

⑨ サブ課題 C： 大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明

目的と科学的卓越性：宇宙誕生から現在までの宇宙進化を解明するために現代物理学を駆使したアプローチ。現実的な宇宙論的設定のもとでダークマターの密度揺らぎの非線形成長を追い、天体形成に関わる基礎物理を取り入れたマルチフィジクスシミュレーションを遂行する。世界中で進められている広域撮像観測により得られる天文ビッグデータと大規模計算を融合したビッグデータ宇宙論を展開。

「京」時代ではどこまで分かっているか？

星、銀河、巨大ブラックホールなど、宇宙における諸階層の構造形成過程が探究され、素過程の理解が進んだ。宇宙階層構造をつなぐ宇宙史の包括的な理解はできていない。

- **初代星形成：**宇宙で最初に誕生する星形成の基礎物理過程を理解。
- **銀河形成：**ダークマター、バリオン物質、輻射による銀河形成の素過程を理解。ブラックホールとの共進化や、現在の銀河につながる進化過程。
- **巨大ブラックホール形成：**銀河中心の巨大ブラックホールへの局所的質量降着による活動銀河核形成を理解。巨大ブラックホールの起源。
- **星形成：**星間分子雲の重力磁気流体過程による小質量星形成を理解。大質量星形成、星団形成。

ポスト京での実現可能性

大領域を設定した現実的な宇宙論的計算の中でバリオン物質、ニュートリノ、ダークマターを含めた天体形成シミュレーションが実現可能。大規模かつ詳細な観測計画と直接比較可能なアウトプットを生成。

ポスト「京」以降で何をを目指すのか？

星、銀河、巨大ブラックホールといった諸階層をつなぐシミュレーションを実現し、**宇宙初期から現在までの宇宙進化の包括的理解**を目指す。

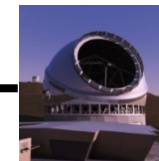
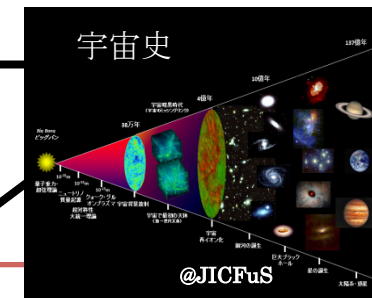
- ダイナミックレンジの大きな計算を実現し、諸階層をつなぐ
- 輻射、ニュートリノ輸送、磁場を忠実に再現。
- **最先端観測**(地上大型望遠鏡、宇宙望遠鏡)との直接比較が可能なレベルのアウトプット生成
- 情報科学者や統計学者と協同し、大規模サーベイ観測のデータ解析



