

# SDSS J1004 + 4112 : 最大分離角重力レンズ クエーサーの発見

稲田 直久

東京大学天文学教育研究センター

2004年日本物理学会秋期大会 28pSF-1

2004年9月28日 @高知大学

# Collaborators

- Robert Becker (UC Davis)
- Francisco Castander (CSIC)
- Kuenley Chiu (JHU)
- Michael Gregg (UC Davis)
- Daniel Eisenstein (Arizona)
- Joshua Frieman (Chicago)
- Patrick Hall (York)
- Joseph Hennawi (Princeton)
- 市川 伸一 (NAOJ)
- David Johnston (Princeton)
- Charles Keeton (Chicago)
- Robert Nichol (CMU)
- 大栗 真宗 (Tokyo, Princeton)
- Bartosz Pindor (Toronto)
- Gordon Richards (Princeton)
- Hans-Walter Rix (MPIA)
- Don Schneider (Penn State)
- Michael Strauss (Princeton)
- 須藤 靖 (Tokyo)
- Edwin Turner (Princeton)
- Wei Zheng (JHU)

and the **SDSS Collaboration**

# 概要

1. スローン・デジタル・スカイ・サーベイについて
2. 導入 (大離角重力レンズクエーサーについて)
3. 大離角重力レンズクエーサーサーベイ
4. SDSS J1004+4112の発見
5. 今後の追加観測
6. まとめ

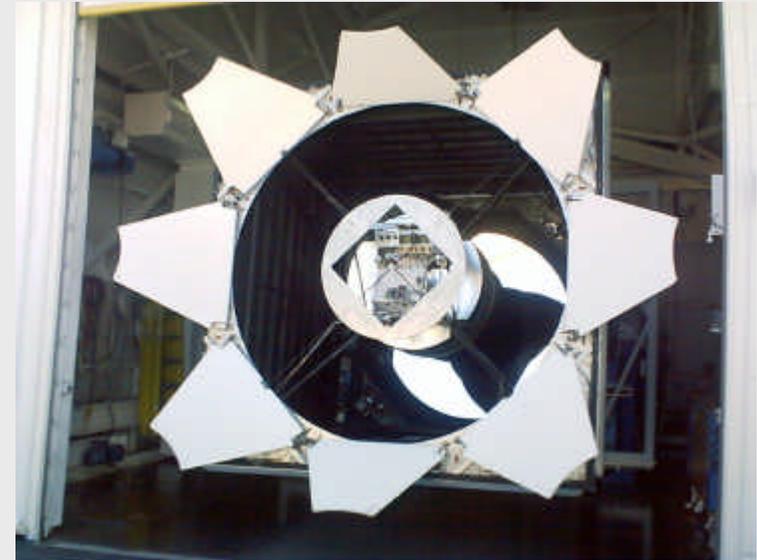
これまで幾つもの探索が行われてきたにもか  
かかわらずその発見がなされていなかった  
銀河団によって強 $\langle$ 重力レンズされた離角  
の大きい重力レンズクエーサーの発見に成功!!

(Inada et al. Nature vol.426 p810

Oguri et al. ApJ vol.605 p78 )

# SDSSの概要

**Sloan Digital Sky Survey** :  
専用の望遠鏡を用い、全天の  
4分の1 (10,000平方度)を可  
視光の領域について測光と  
分光で観測する日・米・独・韓  
の共同プロジェクト。  
2005+?年終了予定。



広域視野専用望遠鏡

最終的には・・・

**10万個**のQSOの一様な分光(測光)データ

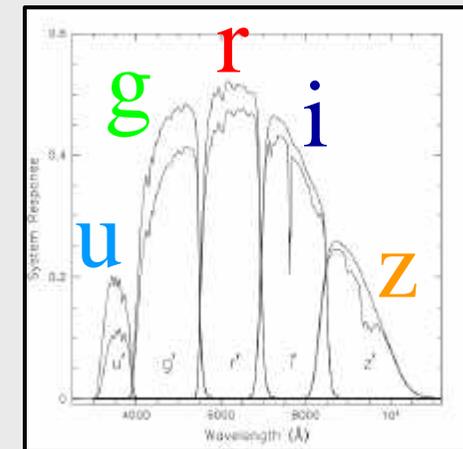
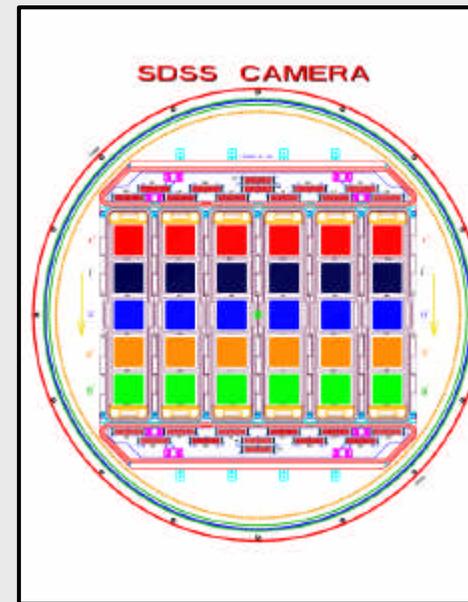
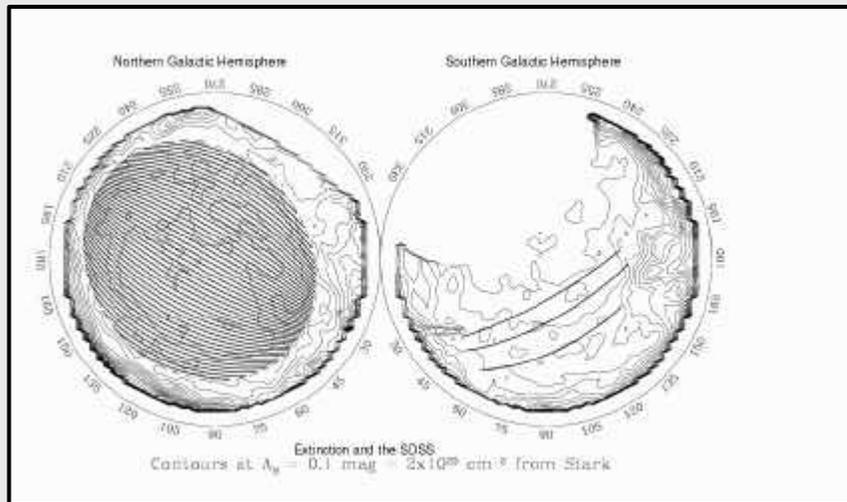
**100万個**の銀河の一様な分光データ

**1億個**の銀河の一様な測光データ

今後数十年間にわたる可視光天文学の基礎データ

# SDSSの観測

観測領域 (10,000平方度)



測光観測 (drift scan)

分光観測  
(ファイバー分光)

測光？ targeting？ 分光？ 測光&分光カタログ

# SDSSのデータ

「宇宙の3次元地図」を作ることが最大の目標。  
しかし、その膨大さと非常に良い一様性により、  
他の様々な目的に対しても使用可能。



現在までに、およそ350編の論文が公開!!  
「lensed quasar survey」もその例外ではない。

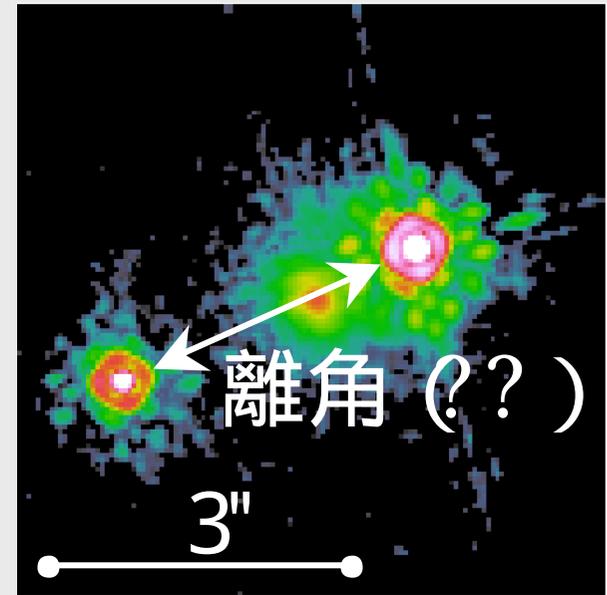
データは順次、無償で公開される予定。

EDR	DR1	DR2	DR3	DR4	DR5
終了	終了	終了	2004/10?	...	...

