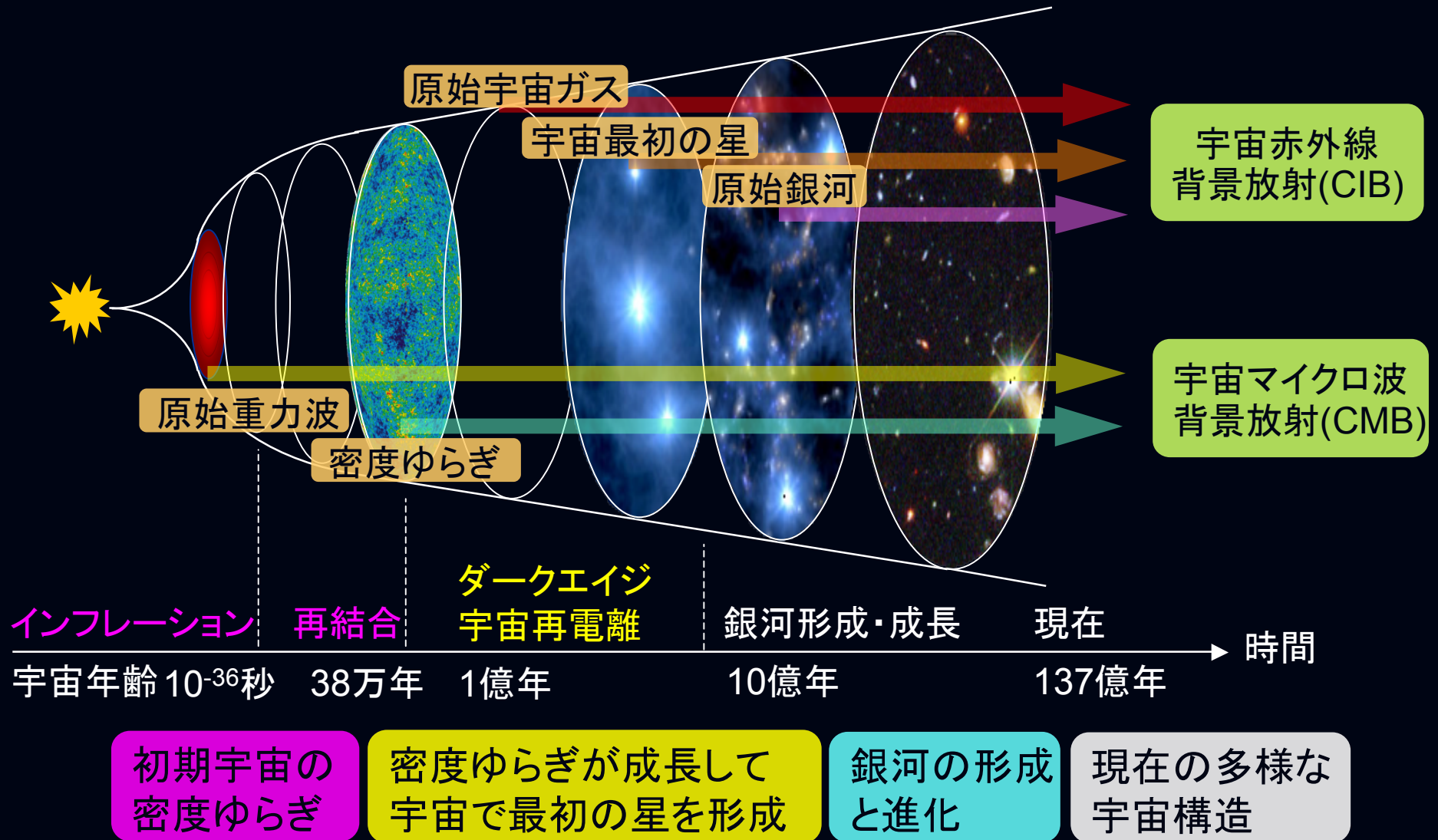


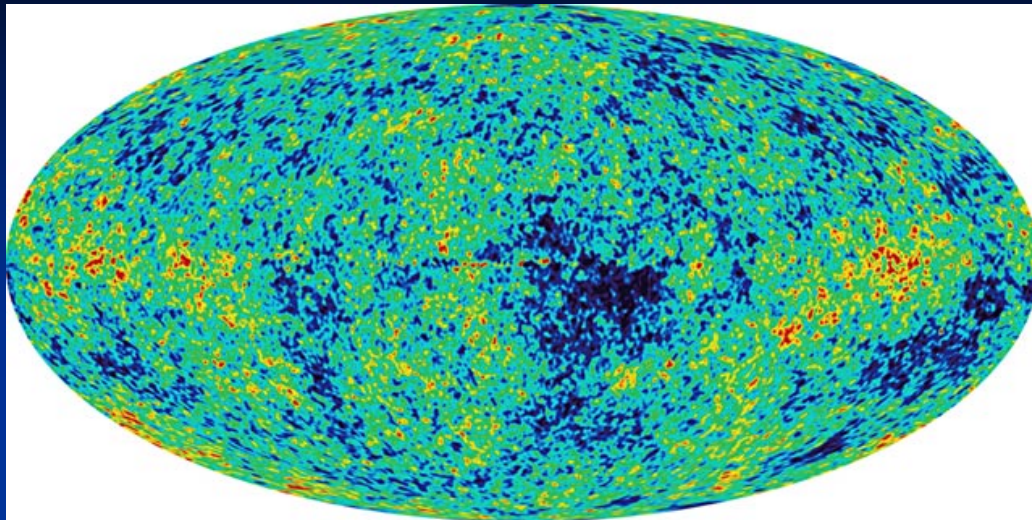
宇宙赤外線背景放射でさぐる 宇宙初期天体

JAXA宇宙科学研究所
赤外・サブミリ波天文学研究系
松浦周二

宇宙創成から銀河形成に至る宇宙史



宇宙再電離・宇宙最初の星(第一世代星)



WMAPによるCMB偏光観測

電離光子による散乱の光学厚さ

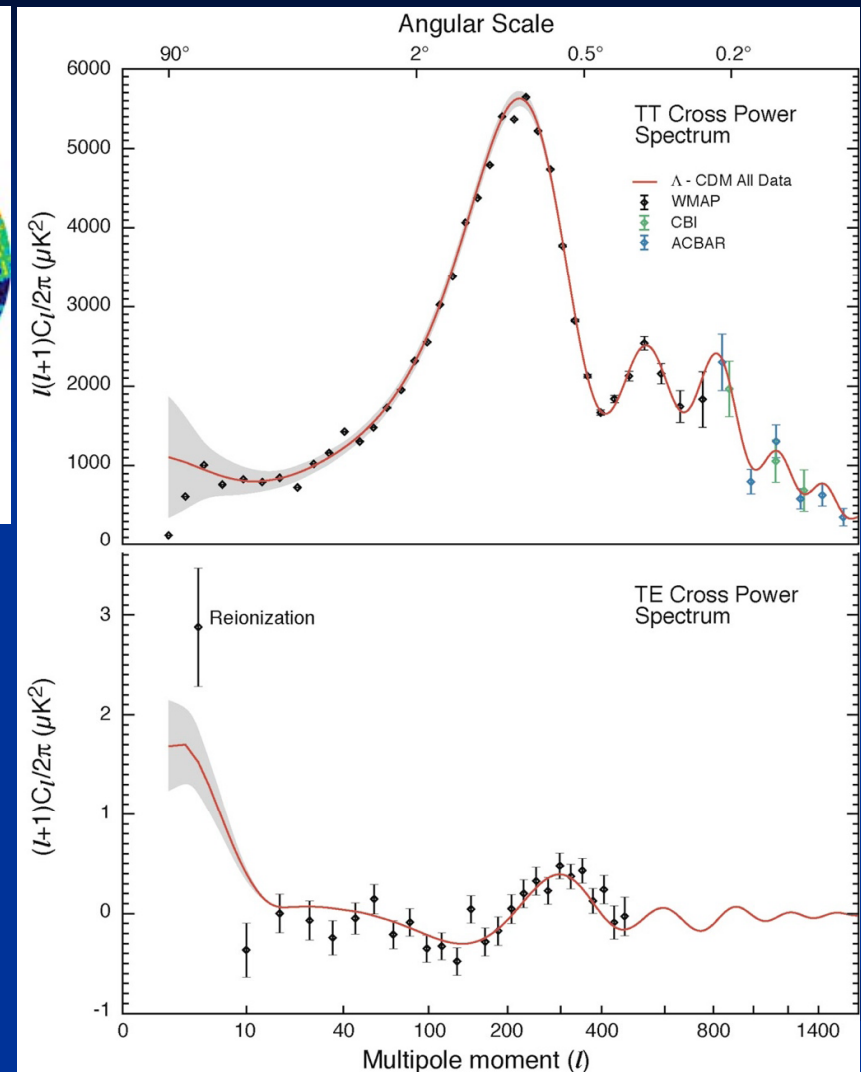
$$\tau = 0.089 \pm 0.030$$

→ $z_{\text{reion}} \sim 11$ 宇宙再電離

現在の宇宙は完全電離状態

再電離源は？

→ Quasar、LAE、遠方銀河、**第一世代星**



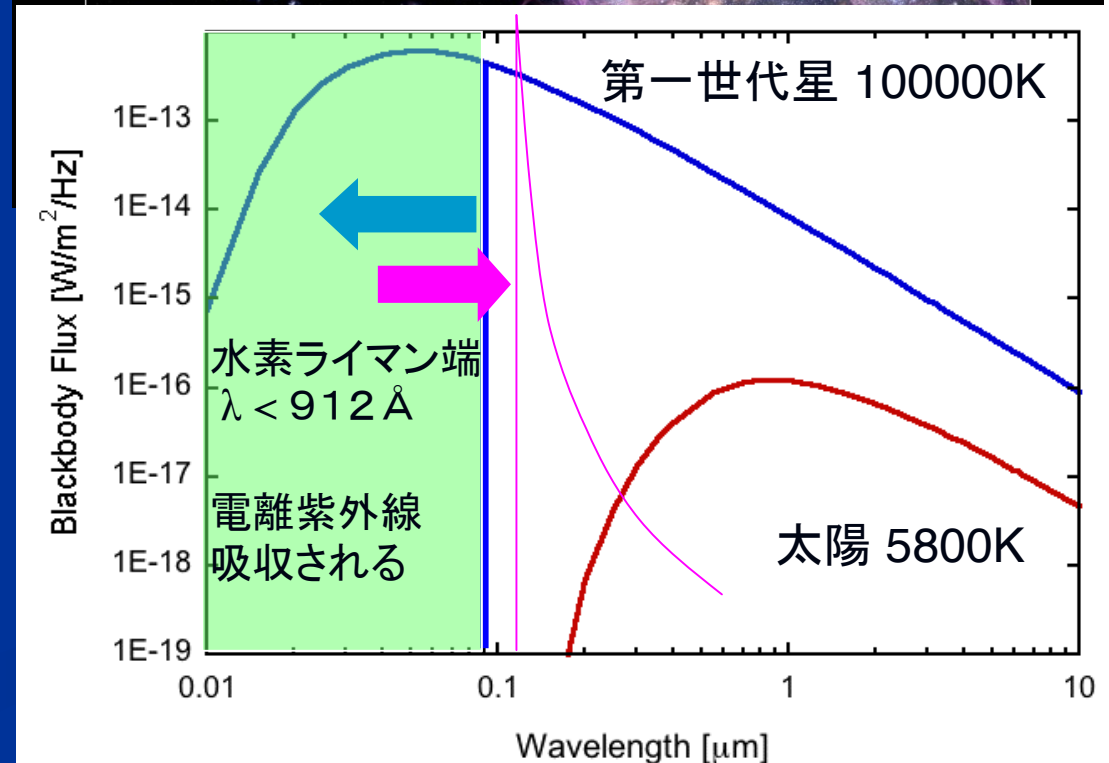
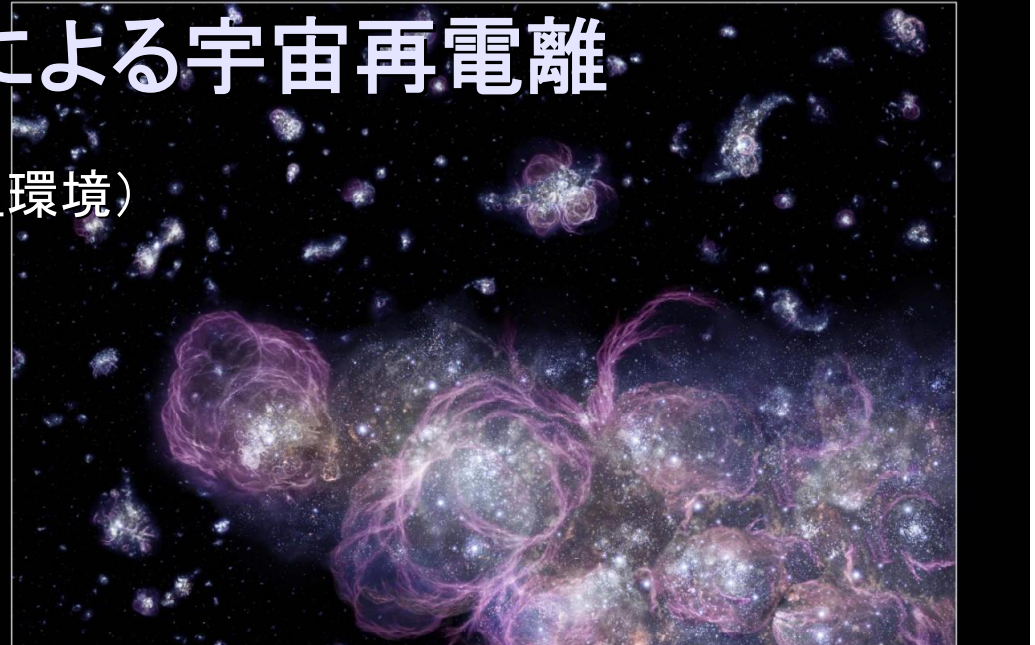
第一世代星による宇宙再電離