すばる望遠鏡



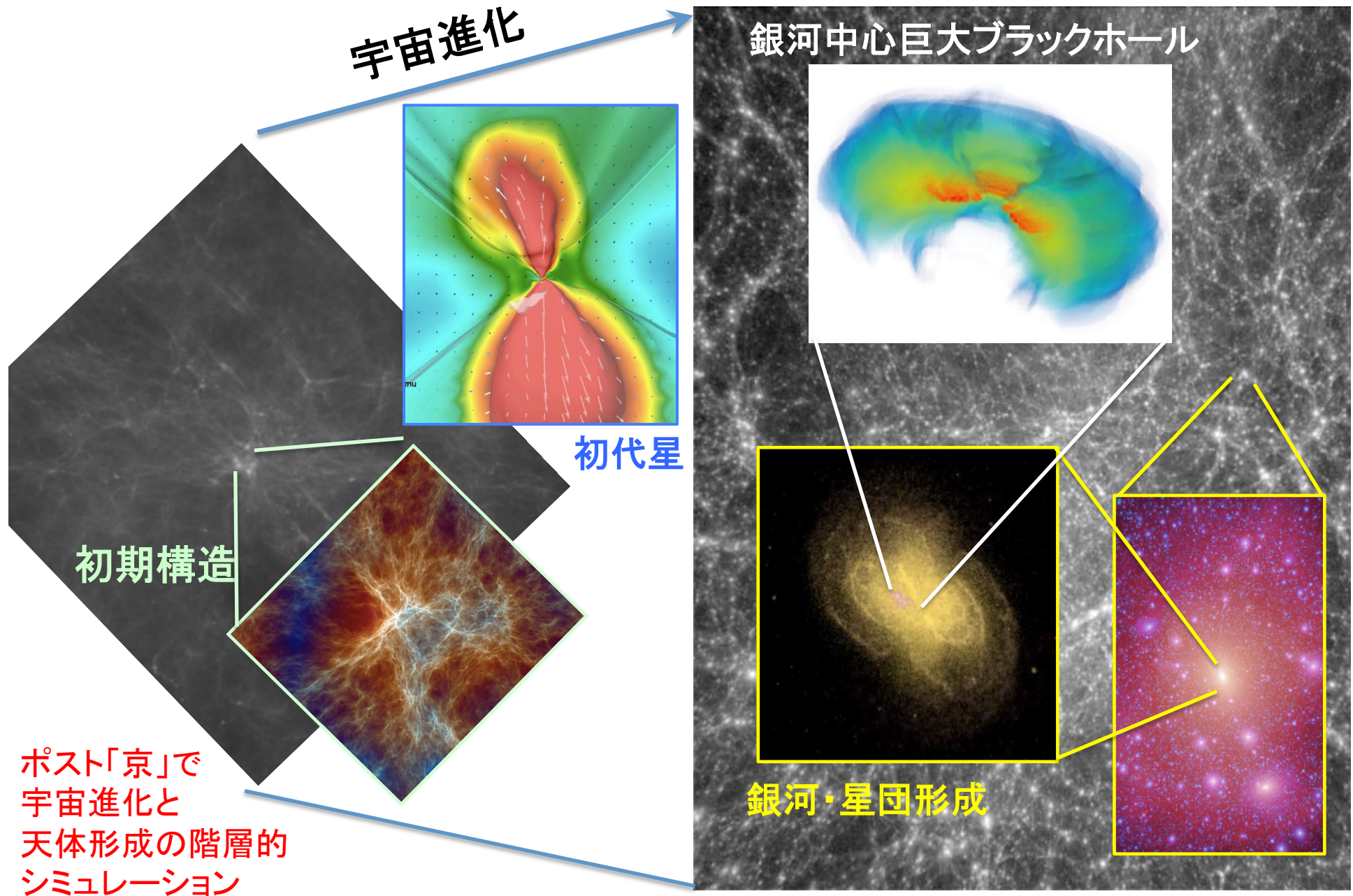
ALMA望遠鏡



TMT計画

写真は国立天文台Webより

⑨ サブ課題 C：ポスト「京」を使った研究目標

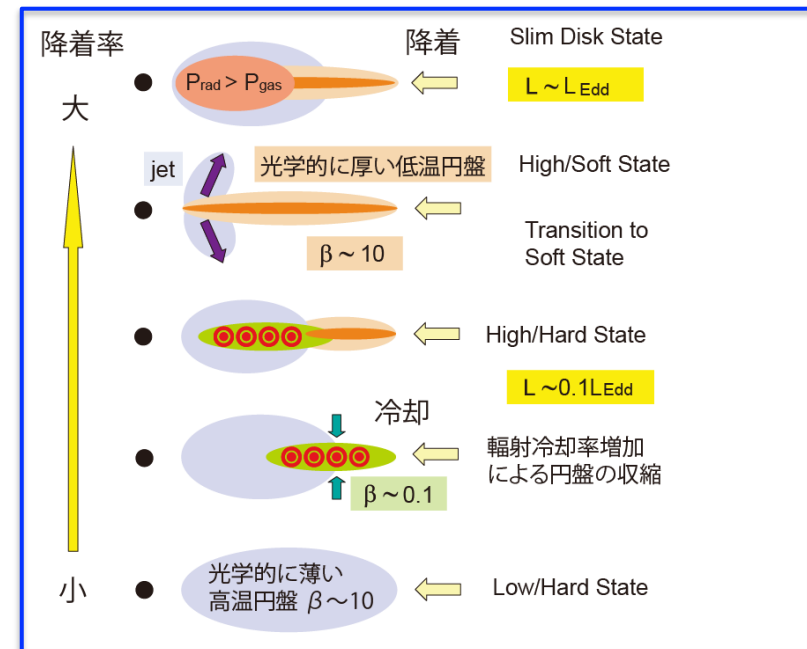


⑨ サブ課題 C：ポスト「京」を使った研究計画

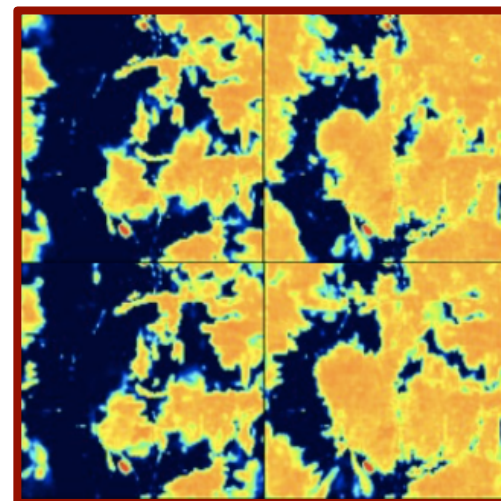
1. 一般相対論的輻射磁気流体コードを高次精度化して降着円盤の大局的3次元輻射磁気流体シミュレーションに適用。
2. 1000兆個相当の荷電粒子を用いた3次元プラズマ粒子計算を磁気再結合現象に適用
3. ブラックホール(BH)降着率増加に伴う光学的に薄い高温円盤から光学的に厚い標準円盤への状態遷移とBH成長率を明らかに。
4. シミュレーション結果から輻射スペクトルを計算し、2016年打ち上げ予定Astro-H衛星の観測と比較して輝線放射領域を特定。
5. ニュートリノを含む宇宙論的シミュレーションで物質分布の進化を高精度で解く
6. 100億個級の粒子を用いた構造形成計算により、宇宙論的大領域の中で星団まで解像



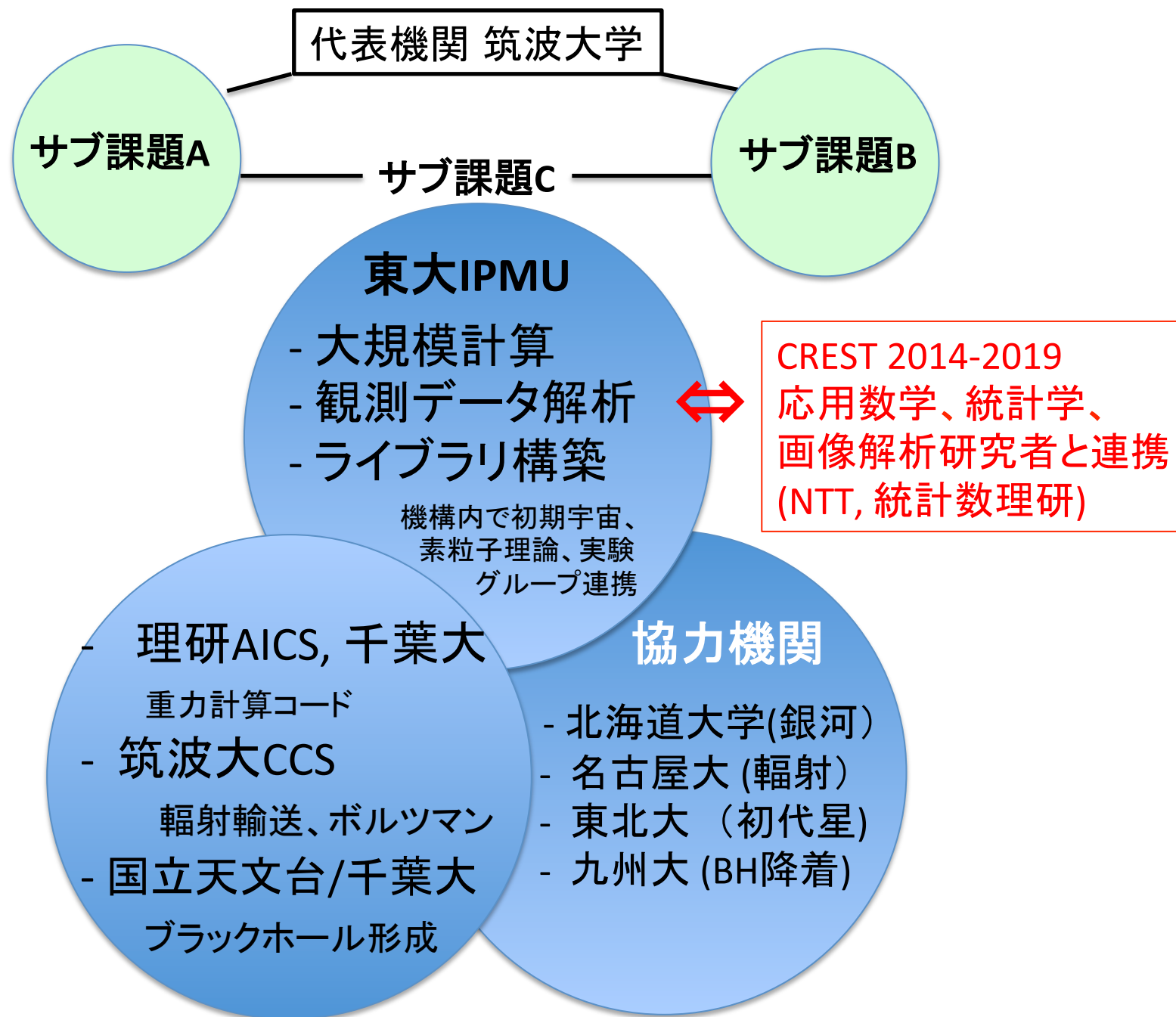
1000 リアライゼーション程度の
ヴァーチャルユニバースライブラリを作成。
共分散行列など、すばるHSCサーベイのための統計量を得て宇宙のダークマター、
ダークエネルギーの性質を高精度で制限



降着率変動に伴う降着円盤の状態遷移。

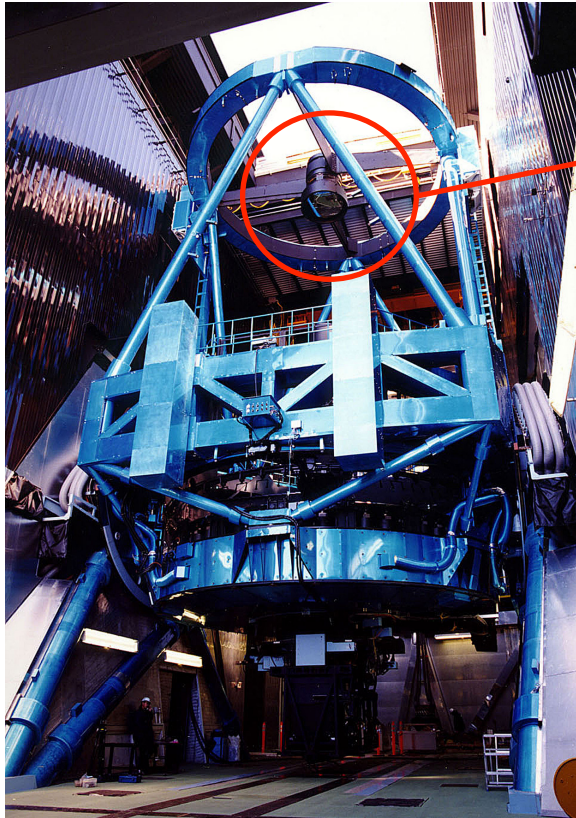


早期銀河からの
紫外光による宇宙
再電離の3次元
シミュレーション



統計計算宇宙物理学@東大IPMU

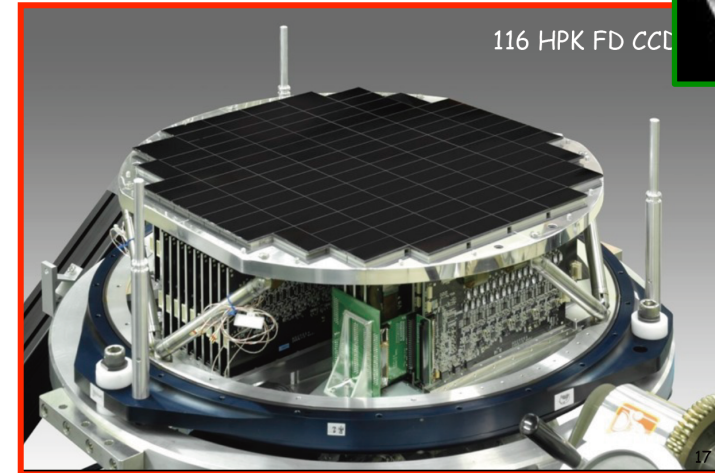
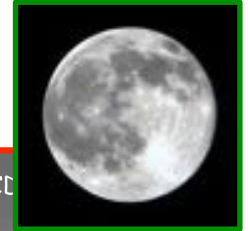
Subaru Hyper Suprime-Cam



