

ロケット実験CIBERによる 宇宙赤外線背景放射の観測的研究

津村耕司

東北大学 学際科学フロンティア研究所

概要

- 宇宙近赤外線背景放射の観測の話
- 銀河の積算では説明できない超過の存在
(最新のCIBERの観測などでも確認)
- **かつては**、その超過の原因として初代星の大規模形成が候補として考えられていた。
- しかし、そのような大規模初代星形成は理論的に困難であった
- 最近の観測的研究(Spitzer, AKARI, CIBER)なども、**初代星モデルでは説明困難**な結果が得られつつある。

「宇宙の明るさ」測定

- 「宇宙の明るさ(背景放射)」を観測して、宇宙全体の「光の量」を決める

宇宙全体の光の量 =

手前の既知の天体からの光

+ まだ観測できていない暗い天体からの光

- ・ 大望遠鏡を用いても見えないような天体からの「光の足し合わせ」を観測している事になる

太陽系からの光
(黄道光)

銀河系(天の川)
からの光

遠方宇宙からの光



大型望遠鏡でも
見えない暗い
天体からの光



地球



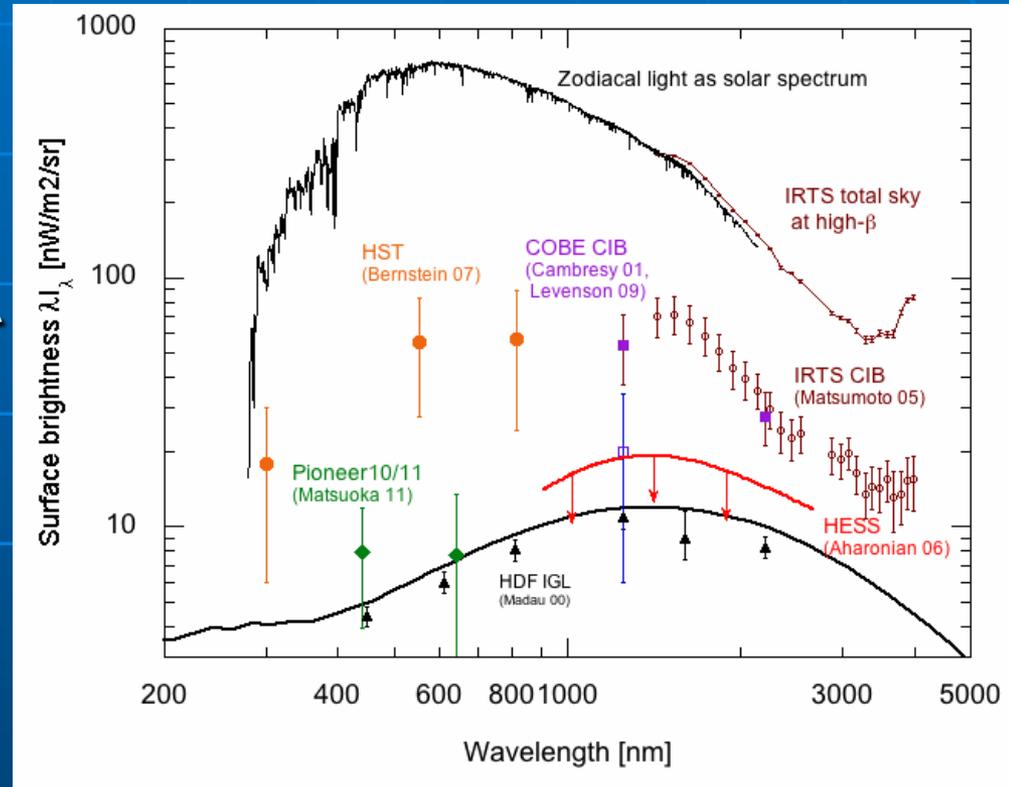
ハレアカラ山頂の
黄道光

EBL観測のキーワード

- Extragalactic Background Light(EBL)
 - Cosmic Infrared Background(CIB)とも
- **SKY = ZL + ISL + DGL + EBL**
 - ZL(Zodiacal Light):黄道光
 - ISL(Integrated Star Light):銀河系内の星の積算
 - DGL(Diffuse Galactic Light):銀河系内ダストによる拡散光
- EBLの**絶対スペクトル**
 - CIBの強度は銀河の足し合わせで説明可能か？
 - 初代天体からの光を含むのか？
 - いかに前景光(主に黄道光)を差し引くか？
- EBLの**空間的ゆらぎ** (今日はこちらを中心に)
 - ゆらぎ観測では最大の前景光である黄道光の影響を受けにくい
 - 大規模構造形成のタネ？
 - CMBゆらぎと大規模構造の間をつなぐ観測

今までのEBLのスペクトル観測

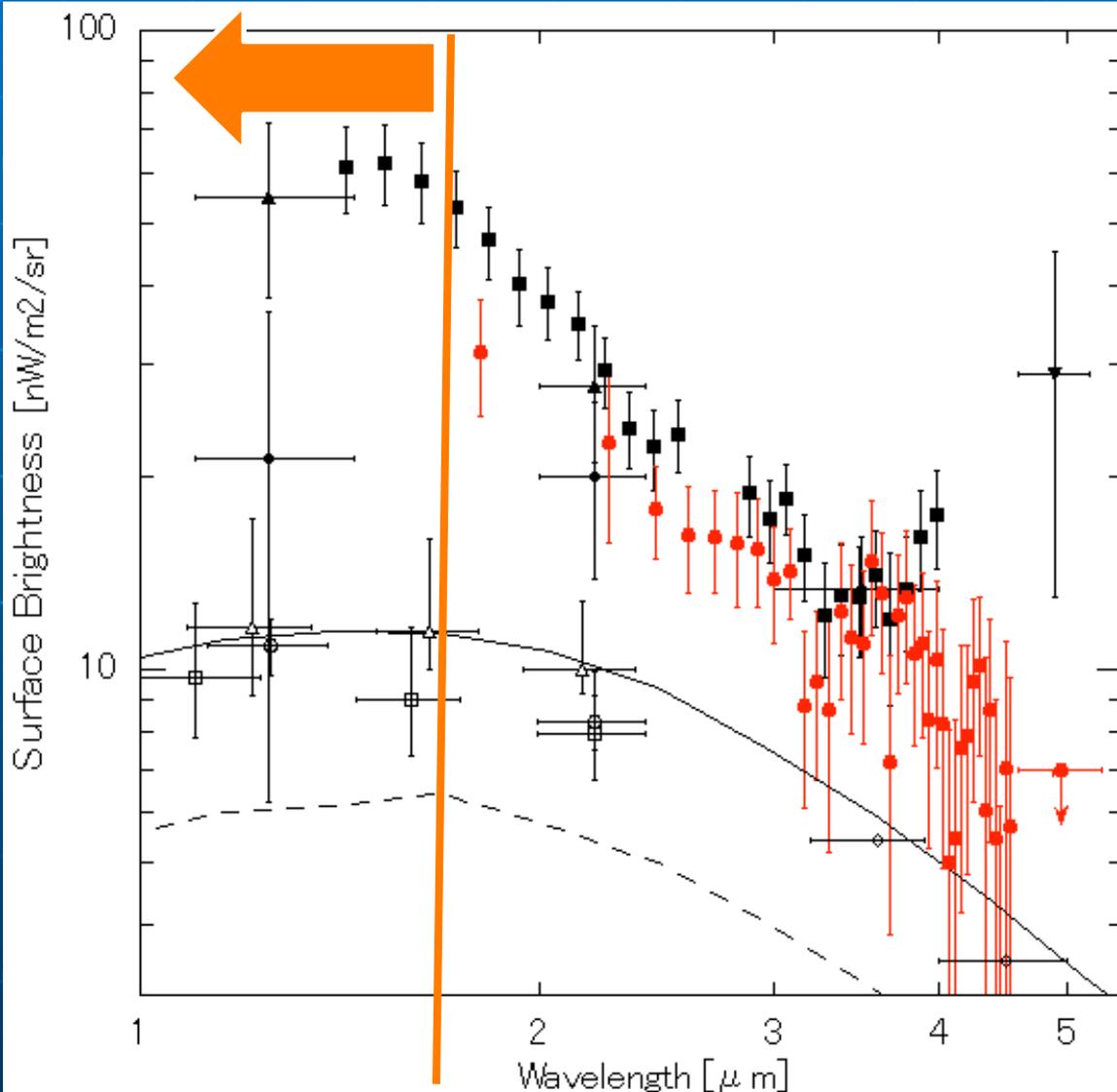
- COBE/DIRBE、IRTSなどによるCIB観測
 - 互いにコンシステントな観測結果
 - 1.5 μm 付近にピーク?
- 銀河の積算では説明できない強度 (EBLエクセス)
未知の光源が必要
- 最大の敵は黄道光
空の明るさの8-9割@NEP