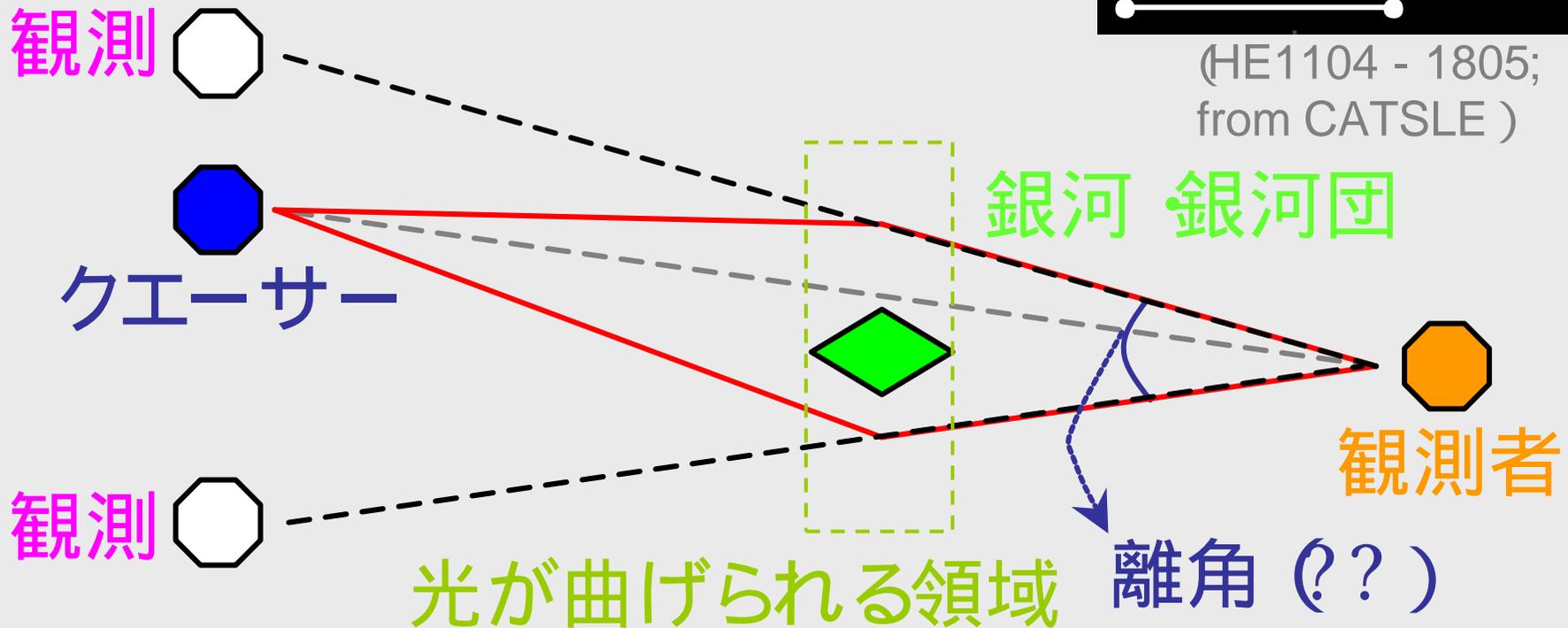
現在までに2100平方度分が公開されている。

# 重力レンズとは？

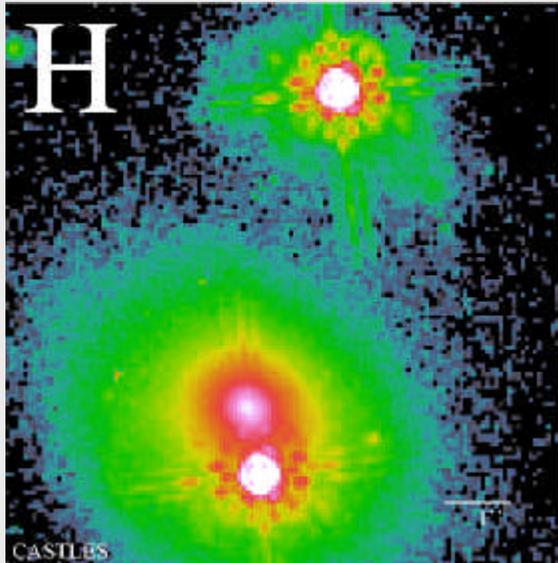
Einsteinの一般相対論によると、重力は「**時空の歪み**」として記述され、そのような凸レンズ状の時空の歪みが**見かけ上の複数の像**を作り出す。



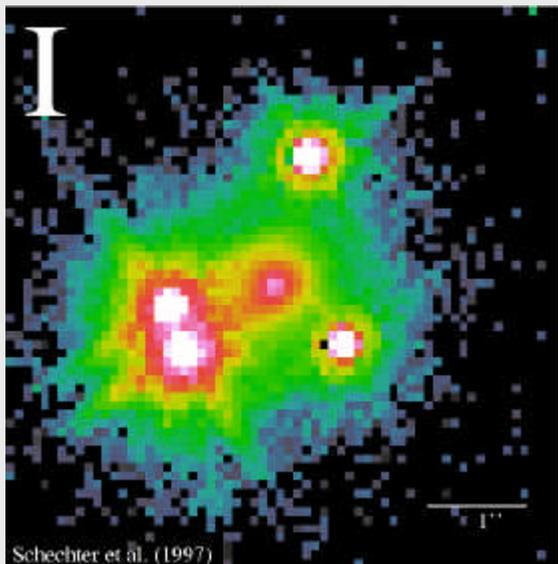
(HE1104 - 1805;  
from CATSLE )



# 現在までの観測結果その1



(Walsh et al.)



(Weyman et al.)

- **Q0957+561** (1979年)

- **PG1115+080** (1980年)

以来、現在までにおよそ**70個**の重力レンズクエーサーが発見されている。

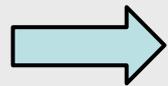
(+ 9 new lenses from SDSS)



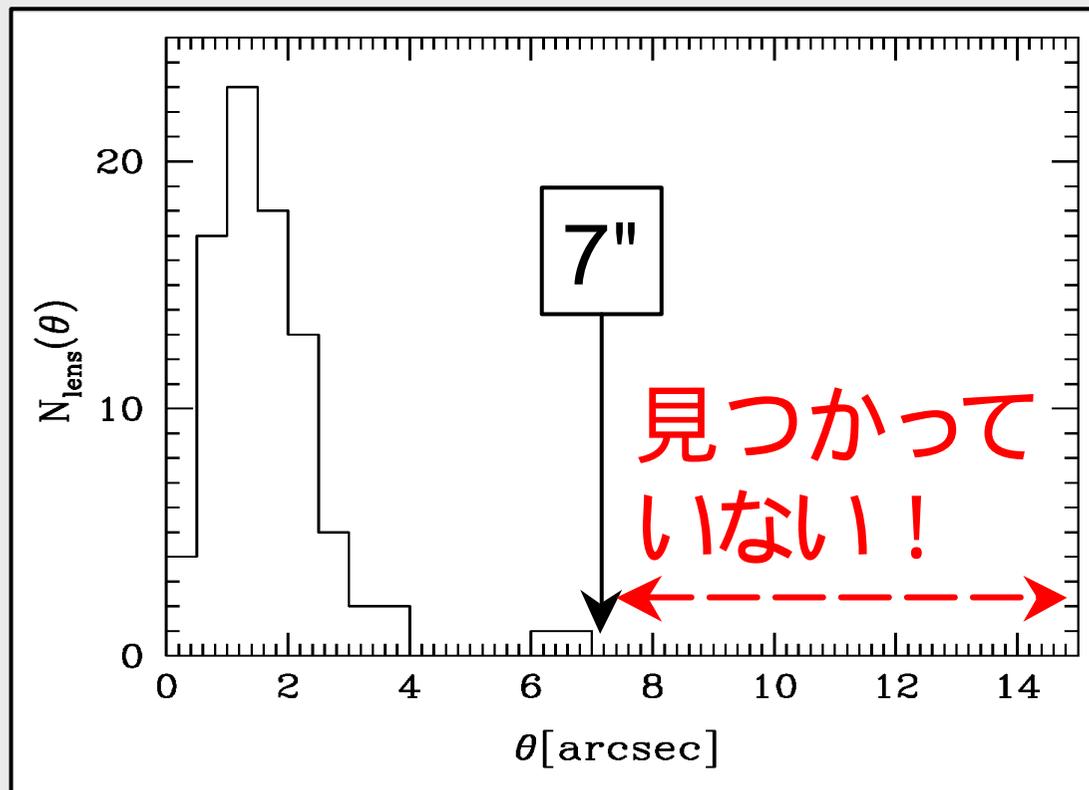
一般相対論の観測的な証拠のみならず、現在では**有用な宇宙論の検証の道具の1つ**として用いられている。

## 現在までの観測結果その2

しかしながら、現在観測されているおよそ80個の重力レンズクエーサーは全て?? < 7.0"である。

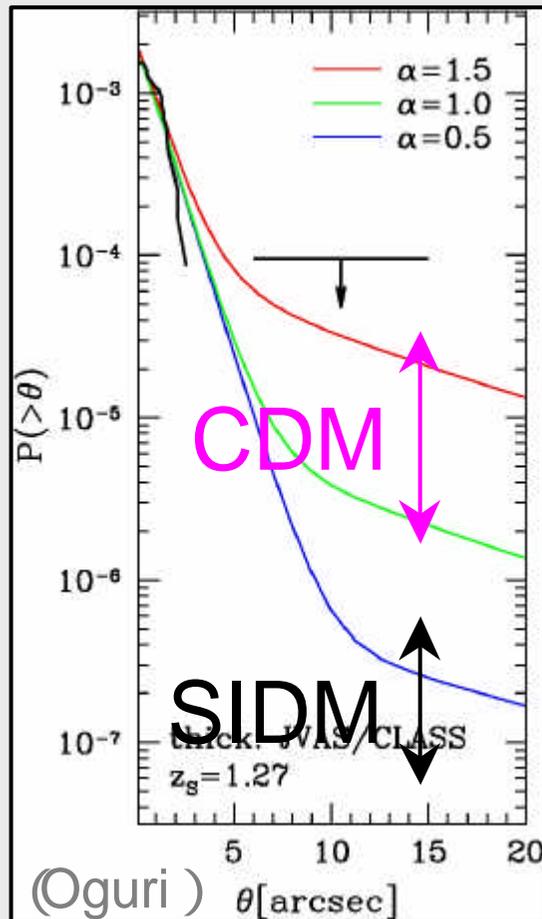
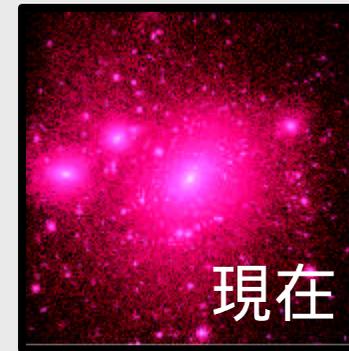
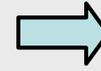
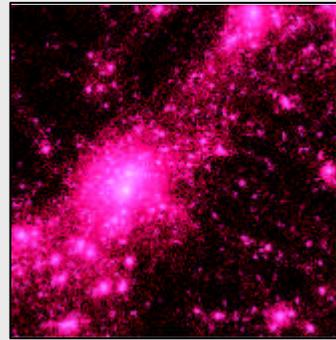
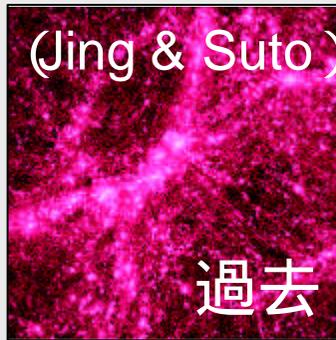


「**1つの銀河**」、あるいは  
「(数個程度の) **銀河のグループ**」による。



**銀河団**、あるいは  
それに相当する大質量による?? > 7.0"  
の重力レンズクエーサーは存在しないの  
だろうか?

# 大離角重力レンズクエーサー



宇宙の大規模構造をよく説明する標準的なCDMモデルは中心集中した銀河団スケールのダークマターの塊の存在を予測。

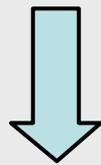
? それらにより、十分に観測される割合で?? > 7.0"の重力レンズクエーサーが存在していることが予測されている。

# 重力レンズクエーサーの「分類」

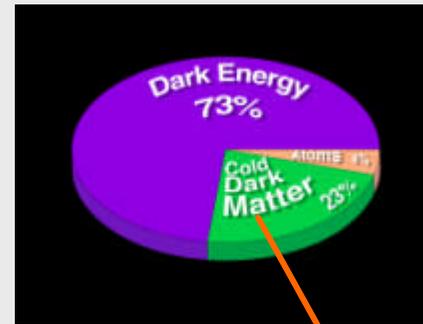
小離角レンズクエーサー 銀河 ( $t_{\text{age}} > t_{\text{cool}}$ ) ? ?  $r^{-2}$   
 ? バリオン

?? ~ 7.0"

大離角レンズクエーサー 銀河団 ( $t_{\text{age}} < t_{\text{cool}}$ ) ?  
 ? ダークマター  $r^{-a} (r+r_s)^{a-3}$



大離角レンズクエーサー  
 はダークマターモデルの  
 検証の道具 1つである!!