First light in 2013

口径 8.2 m
すばる望遠鏡
(ハワイ島)

Largest (3ton) digital camera
1.5 deg. FoV = 10 times
1000 times Hubble ST



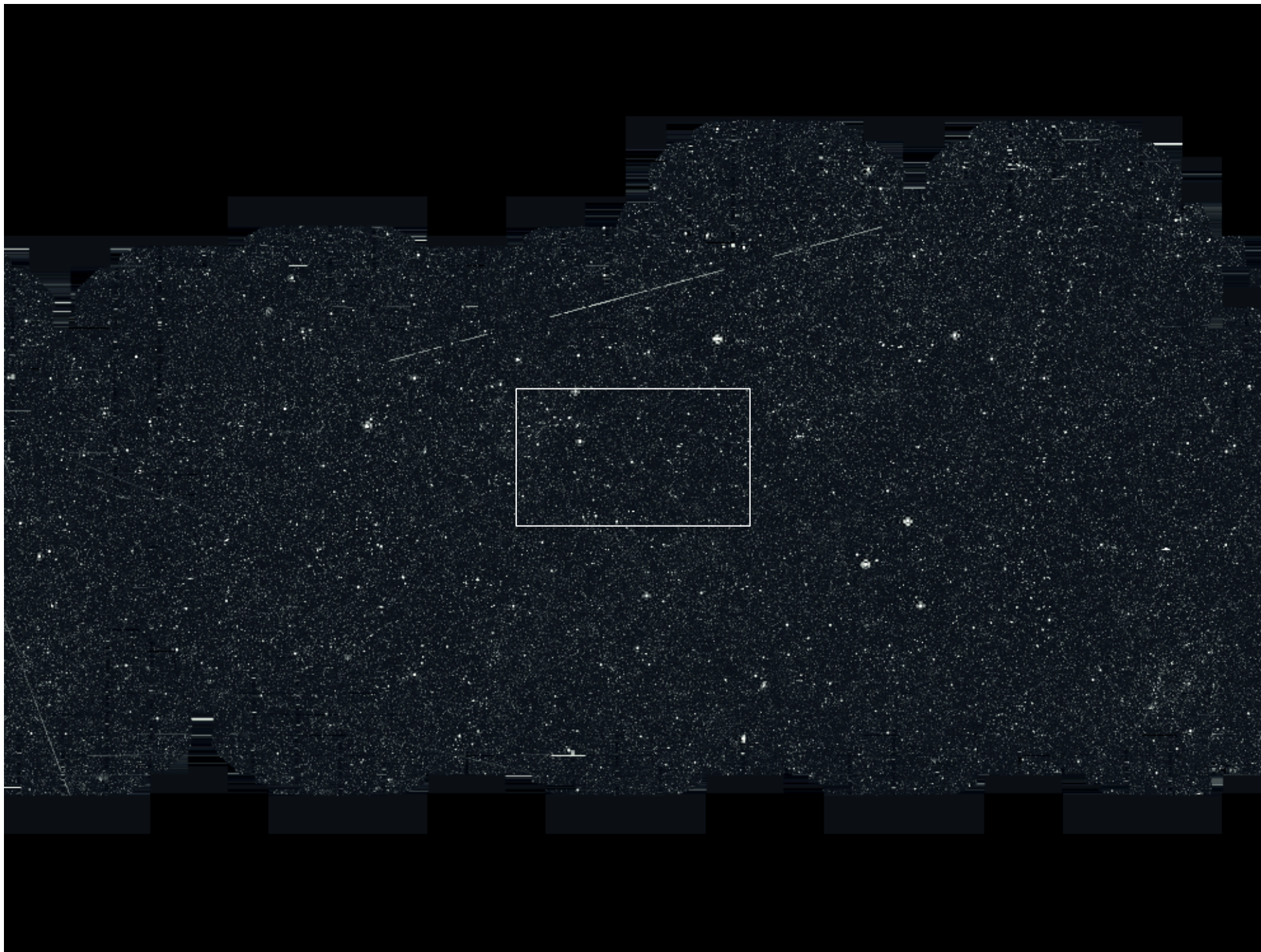
104 CCDs produce a 1 Giga pixel
image *per snapshot*

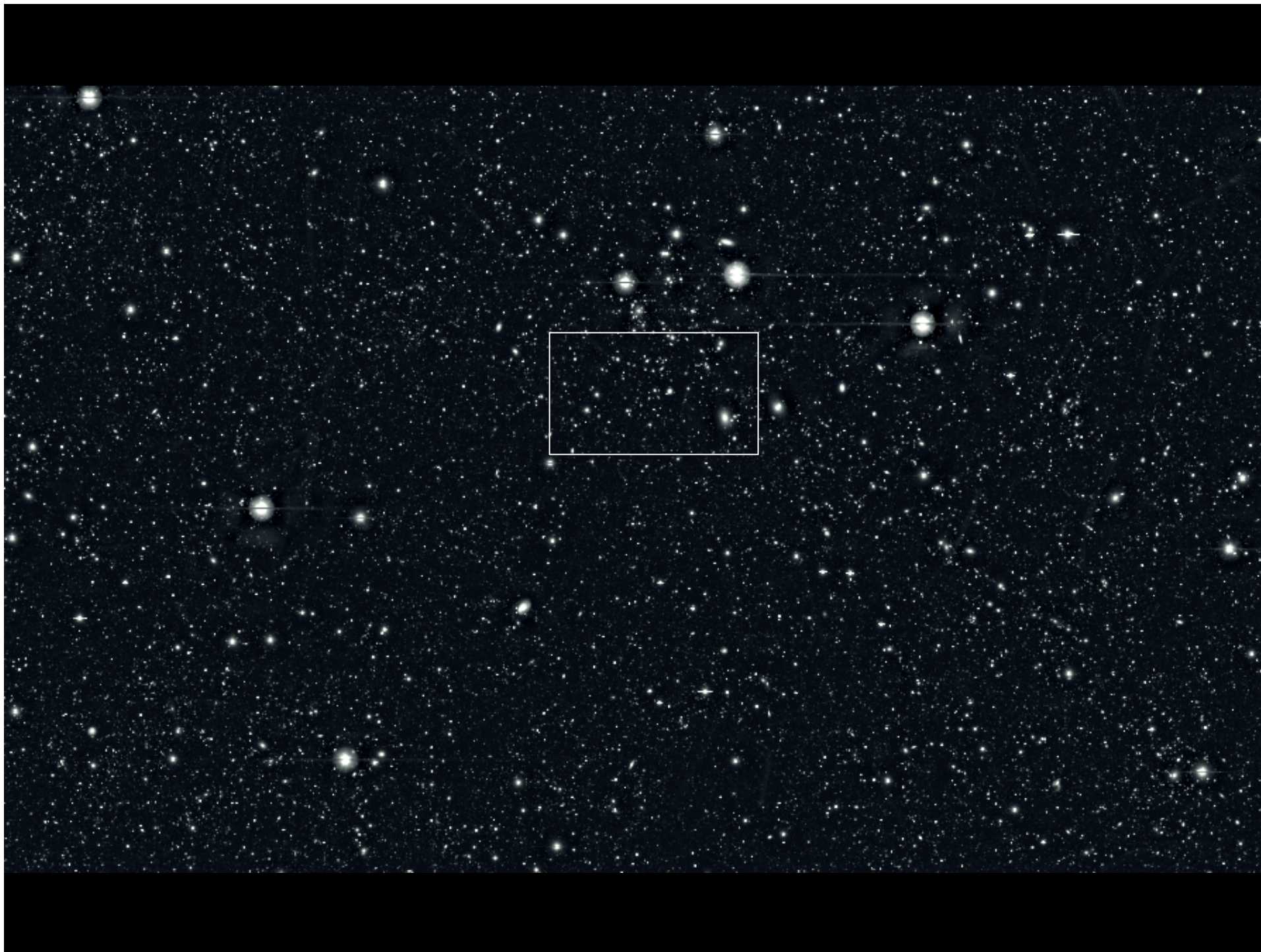
The 5-year survey began in March 2014, and will last to 2019, spending 300 nights.