黄道光観測の精度がカギ

EBL spectrum

CIBER



Extragalactic Background Light (EBL)

- IRTS (Matsumoto et al. 2013)
- ▲ DIRBE (Cambresy et al. 2001)
- ▼ DIRBE (Arendt & Dwek 2003)
- ◆ DIRBE - 2MASS (Levenson et al. 2007)
- AKARI (this work)

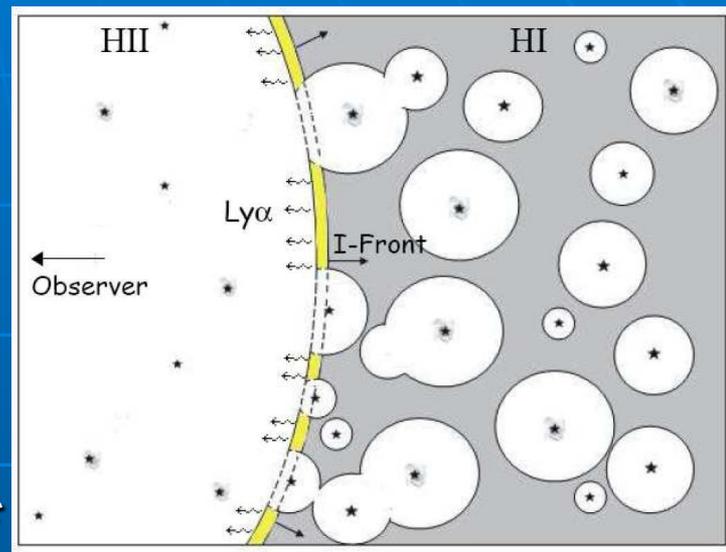
Integrated light of galaxies

- Totani et al. 2001
- Madau & Pozzetti 2000
- △ Keenan et al. 2010
- ◇ Fazio et al. 2004
- Dominguez et al. 2011
- - Dominguez et al. 2011 (Scaled to $m_K > 19$ mag)

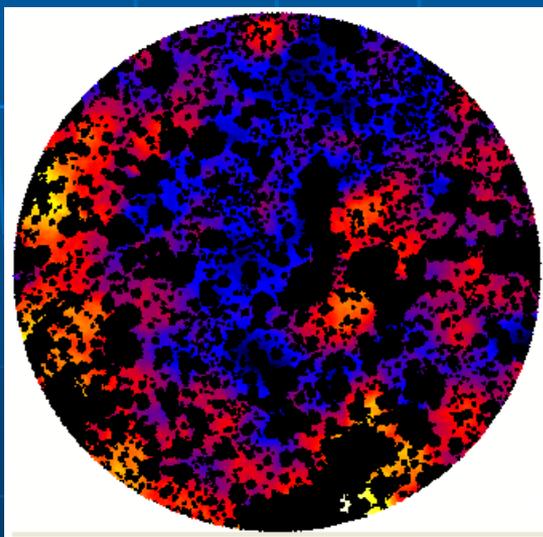
銀河の足し合わせからの有意なEBLエクセスを確認

今までのEBLのゆらぎ観測

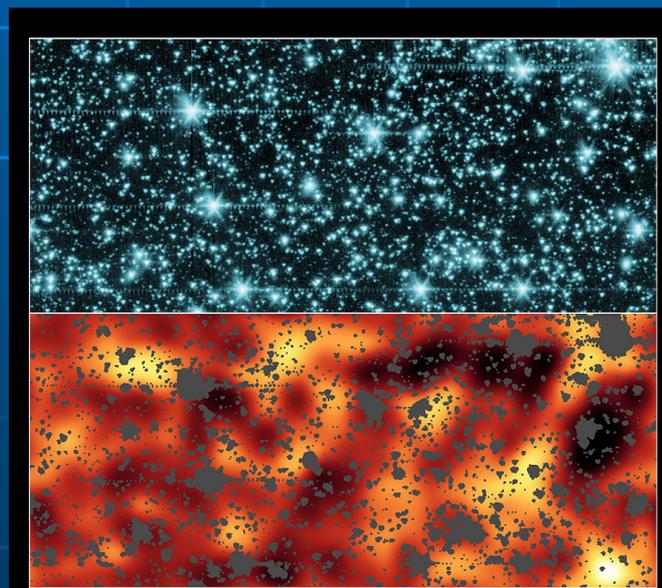
- EBLの空間的ゆらぎの観測
 - Spitzer: Kashlinsky et al. (2005)
 - あかり: Matsumoto et al. (2011)
- ゆらぎのスケールは ~ 15 分角
- 黄道光の空間的ゆらぎは($< 1\%$)
 - 黄道光では観測されたゆらぎを説明できない (Pyo et al. 2012)



15分角というスケール
 $\sim 5\text{Mpc}$ @ $z \sim 12$
銀河団のスケール



Matsumoto et al. (2011)



Infrared Background Light from First Stars Spitzer Space Telescope • IRAC
NASA / JPL-Caltech / A. Kashlinsky (GSFC)

Kashlinsky et al. (2005)

未知の赤外線光源の候補

現在

138億年前

50億年前 130億年前 (宇宙誕生)