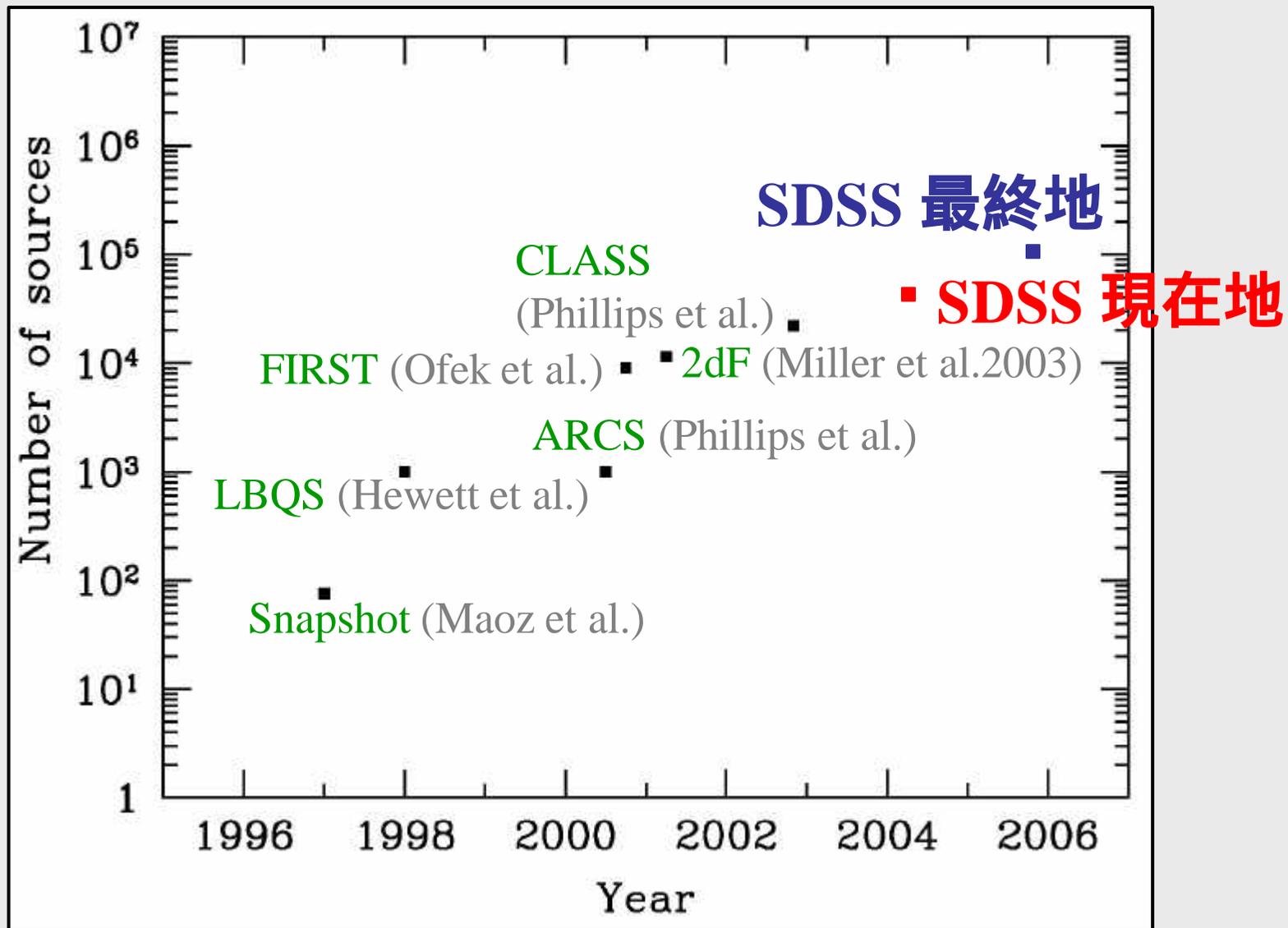


cold DM ?

warm DM ?

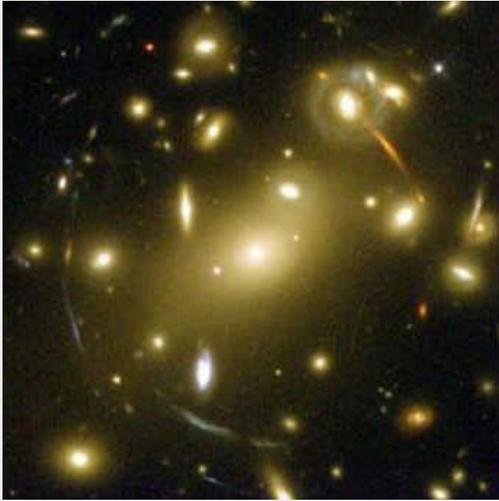
self-Interacting DM ?

# 過去の観測との比較



これまでの探索はすべて失敗に終わっている。

## (大離角)重力レンズアーク



大離角の「重力レンズ銀河」はすでに数十例が観測されている。

銀河団スケールの質量によって重力レンズされていることから大離角レンズクエーサーとは相補的だが・・・

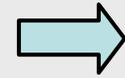
1. Lens-Selected (はじめにclusterありき)
2. レンズ像の特定が難しい。
3. レンズ像のredshiftが計りにくい。
4. sourceのpopulationが良く知られていない。
5. ほとんど全てがmassiveなレンズ天体で起こる。
6. Time-Delayが計れない。

などの違いがある。

# 大離角レンズ探査方法

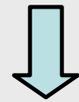
SDSSのデータは……

- 空間解像度が低い。
- 観測地の大気ゆらぎ大



小離角 (?? < 7.0") の  
レンズは形成される  
各像に分割されない

しかし、大離角 (?? > 7.0") については十分分割!!



\* 基本的には \* 簡単

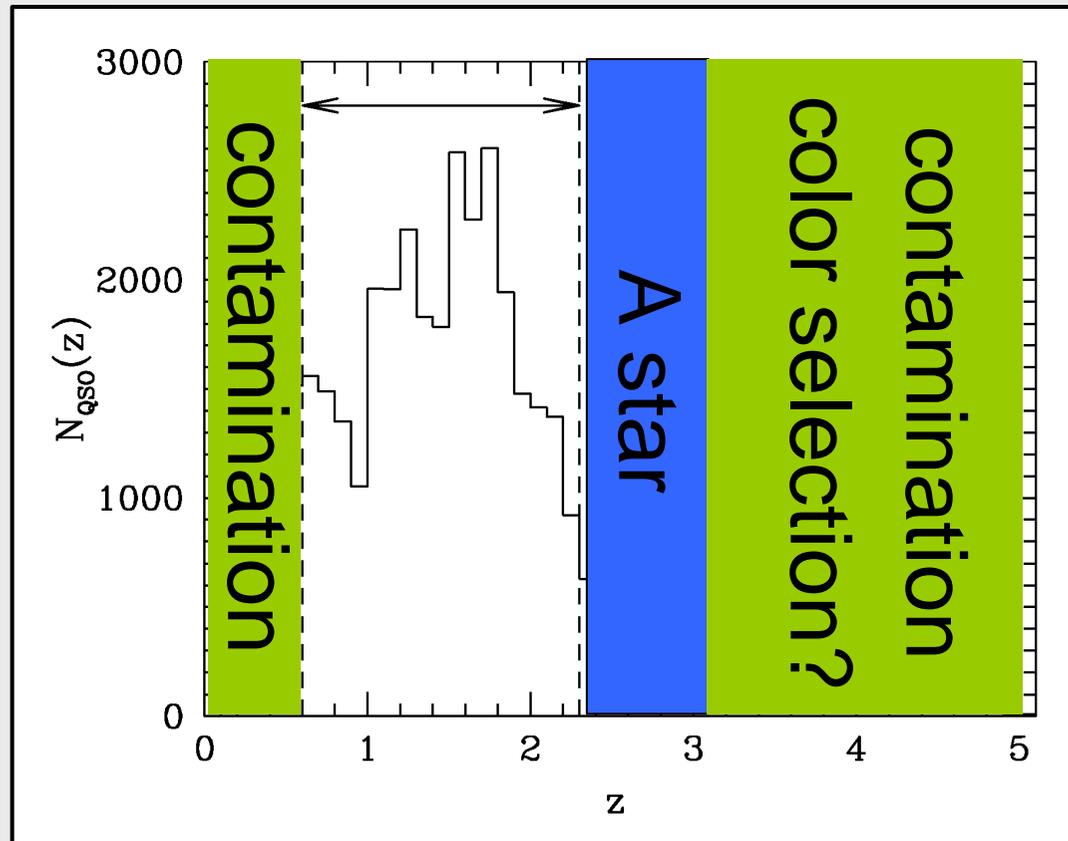
• 重力レンズは「明るさは変えるが色は変えない」という性質を直接利用。

• 探索範囲の限界は60"

? 実際には……?



