

# サーベイ時代の宇宙論

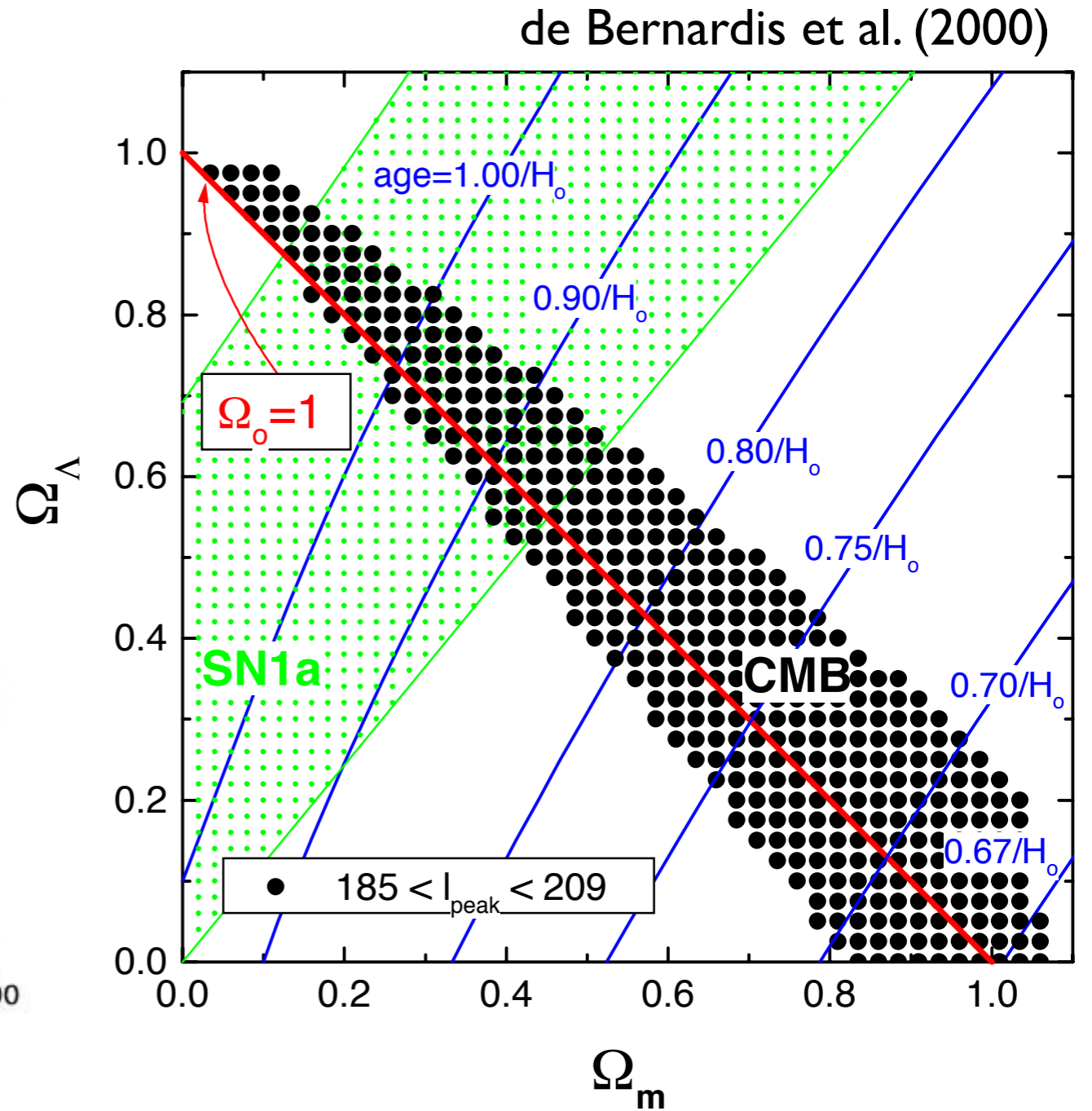
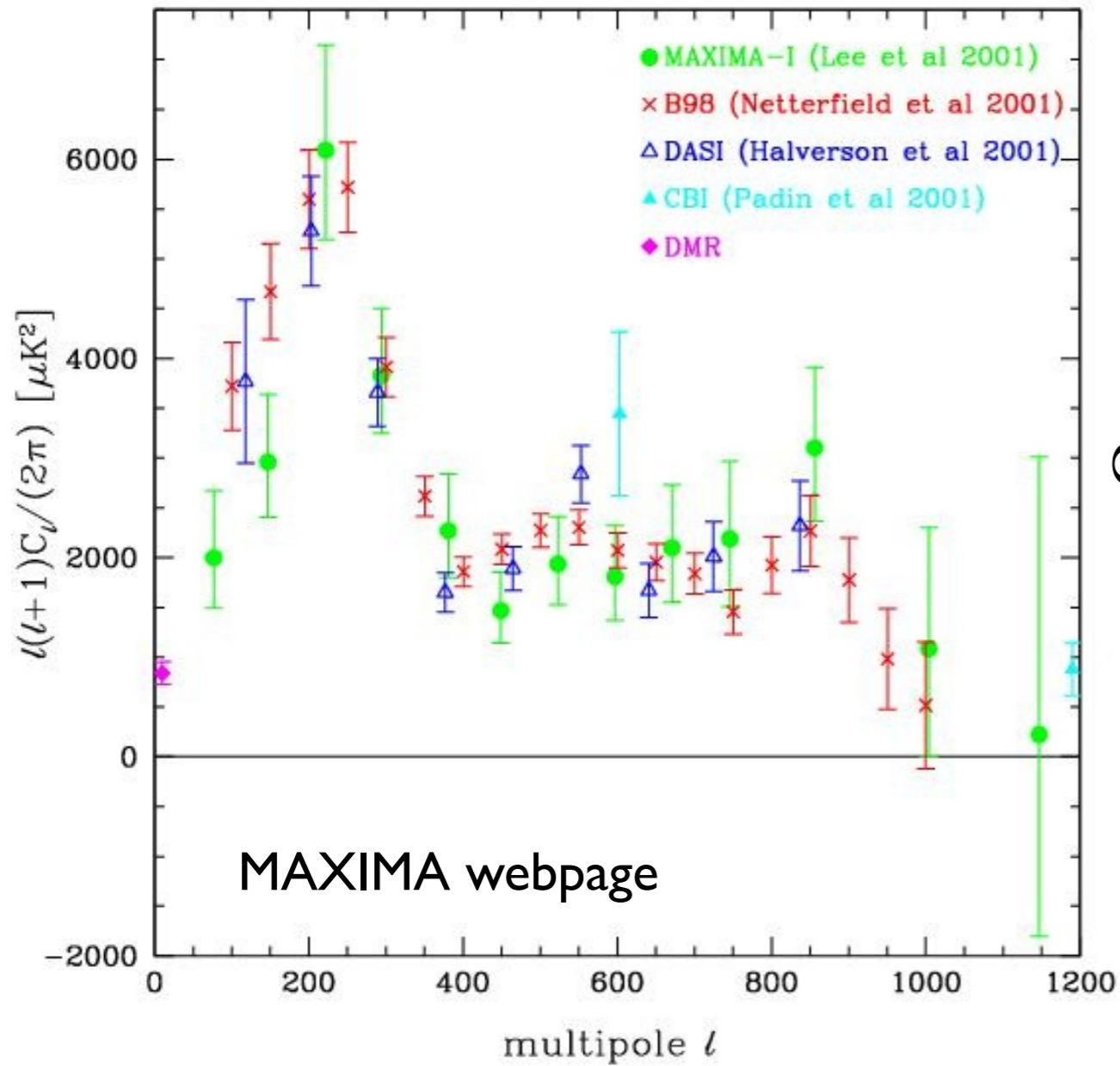
大栗 真宗

(東京大 RESCEU/Kavli IPMU)

# 自己紹介

- 東京大学 理学系物理にて博士号取得  
夏の学校はMIからD2まで参加
- プリンストン、スタンフォード、国立天文台  
で長いポスドク
- 東京大学 (IPMU、その後物理) で助教
- 研究分野：宇宙論の理論とか観測とか

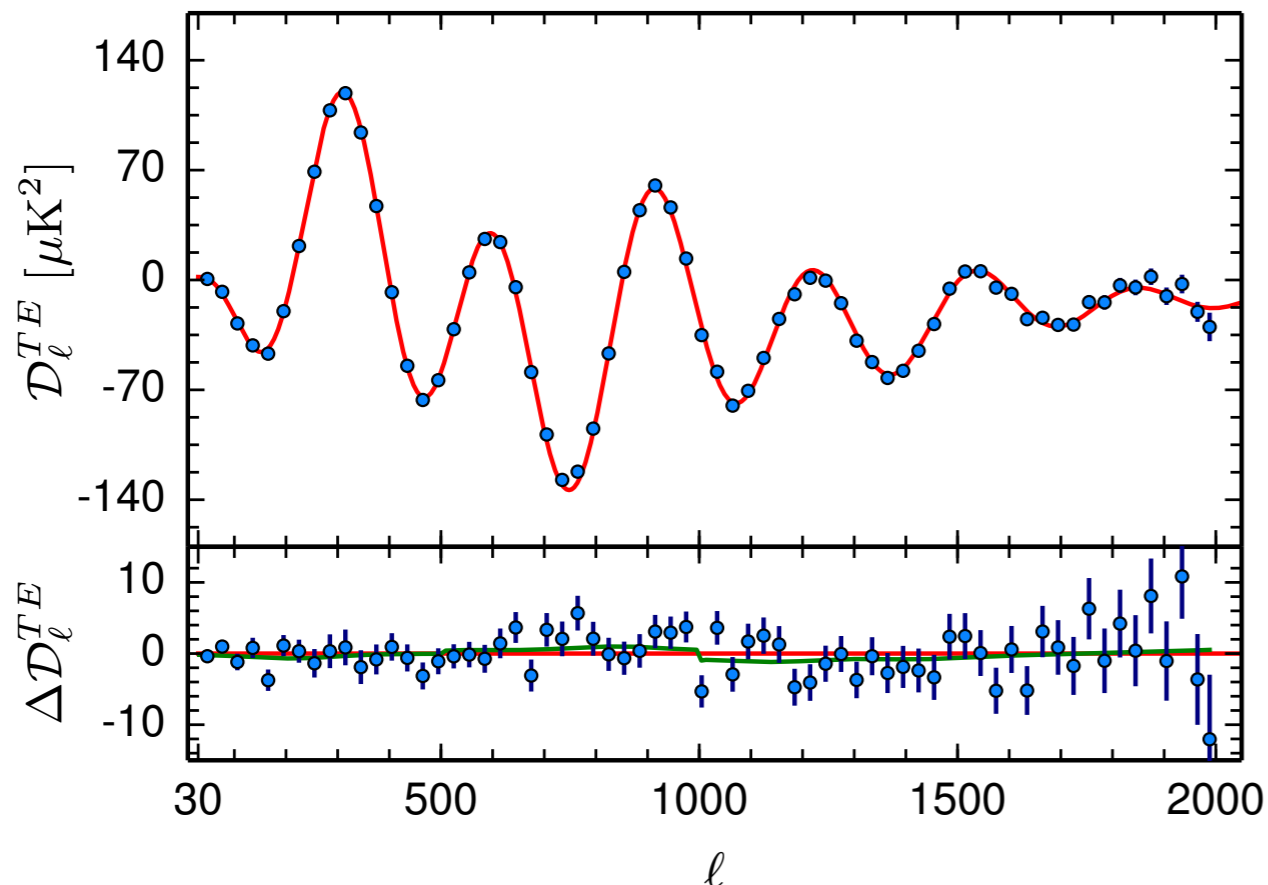
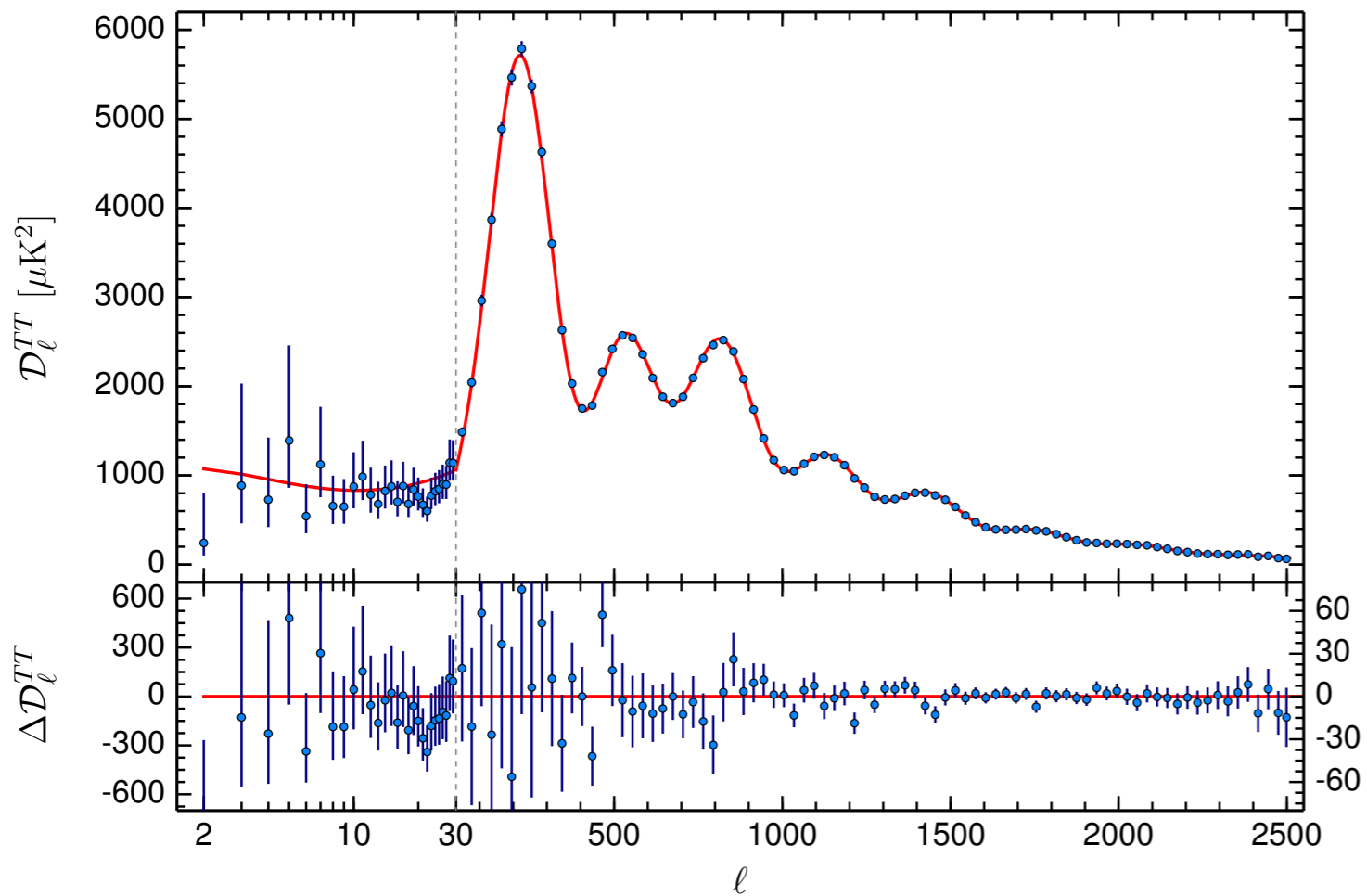
# 研究を始めたころ (~2000年)



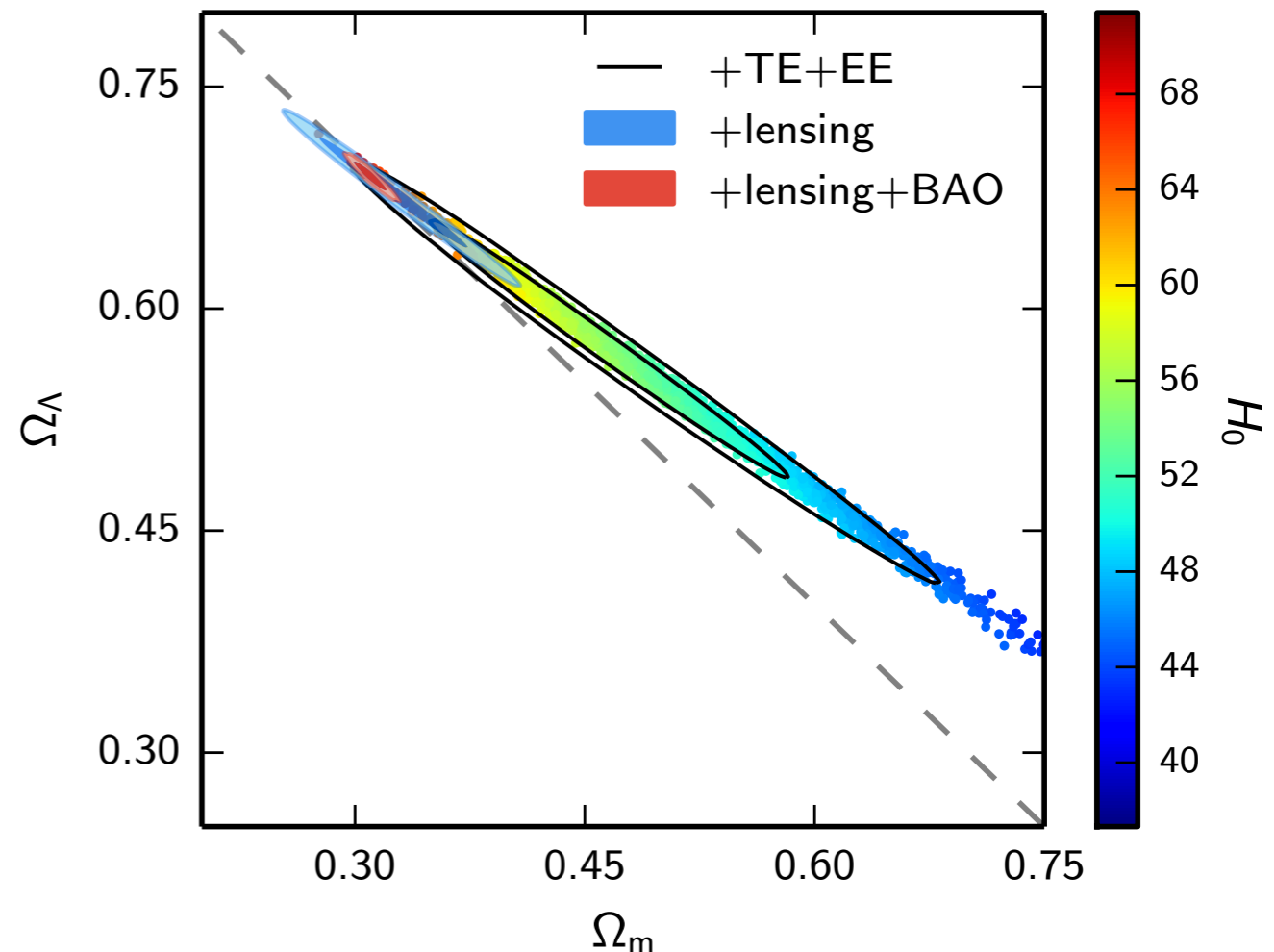
$\Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$ モデルが標準モデルへ

# 現在 (2015年)

観測の劇的な進展  
精密宇宙論へ



Planck collaboration (2015)



# これからの宇宙論研究

- ほとんどの宇宙論研究は以下に集約される
  - ダークマターは何か
  - 宇宙の加速膨張の起源は？
  - 宇宙の初期条件は？  
(インフレーションはあったのか?)

# これからの宇宙論研究

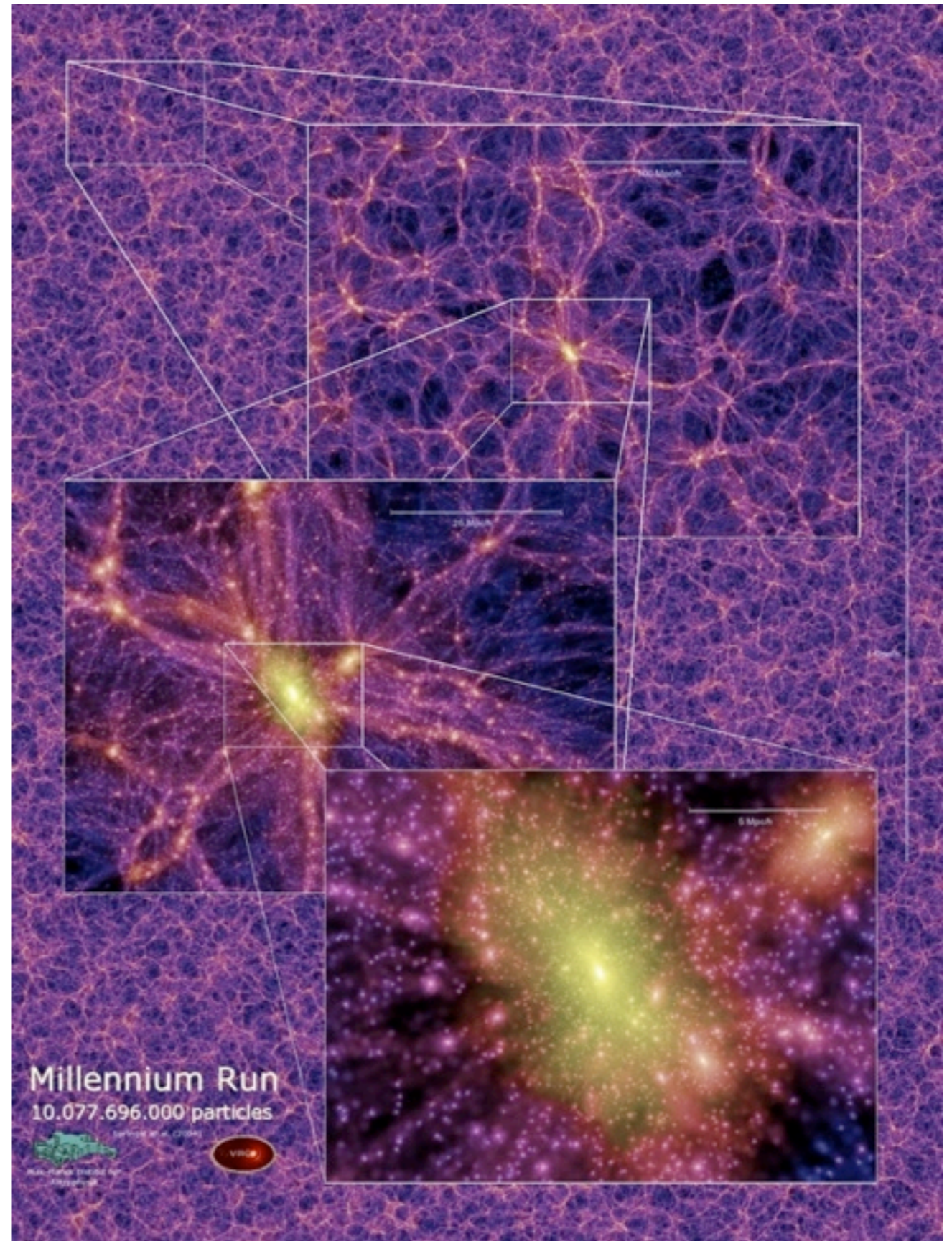
- ほとんどの宇宙論研究は以下に集約される
  - ダークマターは何か
  - 宇宙の加速膨張の起源は？
  - 宇宙の初期条件は？  
(インフレーションはあったのか?)