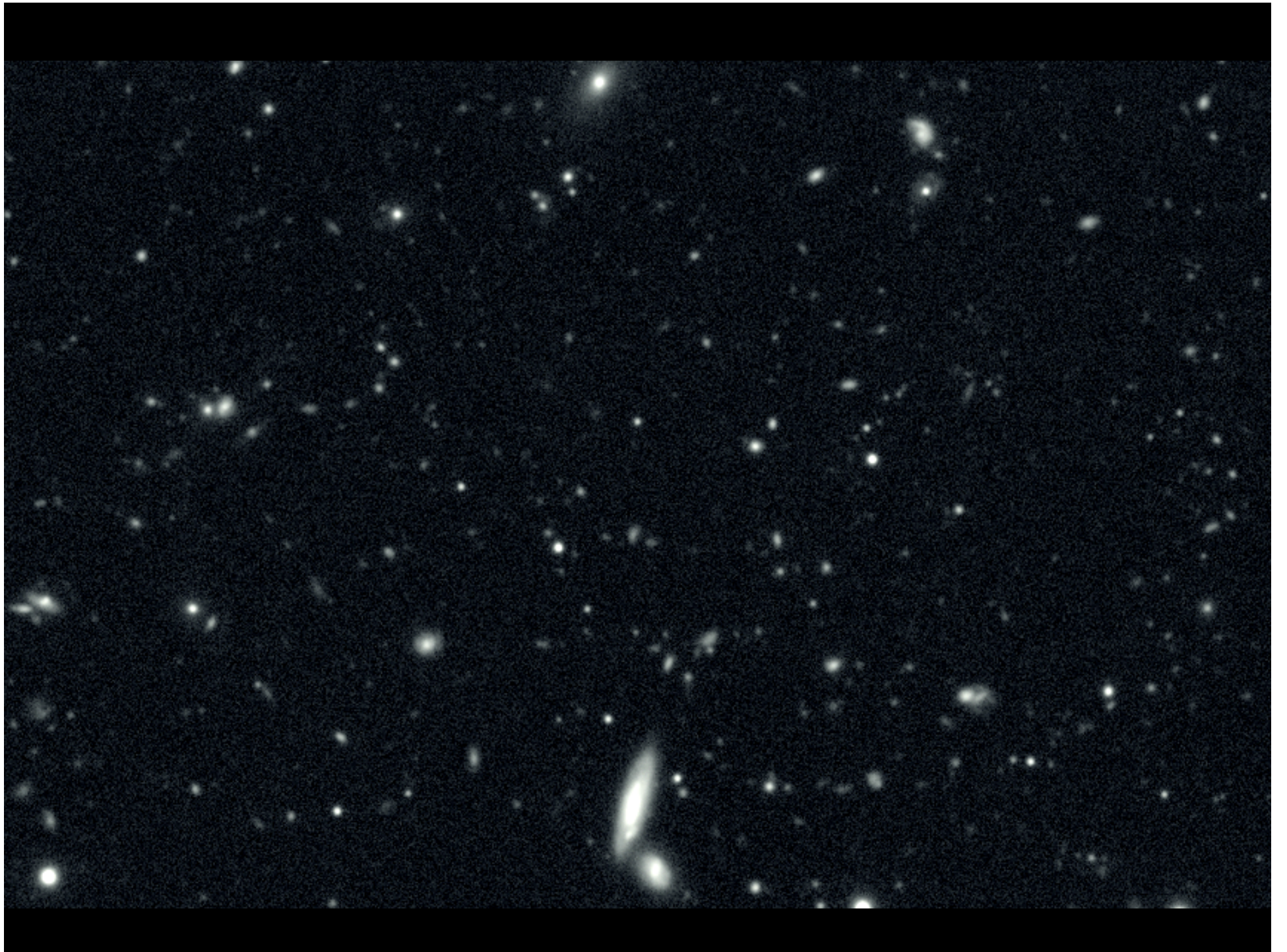
1 PB data will be delivered. → 10 times larger than the largest survey (SDSS).

We need a much faster application system to reduce the images and analyze the data to produce scientific outputs such as the 3D distribution of dark matter (宇宙のダークマター) and determination of the cosmological parameters. (宇宙進化を司る6つのパラメータ)

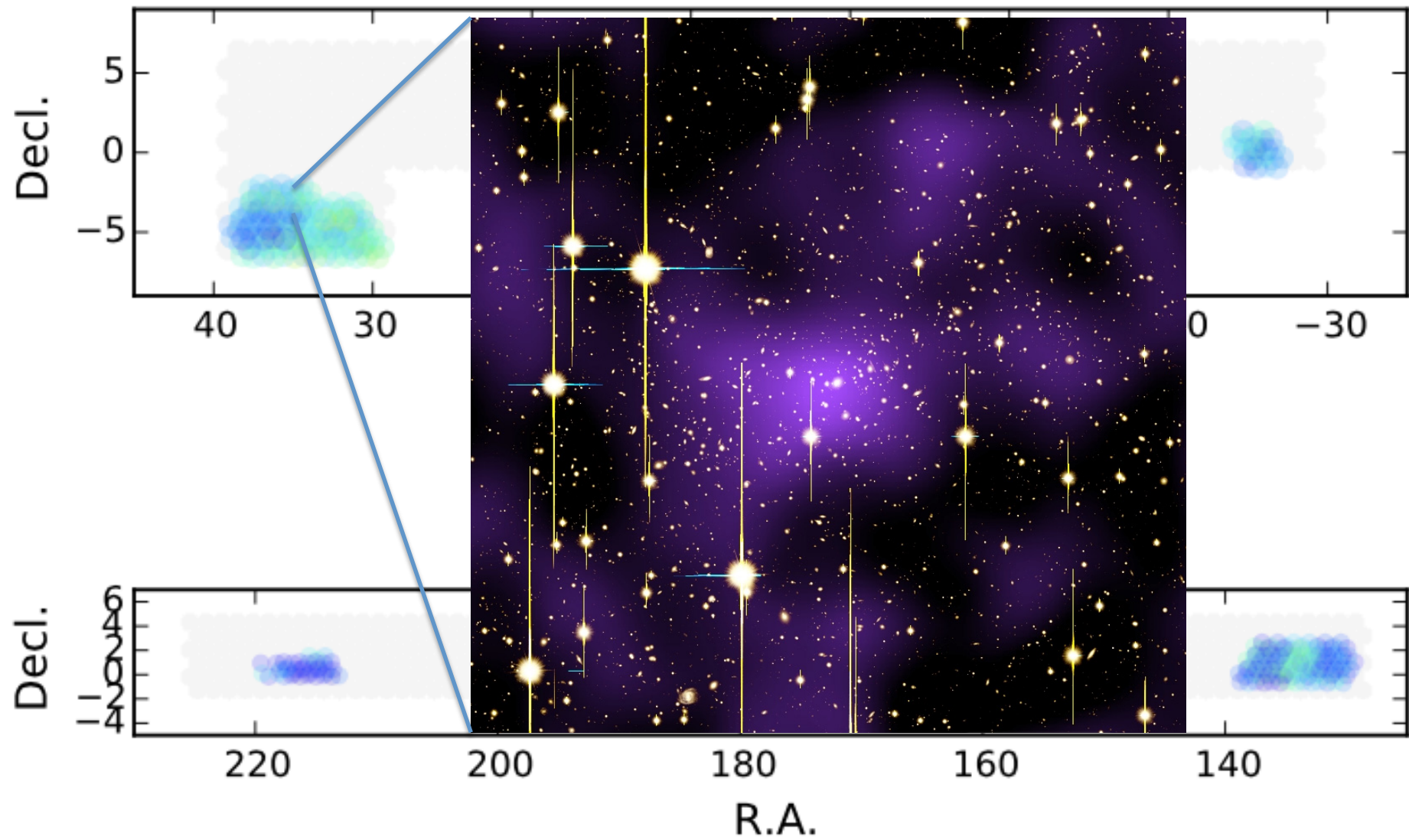
500,000,000 objects (galaxies/stars) will be catalogued on a high-speed database.