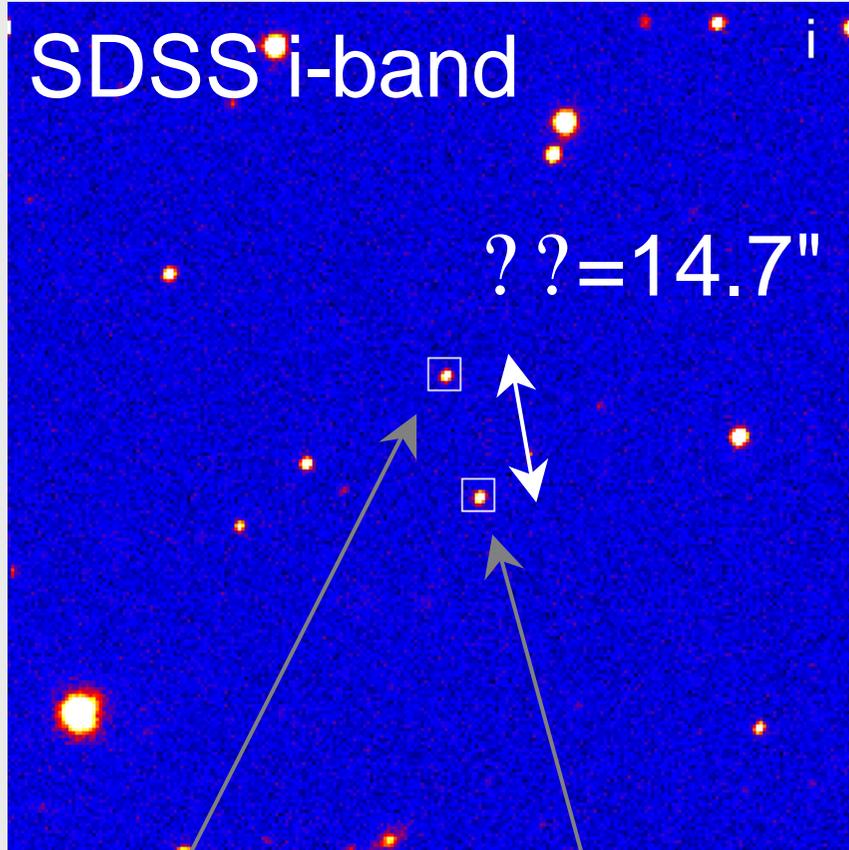
# SDSSのデータにおける大離角レンズ探査



今回の探索では、約**30,000個**の **$0.6 < z < 2.3$** のクエーサーを使った。

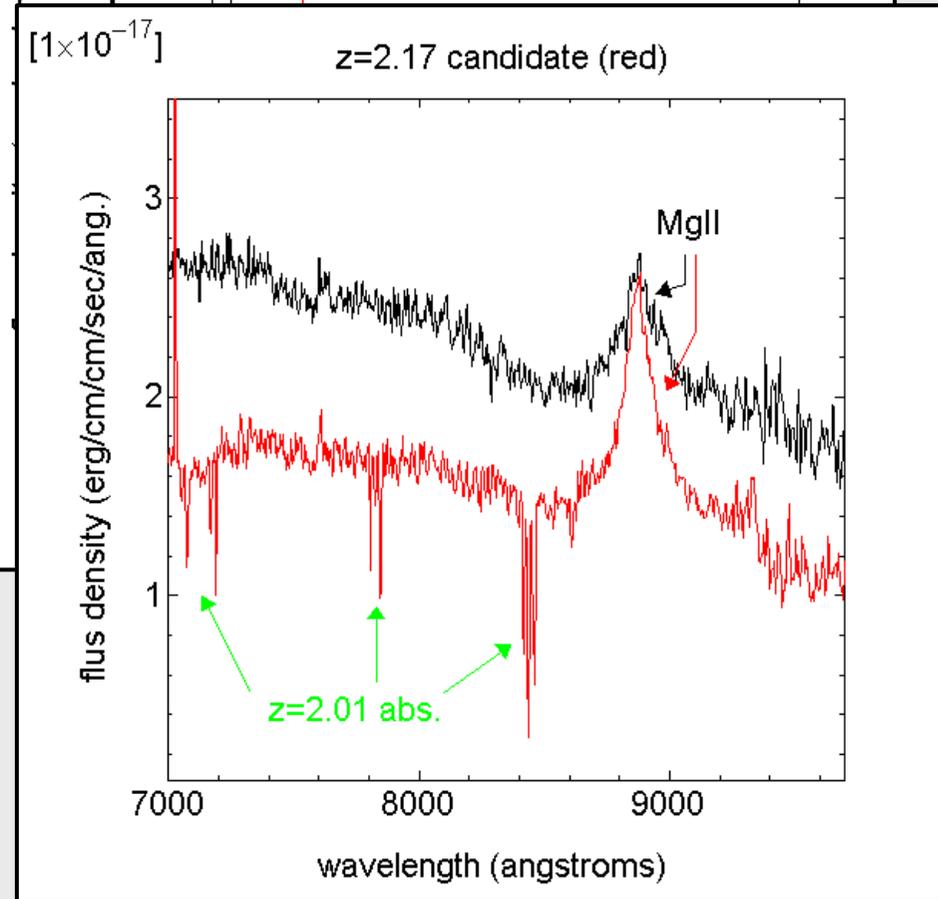
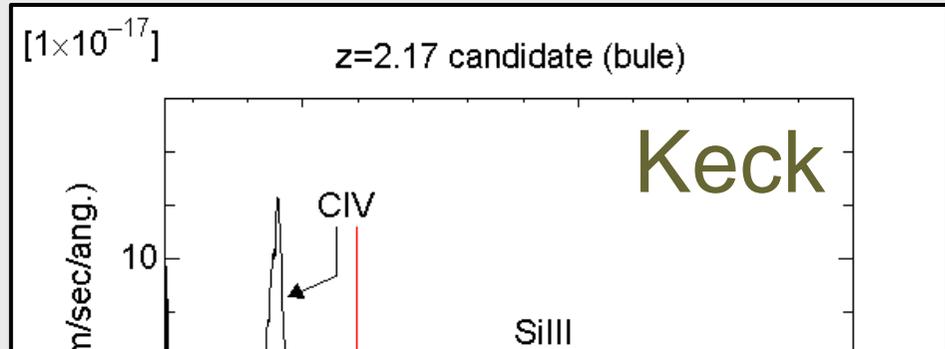
? (公開されていない) 生データでは、 $z < 0.6$  と  $z > 2.3$  でcontamination大。

# 候補 その1



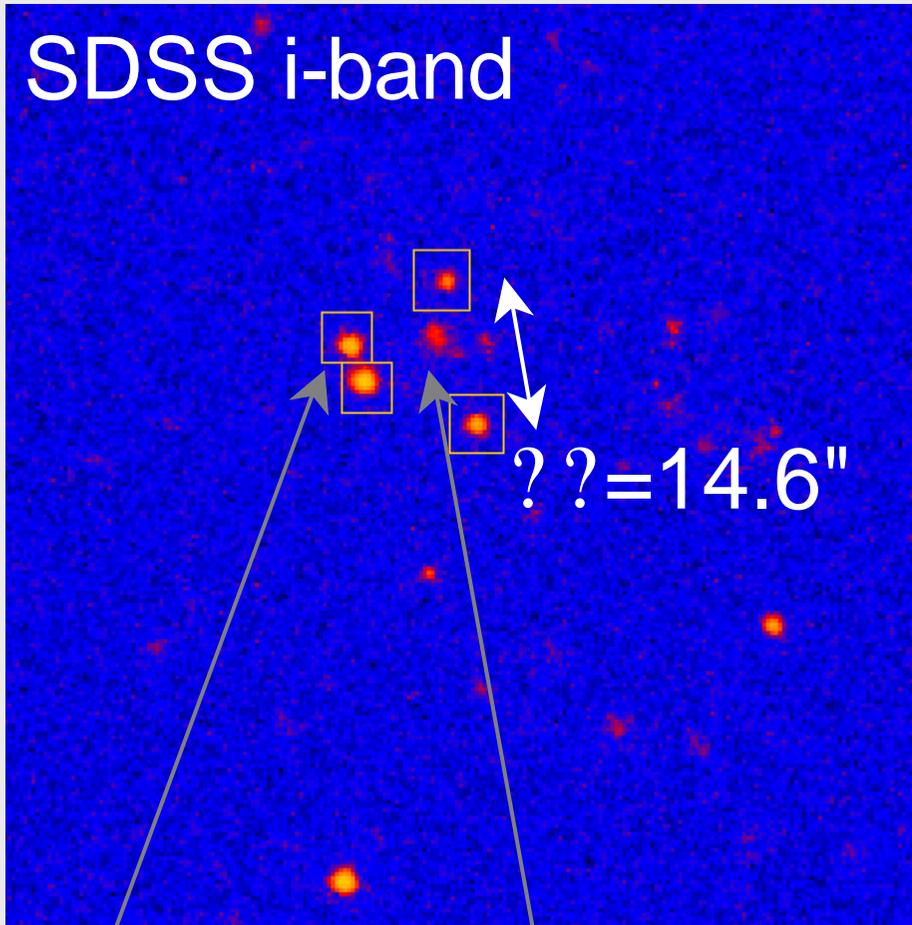
色の同じ SDSS QSO  
天体

「レンズ銀河団」なし



## 候補 その2 : 初の大離角レンズ?

SDSS i-band



SDSS QSO

レンズ 銀河団?」?

世界初の大離角重力  
レンズクエーサーを  
発見!?

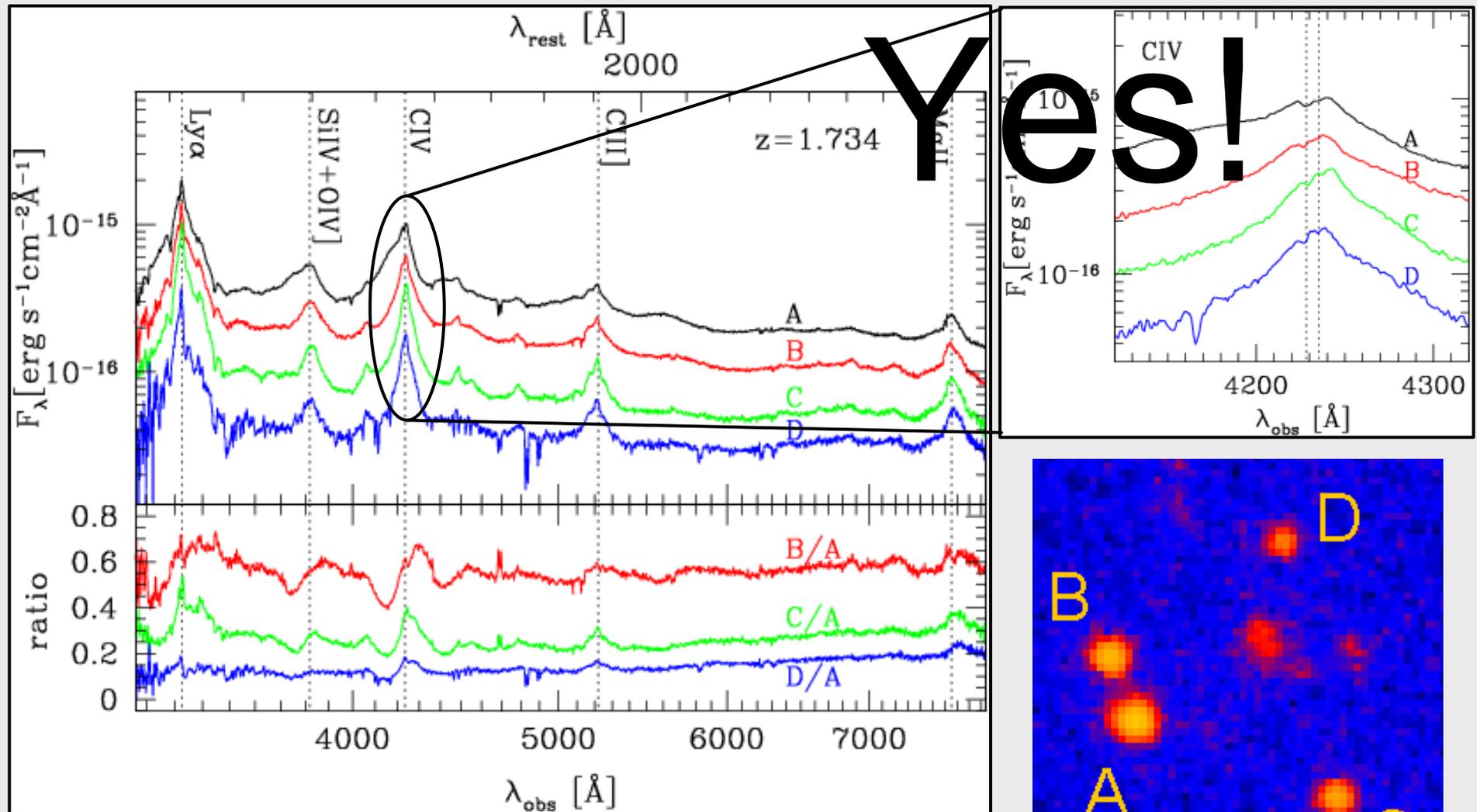
- ?? (最大) = 14.62"
- 形 (配置) がこれま  
に知られている 4重像  
レンズ (例: PG1115  
に酷似)