# ダークマター

- たくさんの状況証拠  
(銀河の回転曲線、銀河団、宇宙の大規模構造、、、)
- 観測から「冷たい」ダークマター (CDM) が示唆
- 直接・間接検出実験はいまのところ成果無し  
(手詰まり感もなきにしもあらず、、、)
- ダークマターが本当に実在するか、CDMの描像が本当に正しいかさらに検証していくことは  
まだまだ重要である

# ダークマターハロー

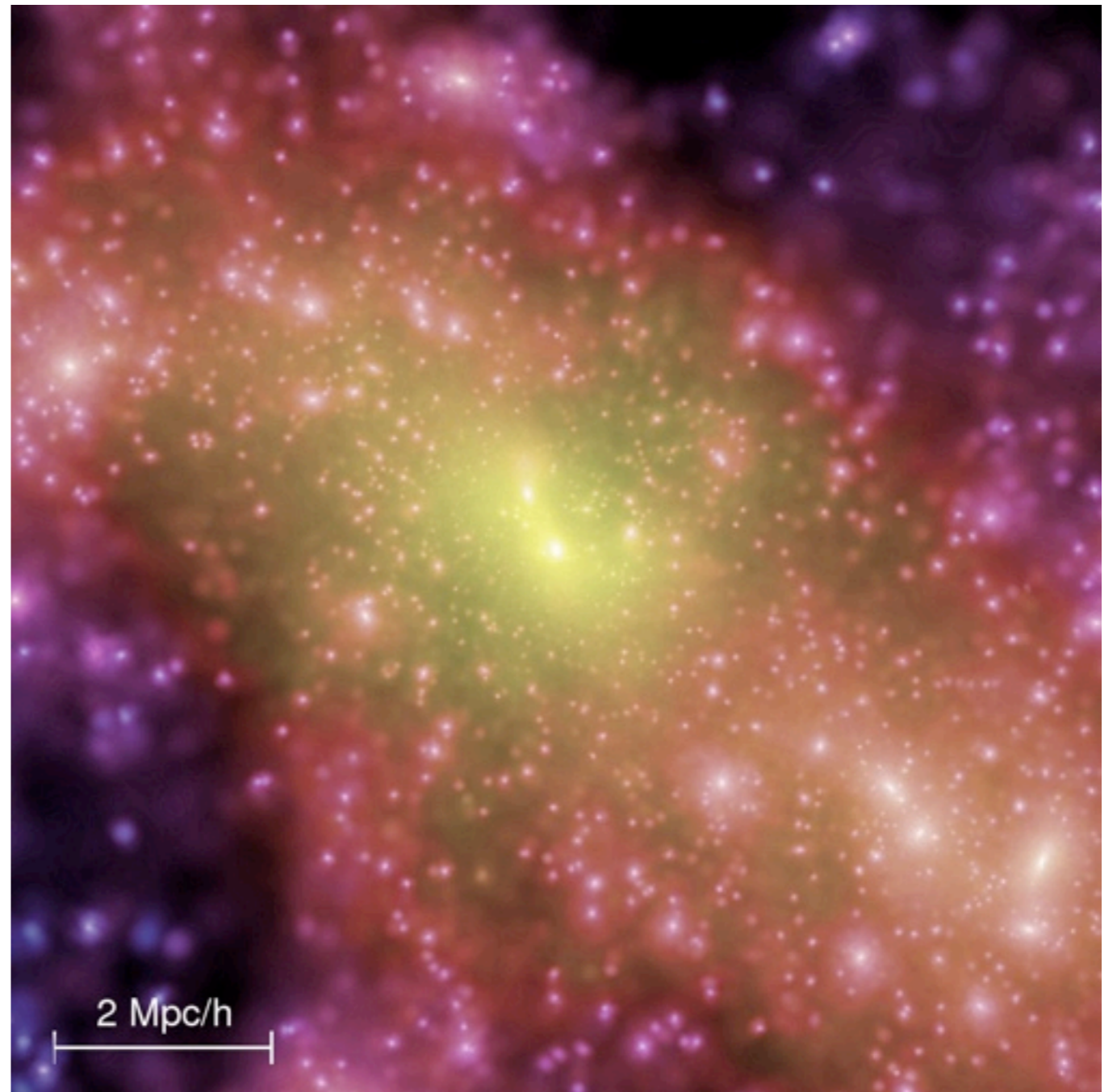
- ダークマターが自己重力により集まってビリアル平衡
- 銀河、銀河団に対応
- N体シミュレーションによってその構造が詳細に予言されている





# $\Lambda$ CDMのハローの性質？

- **cuspy**な動径密度分布  
いわゆるNFW分布  
$$\rho \propto r^{-1}(r+r_s)^{-2}$$
- **大きな非球対称性**  
銀河団 軸比  $\sim 1:2$
- **サブストラクチャ**



<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>

ダークマターの性質と密接な関係

# ダークマター性質との関連

- **self-interacting dark matter**

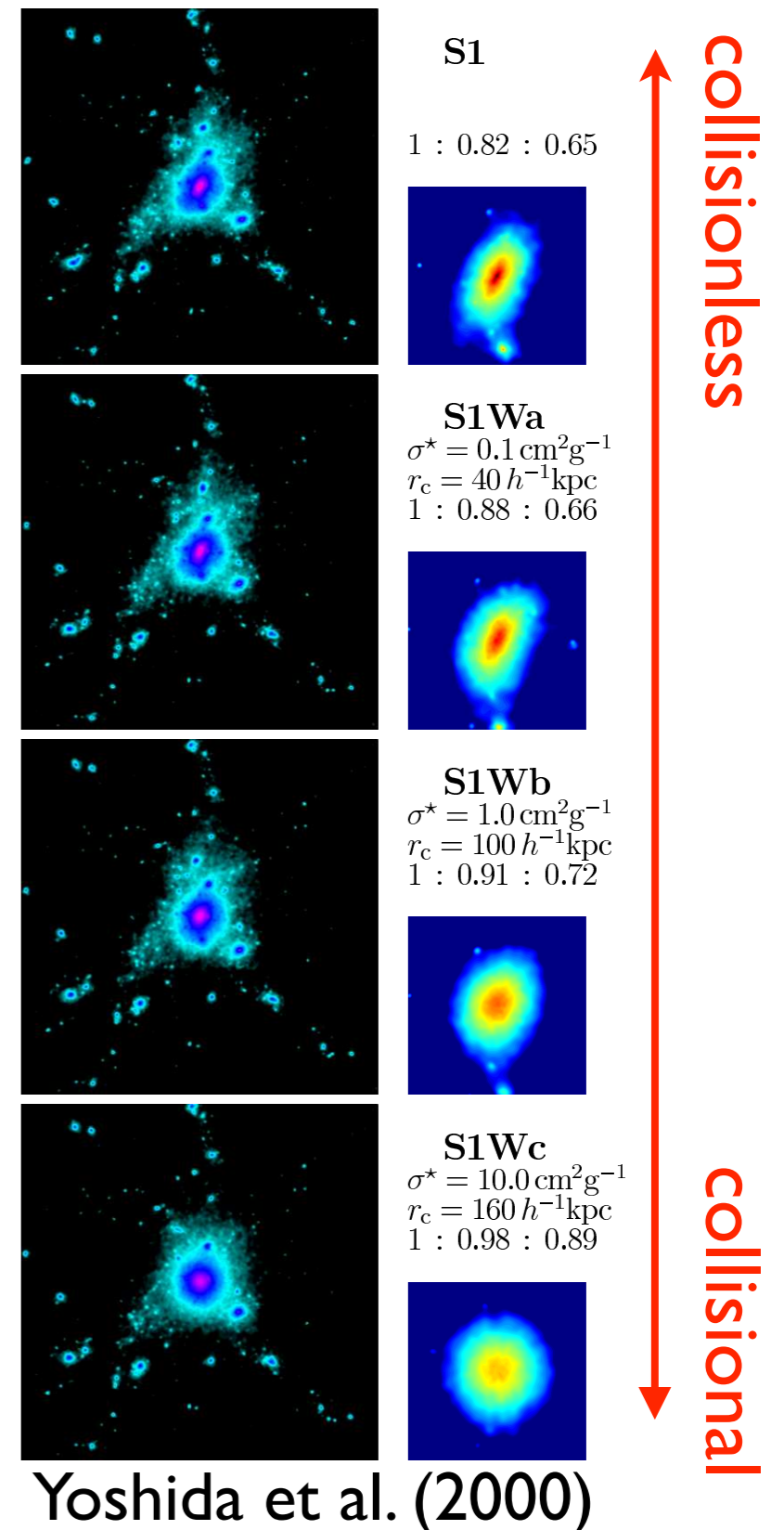
$\Lambda$ CDMの小スケール問題を解決するために導入

(Spergel & Steinhardt 2000)

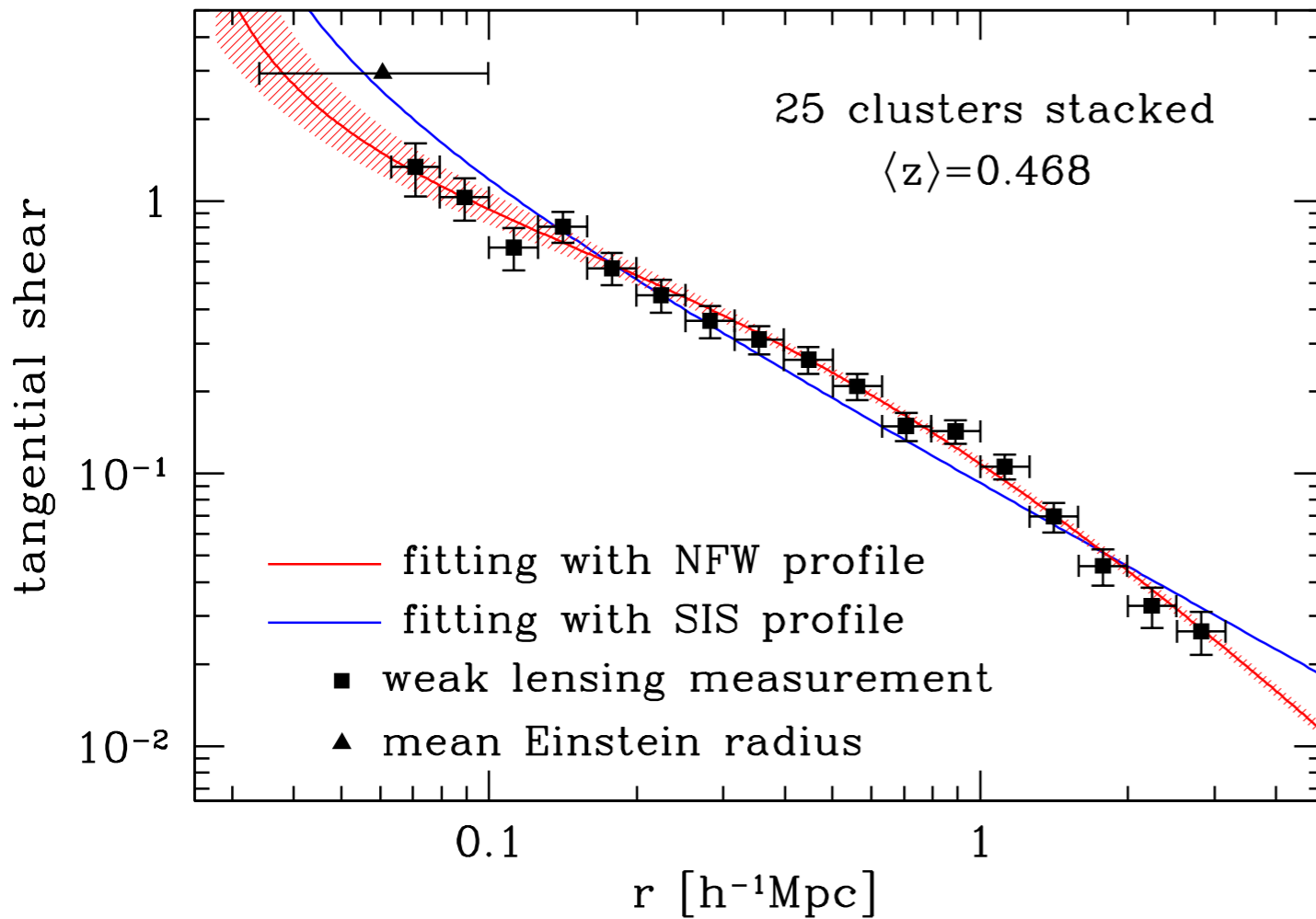
- CDM粒子の衝突はハローの密度分布を大きく変更

– 中心密度低下

– より丸い形状



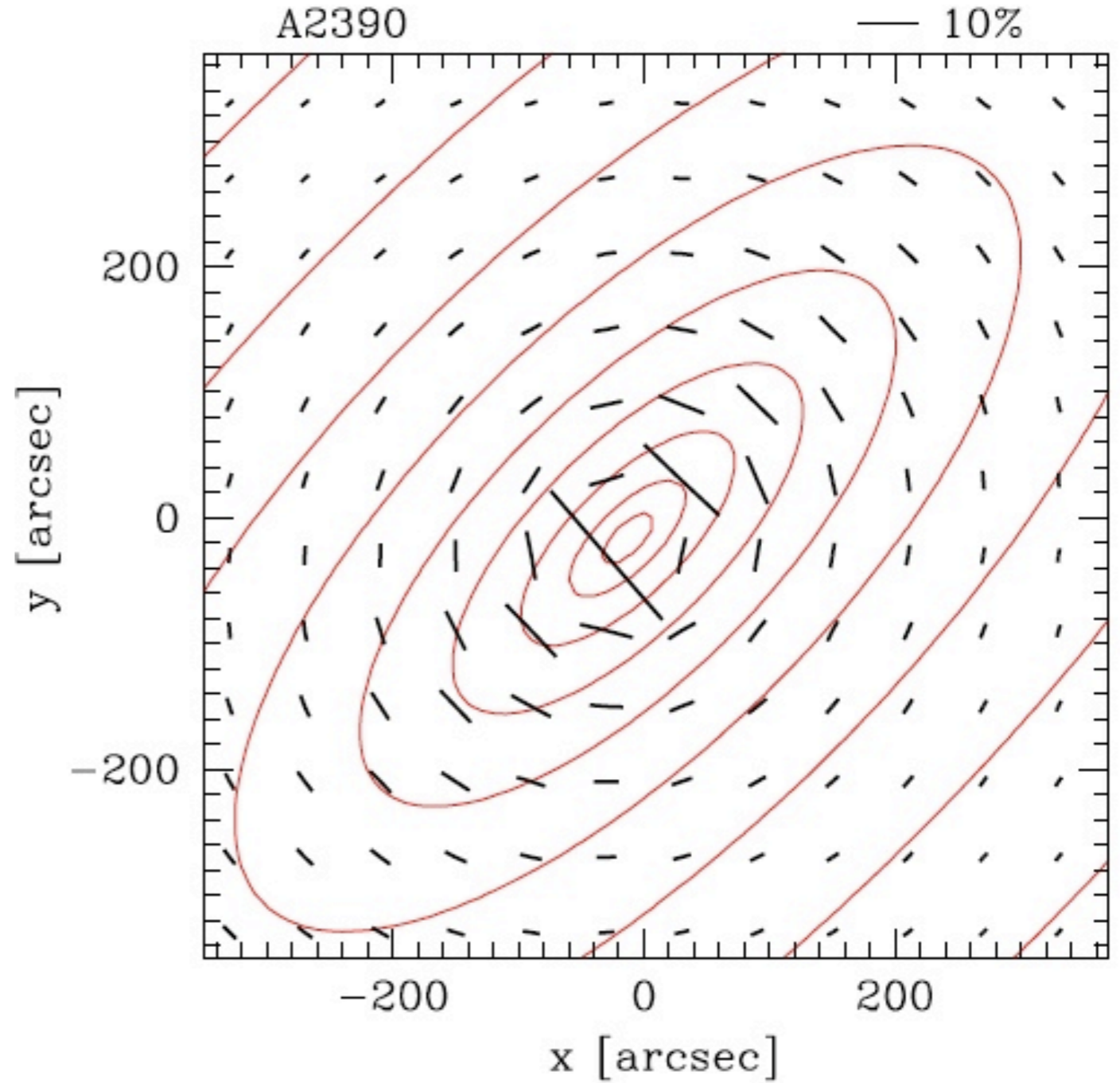
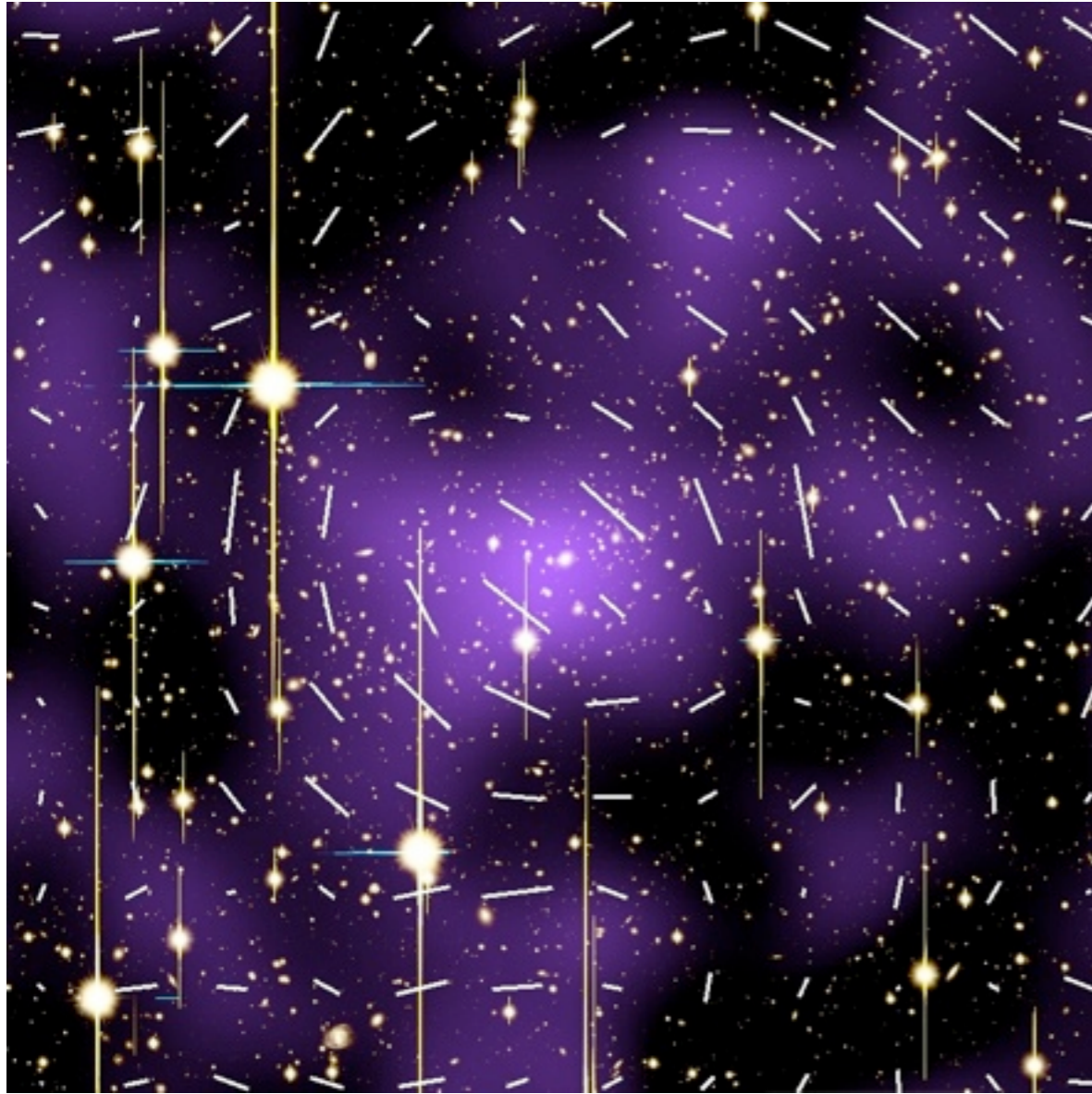
# 重力レンズを用いた測定



(see also Umetsu et al. 2014,  
Okabe et al. 2014, ...)

- 弱い重力レンズ効果によりダークマター分布を直接測定
- 多くの銀河団をstackしてS/Nをかせげる
- 観測された動径分布はNFWと非常によく一致

# 非球対称性の検証

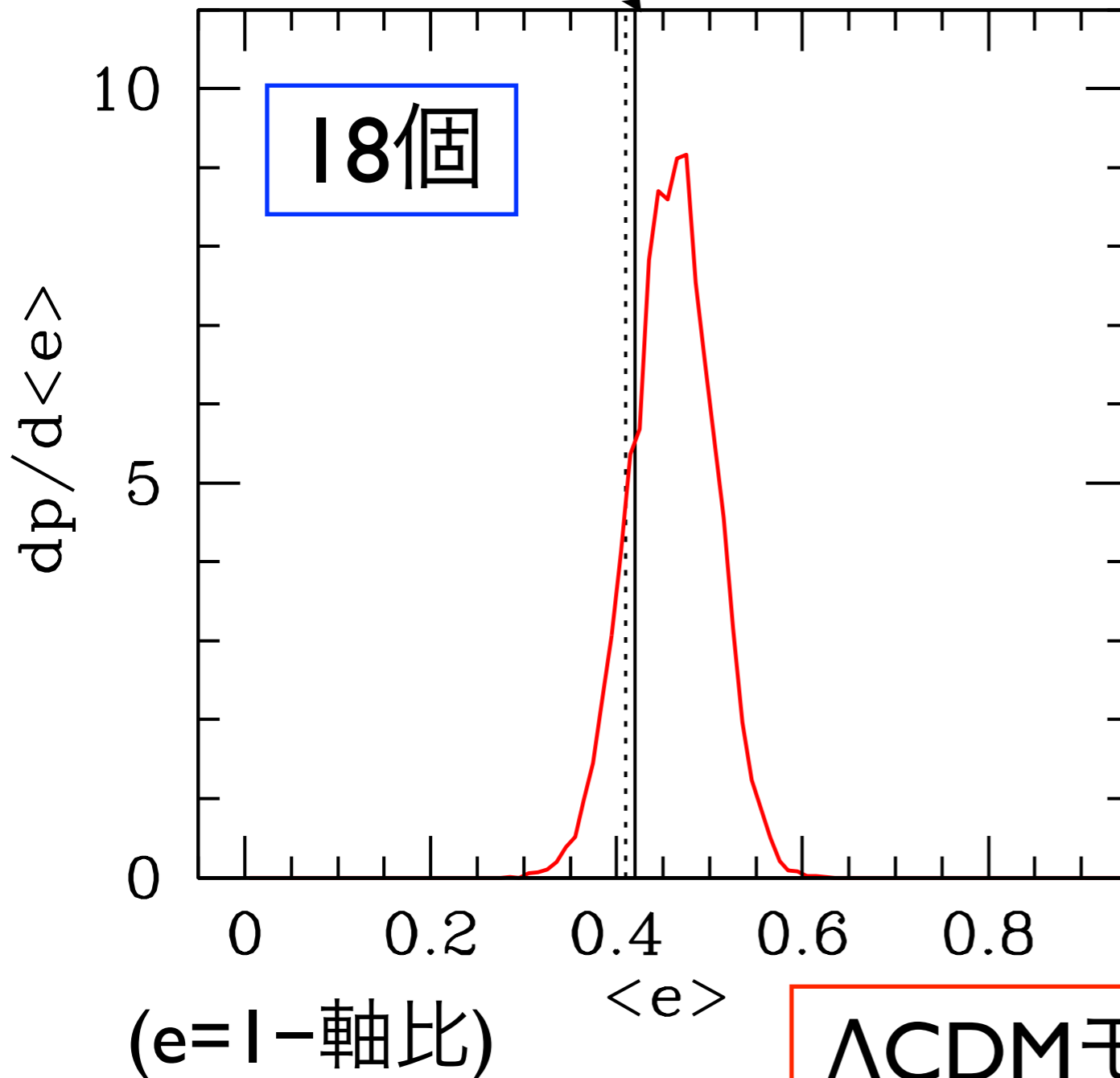


観測されたshear map  
+再構築された密度分布

ベストフィット (楕円NFW)

# 銀河団ハローの平均ゆがみ

$\Lambda$ CDM prediction  
(Jing & Suto 2002)



- 重力レンズ信号を楕円NFWでfit
- marginalizeした楕円率への制限を18個の銀河団で足し合わせ
- $\langle e \rangle = 0.46 \pm 0.04$   
非球対称性を $7\sigma$ 検出

$\Lambda$ CDMモデルの予言とよく一致!

