した点としては、以下のようなものが挙げられる。

- (1) 遠方の銀河については、宇宙論的な減光が激しい。GOODS や UDF などにおいて、 $z=0.4-0.5$  や  $1.3-1.5$  における天の川程度の大きさの銀河の光学半径は、長い露光をしなければ観測できない。
- (2) 二つの系列を関連付ける際には、過去と現代の間における、銀河の大規模な合体などの現象も考慮しなければならない。
- (3) 形態学的な  $k$  補正は、ある程度小さく抑えられることが望ましい。
- (4) 二つの系列は、同程度の質量を持つサンプルから構成されなければならない。
- (5) 銀河の分類は、パラメータを用いて明確に行われるべきだ。

注意点の(1)から(3)までを解決するために、この論文では遠方の銀河として、 $z=0.65$  (60 億年前に対応) 程度の銀河を選択した。これは、この距離における GOODS イメージが、宇宙論的減光について補正した後も、SDSS イメージと同程度には深いことと、この時代から現在に至るまでに起きる銀河の合体は、銀河の数密度などに大きな影響を与えないことの 2 点を主な理由としている。

また、それぞれのサンプルの選択については、(4)の注意点より、near-IR における絶対等級が恒星質量と良い対応をもつことを考慮し、 $M_J(AB) < -20.3$  という同様の基準 ( $M_{stellar} > 1.5 \times 10^{10} M_{sun}$  に概ね対応) を用いて行った。

そして、サンプルの分類は、注意点の(5)を鑑みて、Semi-automatic decision tree によって行われた。

以下では、それぞれの手順について具体的に解説していく。

## 2. Sample

ここからは、サンプルの分類について説明する。近傍銀河のサンプルは SDSS から、遠方銀河のサンプルは GOODS から選択した。サンプル選択の基準は、両者について概ね同様であり、

- [1] Jバンドでの絶対等級  $M_J(AB) < -20.3$
- [2]  $[O_{II}]\lambda 3727$  輝線を測定するのに良質なスペクトルがある
- [3] 少なくとも3つの光学バンドについて、鮮明な画像をもっている

となっている。

近傍銀河のサンプル選択は Fukugita et al. (2007) を利用し、行われた。これは、赤道域での北の空の  $230\text{deg}^2$  の領域における、 $r_p=16$  以下の 2253 の銀河を選択している論文である。今回は、これらの銀河の中から、SDSS DR3 から利用可能なスペクトルやイメージが得られる 2113 の銀河 ( $u(3551\text{\AA})$ ,  $g(4686\text{\AA})$ ,  $r(6165\text{\AA})$ ,  $i(7481\text{\AA})$ ,  $z(8931\text{\AA})$  バンドの画像を持つ) を選び出し、さらにその中から  $M_J(AB) < -20.3$  である 1665 の銀河を選択した。そして、図 1 に示される SDSS の観測限界 (図の青いライン) より、 $z > 0.03$  においては十分なサンプルを得られないと考えられるので、 $z < 0.03$  の、218 の銀河 (図の赤い点) へと絞り込んだ。

そしてそれらの中から、 $[O_{II}]\lambda 3727$  輝線を含む銀河を選択した結果、最終的に  $0.0207 \leq z \leq 0.030$  の 116 の銀河を、近傍銀河のサンプルとして採用した。

次に、遠方銀河のサンプル選択は、 $EW[O_{II}]\lambda 3727 \geq 15\text{\AA}$  のものを星形成銀河、 $EW[O_{II}]\lambda 3727 < 15\text{\AA}$  のものを不活性な銀河とみなし、それぞれについて行われた。両者とも GOODS の調査から選択され、赤方偏移範囲は  $0.4 < z < 0.8$  となっている。

遠方の星形成銀河 ( $EW[O_{II}]\lambda 3727 \geq 15\text{\AA}$ ) のサンプルは、IMAGES 調査の結果から、Neichel et al. (2008) によって選ばれた 52 の銀河から採用した。この 52 の銀河から、3つのバンドの GOODS(ACS)v2.0 images をもっていない 2 の銀河を却下し、さらに最近、不活性な銀河と特定された 1 の銀河を却下することにより、結果として 49 の銀河をサンプルとして採用した。

