

参考資料（重力レンズ効果の観測に対する
モデルフィッティング、及びその諸考察）

東北大学宇宙地球物理学科4年 馬渡 健

第I部

モデルフィッティングの結果

1 RXJ1131-1231

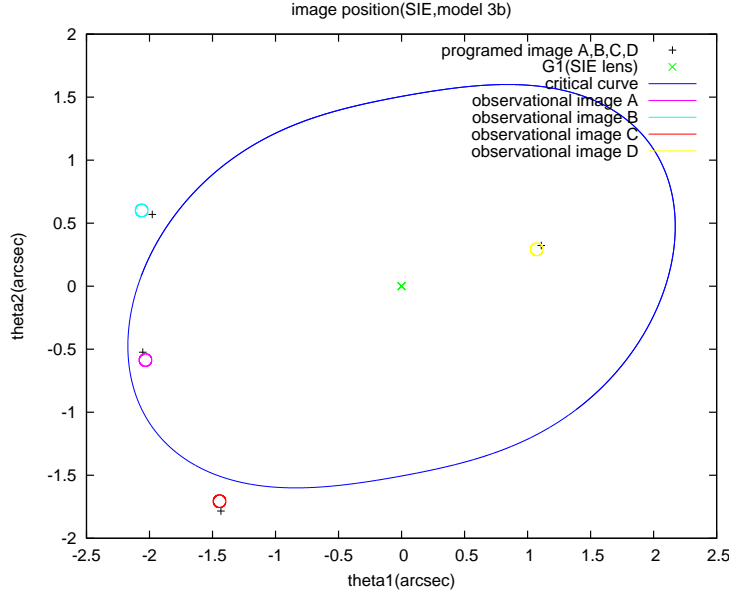
1.1 model fitting with image position and flux ratio

From RXJ1131-1231.c, best fit parameters are

$$f = 0.644355, \gamma_0 = 0.116792, \phi_s = 4.386461(rad), \phi_g = 2.180393(rad), \\ \theta_0 = 1.833886("), \beta_1 = -0.499705("), \beta_2 = -0.092237(").$$

In this case

$$\chi^2/\nu = 5.123187.$$



The comparison between program results and observation

	A	B	C	D
$\theta_1(")$	-2.053340	-1.977879	-1.433246	1.108417
$\theta_2(")$	-0.523402	0.569530	-1.784173	0.323136
δ	1.000	0.737812	0.450194	0.059395
$\theta_1^o(")$	-2.032 ± 0.05	-2.062 ± 0.05	-1.444 ± 0.05	1.073 ± 0.05
$\theta_2^o(")$	-0.586 ± 0.05	0.601 ± 0.05	-1.706 ± 0.05	0.292 ± 0.05
δ^o	1.00 ± 0.00	0.79 ± 0.09	0.38 ± 0.03	0.077 ± 0.007

$\theta_1^o, \theta_2^o,$ and δ^o are observational data from Castles survey(with H-bands).

Furthermore, the mass of SIE lens galaxy is

$$M(\theta_0) = 7.352398 \times 10^{11} (M_{solar}).$$

On the other hand, the mass of stellar component is computed from color and galaxy evolution model (GALAXEV),