(see also Oguri et al. 2012)

# ダークマター分布測定

- 重力レンズを使って銀河団内のダークマター分布を直接、精密に測定できるようになってきた
- 無衝突 $\Lambda$ CDMモデルで予言される動径密度分布、非球対称性が観測と非常に良く一致することが明らかになってきている
- この一致は決して自明ではなく、驚くべきことである

より小スケールへ

密度揺らぎ

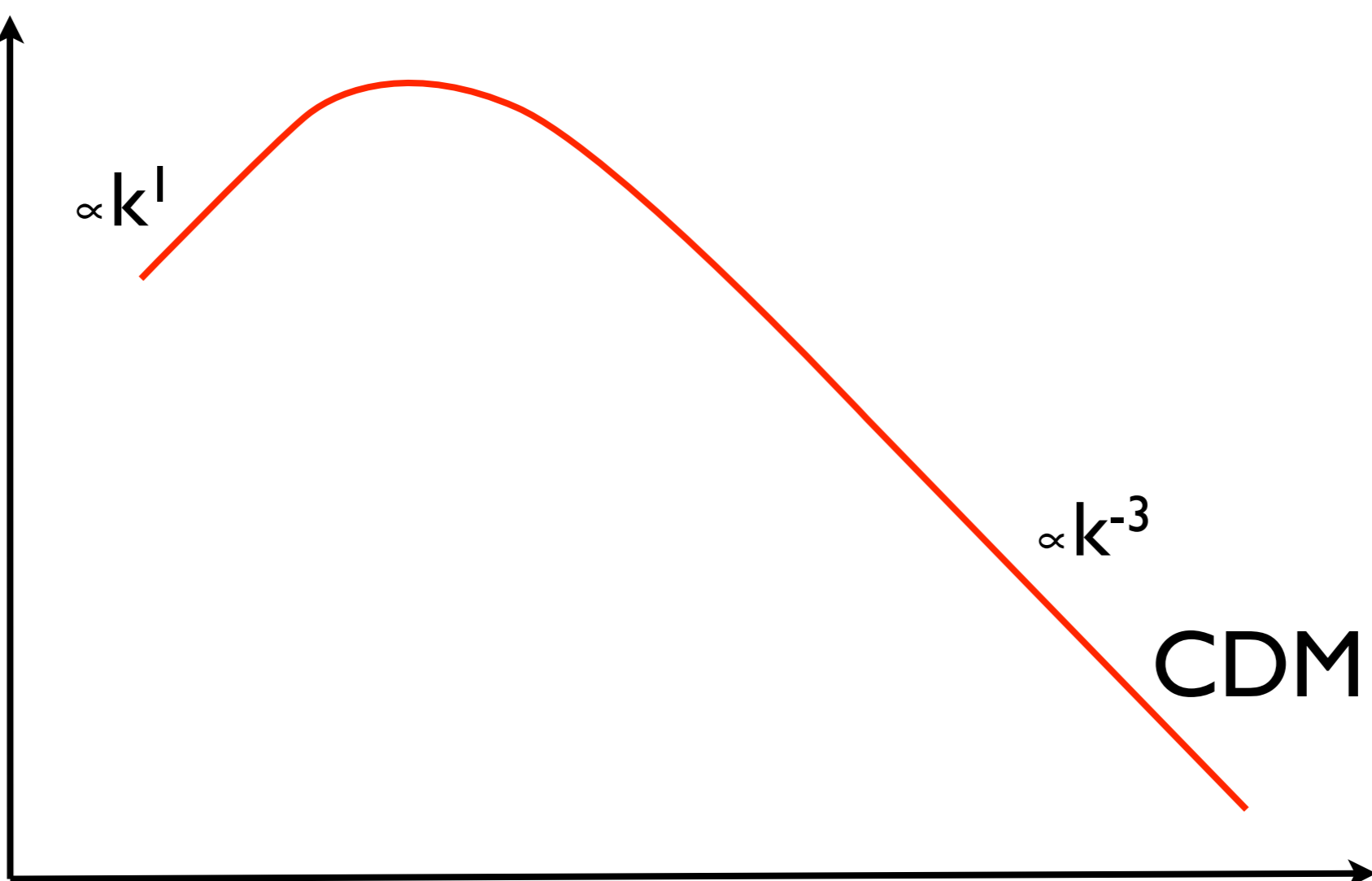
$P(k)$

$\propto k^1$

$\propto k^{-3}$

CDM

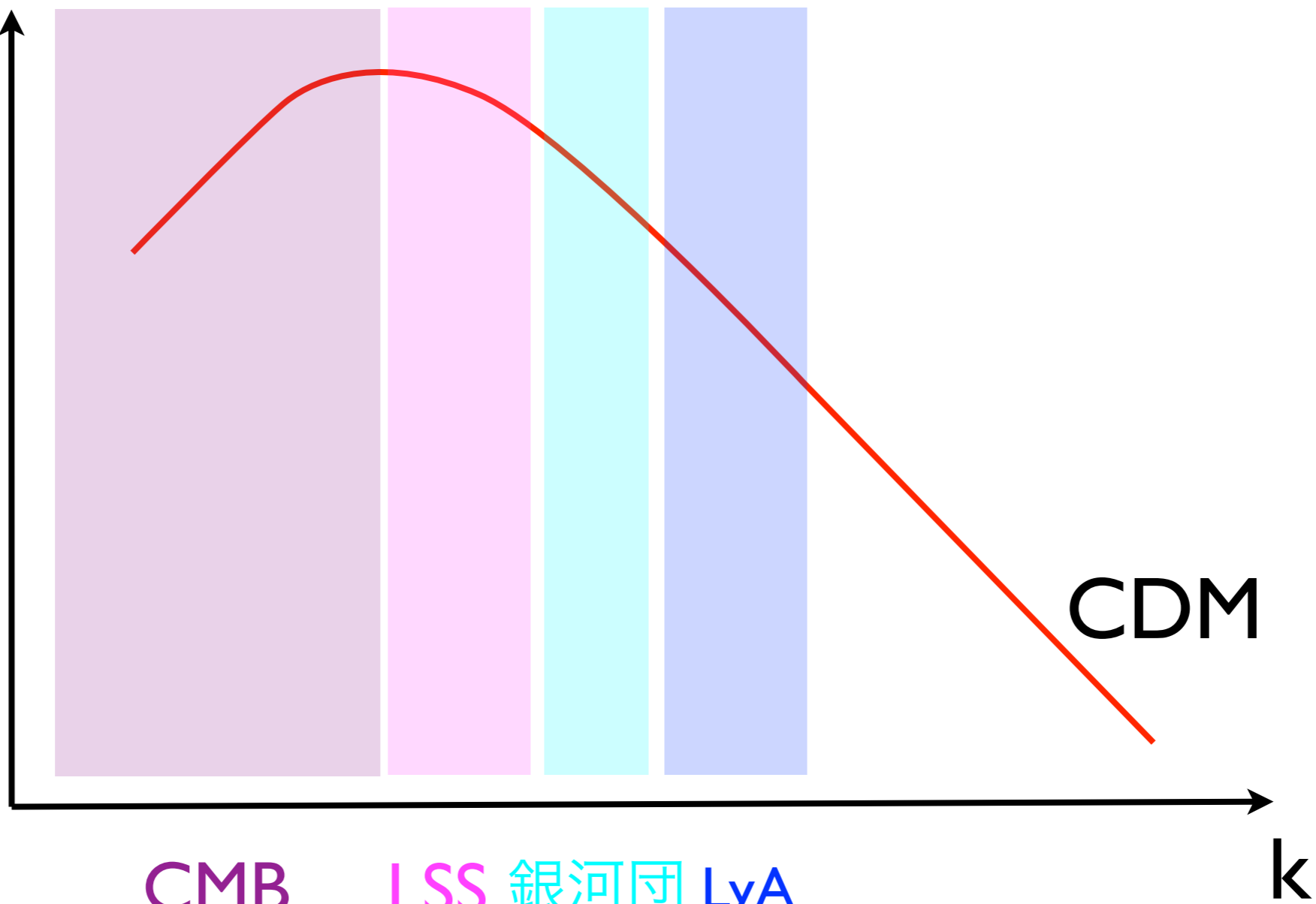
$k$



# より小スケールへ

密度揺らぎ

$P(k)$



CMB

LSS 銀河団 LyA

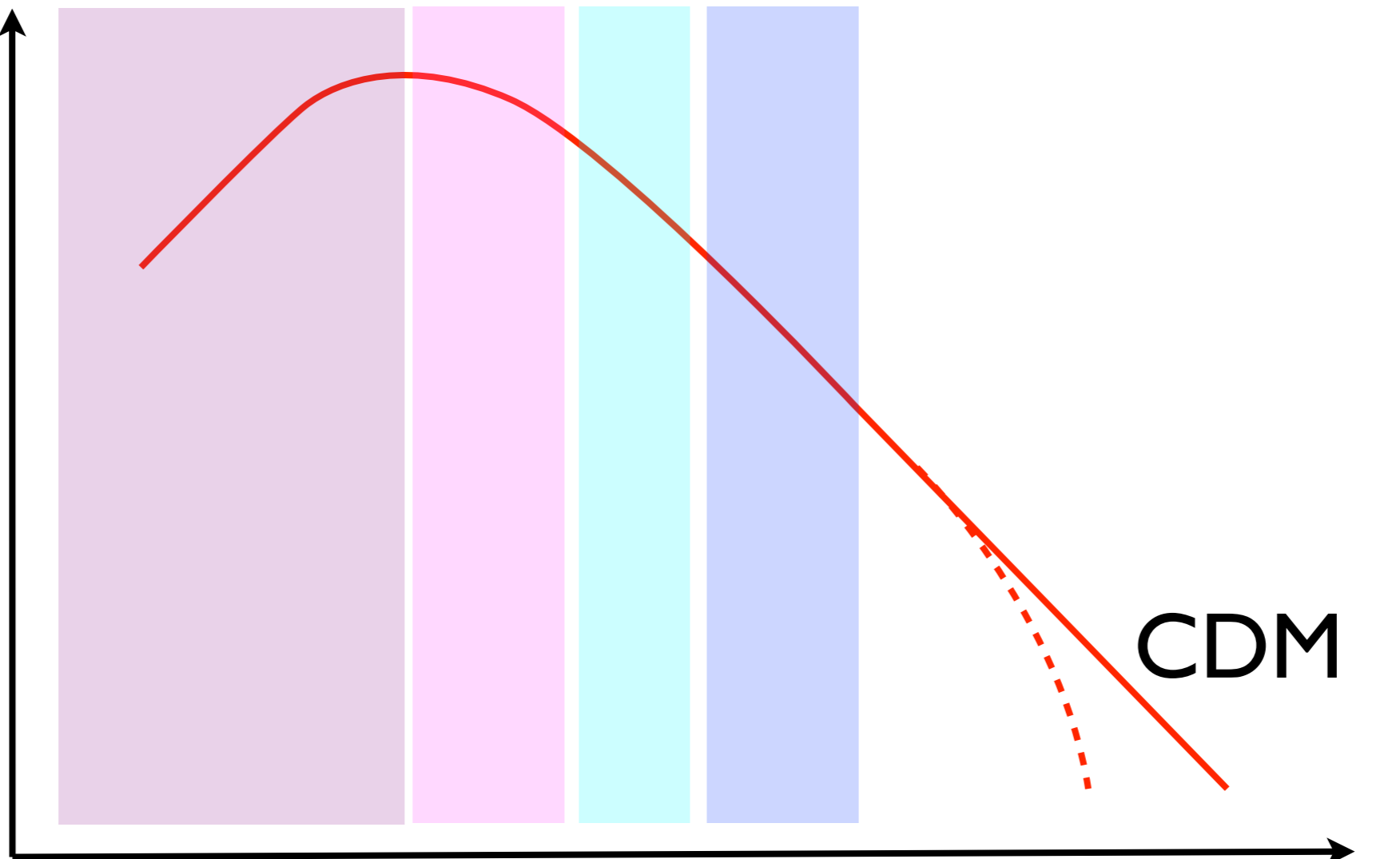
OK!



# より小スケールへ

密度揺らぎ

$P(k)$



CMB

LSS 銀河団 LyA

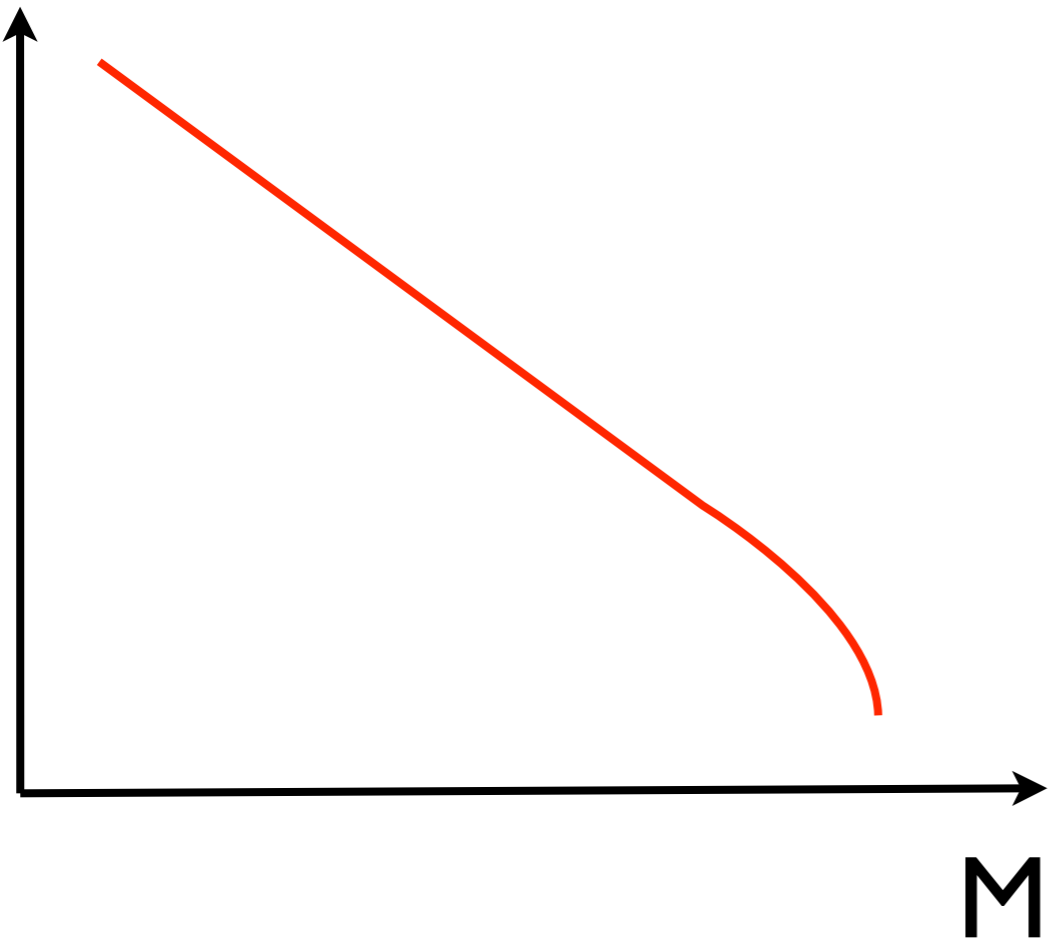
WDM?

k

OK!