遠方の不活性な銀河 ( $EW[O_{II}]\lambda 3727 < 15\text{\AA}$ ) のサンプルは、 $\langle 1 \rangle$  IMAGES の VLT/FORS2 による観測 (Rodrigues et al., 2008)、 $\langle 2 \rangle$  ESO の FORS2 による観測 (Vanzella et al., 2005, 2006)、 $\langle 3 \rangle$  VLT/VIMOS による観測 (Le Fèvre et al., 2005) によって集められた分光データから選択された。これらのサンプルを、 $[O_{II}]\lambda 3727$  輝線を含む波長範囲にてスペクトルが検出されるか、 $M_J(AB) < -20.3$ 、及び  $EW[O_{II}]\lambda 3727 < 15\text{\AA}$  を満たすか、そして3つのバンドにおいて GOODS(ACS)v2.0 images をもっているかという基準に従いふるいにかけて、結果的に 94 の銀河を採用することとした。

こうして選択されたサンプルが、近傍銀河、遠方の星形成銀河、遠方の不活性な銀河のそれぞれにおいて、 $M_J(AB) < -20$  であるものたちを十分に代表しているかを検証したものが、図 2 である。

図 2(a)より、近傍銀河のサンプルの J バンドでの絶対等級の分布は、近傍銀河の J バンドの光度関数 (Jones et al., 2006) と、98% で一致する。また、図 2(b)より、遠方の星形成銀河の J バンドの絶対等級の分布を、青い遠方銀河の K バンドの光度関数 (Cirasuolo et al. 2007) を補正したものと比較すると、97% で一致する。そして、図 2(c)より、遠方の不活性な銀河のサンプルの J バンドの絶対等級の分布を、赤い遠方銀河の K バンドの光度関数 (Cirasuolo et al. 2007) を補正したものと比較すると、97% で一致する。この時、J から K バンドへの補正は、非常に小さい ( $J-K = -0.1\text{mag}$ ) と仮定している。

これらの結果より、今回のサンプル選択においては、それぞれの種類の  $M_J(AB) < -20$  の不活性な銀河を十分に代表するものが選択できたと判断できる。

### 3. Morphological analysis

サンプルの選択が完了したので、続けてこれらのサンプルについての形態学的解析をしていく。  
まず、今回選択した遠方と近傍のサンプルが、比較するのに相応しいものであるかを考察する。

赤方偏移の補正によるバイアスは、これらと比較する上で問題となり得るか。Barden et al. (2008)は、人工的に赤方偏移させた SDSS の銀河が、COSMOS などの銀河と比較しうることを確かめた。これは、赤方偏移の補正によるバイアスが、これらと比較する上で大きな問題を生じさせないことを示唆している。また、表 1 より、遠方銀河のサンプルの  $z$  の中央値を  $z=0.65$  とすると、遠方銀河の  $k$  補正後のバンドは、近傍のそれと良く一致していることがわかる。

画像の解像度などに、大きな差はあるだろうか。 $z=0.65$  における GOODS (HST/ACS) は、 $0.108\text{arcsec}$  ( $0.81\text{kpc}$ ) の FWHM、 $z=0.025$  の SDSS は、 $1.4\text{arcsec}$  ( $0.74\text{kpc}$ ) の FWHM をそれぞれ示している。これは、それぞれ 3.6 画素と 3.5 画素にあたり、比較する上で丁度良い。

また、遠方と近傍、両者の観測条件である表 2 より、式

$$\frac{SNR^{HST}}{SNR^{SDSS}} = \sqrt{\frac{FWHM^{HST}}{FWHM^{SDSS}}} * \sqrt{\frac{T^{HST}}{T^{SDSS}}} * \frac{D^{HST}}{D^{SDSS}} * \sqrt{\frac{B^{SDSS}}{B^{HST}}} * \frac{f_{\lambda}^{HST=00}}{f_{\lambda}^{SDSS}} * \frac{1}{(1+z)^5}$$