$$M_{stellar} = 7.74 \times 10^{10} (M_{solar})$$

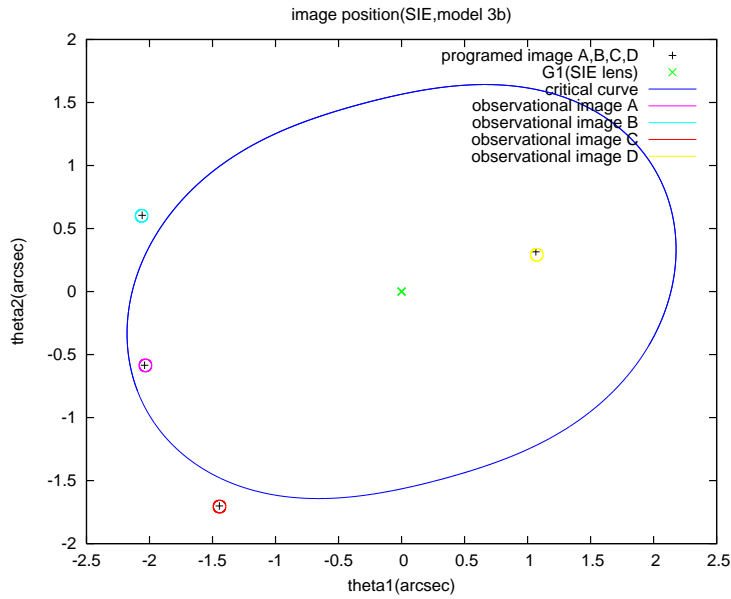
1.2 fitting with only image position

Model fitting with only image position is showed as follows.

$$f = 0.799451, \gamma_0 = 0.104894, \phi_s = 4.784136(rad), \phi_g = 2.113504(rad), \\ \theta_0 = 1.836585("), \beta_1 = -0.537043("), \beta_2 = -0.136413(").$$

In this case

$$\chi^2/\nu = 0.07267925.$$



2 PG1115+080

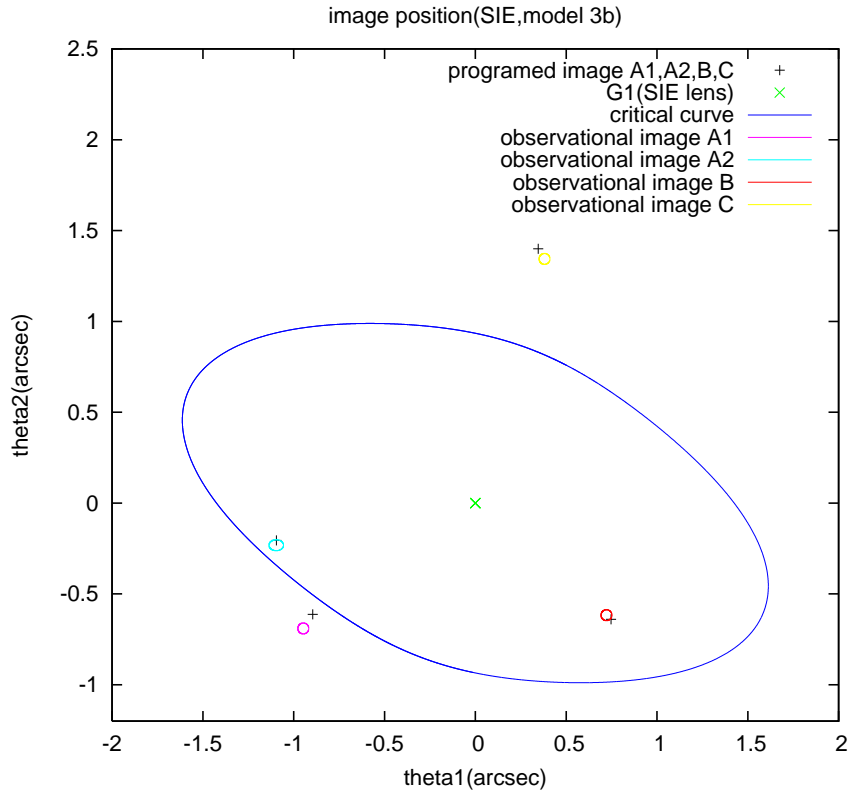
2.1 model fitting with image position and flux ratio

From PG1115+080.c, best fit parameters are

$$f = 0.456695, \gamma_0 = 0.075146, \phi_s = 5.983182(rad), \phi_g = 1.216678(rad), \\ \theta_0 = 1.232004("), \beta_1 = 0.012205("), \beta_2 = 0.227594(").$$

In this case

$$\chi^2/\nu = 7.536834.$$



The comparison between program results and observation

	A1	A2	B	C
$\theta_1(^{\circ})$	-0.895447	-1.095548	0.747288	0.346059
$\theta_2(^{\circ})$	-0.612029	-0.205098	-0.639528	1.400046
δ	1.000	0.740919	0.180872	0.225767
$\theta_1^o(^{\circ})$	$-0.947_{-0.03}^{+0.03}$	$-1.096_{-0.04}^{+0.04}$	$0.722_{-0.03}^{+0.03}$	$0.381_{-0.03}^{+0.03}$
$\theta_2^o(^{\circ})$	$-0.690_{-0.03}^{+0.03}$	$-0.232_{-0.03}^{+0.03}$	$-0.617_{-0.03}^{+0.03}$	$1.344_{-0.03}^{+0.03}$
δ^o	$1.00_{-0.00}^{+0.00}$	$0.63_{-0.04}^{+0.04}$	$0.16_{-0.01}^{+0.01}$	$0.25_{-0.02}^{+0.02}$

$\theta_1^o, \theta_2^o,$ and δ^o are observational data from Castles survey (with H-bands).