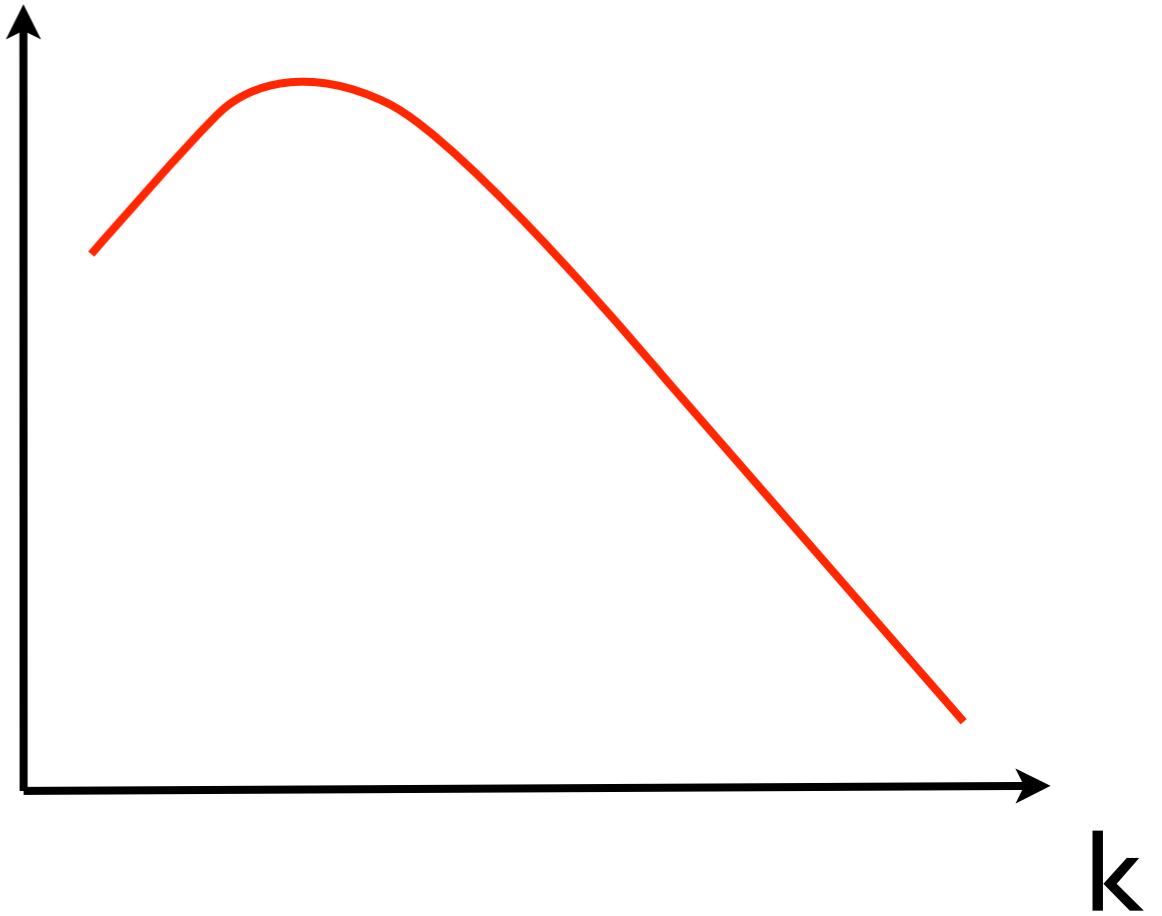
# より小スケールへ

$dn/dM$



一口一質量関数

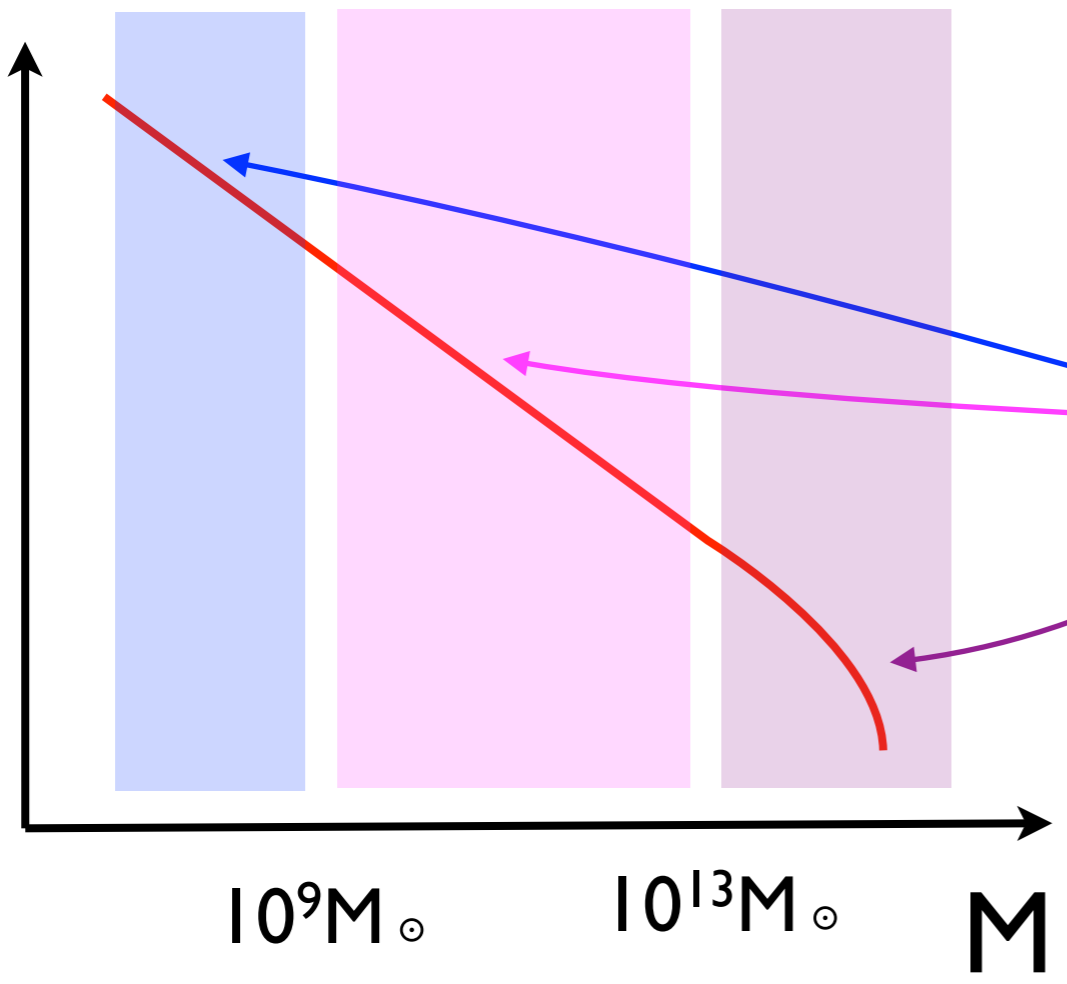
$P(k)$



パワースペクトル

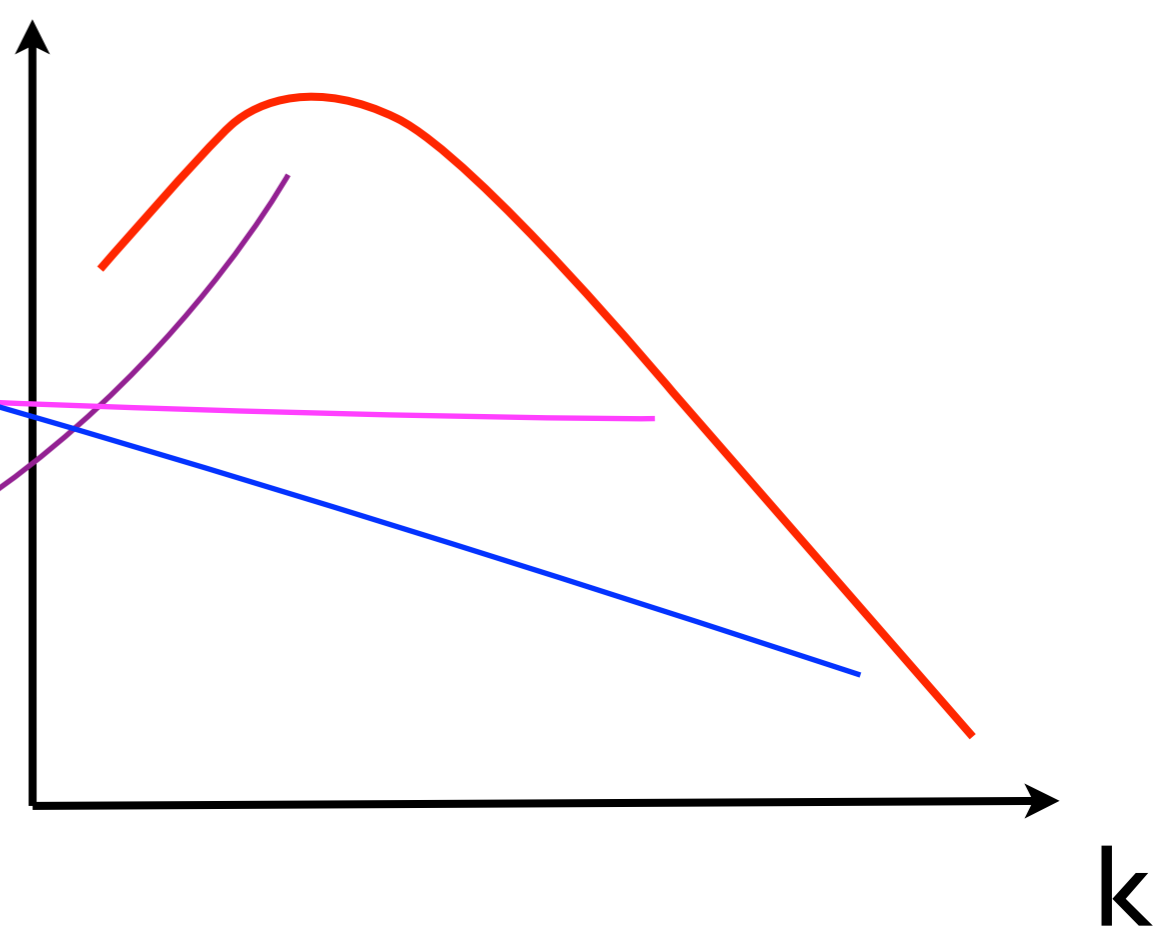
# より小スケールへ

$dn/dM$



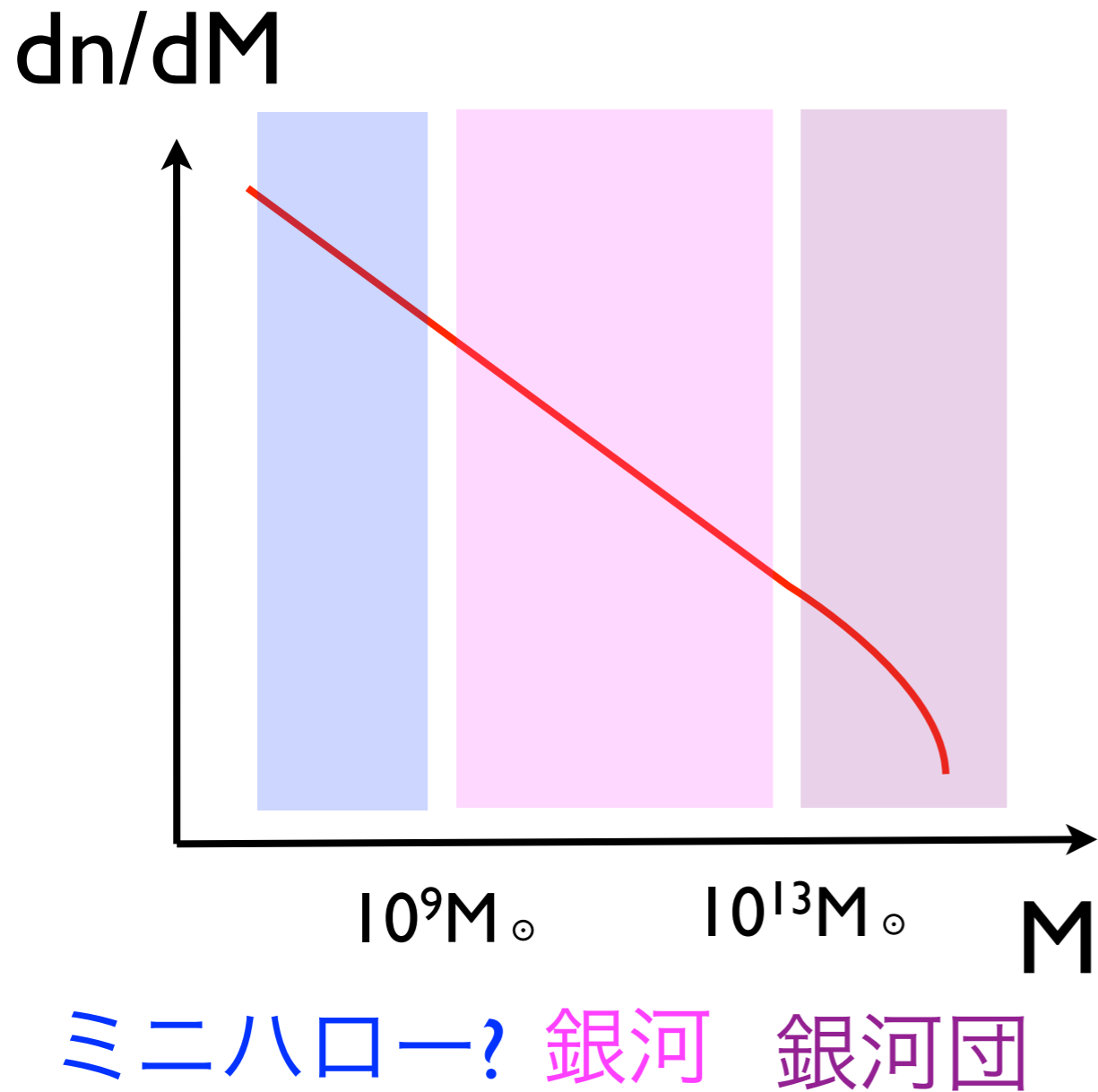
ハロー? 銀河 銀河団

$P(k)$



パワースペクトル

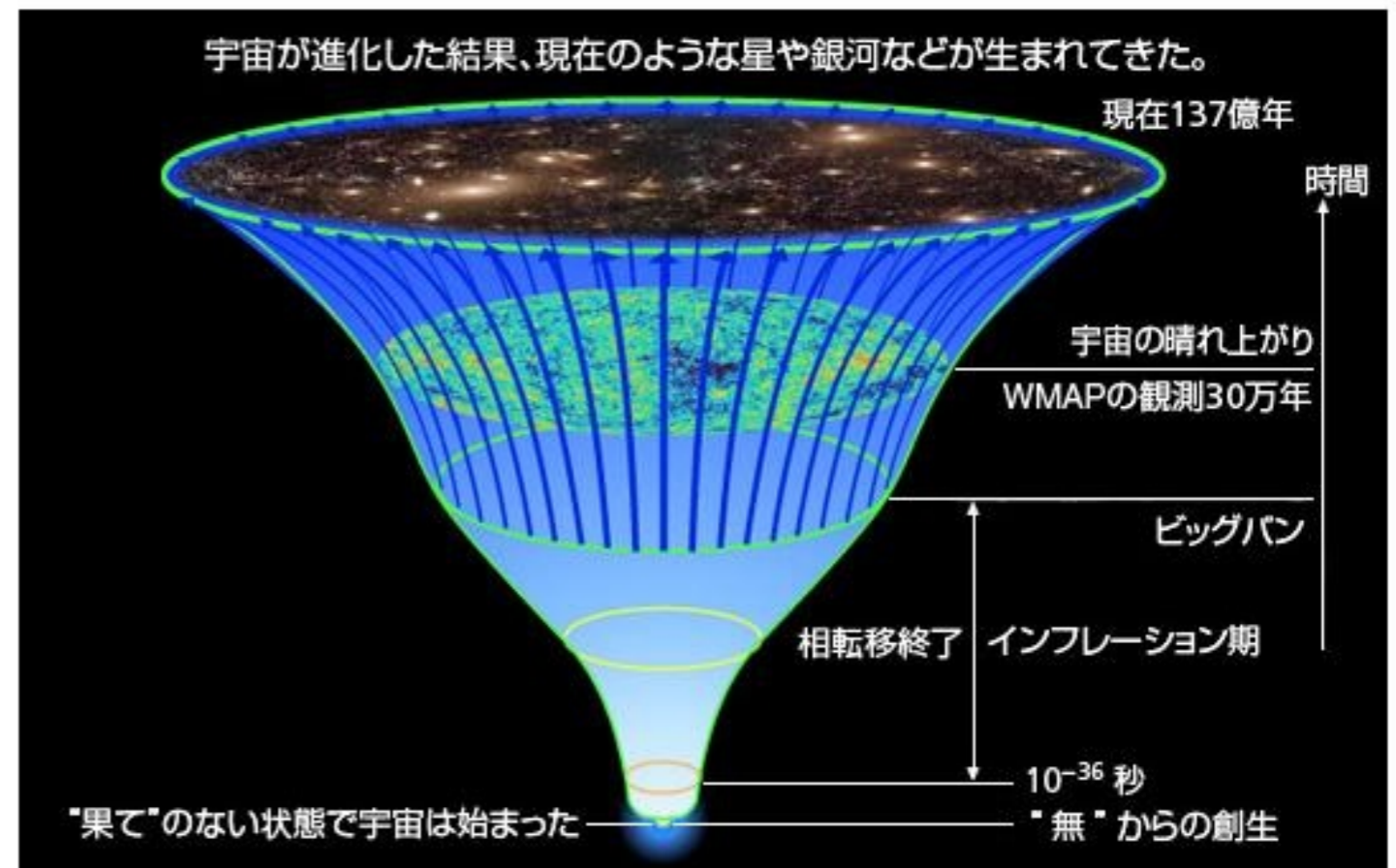
# より小スケールへ



- 銀河団  
ΛCDMと非常に良く一致
- 銀河  
矮小銀河スケールでの  
矛盾の可能性  
バリオン物理の不定性？
- ミニハロー ( $\approx 10^9 M_{\odot}$ )  
バリオン物理効かない  
観測難しいが重要

# インフレーション

- 宇宙初期の急激な膨張
- さまざまな御利益：平坦性問題、地平性問題、ゆらぎの生成、、、



# インフレーション理論の予言

- ほぼスケール不変なゆらぎ ( $n_s \simeq 1$ )
- ほぼ平坦な宇宙の曲率 ( $\Omega_K \simeq 0$ )
- ほぼガウスのな原始ゆらぎ ( $f_{\text{NL}}, g_{\text{NL}}, \dots \simeq 0$ )
- ほぼ断熱的なゆらぎ ( $\alpha \simeq 0$ )
- ほぼスカラーゆらぎ ( $r \simeq 0$ )

# インフレーション理論の予言

- ほぼスケール不変なゆらぎ ( $n_s \simeq 1$ )  
→ OK ( $n_s=0.9667\pm 0.0040$ )
- ほぼ平坦な宇宙の曲率 ( $\Omega_K \simeq 0$ )  
→ OK ( $\Omega_K=0.0008\pm 0.0040$ )
- ほぼガウスのな原始ゆらぎ ( $f_{NL}, g_{NL}, \dots \simeq 0$ )  
→ OK ( $f_{NL}^{local}=2.5\pm 5.7$ )
- ほぼ断熱的なゆらぎ ( $\alpha \simeq 0$ )  
→ OK ( $\alpha=0.0003\pm 0.0014$ )
- ほぼスカラーゆらぎ ( $r \simeq 0$ )  
→ OK ( $r < 0.113$ )

# インフレーション理論の予言

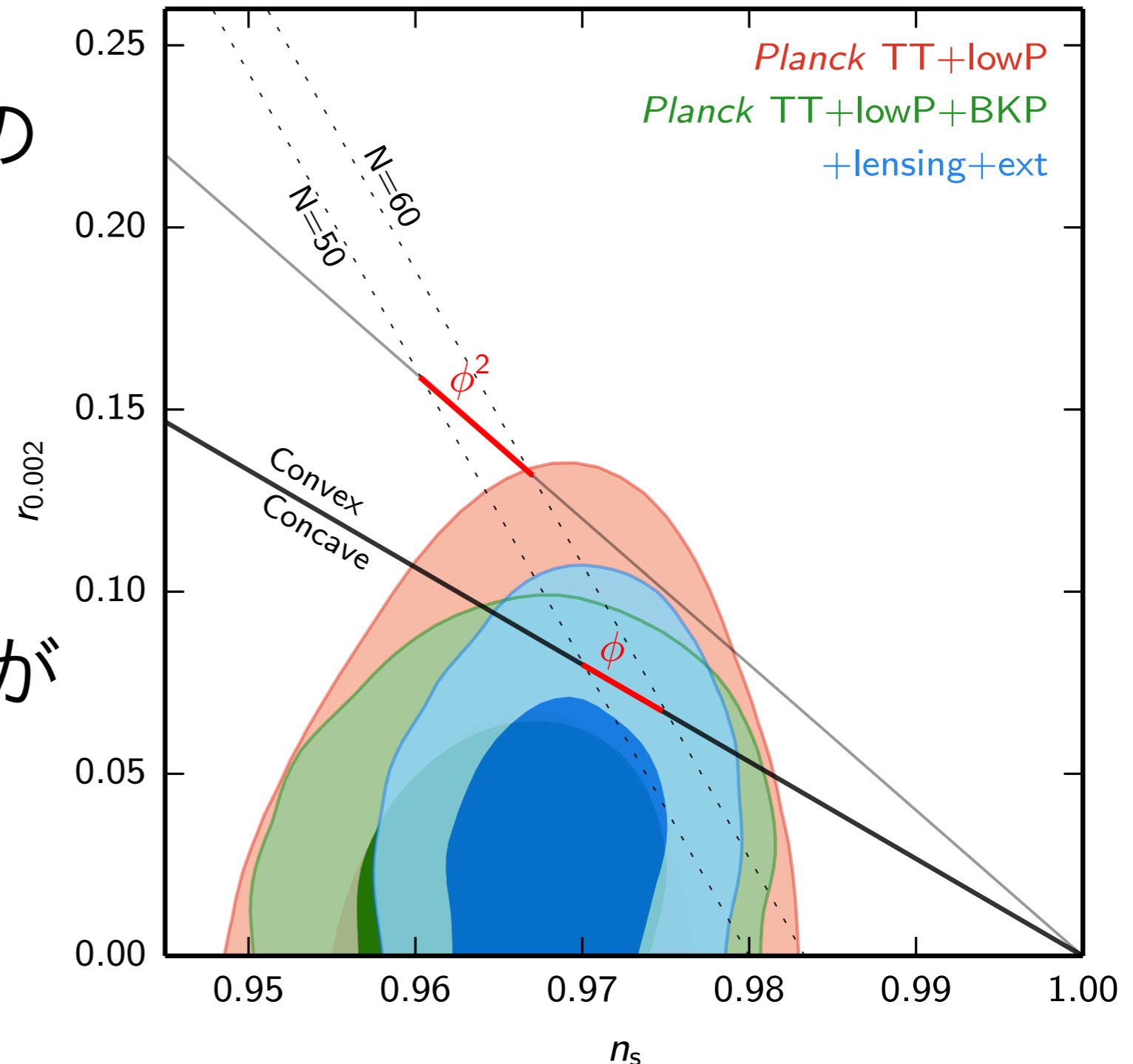
- わずかにスケール依存するゆらぎ ( $n_s < 1$ )
- わずかに開いた宇宙の曲率 ( $\Omega_k > 0$ )
- わずかに非ガウスのな原始ゆらぎ ( $f_{NL} > 0$ )
- わずかに非断熱的なゆらぎ ( $\alpha \neq 0$ )
- わずかにテンソルゆらぎの寄与 ( $r > 0$ )



# spectral index $n_s = d \ln P(k) / d \ln k$

- $n_s$ の1からのずれはインフレーション中のスローロールと関連
- プランク衛星により  $>5\sigma$ で検出！
- なぜか強調されないがインフレーションの観測的証明にむけたきわめて重要な一歩

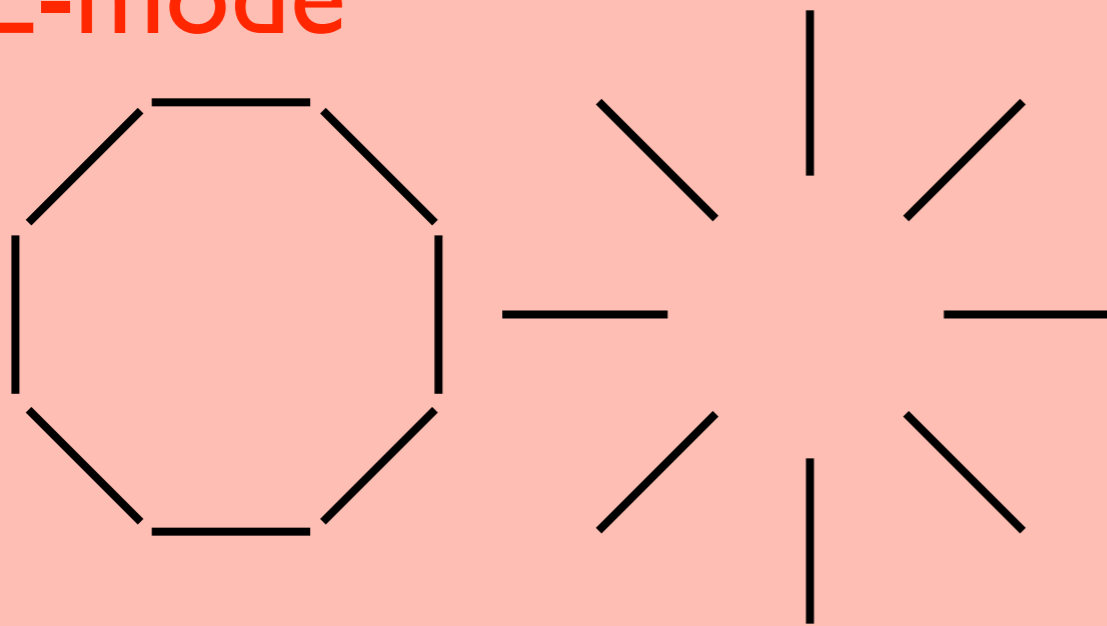
Planck collaboration (2015)



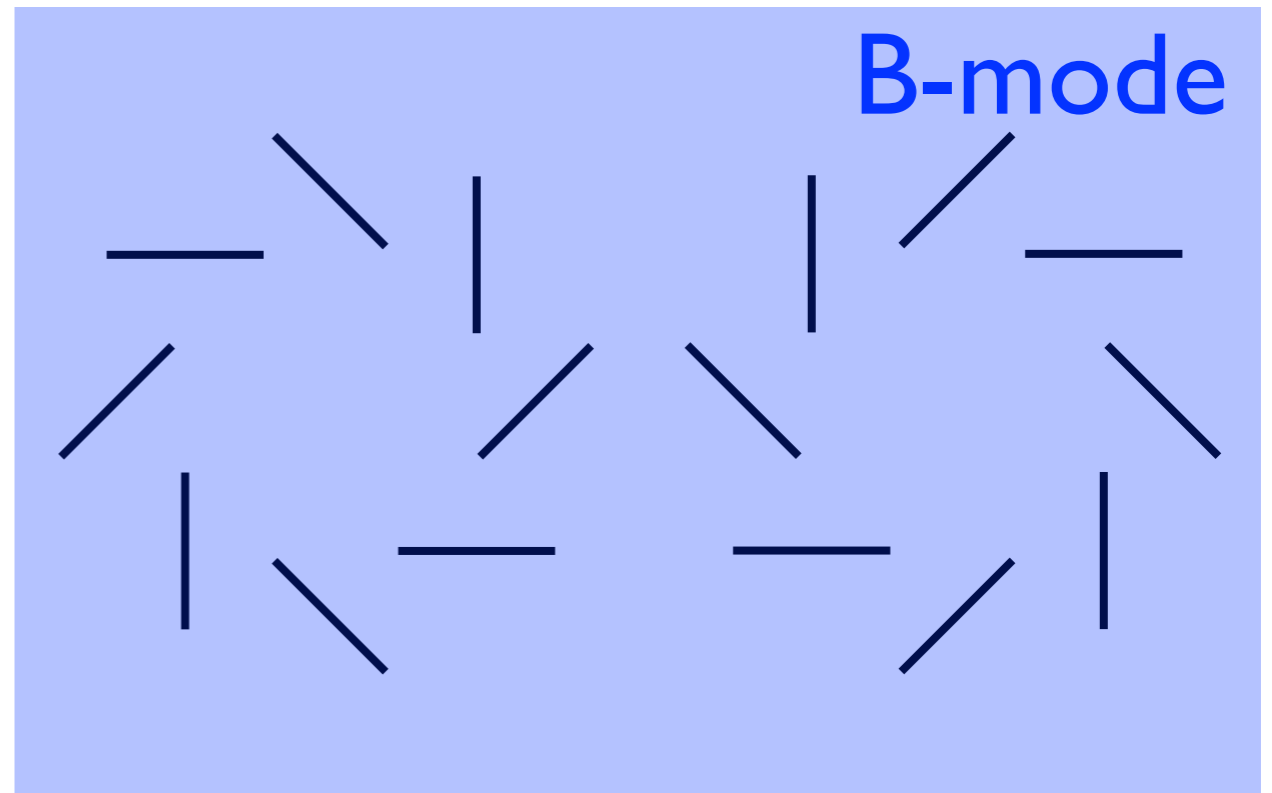
# 次のステップ：偏光Bモード

- CMBの偏光パターンはパリティでEとBモードに分解できる
- 密度 (スカラー) ゆらぎからはEモードのみ  
Bモードでテンソルゆらぎ = 重力波を直接検出！