- ◆ 初期宇宙の環境(重元素なし・高温環境)
→ 大質量星の形成

- ◆ 高温度星 $T > 10^5$ K
→ 大量の紫外線
→ バリオンの 10^{-5} が星になれば
宇宙全体の電離可能

- ◆ 再結合輝線へエネルギー転化
→ Ly- α 1216 Å
HeII 1640 Å

- ◆ $z > 10$ ならば近赤外波長で観測

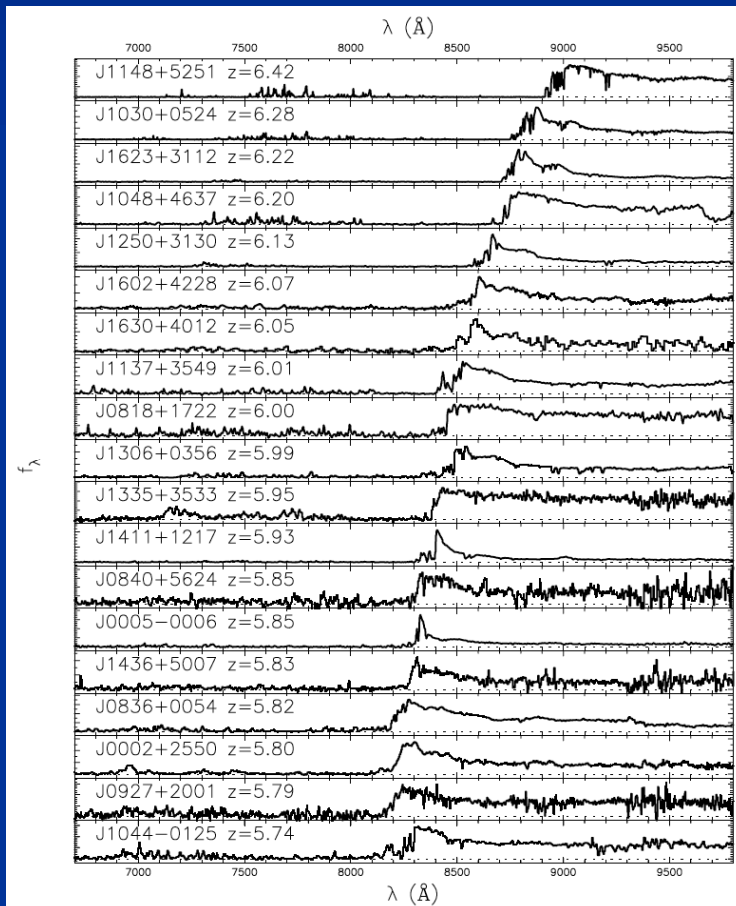


最遠方天体の探査

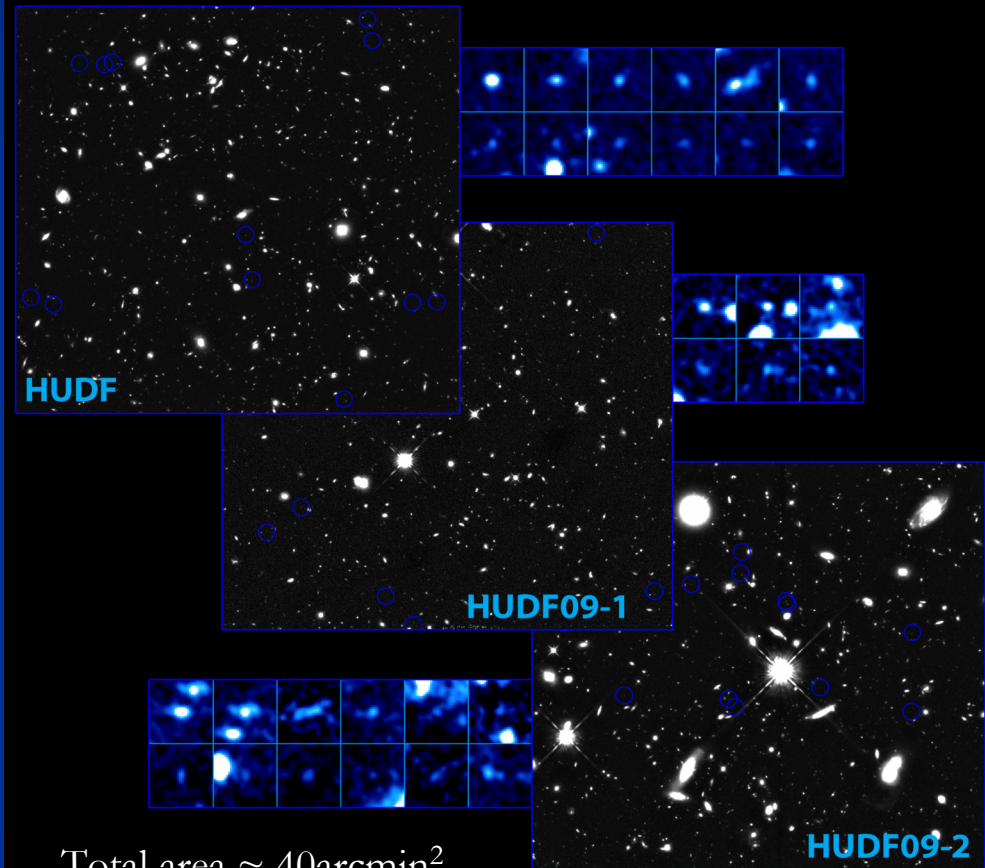
- ◆ 近赤外波長における遠方天体の観測
HST, Keck, SUBARU, ELT. . .
- ◆ Quasar $z = 6.4$, LAE $z = 7$, GRB $z = 8.3$
- ◆ 銀河 $z \sim 10$?



HUDF: Hubble Ultra-Deep Field



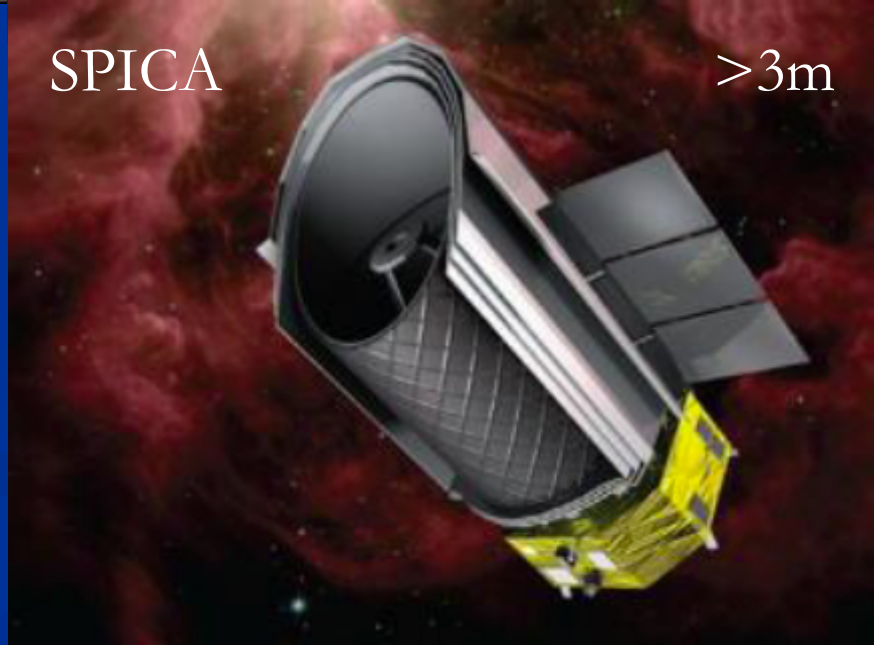
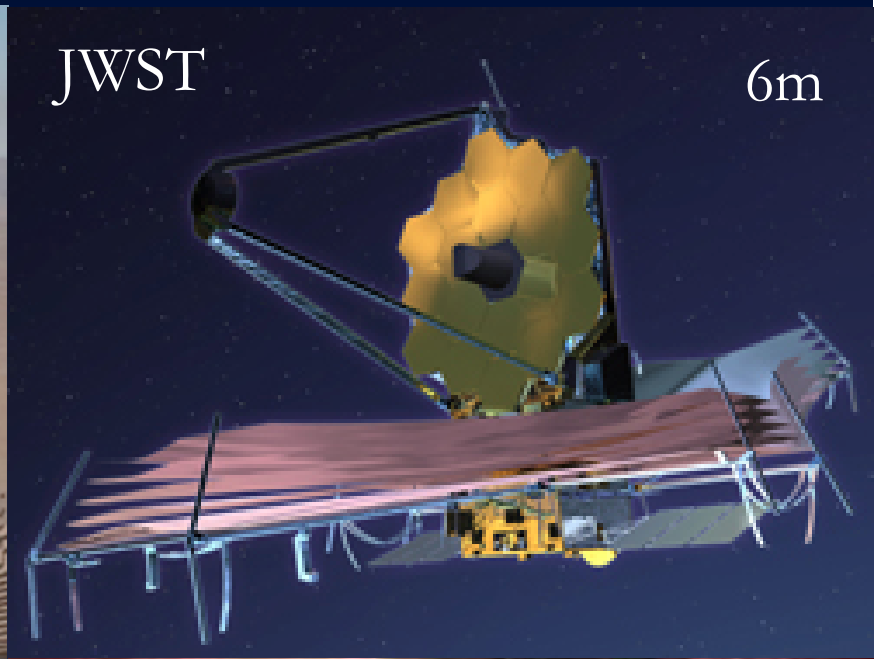
Fan et al., ApJ, 2004, 2006



HUDF09 HST WFC3/IR $z \sim 8$ Galaxies

Credit: G. Illingworth, R. Bouwens, D. Magee (University of California, Santa Cruz), NASA

$z \sim 10$ の第一世代星は個別検出できるか？



第一世代星 ($z = 10$)