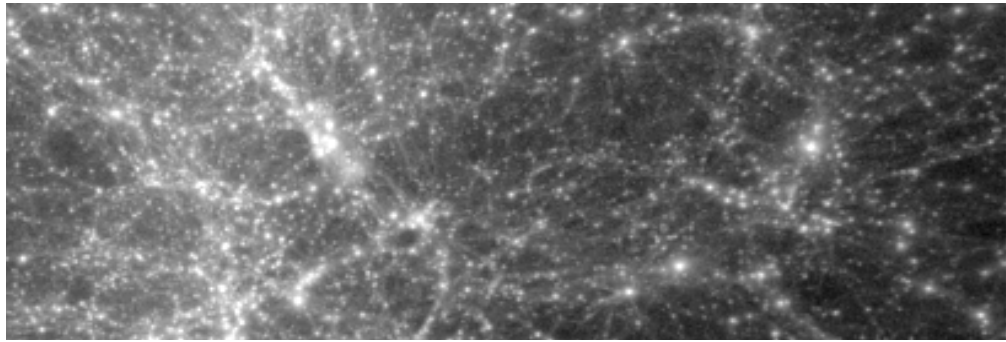






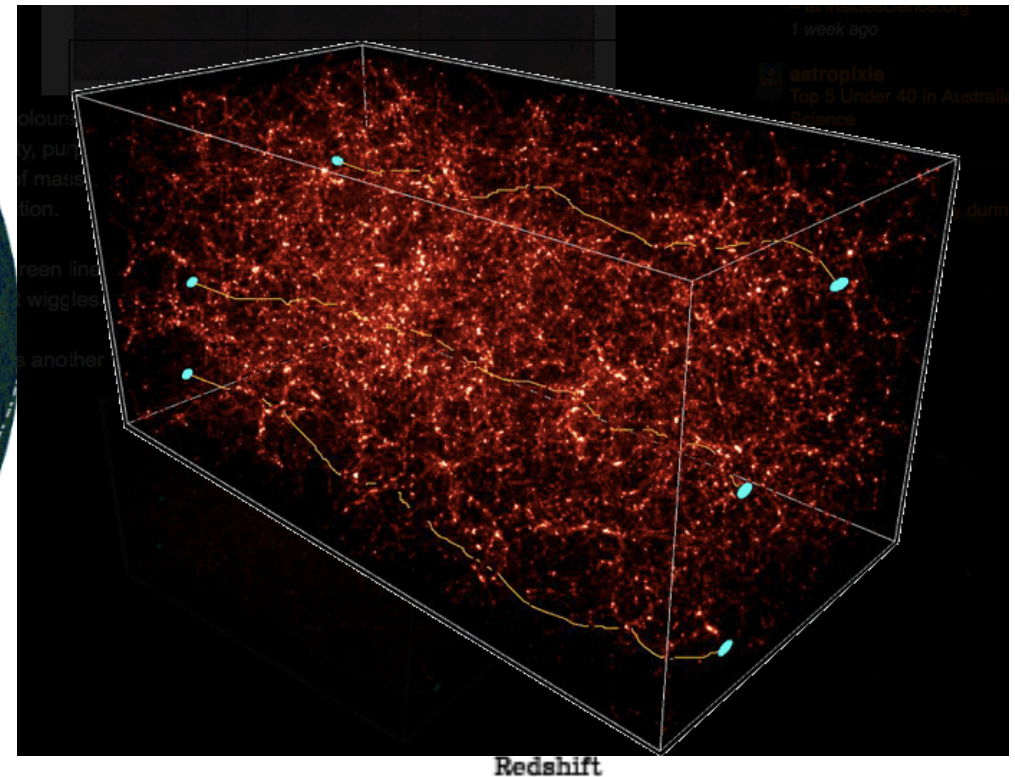
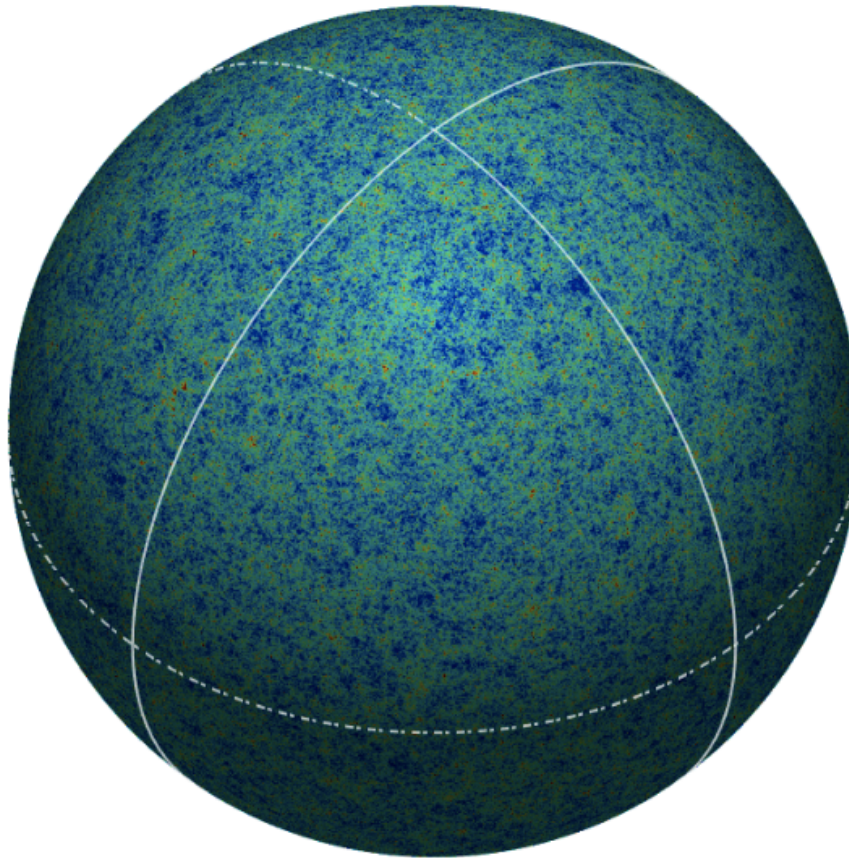
Current Status





