

SuMIRe HSC/PFSサーベイ による宇宙論

高田昌広 (IPMU)

PFS Cosmology WG: A. Taruya (Tokyo), K. Yamamoto (Hiroshima),
J. Peacock (Edinburgh), R. Ellis (Caltech), A Nishizawa (IPMU), ...



Jan 19, 2011 @ Subaru UM10, NAOJ

これまでのPFS活動(日本国内)

PFS Science White Paper

Prepared by the PFS Science Collaborations

- PFS White Paper: 日本人研究者(ボランティア)がメインになって執筆(219 pages!)
 - 宇宙論
 - 銀河考古学
 - 銀河天文学
 - ダスト放射銀河
 - 高赤方偏移銀河、宇宙の再電離
 - QSOs, 活動銀河核
 - QSO吸収線宇宙論
 - 系内星形成領域
- PFSメーリングリスト
 - 約70名が登録(2011.1.17時点)

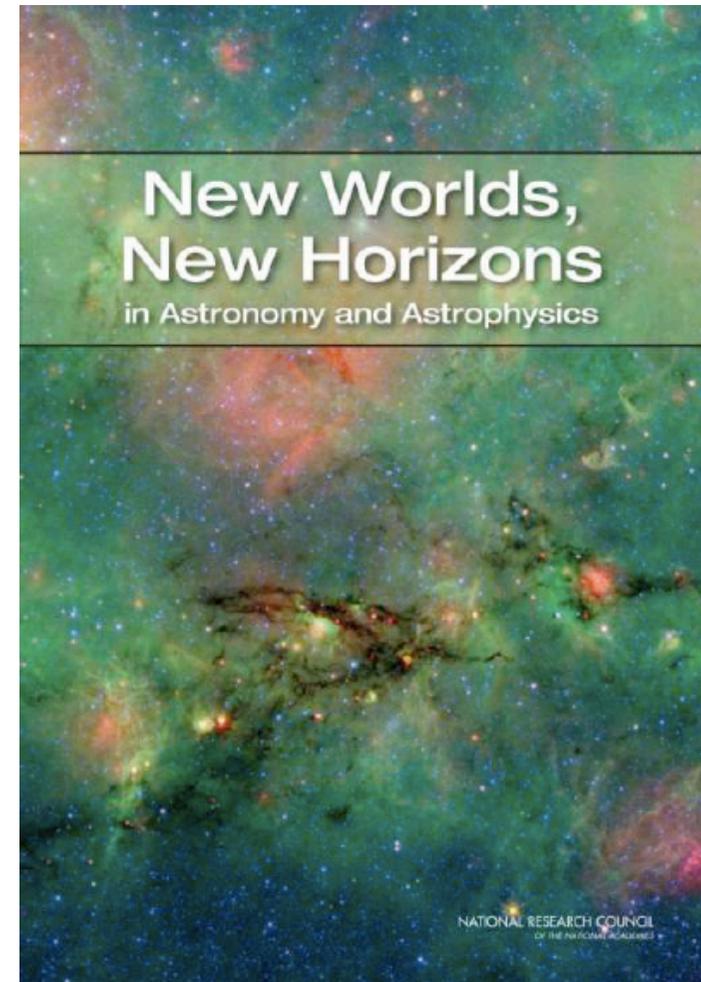
本講演のコンテンツ

- PFSによる大規模赤方偏移銀河サーベイによる宇宙論の威力を評価する
 - ダークエネルギー、ニュートリノ質量、宇宙の初期条件の制限 (インフレーションモデル)、重力理論の検証
- PFS BAOサーベイの実行可能性を評価
 - 必要な観測領域の大きさ(sky coverage)、最小夜数は？
 - HSCサーベイとのシナジーは？
- 国際競争力はあるか？世界一になれるか？
 - 8m級望遠鏡によるサーベイが本当に必要か？
 - BigBOSS (2015? -)との比較: Mayall 4m Tel. @ Kitt Peak Obs.
 - ~\$1B 衛星計画Euclid (ESA: 2019?-), WFIRST (NASA: 2020?-)

Astro2010

全米The National Research Councilsの天文・宇宙物理分科会
(全米科学評議会：日本の学術会議に対応)が、全波長宇宙
分野の2010年代の展望、推奨する長期計画の策定

- Science objectives
 - Cosmic Dawn (宇宙の再電離過程)
 - New Worlds
 - *Physics of the Universe*
 - Dark Matter
 - Dark Energy
 - Inflation
 - Test Gravity



Astro2010 (続き)

- 衛星計画

- 1. **WFIRST**: ダークエネルギーと系外惑星探査

- 1.5m; 144MPx HgCdTe detectors, 200mas, grism; L2
 - 重力レンズ、超新星、バリオン振動

- 地上計画

- 1. **LSST**: ダークエネルギー、暗黒物質、時間変動宇宙

- 8.4m; 3.5 sq. degree FoV; Observe half sky every four days with 6 filters
 - 重力レンズ、超新星、バリオン振動、銀河団

- *Hyper SuprimeCam (HSC) サーベイはこれらの撮像サーベイに先駆けて宇宙論撮像サーベイを行う(2012-)*
 - *一方多天体分光器の計画はほとんどない。2020年代は必ず分光サーベイの必要性が生じる(撮像、分光サーベイは天文学の王道)*

宇宙の加速度膨張： ダークエネルギー or 重力の破綻？

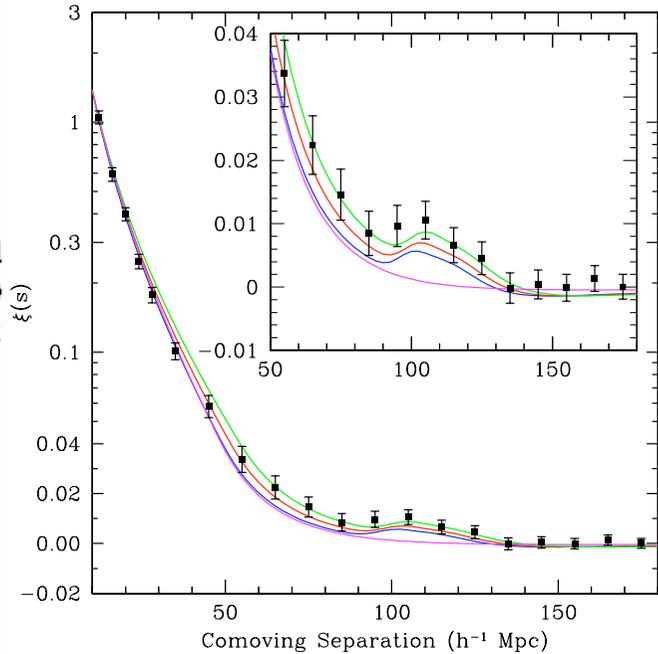
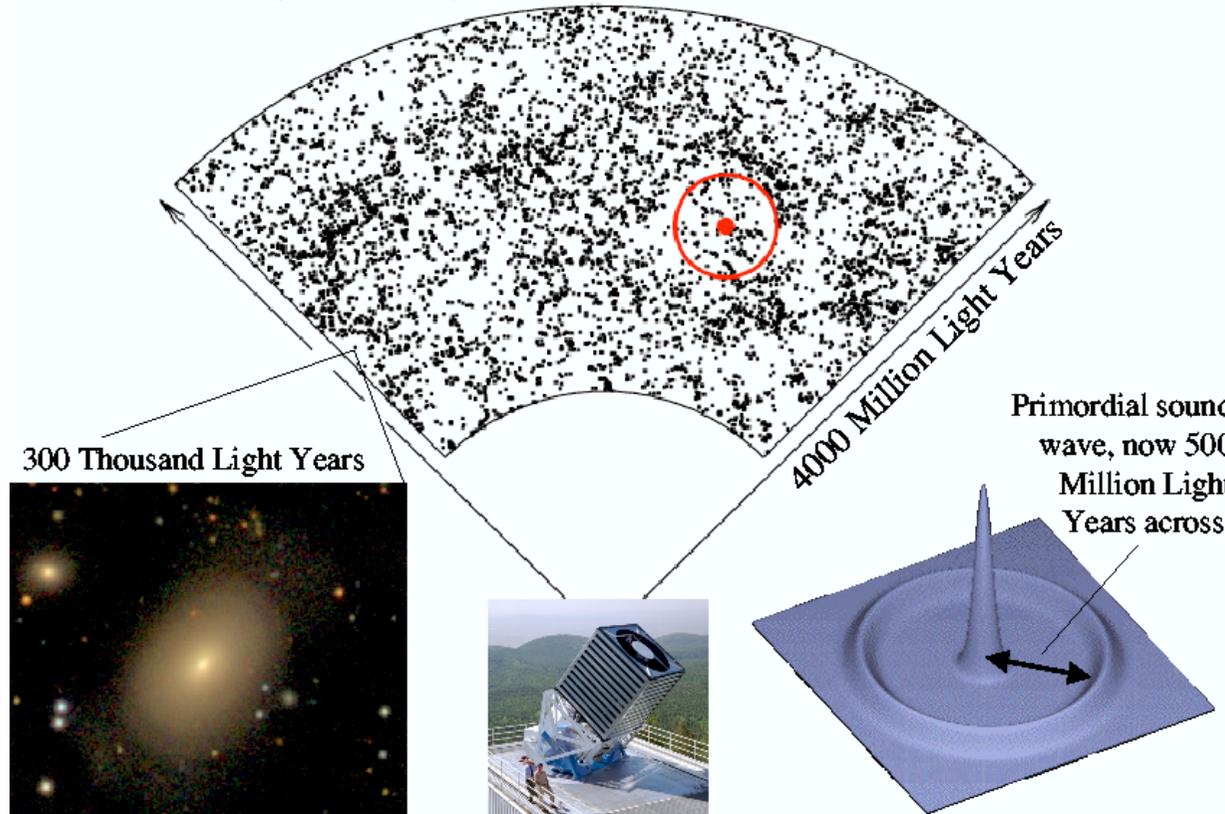
- 観測事実は宇宙の加速膨張

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$
$$\text{or } R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

- 宇宙の構造形成モデル: アインシュタイン重力(GR)に基づくモデル (<10パラメータ: $\Omega_m, \Omega_b, n_s, \dots, +\Lambda$) が 1kpc – 10Gpc (7桁) で正しいのか？
- GRは ~1mm – 10Gpc (29桁) にわたり正しいのか？
- 2つのシナリオの検証: 膨張則の測定 (BAO, SN) と構造形成史の測定 (WL, 銀河団) が組み合わせることが必要
→ SuMIRe HSC + PFS

バリオン振動実験(BAO): 標準物差し

Sloan Digital Sky Survey (SDSS-I,II) (2000-2008)



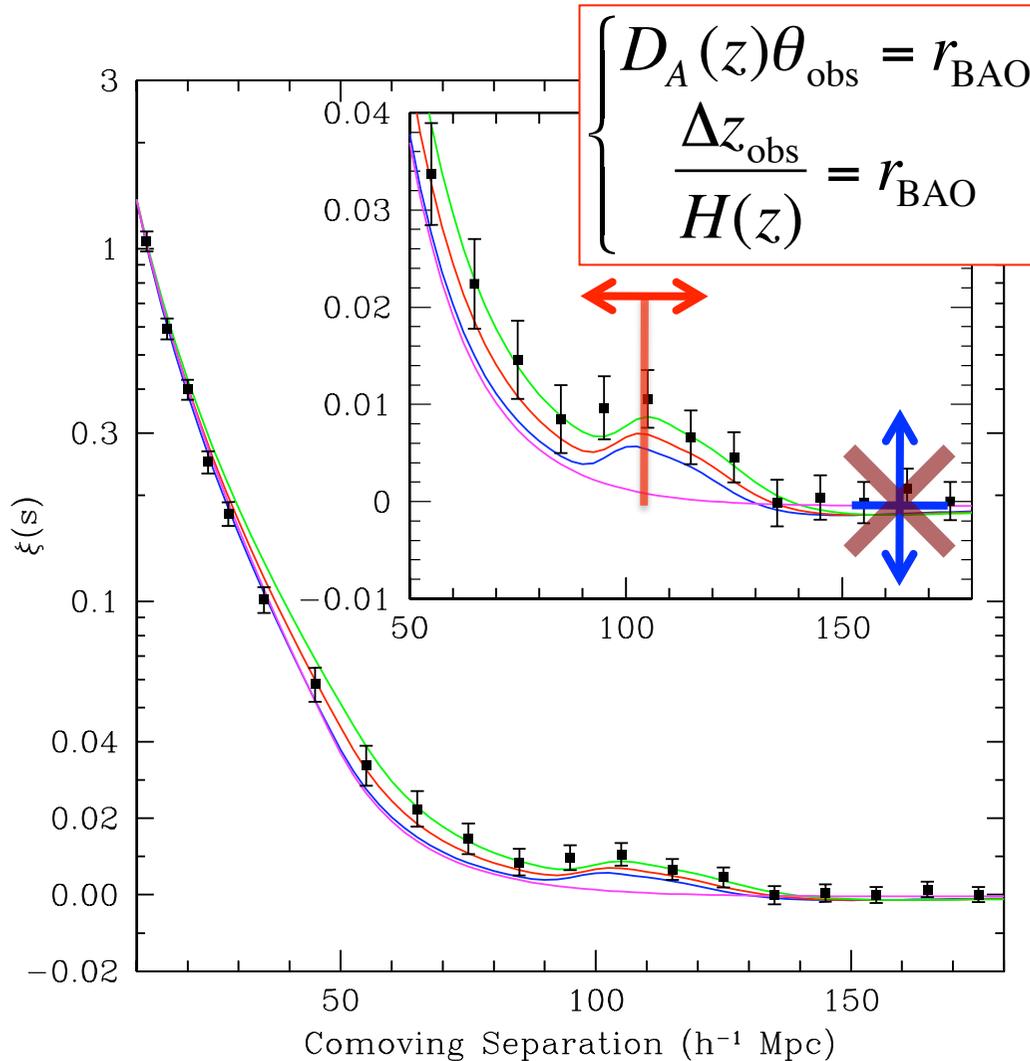
Eisenstein et al. (05)

$$r_{\text{BAO}} = D_A(z) \Delta\theta_{\text{obs}} \quad r_{\text{BAO}} = \frac{\Delta z_{\text{obs}}}{H(z_{\text{survey}})}$$