→ 次世代巨大望遠鏡: EELT, GMT, TMT, JWST, SPICA,

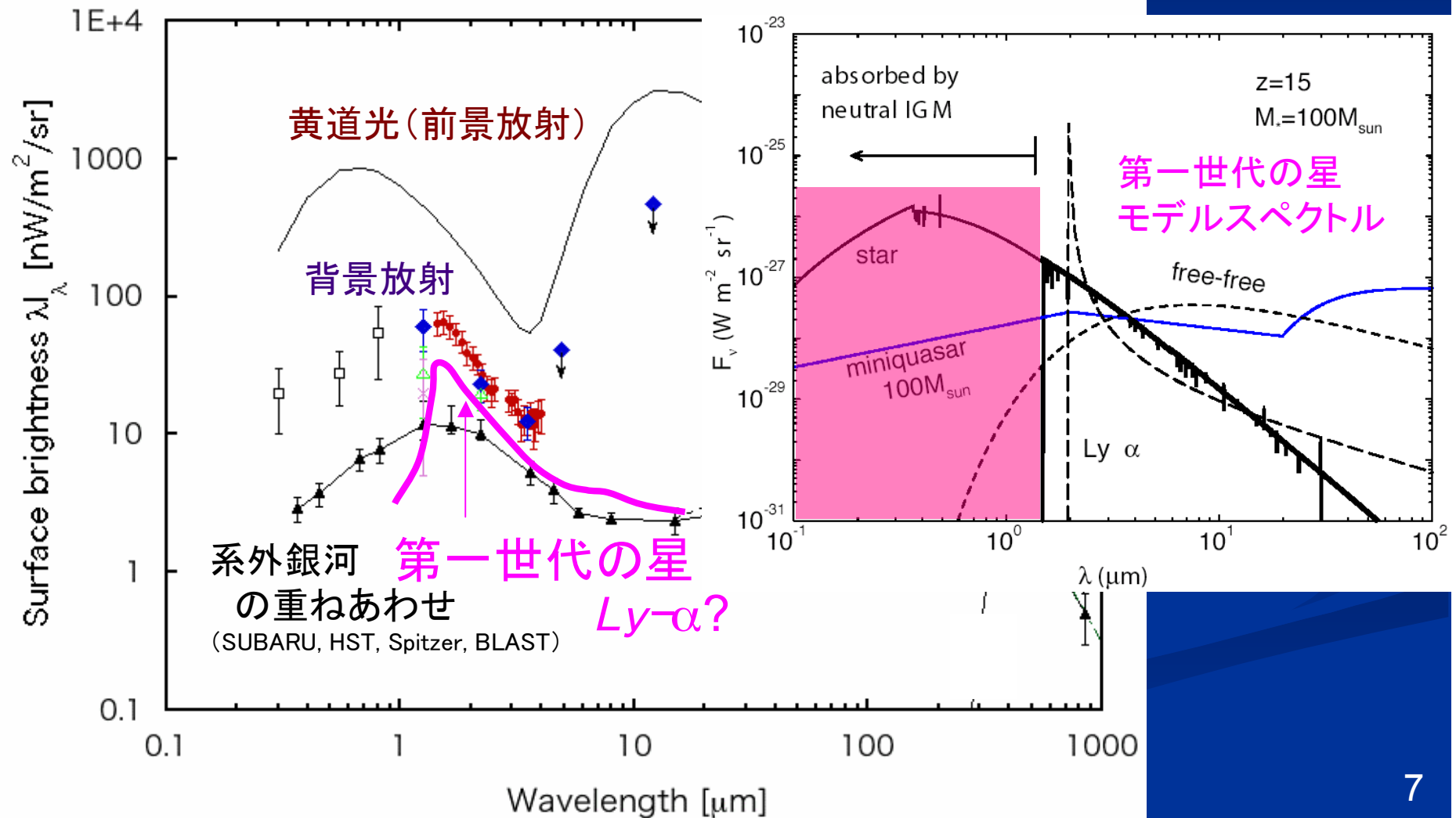
… ですら個別の星検出は困難

→ 星団や矮小銀河としてならば可能

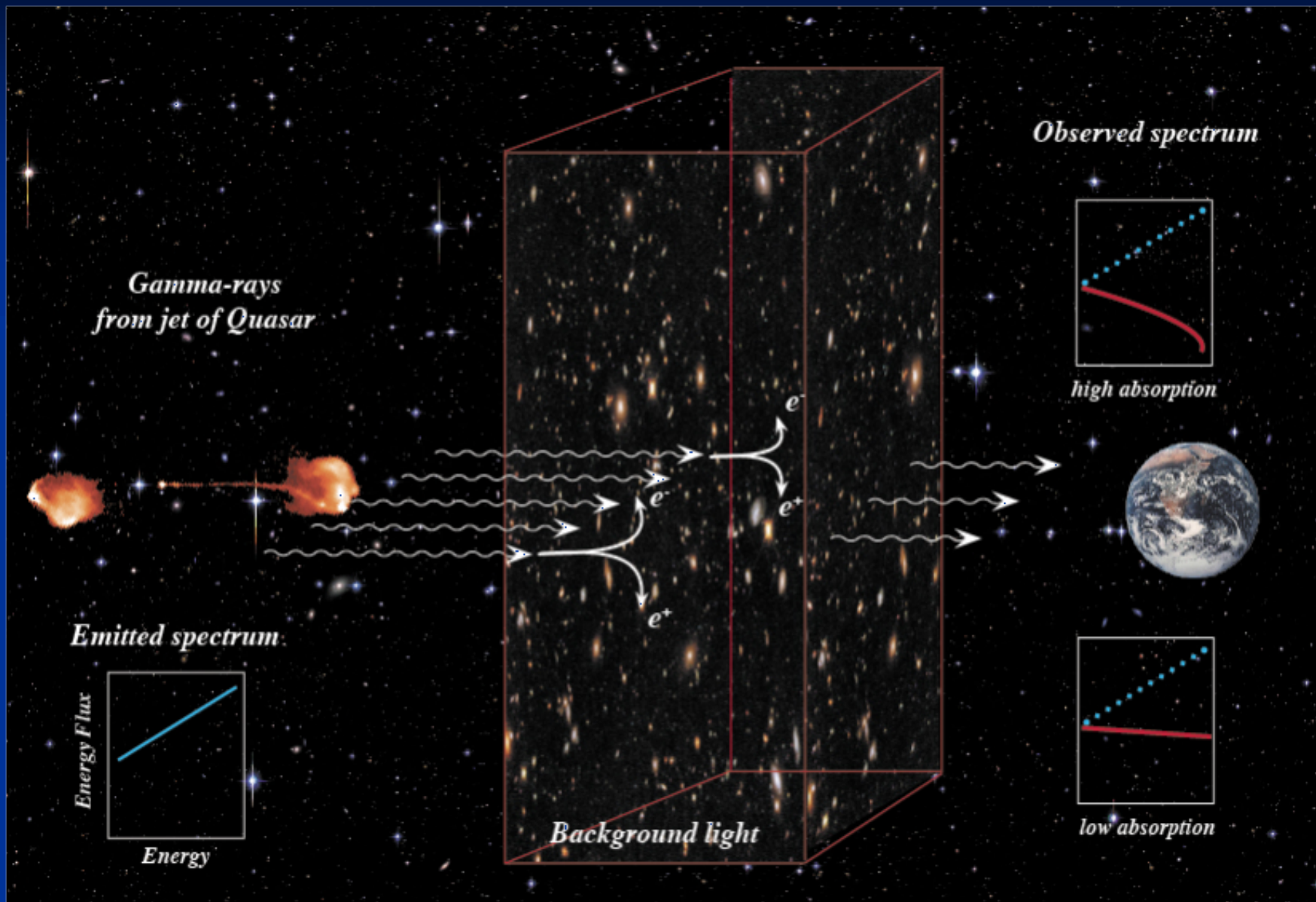
宇宙背景放射としてならばより容易

宇宙背景放射観測の現状

- 宇宙赤外線背景放射 (CIB : Cosmic Infrared Background)
- 前景放射: 太陽系 (黄道光)、銀河系 (星、星間ダスト放射)
- 近赤外域には銀河の重ねあわせでは説明できない **超過成分**

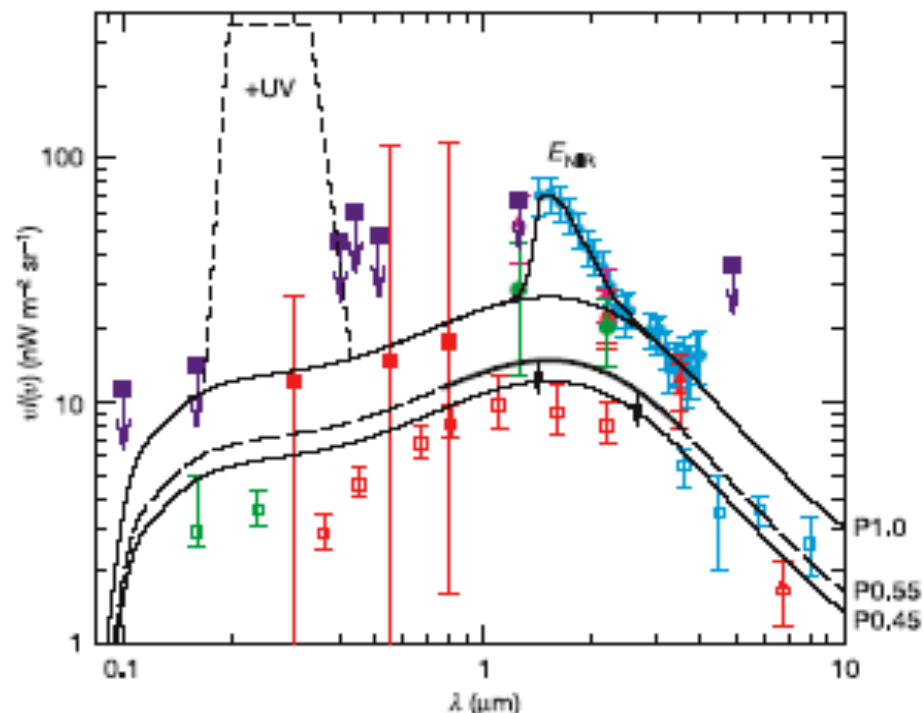
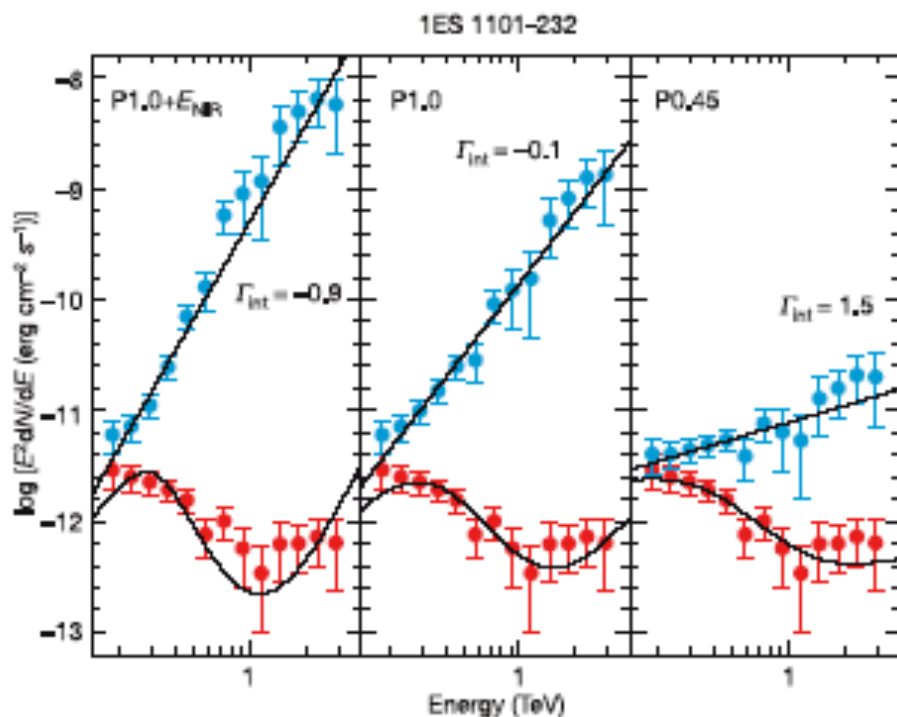


TeVガンマ線の銀河間吸収によるCIBの測定



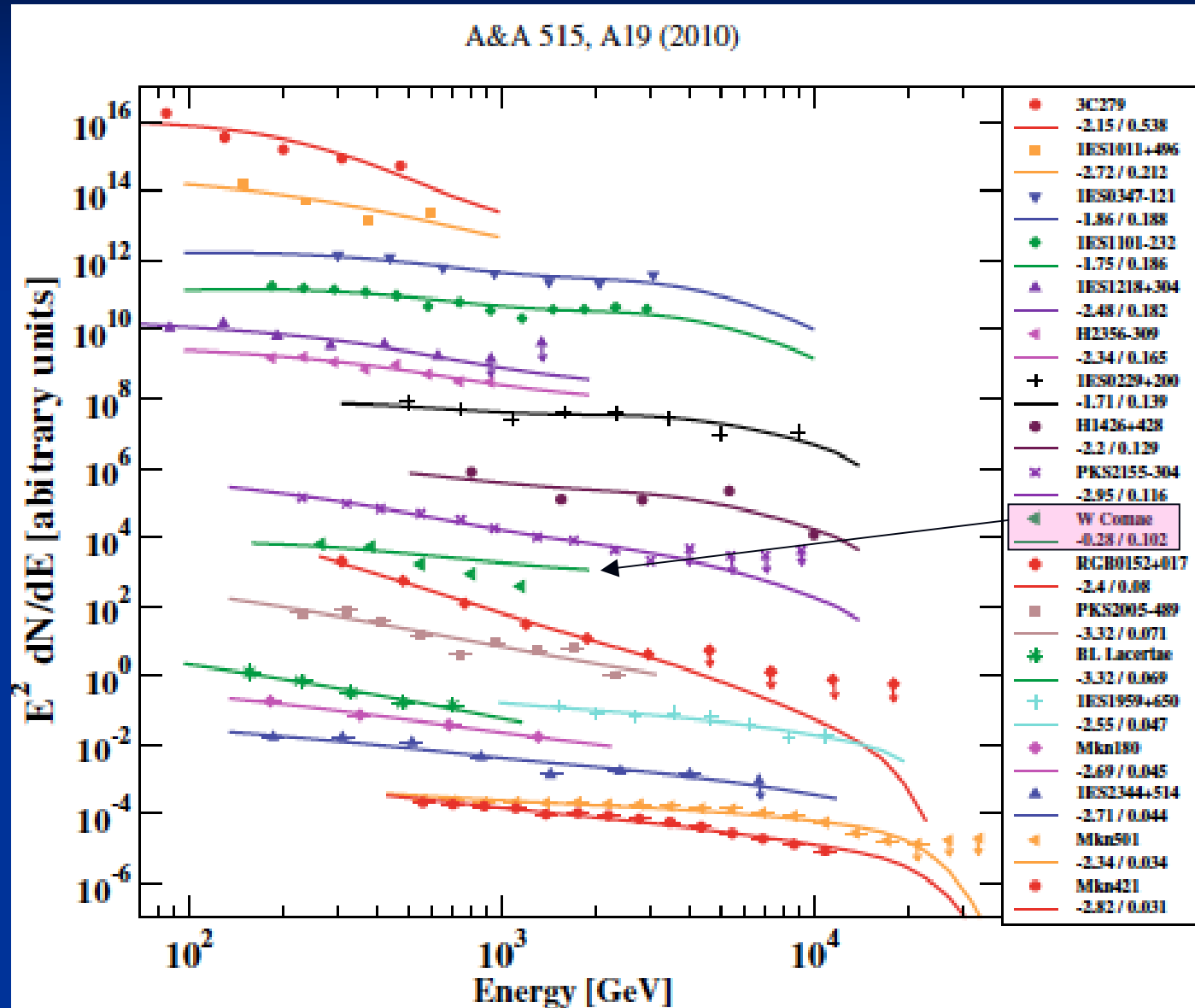
TeVガンマ線の銀河間吸収によるCIBの測定

- $\gamma(\text{TeV}) + \gamma(\text{NIR}) \rightarrow e^- + e^+$ による銀河間吸収, $E(\text{NIR}) \times E(\text{TeV}) \sim (2m_e c^2)^2$
 - 空気チェレンコフ望遠鏡 HESS
 - Blazer : 1ES 1101-232 ($z = 0.186$), H 2356-309 ($z = 0.165$)
 - 吸収前スペクトルとしてべき乗($dN/dE \propto E^{-\Gamma}$)を仮定, Γ が異常でないかにより判断
- 結果
- 超過をもつ背景放射観測値 $\rightarrow \times$: 観測や理論($\Gamma > 1.5$)から大きく逸脱
 - 超過なし、銀河カウントのみ $\rightarrow \circ$: 矛盾がない