Furthermore, the mass of SIE lens galaxy is

$$M(\theta_0) = 2.348746 \times 10^{11} (M_{solar}).$$

On the other hand, the mass of stellar component is computed from color and galaxy evolution model (GALAXEV),

$$M_{stellar} = 5.13 \times 10^{10} (M_{solar})$$

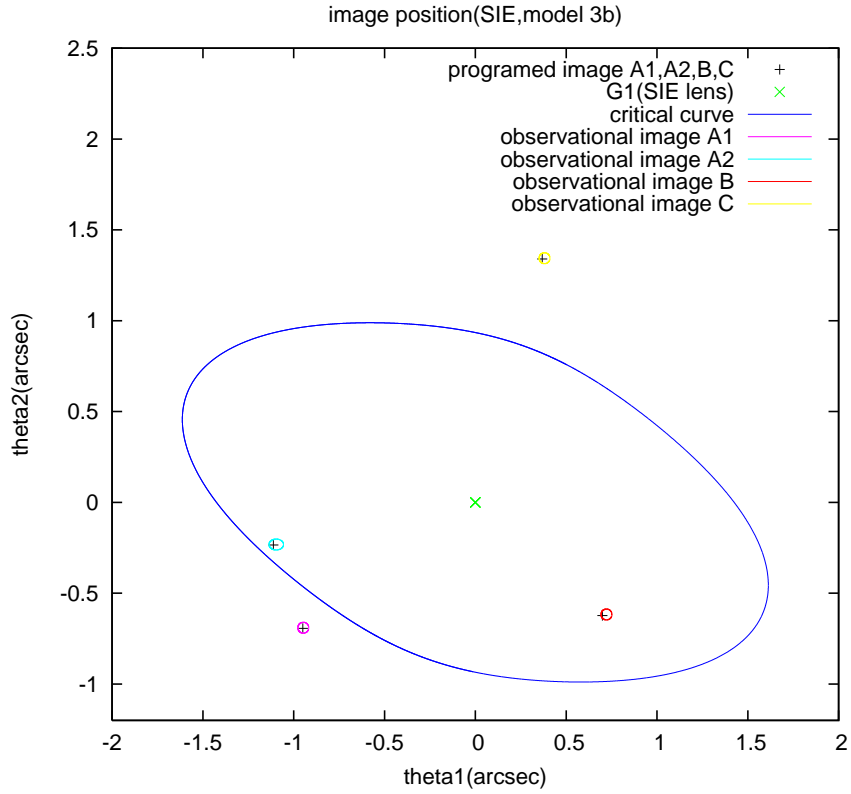
2.2 model fitting with only image position

Model fitting with only image position is showed as follows.

$$f = 0.807716, \gamma_0 = 0.094785, \phi_s = 4.001910, \phi_g = 1.554524, \theta_0 = 1.149809, \\ \beta_1 = -0.029084, \beta_2 = 0.138298.$$