E-mode

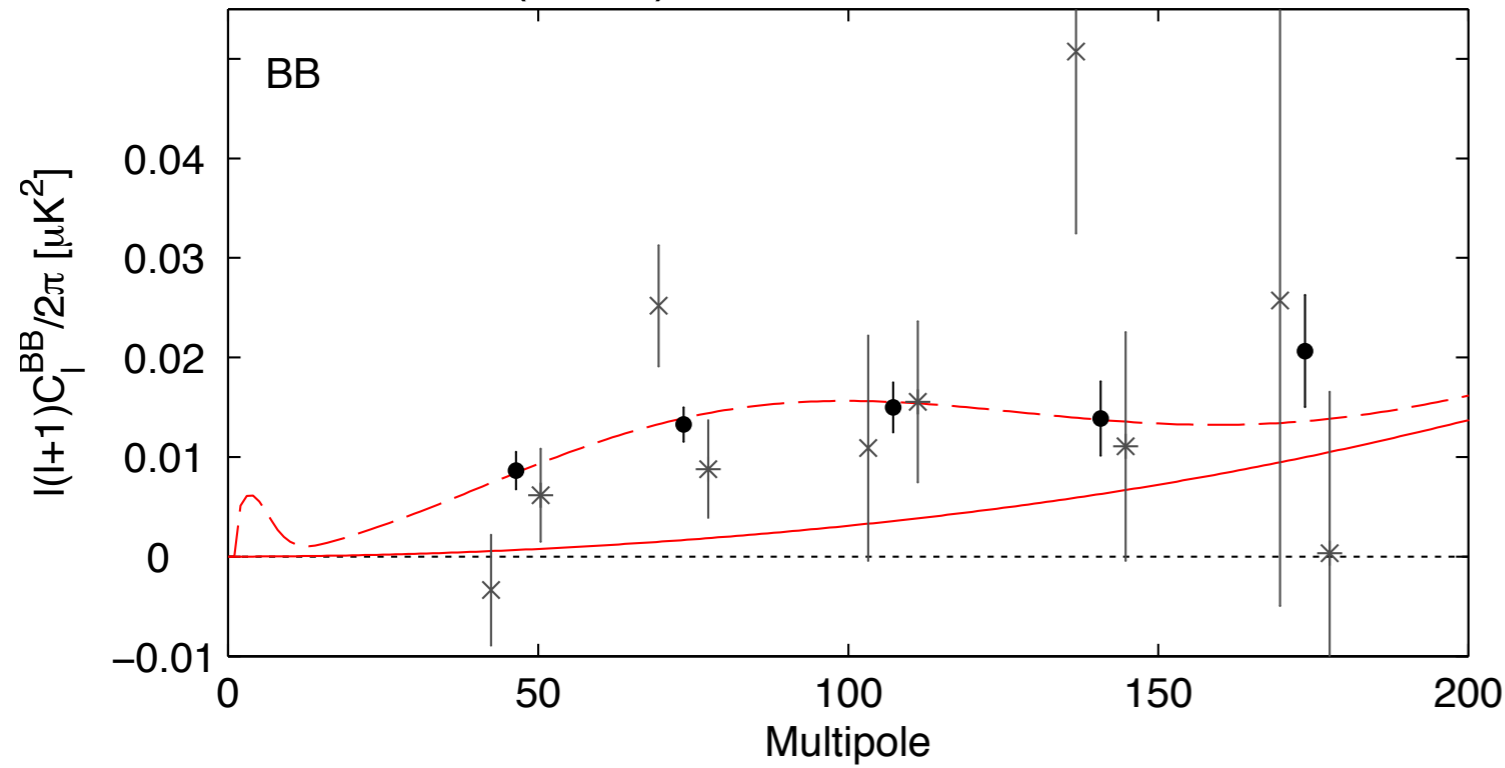


B-mode



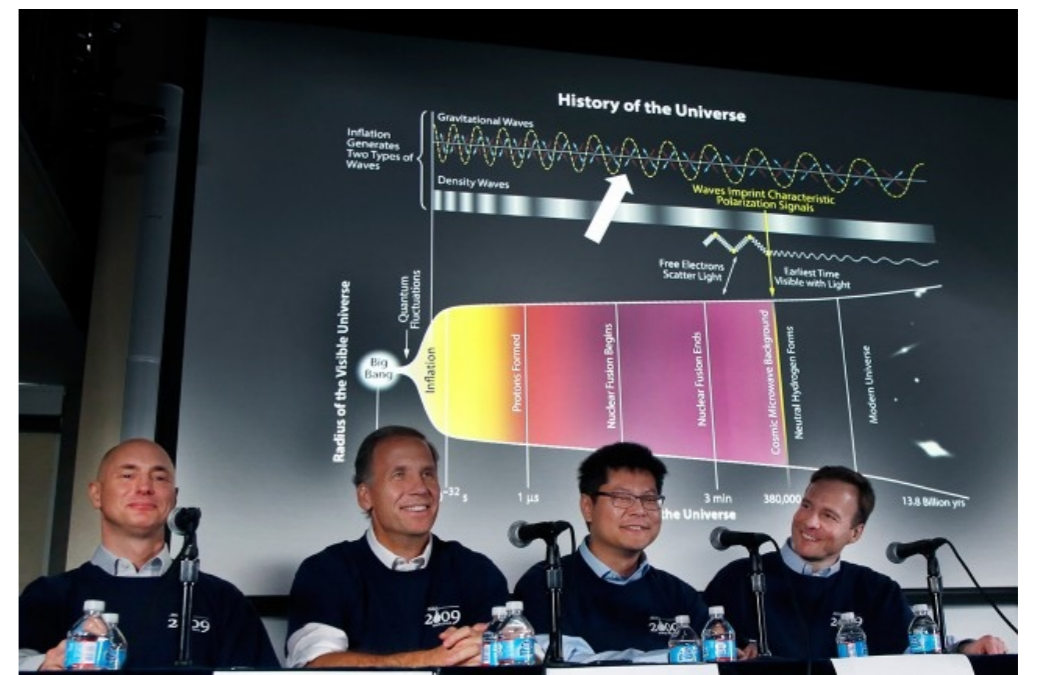
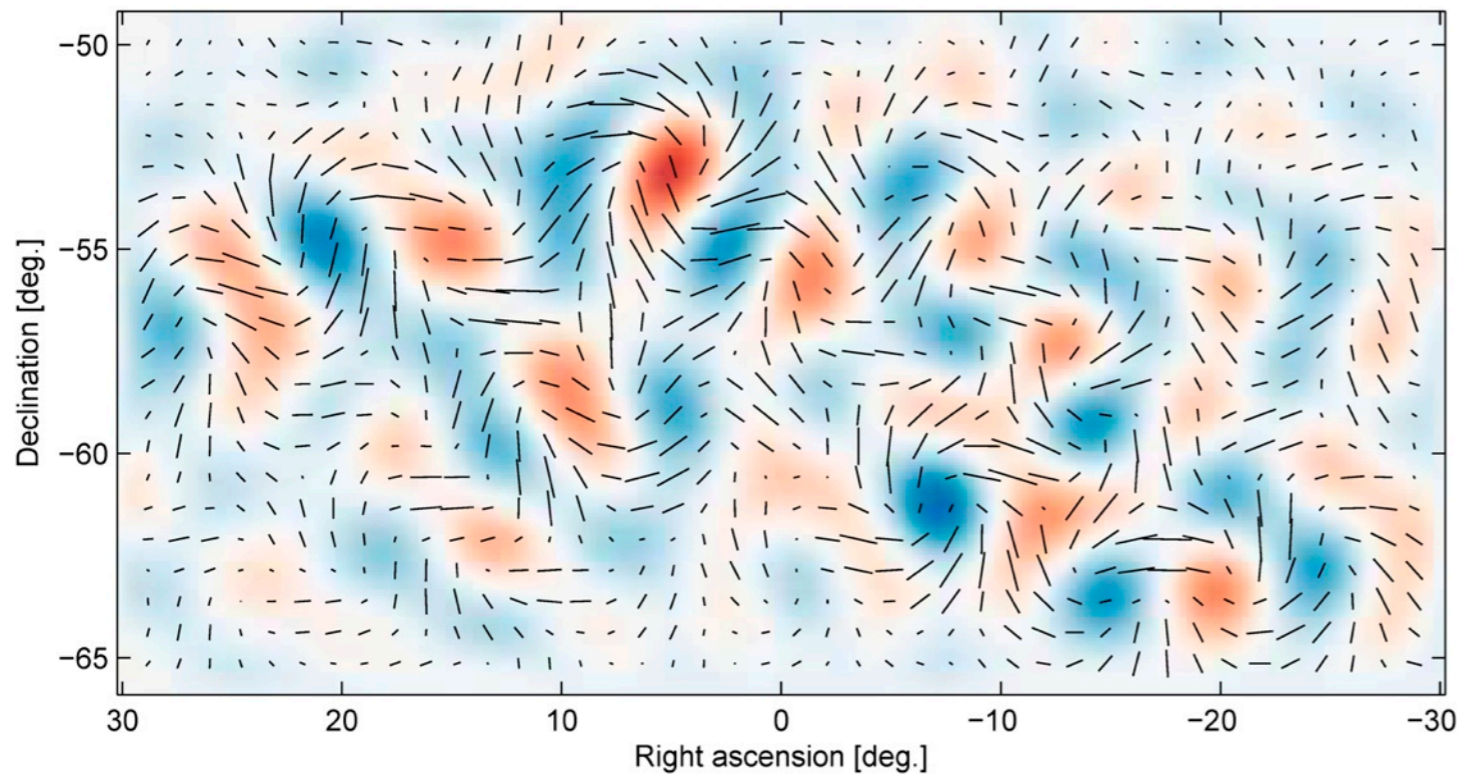
# BICEP2

Ade et al. (2014)



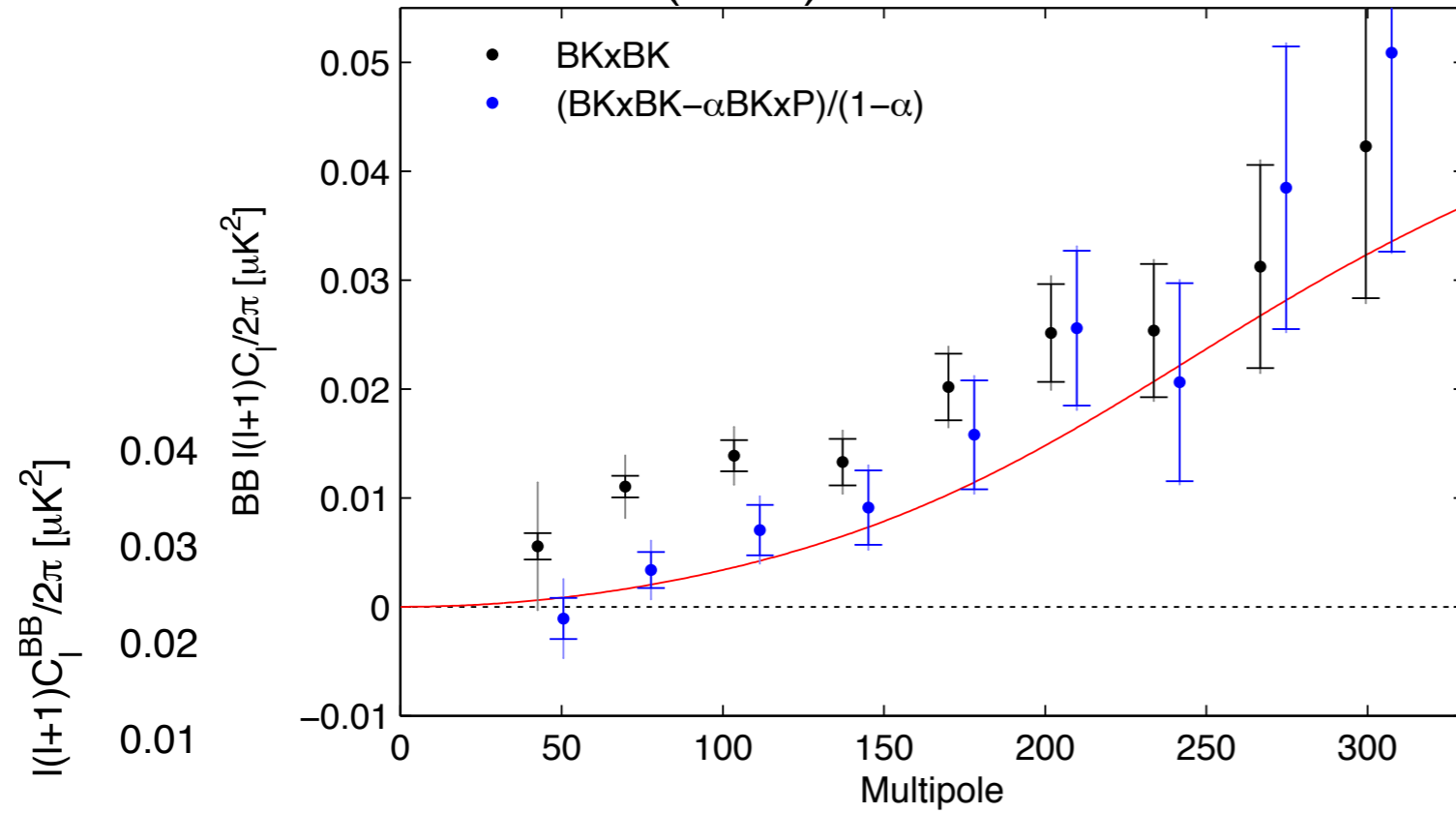
- 原始重力波発見！  
r=0.2 !!

BICEP2 B-mode signal

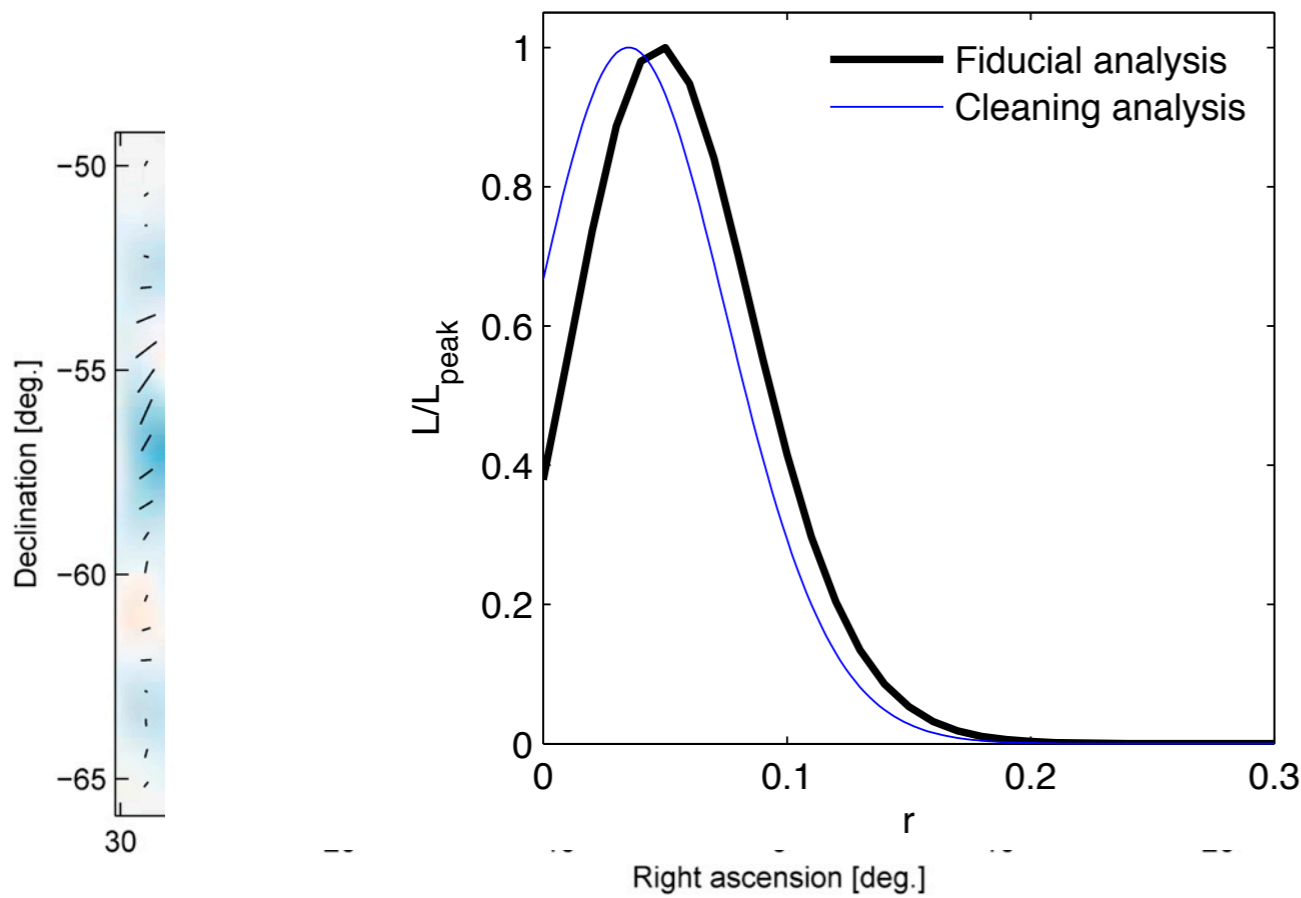


Elise Amendola/Associated Press

Ade et al. (2015)



銀河系内のダスト  
でした、、、  
(Planckとjoint解析)



# Bモードの重要性

- スカラーゆらぎの大きさはポテンシャルとその微分で決まる ( $P \propto V^3/V, \phi^2$ )
- テンソルゆらぎの大きさはポテンシャルで決まる ( $P \propto V \propto H^2$ )
- Bモード観測でインフレーションのエネルギースケールが決まる!  
( $r \sim 0.2 \rightarrow H \sim 10^{14} \text{GeV}$ )
- LiteBIRDに期待

# 宇宙の曲率

- インフレーション理論はほぼ平坦な宇宙を予言
- 自然なインフレーションのモデルは、わずかな負の曲率 ( $\Omega_K \sim 10^{-5}$ ) を予言する

(e.g., Guth & Nomura 2012, Kleban & Schillo 2012)

- 超高精度の曲率測定はインフレーション理論の独立かつ強力な検証につながる！

( $\Omega_K < -10^{-4}$  なら全てのモデル棄却!?)

# Open inflation

Kleban & Schillo 12  
Nomura & Guth 12

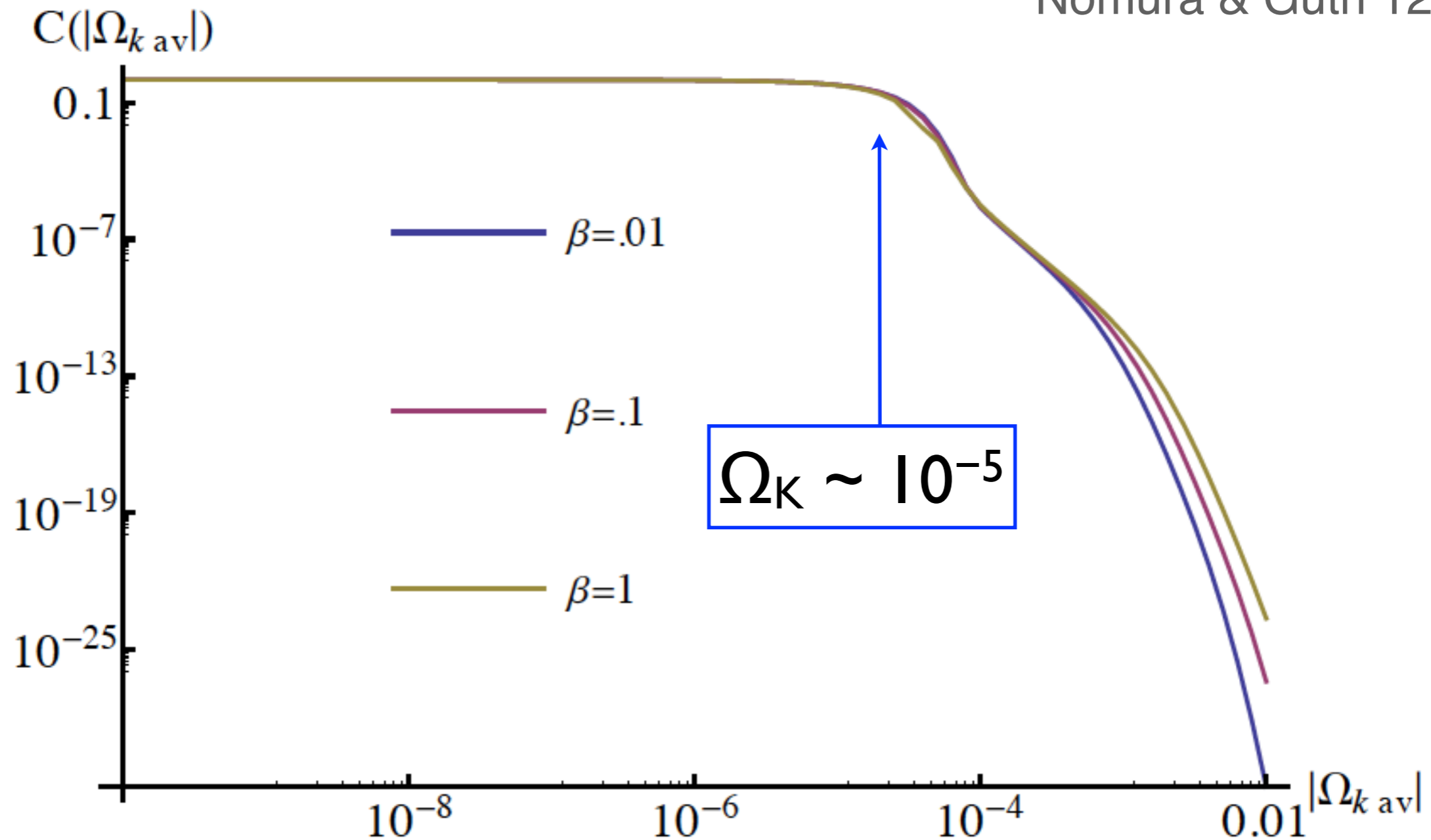
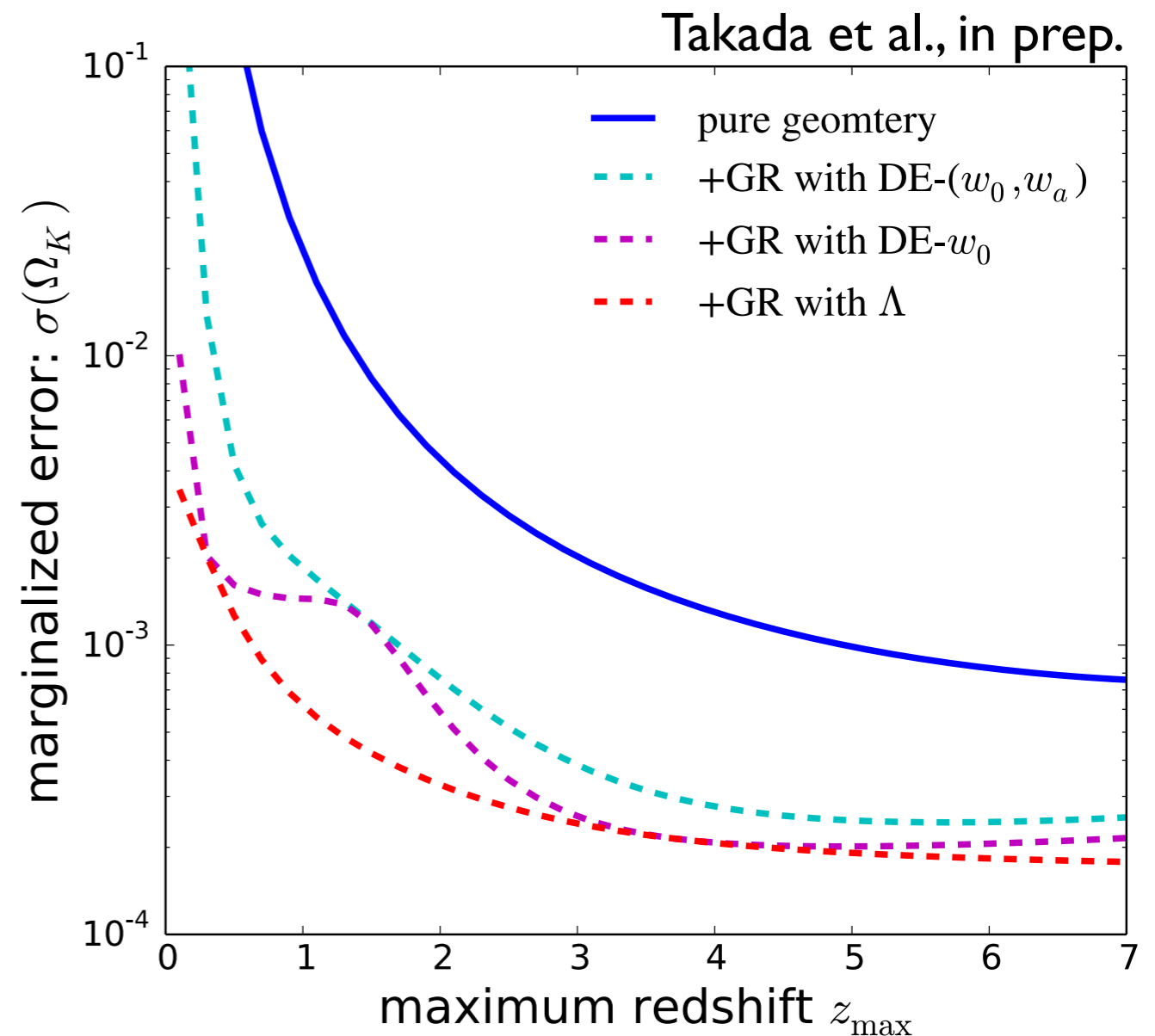


Figure 2. The cumulative probability distribution  $C(|\Omega_k|)$  defined in (5.1) (the probability that the magnitude of the measured curvature is larger than  $|\Omega_{k,av}|$ ), using the power spectrum (4.8), and a logarithmic prior on the eternal inflation length scale  $L_*$ .