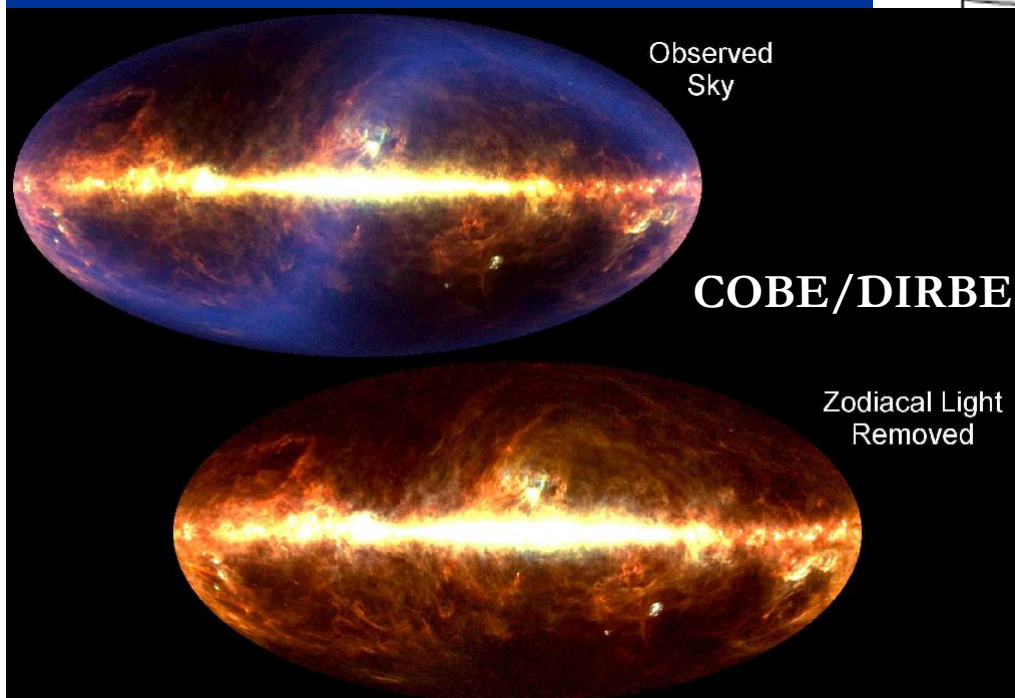
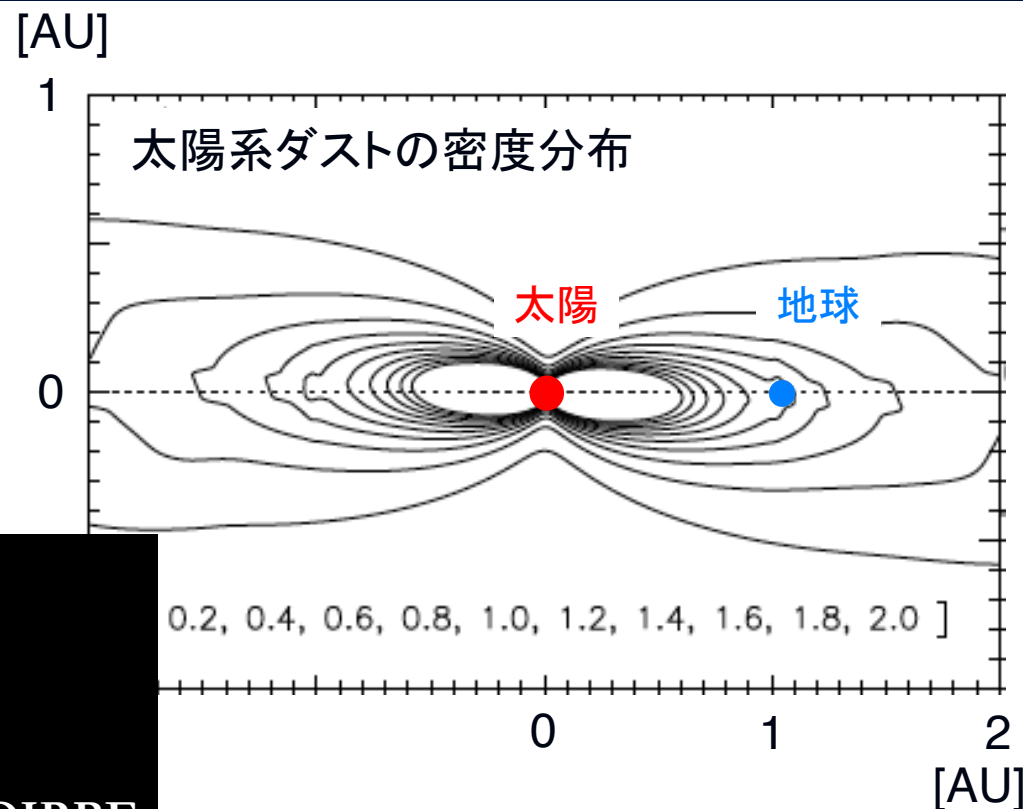
TeVガンマ線の銀河間吸収によるCIBの測定

- さまざまな吸収量(距離)における観測と多くのサンプル
- $\Gamma < 1.5$ は一例のみ → やはりCIB直接測定との矛盾するようである



超過成分は本当に銀河系外起源か？

- 銀河系内放射は微弱、かつ不定性が小さい
- 太陽系内前景放射(黄道光) COBEデータに基づくモデル → 不定性 最大10%



黄道光はCIBより1桁明るい
→ $\lambda I_\lambda \sim 30 \text{ nW/m}^2/\text{sr}$
($\lambda = 1 \sim 1.5 \mu\text{m}$)

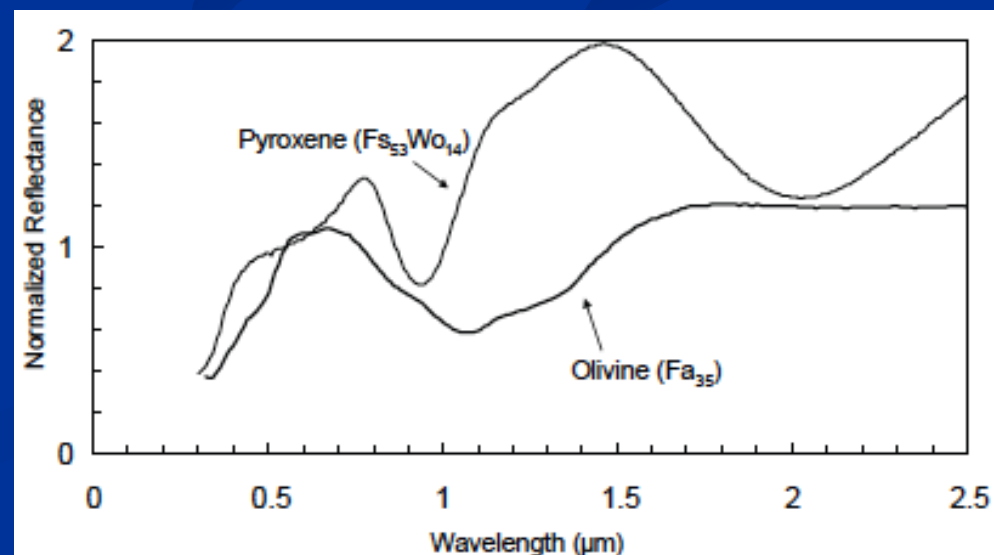
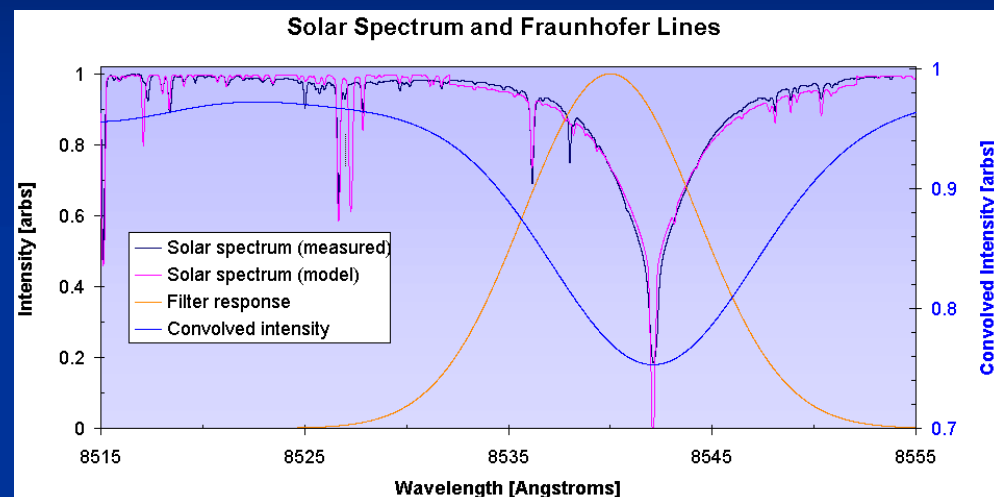
CIB超過成分と同程度
黄道光の差引精度がカギ

黄道光の影響が小さいCIB観測方法(I)

黄道光： 太陽光のダストによる散乱

吸収線／吸収帯の深さを指標に観測値への黄道光の寄与を推定

- フラウンホーファー線の測定
狭帯域分光観測
可視域で地上観測の例あり
(Bernstein et al. 2002など)
 - ダスト鉱物吸収の連続分光
広帯域連続分光観測
スペースからの観測が必須
- 両者とも1 μm 付近の観測なし

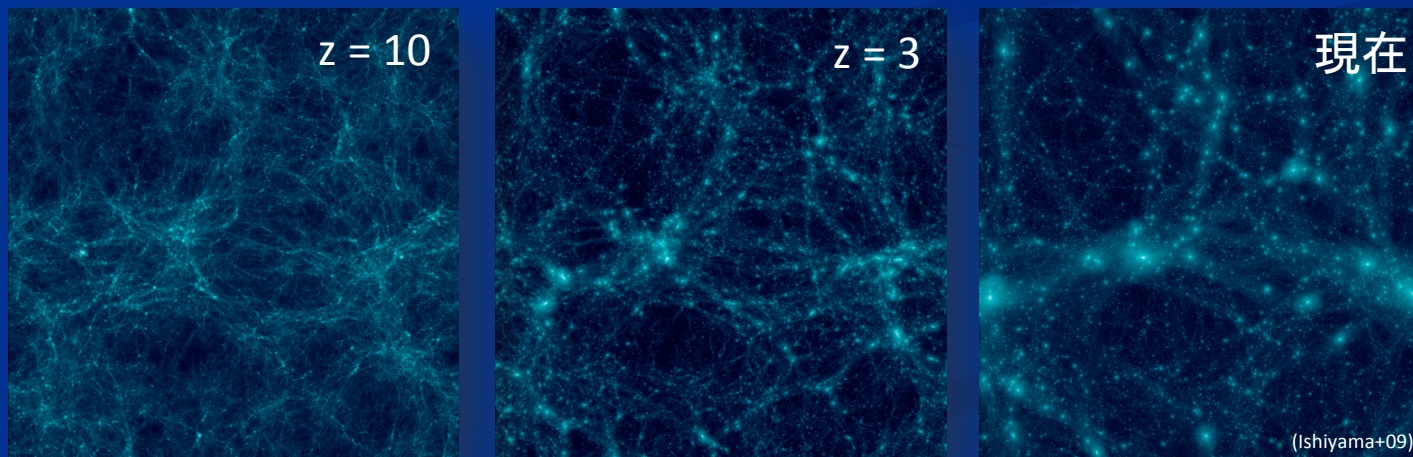


黄道光の影響が小さいCIB観測方法(II)