Dark Energy Task Force Report (DETF)

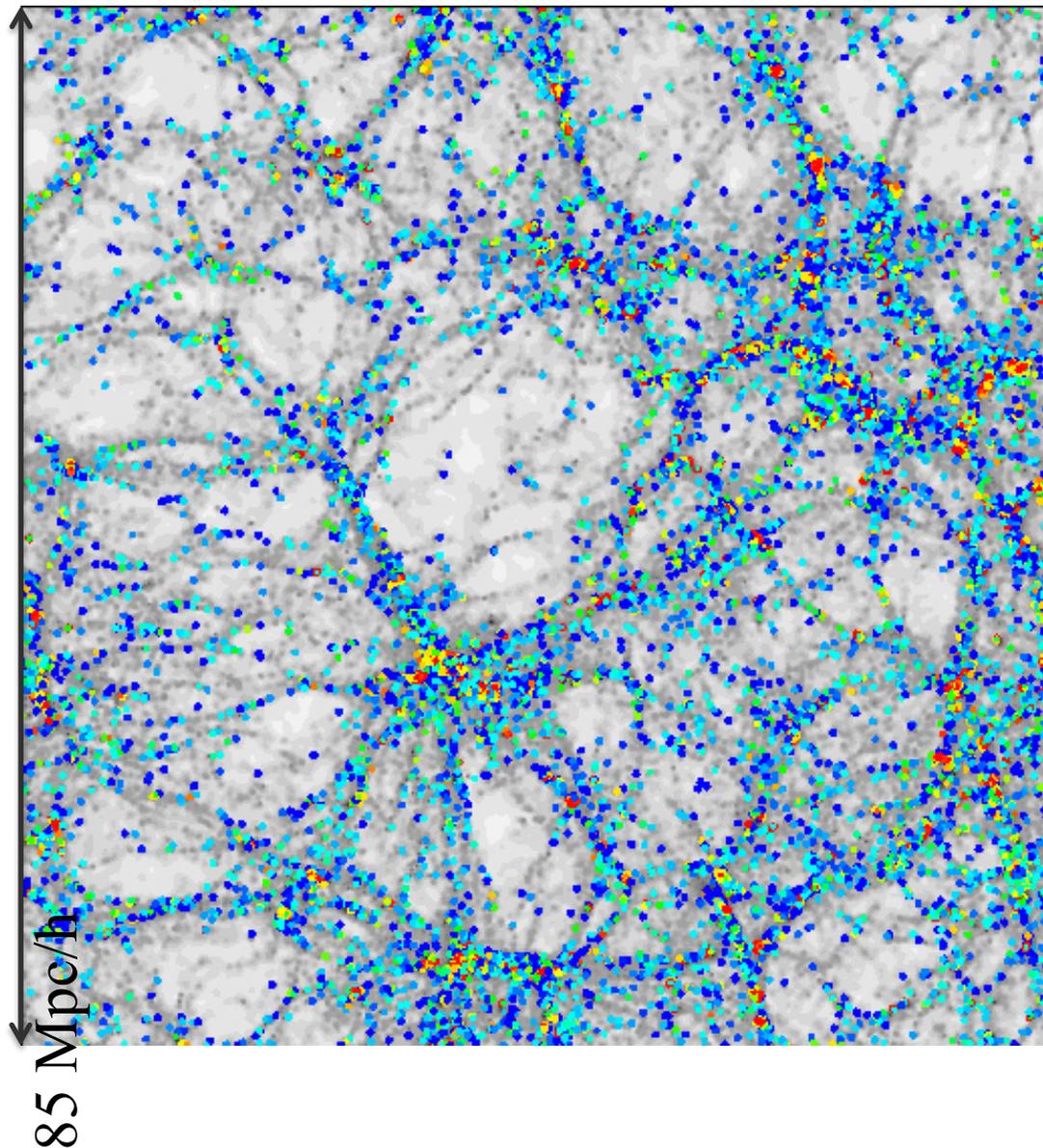
- a. The **BAO** technique has only recently been established. It is less affected by astrophysical uncertainties than other techniques.

BAO幾何学実験



- 銀河分布からBAOスケールを測定する(その角度スケール、赤方偏移偏差)
- 銀河のクラスタリング強度は使わない(そのS/Nは圧倒的に高い)
 - 銀河バイアス不定性のため
- 通常の方法: 銀河バイアスの不定性を考慮したBAOスケールを導出

銀河のバイアス不定性



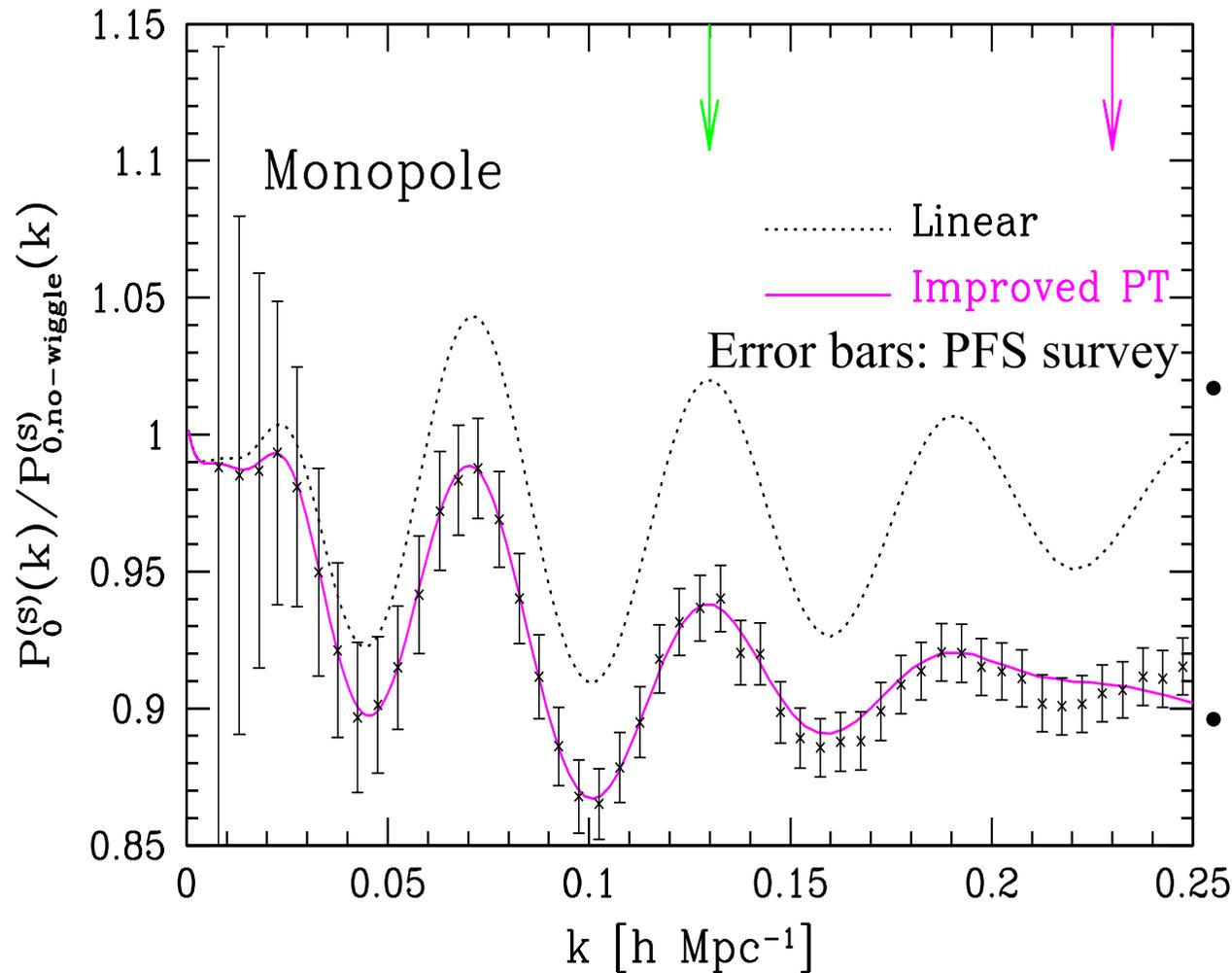
From the Virgo Consortium

- 宇宙の構造形成は「暗黒物質」によって引き起こされる
- 銀河は暗黒物質のバイアスしたトレーサー

$$\delta_g \neq \delta_m$$

- 基礎物理法則に基づく銀河バイアスのモデルはない
- **重力レンズ**: バイアスの直接測定法(HSC+PFS), BigBOSSでは不可能

銀河バイアスを忘れれば、、、 暗黒物質のクラスタリング



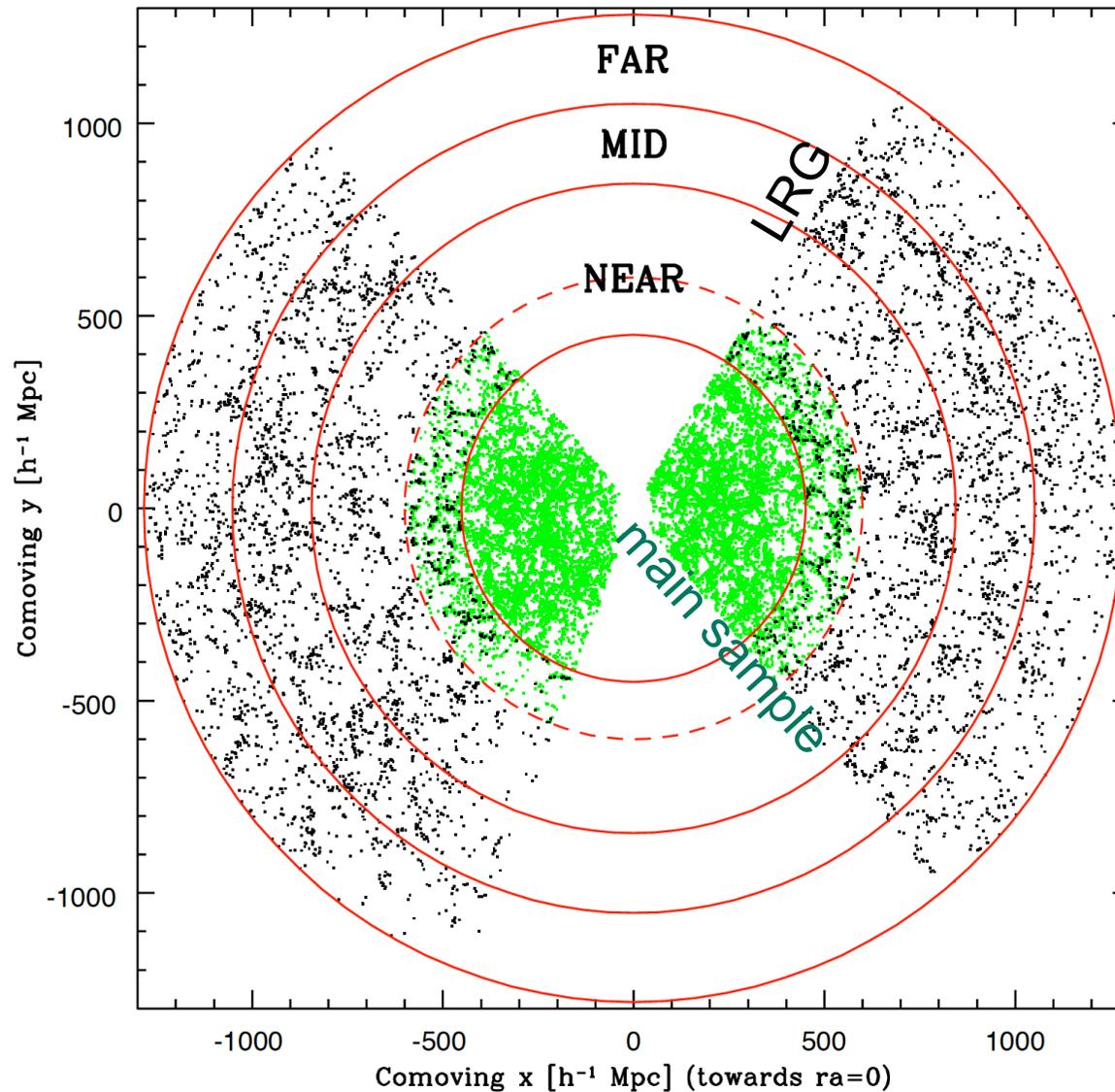
- BAO ($\sim 150\text{Mpc}$)でさえ、暗黒物質クラスタリングにおける重力の非線形成長は無視できない
- N体シミュレーション、摂動理論モデルによる正確な理論モデル (e.g. Taruya+ 09, 10)
- 銀河バイアスの不定性が除去できれば、銀河クラスタリングの強度の情報も使える