直ちに追加観測へ

# レンズ像の分光追加観測

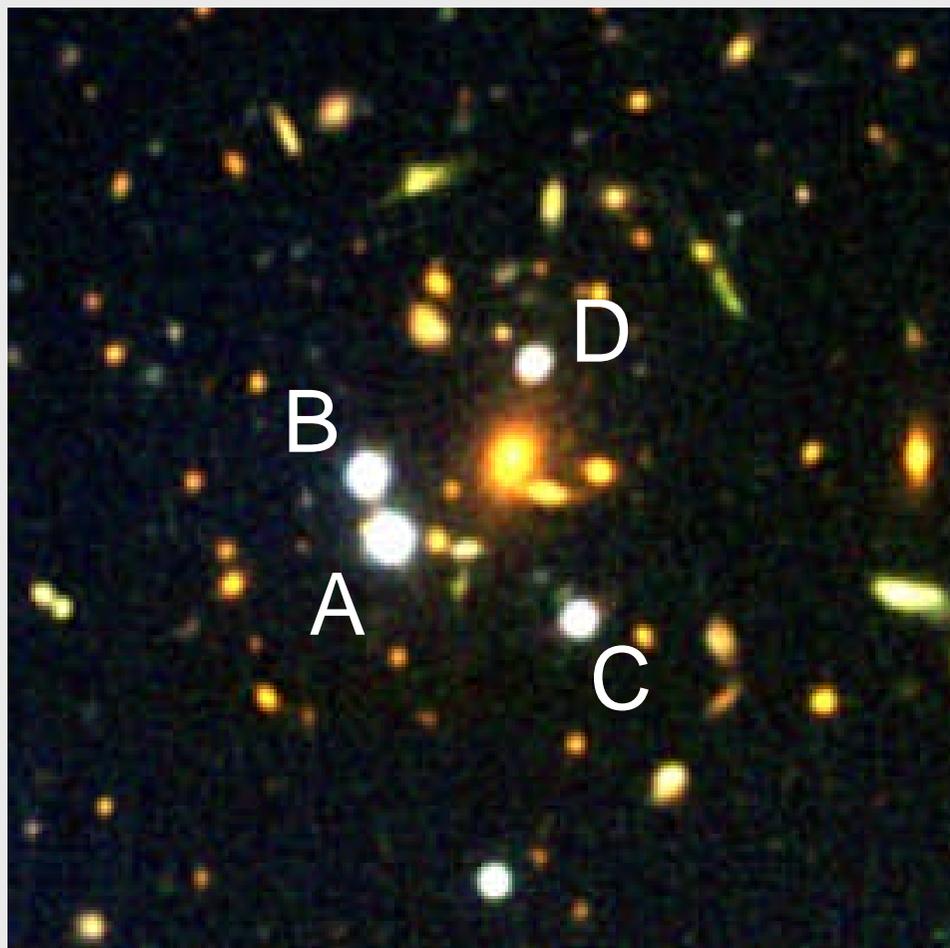
4つの星状の像は源が同じクエーサーか?



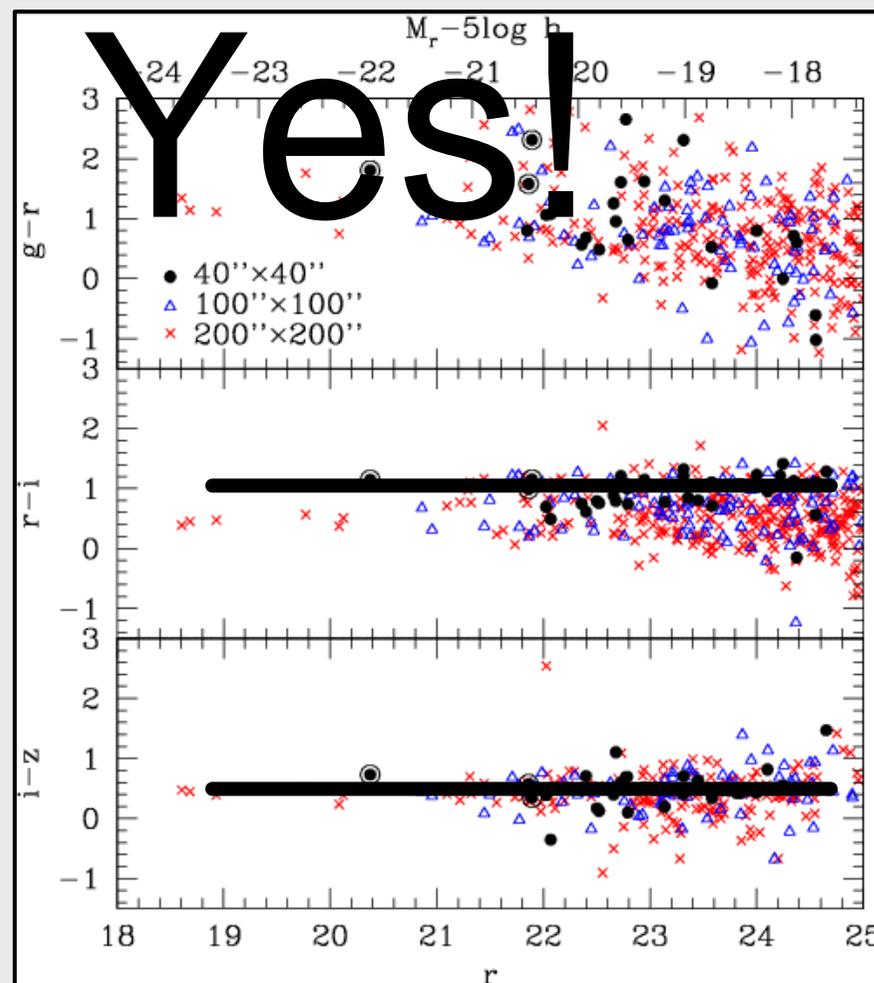
Keck

# 測光追加観測

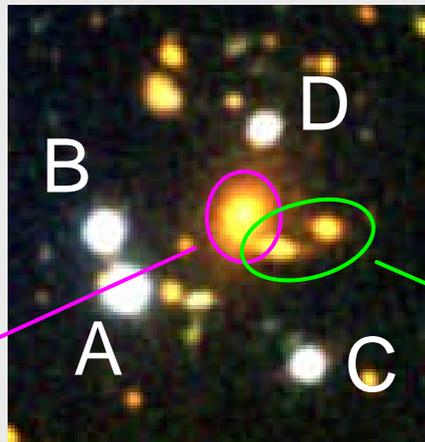
レンズとなっている銀河団は存在するか？



Subaru



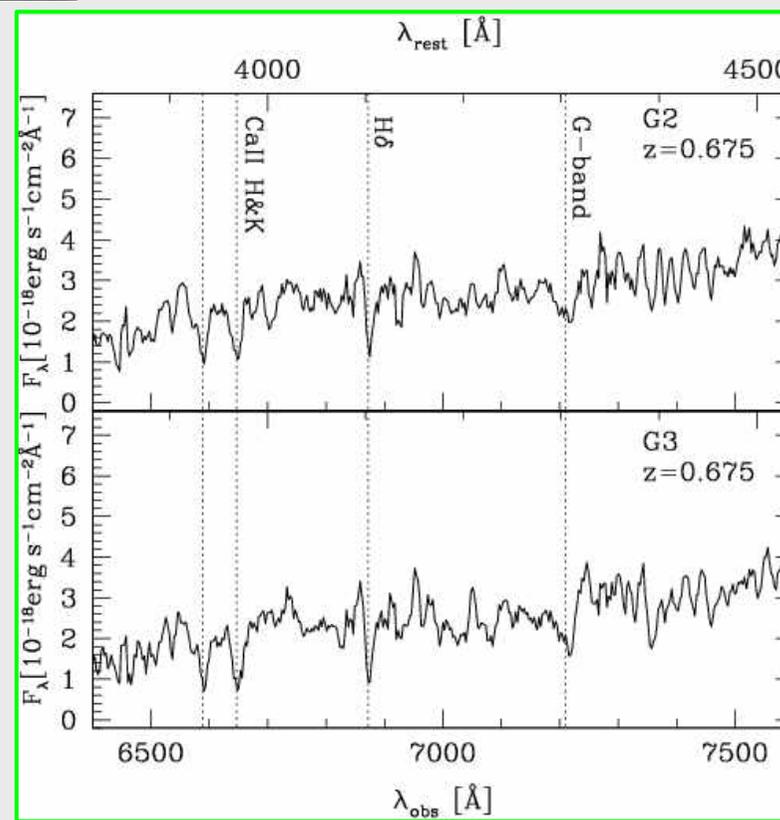
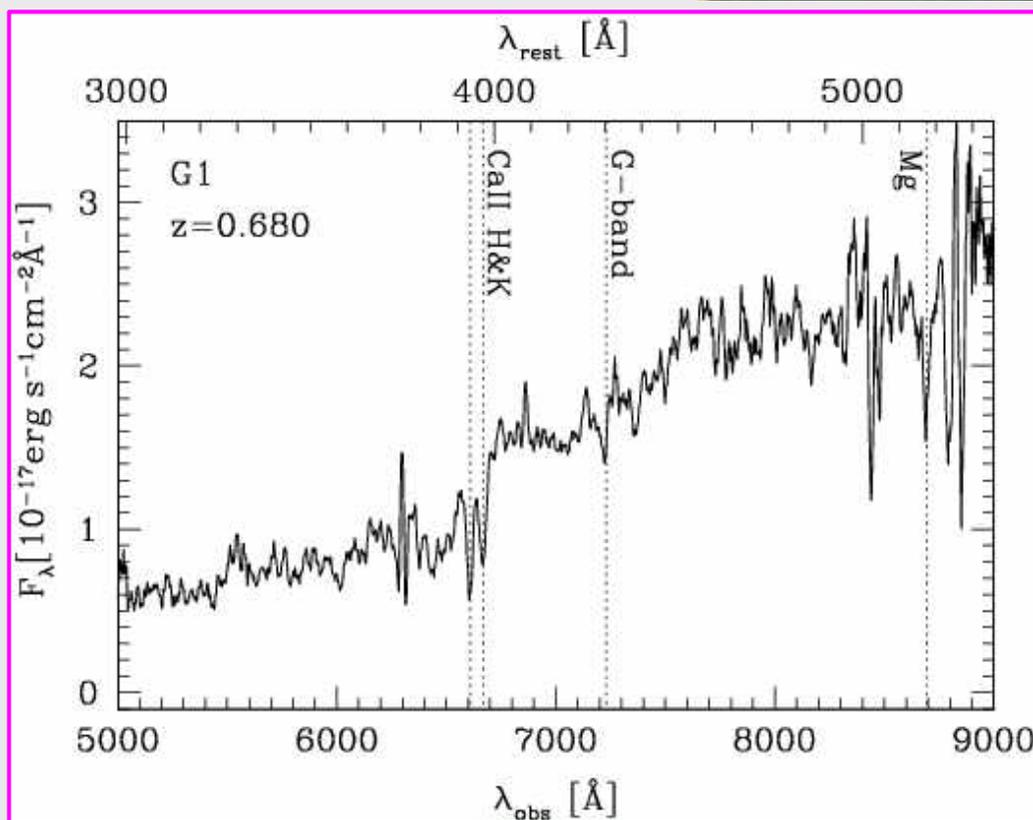
# レンズ天体の分光追加観測