Virtual all sky

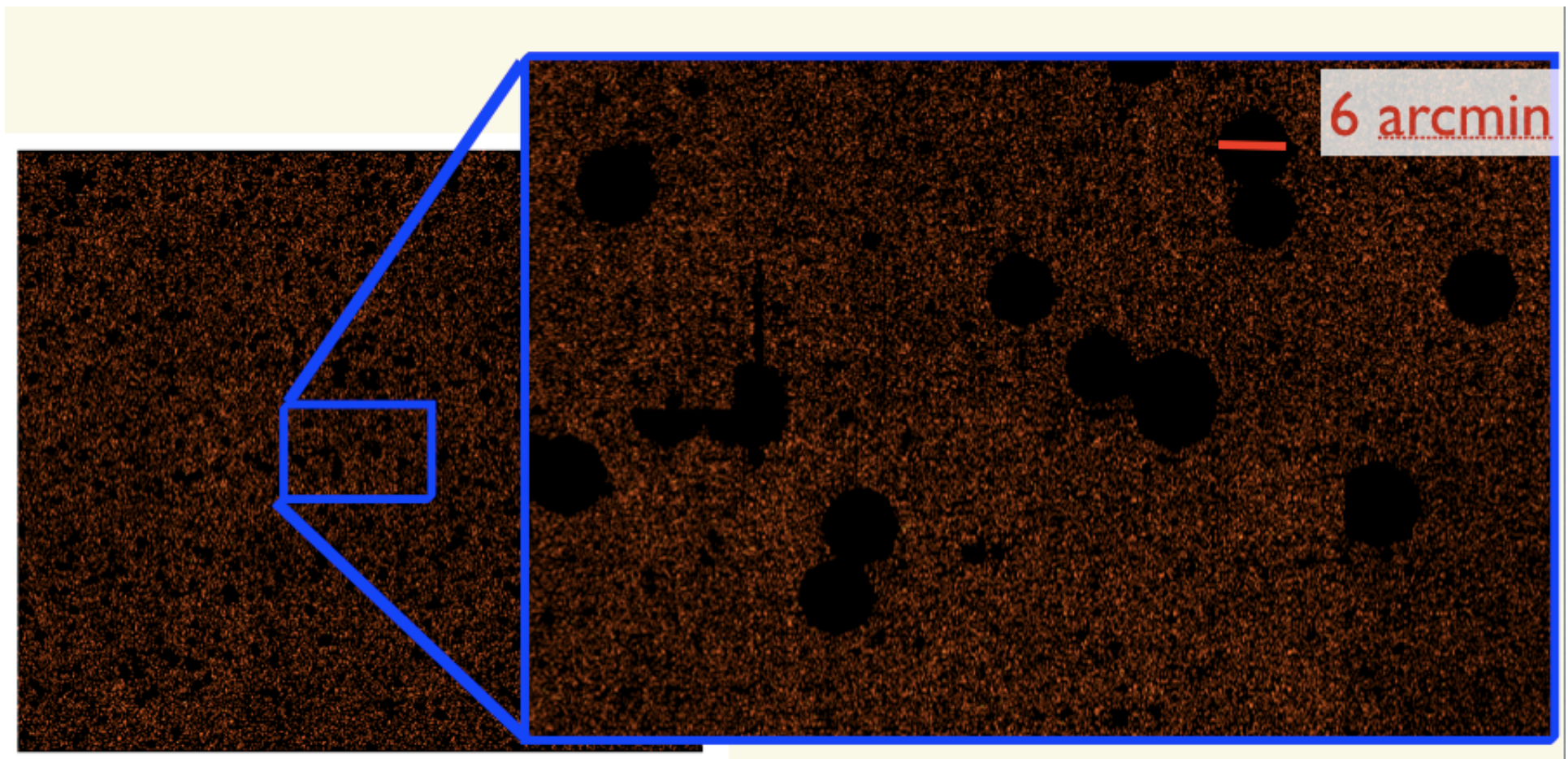
Simulations using
8 billion particles



ポスト京では連続的な光円錐

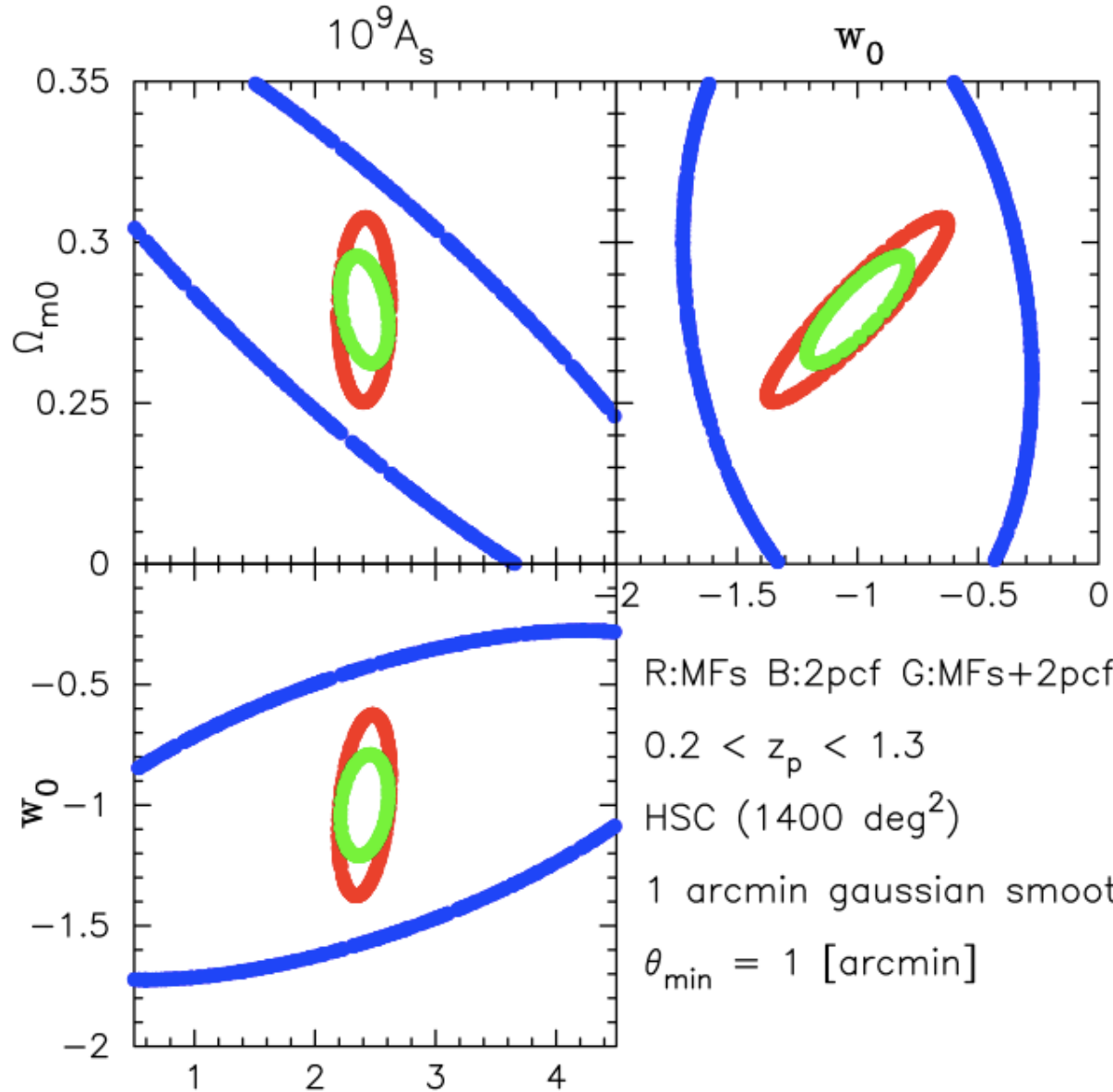
Sky masks, foregrounds, galaxy distribution etc...

実際の観測データ



Sky masks, foregrounds, exposure times, seeing etc...

HSCの測定精度



ダークエネルギー状態方程式

密度パラメータ

現在の宇宙の揺らぎの振幅

物質分布パワースペクトルの共分散行列

宇宙論パラメータを推定する統計解析に必要

Covariance for wavenumbers k_1, k_2 :

$$\begin{aligned}\text{cov}(k_1, k_2) &= \left\langle \left[P(k_1) - \langle P(k_1) \rangle \right] \left[P(k_2) - \langle P(k_2) \rangle \right] \right\rangle \\ &= \frac{2}{N_k} P^2(k) \delta_{k_1, k_2} + T(k_1, k_2) \\ &\quad (\text{Nk : number of modes})\end{aligned}$$

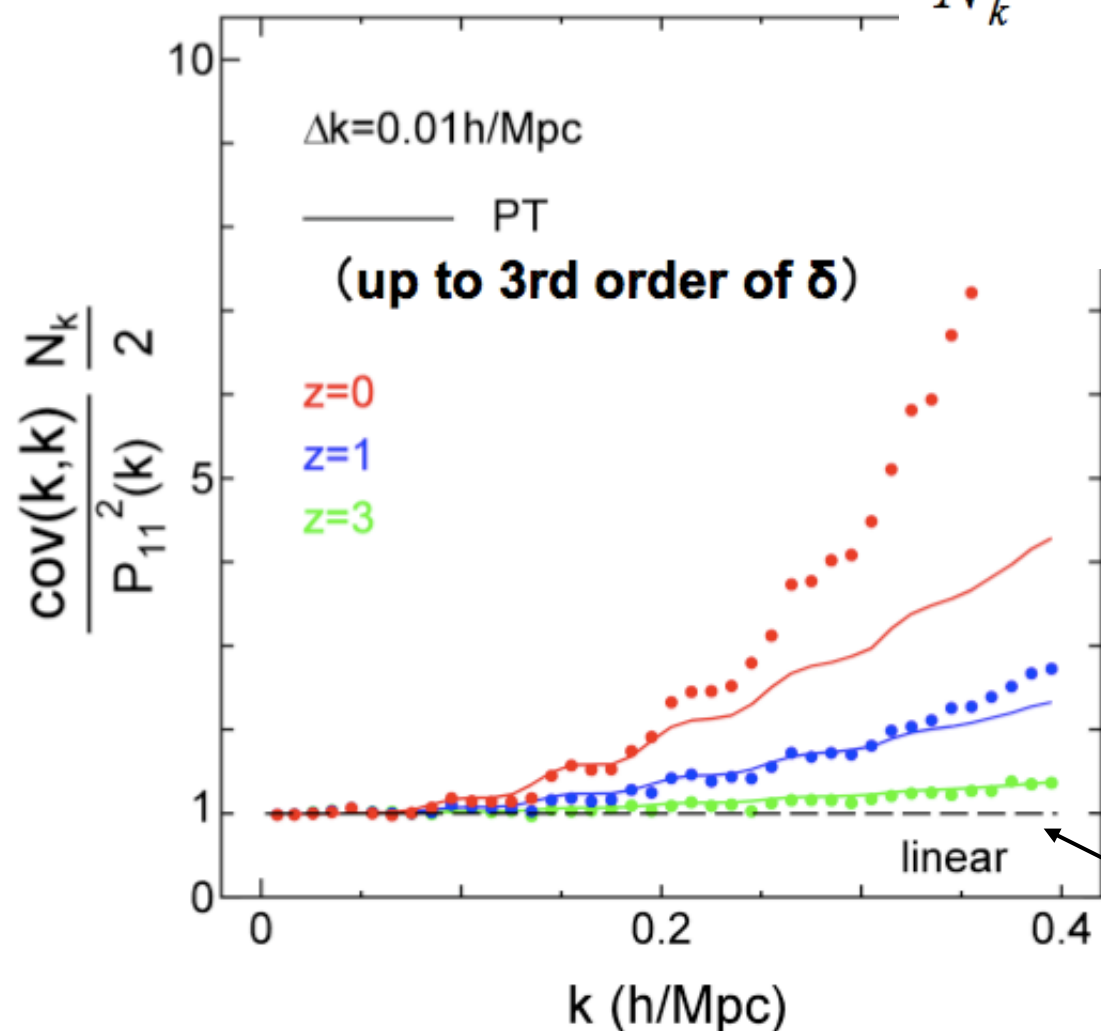
Takahashi, Yoshida et al. (2009)