PFS BAOサーベイ

	BOSS	BigBOSS	SuMIRe PFS
Telescope	2.5m	4m @KPNO	8.2 Subaru Tel.
Pre-imaging survey	SDSS	<i>PTF (1.2m) ???</i>	HSC+
Redshift	$0.2 < z < 0.6$	$0.2 < z < 2 + z \sim 3$	$0.6 < z < 1.6 (+z < 2.5)$
Sky coverage	10000 deg²	14000-24000deg²	~2000 deg²
Field-of-view	7 deg ²	7 deg ²	1.8 deg ²
Fiber density (per deg ²)	143	714	1333
Number of fibers	1000	5000	2400
Wavelength range	360-1000nm	340-1130nm	600-1100nm (380-1300nm)
Spectral resolution	1600-2600	2300-6000	~3000
Target galaxies	LRGs	LRGs+[OII] emitters	LRGs + [OII] emitters

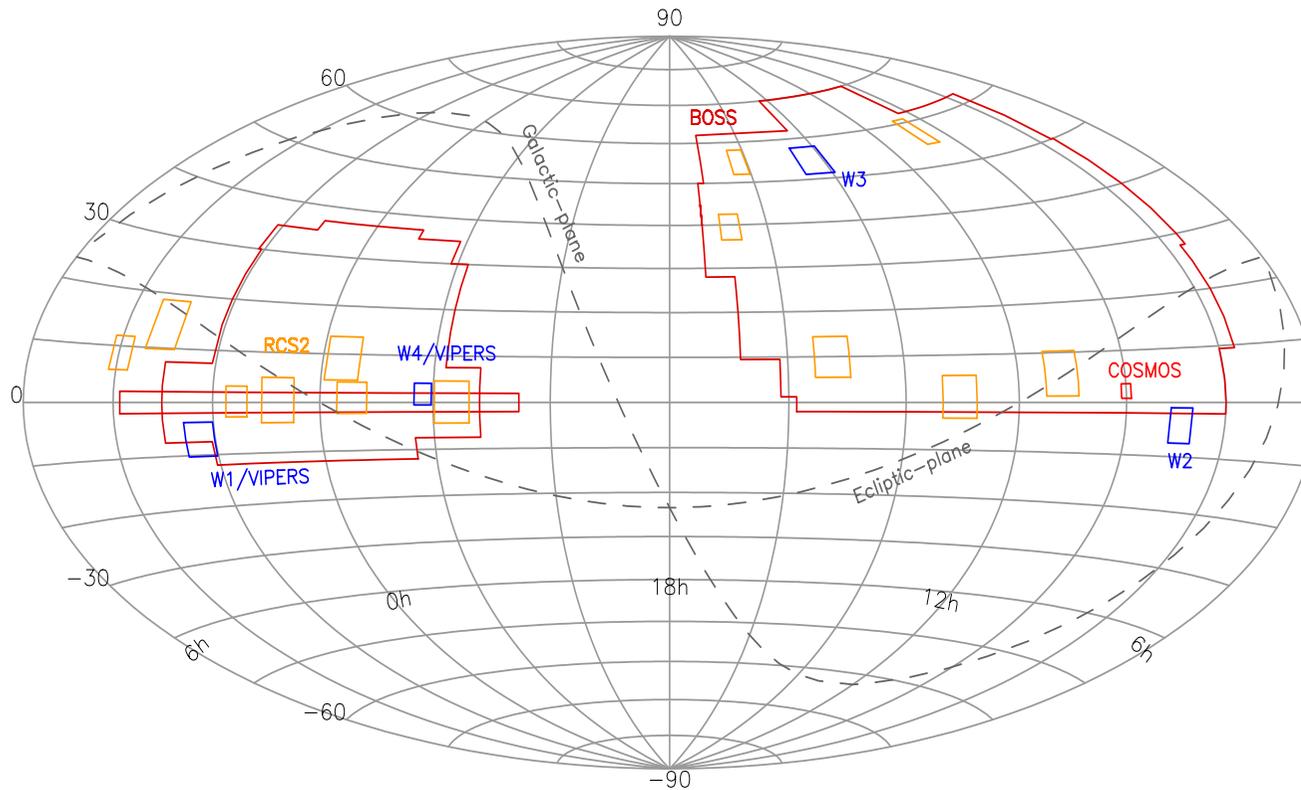
- **BigBOSS (4m) = 広く + 浅いサーベイ**
- **PFS (8m) = 深く + (比較的) 狭いサーベイ (HSC)**

撮像サーベイの重要性



- 赤方偏移サーベイのターゲット銀河を同定するために撮像サーベイが必要
- 例: SDSS-III BOSS は、SDSS-I, IIの撮像サーベイで同定されたLuminous Red Galaxies (LRGs)の赤方偏移フォローアップサーベイ

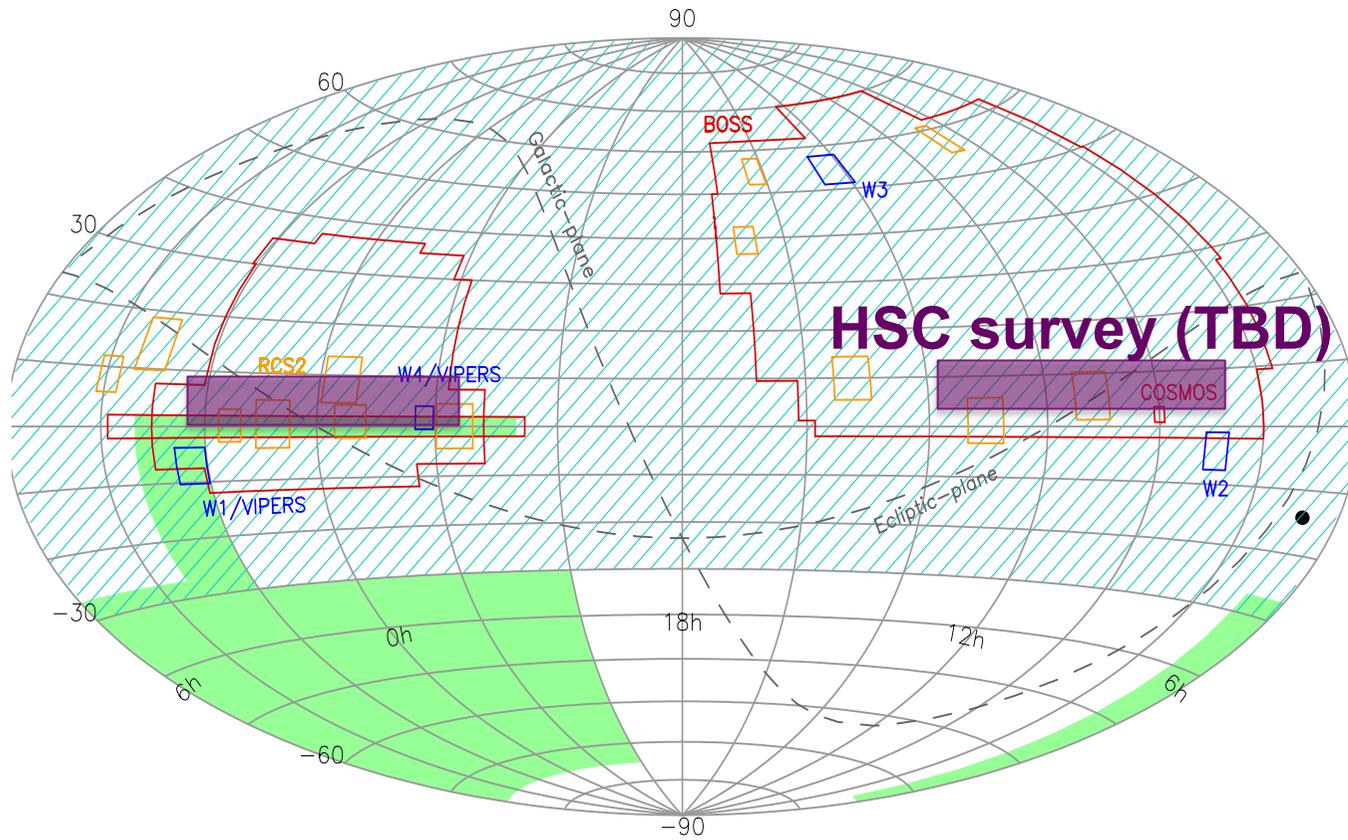
撮像サーベイの現状



Courtesy by A. Nishizawa

- 宇宙論には、連続したサーベイ領域が望ましい
- SDSS ($i \sim 21$) が最大だが、赤方偏移サーベイはすでに実行中 (BOSS)
- より深いサーベイは CFHTサーベイ (4m; $i \sim 24$); 各領域はせいぜい数十平方度
 - VVDS, VIPERS (VLT VIRMOS)

5年後 (~2015)...



- Dark Energy Survey (CTIO 4m, Chile; $i \sim 25$)
- ▨ Pan-Starrs (PS1) (1.8m, Hawaii; $i \sim 23$)