初代星モデル

宇宙初期に大量の初代星形成
紫外線放射が赤方偏移して赤外線へ



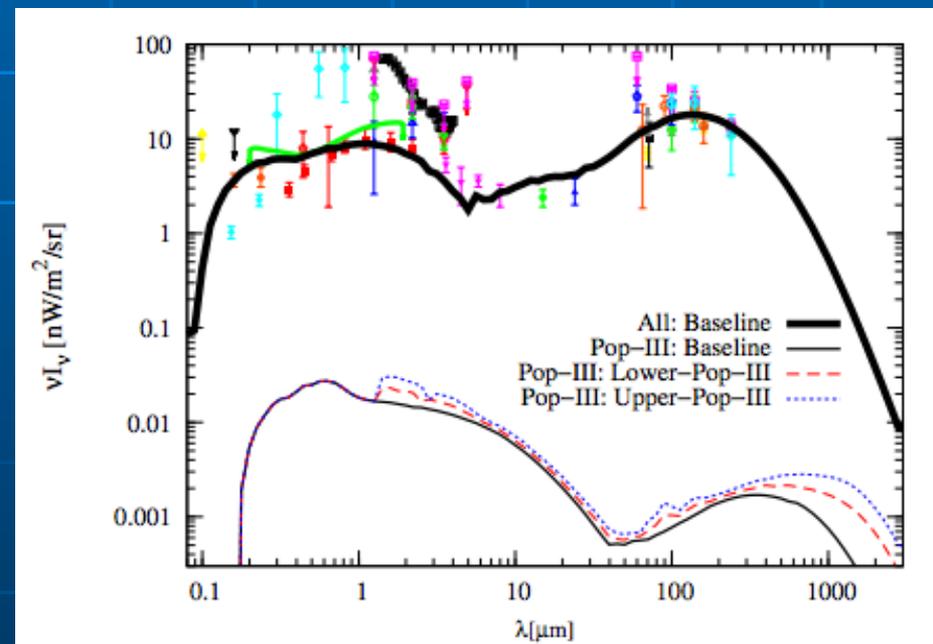
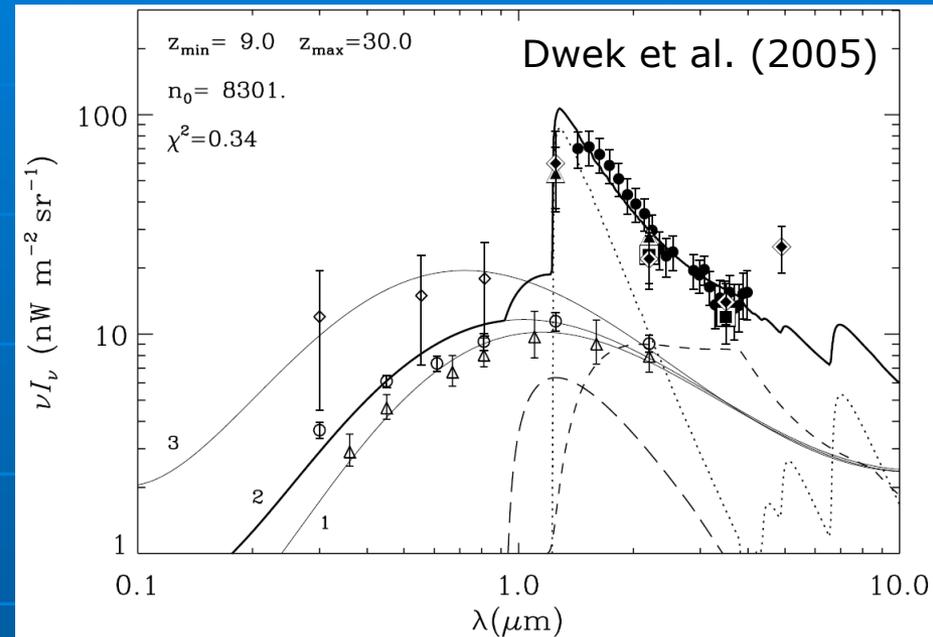
ハロー浮遊星モデル

銀河のハロー領域に大量の暗い星
可視光が赤方偏移して赤外線へ



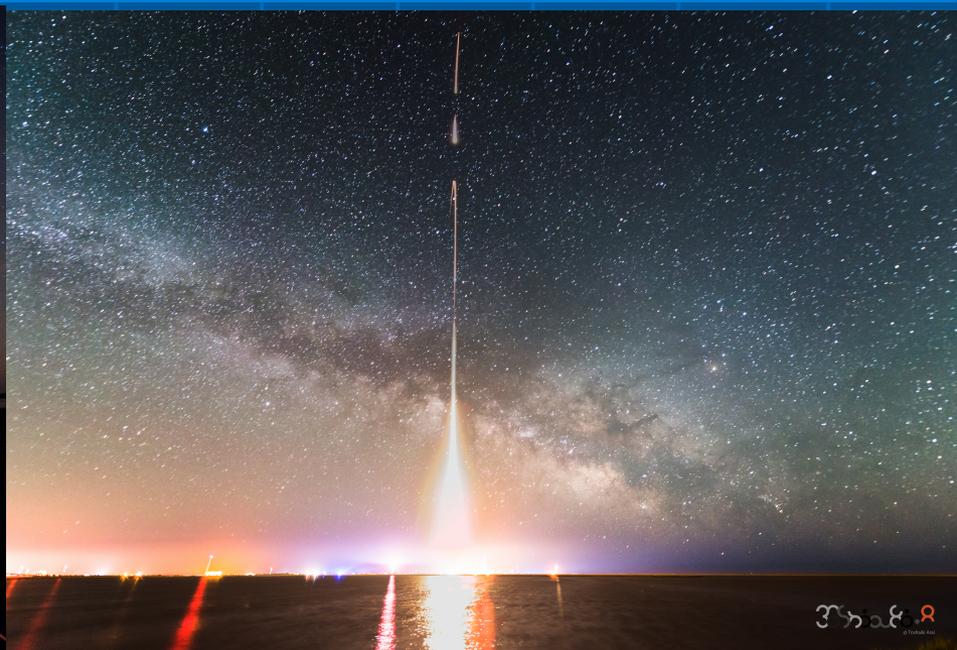
初代星モデル

- 最初は初代星モデルが提唱された
 - 1.5 μm ピークを $z \sim 10$ のLyman- α で説明
- ただしEBLエクセスを説明できるレベルの初代星形成は非現実的というのが現在の理解



ロケット観測実験CIBER

CIBER 4th flight (2013/Jun./5th) @Wallops Flight Facility, US
写真:新井俊明(ISAS/JAXA)



Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER)

日米韓共同研究チーム(約10名)
NASAのロケットプログラム

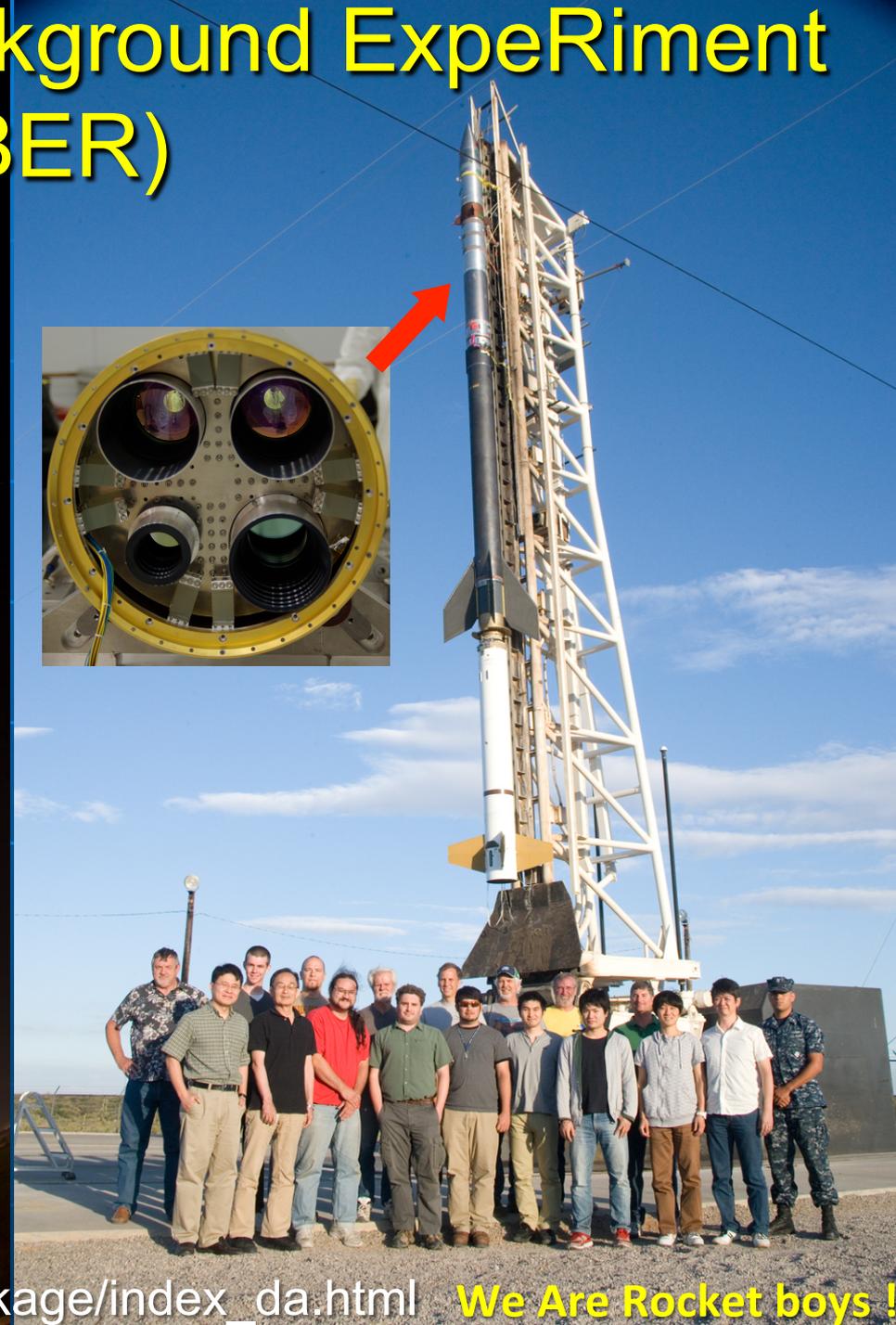
4度の打上げ・観測に成功!