を用いて  $SNR$  の比を計算すると、両サンプルは同程度の深さを持っていることがわかる。

以上のことより、今回選択されたサンプルは、比較するのに十分に相応しいものであると結論づけることができる。よって、このサンプルを具体的に解析していく。解析は、次のような手法をとった。

まず、表面輝度のプロファイル解析を行った。フラックスや等級のプロファイルなどを用いて解析する IDL procedure を開発し、half light radius を求め、さらに GALFIT シミュレーションを用いて、バルジと全体の比  $B/T$  を求めた。

次に、カラーマップ及びカラーイメージの作成を行った。近傍銀河の  $u-r$  と遠方銀河の  $v-z$  を用いて、2 色のカラーマップを作成し、近傍銀河の  $u-b-r$  と遠方銀河の  $v-i-z$  を用いて、3 色のカラーイメージを作成した。

こうして得られた解析データを、図 4 の Semi-automatic decision tree に照らし合わせ、両サンプルを分類する。今回は、銀河を以下の種類に分類した。

- 1: 楕円銀河 (E)
- 2: レンズ状銀河 (S0)
- 3: 渦巻銀河 (Sp)
- 4: 特異銀河 (Pec)・・・合体銀河 (Pec/M)  
オタマジヤクシ銀河 (Pec/T)  
不規則銀河 (Pec/Irr)  
コンパクト銀河 (Pec/C)

また、なるべく主観を排し、客観性を高めるため、この分類は 3 人の研究者の手でそれぞれ行われ、3 つの結果を照らし合わせるという過程を経た。結果、3 つの結果に大きな差異は見受けられなかったという。

## 4.Result

こうして得られた結果をまとめたものが、表3であり、それを視覚的に表したのが図5である。この表3において、近傍銀河は、星形成銀河が83%、不活性な銀河が17%、遠方銀河においては、星形成銀河が60%、不活性な銀河が40%の割合で含まれている。

この結果より読み取れることは、以下の4点である。

- 《1》早期型銀河(E/S0)の割合は、60億年前と現代の間でほぼ変化していない。
- 《2》現代の渦巻銀河の割合は、60億年前の約2.3倍に増加している。
- 《3》現代の特異銀河の割合は、60億年前の約1/5に減少している。
- 《4》ここ60億年で増加した渦巻銀河の割合は、減少した特異銀河の割合とほぼ一致する。

上記の4点は、60億年前の特異銀河が、現代の渦巻銀河へと関連付けられうることを示唆している。しかし、これらを直接に関連付けるためには、幾つか考えなければならないことがある。よって、結論を出すまえに、そのことについて記述する。

まず、早期型銀河の割合が変化していないとはいえ、それは早期型銀河に関わる銀河の進化、発展が起こっていないことを直接意味する訳ではない。特異銀河と渦巻銀河を関連付けるためには、早期型銀河が、ここ60億年の間に発展するかを確かめなければならない。図6は、早期型銀河のバルジの半径と光度の関係を記したものである。これより、120億年前に一息に全ての星が形成されたと仮定するなら、早期型銀河には、星の種族のpassive evolutionによる発展(約0.59mag)以外の変化はほとんど見受けられないことがわかる。よって、早期型銀河はこの60億年の間には、ほとんど進化、発展を起こしていないと結論付けることができる。

次に考えなければならないのは、60億年の間に起こる銀河の合体は、過去の特異銀河と現在の渦巻銀河を関連付ける上で、どれほどの影響を及ぼすのか、ということだ。60億年の間に起こる合体で、今回の結果に影響を及ぼしうるものは、大きく分けて2種類が考えられる。1つは、 $M_J(AB) > -20.3$ の2つの銀河が合体し、1つの $M_J(AB) \leq -20.3$ の銀河となるもの。もう1つは、2つの $M_J(AB) \leq -20.3$ の銀河が合体し、1つの $M_J(AB) \leq -20.3$ の銀河となるものである。前者では、今回用いた基準にうかる銀河の数が1つ増え、後者では1つ減る。これらの合体の起こる割合を示したものが、図A.1である。これより、考えられる2つのパターンの起こる割合をあわせても、結果に~5%を超える影響は及ぼしそうにないことがわかる。これは表3の結果の誤差の範囲内である。