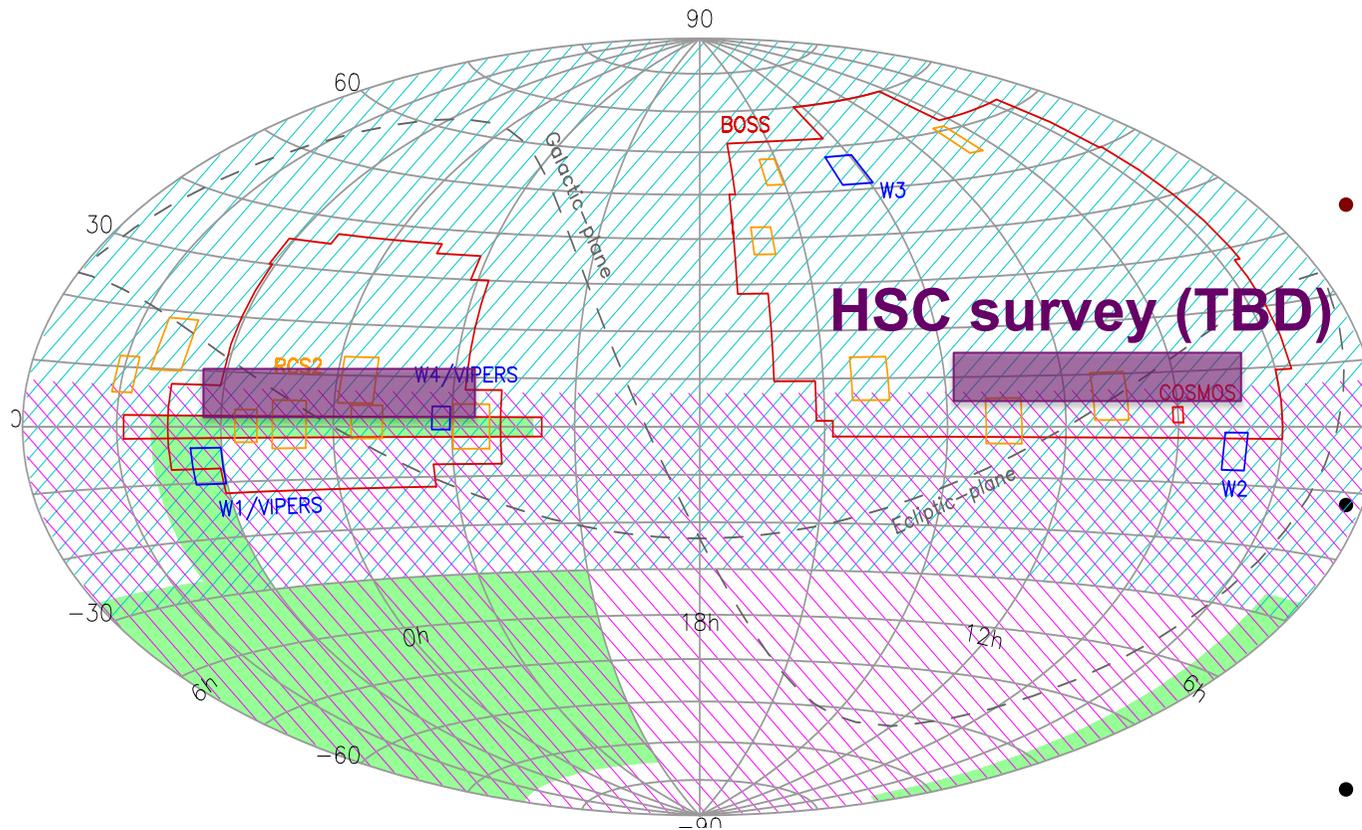
- 様々な大規模撮像サーベイ (WL: DE)
 - Pan-Starrs (1.8m, 3π survey over 3 years; $i \sim 23-24$)
 - DES (4m; 5000 sq. degrees; $i \sim 25$), almost no overlap with SDSS
- Hyper SuprimeCam Survey (2012-)
 - ~ 1500 sq. degrees
 - grizy ($i \sim 26$)
 - Overlap with SDSS, ACT, UKIDSS, ...
 - Need 10 nights to cover 500 deg^2 with igz ($i \sim 25$)

2020年代

- 究極の撮像サーベイLSST(チリ)が始まる(10年間)
 - 6m (effective), $i \sim 27$, 10 years (2018-?)

- 全天にわたり可視光撮像データ($i < 24$)が得られる

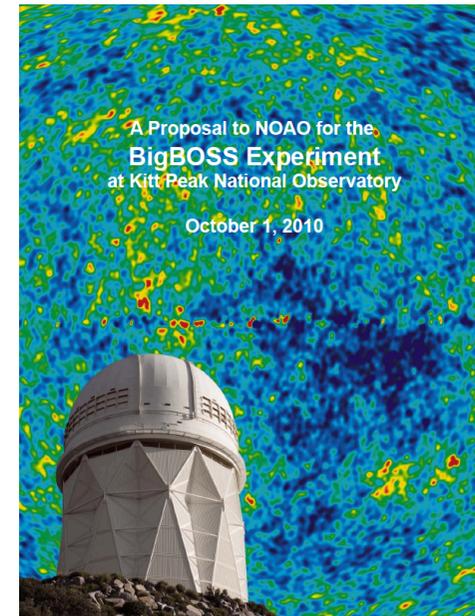
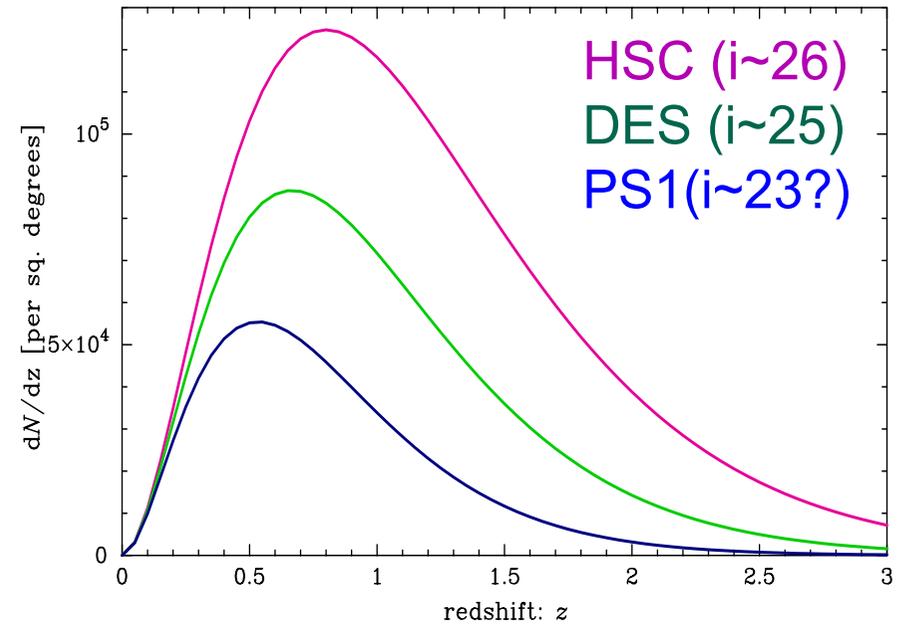
- さらに近赤撮像サーベイも含む衛星計画Euclid, WFIRSTも実行中かもしれない
- しかし、撮像銀河をフォローアップできる多天体分光装置計画はない



- Dark Energy Survey (CTIO 4m, Chile; $i \sim 25$)
- ▨ Pan-Starrs (PS1) (1.8m, Hawaii; $i \sim 23$)
- ▨ LSST (8.4m [6m in effective], Chile; $i \sim 27$ over 10 years)

撮像サーベイ

- BAOサーベイのターゲット銀河の選定に必要
 - 撮像サーベイの深さは、目標とする赤方偏移の銀河をカバーする深さ
- PFS BAOサーベイ
 - HSCサーベイ
 - 同じ観測領域を測定する：宇宙論の改善および様々な系統誤差の除去
- BigBOSSサーベイ (2015-?)
 - The Palomar Transient Factory (PTF; 1.2m) survey: 12,000 deg², R~23.5
 - PS1 (gi): i~23
 - PS1(gi)+PTF(R) を用いる予定
 - $z > 1$ の銀河を探すのは非常に難しい
 - 実質的にBigBOSS は $0.6 < z < 1$ BAO (10000 deg²)サーベイ



BigBOSS proposal to NOAO
(Oct 1st, 2010)

BAOに必要な銀河の個数密度(ファイバー本数)

- 暗黒物質の分布(クラスタリング)を銀河分布から推定
- 銀河パワースペクトル(2点相関関数)の測定精度は、サーベイ領域の体積および銀河の個数密度で決まる

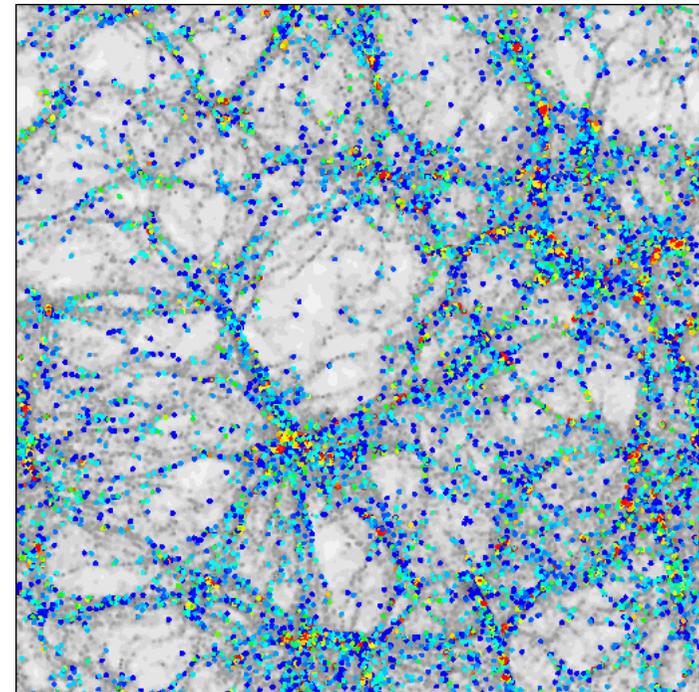
$$\left[\frac{\sigma(P_g)}{P_g(k)} \right]^2 = \frac{2}{N_k} \left[1 + \frac{1}{\bar{n}_g P_g(k)} \right]^2$$

$$N_k \equiv \frac{4\pi k^2 \Delta k}{(2\pi/L)^3} = \frac{k^2 \Delta k}{2\pi^2} V_{\text{survey}}$$

V_{survey} : survey volume

$P_g(k) \approx b^2 P_m(k)$ in the linear regime

\bar{n}_g : mean number density of galaxies



- より統計精度の高い測定には、(1)より広いサーベイ領域、(2)より高い銀河密度、(3)よりバイアスの高い銀河、が必要
- 妥当なサーベイ戦略: 銀河の個数密度が $\bar{n}_g P_g \sim \text{a few}$ を満たすようにサーベイデザインを決定

PFS BAOに必要な銀河の個数密度

Redshift	Volume ($h^{-3} \text{ Gpc}^3$)	# of galaxies (per field)	Number density ($h^3 \text{ Mpc}^{-3}$)	bias	nP @ $k=0.1h\text{Mpc}^{-1}$
$0.6 < z < 0.8$	0.8	212	3×10^{-4}	1.5	1.4
$0.8 < z < 1.0$	1.1	292	3×10^{-4}	1.5	1.2
$1.0 < z < 1.2$	1.4	495	4×10^{-4}	1.5	1.3
$1.2 < z < 1.4$	1.6	565	4×10^{-4}	1.5	1.2
$1.4 < z < 1.6$	1.7	600	4×10^{-4}	1.5	1.0

Total # of target galaxies per 1.8 sq. degrees=2164

- ターゲット銀河: $0.6 < z < 1.6 \sim 1.7$ におけるLRGs + 輝線([OII]) 銀河 $0.6 < z < 1.6 \sim 1.7$
- PFSの高感度は、各フィールドを単一露出時間で上述の赤方偏移領域の銀河をサーベイすることが可能(後述参考)

BigBOSSでは？

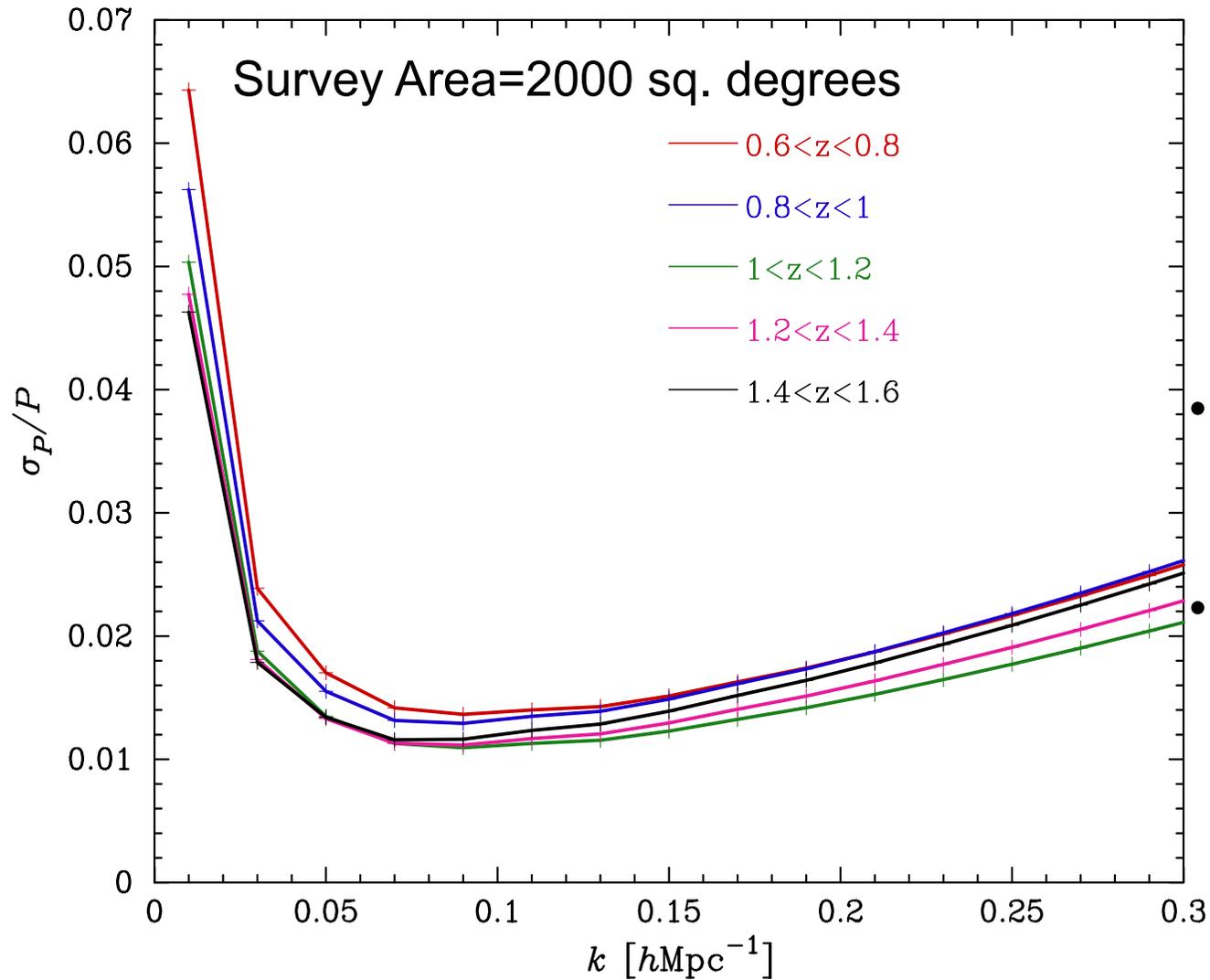
Table 2.3: Expected galaxy density distributions and resulting signal power to shot-noise power ratio at $k = 0.2 h \text{ Mpc}^{-1}$.

