

光赤外サーベイの将来計画 (宇宙論の観点から)

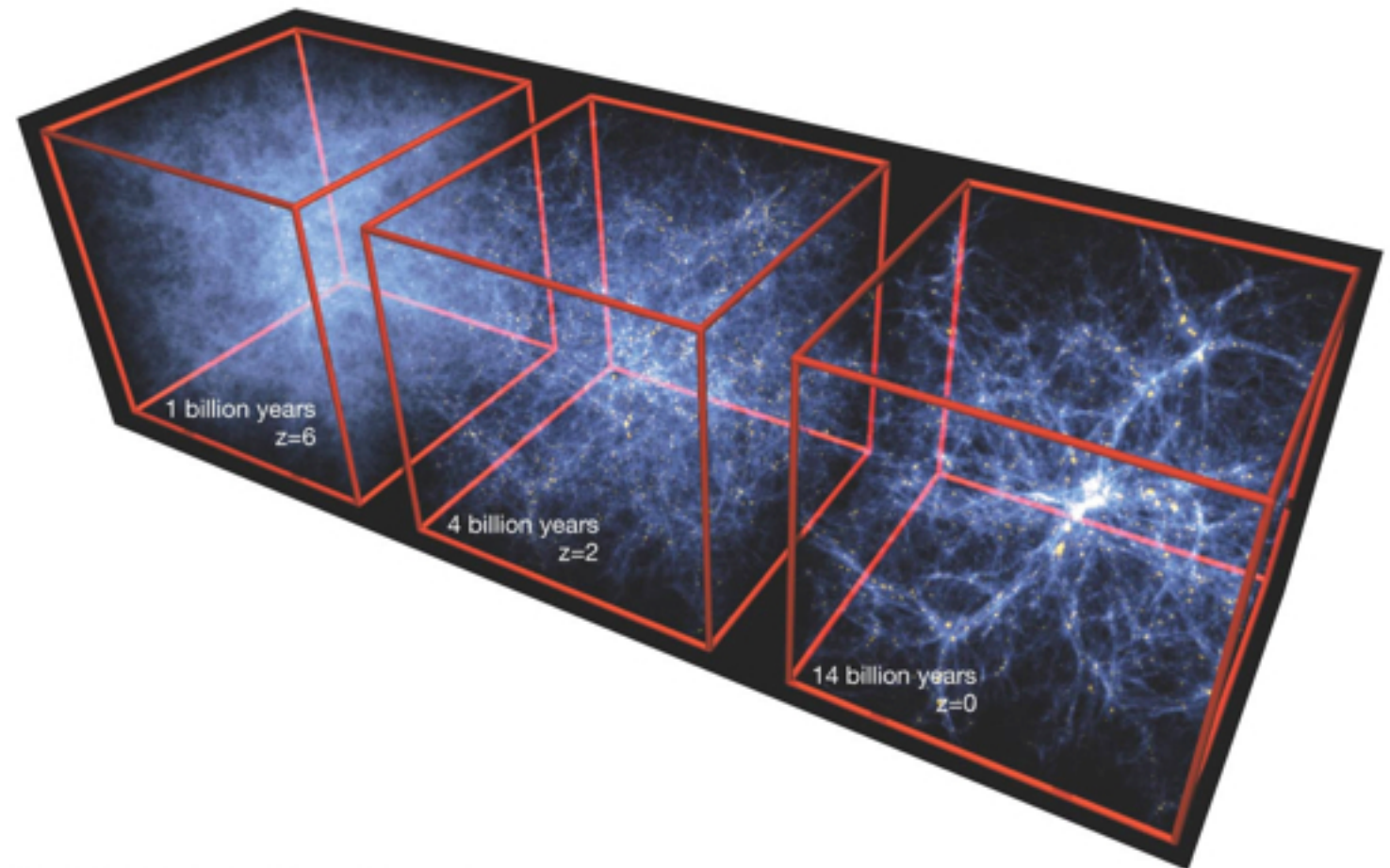
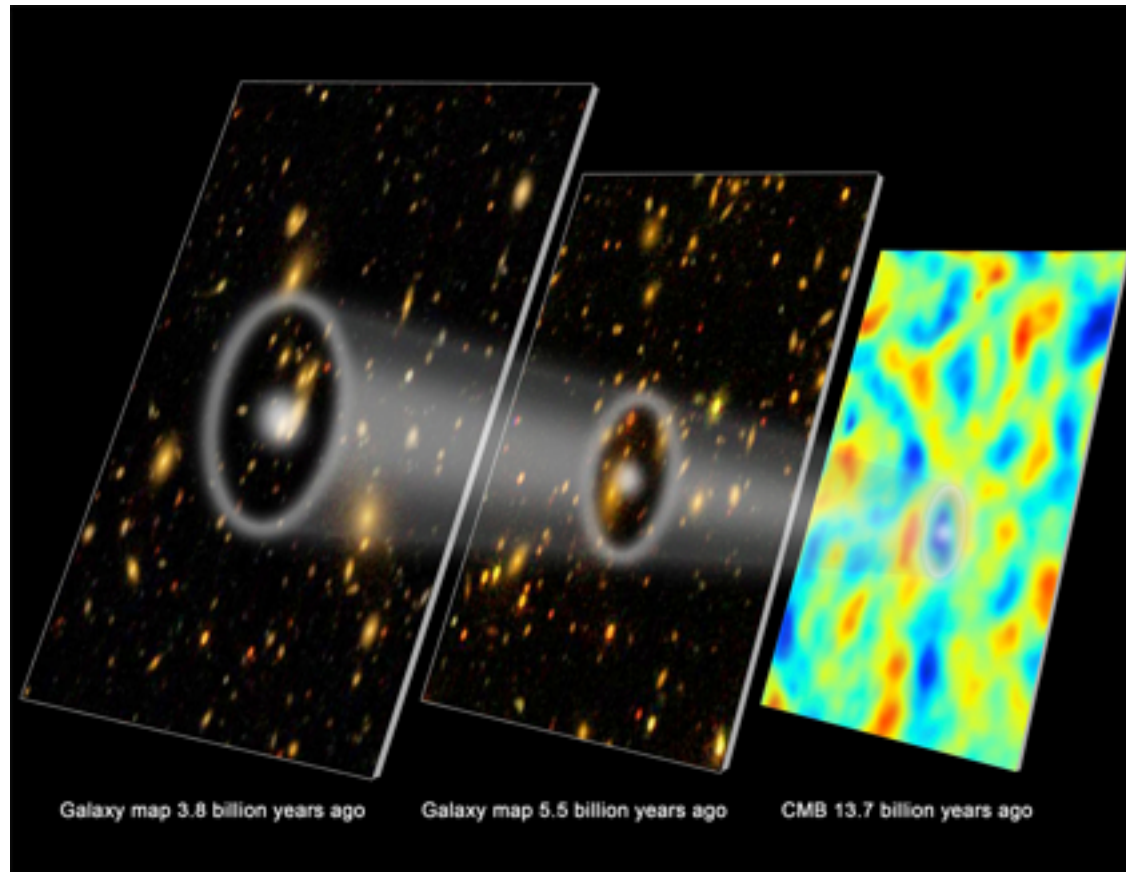
大栗 真宗

東京大物理/Kavli IPMU

宇宙論の重要問題

- 加速膨張の起源
暗黒エネルギー or 修正重力？
- 暗黒物質の性質
無衝突冷たい暗黒物質仮説はどこまで正しいか？
- インフレーション
本当にあった？ Bモードゆらぎ？ 非ガウス性？
- ニュートリノの性質
質量？ 階層？ 世代数？