In this case

$$\chi^2/\nu = 0.2361275.$$



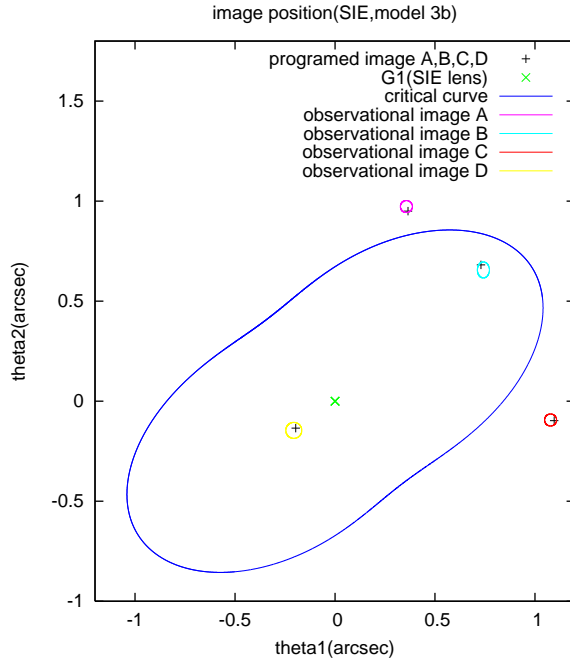
3 おまけ:非常に上手くフィッティングできた例 B1422+231

From PG1115+080.c, best fit parameters are

$$f = 0.546807, \gamma_0 = 0.117313, \phi_s = -0.751958(rad), \phi_g = -1.021963(rad), \\ \theta_0 = 0.783475("), \beta_1 = 0.345428("), \beta_2 = 0.246118(").$$

In this case

$$\chi^2/\nu = 0.657962.$$



The comparison between program results and observation

	A	B	C	D
$\theta_1(^{\circ})$	0.365023	0.729807	1.096130	-0.196080
$\theta_2(^{\circ})$	0.949841	0.681351	-0.097544	-0.134452
δ	0.908125	1.000000	0.495007	0.037154
$\theta_1^o(^{\circ})$	0.357 ± 0.03	0.742 ± 0.03	1.078 ± 0.03	-0.206 ± 0.04
$\theta_2^o(^{\circ})$	0.973 ± 0.03	0.656 ± 0.04	-0.094 ± 0.03	-0.146 ± 0.04
δ^o	0.93 ± 0.04	1.00	0.49 ± 0.02	0.03 ± 0.01

$\theta_1^o, \theta_2^o,$ and δ^o are observational data from Patnaik99(with radio 8.4GHz).

Furthermore, the mass of SIE lens galaxy is

$$M(\theta_0) = 9.301098 \times 10^{10} (M_{solar}).$$

第II部

発展：銀河進化を求めて・・・

1 M/L比を求めるのに使える天体数

strong lens 自体は 100 あまり観測データがあるので (from castles survey)、それらを全て使いたいそう簡単にはいかない。M/L の L は本当なら bolometric luminosity を使えば良いが、現実的には観測 band 毎の Luminosity しか得られない。よって M/L も band 毎の $(M/L)_x$ になるわけだが、異なる銀河間で比較をするためには銀河の rest frame での band(x) をそろえる必要がある。なので観測 band 波長を $(1+z)$ で割った rest frame 波長が大体同じになるような銀河しか比較対象にならないのである。

そうしたふりいにかけた結果、使用する天体を計 13 個 ($(M/L)_B:10$ 個, $(M/L)_V:7$ 個, $(M/L)_U:7$ 個) に絞らざるを得なくなった。

2 M/L比の定義

今考えている銀河の質量 $M(\theta_0)$ と x-band でのみかけ等級 m_x が分かっている場合の $\gamma_x = (M/L)_x$ を定義する。ただし太陽の $M/L = M_{sun}/L_{x,sun}$ ($L_{x,sun}$ は x-band での太陽の単位波長あたりの Luminosity) で規格化すると考える。

$$\gamma_x = \frac{M(\theta_0)/M_{sun}}{L_x/L_{x,sun}}$$

また絶対等級 $M_x, M_{x,sun}$ の定義より

$$L_x/L_{x,sun} = 10^{0.4(M_{x,sun}-M_x)}$$

なので

$$\gamma_x = 10^{0.4(M_x - M_{x,sun})} \frac{M(\theta_0)}{M_{sun}}$$

ちなみに、みかけ等級から絶対等級への直し方は

$$m_x - M_x = -2.5 \log \frac{L_x/4\pi D_L^2(1+z_d)}{L_x/4\pi 10^2} = -5 + 5 \log(D_L \sqrt{1+z_d})$$

を使う。($1+z_d$ の項は単位波長あたりの Flux ないし Luminosity を考えているために生じた補正項)