第1回実験 2009年2月

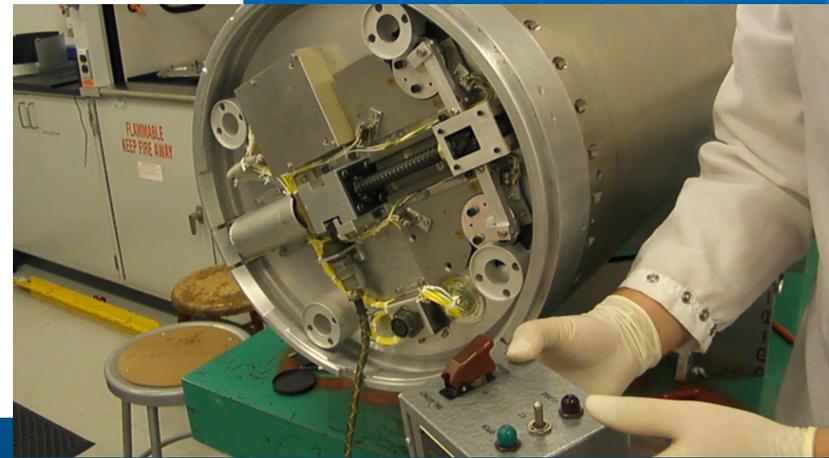
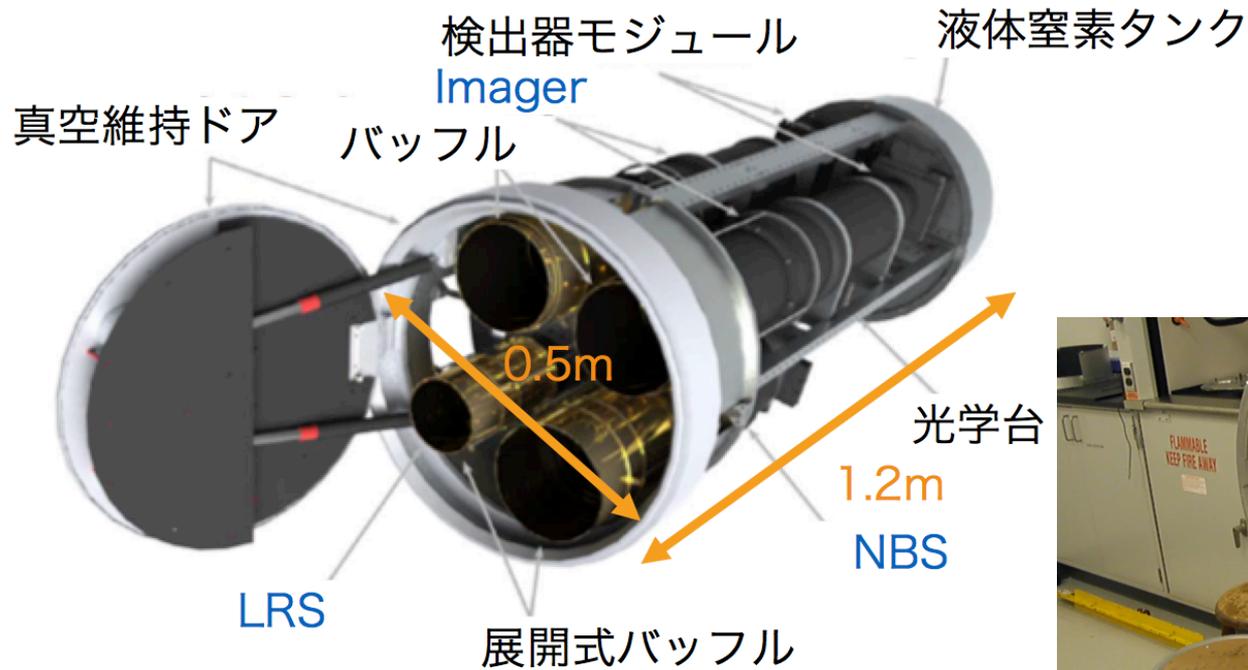
第2回実験 2010年7月

第3回実験 2012年3月

第4回実験 2013年6月



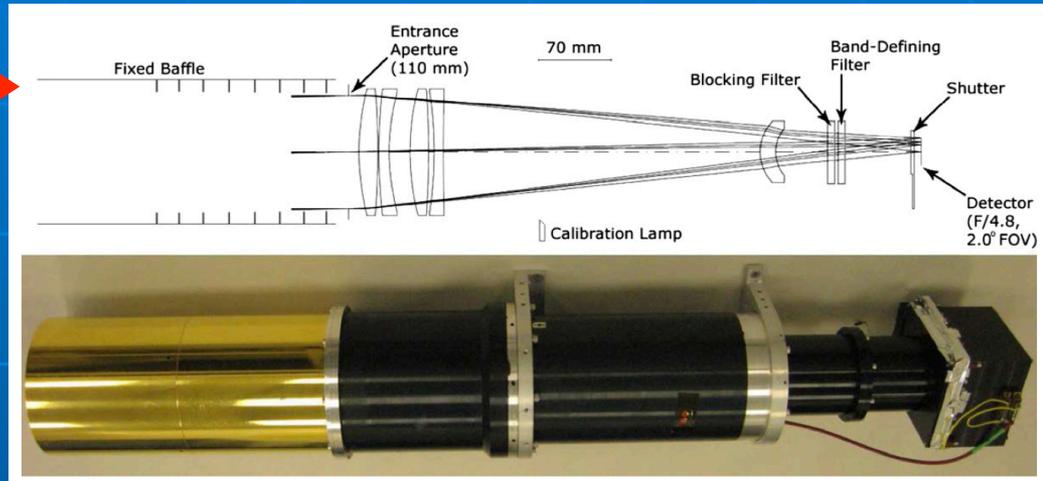
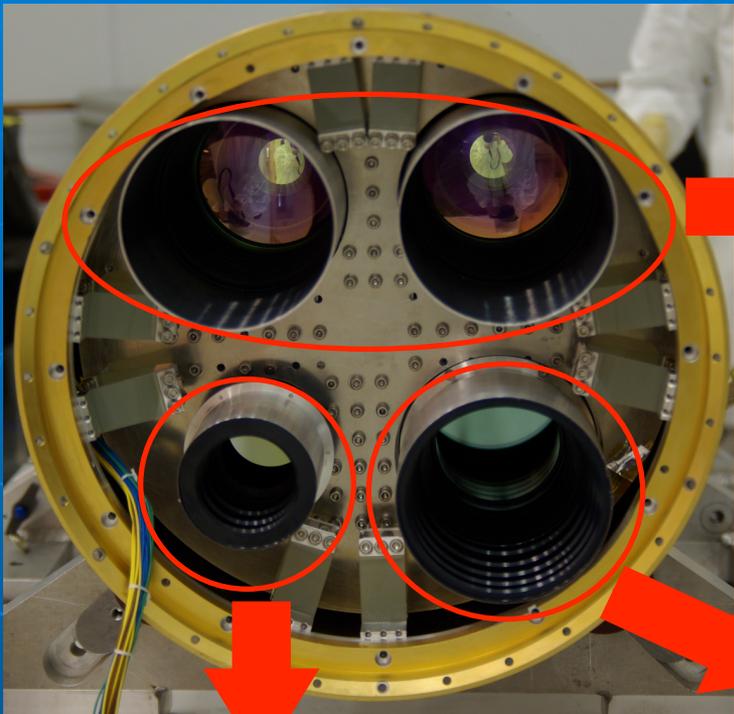
CIBERの観測装置