全て  $z = 0.68$

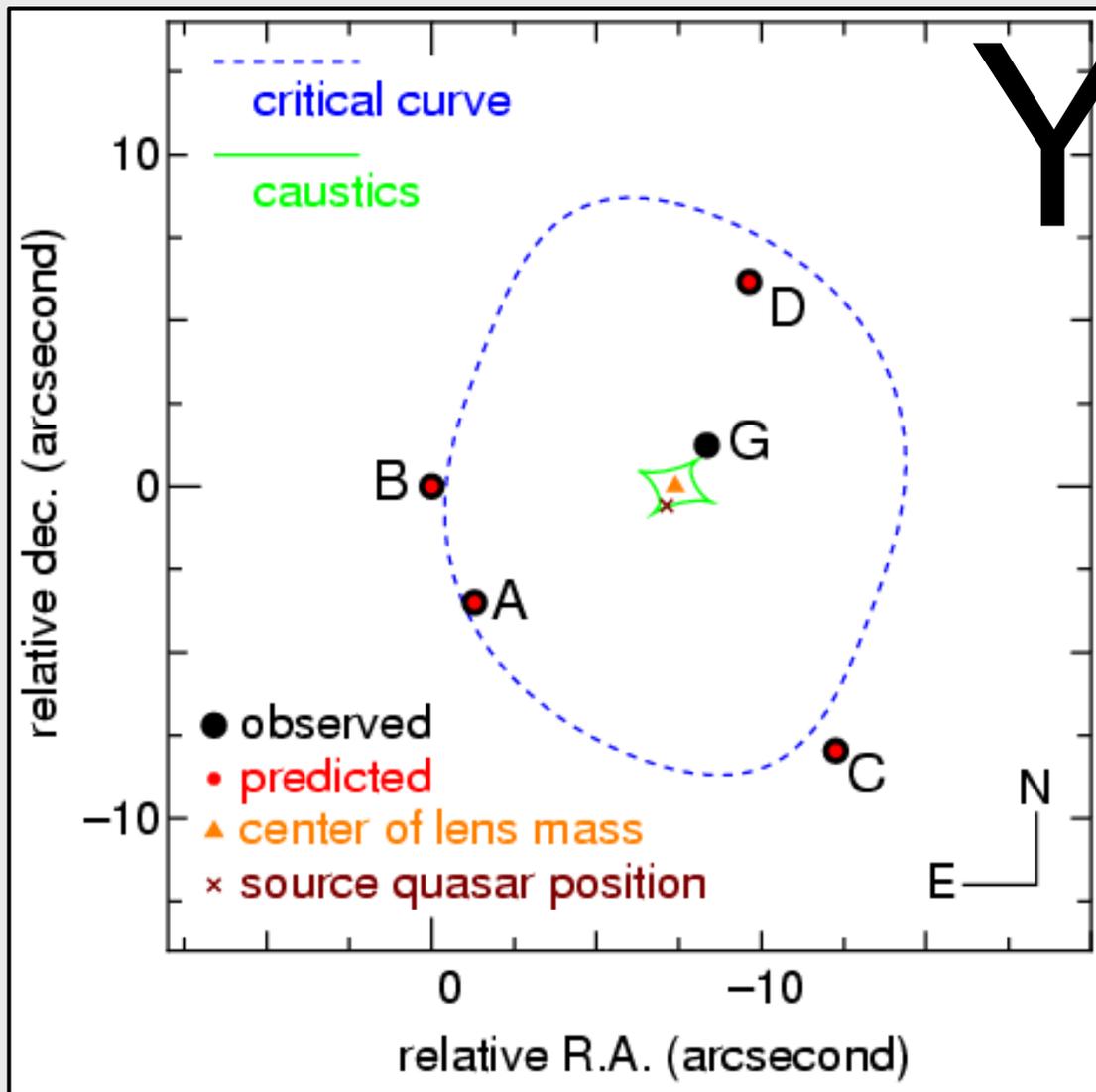
Keck

Subaru



# レンズモデリング

レンズモデルによって説明できるか?



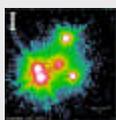
Yes! SIE + shear

$$\psi(r, \theta) = \sigma^2 r^2 + \frac{\gamma}{2} r^2 \cos(2\theta - 2\theta_\gamma),$$

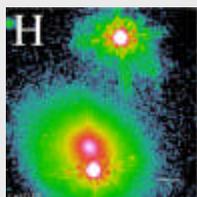
Einstein Radius :  
**6.9"** ( 700 km/sec )

flux比	
観測値	予測値
<b>0.69</b> (B/A)	0.78
<b>0.46</b> (C/A)	0.43
<b>0.22</b> (D/A)	0.25

# おまけ



1115+080



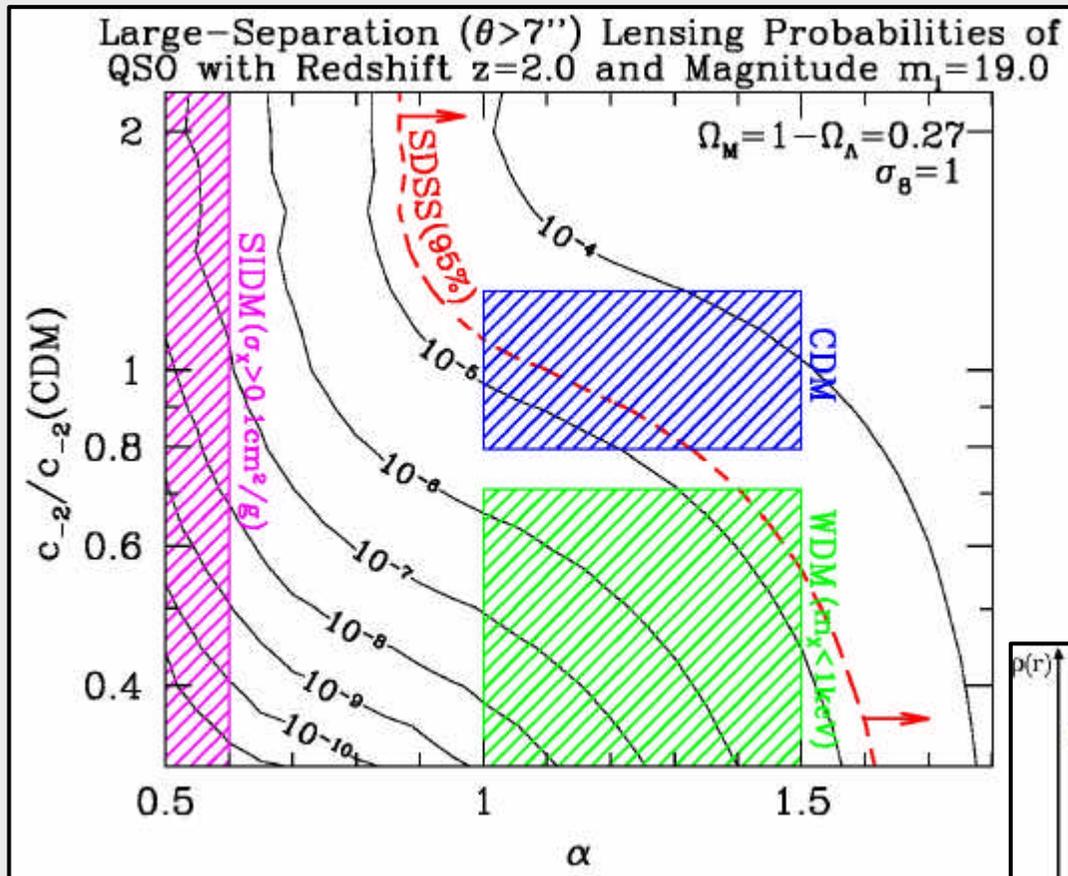
0957+561



1004+4112

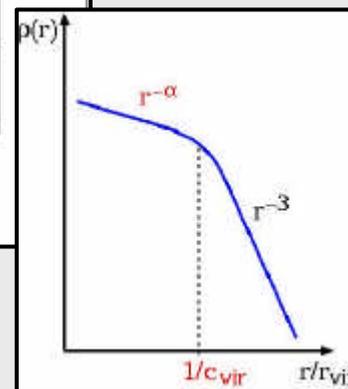
# 結果 その1

これまで未発見であった 銀河団「レンズクエーサー」の発見に成功!! 新種のレンズの存在を確立。



$$\rho(r) = \frac{\rho_{\text{crit}} \delta_c}{(r/r_s)^\alpha (1 + r/r_s)^{3-\alpha}}$$

一般化されたNFWを用いたレンズ確率

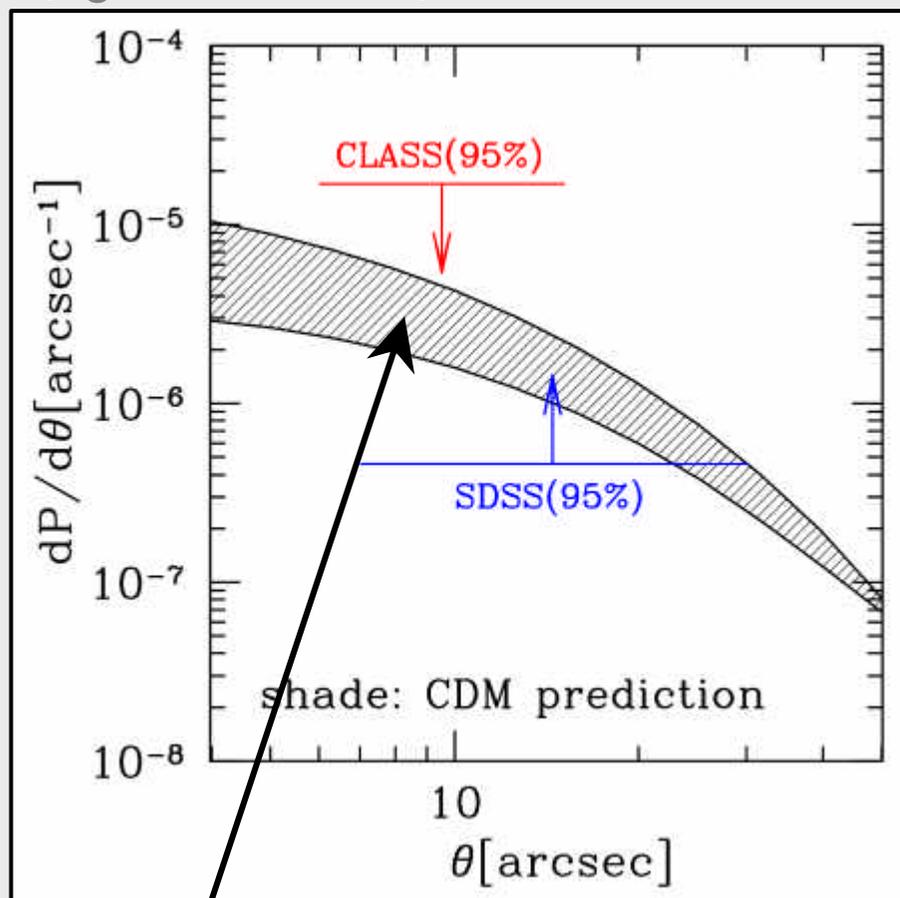


CDMを強く支持!!