# 宇宙の曲率の測定

- 遠方距離観測で曲率の効果が**直接**見える  
(三角形の角度の和 $\neq 180$ 度)
- $\Omega_K$ は小さいので展開すると
$$D_A(z) \simeq D_C(z) \left[ 1 + \frac{1}{6} H_0^2 \Omega_K D_C(z)^2 \right]$$
- $z \sim 3-4$ までBAOなどで距離を精密測定することが重要



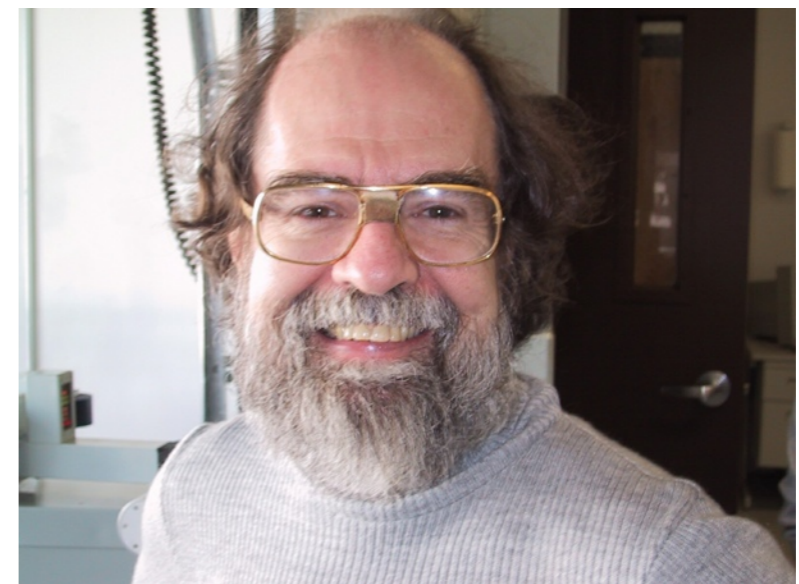
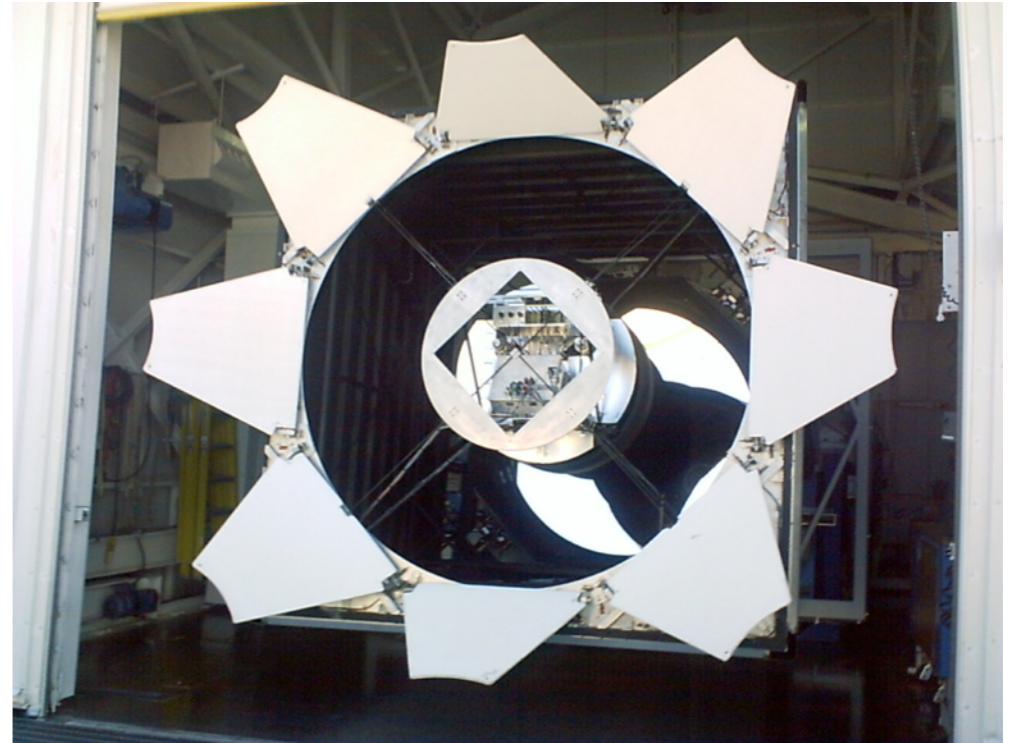


# 宇宙論とサーベイ

- 理論により予言されるものは基本的にはさまざまな物理量のアンサンブル平均
- これを空間平均した観測量と比較し検証
- 高精度の検証のためには広い領域を一様に観測するサーベイ観測が必要不可欠

# Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

- 2000年開始、全天の1/4の撮像&分光サーベイ
- 2.5mの専用望遠鏡 (@New Mexico, USA)
- 天文学、宇宙論の様々な分野で大きな成果をあげた



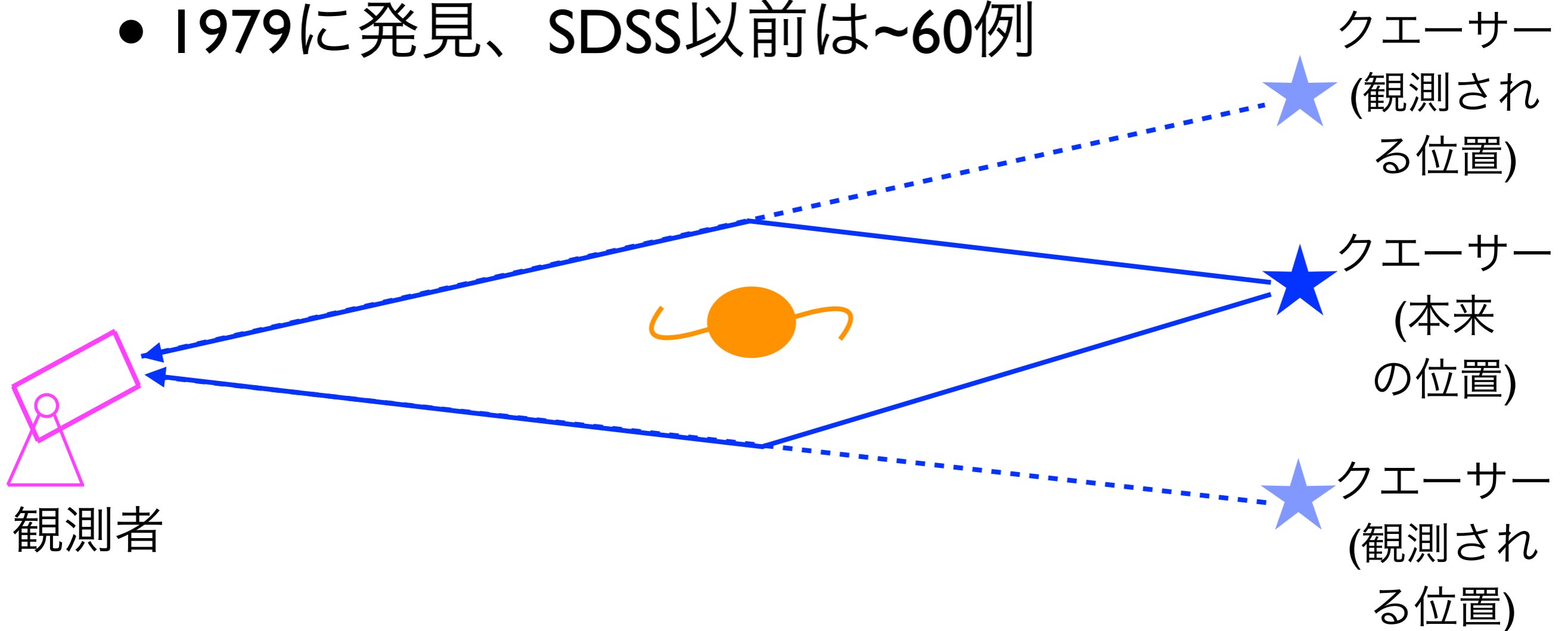
Jim Gunn

# SDSSと日本

- SDSSはアメリカ、日本、ドイツの共同研究としてはじまった
- 日本は福来さん (現Kavli IPMU) を中心に~10人くらいがメンバーとして参加した
- 私の指導教員の須藤さんもメンバーだったためSDSSデータを使うことができた

# クエーサー重力レンズ

- 遠方のクエーサーが手前の天体の重力場で複数に分裂して観測
- 1979に発見、SDSS以前は~60例



SDSSJ1226-0006/SDSS

SDSSJ1226-0006/HST

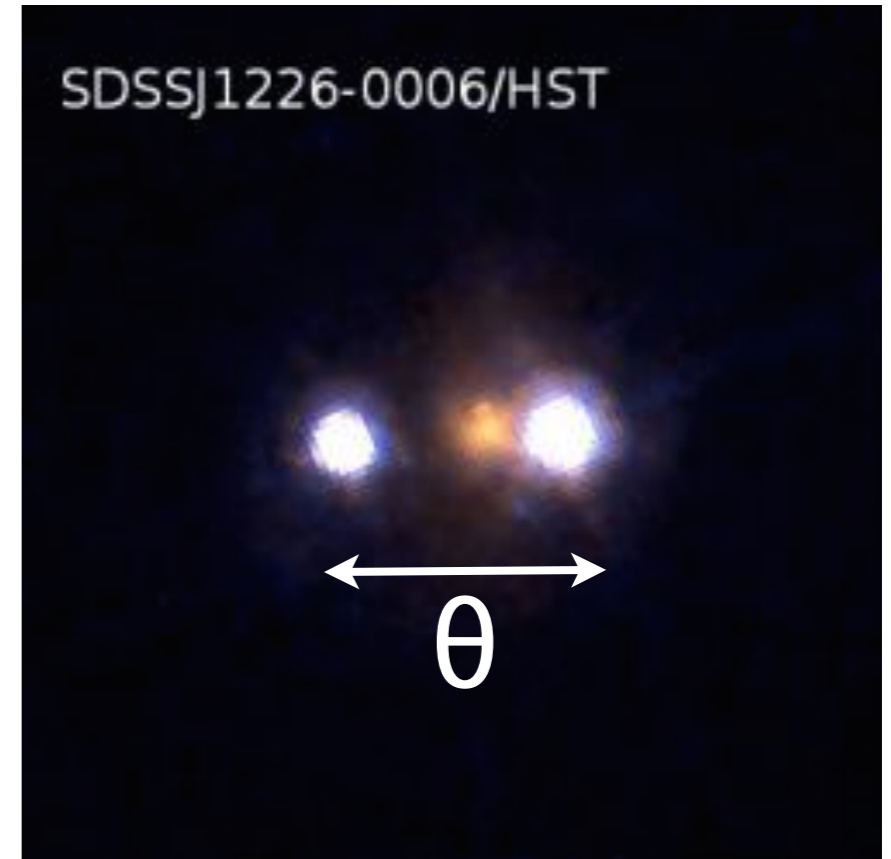


観

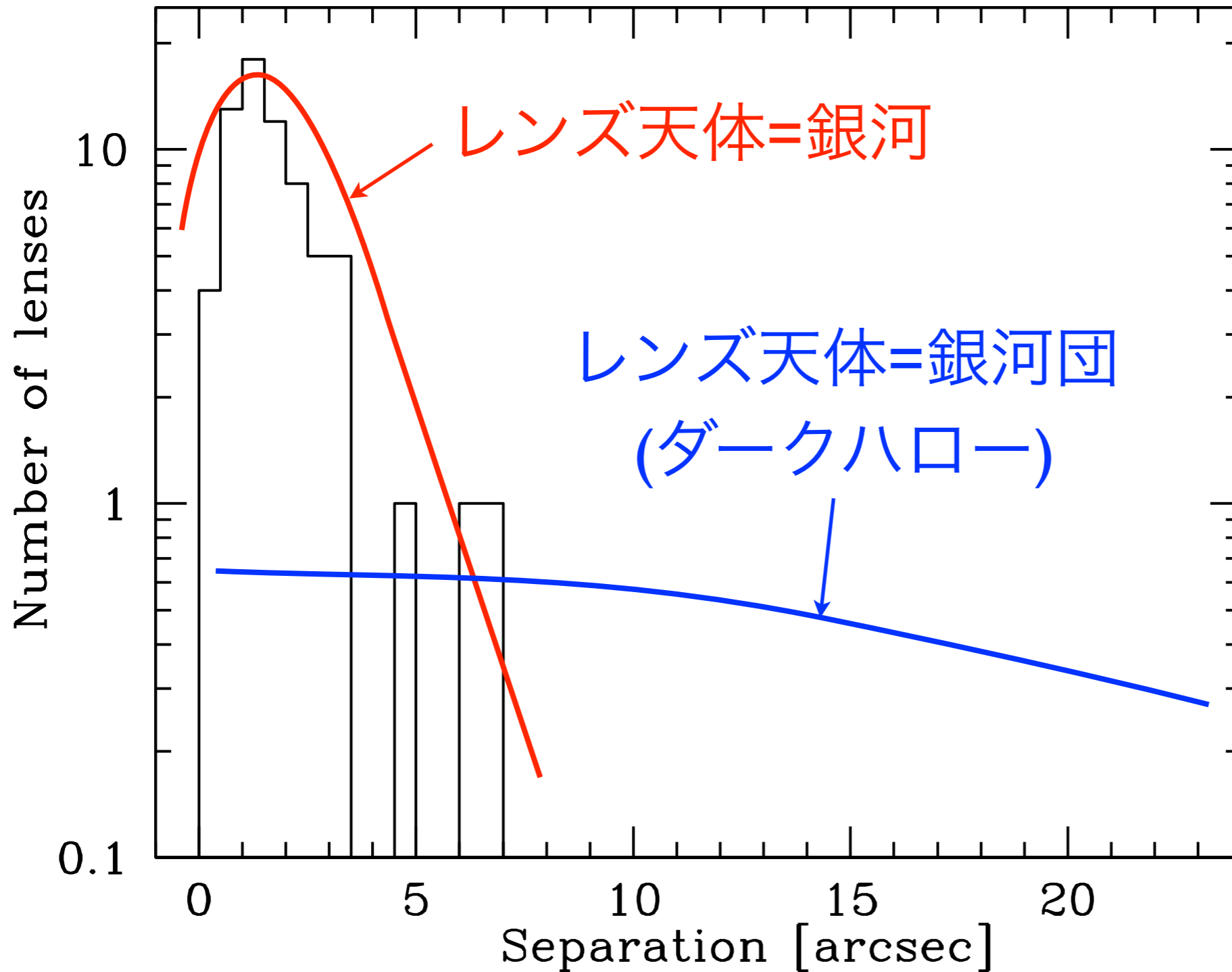
十一  
れ  
量)  
十一  
量)  
十一  
れ  
量)

# クエーサー重力レンズの分離角分布

- 複数像間の分離角はレンズ天体の質量で主に決まる (point massだと  $\theta \propto M^{1/2}$ )
- 通常の銀河がレンズ天体では $\theta$ は高々6"程度
- CDM理論によるとcuspyなハローにより10"を超える銀河団重力レンズも存在するはず (e.g., Oguri 2002)



# 分離角分布 (SDSS以前)



レンズ天体=銀河

レンズ天体=銀河団  
(ダークハロー)

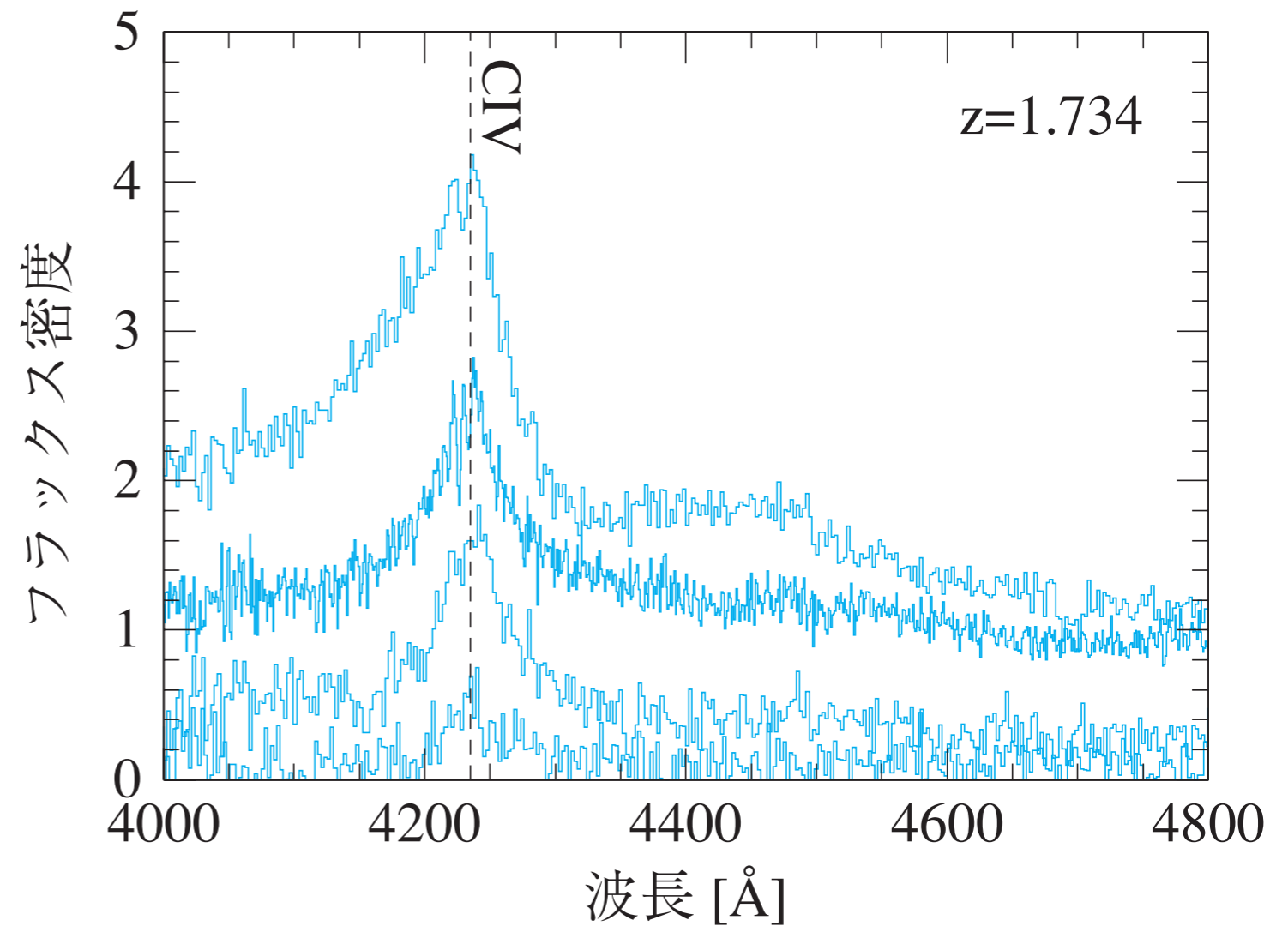
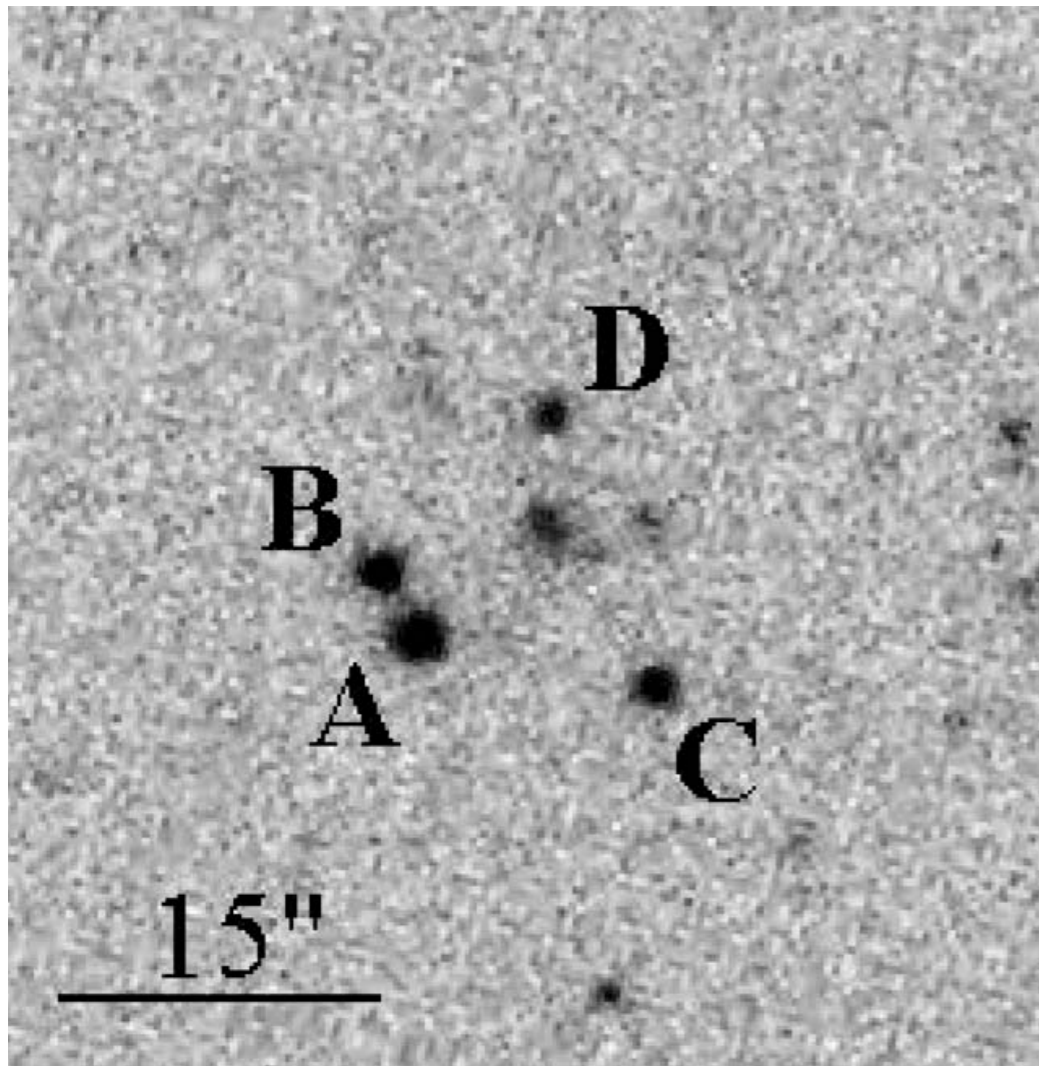
確率的に  
SDSSで  
みつかる  
(はず)