3 結果

name	z	χ^2/ν	f	mass ($10^{11} M_{sun}$)	M_U	M_B	M_V	$(M/L)_U$	$(M/L)_B$	$(M/L)_V$
HE0230-2130	0.52	8.96	0.55	2.4	-19.59	-22.21	-22.44	20.8	2.16	2.98
MG0414+0534	0.96	7.13	0.56	6.2	-22.16	-23.83	-25.53	4.99	1.24	0.44
HE0435-1223	0.46	13.1	0.95	3.4	-21.33	-24.41	-23.61	5.90	0.40	1.43
RXJ0911+0551	0.77	75	0.90	4.5	/	-23.57	/	/	1.15	/
SDSS0924+0219	0.39	13.8	0.48	1.7	/	/	-22.60	/	/	1.81
PG1115+080	0.31	7.54	0.46	2.3	/	-20.59	/	/	9.35	/
RXJ1131-1231	0.295	5.12	0.64	7.4	/	-21.56	/	/	12.0	/
SDSS1138+0314	0.45	11.1	0.33	1.1	-19.77	/	-22.36	8.07	/	1.47
HST14113+5211	0.46	2.83	0.73	2.2	-20.27	/	-22.47	10.1	/	2.64
HST14176+5226	0.81	13.9	0.37	7.6	-22.29	-24.43	/	5.46	0.88	/
B1422+231	0.34	0.66	0.55	0.93	/	-19.79	/	/	7.74	/
WFI2033-4723	0.66	7.69	0.81	4.5	-21.04	-23.84	/	0.17	0.89	/
Q2237+030	0.04	12.1	0.36	0.18	/	-19.28	-20.73	/	2.39	1.07

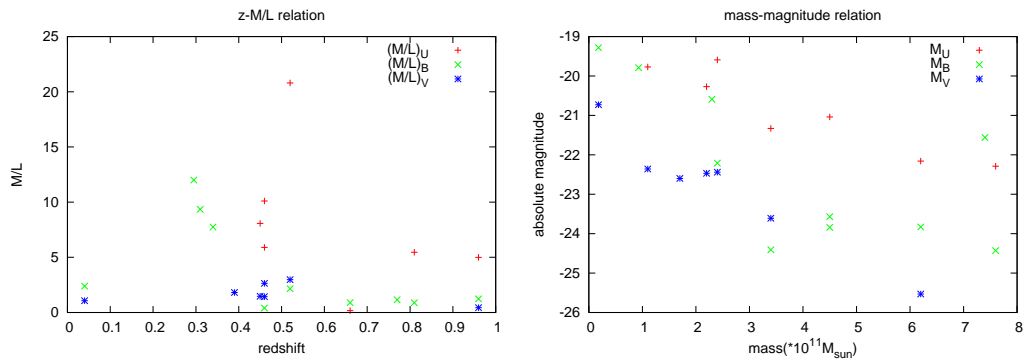
4 相関

4.1 M/L 比の redshift 依存性

特になし (下図左側参照)。残念な結果であるが、逆に $z=0$ から 1 にかけては銀河進化はないともいえる。(特に楕円銀河)

4.2 現時点で唯一見つかった相関

質量と絶対等級には下図右側のような相関が見られた。「重いほど明るい」というごく当たり前のことを言っているようであるが、モデルフィッティングの信頼性の確認にはなった。