z	From BigBOSS proposal				
	dn/dz_{LRG} (sq. deg.) ⁻¹	dn/dz_{ELG} (sq. deg.) ⁻¹	dn/dV_{LRG} ($10^{-4}h^3\text{Mpc}^{-3}$)	dn/dV_{ELG} ($10^{-4}h^3\text{Mpc}^{-3}$)	$nP_{0.2}$
0.15	47	247	2.78	14.63	2.56
0.25	117	148	2.78	3.50	1.44
0.35	209	69	2.78	0.93	1.18
0.45	314	120	2.78	1.07	1.20
0.55	426	429	2.78	2.80	1.38
0.65	443	888	2.28	4.58	1.36
0.75	533	1359	2.28	5.82	1.49
0.85	541	1712	2.00	6.32	1.43
0.95	435	1654	1.42	5.41	1.11
1.05	289	1284	0.86	3.80	0.73
1.15	104	941	0.29	2.57	0.37
1.25	0	680	0.00	1.74	0.18
1.35	0	582	0.00	1.41	0.14
1.45	0	630	0.00	1.45	0.15
1.55	0	592	0.00	1.31	0.13
1.65	0	424	0.00	0.91	0.09

A fewer density of galaxies
than required for BAO at $z > 1$

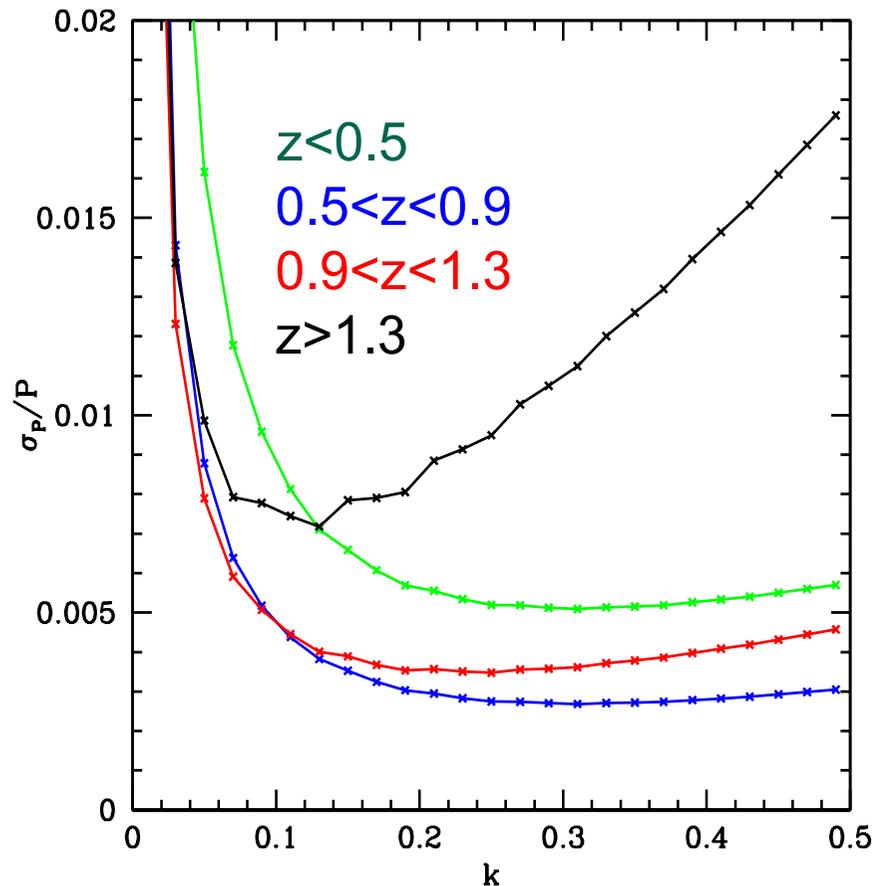
PFSサーベイで期待される $P(k)$ の測定精度

Fractional error in measuring $P(k)$ at each z , k -bins



- 全ての赤方偏移スライスが同程度に重要
- PFSサーベイにより、 $P(k)$ の振幅を数パーセントの精度で測定が可能

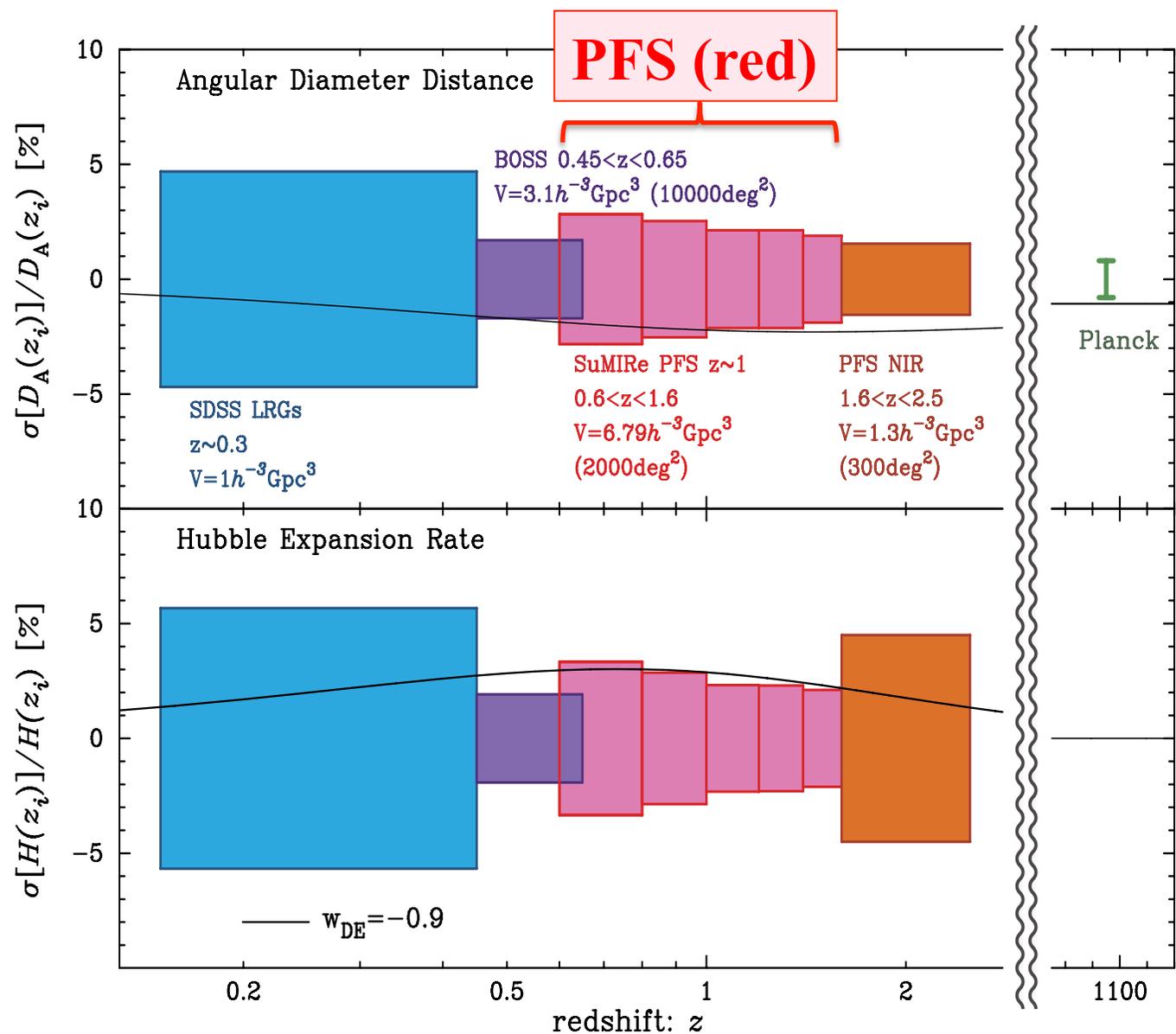
Again, in BigBOSS case



- 赤方偏移 $z > 1$ の銀河の $P(k)$ の測定精度は悪い
- また、BigBOSS (4m) は $z > 1$ の銀河スペクトルを高 S/N で測定するのは困難

Figure 2.2: Expected fractional uncertainties in the power spectrum for bins of $\Delta k = 0.02h^{-1}$ Mpc (indicated by points). The curves represent different redshift bins $z < 0.5$ - green, $0.5 < z < 0.9$ - blue, $0.9 < z < 1.3$ - red, $z > 1.3$ - black. The gravitational growth function is best constrained on scales $k > 0.05h^{-1}$ Mpc (smaller than 200 Mpc).

予想されるPFS BAO実験の精度



BAO幾何学テスト

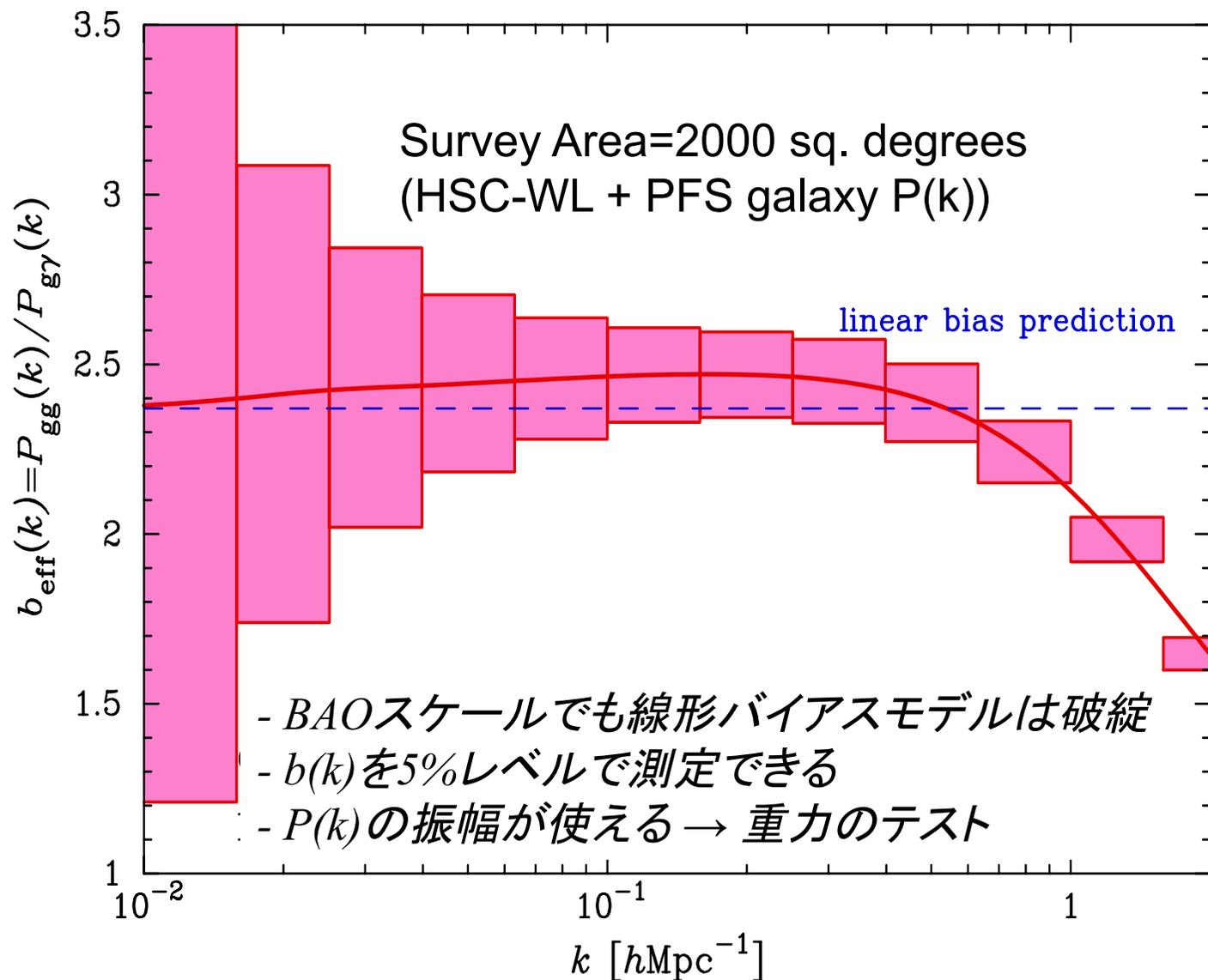
各赤方偏移スライスで、 $D_A(z)$, $H(z)$ を数パーセントの精度で測定可能