2002年秋  
稲田直久さん  
(当時宇宙線研)  
の協力を得て  
探索を開始  
(稲田D2, 大栗DI)

今以上に何も  
ない柏に足繁く  
通う修行の日々







天文月報, 97, 415 (2004)より

- 2013年5月3日、SDSS J1004+4112 ( $\theta \sim 15''$ )を発見!
- 分離角の記録を2倍以上更新

- 銀河団で引き起こされた、新たな種族のクエーサー重力レンズをSDSSで初めて発見
  - 約3万個のクエーサーの探索で発見
- **CDM理論の予言とよく一致**
- 大学院生が立案したプロジェクトの成果

.....  
**A gravitationally lensed quasar with quadruple images separated by 14.62 arcseconds**

Naohisa Inada<sup>1</sup>, Masamune Oguri<sup>1</sup>, Bartosz Pindor<sup>2</sup>, Joseph F. Hennawi<sup>2</sup>, Kuenley Chiu<sup>3</sup>, Wei Zheng<sup>3</sup>, Shin-Ichi Ichikawa<sup>4</sup>, Michael D. Gregg<sup>5,6</sup>, Robert H. Becker<sup>5,6</sup>, Yasushi Suto<sup>1</sup>, Michael A. Strauss<sup>2</sup>, Edwin L. Turner<sup>2</sup>, Charles R. Keeton<sup>7</sup>, James Annis<sup>8</sup>, Francisco J. Castander<sup>9</sup>, Daniel J. Eisenstein<sup>10</sup>, Joshua A. Frieman<sup>7,8</sup>, Masataka Fukugita<sup>11</sup>, James E. Gunn<sup>2</sup>, David E. Johnston<sup>7</sup>, Stephen M. Kent<sup>8</sup>, Robert C. Nichol<sup>12</sup>, Gordon T. Richards<sup>2</sup>, Hans-Walter Rix<sup>13</sup>, Erin Scott Sheldon<sup>7</sup>, Neta A. Bahcall<sup>2</sup>, J. Brinkmann<sup>14</sup>, Željko Ivezić<sup>2</sup>, Don Q. Lamb<sup>7</sup>, Timothy A. McKay<sup>15</sup>, Donald P. Schneider<sup>16</sup> & Donald G. York<sup>7,17</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, School of Science, The University of Tokyo, 113-0033, Japan

<sup>2</sup>Princeton University Observatory, Peyton Hall, Princeton, New Jersey 08544, USA

<sup>3</sup>Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, 3701 San Martin Drive, Baltimore, Maryland 21218, USA

<sup>4</sup>National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>5</sup>Department of Physics, University of California at Davis, 1 Shields Avenue, Davis, California 95616, USA

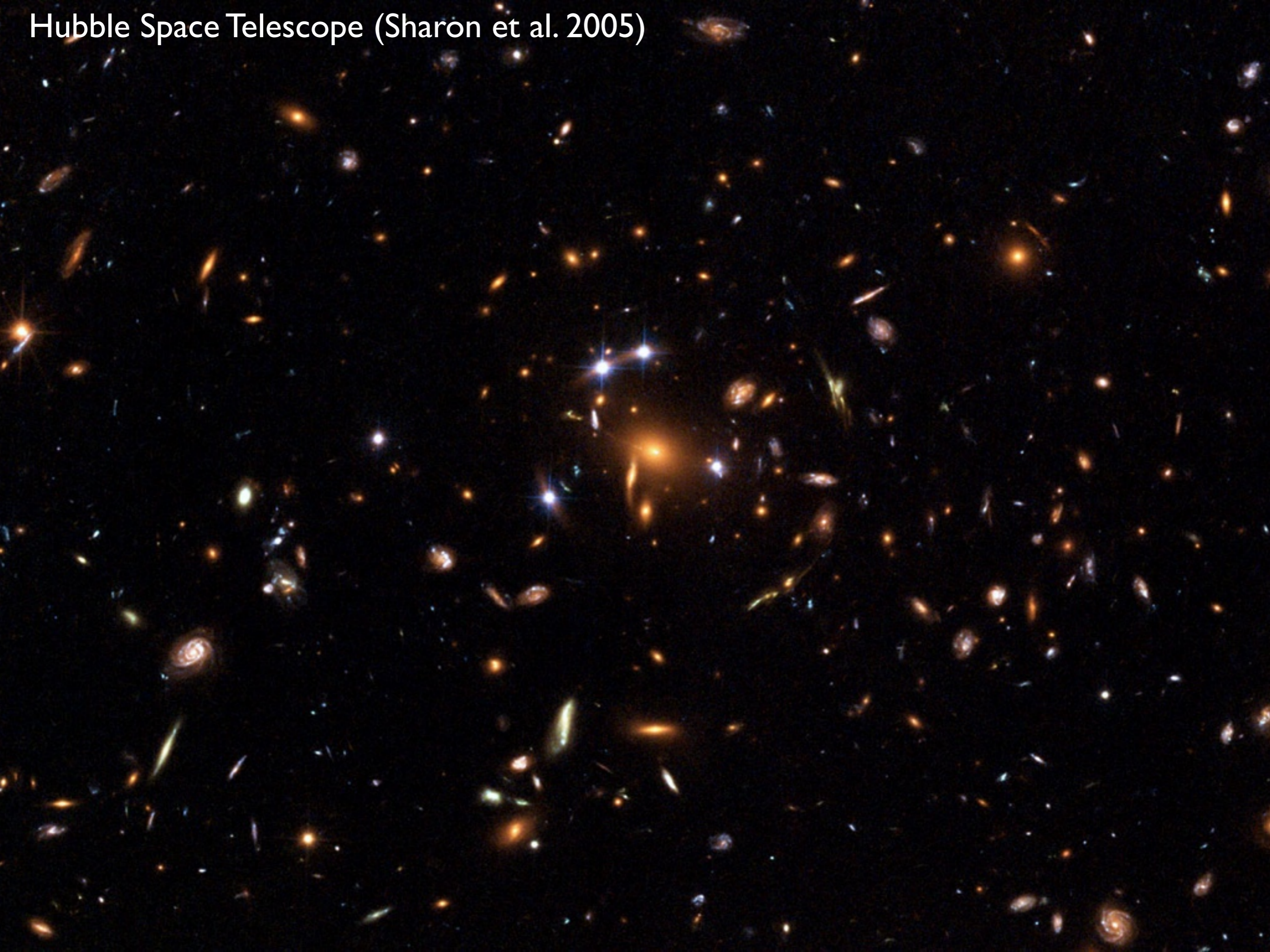
<sup>6</sup>Institute of Geophysics and Planetary Physics, Lawrence Livermore National Laboratory, L-413, 7000 East Avenue, Livermore, California 94550, USA

<sup>7</sup>Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, Illinois 60637, USA

<sup>8</sup>Fermi National Accelerator Laboratory, PO Box 500, Batavia, Illinois 60510, USA

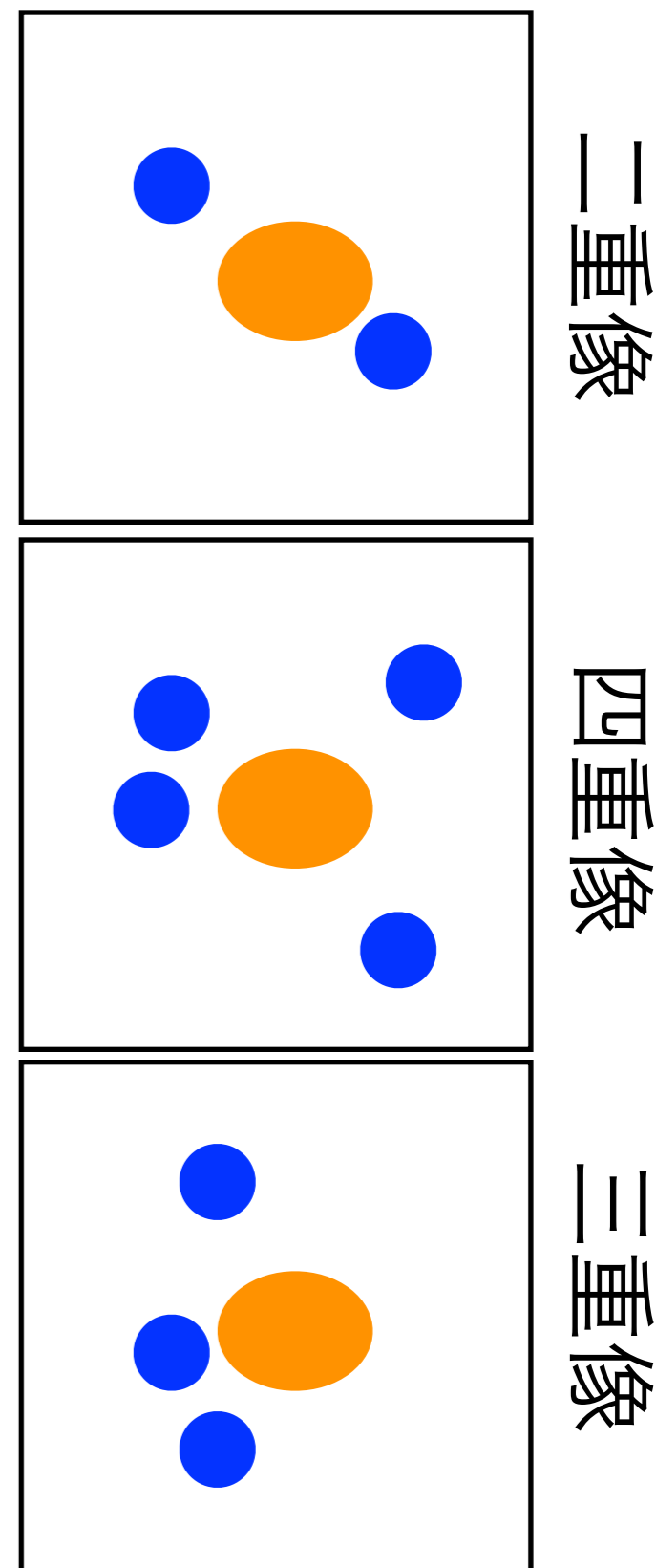
<sup>9</sup>Institut d'Estudis Espacials de Catalunya/CSIC, Gran Capita 2-4,

Hubble Space Telescope (Sharon et al. 2005)



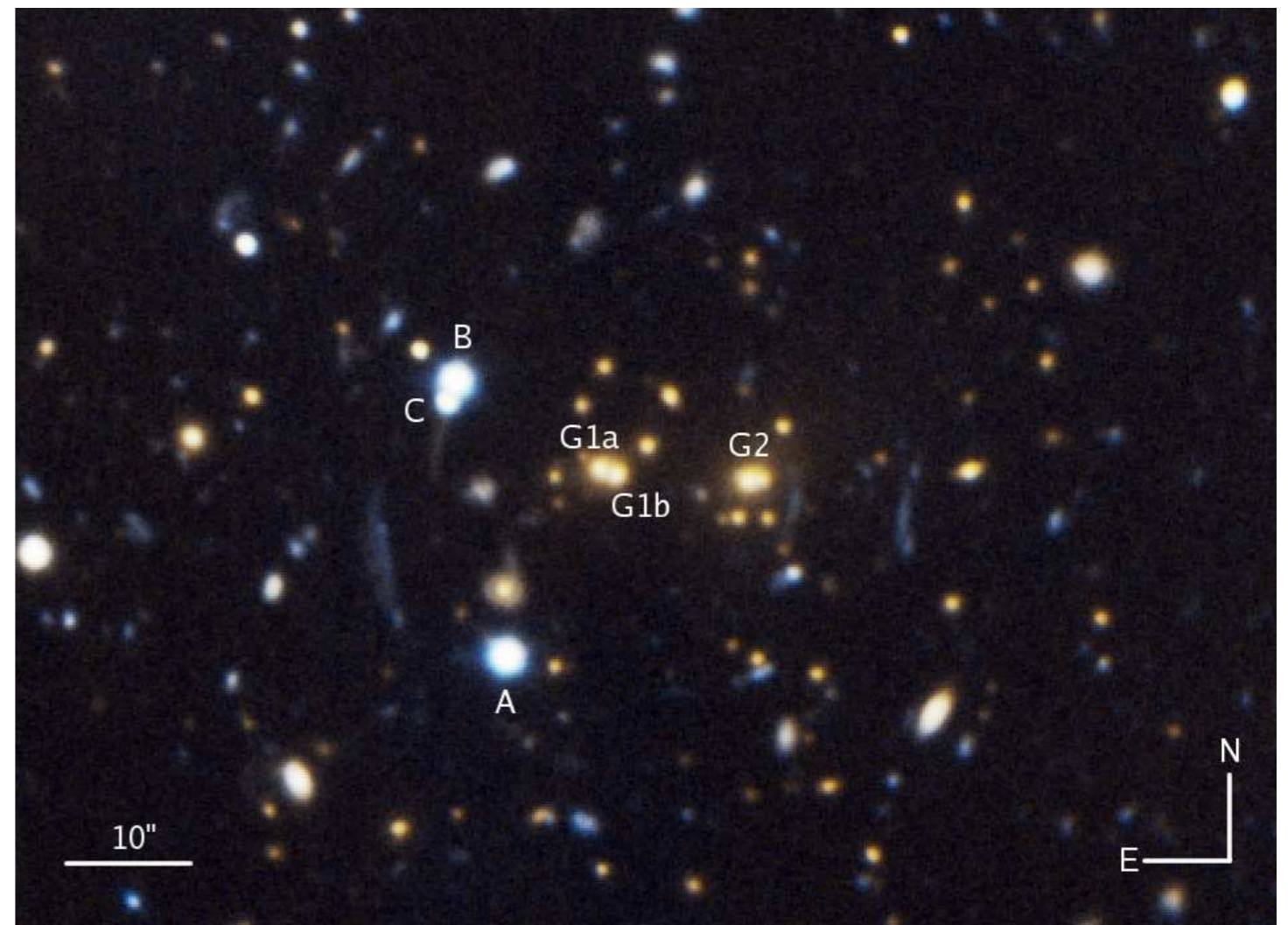
# 大分離角重力レンズの像の数

- 銀河スケールでは二重と四重像がほとんど
- 銀河団スケールでの期待される像の数を、ハローの非球対称性を考慮して予言
- 大分離角重力レンズでは三重像がかなりの割合 (~50%) 観測されるであろう



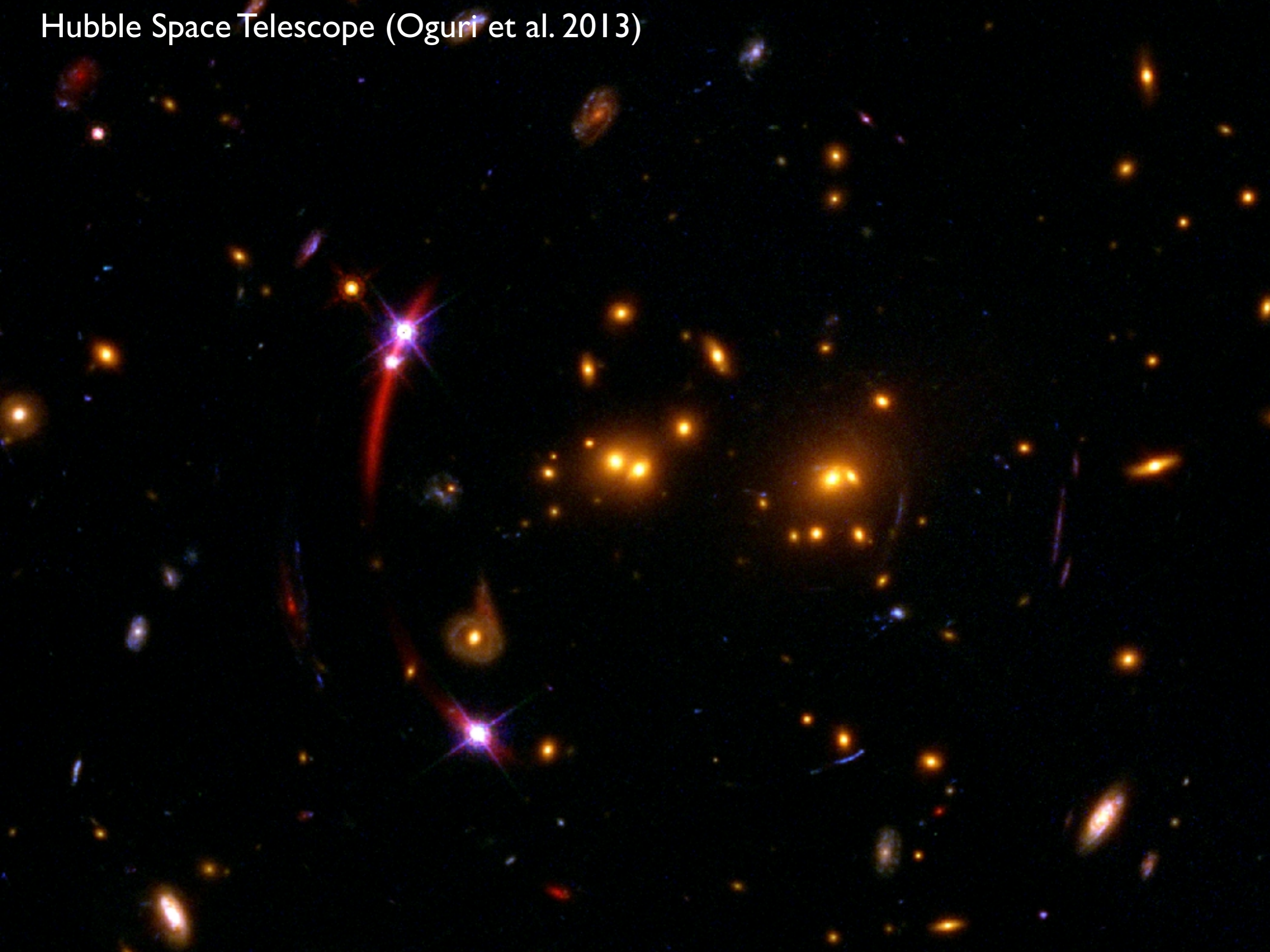
# 三重像重力レンズの発見

- さらに大きい分離角 ( $\theta \sim 22.5''$ ) の重力レンズクエーサーをSDSSから発見
- 片側に三重像  
→ 理論の期待どおり



SDSS J1029+2623

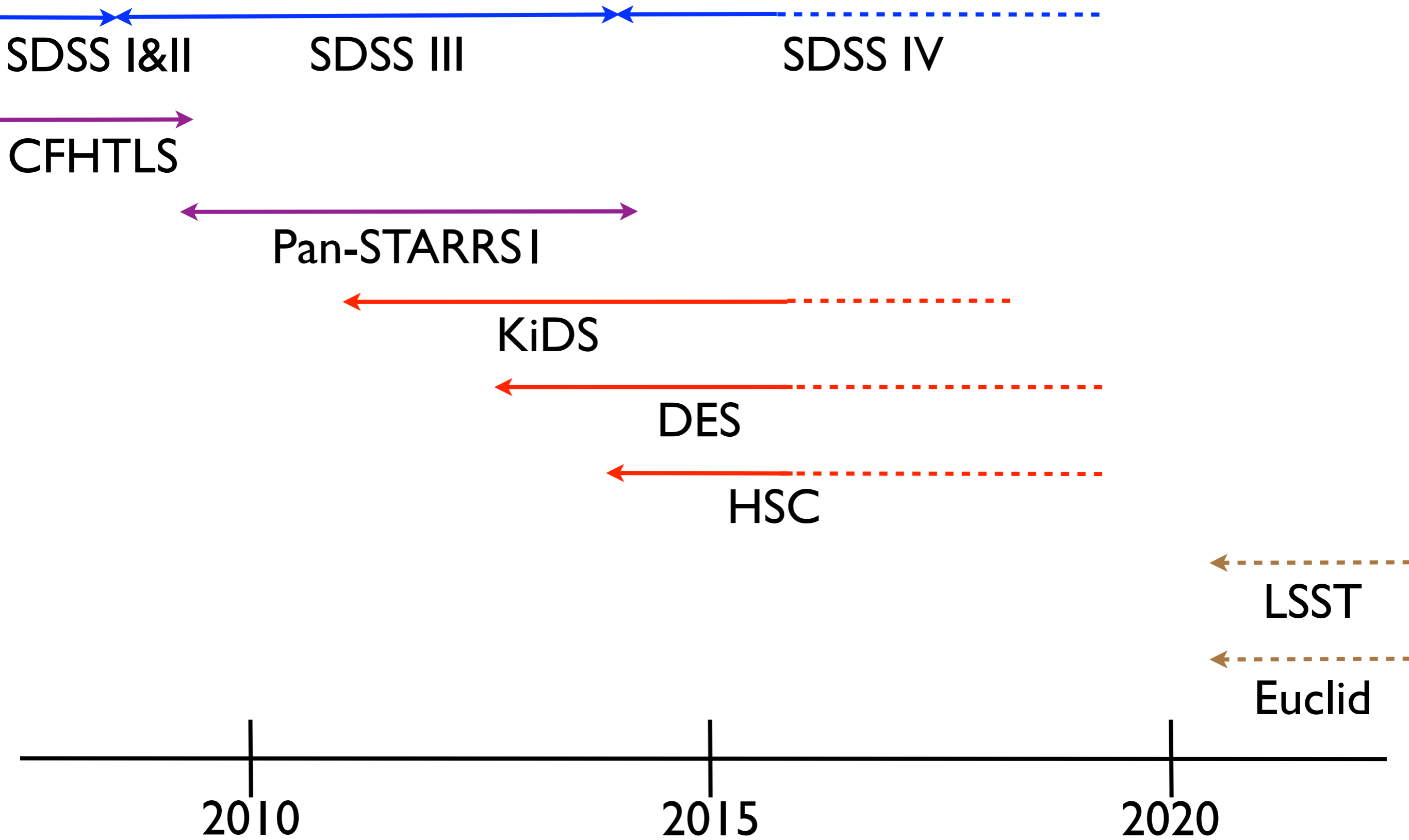
Hubble Space Telescope (Oguri et al. 2013)