観測的宇宙論：二つの方向性



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

距離、膨張率

$D(z), H(z)$

密度ゆらぎとその進化

$\delta(z), P(k), \dots$

宇宙論の重要問題

- 加速膨張の起源

暗黒エネルギー or 修正重力？ ← 距離+ゆらぎ

- 暗黒物質の性質

無衝突冷たい暗黒物質仮説はどこまで正しいか？

↑ゆらぎ

- インフレーション

本当にあった？ Bモードゆらぎ？ 非ガウス性？

↑ゆらぎ

- ニュートリノの性質

質量？ 階層？ 世代数？ ←ゆらぎ

宇宙論の重要問題

- 加速膨張の起源

暗黒エネルギー or 修正重力？ ← 距離+ゆらぎ

- 暗黒物
無衝突

密度ゆらぎの観測が

しいいか？

- インフレーション
今後ますます重要！

らぎ

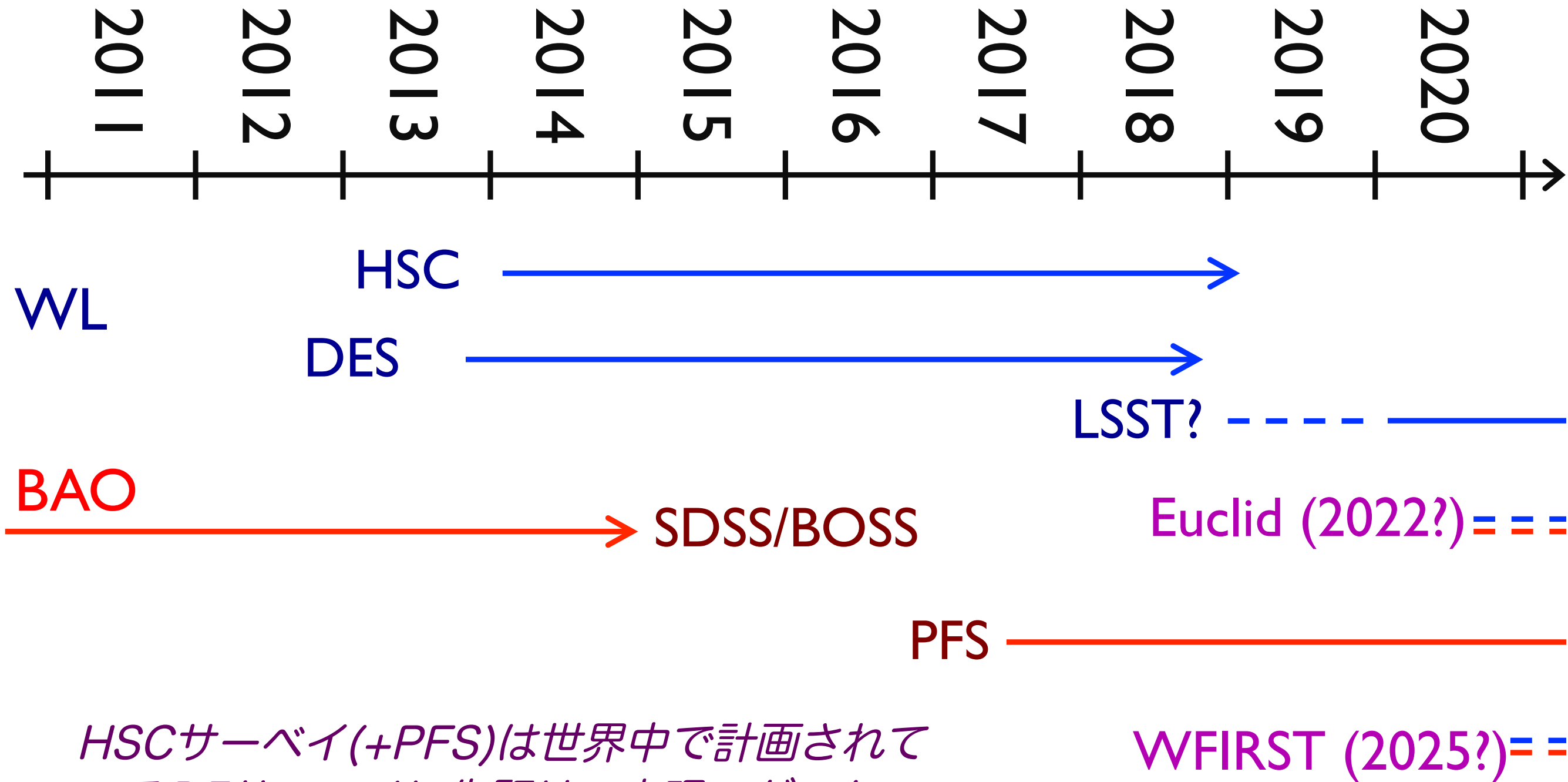
本当にあった？ Bモードゆらぎ？ 非ガウス性？

↑ゆらぎ

- ニュートリノの性質

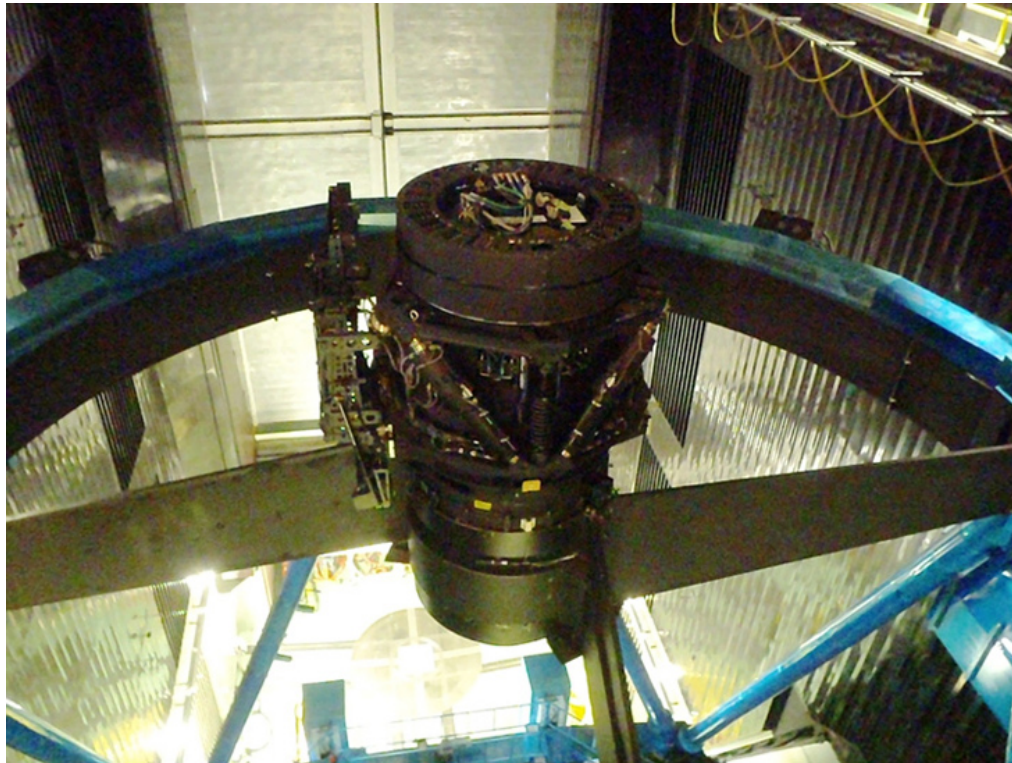
質量？ 階層？ 世代数？ ← ゆらぎ

Timeline of DE experiments

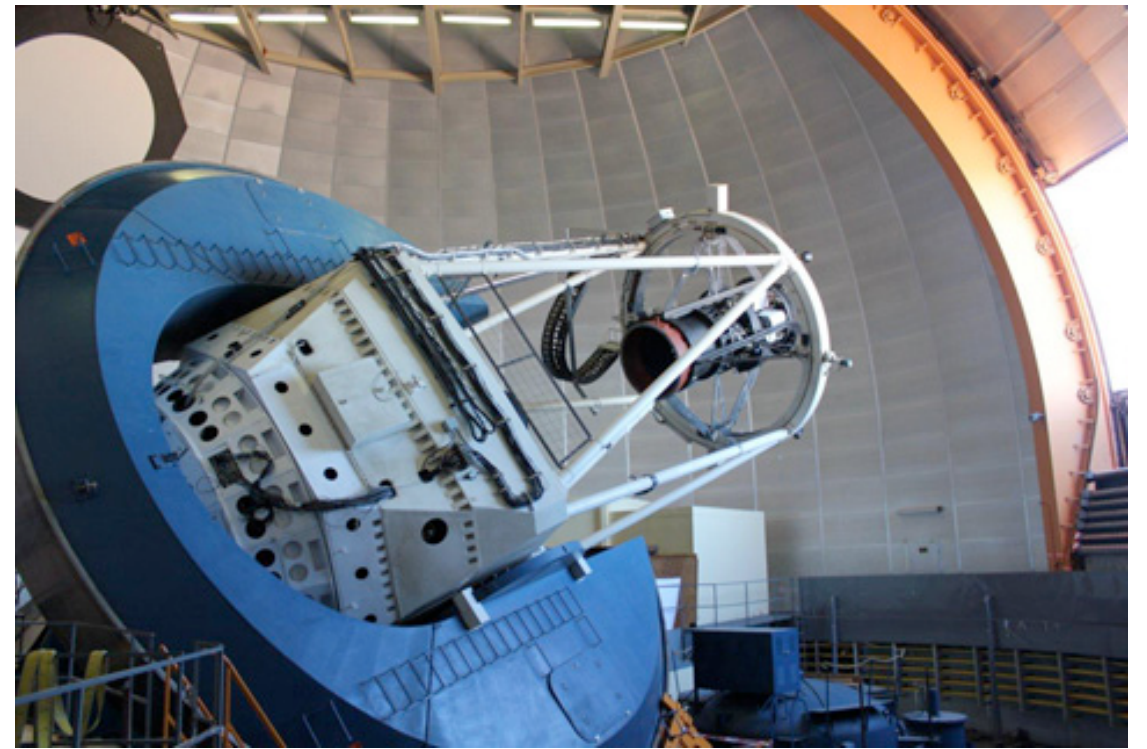


HSCサーベイ(+PFS)は世界中で計画されているDEサーベイに先駆けて実現。ダークエネルギー研究で世界をリードするチャンス

2010年代: HSC vs DES



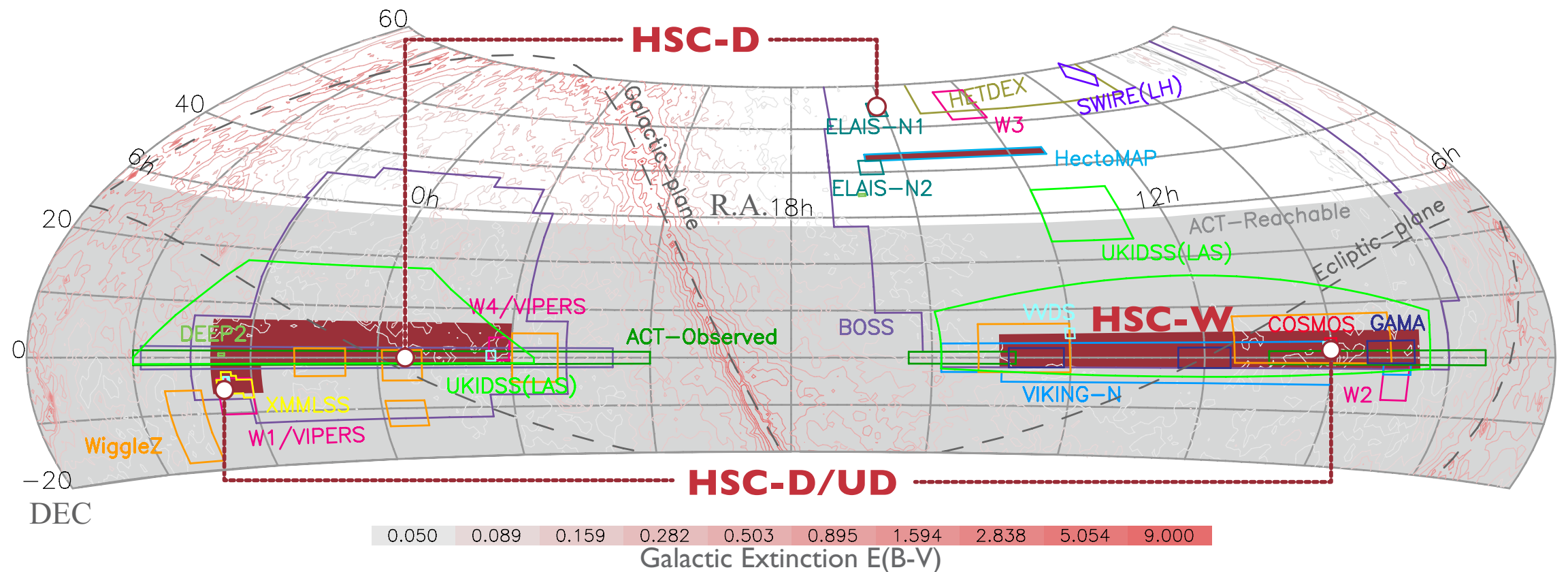
Hyper Suprime-Cam (HSC)
(日本+, Subaru 8.2m)
FOV: 1.7 deg^2 , optical (grizy)
survey: 1400 deg^2 , $\sim 26 \text{ mag}$
2014/3–, 5-6 years



Dark Energy Survey (DES)
(米国+, Blanco 4m)
FOV: 3 deg^2 , optical (ugrizy)
survey: 5000 deg^2 , $\sim 25 \text{ mag}$
2013/9–, 5 years

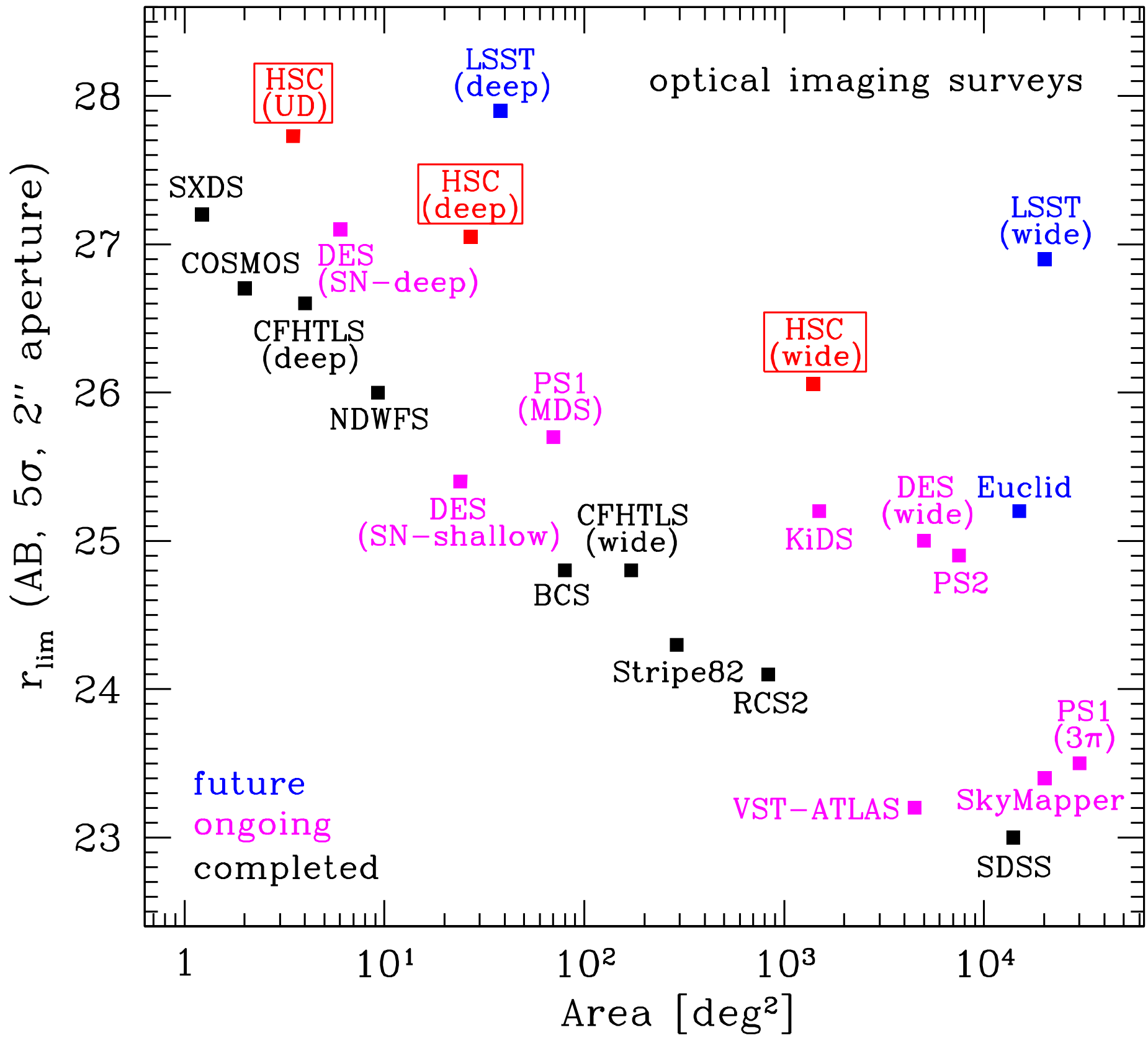
Hyper Suprime-Cam survey

- 5(6?)年間で300夜のすばる望遠鏡時間を投入
- 3つのレイヤー: wide, deep, ultradeep
- 2014年3月よりサーベイ開始!