CIBゆらぎ測定 ∵ 黄道光のゆらぎは極めて小さい
ダスト熱放射成分の観測 $\Delta I/I \sim 10^{-4}$

■ 第一世代星の分布

宇宙初期の線形成長段階にあり、ダークマター分布に従う
CIBゆらぎの角度スペクトルから宇宙初期である検証が可能

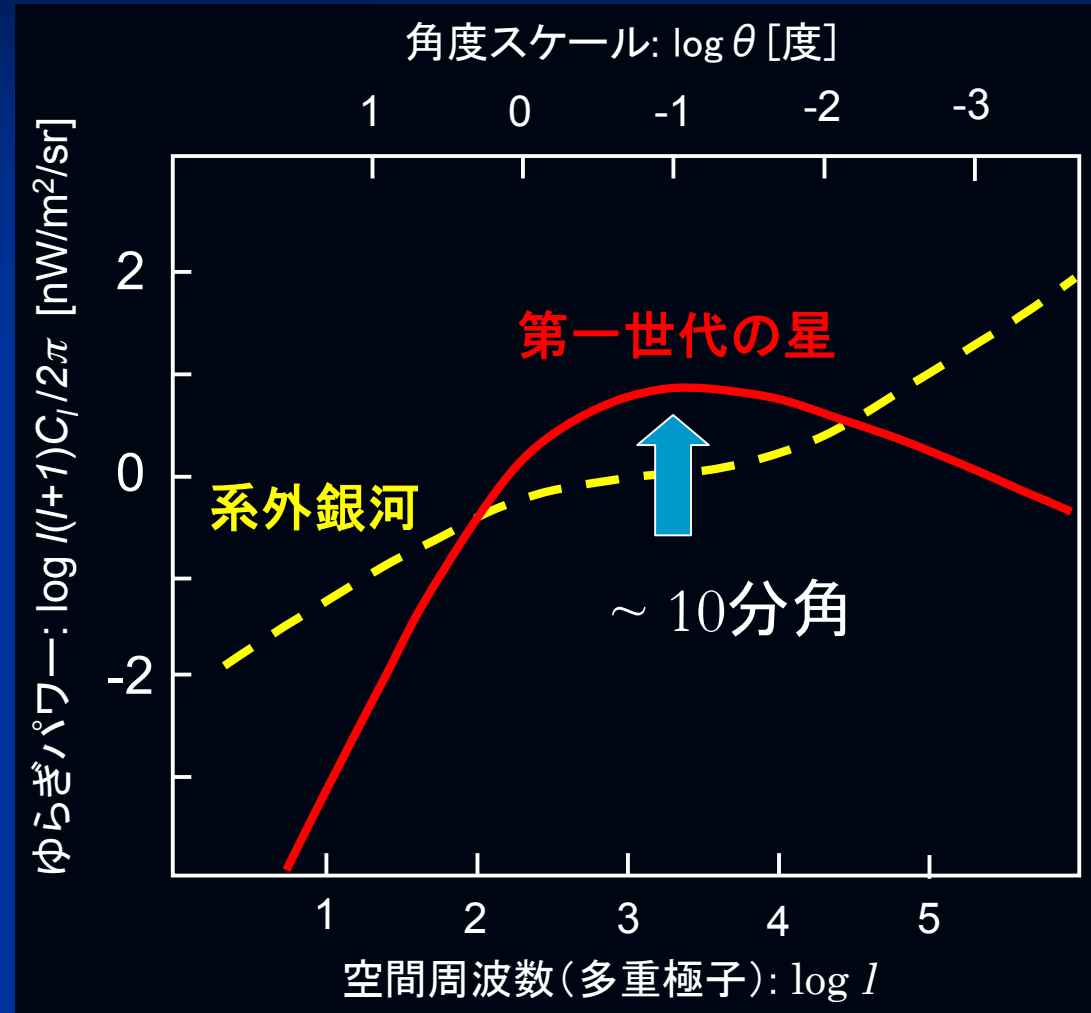


シミュレーションによるダークマター分布の進化

CIBゆらぎの角度スペクトル

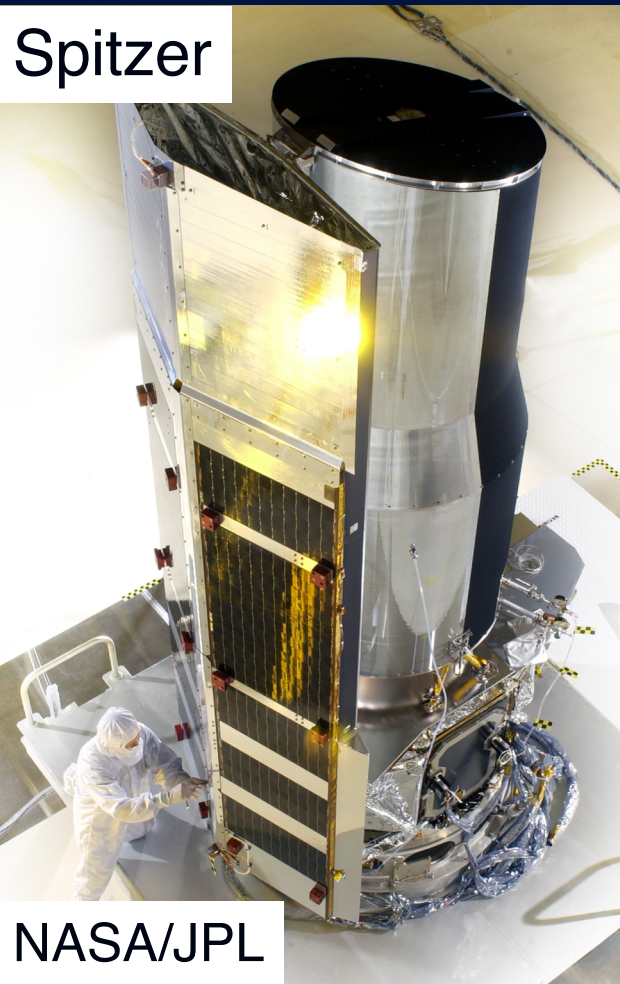
- **第一世代の星:**
線形成長段階
ダークマター分布
- **系外銀河の分布:**
バリオンの放射関与
非線形成長
小角度クラスタリング

特に10分角スケールの
ゆらぎ測定が重要



IRTSやCOBEよりもはるかに高い角分解能が必要

Space Infrared Telescopes



Launch: 2004
Telescope: 85cm ϕ
Wavelength: 3.5-200 μ m
Pointed observations

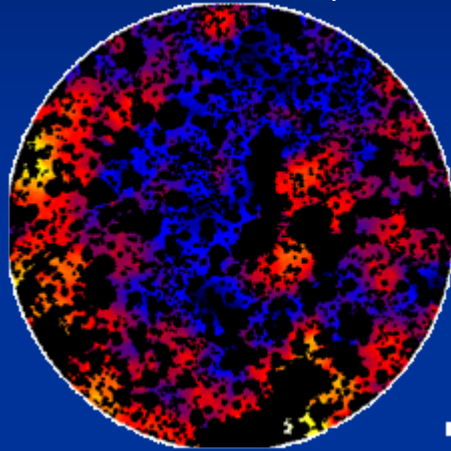


Launch: 2006
Telescope: 68.5cm ϕ
Wavelength: 3.5-200 μ m
All-sky survey

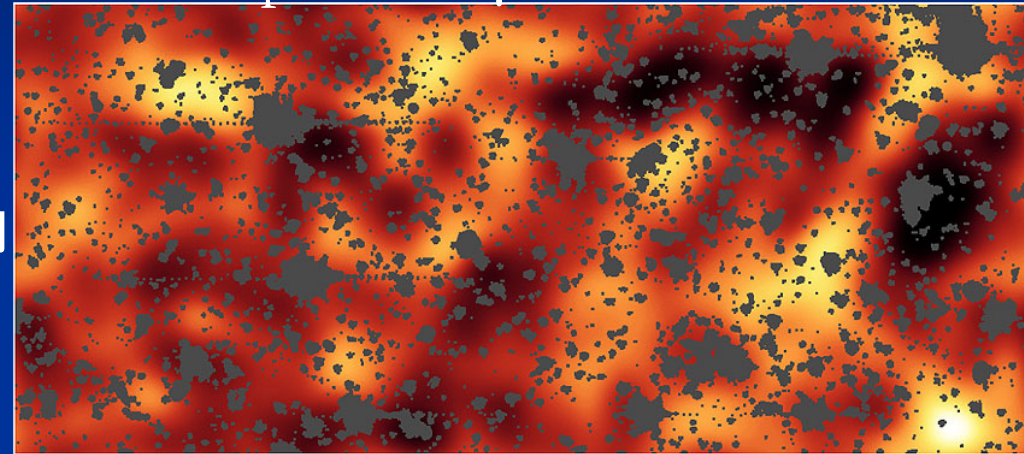
SpitzerとAKARIによるCIBゆらぎ測定

- 波長 $2\mu\text{m}$ 以上での観測
- 系外銀河では説明できない > 数分角のゆらぎに超過兆候

AKARI $2.4\mu\text{m}$

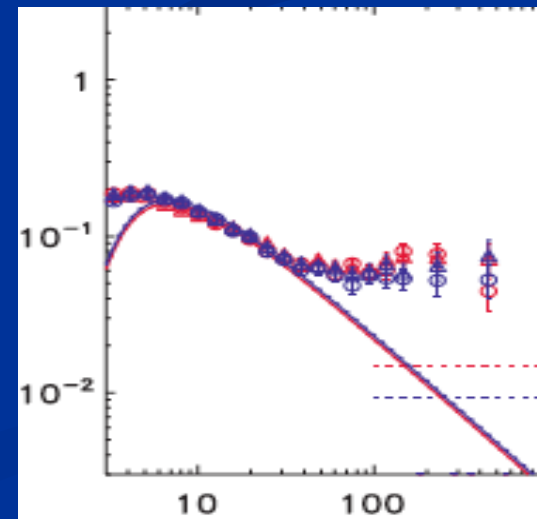
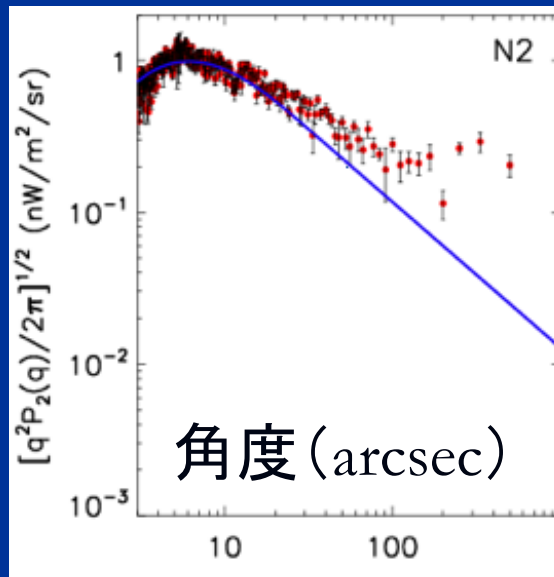