最後に、遠方、つまり過去の銀河において、現在との星の種族の違いにより、 $M_{stellar}/L_K$ が発展していることの影響を考える。 $M_{stellar}/L_K$ が発展していることを考えれば、同じ $M_J(AB)$ を基準としてサンプルを抽出しても、近傍の銀河より遠方の銀河の方が、質量の軽いものを選択してしまうのではないか、という懸念である。このことは、恒星質量だけでなく、ガスも合わせた全体の質量を考えることによって解決される。図A.2を見れば分かるように、星の種族による $M_{stellar}/L_K$ の発展(約0.15dex)は、遠方の銀河と近傍の銀河のガス質量の差により相殺される。よって、全体の質量を考えれば、遠方銀河と近傍銀河において、同等の質量のものを選択したことになるのである。

これらの議論により、60億年前の特異銀河と現在の渦巻銀河は、合体などの現象を考えずに直接関連付けられるものであると考えられる。

## 5.Conclusion

以上より、この論文で結論づけられるのは以下の5点である。

- 【1】早期型銀河 (E/S0) の数は、ここ 60 億年ほどの間でほぼ増減していない。
- 【2】遠方銀河の半分以上は、特異な形態をもっている。
- 【3】渦巻銀河の割合は、ここ 60 億年ほどの間に約 2.3 倍に増加している。
- 【4】特異銀河の割合は、ここ 60 億年ほどの間に約 1/5 に減少している。
- 【5】60 億年間の銀河の進化のほぼ全ては、特異銀河から渦巻銀河への進化であると考えられる。

この結果は、銀河の進化と形成のシナリオを考える上で有用なものである。ただし、この結果が 60 億年より前の時代まで適用されるかは不明瞭であり、サンプル数も少ない。また、GOODS field に影響を及ぼす可能性があるため、Cosmic variance effect も考慮に入れる必要がある、といった課題も、まだ残っている。

なお、次ページより添付されている図及び表は、全て『How was the Hubble sequence 6 Gyrs ago?』Delgado-Serrano, R.; Hammer, F.; Yang, Y. B.; Puech, M.; Flores, H.; Rodrigues, M.から引用させて頂いた。

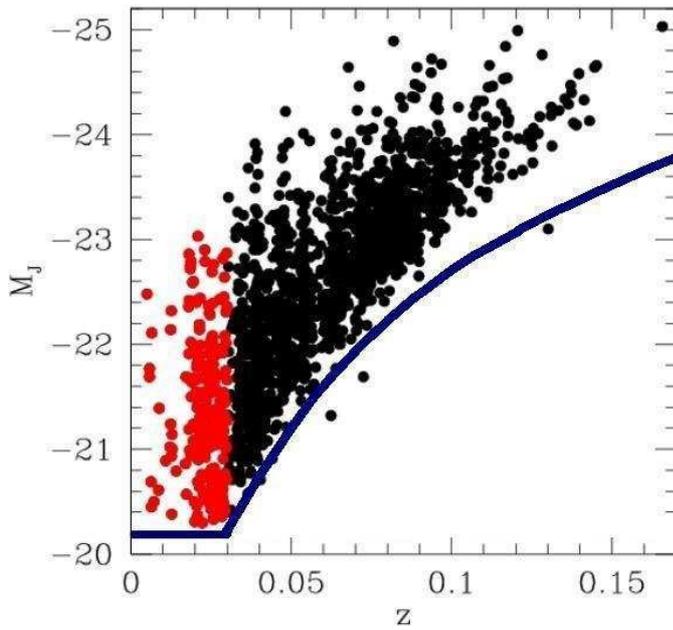


図 1: Fukugita et al. (2007)におけるサンプルの銀河の  $M_J$  対  $z$  のグラフ。青いラインは、観測限界などによる制限。赤く着色された点が、今回採用された218の銀河。