- 背景放射観測に特化した広視野カメラ
- 液体窒素で装置全体を $\sim 80\text{K}$ (-190°C)まで冷却することにより、装置起因の赤外線をなくす。
- 地上では真空槽内部に収納され、上空でふた開け、観測開始。

Wide-Field Imagers

1.0/1.6 μm でのCIBゆらぎ観測

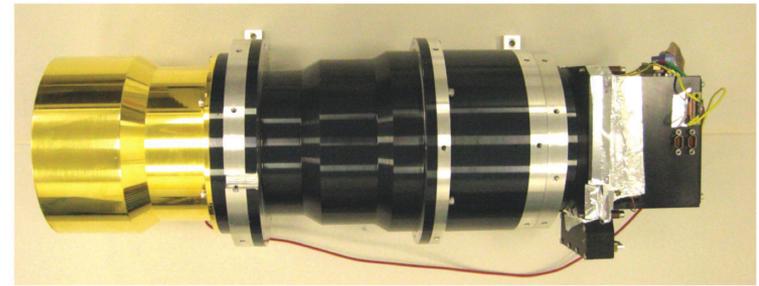
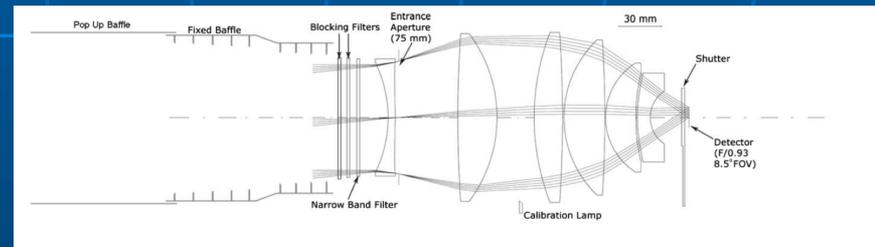
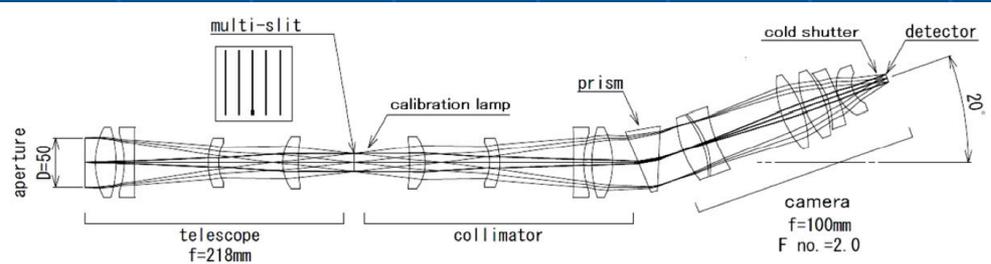


Narrow Band Spectrometer (NBS)

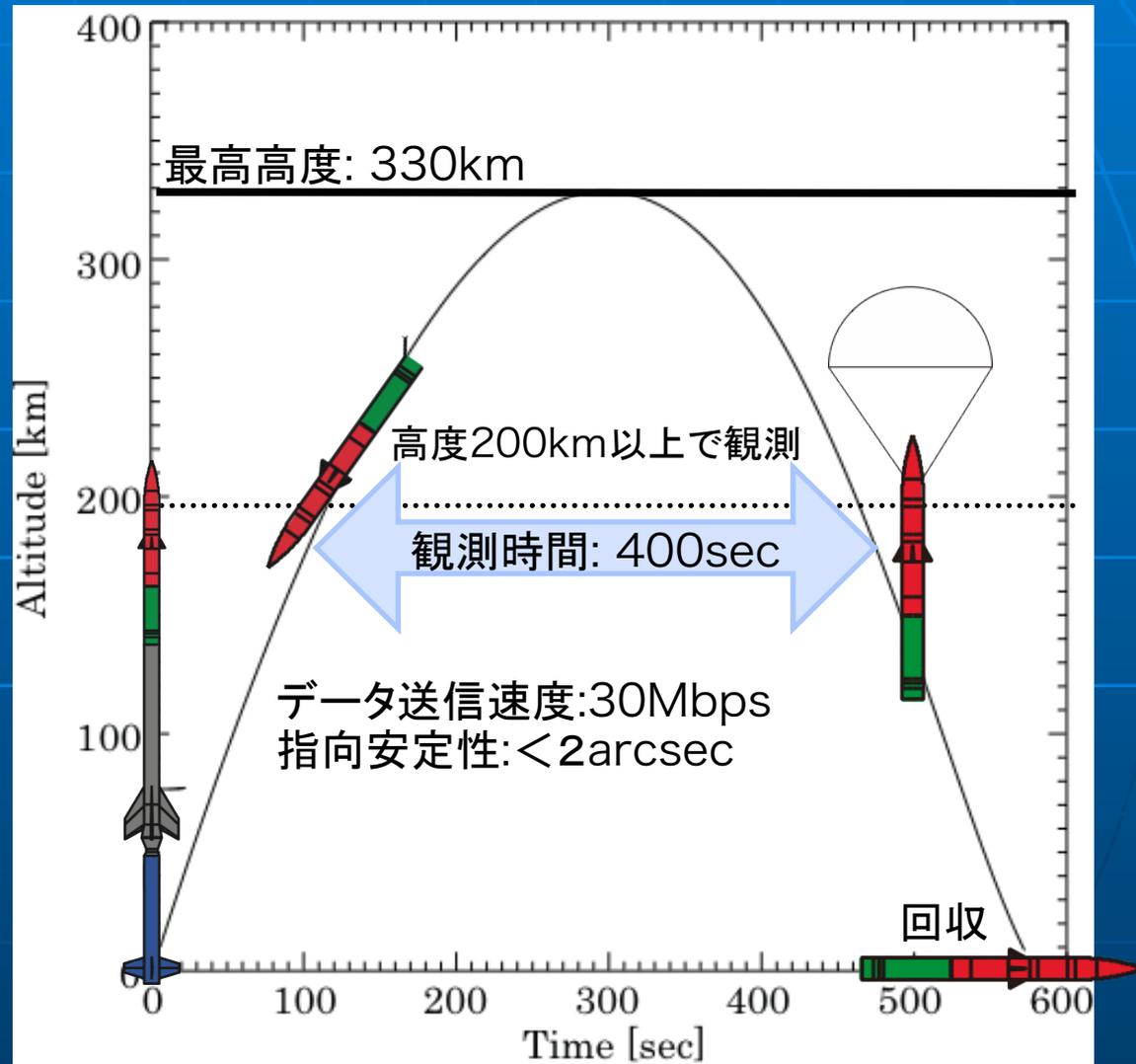
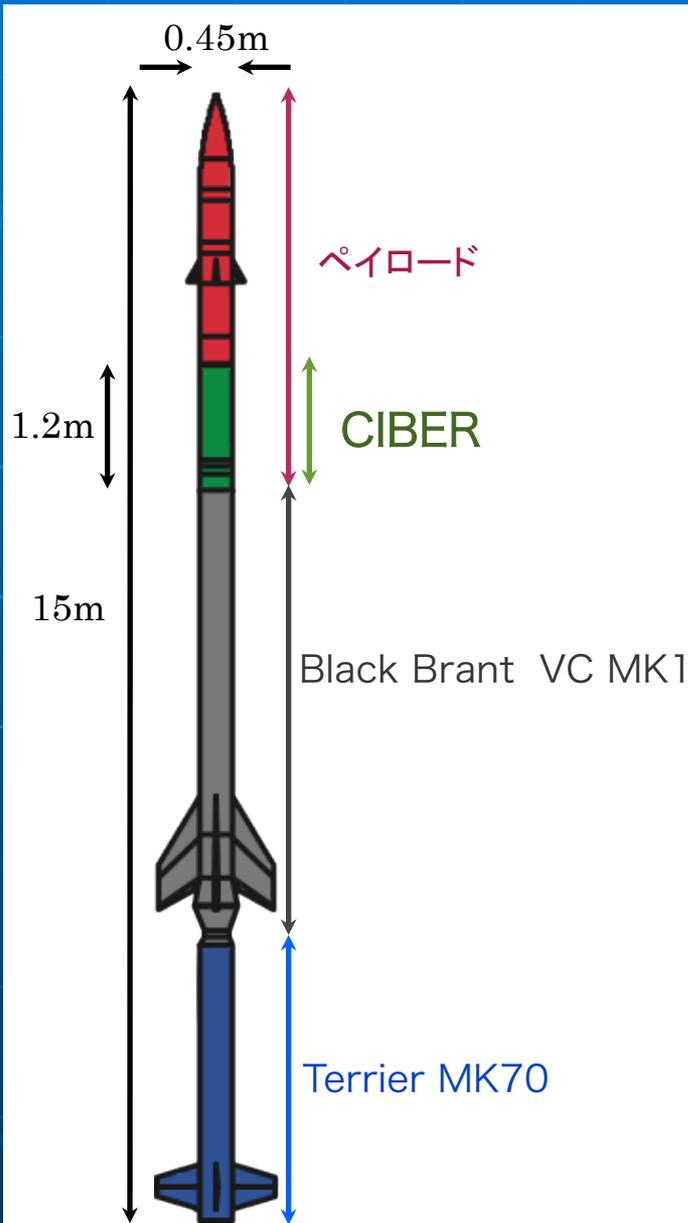
フラウンホーファー線観測による黄道光の絶対値測定