Spitzer $3.6\mu\text{m}$

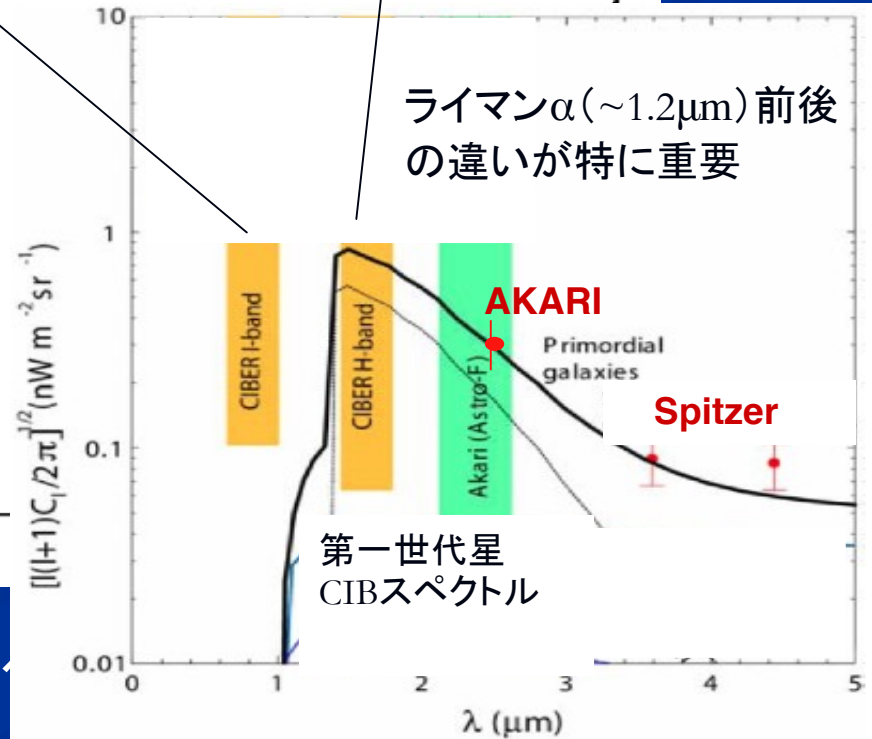
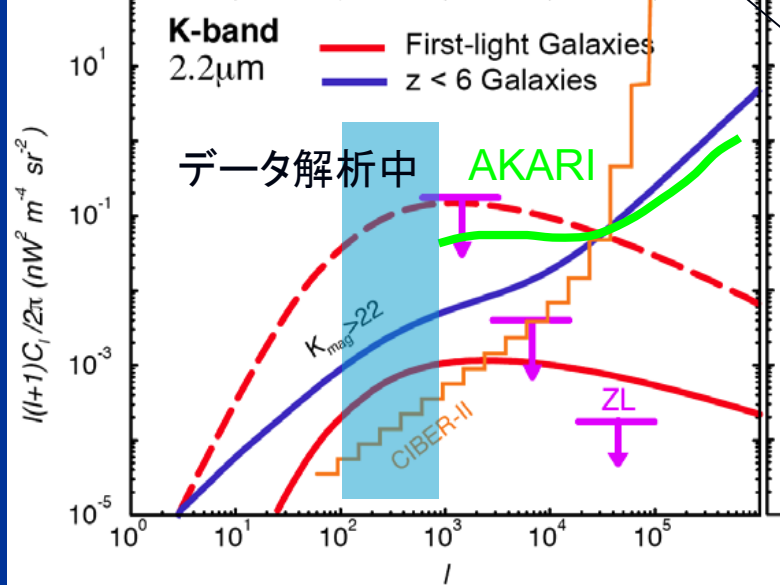
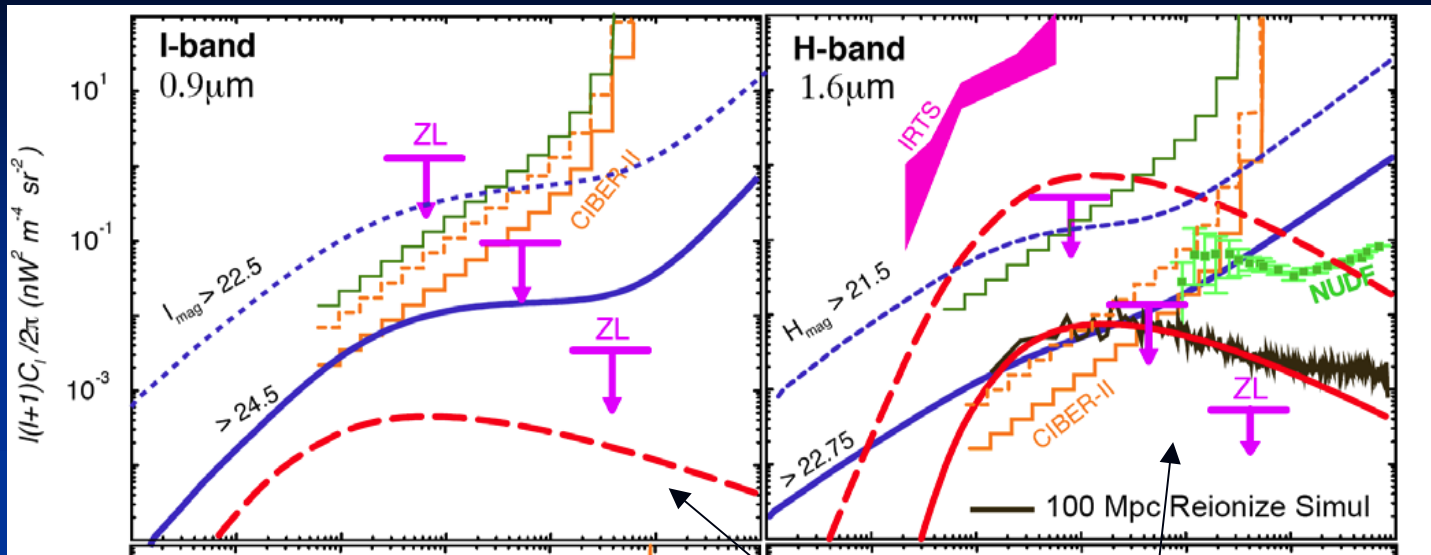


10分角

ゆらぎ振幅



我々は目標に近づいている

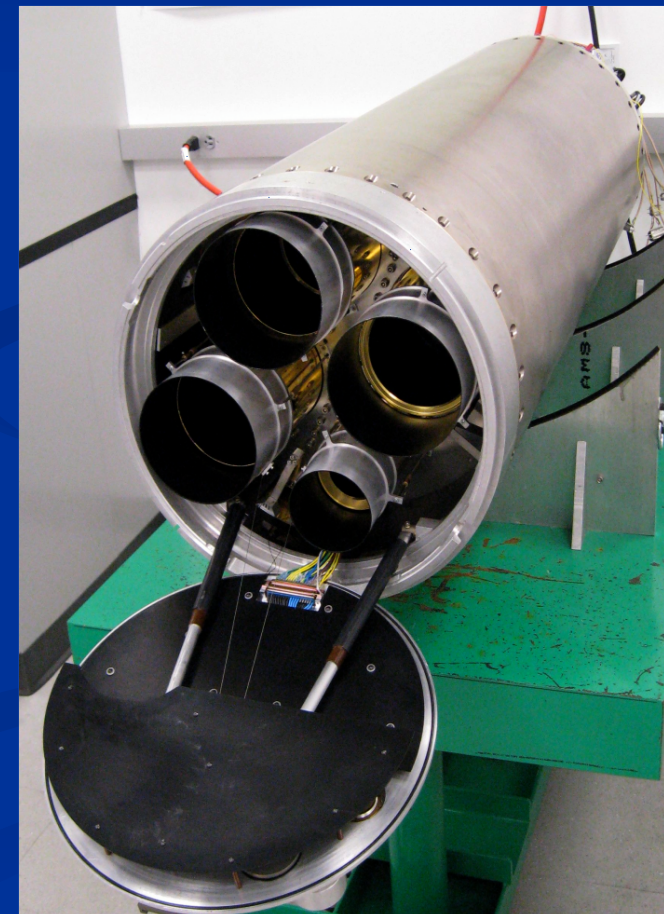
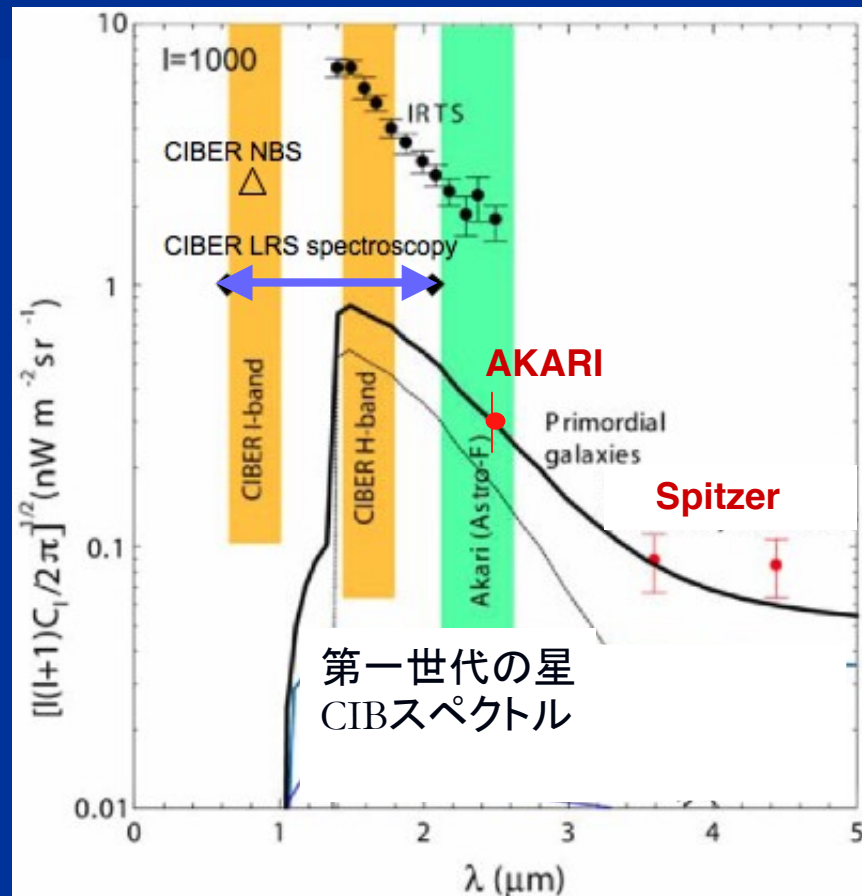


あかりの結果は第一世代星によ

宇宙赤外線背景放射観測ロケット実験CIBER (Cosmic Infrared Background ExpeRiment)

黄道光とCIBを精度良く分離するためのあらゆる装備

- $z \sim 10$ $L\gamma$ - α ピーク ($1 \mu\text{m}$) 周辺のゆらぎ (2波長カメラ, 視野2度)
- 連続スペクトル (粗いプリズム分光, $\lambda/\Delta\lambda \sim 20$)
- フラウンホーファー線 (狭帯域フィルタ分光, $\lambda/\Delta\lambda = 1200$)