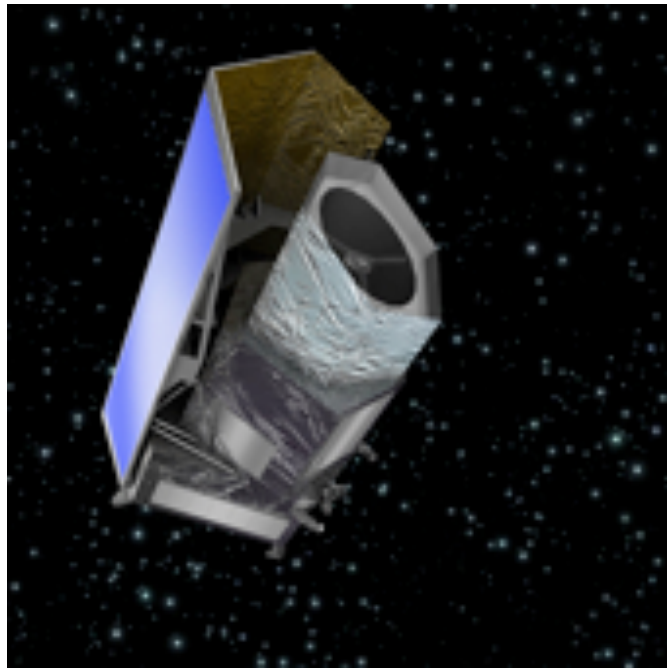
from HSC SSP proposal

from HSC SSP proposal

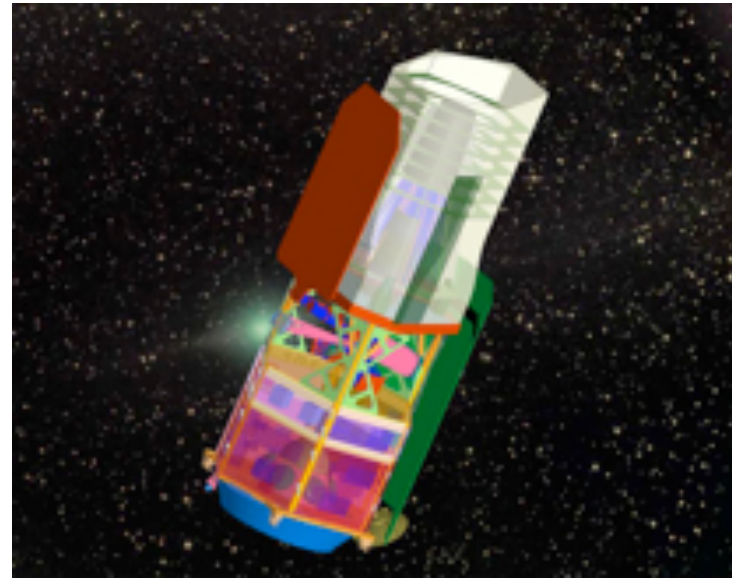


HSCサーベイは
世界最先端かつ
ユニーク

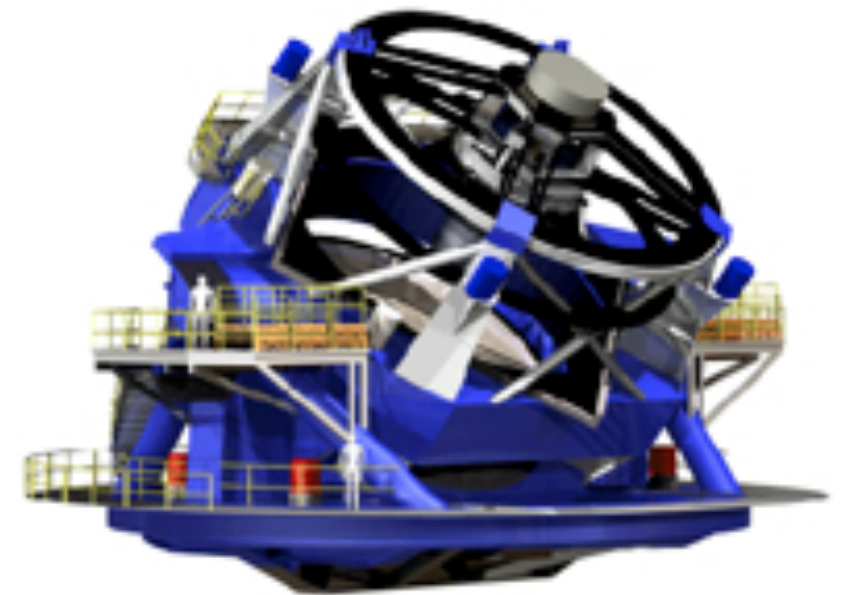
2020年代の宇宙論(ができる)サーベイ



Euclid (欧, 1.2m)
FOV: 0.54deg^2
optical(1)+NIR(3)
slitless NIR spec



WFIRST (米, 2.4m)
FOV: 0.28deg^2
NIR(4)
IFU NIR spec



LSST (米, 8.4m)
FOV: 9.6deg^2
optical(5)
no spec

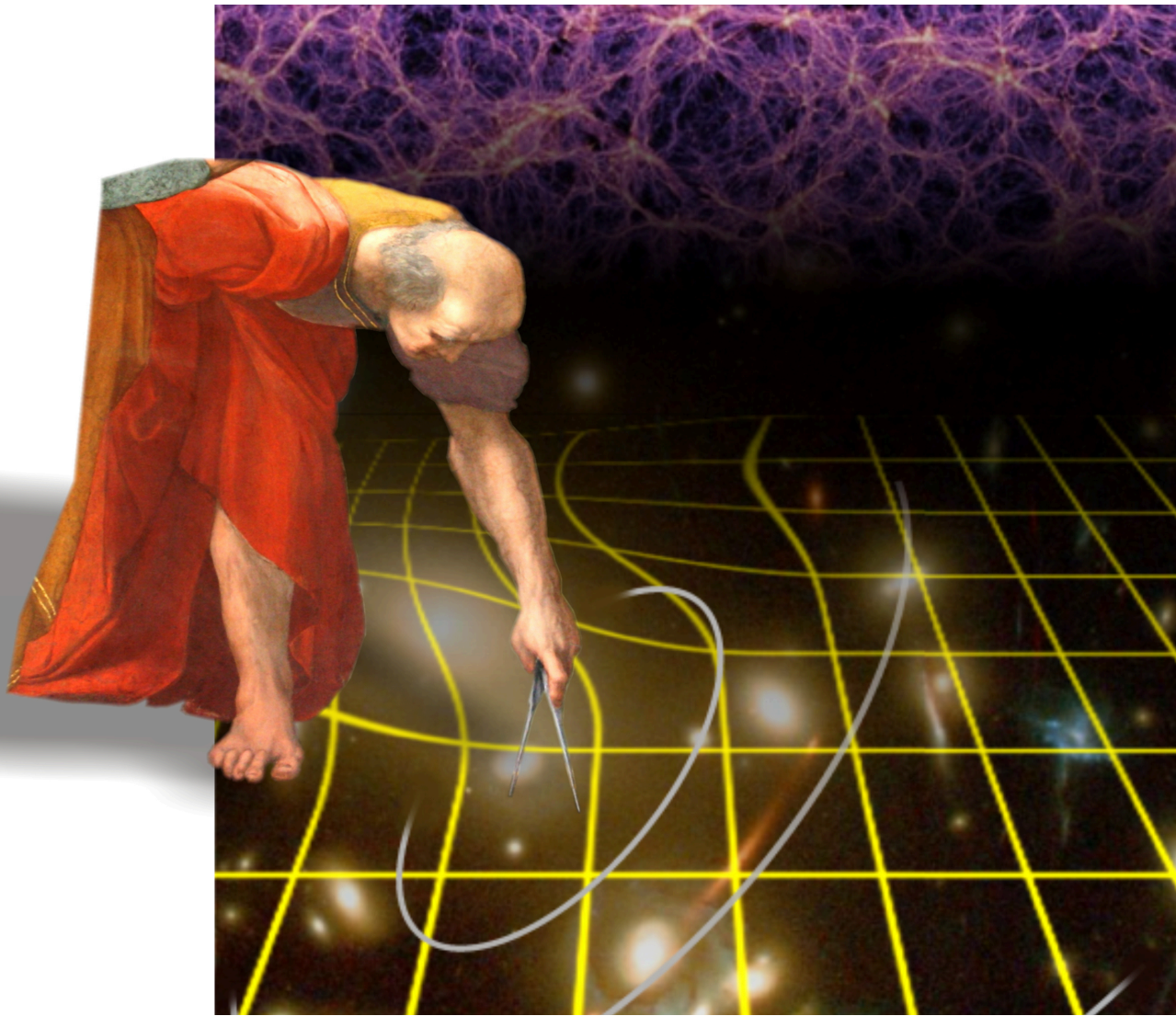
具体的な手法

	Euclid	WFIRST	LSST
弱い重力レンズ	✓	✓	✓
銀河相関関数 (BAO, RSD, ...)	✓	✓	
銀河団	✓	✓	✓
Ia型超新星爆発		✓	✓
強い重力レンズ (time delay)			✓

具体的な手法

	Euclid	WFIRST	LSST
ゆらぎ → 弱い重力レンズ	✓	✓	✓
距離 → 銀河相関関数 (BAO, RSD, ...)	✓	✓	
ゆらぎ → 銀河団	✓	✓	✓
距離 → Ia型超新星爆発		✓	✓
距離 → 強い重力レンズ (time delay)			✓

Euclid mission (ESA)

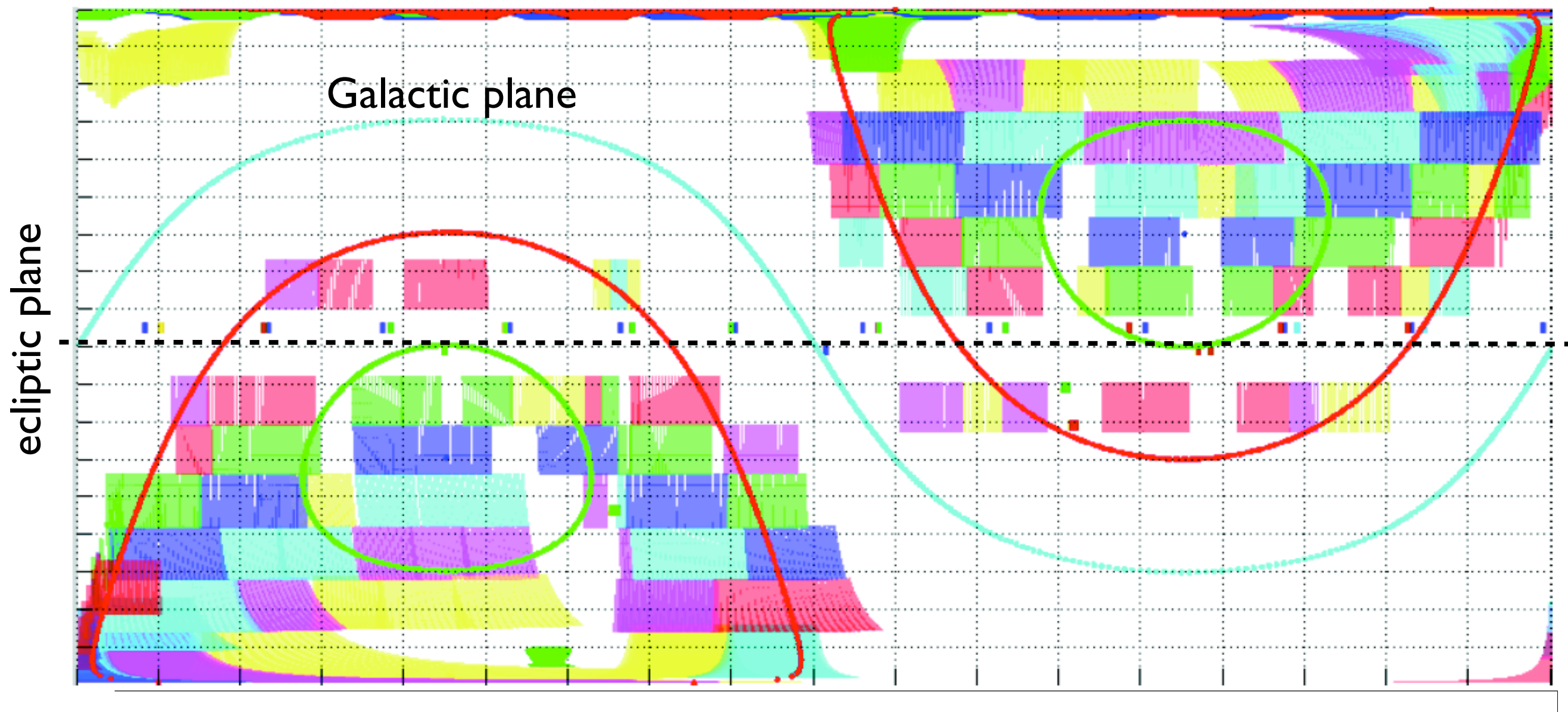


see Euclid “Red Book”