SDSS, BOSS(とPlanck)と組み合わせることで、 $0 < z < 1.7$ (or $z < 2.5$)までの膨張則の測定を可能にする

HSCとPFSのシナジー：銀河バイアスの直接測定

$$P_{gg}(k) \propto \langle \text{galaxy - galaxy} \rangle \propto b^2 P_m(k) \quad (\text{linear regime})$$

$$P_{\gamma g}(k) \propto \langle \text{shear - galaxy} \rangle \propto b P_m(k)$$



background gals
(from HSC)

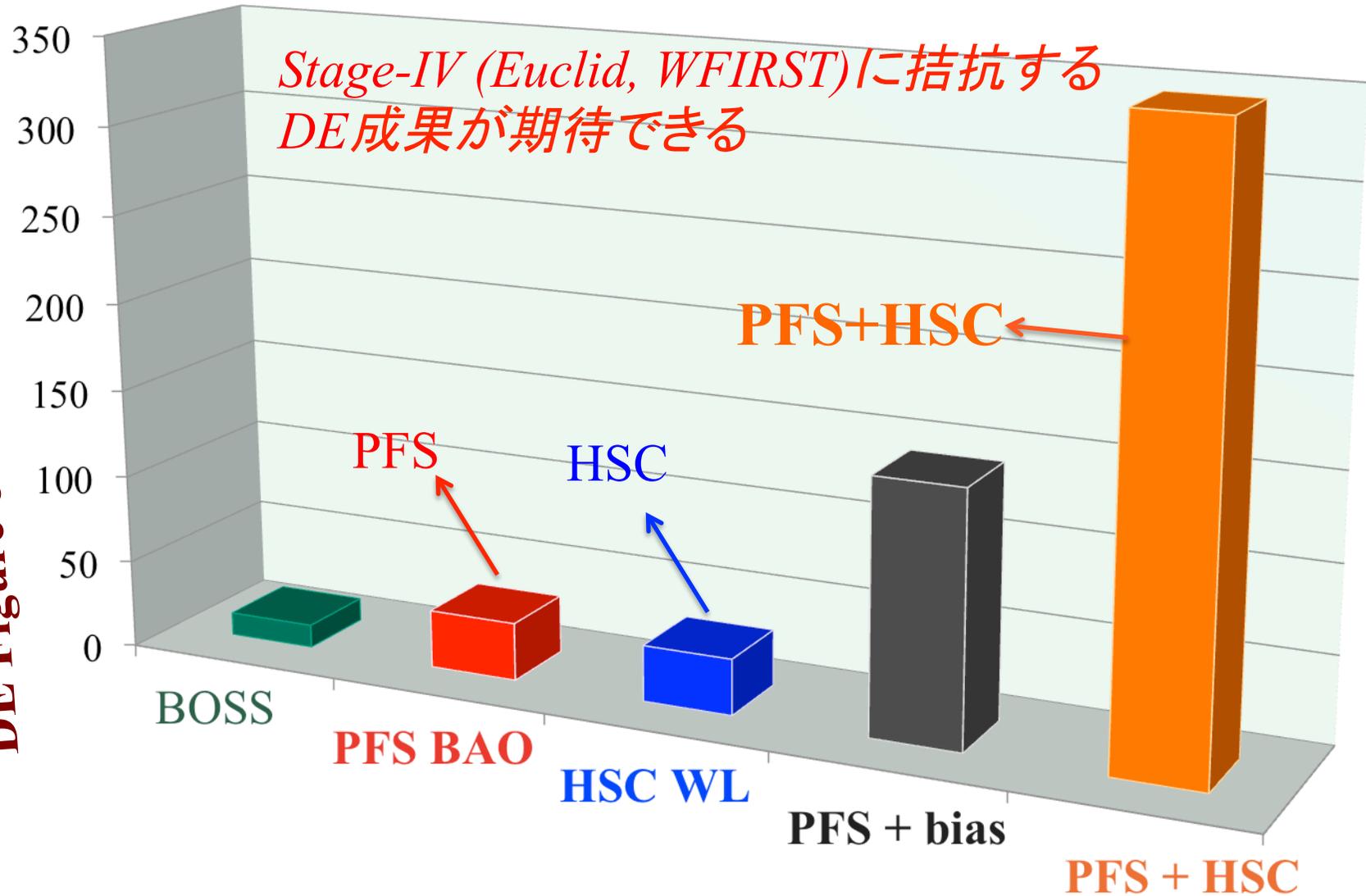
halo

gals with redshifts
(from PFS)



予想されるSuMIRe HSC/PFSによる ダークエネルギー精度

DE Figure of Merit = $[\sigma(w_{\text{pivot}})\sigma(w_a)]^{-1}$



SuMIRe: HSC+PFS(続き)

	BOSS	PFS (+BOSS)	SuMIRe (HSC+PFS+BOSS)
Redshift	0.2<z<0.65	0.6<z<1.6	0<z<1.6
Sky coverage	10000 deg ²	2000 deg ²	2000 deg ²
$\sigma(w_{\text{constant}})$	0.083	0.046	0.017
DETF FoM	13	33	345
Growth: $\sigma(\gamma)$	-	-	~ 0.03
$\sigma(\Sigma m_{\nu})$ [eV]	-	-	$\sim 0.06\text{eV}$
$\sigma(f_{\text{NL}})$	-	-	~ 10

$$G(a) \propto \exp \left(\int^a d \ln a' [\Omega_m^\gamma(a') - 1] \right) \quad (\text{GR: } \gamma \approx 0.55)$$

- PFS (BAO) + HSC (WL, clusters) により、宇宙の膨張則、構造形成史の制限
- 宇宙加速膨張の起源の検証 (BAOだけではできない)
 - ダークエネルギーシナリオ: $w \neq -1?$ and $\gamma = 0.55$
 - 修正重力シナリオ: 一般に $w \neq -1?$ and $\gamma \neq 0.55?$
- PFS + HSC: γ を数%の精度で制限することができる