宇宙赤外線背景放射観測ロケット実験CIBER

- 打上げ時環境試験
- 地上での性能評価、感度較正
- ロケットI/F、テレメトリ試験、組立て



宇宙赤外線背景放射観測 ロケット実験CIBER

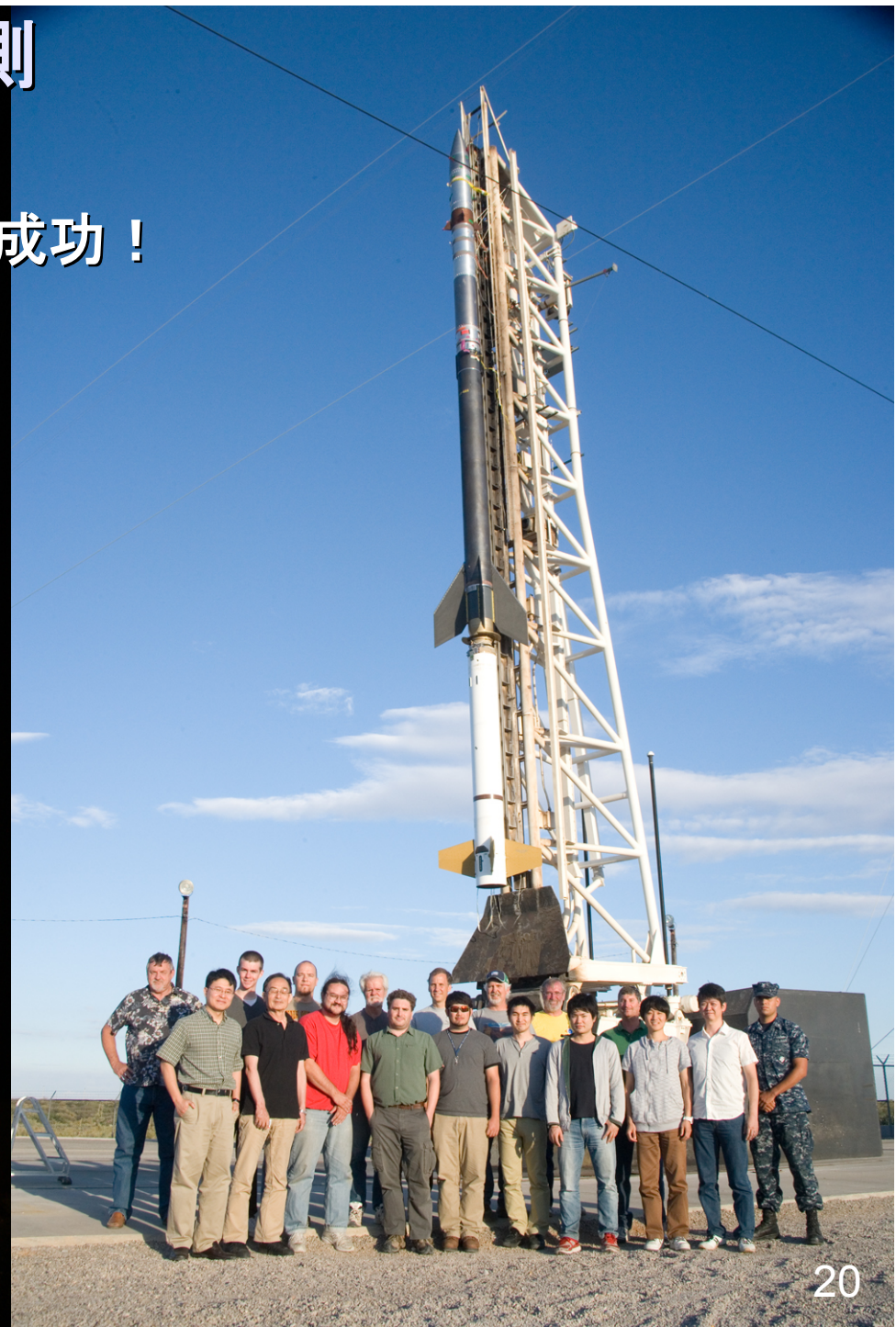
2度の打上げ・観測・装置回収に成功！

第1回実験 2009年2月

初めての黄道光連続スペクトル測定

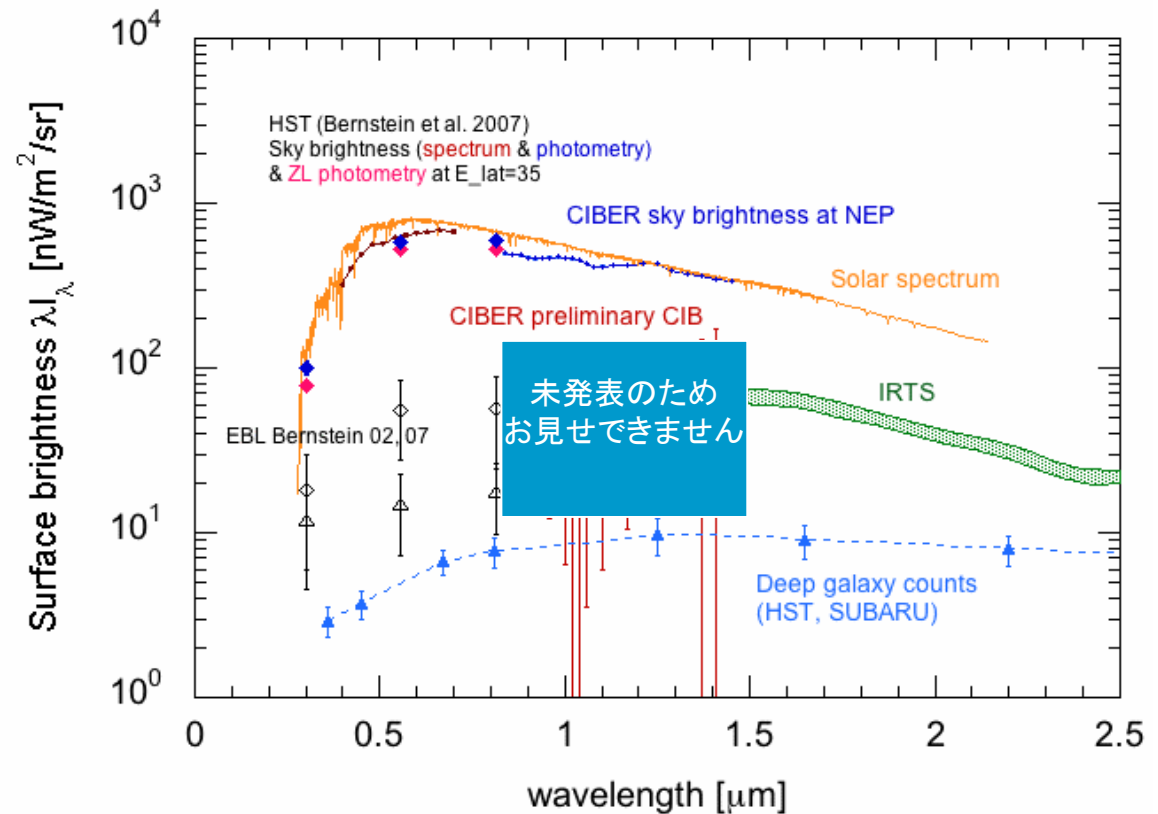
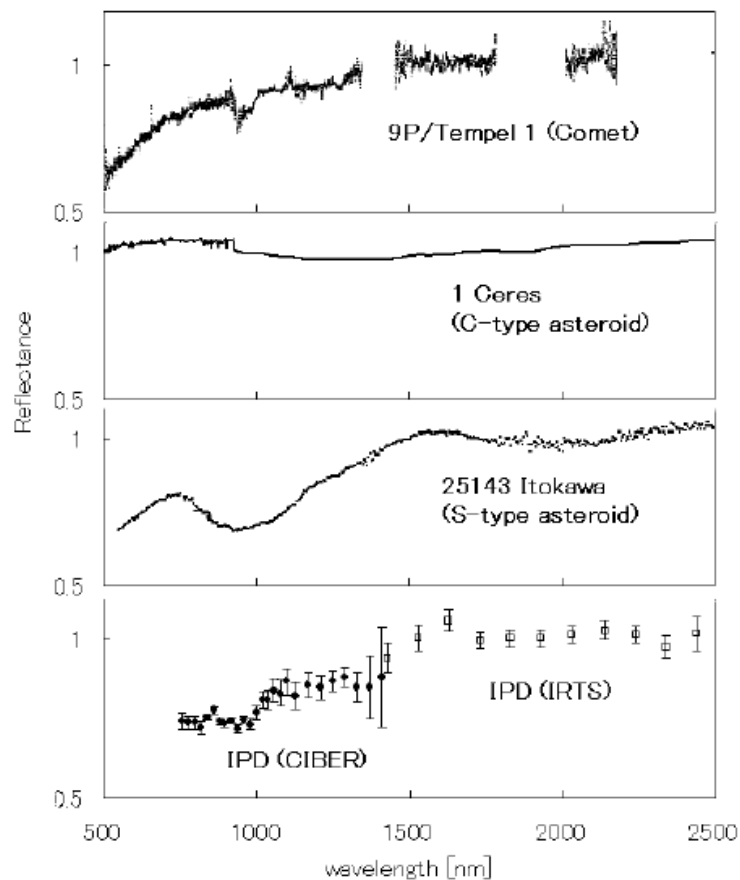
第2回実験 2010年7月

バッフル・迷光除去性能向上の改良
より良質のデータが得られた



CIBER第1回フライトの結果

- 可視・近赤外域での黄道光の連続スペクトル測定に初めて成功
- 黄道光ダスト — 石質隕石やS型小惑星と同様の物質で構成
Tsumura et al. ApJ (2010)
- 第2回フライトでは高精度のCIB検出に成功した(解析中)



ペイロードの回収にも成功

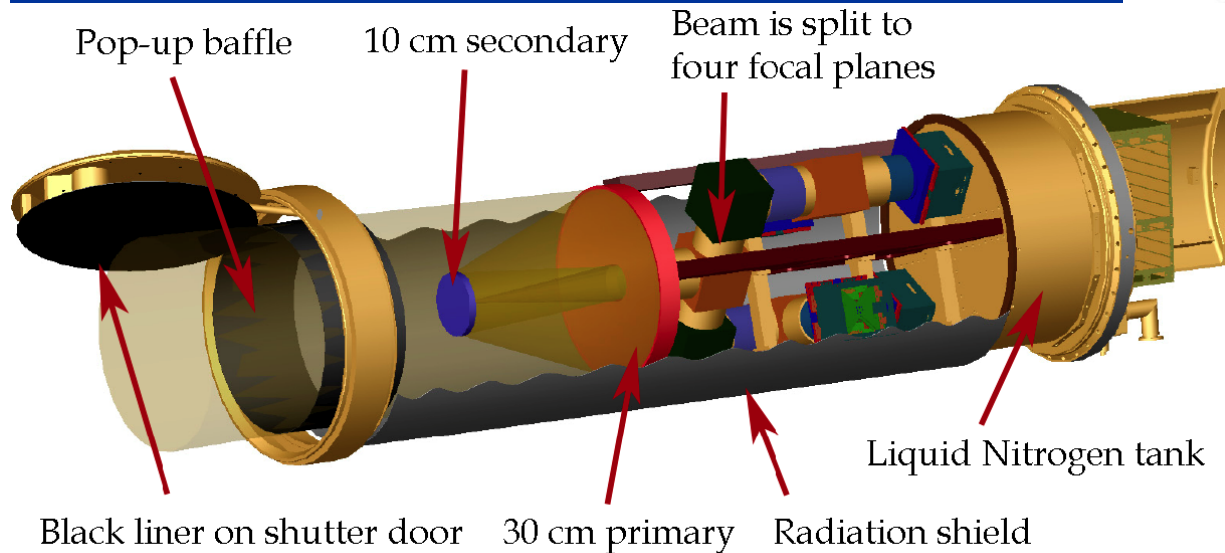
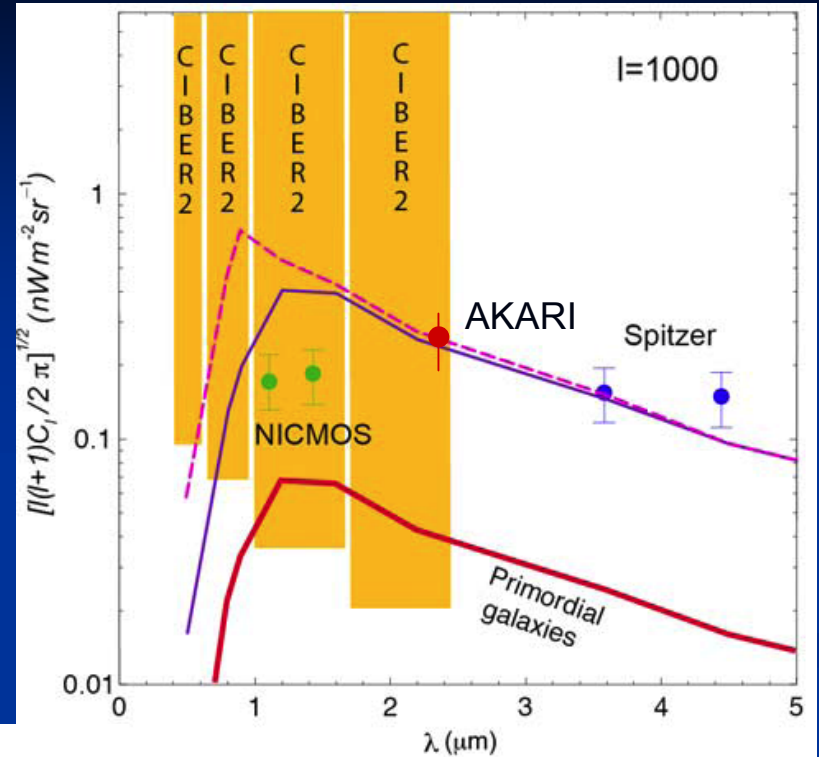
- 落下衝撃により冷却系部品破損、光学系の外観は問題なし
- 大破はしていないため再利用(第3回実験)が可能、現在修復中



次期ロケット実験シリーズ CIBER-2

- 可視域を含むゆらぎSED詳細測定
 - 赤方偏移分布
 - 第一世代の星モデル詳細
- より高い点源感度(角分解能)
 - 大口径望遠鏡(30cmφ)
 - 大規模フォーマット検出器(2k x 2k)

ゆらぎ振幅



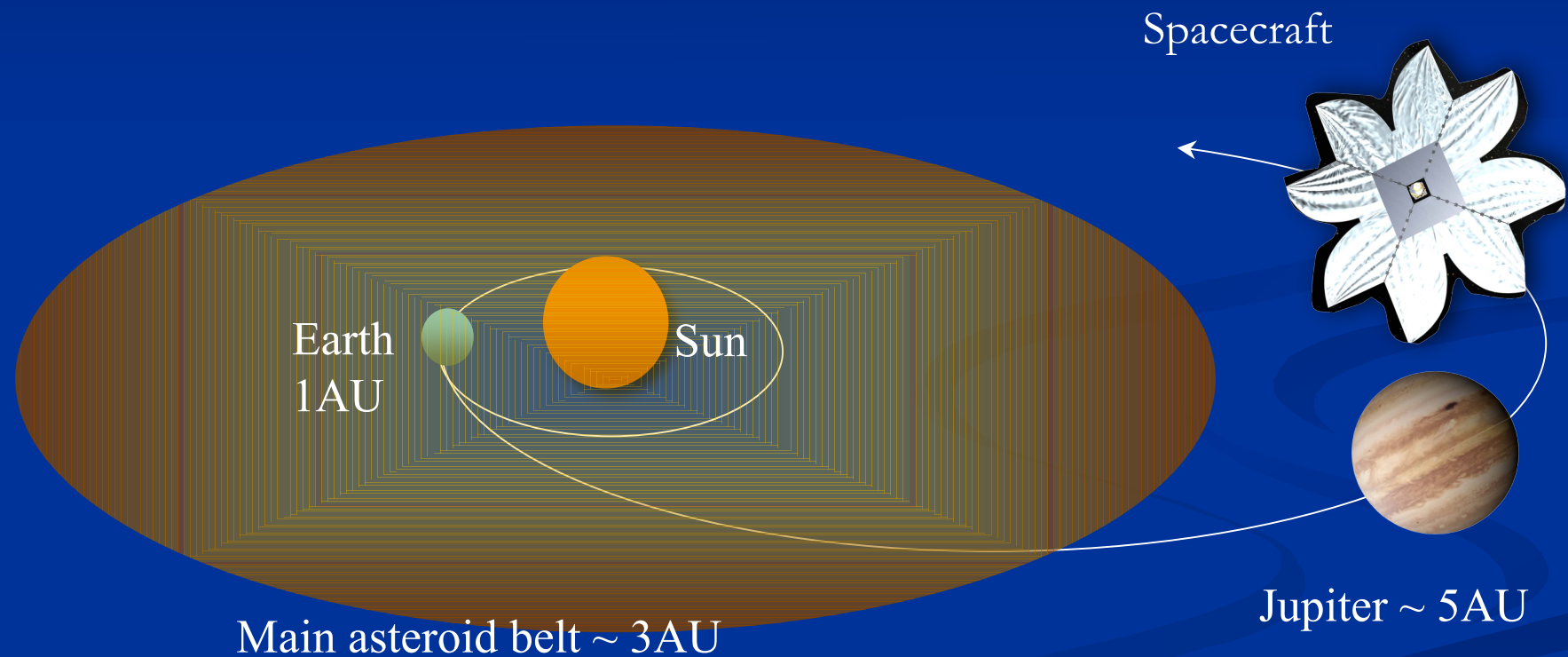
波長[μm]