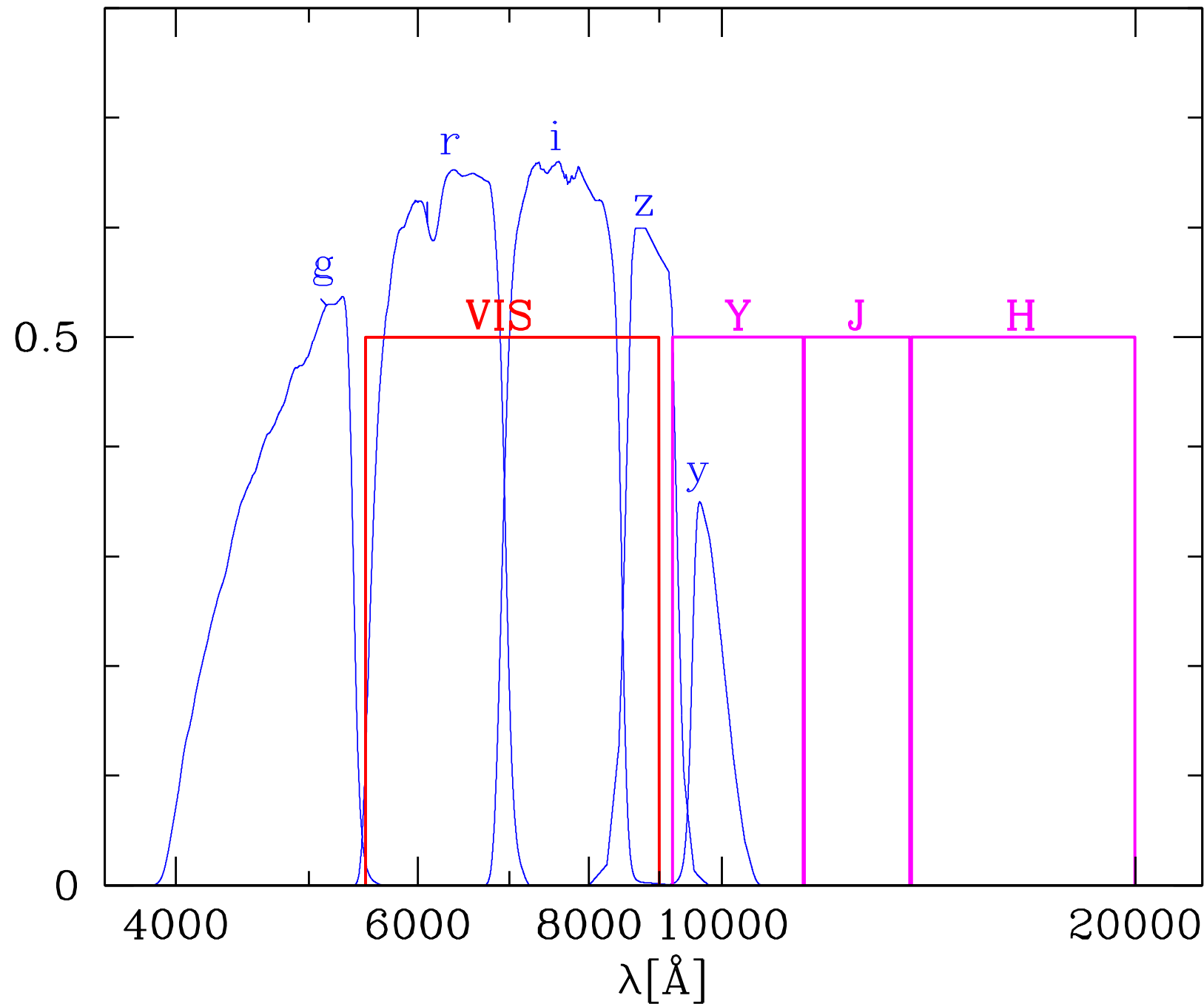
- サーベイ専用宇宙望遠鏡
- 可視1バンド (WL) + 近赤外3バンド撮像
- 近赤外スリットレス分光
- **already funded**

サーベイ領域

- 北天+南天、計15000deg²



Euclid weak lensing survey



可視超広帯域撮像

⇒ 銀河の形状測定

近赤外撮像 (YJH)

+地上可視撮像 (griz)

⇒ photo-z

南天：DES/LSST

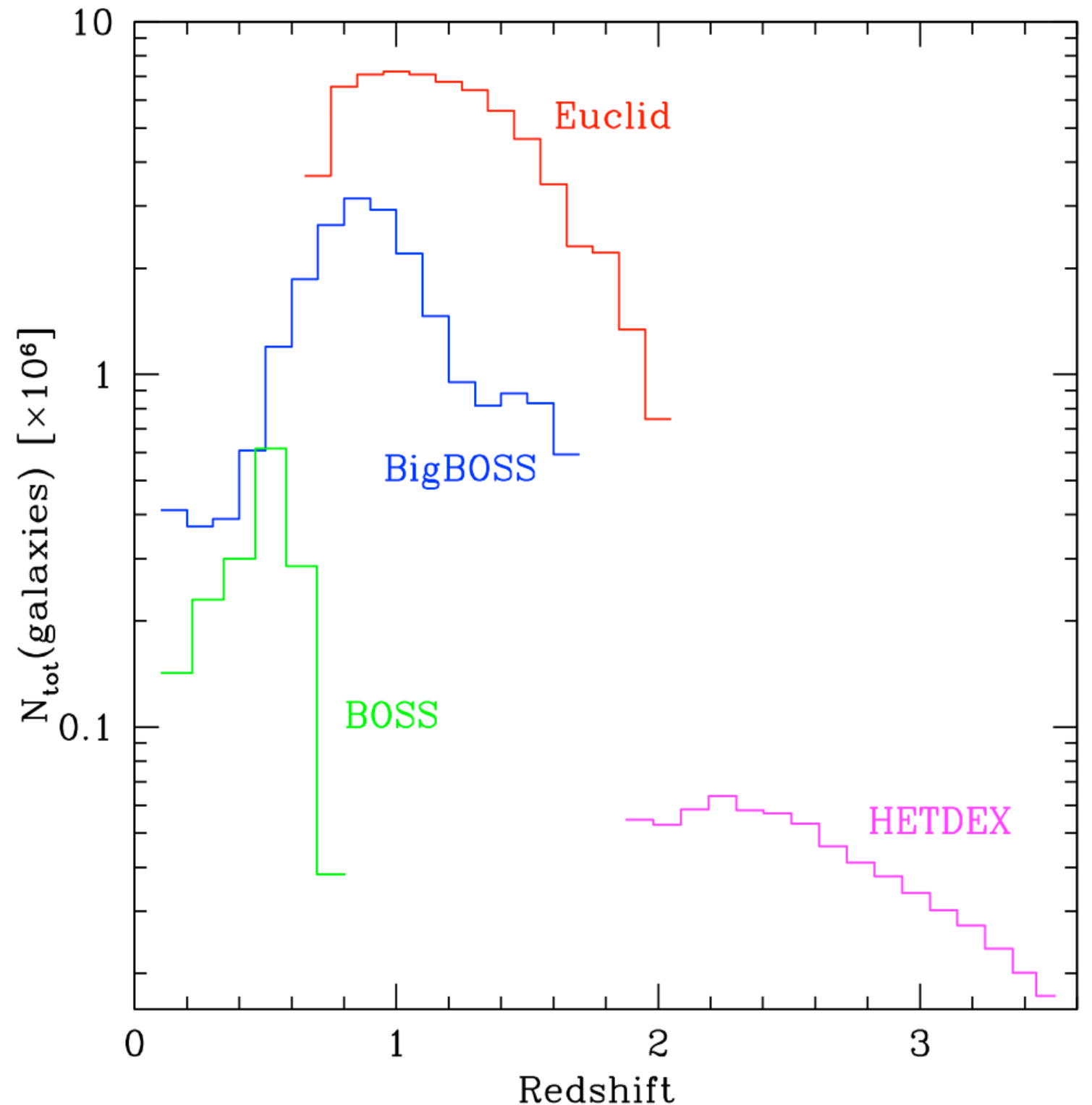
北天：HSC??

(議論中)

そもそもphoto-zに地上可視撮像が必要不可欠

Euclid spectroscopic sample

- 近赤外分光から
主に $z = 0.7-2$ の
 $H\alpha$ 輝線銀河
- >5000万個の銀河
サンプル
- 銀河の相関関数
(BAO, RSD, ...) を
用いた宇宙論

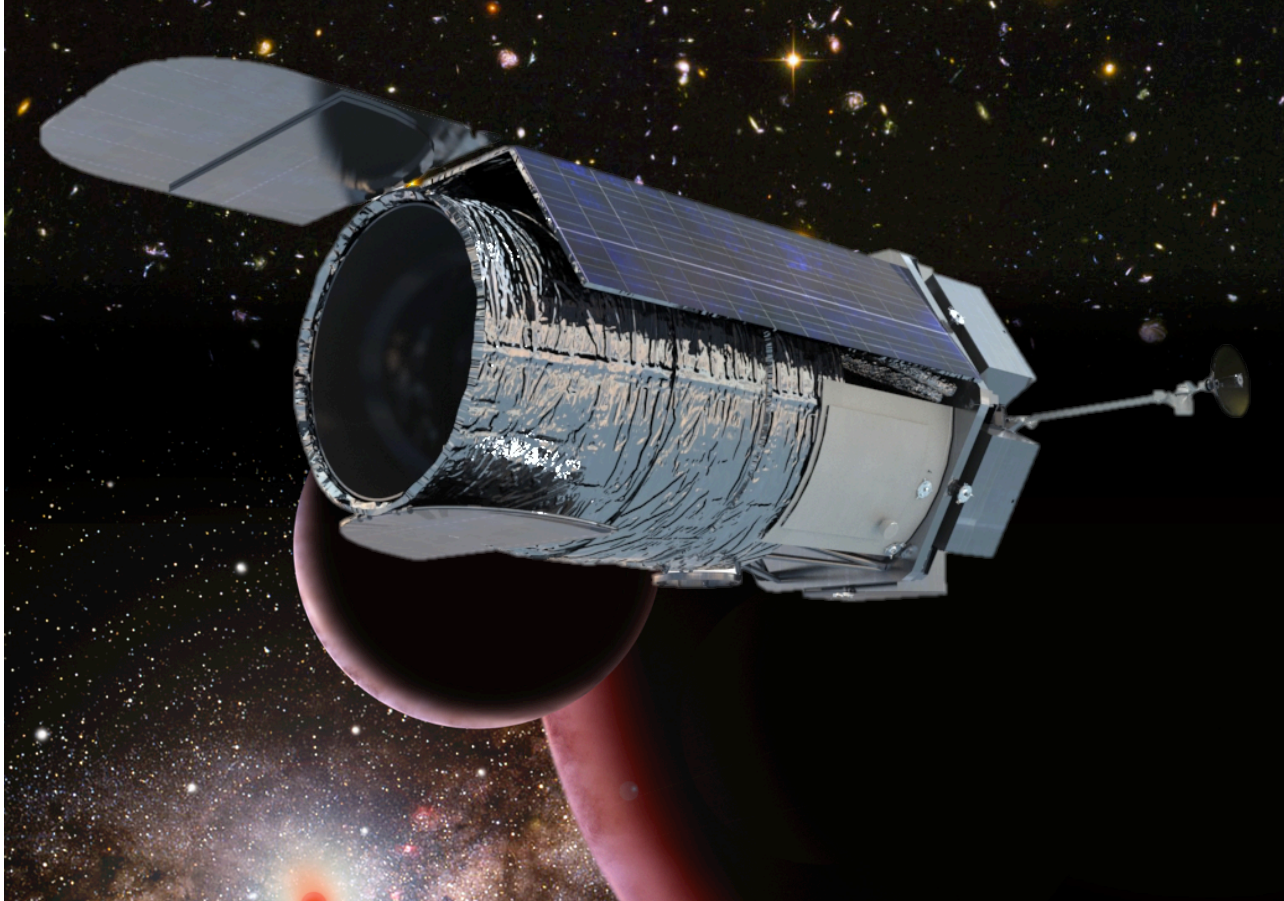


期待される制限 (Euclid)