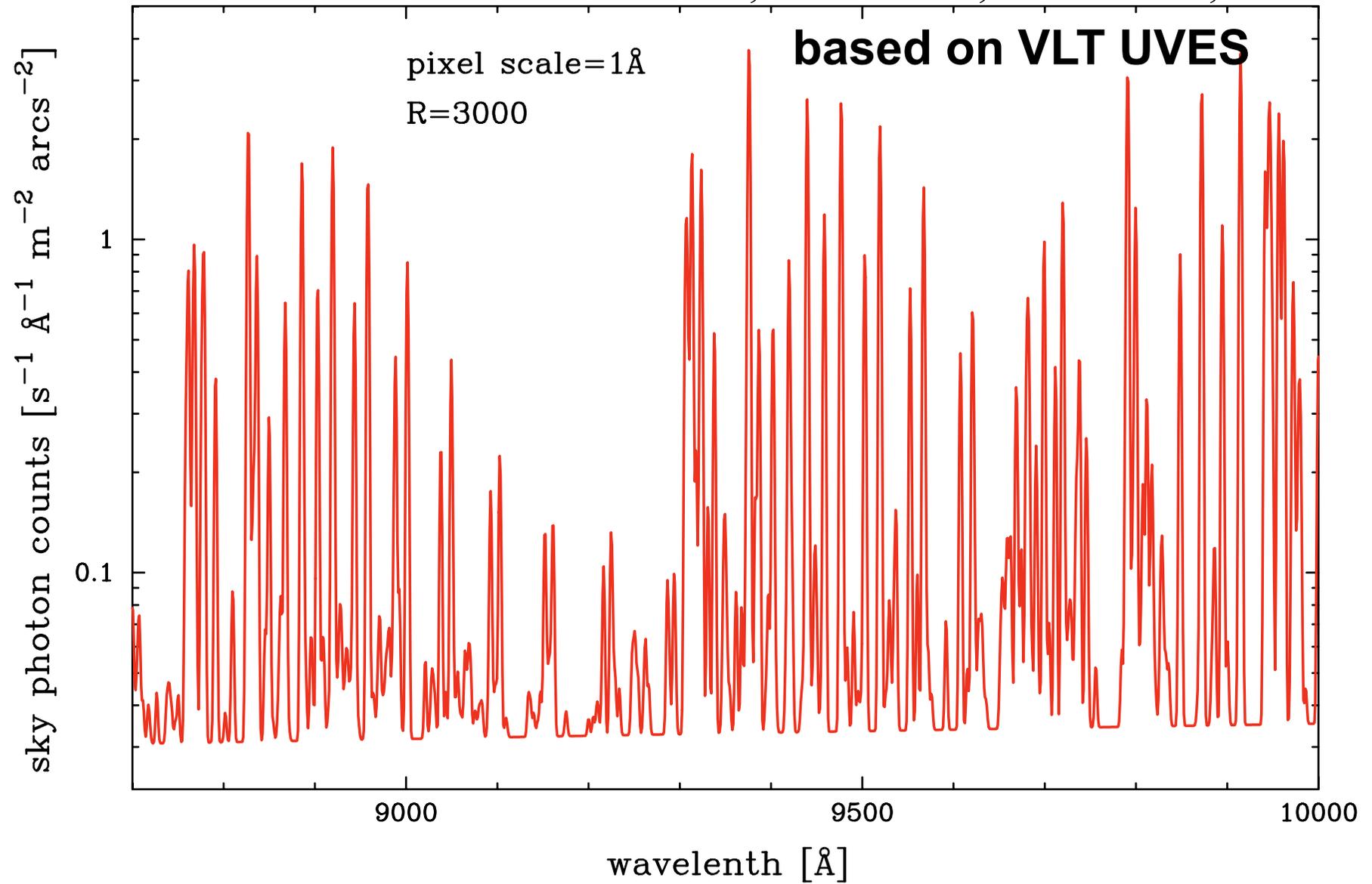
PFSサーベイの実現可能性

*Q: PFS BAOサーベイに必要なすばる
最小夜数は何夜か？*

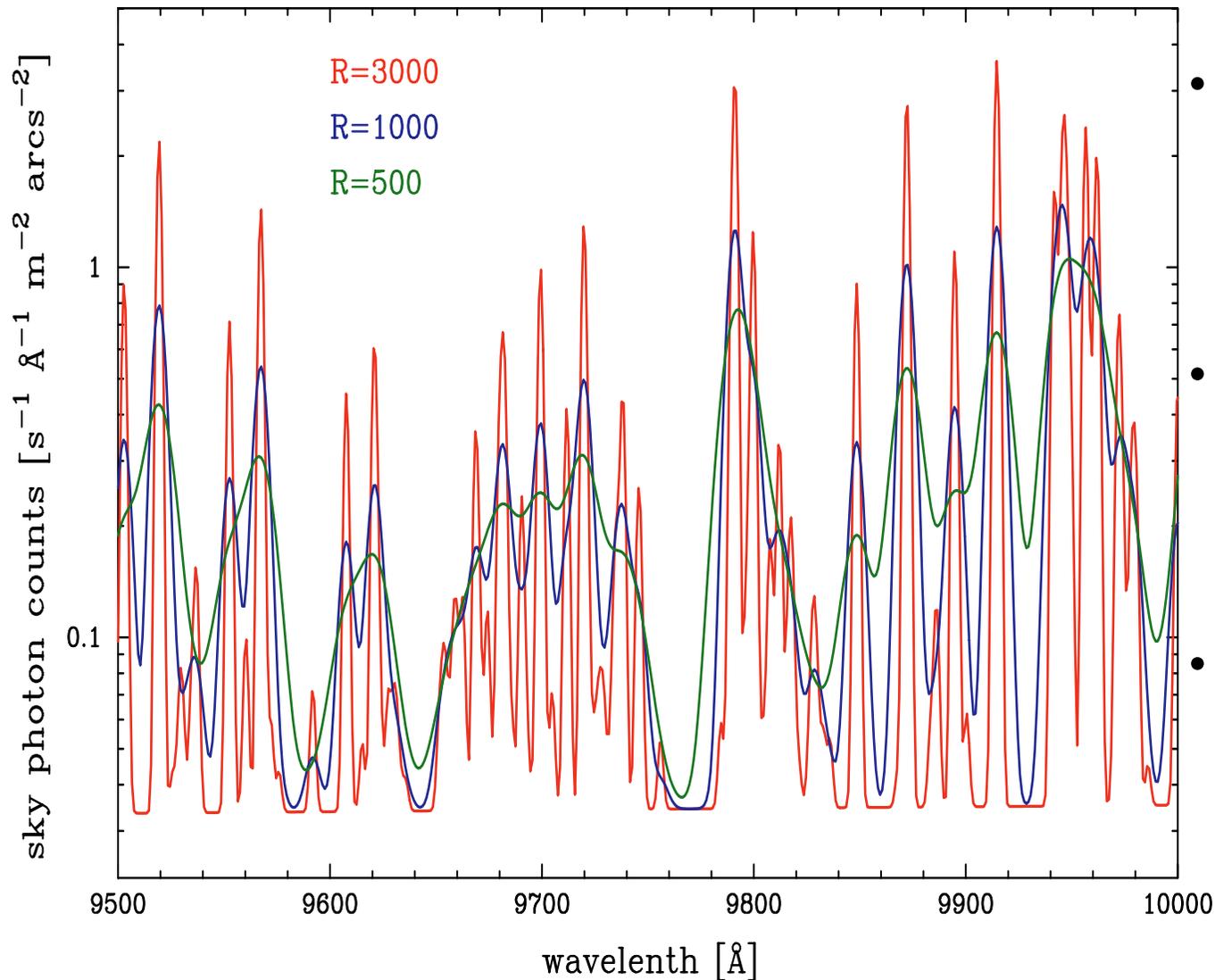
- ここではPFS赤側分光器を仮定
 - 赤方偏移範囲($600 < \lambda < 1000 \text{nm}$): $0.6 < z < 1.7$ ([OII] 3727Å)
- 赤側波長帯の主要ノイズは夜光
- より正確な夜光モデル(by J. Gunn, M. Strauss, I. Iwata, M. Takada)を用いることが重要
- Princeton (J. Gunn) + Marseille (E. Prieto)の分光器デザインのパラメータを用いる

夜光スペクトルのモデル

J. Gunn, M. Takada, M. Strauss, I. Iwata



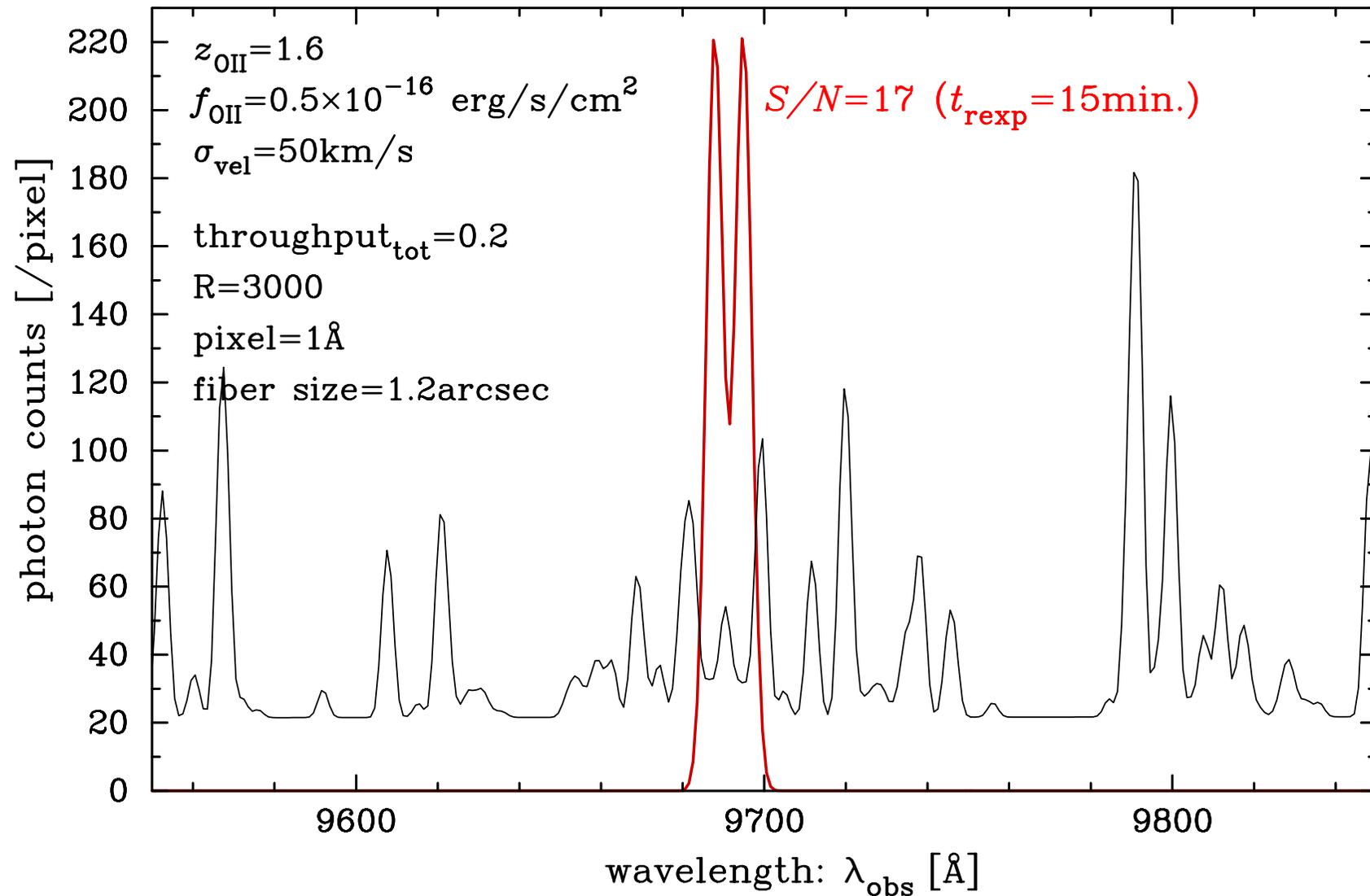
夜光スペクトル（続き）



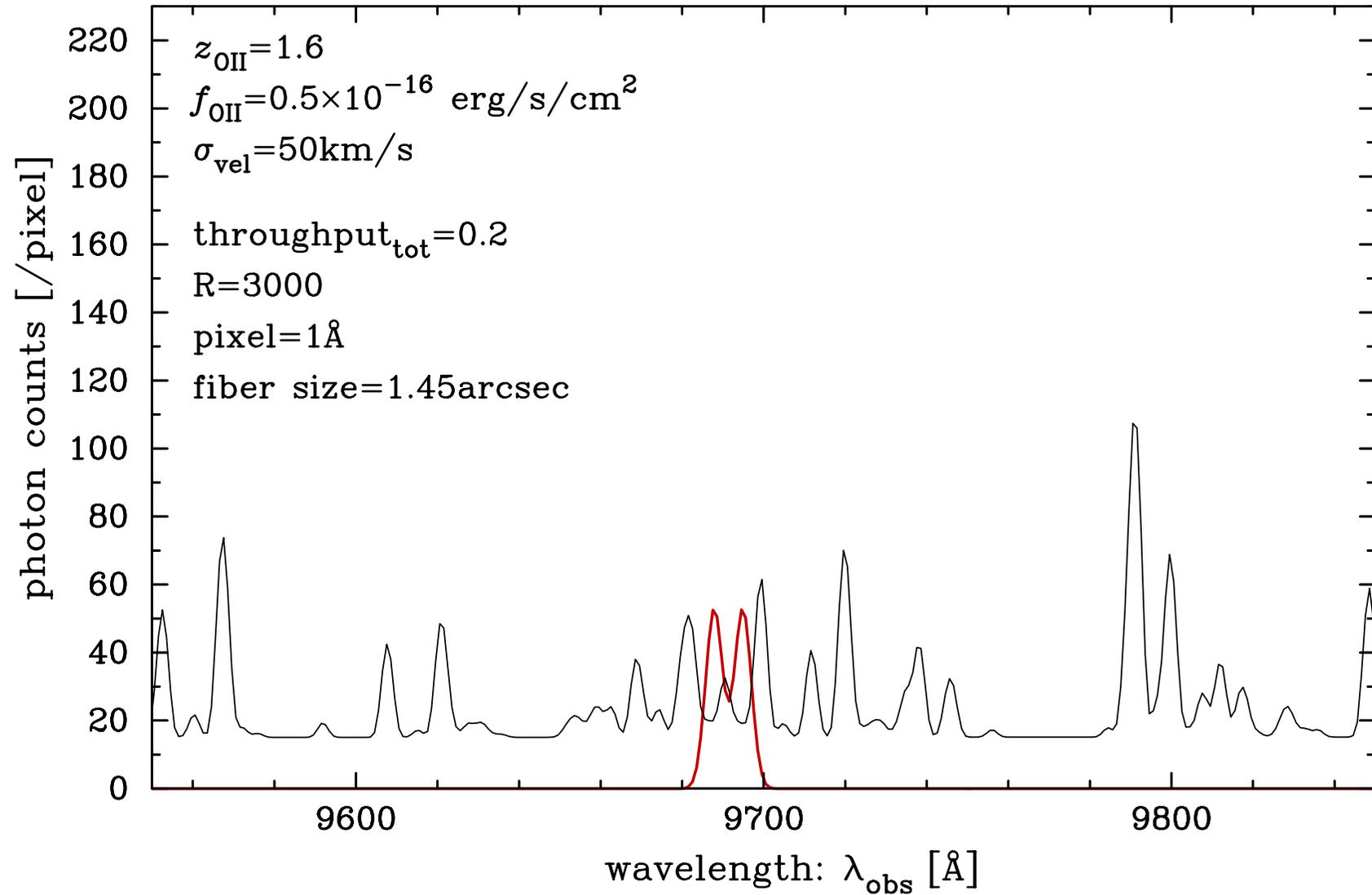
- 高スペクトル分解能であれば、より夜光が低い波長領域が増える
- 特に、 $z > 1$ の銀河の分光にはある程度高いスペクトル分解能が望ましい
- 近赤(1-1.3 μm)の正確な夜光スペクトルは天文学にとって有用(TMT)