- 現在装置構成検討中
- 2013年ごろの打上げを目標、以後も継続

黄道ダスト雲からの脱出: EXZIT

(EXZIT: EXo-Zodiacal Infrared Telescope)

- 惑星探査機を用いて黄道ダスト密度が低い深宇宙から観測



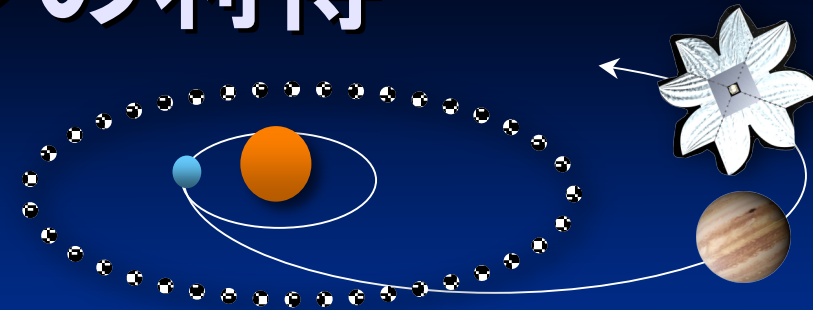
EXZITミッションの利得

- 5AUでは黄道光が1/30 ~ 1/100に低下

- 黄道光の影響がない理想的なCIB測定

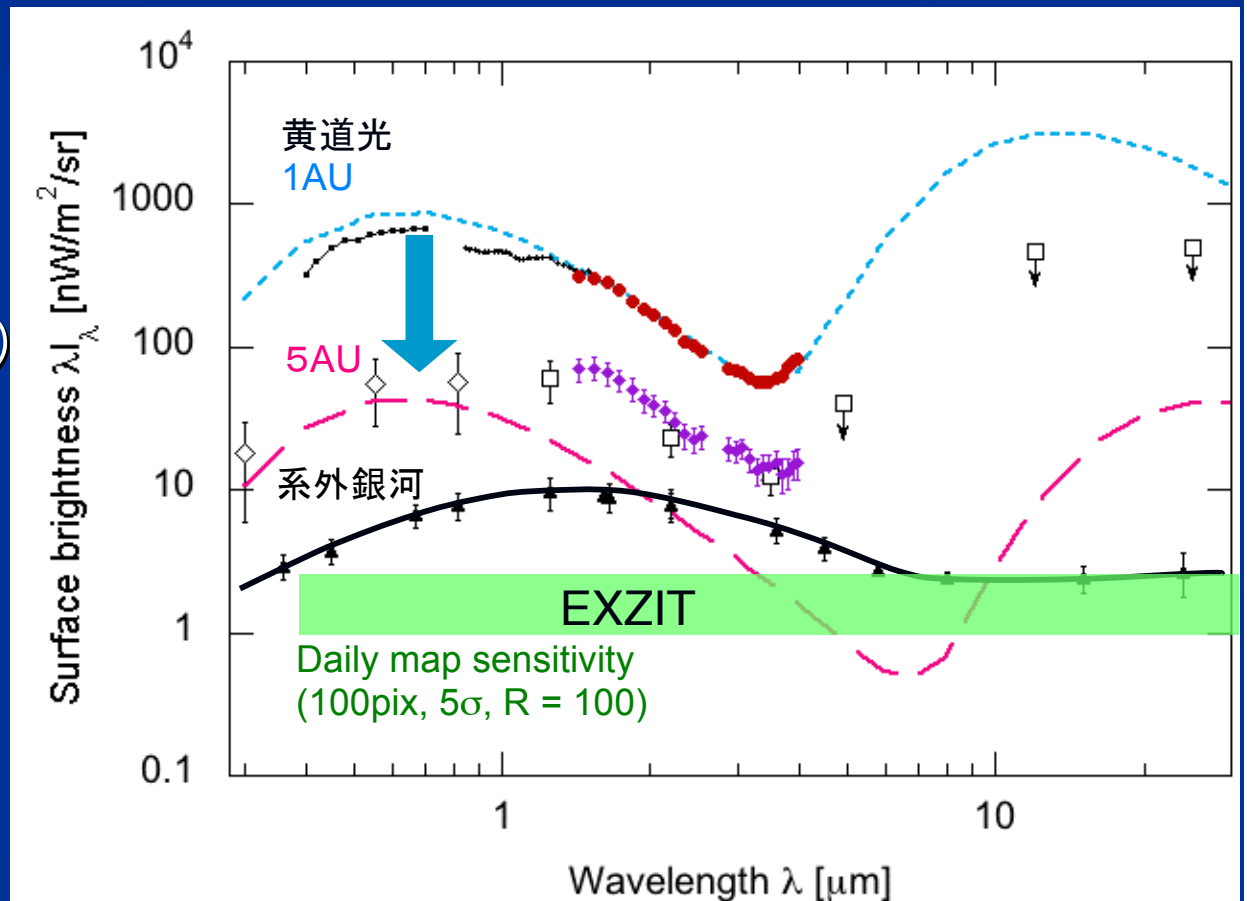
- 中赤外域
(黄道光の割合 > 99%)
初めてのCIB観測が可能に！

Hauser et al. 1998 (COBE)
Matsumoto et al. 2005 (IRTS)
Bernstein et al. 2002 (HST)
Tsumura et al. 2010 (CIBER)



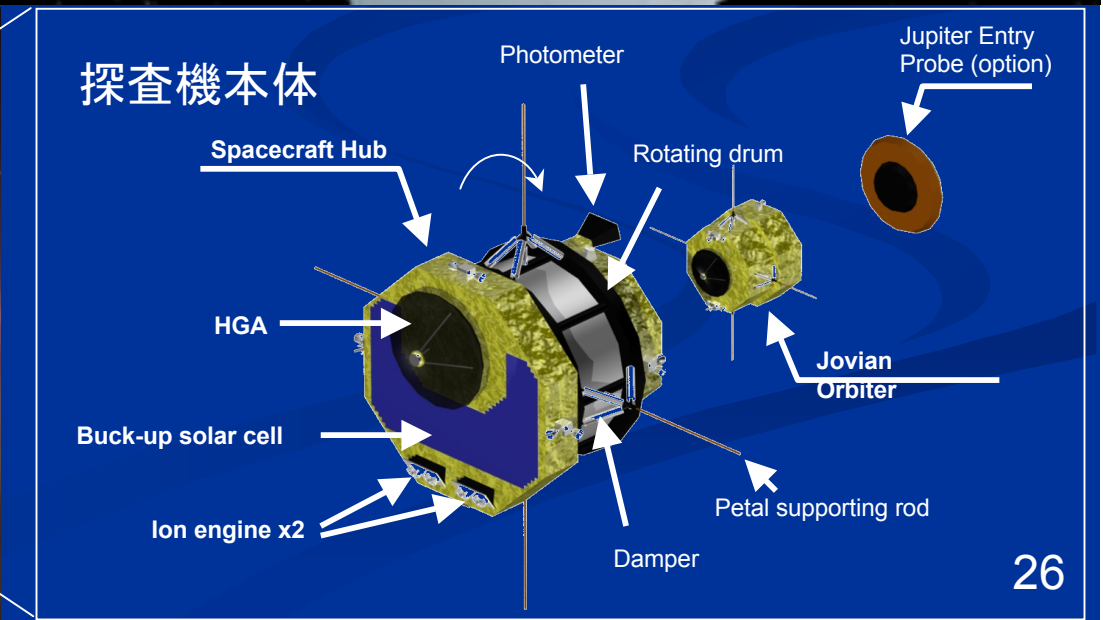
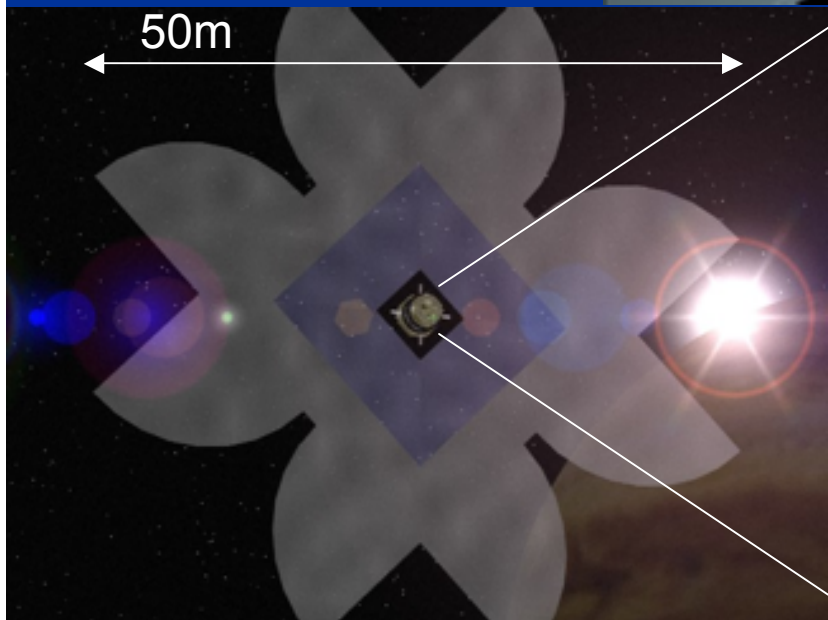
Main asteroid belt ~ 3AU

Jupiter ~ 5AU



ソーラー電力セイル探査機による実現

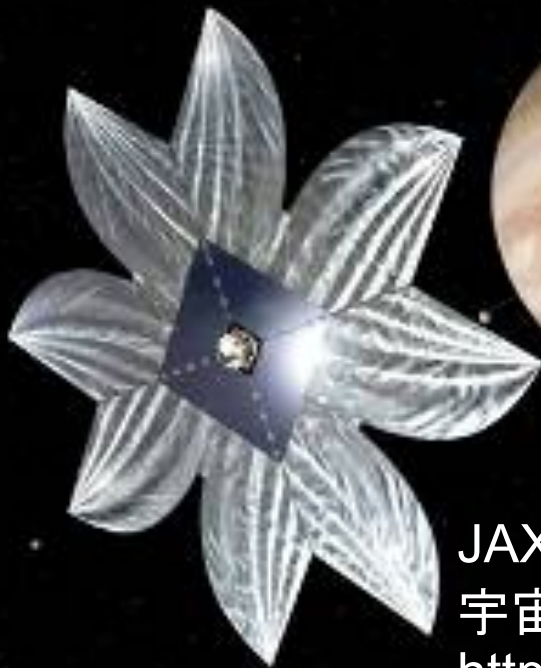
- JAXAが開発中の次世代惑星探査機
 - 太陽光圧+イオンエンジンハイブリッド推進
 - IKAROS(10m級セイル)による実証成功
- EXZITほか科学機器を搭載した50m級セイル木星探査とクルージング期の観測
2020年ごろの打上げを目指し開発



EXZIT (EXo-Zodiacal Infrared Telescope)

powered by Solar Sail

～ 惑星探査機による新しい天文学の開拓 ～



JAXA宇宙研

宇宙赤外線背景放射観測プロジェクト

http://www.ir.isas.jaxa.jp/~matsuura/darkage/index_da.html

CTAとの連携

- まずは、CIB直接測定とTeV γ -ray吸収測定との矛盾を両者のさらなる高精度化により確定することが重要。
- 宇宙背景放射を語るには、その等方性がチェックされていないといけない。
- TeV γ -ray吸収測定でも異方性が測定できるならば、直接測定で得られたCIBゆらぎ ($\delta I/I \sim 1\%$) との相関は重要な研究となる。

The END

これも宣伝になりますが、、、

今週土曜日に放映されるNHK番組「サイエンスゼロ」は
あかり衛星の科学成果についてです。

お恥ずかしながら私も出ております。

ご覧いただければありがたく存じます。