	Modified Gravity	Dark Matter	Initial Conditions	Dark Energy		
Parameter	γ	m_ν/eV	f_{NL}	w_p	w_a	FoM
Euclid Primary	0.010	0.027	5.5	0.015	0.150	430
Euclid All	0.009	0.020	2.0	0.013	0.048	1540
Euclid+Planck	0.007	0.019	2.0	0.007	0.035	4020
Current	0.200	0.580	100	0.100	1.500	~10
Improvement Factor	30	30	50	>10	>50	>300

from Euclid “Red Book”

WFIRST-AFTA (NASA)



see arXiv:1305.5422

- 多目的宇宙望遠鏡
(宇宙論/系外惑星/
超新星/公募観測)
- 近赤外6バンド撮像
- grism/IFU分光
- 計画段階、日本の
参加可能性も議論中

WFIRST-AFTAの経緯

- 2010年の米国 decadal survey でいくつかの提案を組み合わせさせた“WFIRST”が top priority を獲得
 - その後の検討で1.3-m宇宙望遠鏡のデザイン提案
 - 2012年に NRO (アメリカ国家偵察局) が不要になった2.4-mスパイ衛星2台を NASA へ譲渡
 - 検討の結果この2.4-m望遠鏡が WFIRST に非常に適していることがわかった
- **WFIRST-AFRA** (astrophysics focused telescope assets) として再出発

The WFIRST-2.4 Dark Energy Roadmap

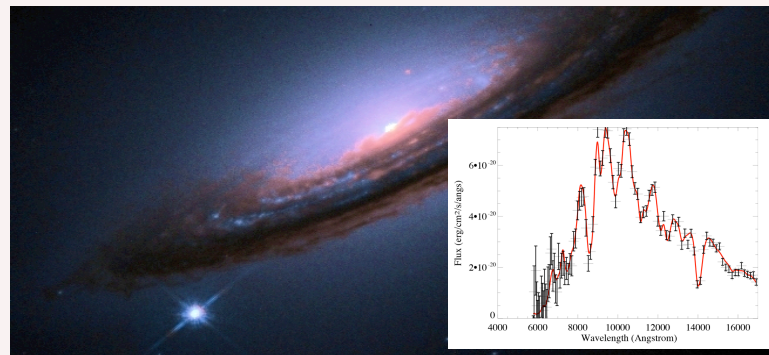
Supernova Survey

wide, medium, & deep imaging
+
IFU spectroscopy

2700 type Ia supernovae
 $z = 0.1-1.7$



standard candle distances
 $z < 1$ to 0.20% and $z > 1$ to 0.34%



High Latitude Survey

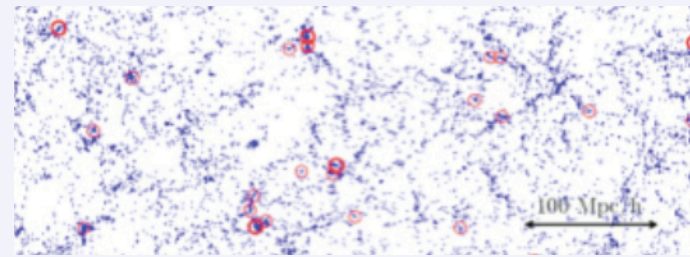
spectroscopic: galaxy redshifts
20 million H α galaxies, $z = 1-2$
2 million [OIII] galaxies, $z = 2-3$

imaging: weak lensing shapes
500 million lensed galaxies
40,000 massive clusters



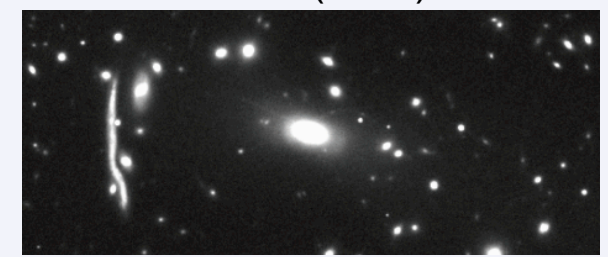
standard ruler

distances	expansion rate
$z = 1-2$ to 0.4%	$z = 1-2$ to 0.72%
$z = 2-3$ to 1.3%	$z = 2-3$ to 1.8%



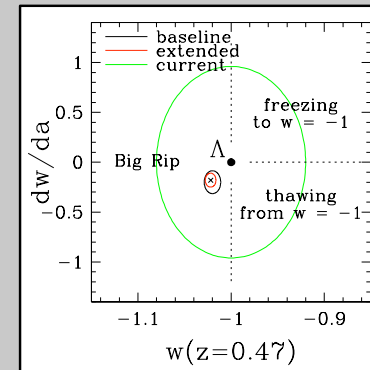
dark matter clustering

$z < 1$ to 0.16% (WL); 0.14% (CL)
 $z > 1$ to 0.54% (WL); 0.28% (CL)
1.2% (RSD)



history of dark energy
+
deviations from GR

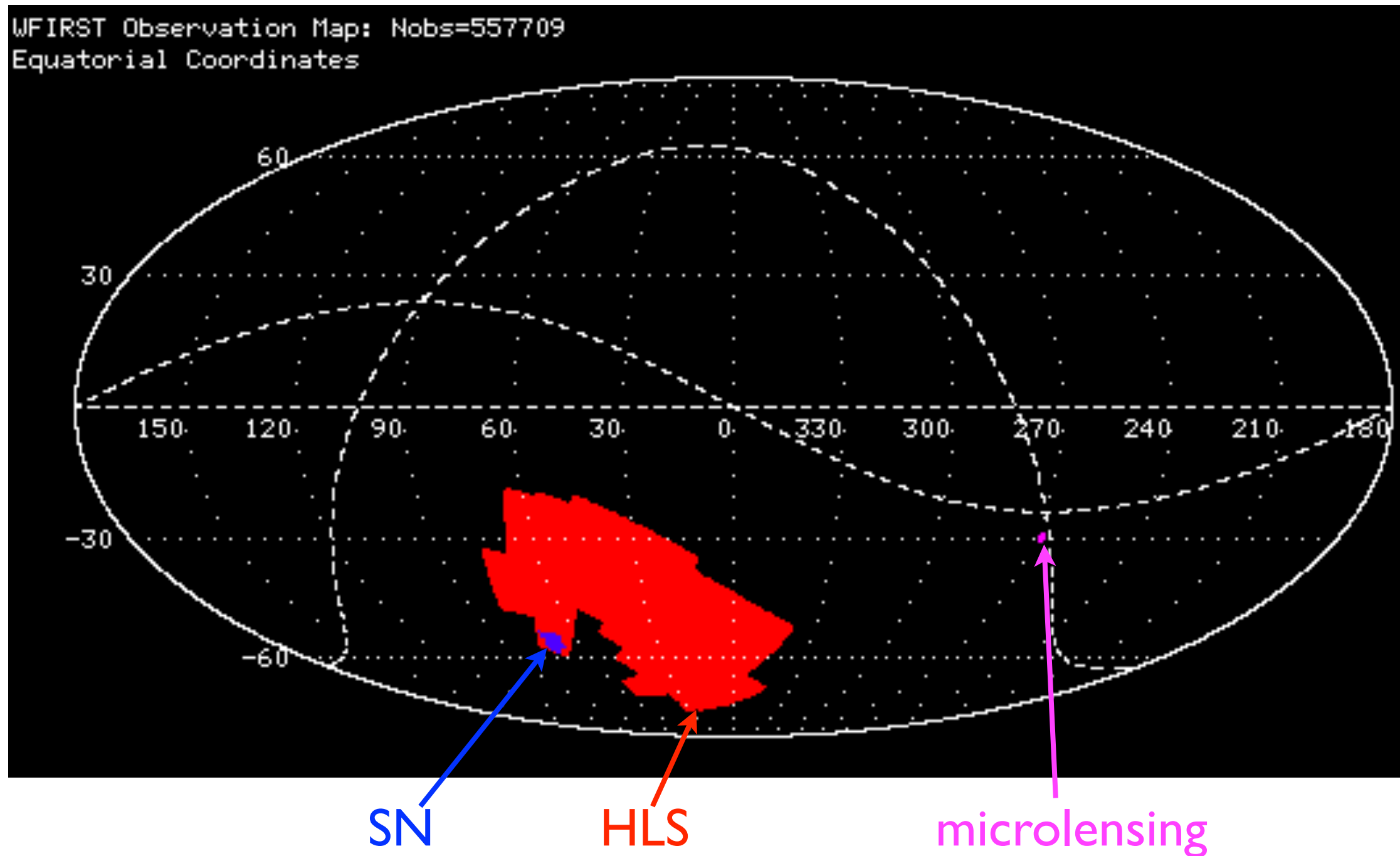
$w(z)$, $\Delta G(z)$, Φ_{REL}/Φ_{NREL}



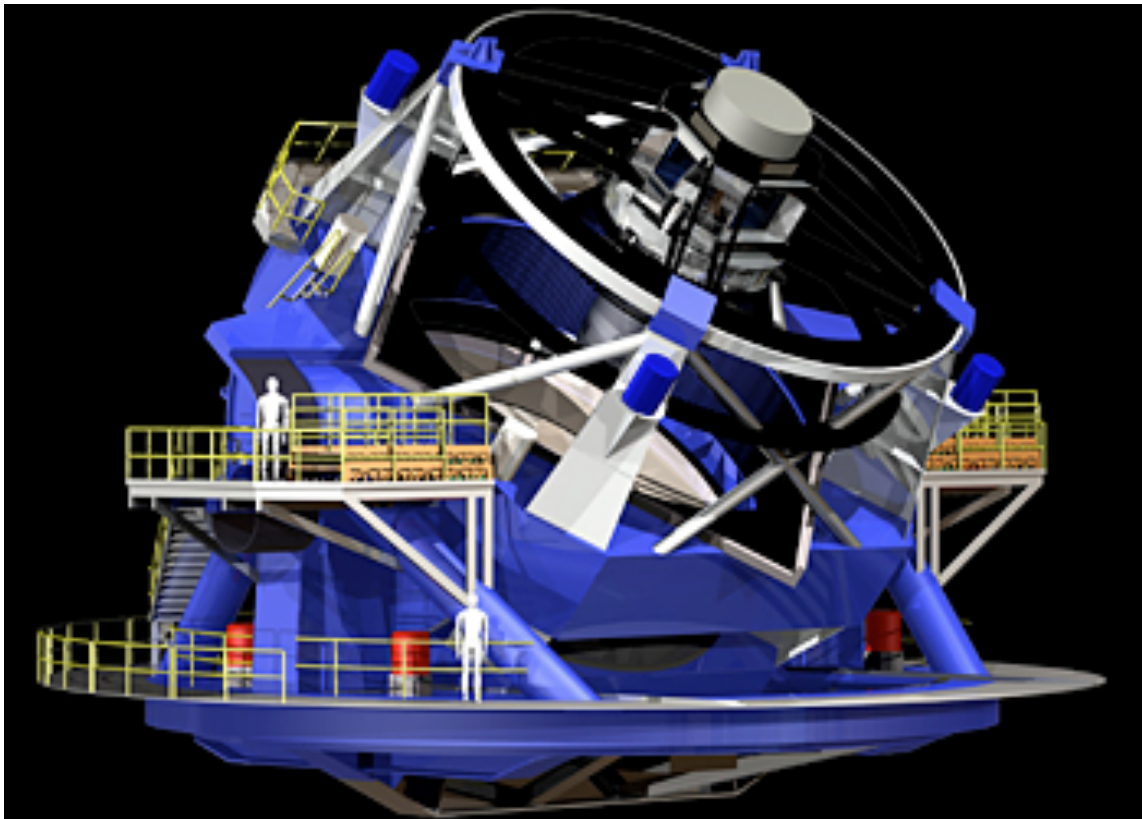
(arXiv:1305.5422)

サーベイ領域 (未決定?)