# 教訓的な何か

- ちゃんと理論的に計算したものはわりと観測でもみつかるものである
- 自分を規定しすぎて可能性を狭めない  
(自分は理論/観測/可視/×線/... だから云々)
- とはいっても新しいことをやるうえでその道の専門家にアドバイスをもらおう、ないし共同研究することはたいへん重要
- 夏の学校は狭い自分の研究分野を超えた人脈を広げうるという点で有用かも

# サーベイの進展



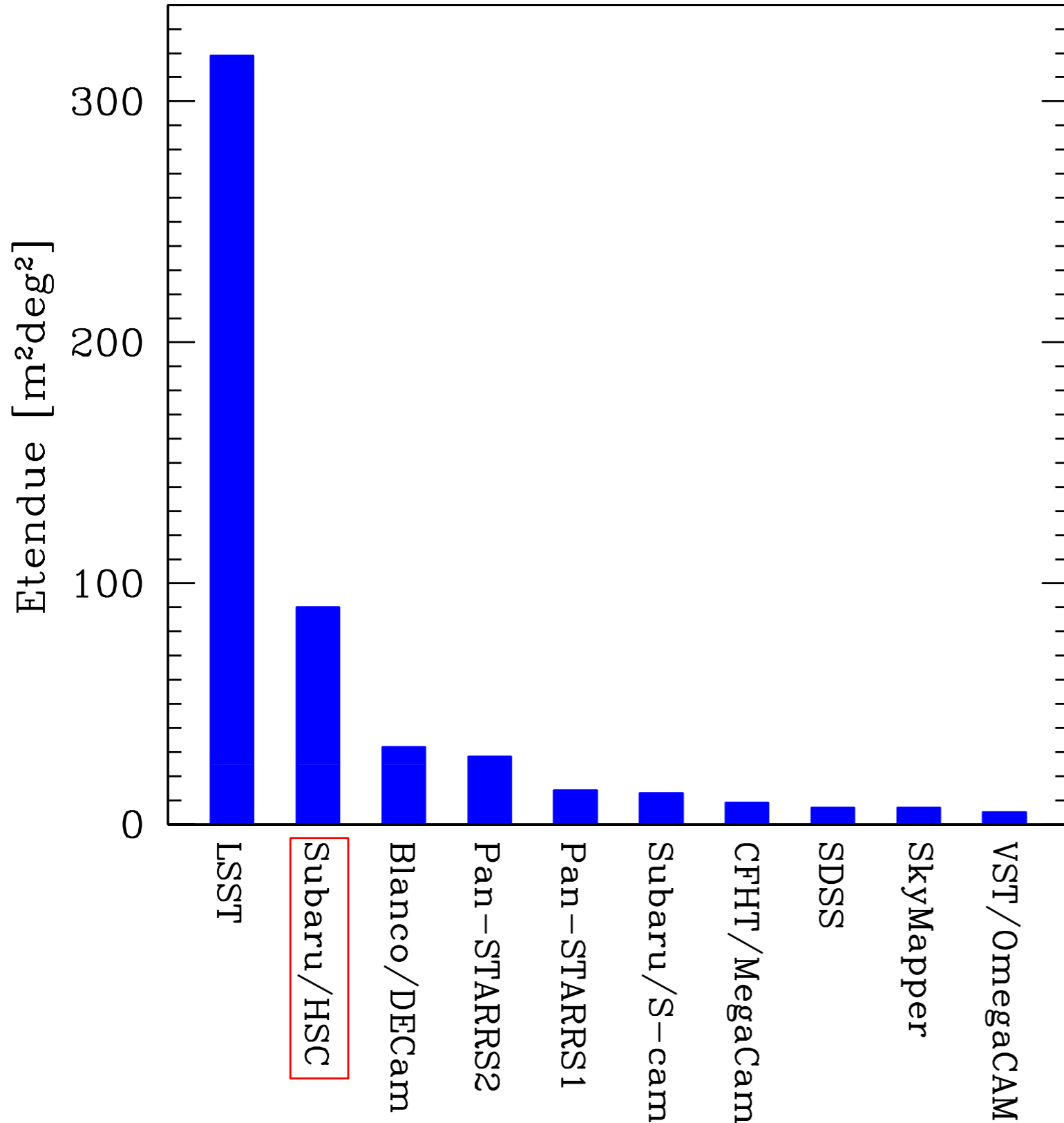


# Hyper Suprime-Cam (HSC)

- すばる望遠鏡に取り付けられた広視野カメラ
- 5年で300晩の観測時間を使うサーベイ観測を開始 (2014-)
- 日本が主導する初の大規模 (宇宙論) サーベイ  
とあってよい
- PI: 宮崎聡 (国立天文台)

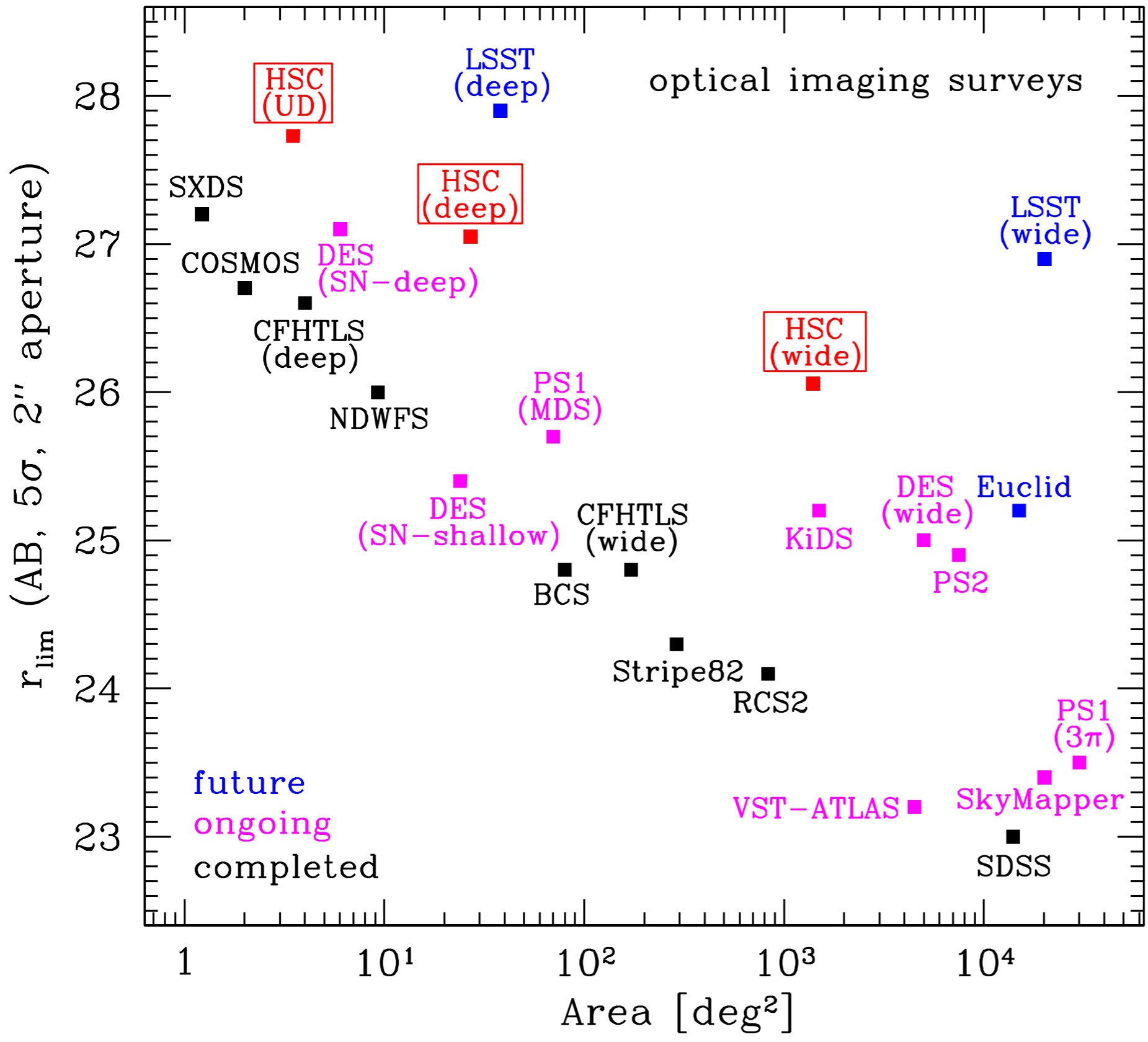


# サーベイ速度

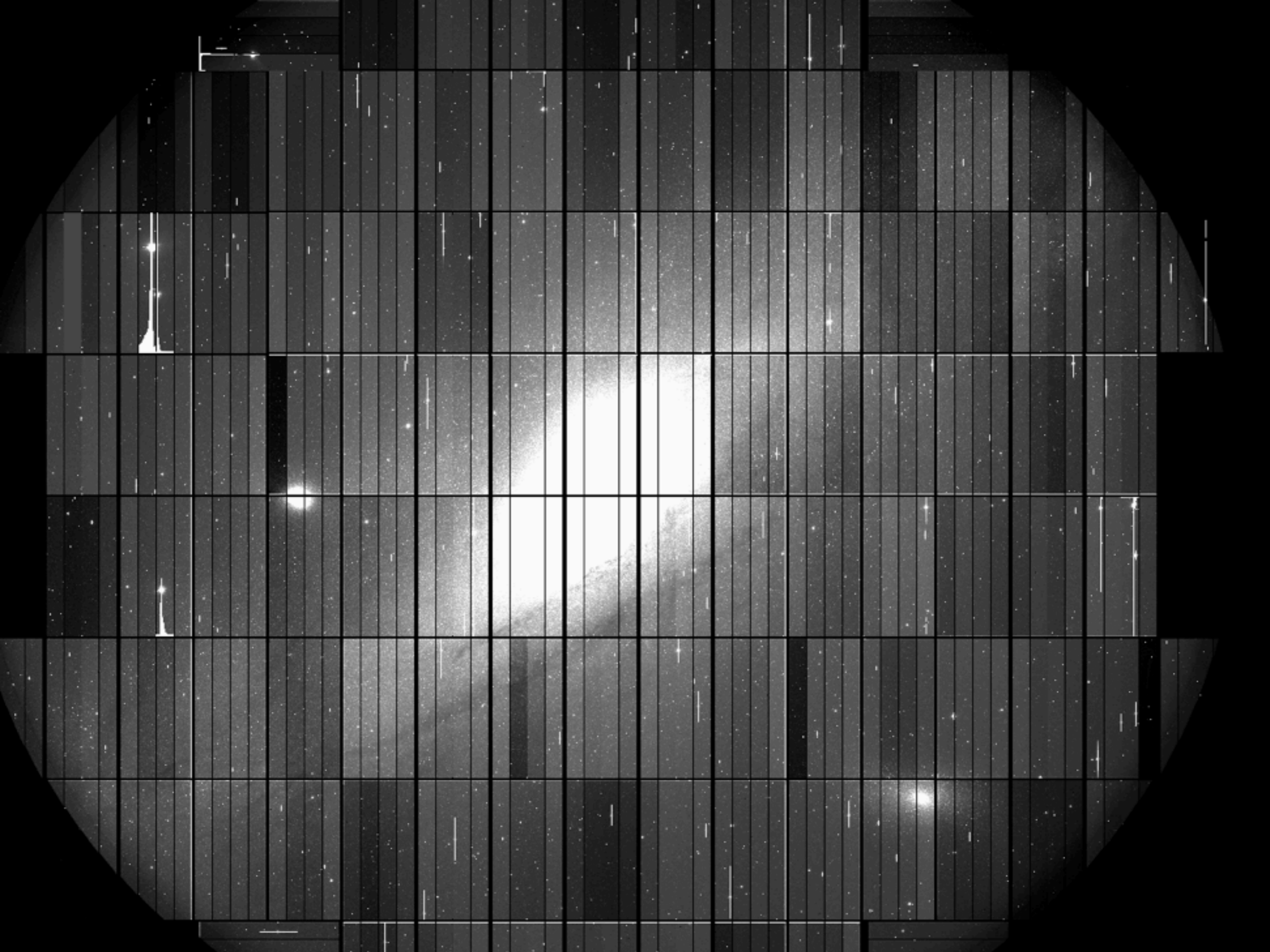


- サーベイ速度  
=視野×口径
- HSCは現段階では  
圧倒的世界一位!

# from HSC SSP proposal

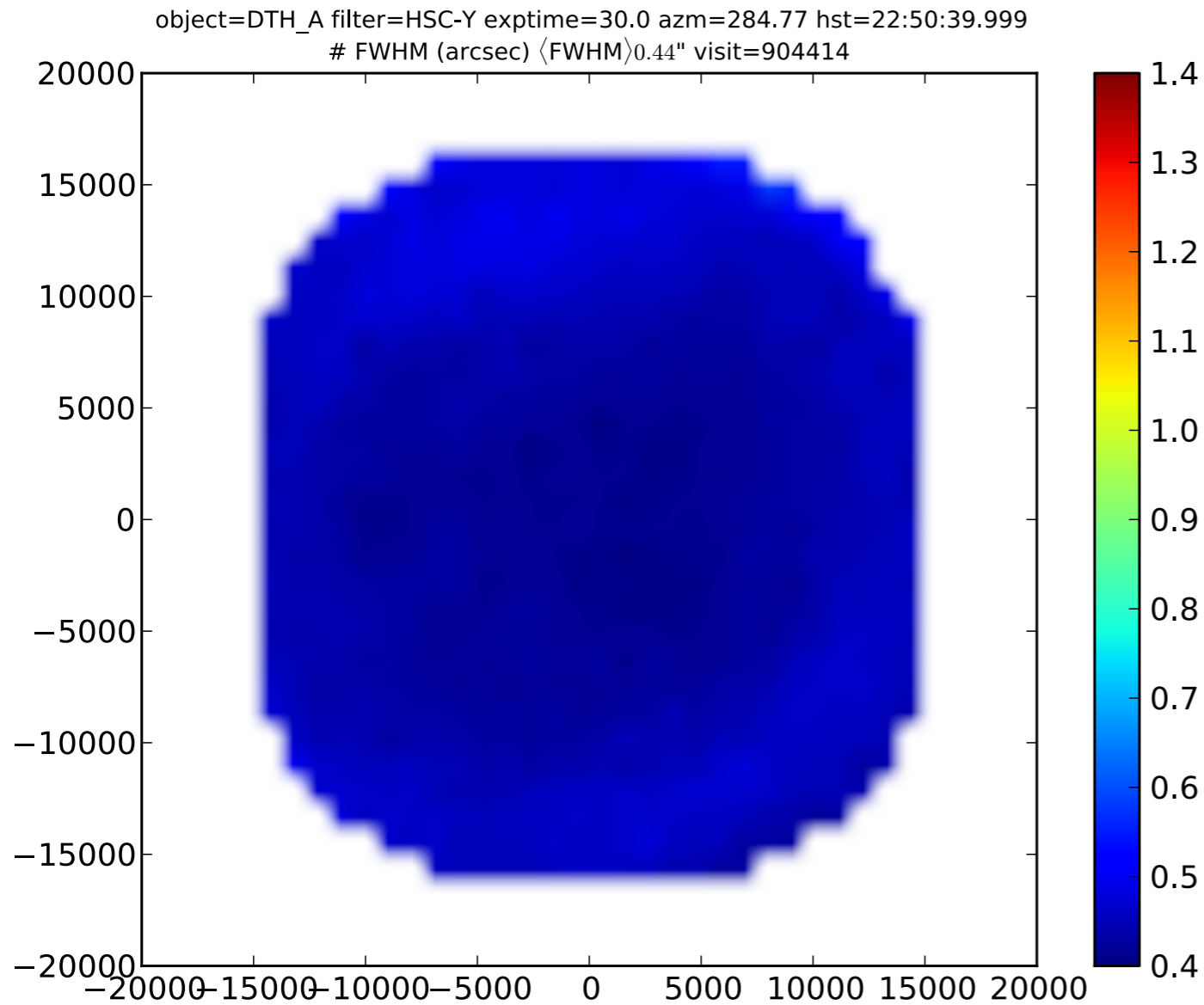


HSCサーベイは  
世界最先端かつ  
ユニーク





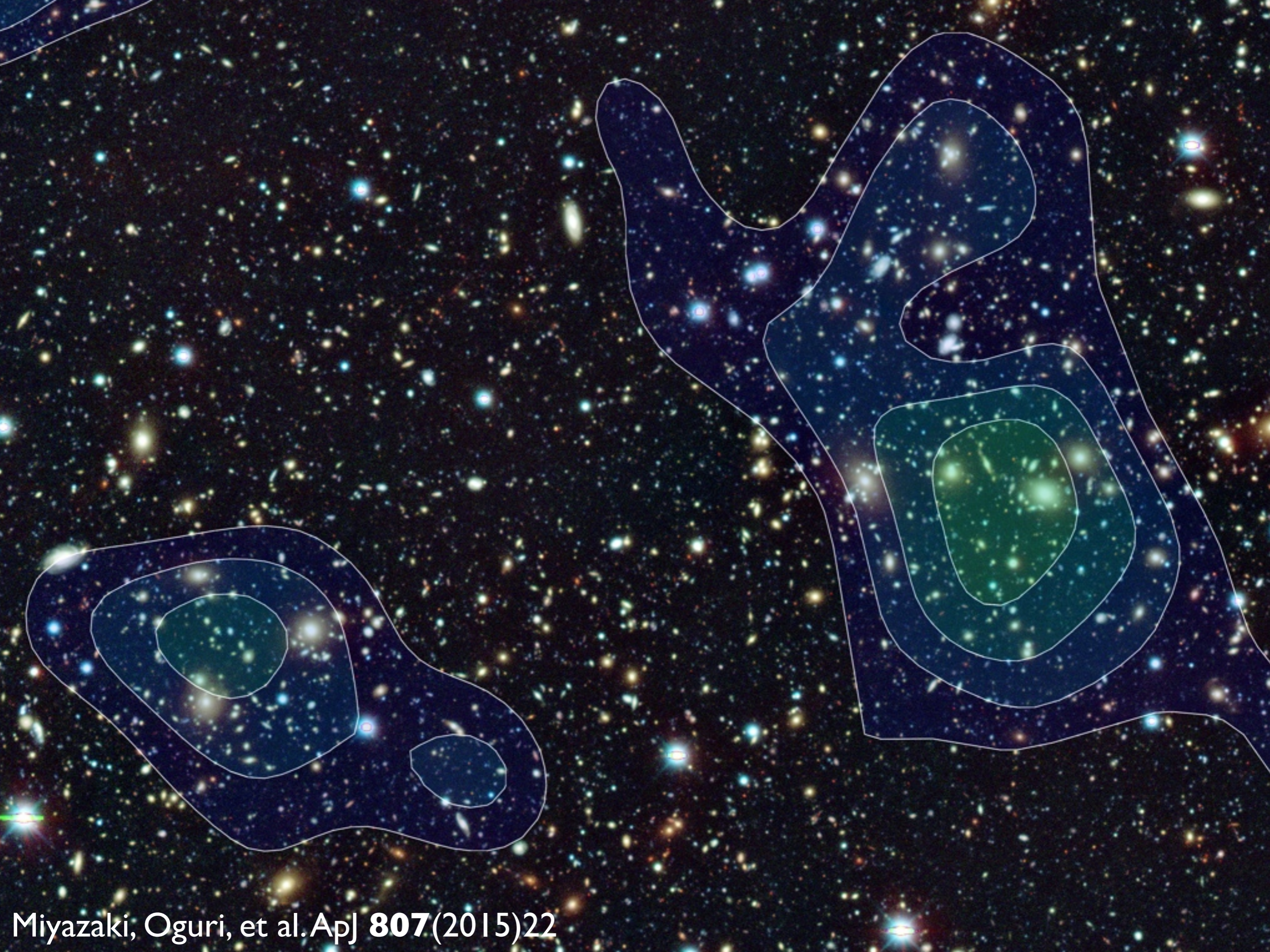
# 優れた結像性能



← 1.5 deg →


(Nov. 2 2013, y-band, 30 sec)

- 視野全体に渡って  
~0.4" FWHM の  
シーイング達成
- 弱い重力レンズで  
大きな成果が期待  
できる



## ダークマター9つ確認 2.3平方度の範囲だけで

Science Portal [2015/07/06]

- ✓ 13.3型 (2560 x 1440) + 500GB SSD搭載ノートPCがこの価格? [PR] 
- ✓ 13.3型 (2560 x 1440) + 500GB SSD搭載ノートPCがこの価格?
- ✓ OSSデータベースのセキュリティ対策に応えた暗号化ソリューション【MyDiamo】
- ✓ マイナビニュースでお買い物もできちゃう!! ショッピングチャンネルはこちらから♪

全天球のごく一部にすぎない領域だけで、銀河団規模のダークマター(暗黒物質)が集中している場所が9カ所あることを、国立天文台、東京大学などの研究チームがすばる望遠鏡の観測データから確認した。

宇宙の質量の4分の1を占めるといわれるダークマターは、今の物理モデルで説明できず、いろいろな考えが出されている(2015年5月25日ハイライト・香取 秀俊 氏・東京大学 大学院工学系研究科 教授 「科学技術を大きく変える光格子時計」参照)。

研究チームは、ハワイ・マウナケア山頂にあるすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラによる観測データから、2.3平方度の広さにダークマターの集中が9つ存在することを突き止めた。大きさはいずれも銀河団規模だった。1平方度は、角度にして1度の長さを一辺とする正方形



# HSCサーベイの共同研究形態

- 日本人なら誰でも参加してデータ使用可能
- ボトムアップ的なSDSS方式を採用：各自が自分の興味・アイデアで自由に研究プロジェクトを提案し研究を行うことができる
- 実際に手を動かした人がlead authorとして論文執筆
- 特に若い人には大きなチャンスとなりうる

# まとめ

- 宇宙論はまだまだ重要問題があり面白い
- 大規模サーベイが重要な役割を果たしている
- 日本でも世界をリードする大規模サーベイ  
HSCサーベイがはじまったところである

(興味がある人は天文学会年会企画セッション  
収録も参照してください

<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~msyktnk/tmp/hsc/asj15a/> )