PFS観測の[OII]輝線のシミュレーション

15分露出を仮定

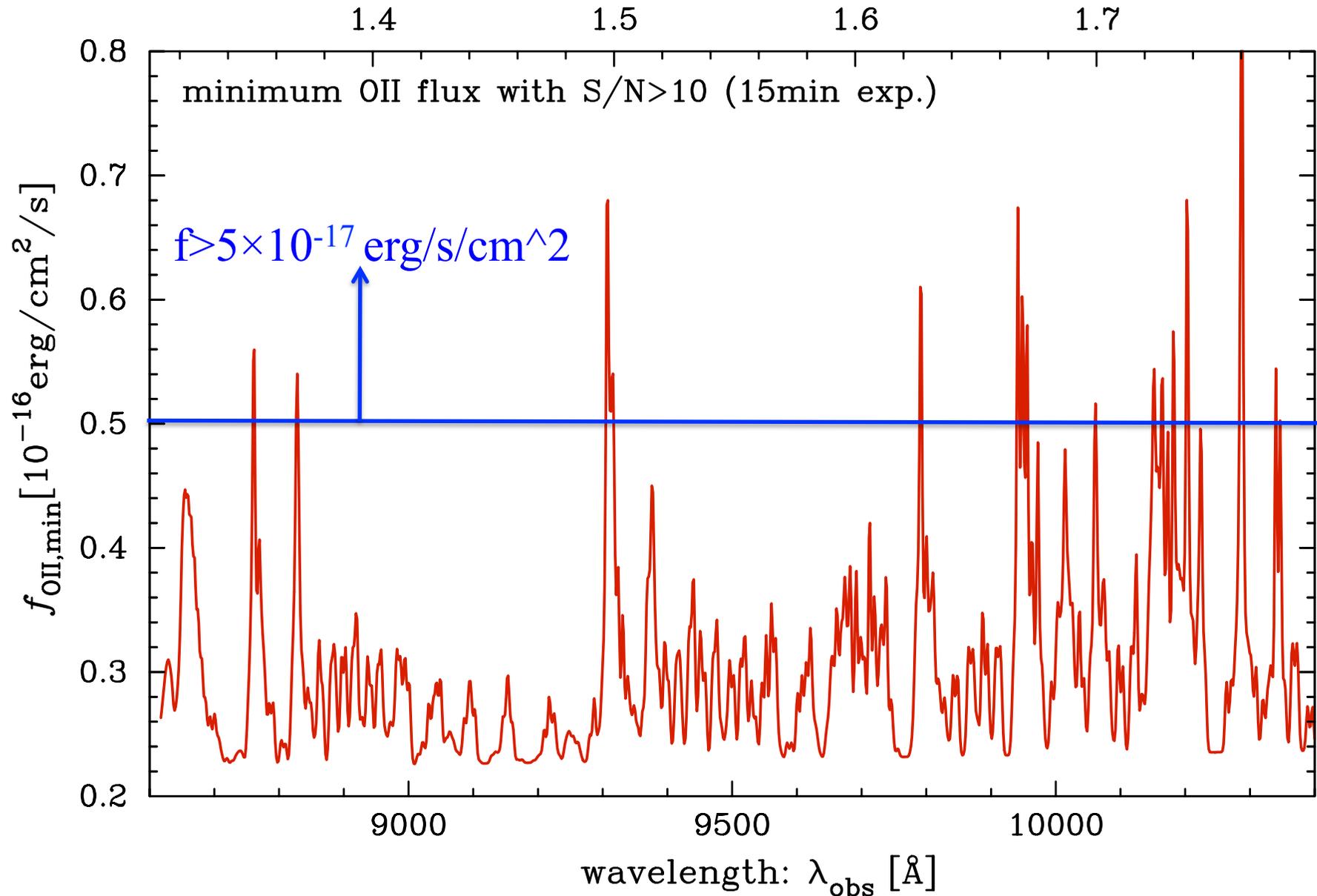


4m級望遠鏡の場合、、、

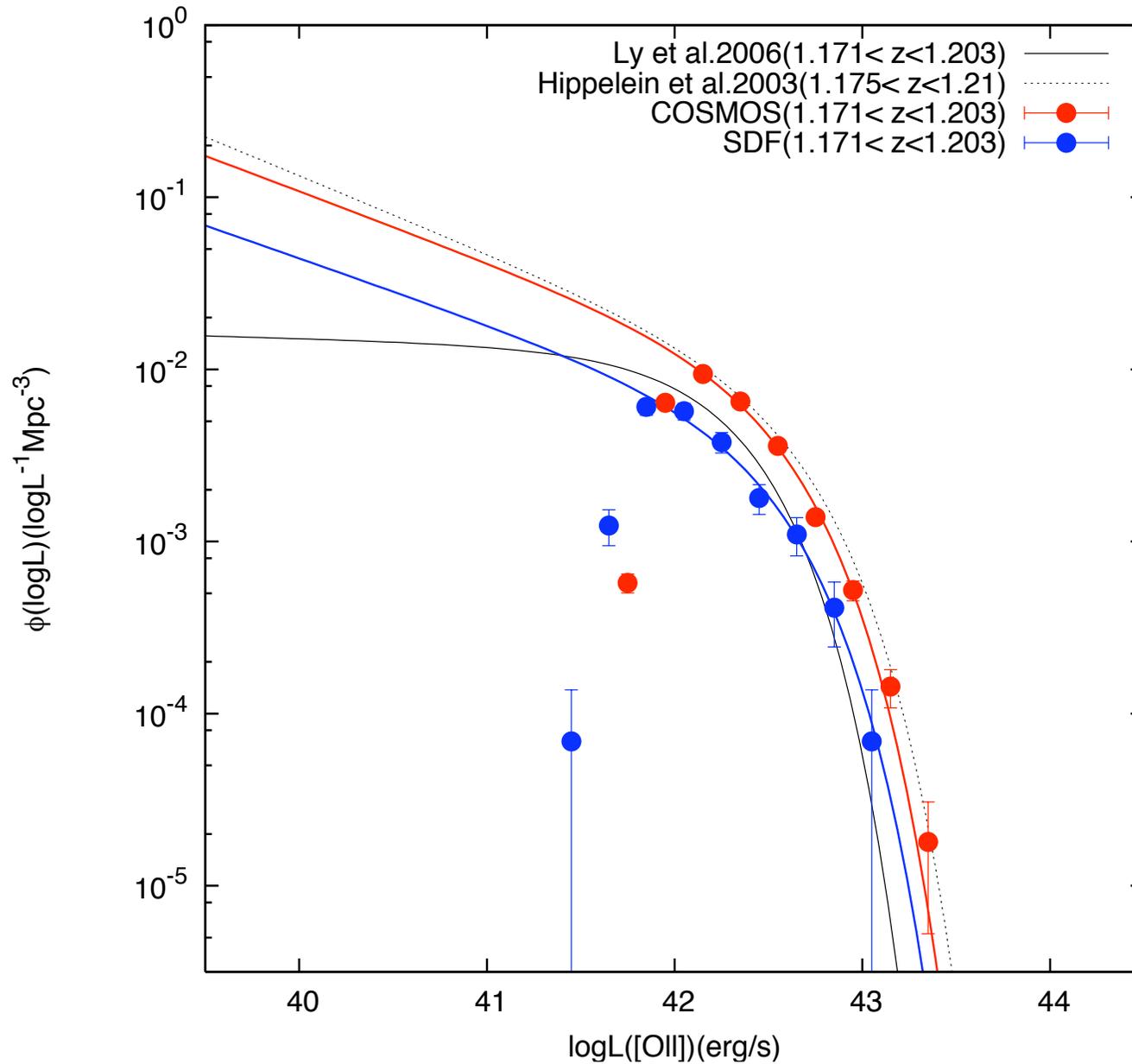


$z > 1$ 銀河の[OII]輝線の検出限界

OII redshift: z_{OII}

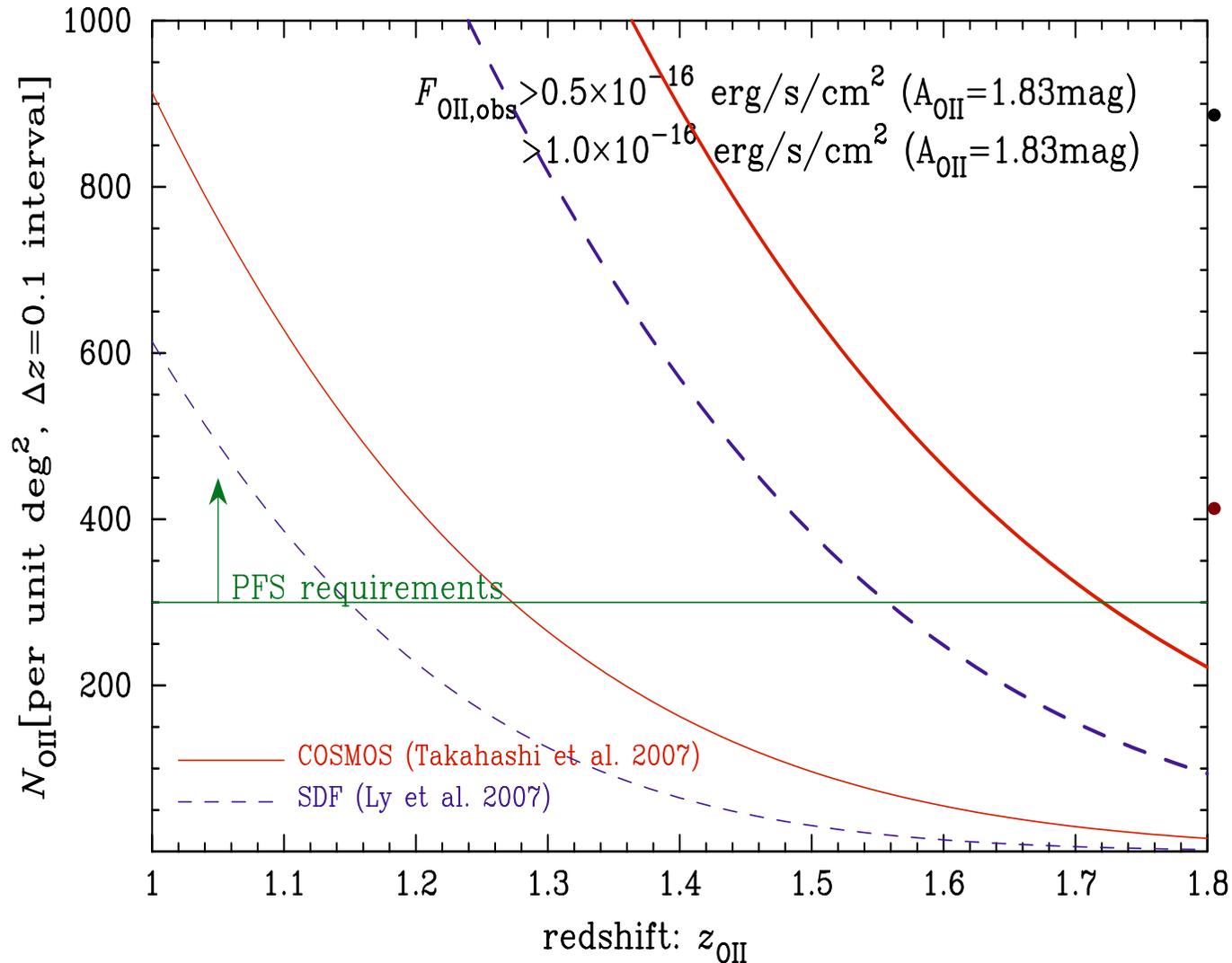


十分な数の輝線銀河(特に $z > 1.2$)はあるか？



- 狭帯域フィルターサーベイによる[OII]輝線銀河の光度関数の研究

十分な数の輝線銀河(特に $z > 1.2$)はあるか？(続き)



- $f_{\text{obs}} > 5 \times 10^{-17} \text{ erg/s/cm}^2$ の銀河をターゲットに選べば、BAOサーベイに必要な数の銀河がありそうだ
- **各フィールド15分の露出でも十分** ($f_{\text{OII}} > 5 \times 10^{-17}$, 15min \rightarrow S/N > 10)

BAOサーベイに必要な最小夜数は？

- *A: 2000平方度をPFSでサーベイするには(天候係数は含まない)*

$$\# = \frac{2000 \text{ deg}^2}{\pi \left(\frac{1.5 \text{ deg}}{2} \right)^2 \times \frac{8[\text{hours/night}] \times 60[\text{min/hour}]}{15 \text{ min/pointing} + 40 \text{ sec}/60 \text{ sec(overhead)}}} \approx 37 \text{ nights}$$

- ただし、各フィールドでターゲット銀河を100%の成功率で選ぶことができるかと仮定した。現実的には、7割程度なので、各フィールドを複数回観測すること必要になりそう(要検討)
- *PFSは $z \sim 1.6$ までのBAOサーベイには極めて強力な装置である*
- *ターゲット銀河を見つけるための撮像データがあれば、PFS BAOサーベイをさらに拡大することが可能: DES, Pan-Starrs, HSC shallow survey (giz, each 5min, $i \sim 25$: 10nights=500 sq. degrees), LSST*

まとめ

- SuMIRe HSC/PFS計画は、2020年代においても極めてユニークな装置・サーベイ計画
- HSC撮像サーベイとPFS銀河赤方偏移サーベイを組み合わせることで、極めて強力な宇宙論サーベイを行うことが可能になる
 - ダークエネルギー、暗黒物質、ニュートリノ質量、重力の検証
 - 銀河バイアスの直接測定
 - \$1B級のダークエネルギー衛星探査計画 (Euclid, WFIRST) に迫る精度を達成
- 計画されているPFS仕様は、BAOサーベイに理想的な装置
 - **最小で約40夜で2000平方度をサーベイすることが可能(100% ターゲット銀河の選定を仮定)**
 - **各フィールド2回測定したとしても、約80夜(80 clear nights)**
- より最適なサーベイデザインについては要検討(例: もう少し深いBAOサーベイで、銀河天文学も可能になるか?)