- 宇宙論サーベイ：南天 $\sim 2000\text{deg}^2$



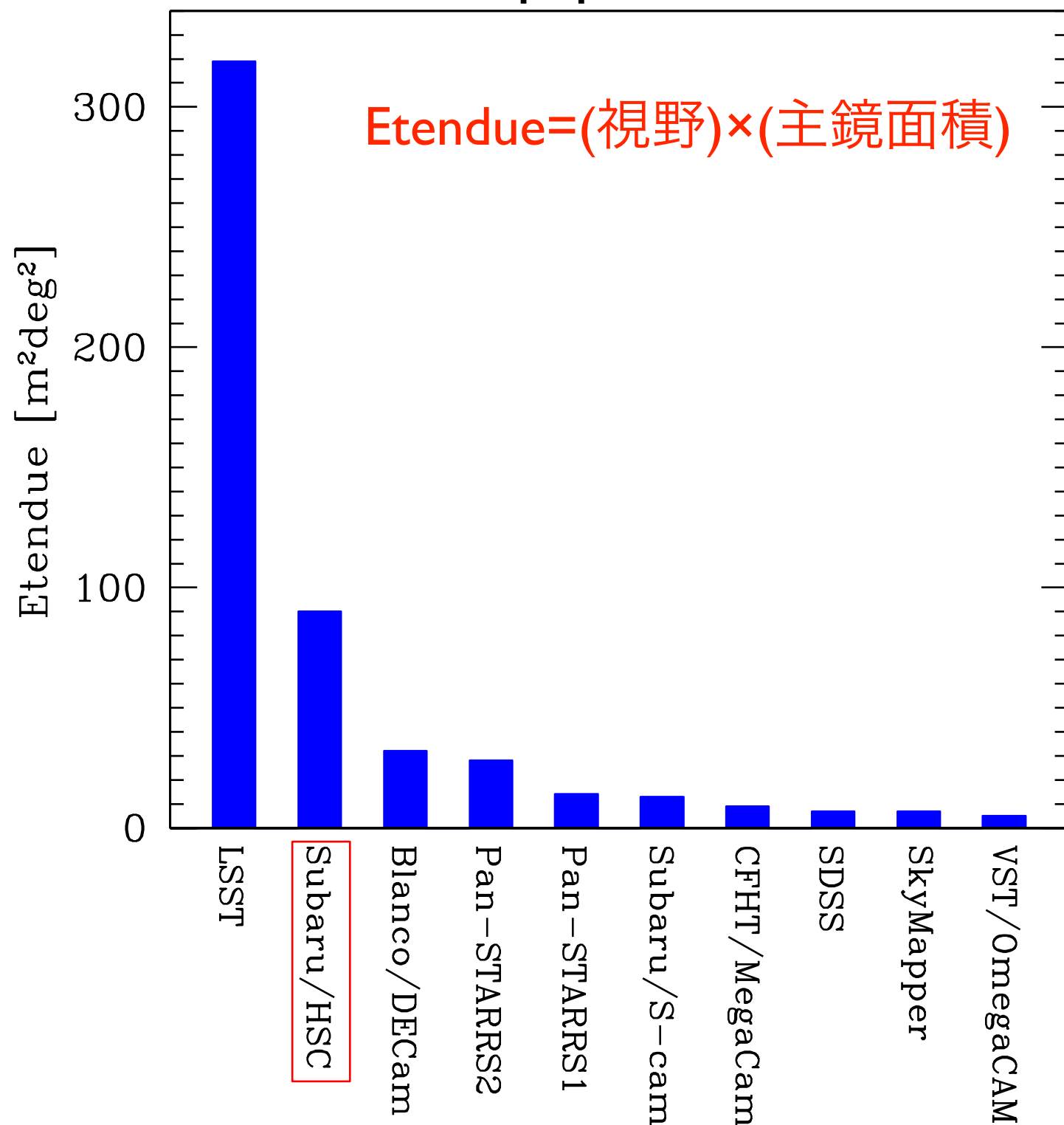
LSST: Large Synoptic Survey Telescope



- チリの6.7-mサーベイ専用望遠鏡
- 可視6バンド (ugrizy)
- 20000deg²を繰り返し何回も観測し時間変動のデータを得る
- 計画段階、日本の参加可能性も議論中