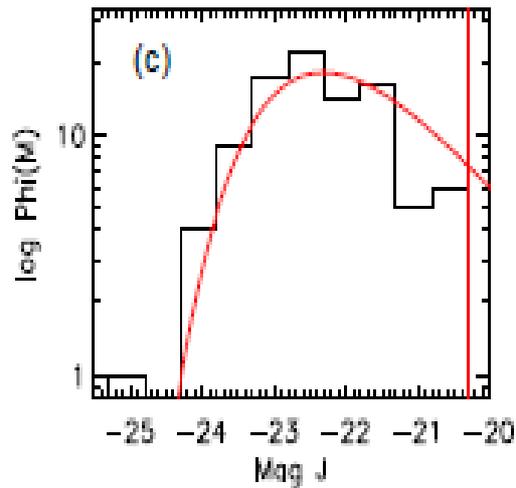
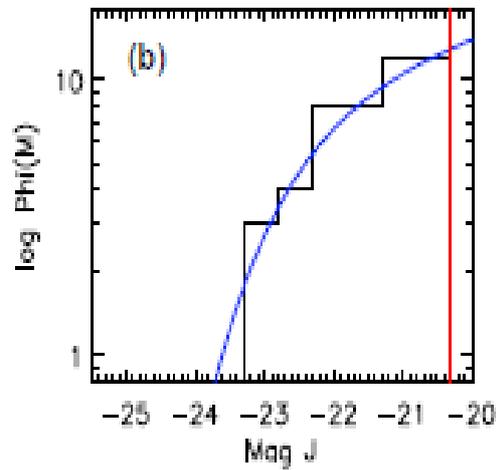
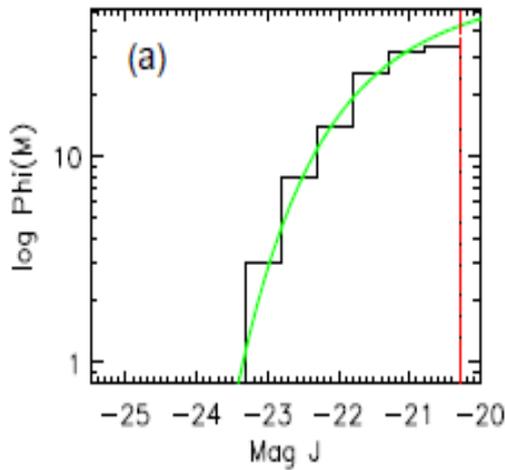


図 2:(a)黒いラインは、近傍銀河のサンプルの  $M_J$  のヒストグラム。緑のラインは、赤方偏移範囲  $0.0025 < z < 0.2$  において観測された光度関数 (Jones et al. (2006))。赤い垂直な線は  $M_J = -20.3$  の限界。(b)黒いラインは、遠方の星形成銀河のサンプルの  $M_J$  のヒストグラム。青いラインは  $0.25 < z < 0.75$  の青い銀河の光度関数 (Cirasuolo et al. (2007))。

(c)黒いラインは、遠方の不活性な銀河のサンプルの  $M_J$  のヒストグラム。赤いラインは  $0.25 < z < 0.75$  の赤い銀河の光度関数 (Cirasuolo et al. (2007))。