5000個のリアライゼーション(仮想宇宙)を作り、
非線形シミュレーションから共分散行列を直接計算
5000個は忍耐の限界を遙かに超える数
(最近フランスの郊外の大学の人々が1万個やった。)

対角成分

$$\frac{2}{N_k} P^2 = \frac{2}{N_k} (P_{11} + P_{22} + P_{13})^2$$

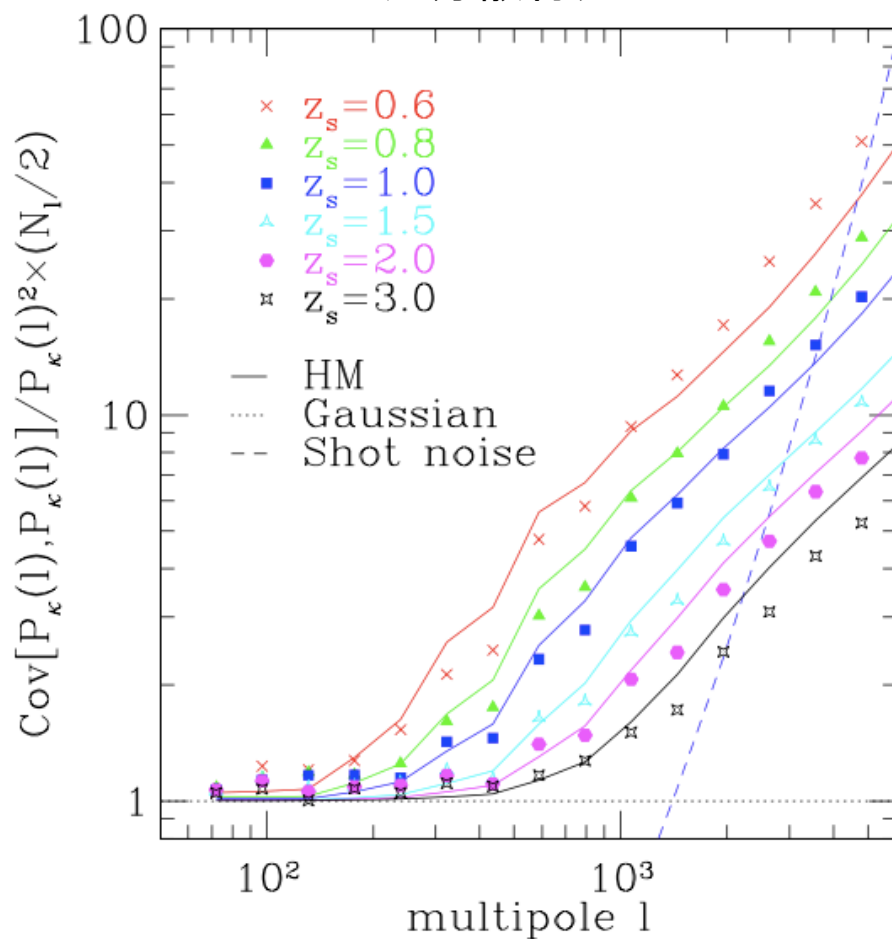
$$\cong \frac{2}{N_k} P_{11}^2 + \frac{4}{N_k} P_{11} (P_{22} + P_{13})$$



摂動理論の予言

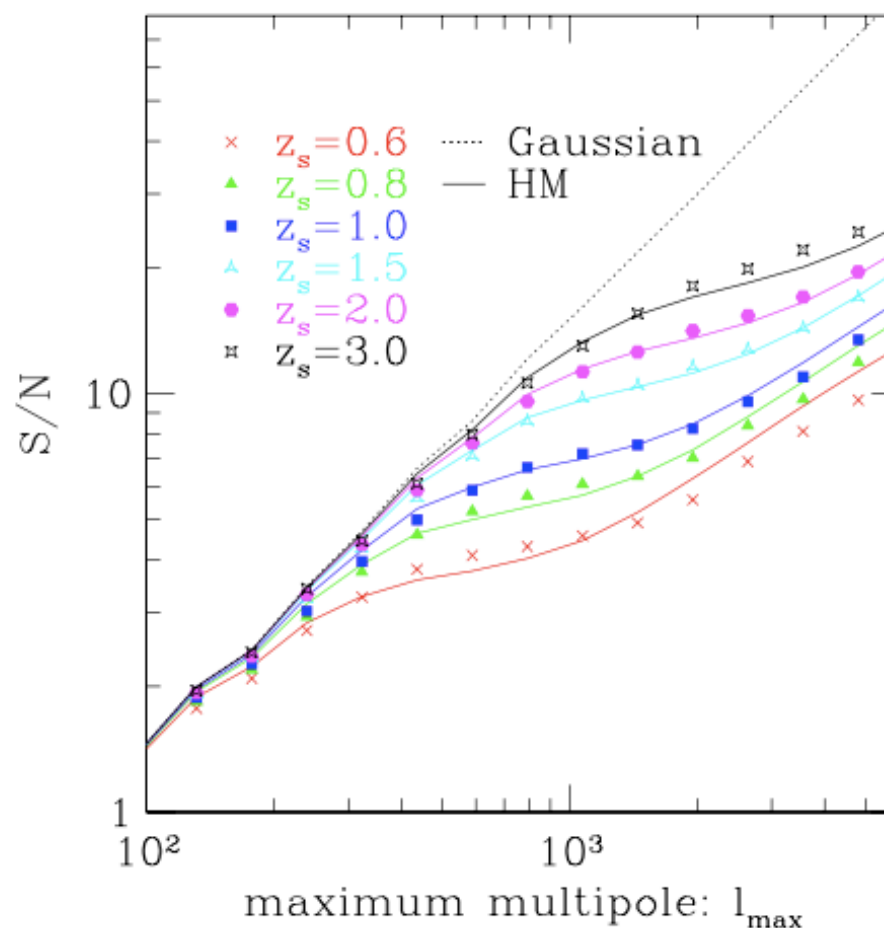
One thousand WL simulations

共分散行列

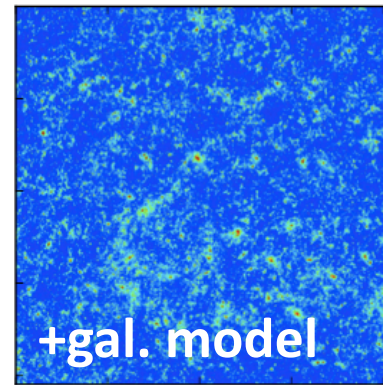
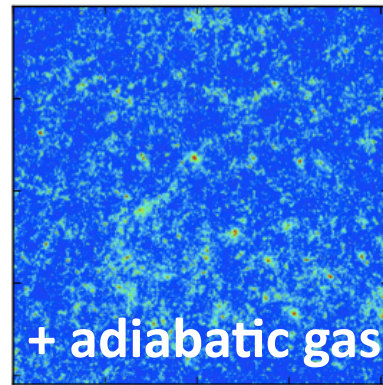
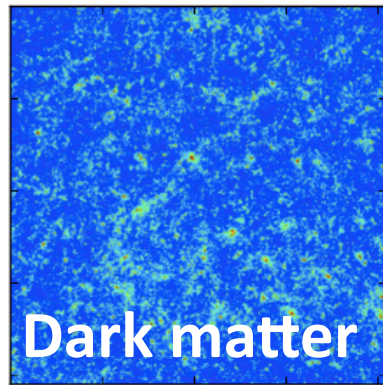