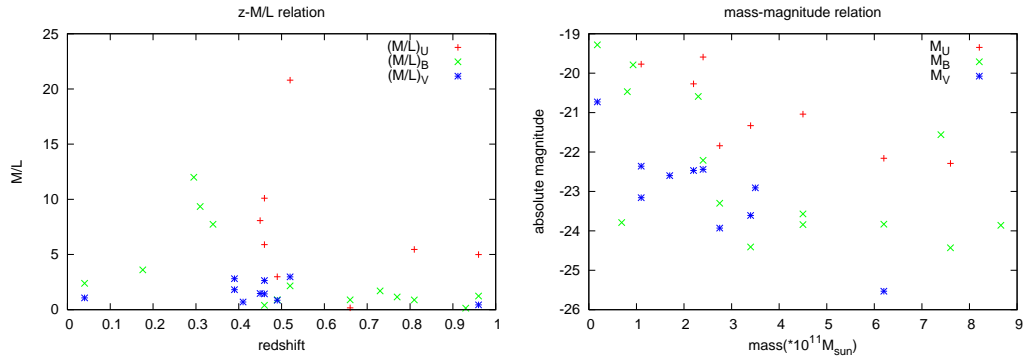


5 追加データ

5.1 第一次追加分

上記では fitting の精度を優先させて image 数が 4 つの天体しか扱わなかった。ここではデータ数を増やすために既存の理論モデル (SIS, SIE) で再現できそうではあるが image 数が 2 つの重力レンズのデータを追加させてみた。ただし、もう χ^2 fitting プログラムにかけることはせず論文などで発表されている Einstein 半径から質量を求めた。(http://www.cfa.harvard.edu/glensdata/size で黒字と赤字で書かれているデータ)

name	z	mass ($10^{11} M_{sun}$)	M_U	M_B	M_V	$(M/L)_U$	$(M/L)_B$	$(M/L)_V$
HE0047-1756	0.41	1.1	/	/	-23.16	/	/	0.70
Q0142-100	0.49	2.75	-21.84	-23.30	-23.93	2.99	0.90	0.86
HE0512-3329	0.93	0.69	/	-23.79	/	/	0.14	/
HS0818+1227	0.39	3.5	/	/	-22.91	/	/	2.81
HE1104-1805	0.73	8.66	/	-23.86	/	/	1.70	/
SDSS1155+6346	0.18	0.81	/	-20.47	/	/	3.61	/

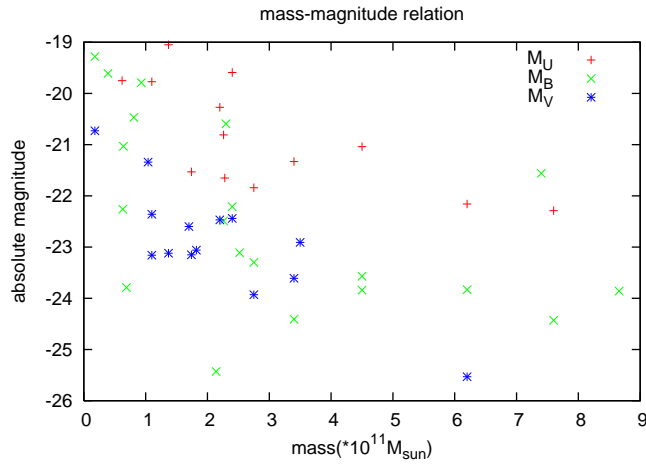
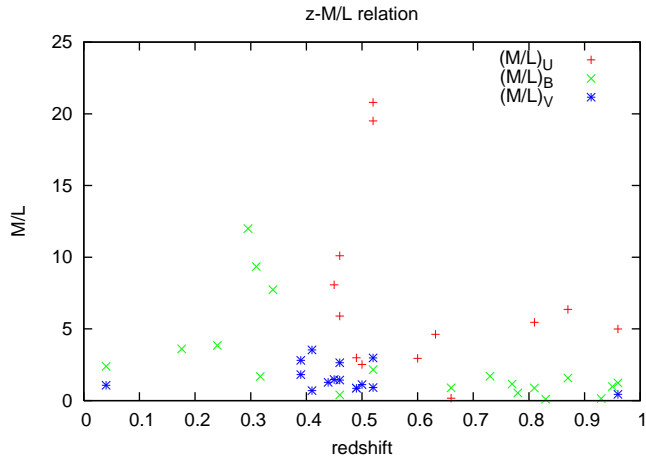


5.2 第二次追加分

更に許容範囲を広げて、データを付け足してみた。

具体的には <http://www.cfa.harvard.edu/glensdata/>にあるデータの内、信頼度 A かつ Einstein 半径が信頼できそうなもの (size が赤字か黒字) を全部拾うことにした。もはや image が 4 つのものはないしリング状 image になってしまっているものもあるが、Einstein 半径と z_d, z_s さえしっかりしていれば問題ないはずである。