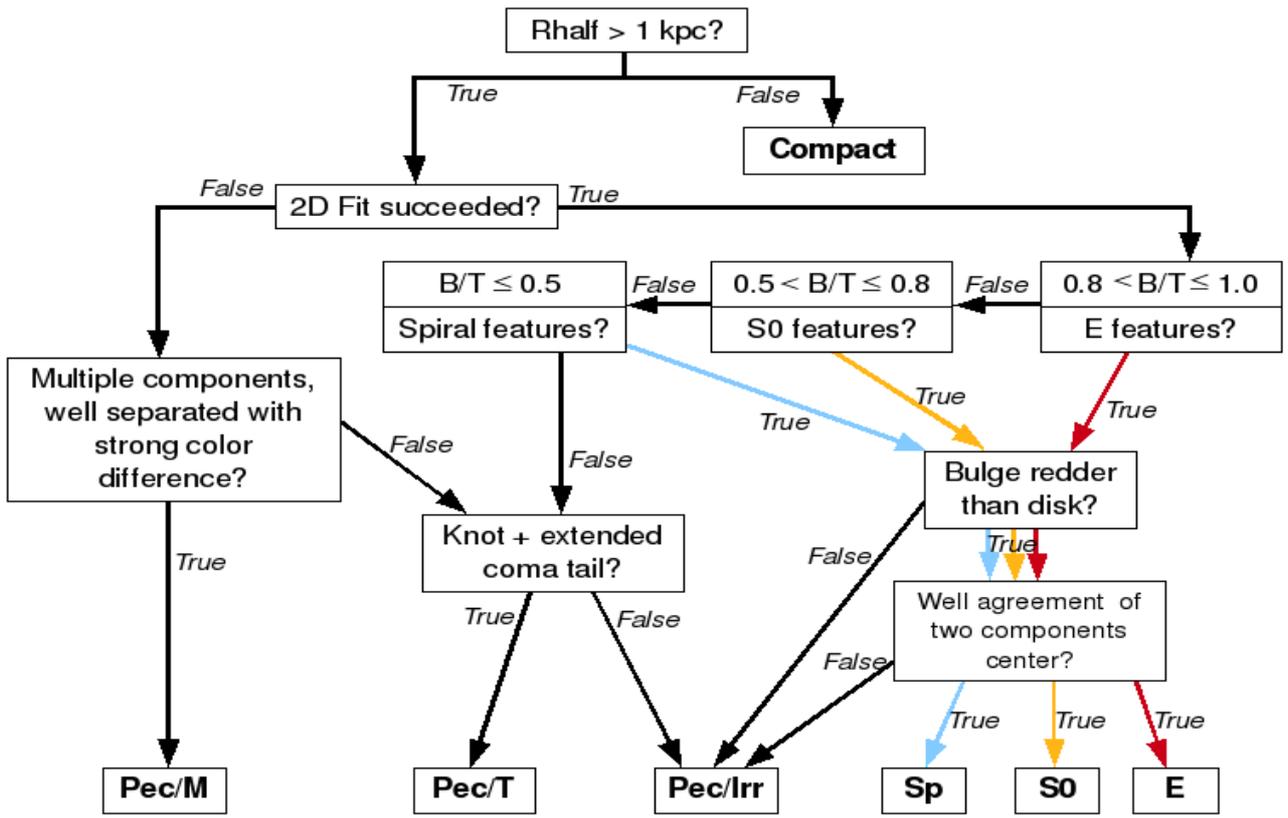


図 4: Semi-automatic decision tree.