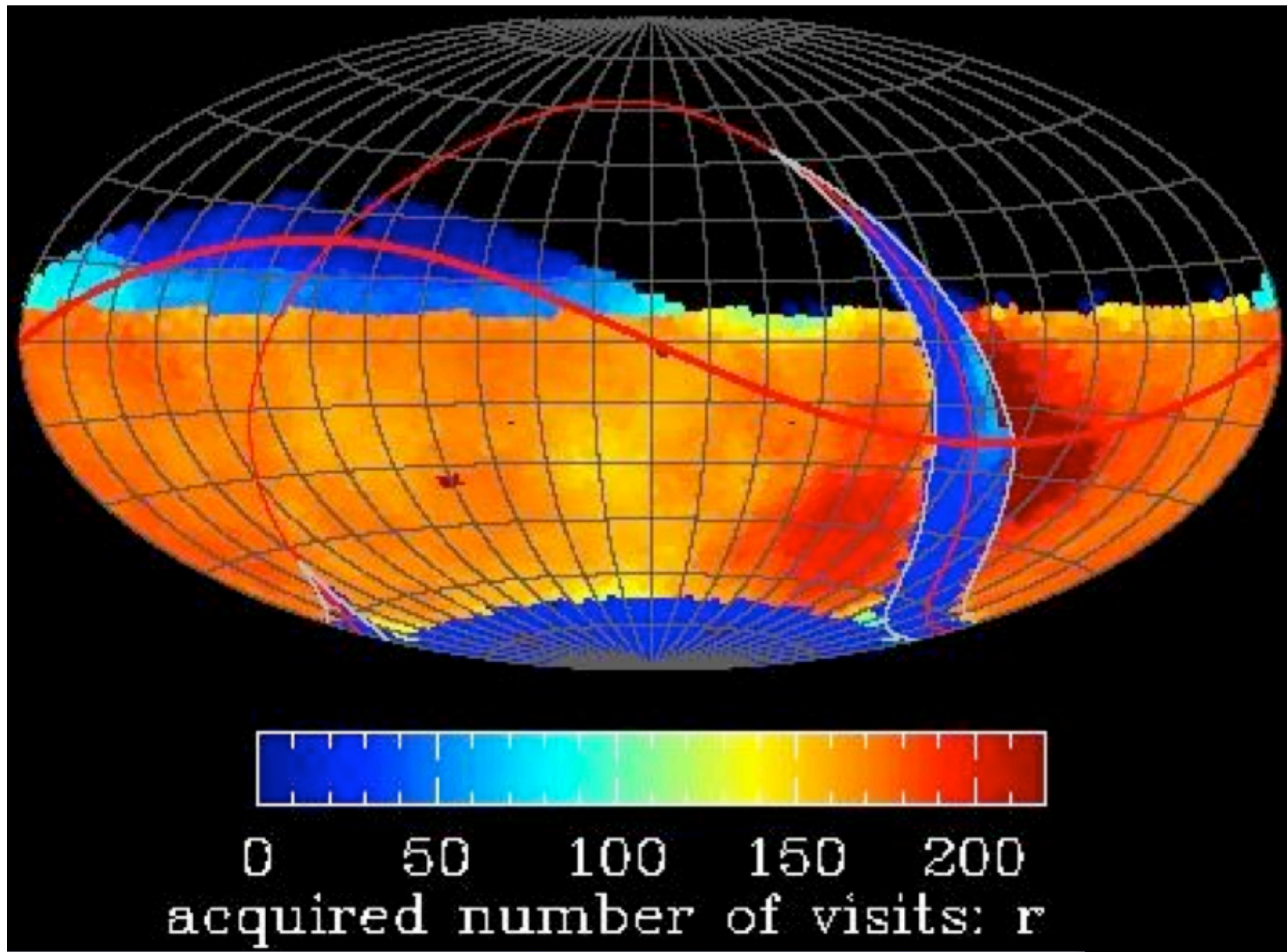
LSSTのサーベイ性能

from HSC white paper



- etendue = 望遠鏡のサーベイ速度
- 2020年代まではHSCが圧倒的一位
- LSSTはHSCの3倍以上のetendue

サーベイ領域

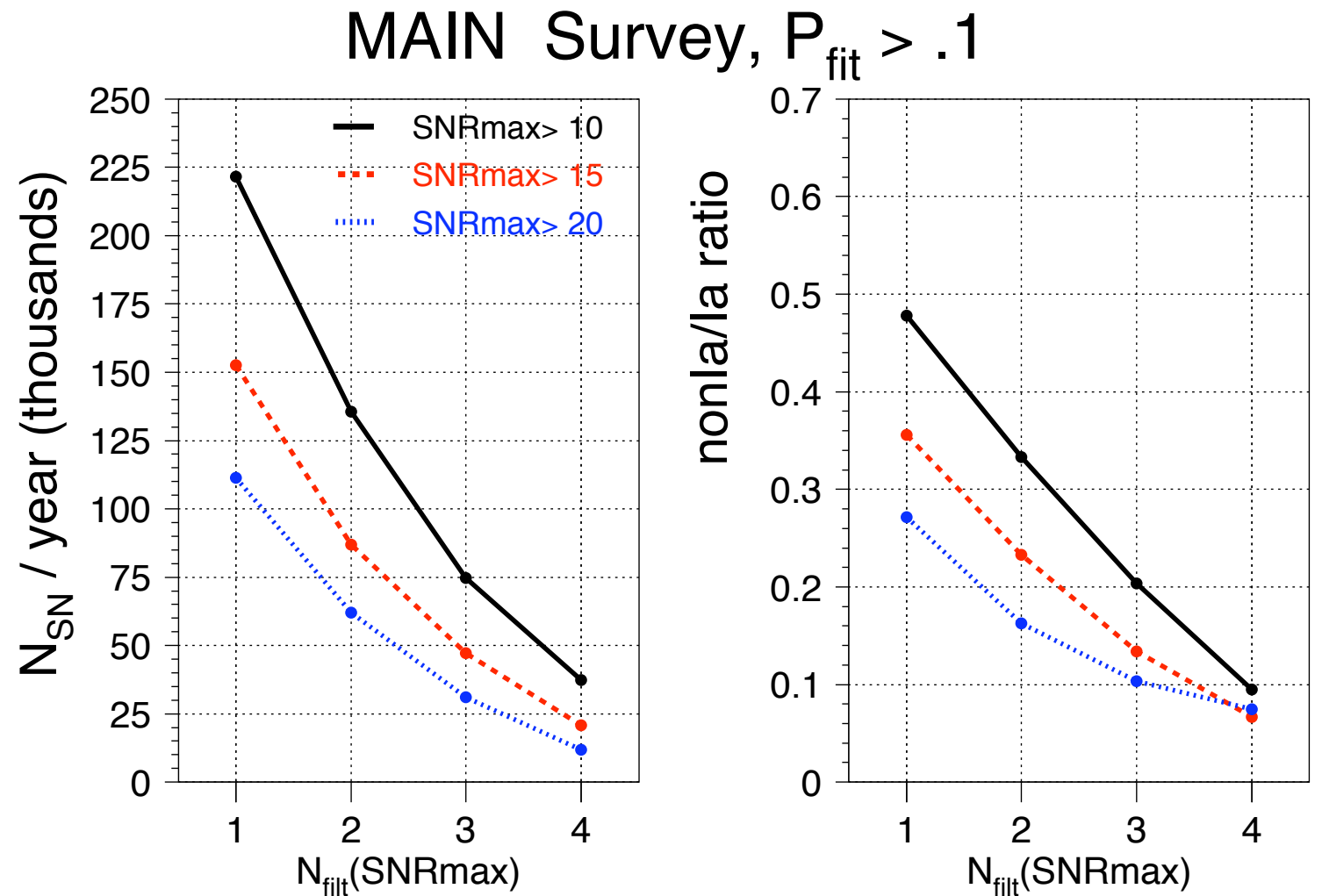


equatorial coordinates

- 南天全部
= 20000deg²
- 一回の観測
で~24等, 10年
のデータを足
すと~27等

Ia型超新星爆発とLSST

- LSST は time domain surveyなので超新星も大量に見つかる
- 100万個以上の大量のIa型超新星爆発

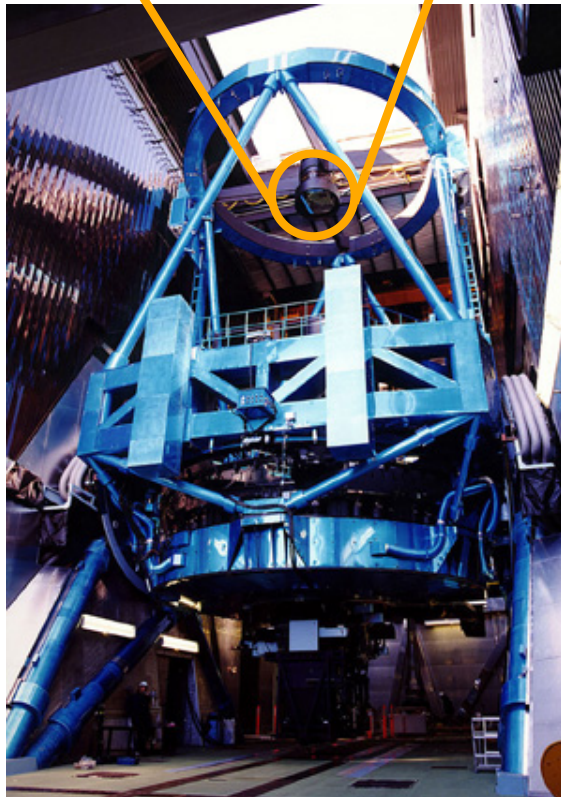
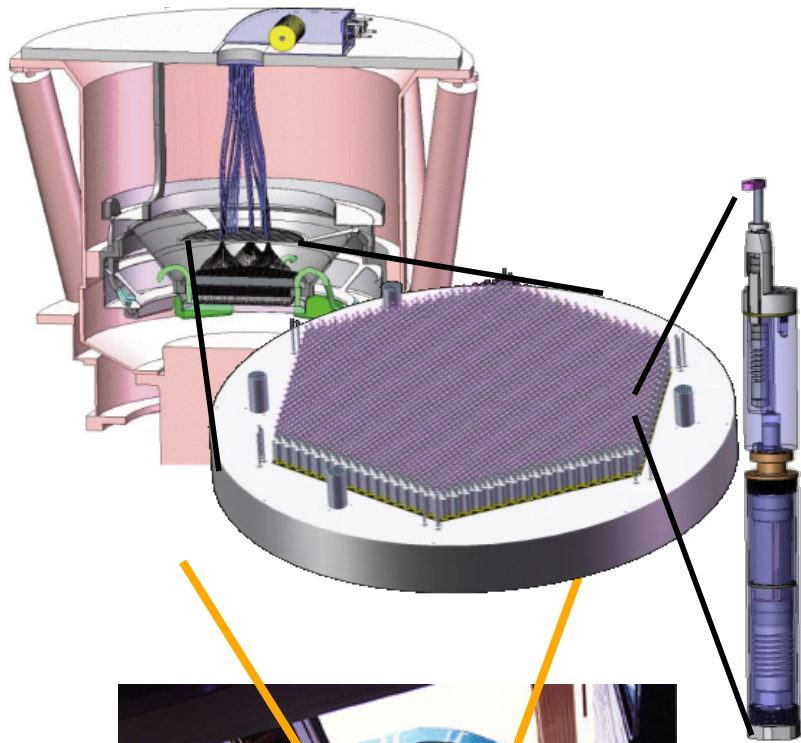


(from LSST science book)

補足：地上可視多天体分光

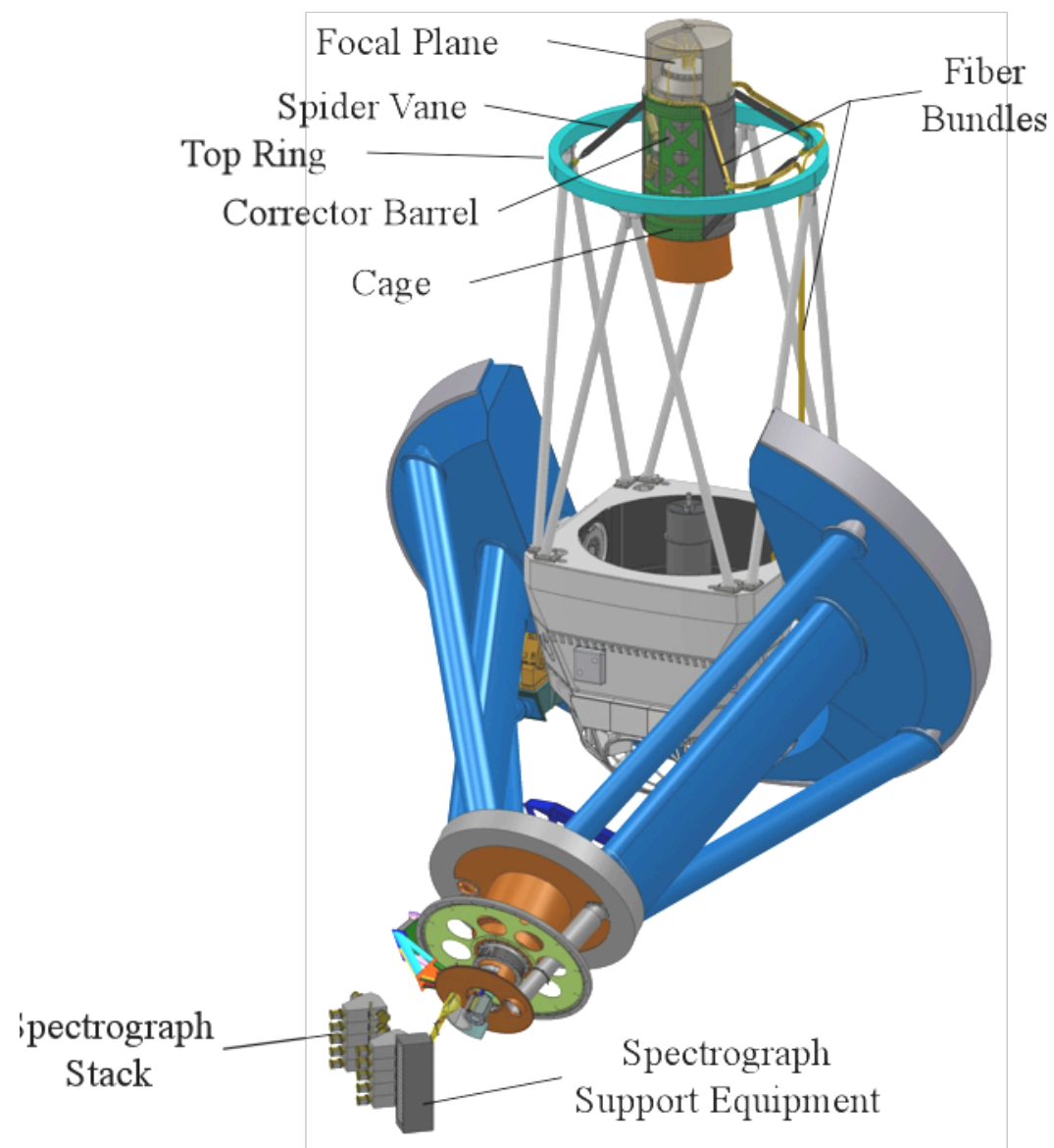
- 地上大口径望遠鏡による可視多天体分光も重要
- 広視野撮像、近赤外分光と相補的
- BAO、重力レンズ解析等におけるphoto-z較正

Prime Focus Spectrograph (PFS)



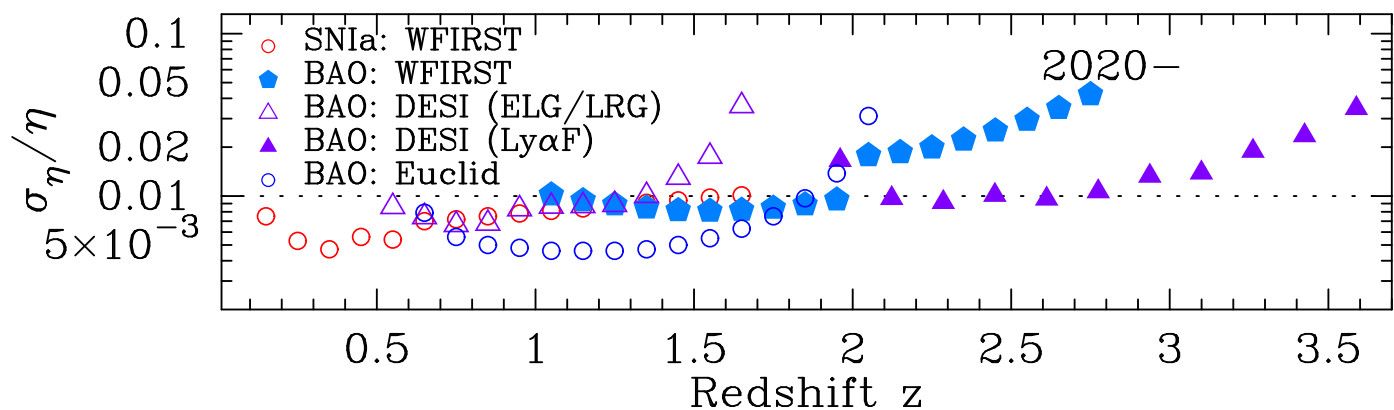
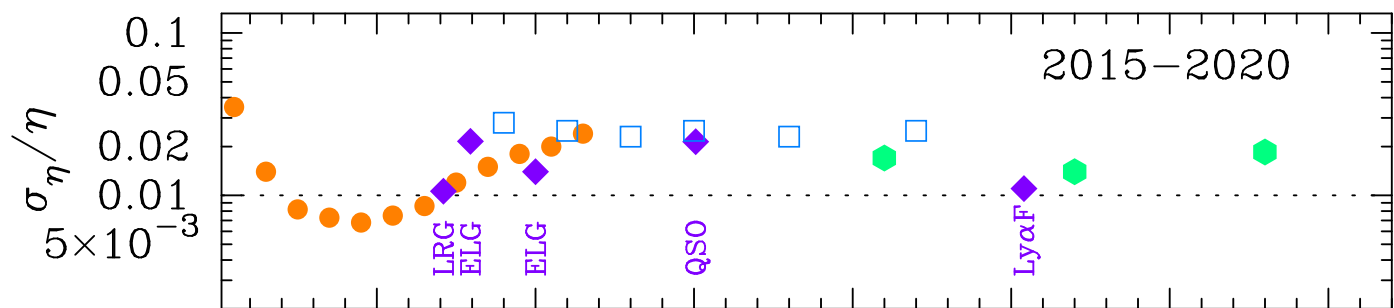
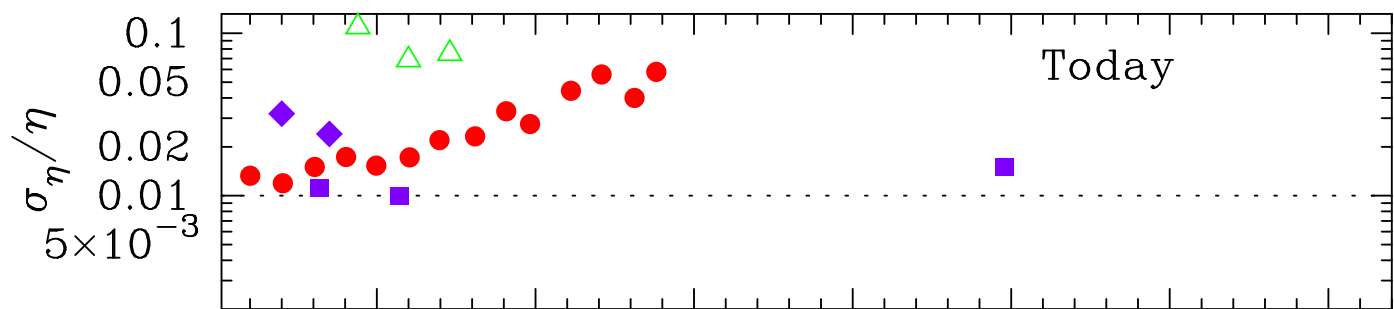
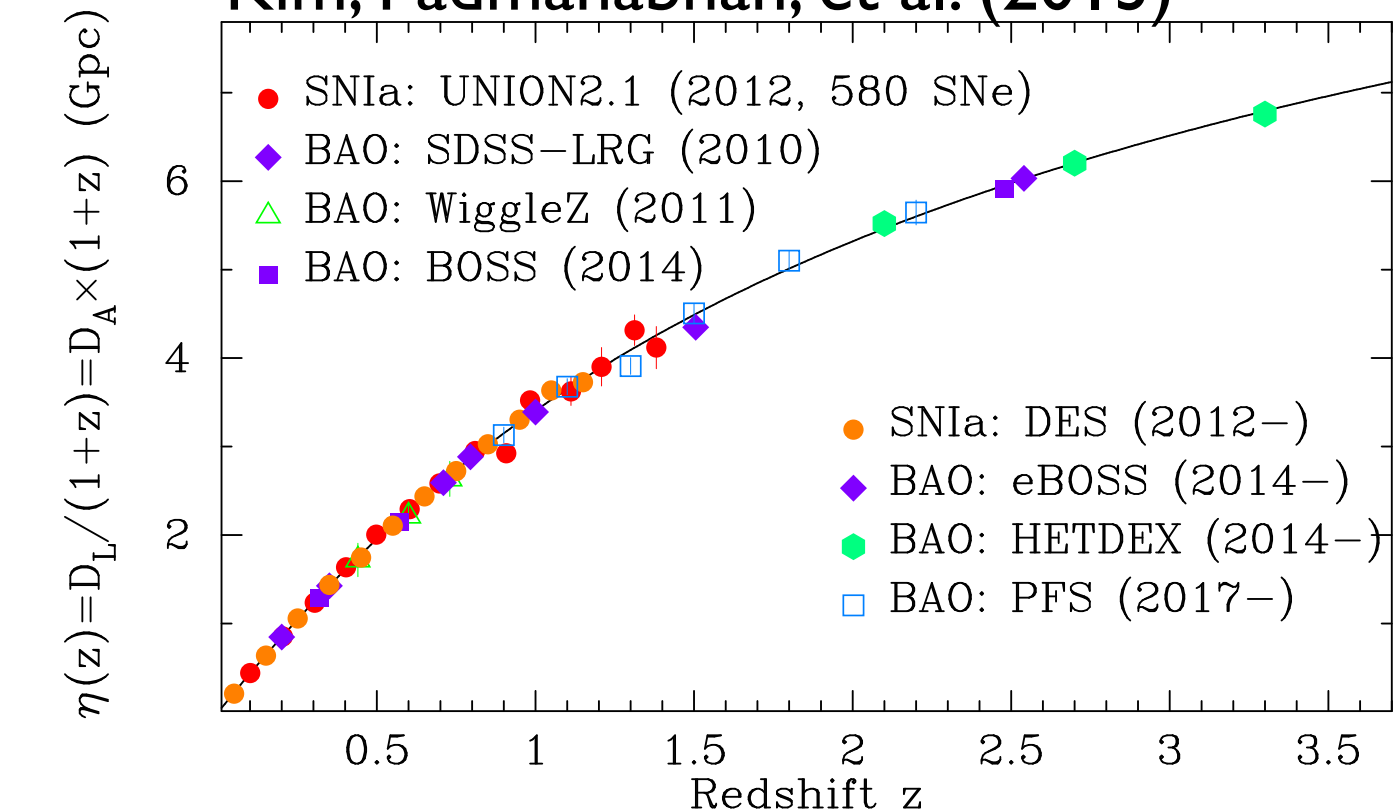
- すばる望遠鏡に取り付ける多天体分光器
- 2400天体を同時分光
- 0.38–1.3 μm の広い波長域
- 2018年頃?からサーベイ開始