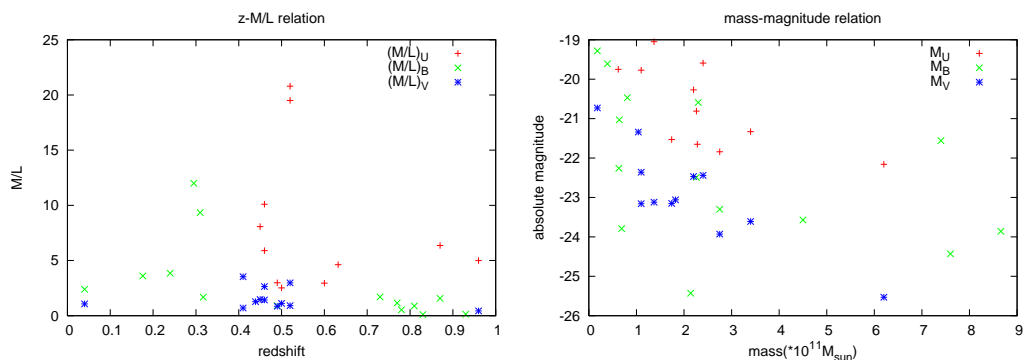
name	z	mass ($10^{11} M_{sun}$)	M_U	M_B	M_V	$(M/L)_U$	$(M/L)_B$	$(M/L)_V$
Q0158-4325	0.317	0.64	/	-21.03	/	/	1.68	/
SBS0909+523	0.83	2.14	/	-25.43	/	/	0.10	/
FBQ0951+2635	0.24	0.39	/	-19.61	/	/	3.85	/
BRI0952-0115	0.632	0.62	-19.75	/	/	4.62	/	/
J1004+1229	0.95	2.52	/	-23.11	/	/	0.98	/
LBQS1009-0252	0.87	2.26	-20.81	-22.49	/	6.36	1.57	/
Q1017-207	0.78	0.63	/	-22.26	/	/	0.54	/
B1030+071	0.6	2.28	-21.65	/	/	2.95	/	/
B1152+200	0.439	1.82	/	/	-23.06	/	/	1.27
SDSS1226-0006	0.52	1.37	-19.05	/	-23.12	19.5	/	0.91
B1600+434	0.41	1.04	/	/	-21.34	/	/	3.53
HE2149-2745	0.5	1.74	-21.53	/	-23.15	2.52	/	1.12



5.3 外れデータの除去

以下のデータを外すことでより安全な考察をしたい。

name	外す band	理由
HE0230-2130	B	観測等級が castles survey でない。
MG0414+0534	B	rest flame 波長がきっちり B に来ない。
HE0435-1223	B	観測等級が castles survey でない。
HS0818+1227	V	rest flame 波長がきっちり V に来ない。
SDSS0924+0219	V	rest flame 波長がきっちり V に来ない。
HST14176+5226	U	rest flame 波長がきっちり U に来ない。
B1422+231	B	rest flame 波長がきっちり B に来ない。
WFI2033-4723	B,U	rest flame 波長がきっちり U でない。B は castles データでない。
J1004+1229	B	rest flame 波長がきっちり B に来ない。



ここまで銀河進化を見出そうと色々やってきたが、やはり M/L 比の進化は見出せない。星質量だけの M/L 比なら redshift 依存性があるかもしれないが、total mass の M/L 比を考える限り $z=0$ から 1 では進化はなさそうである。

またデータを増やしていく中できれいな mass-mag 関係にあてはまらないもの (軽い割に明るい or 重い割に暗い) も出てきてしまった。自分で観測したデータでないためどうしても処理に戸惑うことが多かったためかもしれない。やはり目的に沿った観測を自ら行うのが理想的である。しかし一方でそうした特殊な天体を個別に見るのもおもしろいかもしれない。

Reference

Kormann,R. et al :A&A1994...286...357K "A gravitaional lens model for B1422+231"

Kormann,R. et al :A&A1994...284...285K "Isothermal elliptical gravitatonal lens model"

Ramesh Narayan : Lectures on Gravitational Lensing

Press,W.H. et al : Numerical Recipes in C

<http://www.cfa.harvard.edu/glensdata/>

Iwamuro et al : 2000PASJ...52...251 "Infrared Imaging of the Gravitational Lens PG1115+080 with the Subaru Telescope"

谷口義明他 : シリーズ現代の天文学、銀河 I