角度スケール → 小

Cumulative Signal to Noise

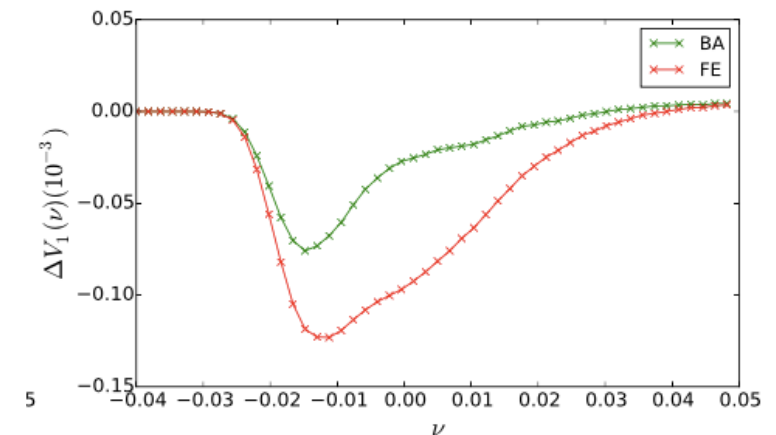
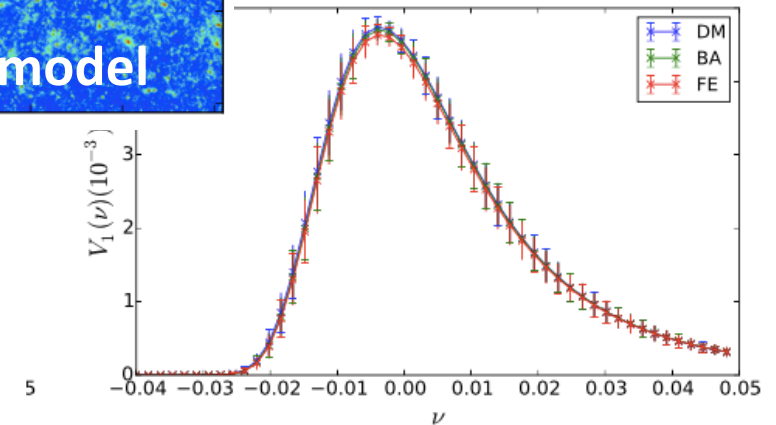
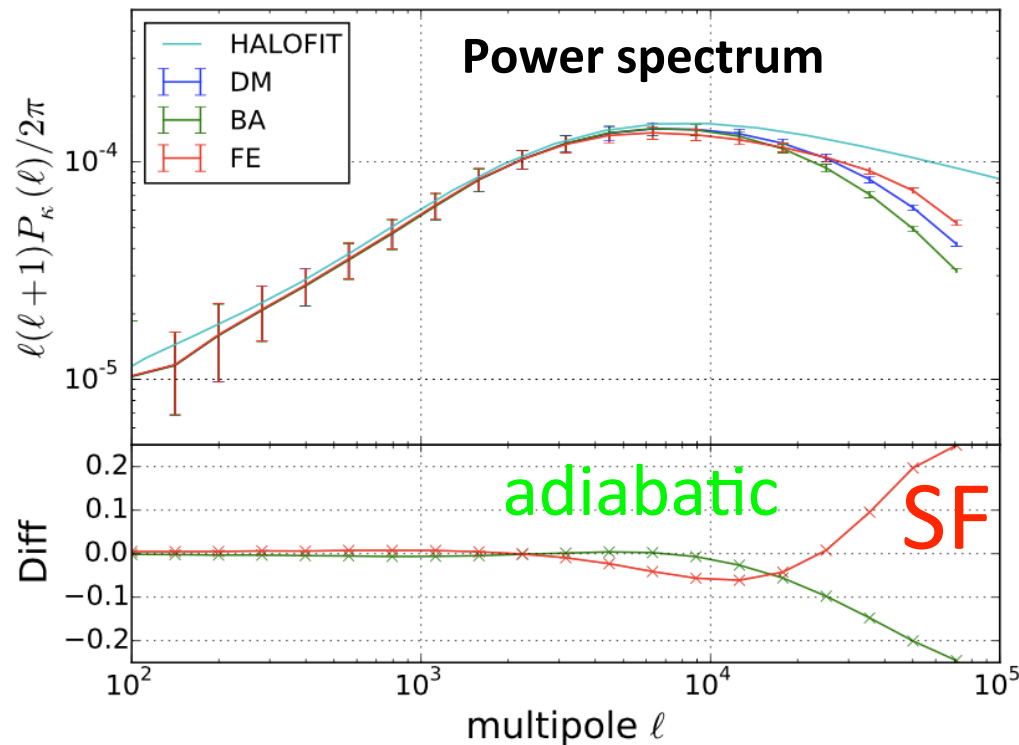


Effect of gaseous component



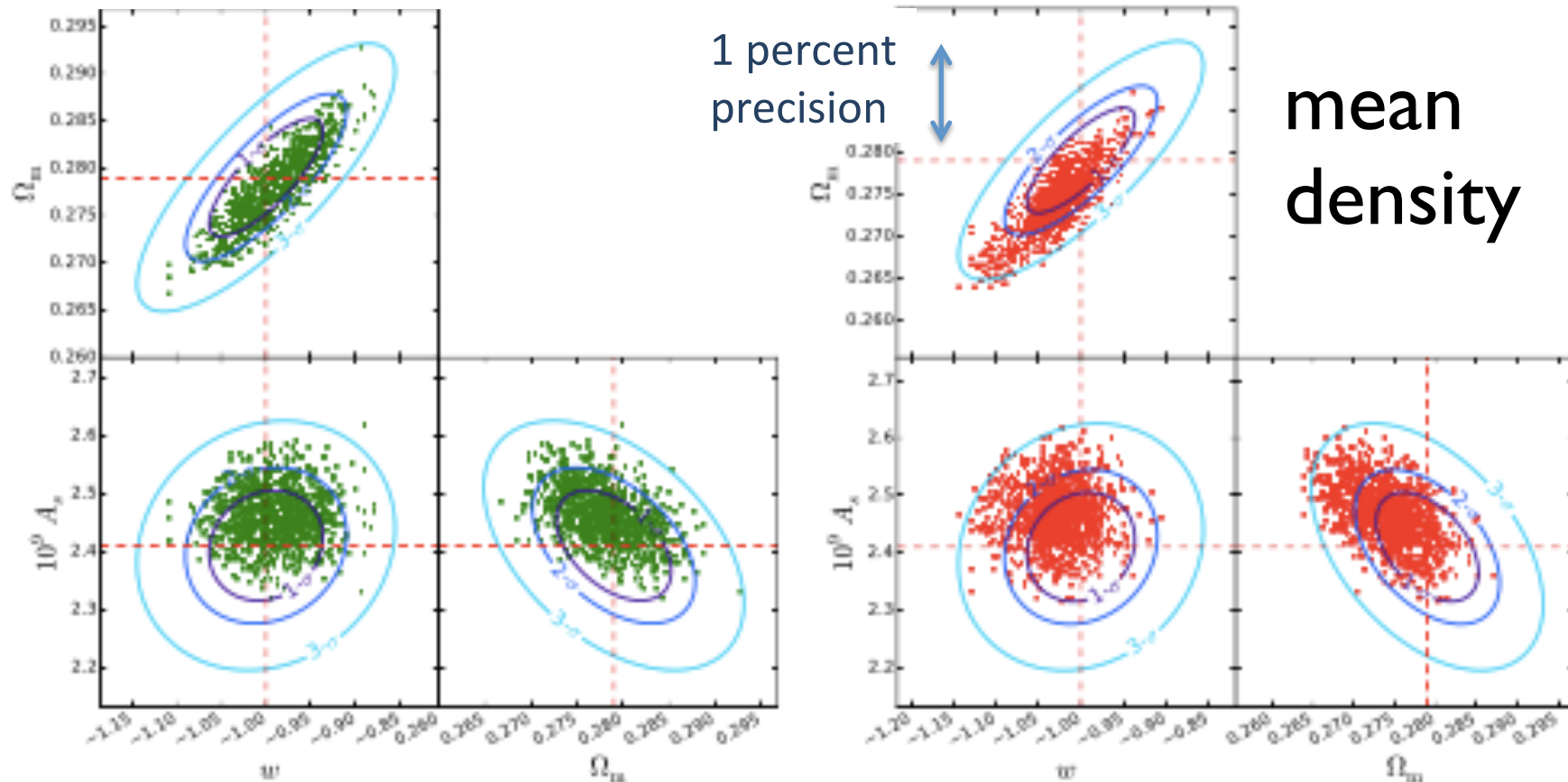
100 simulations
per each model

MF V_0



Effect of Gas

Fisher forecast



**Parameter bias
with respect to naive estimate
from dark matter only simulations**

計算資源見積もり

- 宇宙論的N体計算は京を使うと、400 億粒子ステップ/秒。
- ポスト京の 性能がこの 100 倍になるとすると、2 兆粒子の計算を 50 宇宙モデル(あるいはリアライゼーション)、それぞれ 5 万ステップ 行うとして、必要時間は 14 日。
- 共分散行列などの統計量には100億から数百億粒子の計算で十分。サーベイ終了(2019)までに千個ほどのデータベースを構築。(銀河形成モデルなし)
- HSCサーベイのあとには5年間のPFS分光サーベイを計画