Low Resolution Spectrometer (LRS)

0.7-2.2 μm でのCIB分光観測



ロケット実験の概要 (第1-3回目の場合)



打上場: White Sands Missile Range

ロケット打上げ準備

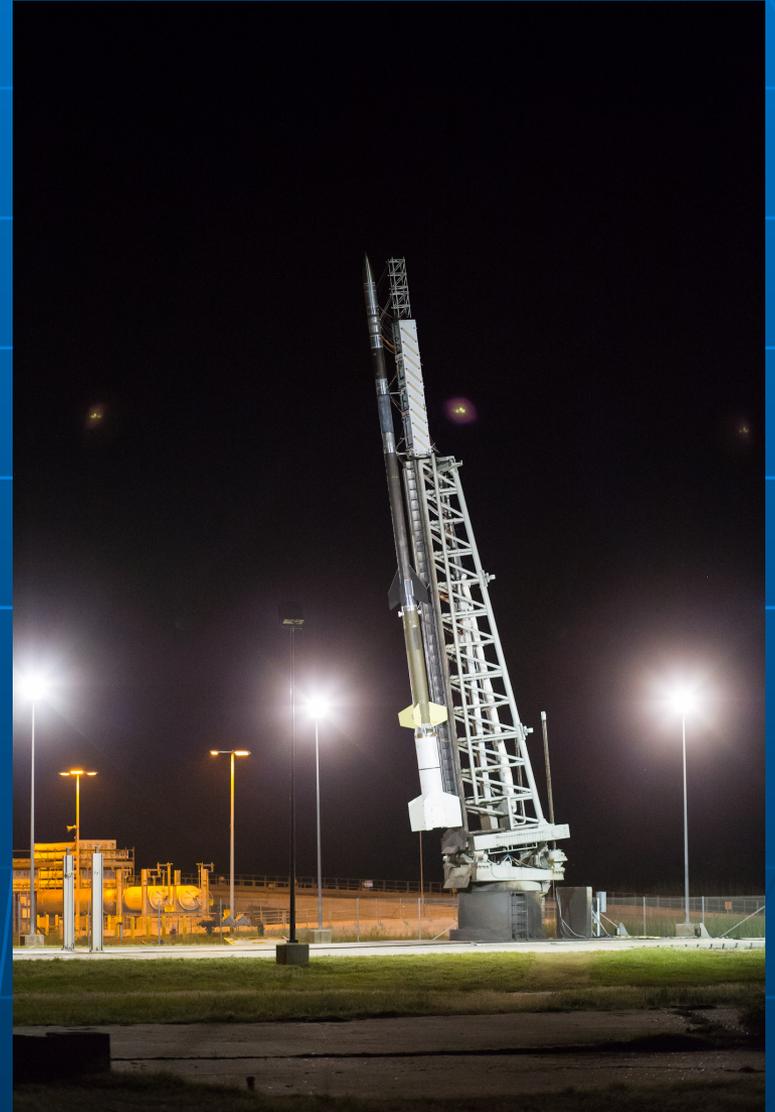


打上げ直前の様子

Launcherに取り付け時



打ち上げ直前



装置の回収

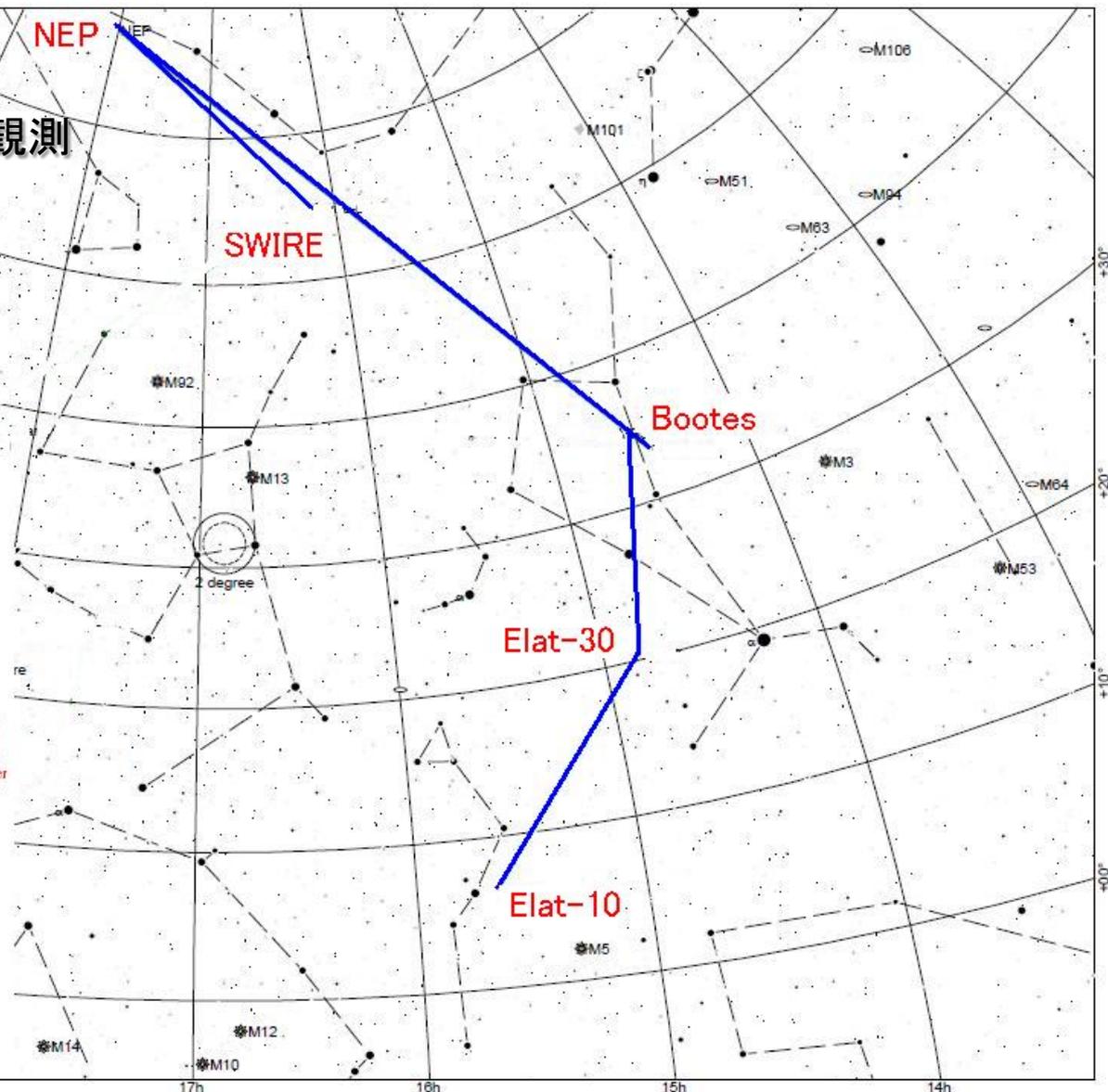