(Oguri & Keeton)

## 結果 その2

大栗氏 & Keeton氏による  
三軸不等楕円体を用いた  
レンズ確率の計算



CLASS (~ 10,000個) で  
1個も見つからなかった。

+

SDSS (~ 30,000個) で  
1個見つかった。



CDMを強く支持!!

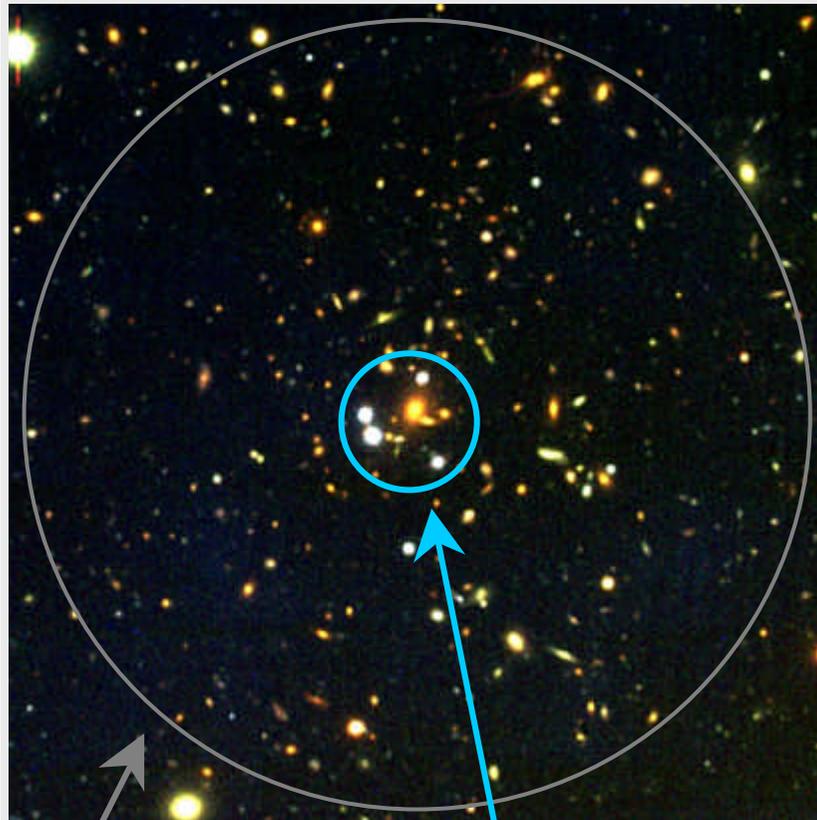
CDMによる理論予測

発見されたものが「4重像」



# J1004 Further Follow-up Observation

J1004により、**銀河団の中心部分の質量分布**を正確に知ることができる!!



1 Mpc

0.1 Mpc

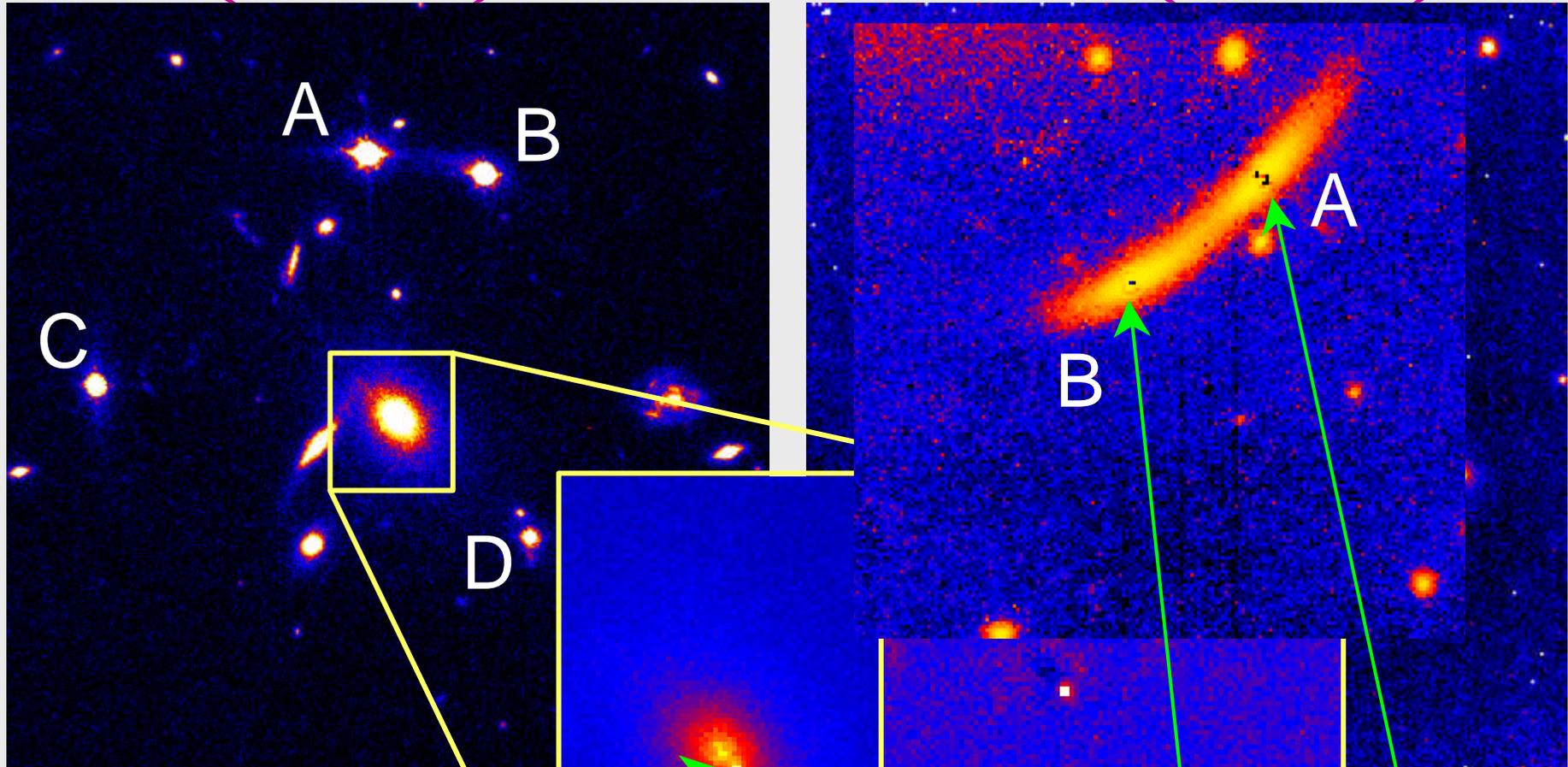
しかしながら、J1004のレンズモデルのパラメータは観測によるconstraintよりも多い。  
? 様々なモデルで説明可能。

現在、観測によってさらなるconstraintを得るための観測を実施中。これによりモデルを決定し、**銀河団中心の質量分布を求める。**

# ハッブル宇宙望遠鏡による撮像

ACS (F814W)

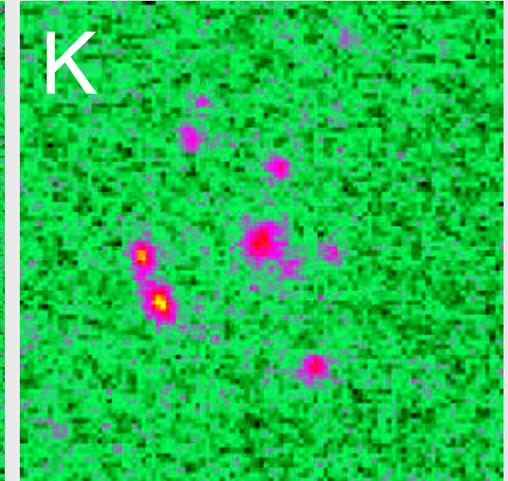
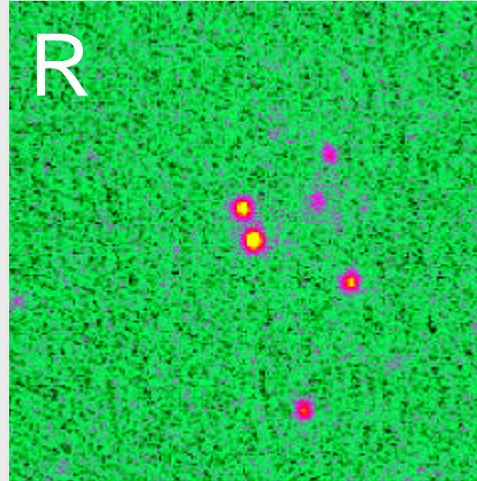
NICMOS (F160W)



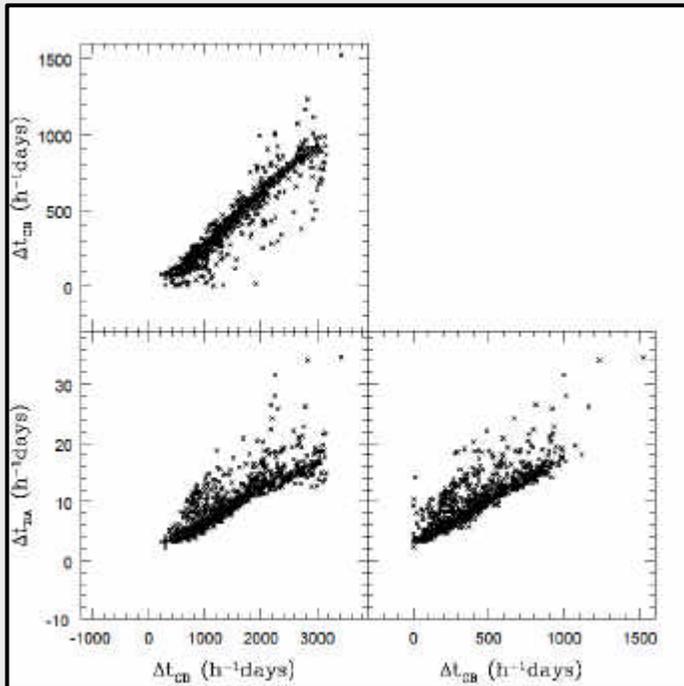
レンズシステム  
の 5番目 の像？

「ホスト銀河」

# 測光モニタリング観測



(テスト観測の結果)