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)



- Kitt Peak Mayall 4-m に設置
- 5000天体を同時分光
- 1400deg²のBAOサーベイ,
2000万天体の分光
(LRG+ELG+QSO+Ly α)
- 2018年開始を目指す

Kim, Padmanabhan, et al. (2013)



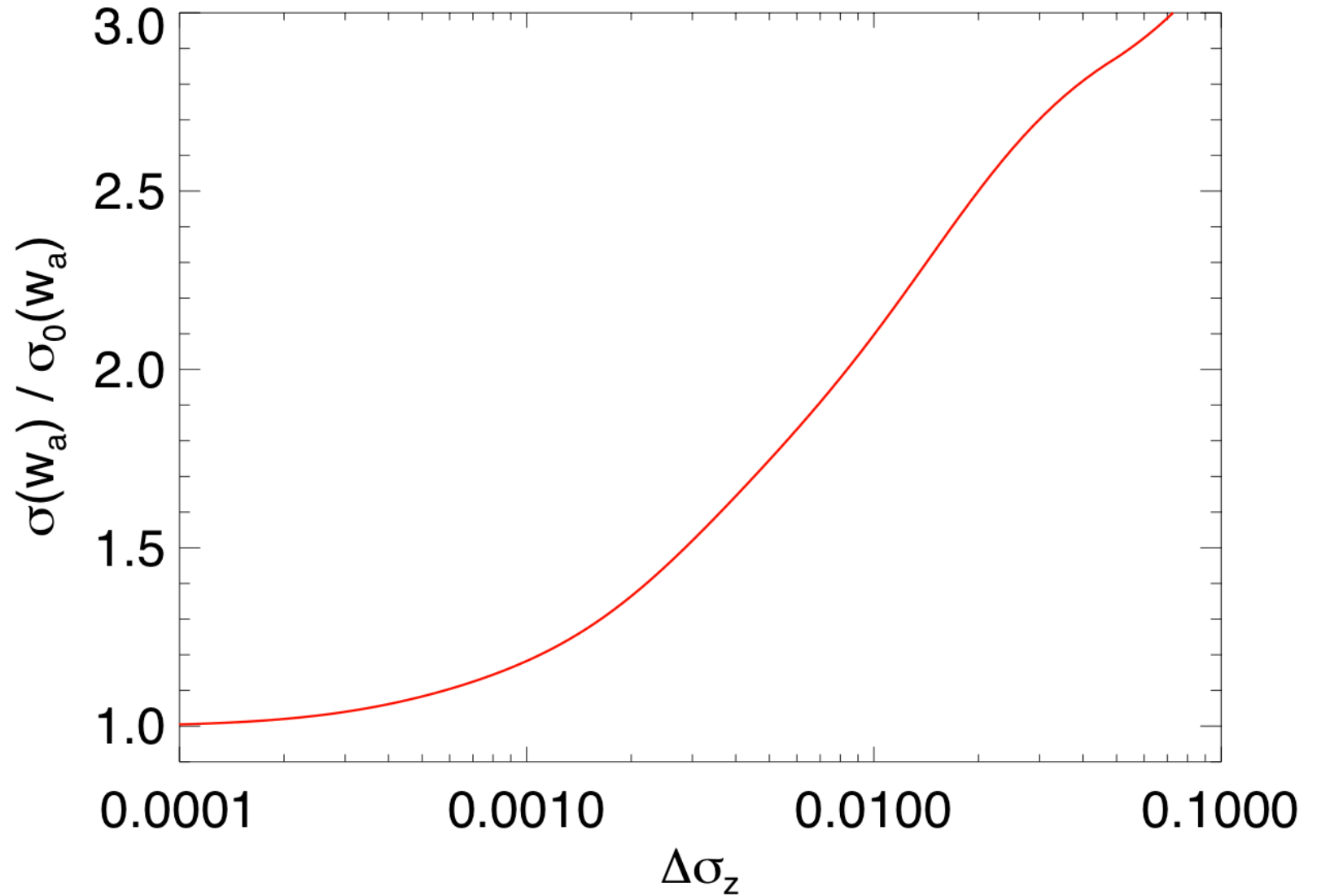
国際競争

- 2015年-2020年
 - PFS (日, 8.2m)
 - eBOSS (米, 2.5m)
 - HETDEX (米, 9.2m)
 - 2020年-
 - Euclid (欧, 1.2m宇宙)
 - WFIRST (米, 2.4m宇宙)
 - DESI (米, 4m)
- (↑ BigBOSS+DESpec)

弱い重力レンズとphoto-z

- 測定に使う銀河のphoto-zの精度はゆらぎ進化の精密測定に重要
- Euclid etc. では <0.2% ほど必要
- $i \sim 25$ の銀河でこの精度を達成するのは大変！

Newman et al. arXiv:1309.5384

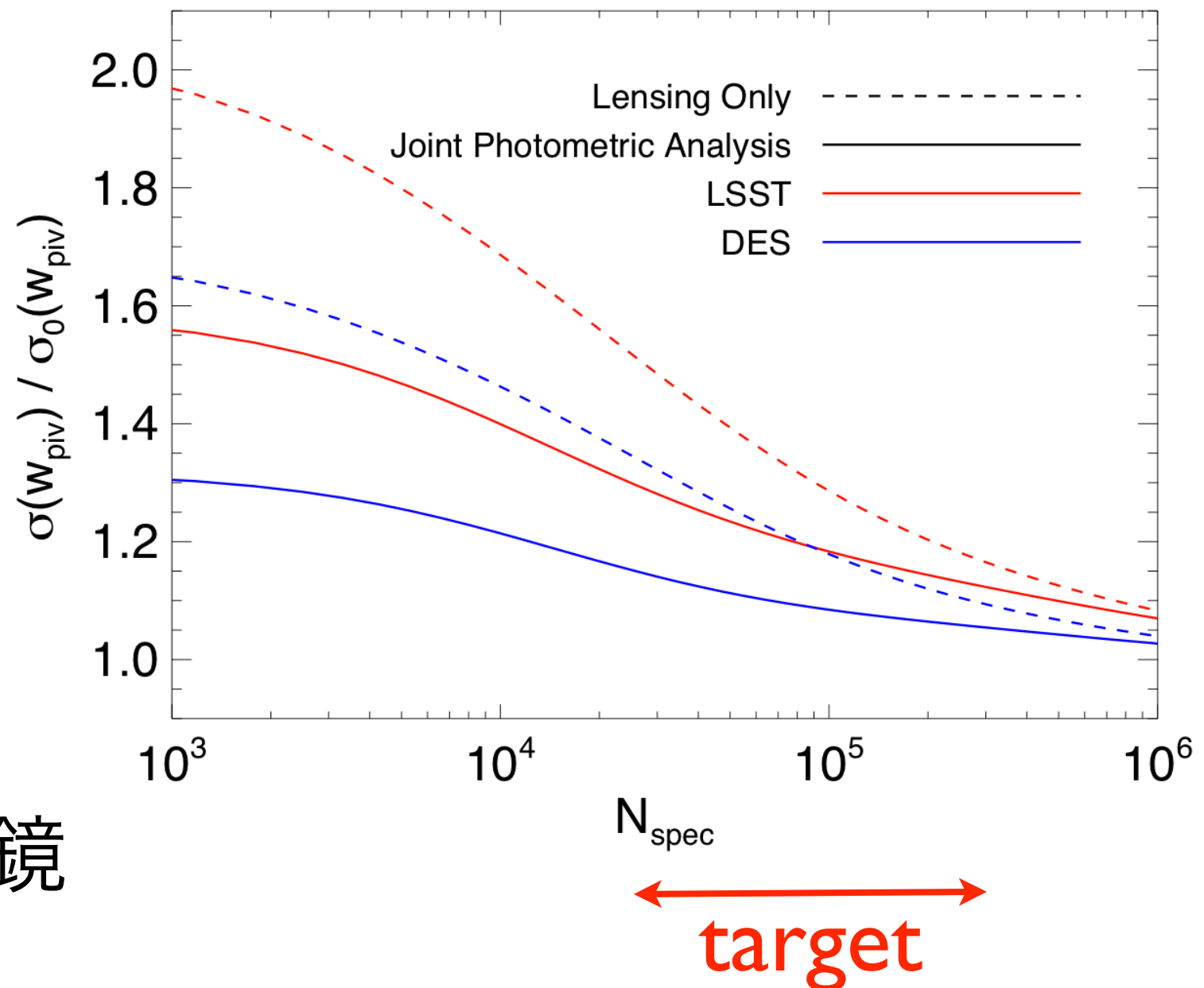


(LSST-like survey)

分光によるphoto-z較正

- 分光サンプルによるphoto-zの訓練、較正が必要不可欠
- >30000の分光銀河が必要、全天に広く分布している必要 (cosmic variance)
- PFSおよび30m級望遠鏡が主力になると期待

Newman et al. arXiv:1309.5384



まとめ

- 宇宙論 \approx 距離とゆらぎの測定
- 多様なアプローチ
- Euclid/WFIRST/LSSTが2020年代の主力
- 広視野の撮像(HSC)および分光(PFS)装置を有する
すばるはこれらサーベイを補完する非常に重要な役割を果たしうる