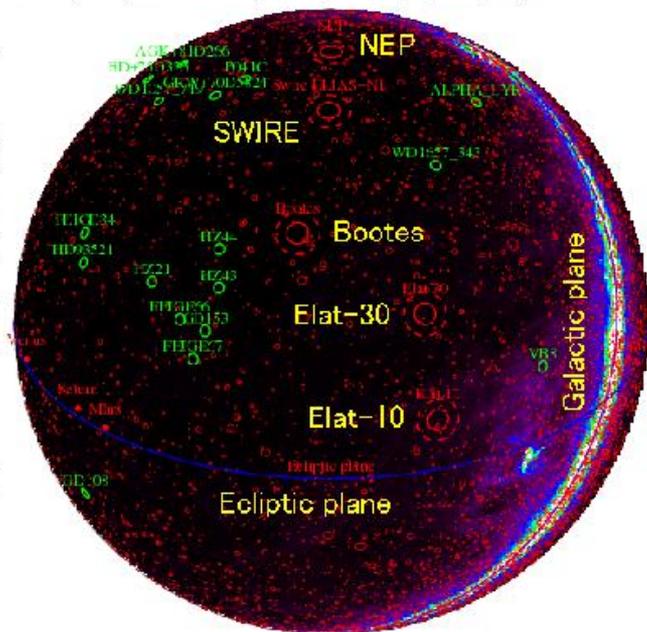


観測した天域

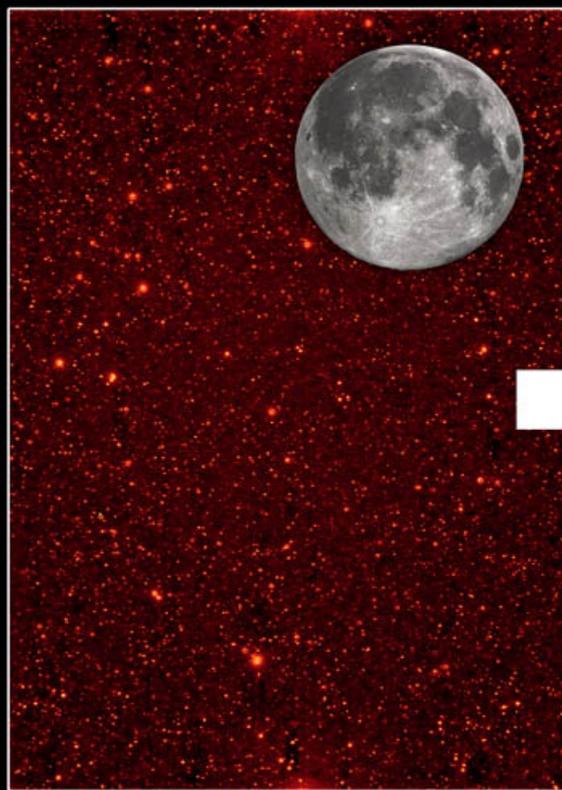
TheSky (c) Astronomy Software 1984-1998

1回の打ち上げ観測で5-6領域を観測

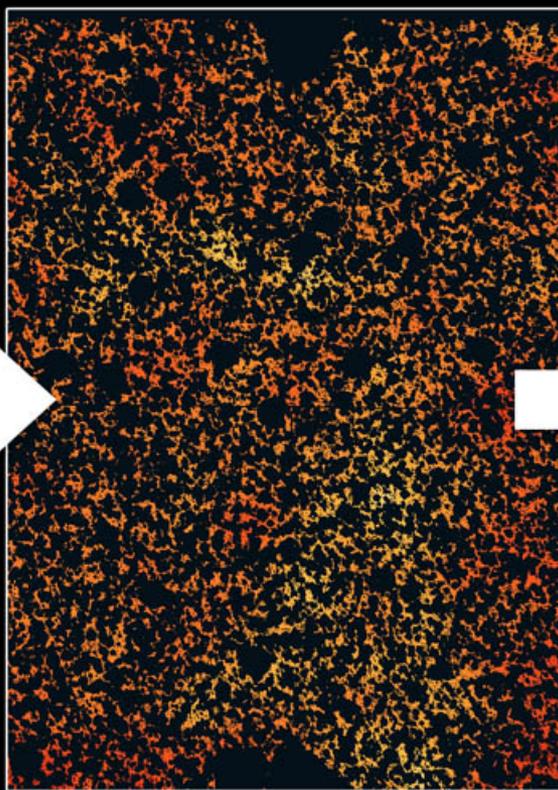
- ・NEP北黄極領域(りゅう座)
- ・SWIRE領域(りゅう座)
- ・Bootes領域(うしかい座)
- ・他の参照領域(数天域)