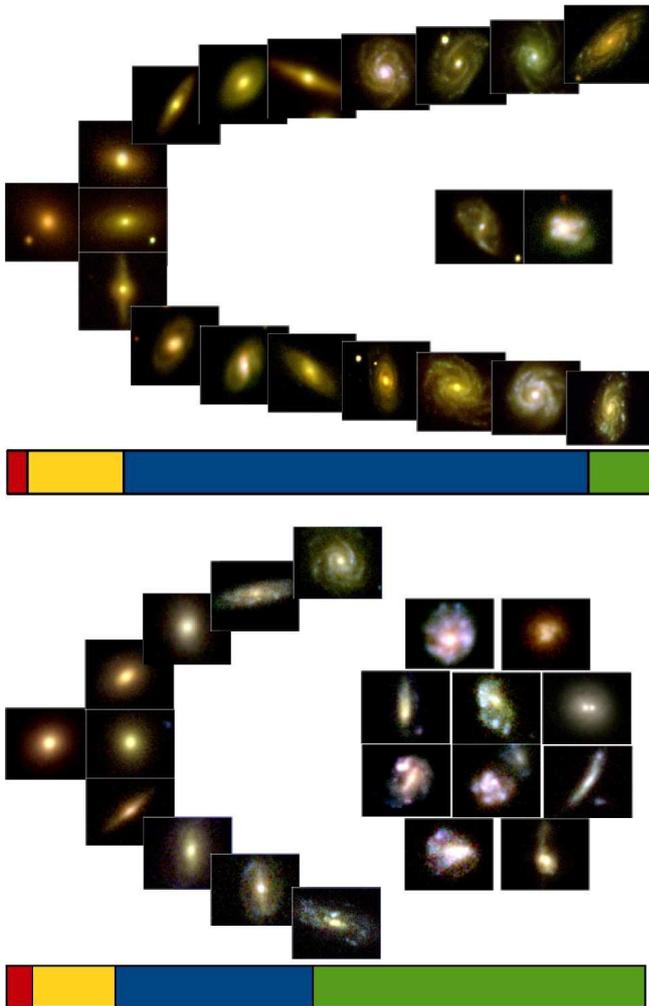


図 5: 近傍のサンプルから導かれる今日のハッブル系列(上)と、遠方のサンプルから得られる過去のハッブル系列(下)。各画像の横幅は、全体の約5%を表す。それぞれの下方にあるバーは、楕円銀河(赤)、S0 銀河(黄)、渦巻銀河(青)、特異銀河(緑)の割合を表している。

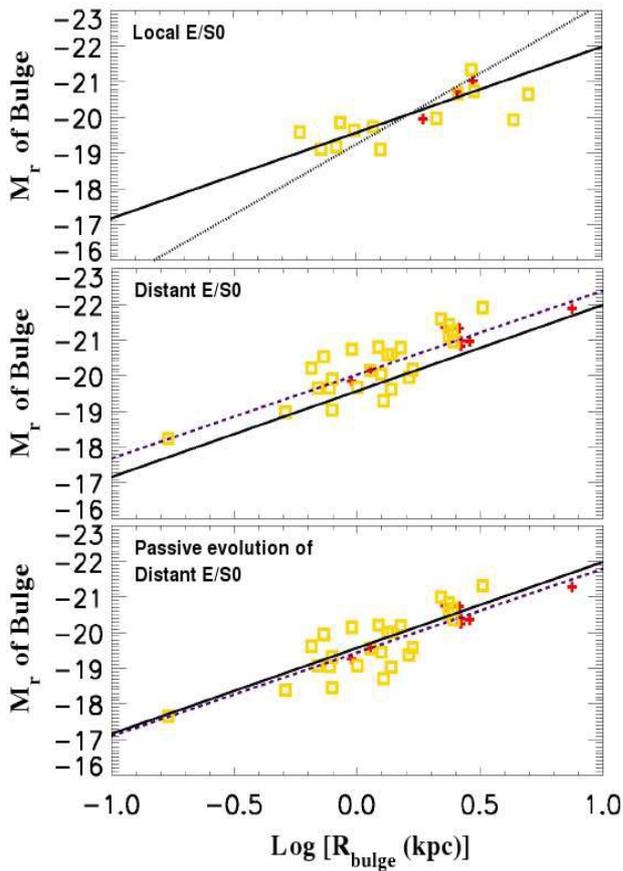
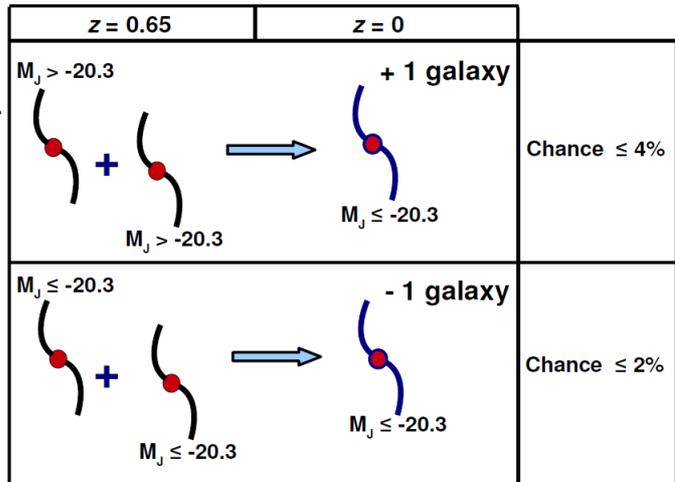