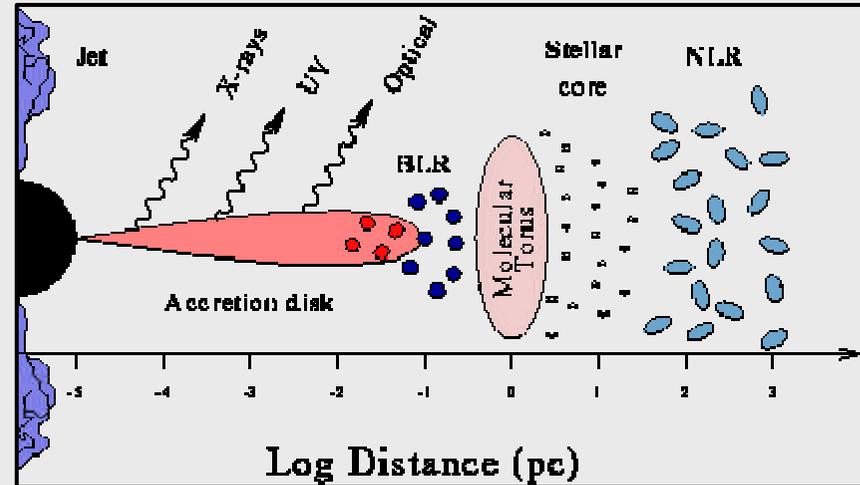
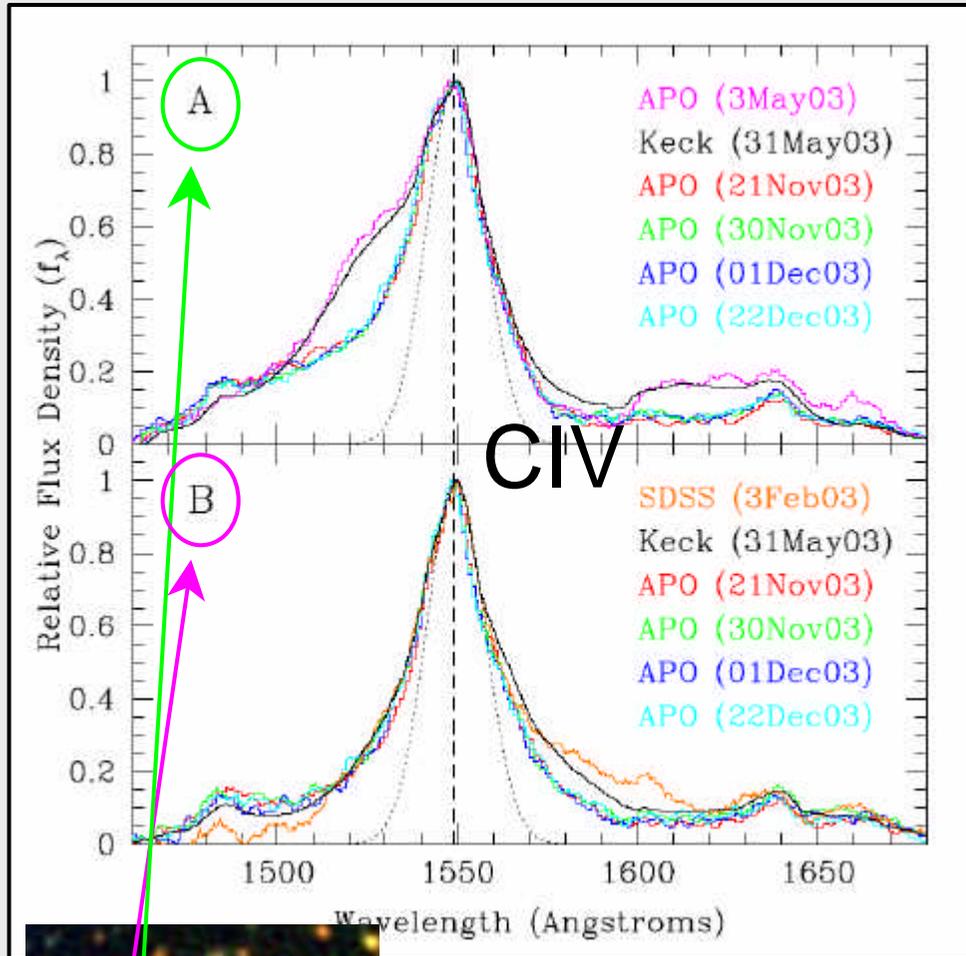
東京大学の**MAGNUM望遠鏡**

(@ハワイ・マウイ島)を用いた  
測光モニタリング観測による  
**time-delay**の測定。

? **04年11月より**本格始動

# 分光モニタリング観測

(Richards et al.)

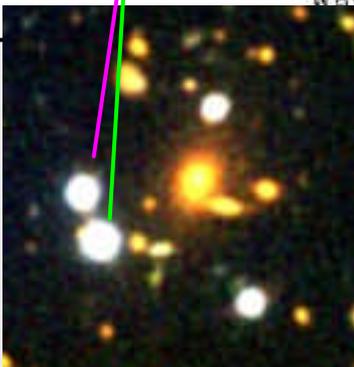


BELRのマイクロレンズ  
何がmicrolensを引き起こしているかは不明。

intra-cluster MACHO?

Aに近い銀河中の星?

ARC 3.5m



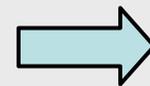
? BELRのサイズ・構造?

# レンズ銀河団におけるSZ効果



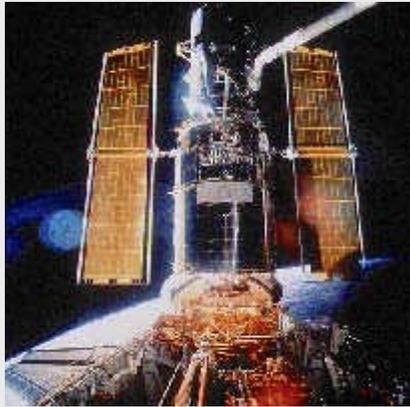
野辺山45m電波望遠鏡  
を使ってレンズ銀河団か  
らのSZ効果を観測。

(with 坪井 (NRO) )  
桑原 (東大理) et al.)



No Signal

# 今後の追加観測の予定



ハッブル宇宙望遠鏡：  
ACSによるF555Wの  
撮像、NICMOSによる  
CとDの撮像



チャンドラX線望遠鏡の  
観測時間 (80Ksec) 獲得!!  
(with 太田 (理研) 満田、  
藤本 (宇宙研))



すばる望遠鏡 5番目の像の分光、  
およびレンズ銀河団によるWeak  
Lens (未定)

## まとめ

SDSSのデータより、銀河団スケールの質量分布による初の大離角レンズクエーサー、

### SDSS J1004+4112

を発見することに成功。新しい種類のレンズの存在を確立。

- ? 銀河団スケールでも**CDMが良く成り立つ**。
- ? 銀河団中心での**CDMの密度分布**。
- ? クエーサーの**BELRのサイズ・構造**。

現在もJ1004の追加観測、および新しい大離角レンズの探索を継続中。

# Further Large-Sep Lenses

Astronomy

## Wide-angle lens

Joachim Wambsganss

Gravitational lenses produce multiple images of single astronomical objects. The most widely separated images of a quasar ever found reveal the dark-matter content of the lensing galaxies.

News & Views  
J. Wambsganss  
Nature Vol.426  
P781 2004

SDSS ?  
2dF ?

seen by Inada *et al.*<sup>1</sup> is very strong, and this is the first detection of a galaxy cluster whose very massive dark halo is splitting a quasar image. The fact that they see four images also hints at the mass profile: the dark matter must be quite concentrated, and slightly asymmetric, around the cluster. Once the variability of the quasar has been picked up in each of the images, that will reveal<sup>8</sup> more about the distribution of dark matter in this system. But, as the authors state, it is already clear that this discovery confirms the predictions of the 'concordance' model<sup>9</sup>, the standard model of cosmology.

Inada *et al.*<sup>1</sup> found this record-breaking quasar lens by performing a systematic search among the tens of thousands of quasars logged by the Sloan Digital Sky Survey (SDSS)<sup>10</sup>. Previously, the most comprehensive lens searches had been done at radio wavelengths<sup>11</sup>; they showed that about one in 700 quasars is multiply imaged by a gravitational lens. But with the advent of two large-scale surveys, SDSS and 2dF (ref. 12), such huge studies are now possible at

visible wavelengths as well. Many more large-separation quasar lenses should soon be found, enabling quantitative comparison of the matter distribution in the Universe with theories of its formation. It's a safe bet that it won't be another 24 years until this quasar record is broken. ■

Joachim Wambsganss is at the Physics Institute, University of Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam, Germany.

e-mail: [jkw@astro.physik.uni-potsdam.de](mailto:jkw@astro.physik.uni-potsdam.de)

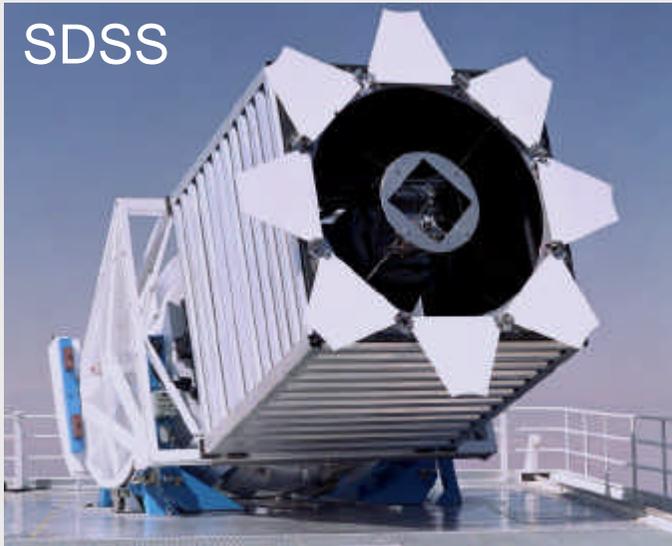
1. Inada, N. *et al.* *Nature* **426**, 810–812 (2003).
2. Einstein, A. *Science* **84**, 506 (1936).
3. <http://cfa-www.harvard.edu/castles>
4. Walsh, D., Carswell, R. F. & Weymann, R. J. *Nature* **279**, 381–384 (1979).
5. Muñoz, J. A. *et al.* *Astrophys. J.* **546**, 769–774 (2001).
6. Wambsganss, J. *Living Reviews in Relativity* **1**, No. 12 (1998); [www.livingreviews.org/Articles/Volume1/1998-12wamb](http://www.livingreviews.org/Articles/Volume1/1998-12wamb)
7. Natarajan, P. & Kneib, J.-P. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **287**, 833–847 (1997).
8. Kochanek, C. S. *Astrophys. J.* **578**, 25–32 (2002).
9. Ostriker, J. P. & Steinhardt, P. *Nature* **377**, 600–602 (1995).
10. Richards, G. T. *et al.* *Astron. J.* **123**, 2945–2975 (2002).
11. Browne, I. W. A. *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **341**, 13–32 (2003).
12. Croom, S. M. *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **325**, 483–496 (2001).

# Thanks!!

Subaru



SDSS



Keck



Nobeyama



HST



ARC



MAGNUM