図 6: バルジの  $r$  絶対等級対 E (赤い十字) と S0 (黄色の正方形) のバルジの半径。  
 上: 近傍銀河のもの。実線が、もっともフィットする直線。点線が Bernardi et al. (2003) から得られる直線。  
 中: 遠方銀河のもの。実線が、もっともフィットする直線。点線が、近傍銀河におけるもっともフィットする直線。両者の間には、おおよそ 0.5mag の差がある。  
 下: 遠方銀河のものについて、星の種族の passive evolution による発展 (約 0.59mag) を補正したもの。

図 A.1: 過去と現在の銀河を関連付ける上で、影響を及ぼしうる銀河の合体と、その起こりうる割合。



$z = 0$	$z = 0.65$
 $M_J < -20.3$	 $M_J < -20.3$
$\text{Log}(M_{\text{star}}) > \text{Log}(1.5 \cdot 10^{10} M_{\odot})$	$\text{Log}(M_{\text{star}}) > \text{Log}(1.5 \cdot 10^{10} M_{\odot}) - 0.15 \text{ dex}$
$\text{Log}(M_{\text{Baryonic}}) \geq \text{Log}(1.5 \cdot 10^{10} M_{\odot}) + 0.04 \text{ dex}$	$\text{Log}(M_{\text{Baryonic}}) \geq \text{Log}(1.5 \cdot 10^{10} M_{\odot}) + 0.01 \text{ dex}$
$\text{Log}(M_{\text{Baryonic}}) \geq \text{Log}(M_{\text{star}} + M_{\text{gas}})$ $\text{Log}(M_{\text{Baryonic}}) \geq \text{Log}(M_{\text{star}}) + 0.16 \text{ dex}$	

図 A.2: バリオンの質量を考えた場合の、銀河の質量。左が近傍、右が遠方の銀河。

Survey	-	u band	g band	r band	i band	z band
SDSS	-	3551 Å	4686 Å	6165 Å	7481 Å	8931 Å
-	B band	V band	i band	z band	-	-
GOODS	4312 Å	5915 Å	7697 Å	9103 Å	-	-
<i>rest-frame</i>	2582 Å	3542 Å	4609 Å	5451 Å	-	-

表 1: SDSS と GOODS (ACS) での、異なったバンドの波長比較。

	SDSS			GOODS ACS			
D=telescope diameter (m)	2.5			2.4			
Band	u	g	r	B	V	i	z
T=Expo-time (s)	53.907456	53.907456	53.907456	7200.00	5450.00	7028.00	18232.00
B=sky background (mag)	22.15	21.85	20.85	23.43	22.74	22.72	22.36
Filter FWHM (Å)	567.00	1387.00	1373.00	728.95	1565.50	1017.40	1269.10
Filter range (Å)	~1000.00	~1800.00	~1500.00	8780.00	2570.00	1910.00	>3080.00

表 2: SDSS と GOODS (ACS) それぞれの観測条件。

Type	Local			Distant		
	Total (%)	Quiescent (%)	Starburst (%)	Total (%)	Quiescent (%)	Starburst (%)
E	3±1	3±2	0±0	4±1	11±3	0±0
S0	15±4	14±4	20±10	13±2	33±6	0±0
Spiral	72±8	76±10	55±17	31±7	31±6	31±8
Peculiar <sup>a</sup> :	10±3	7±3	25±11	52±9	25±5	69±12
P/Irr	4±2	2±1	15±9	26±7	21±5	29±8
P/Tad	0±0	0±0	0±0	6±3	0±0	10±5
P/Mer	4±2	4±2	5±5	20±6	4±2	30±8
P/C	2±1	1±1	5±5	0±0	0±0	0±0

表 3: 近傍銀河と遠方銀河についての、それぞれの分類の割合。