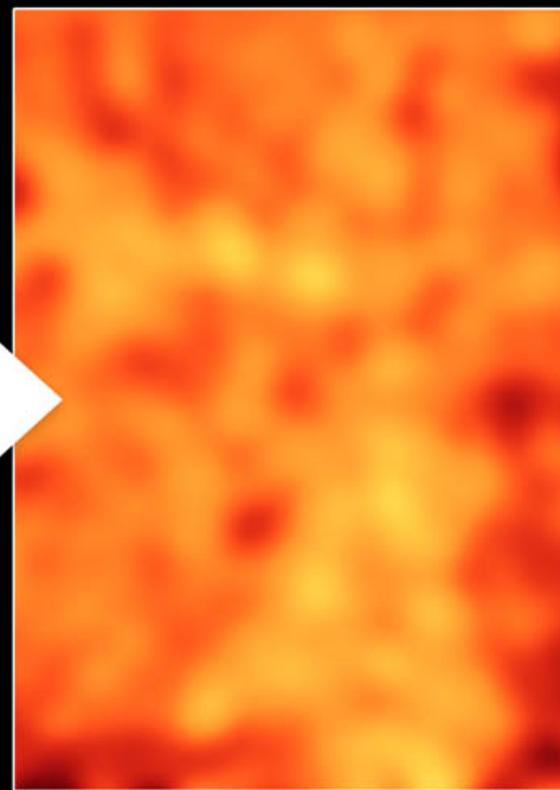
画像処理



Full Sky Image



Remove
Stars & Galaxies



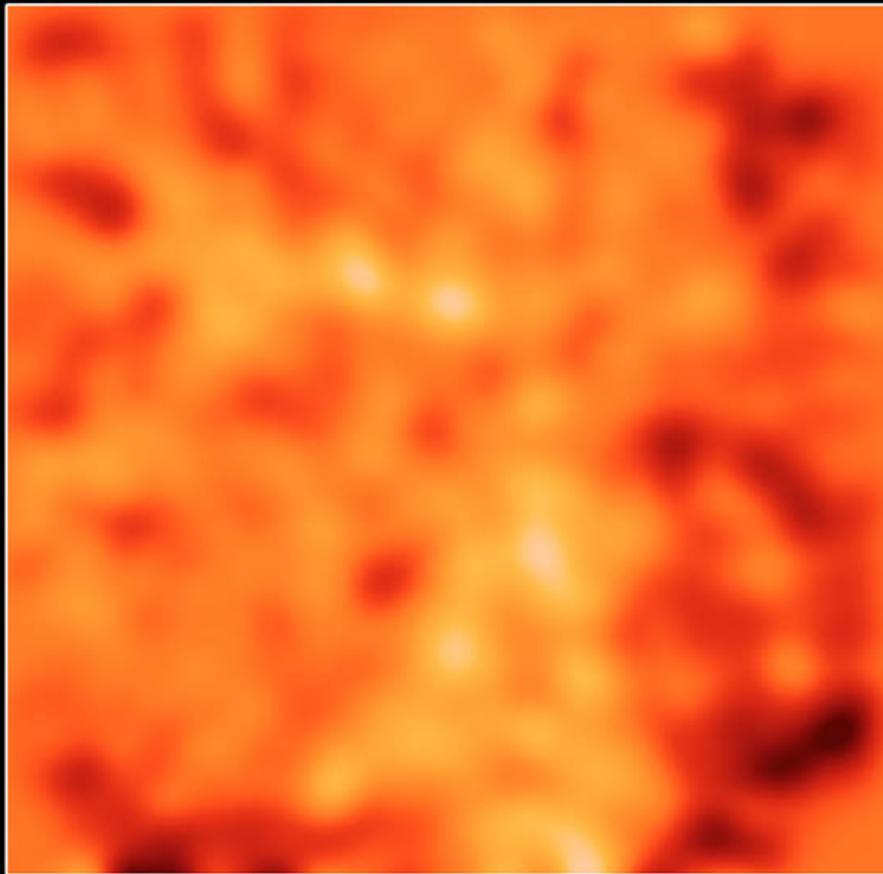
Extract Large-Scale
Fluctuations

Revealing the Hidden Background Light of Stars

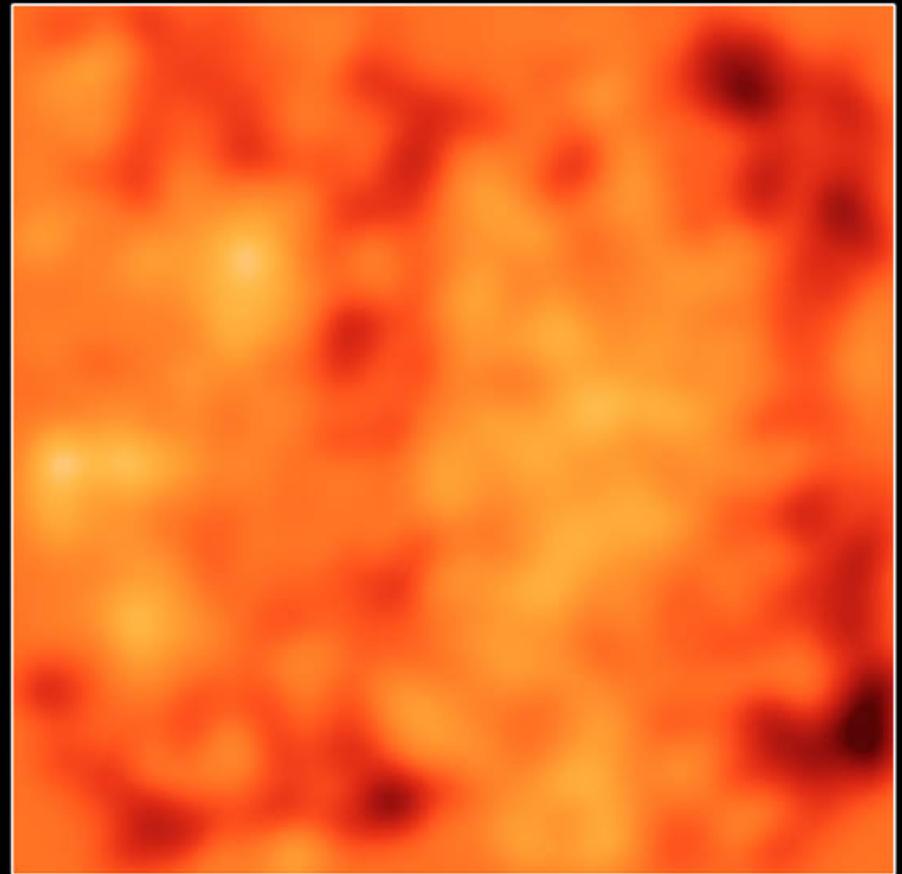
CIBERで得たEBLゆらぎ

Zemcov et al. 2014 Science 346, 732

JAXA, Tohoku Univ., NASA JPL/Caltech



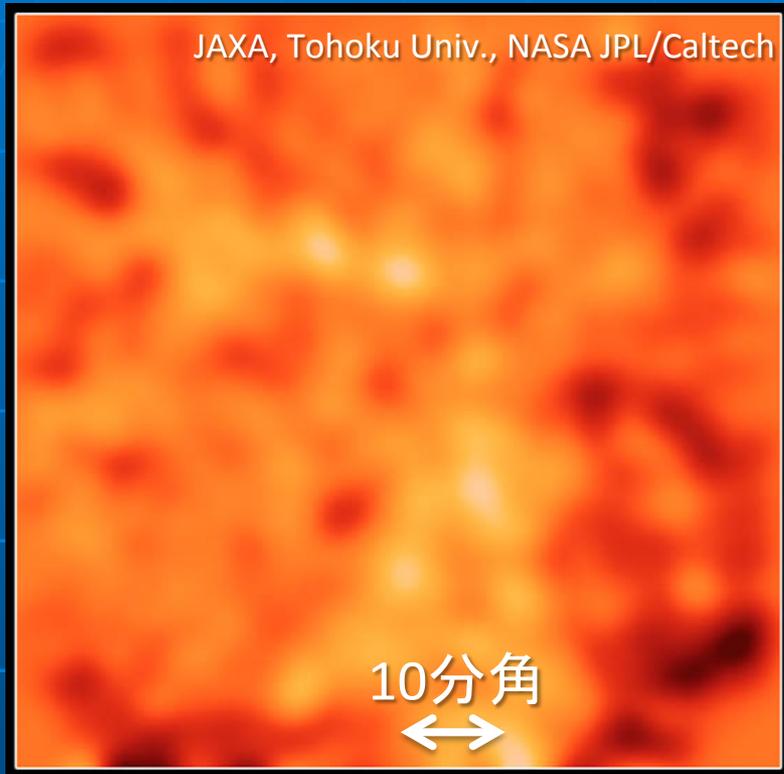
1.1 microns



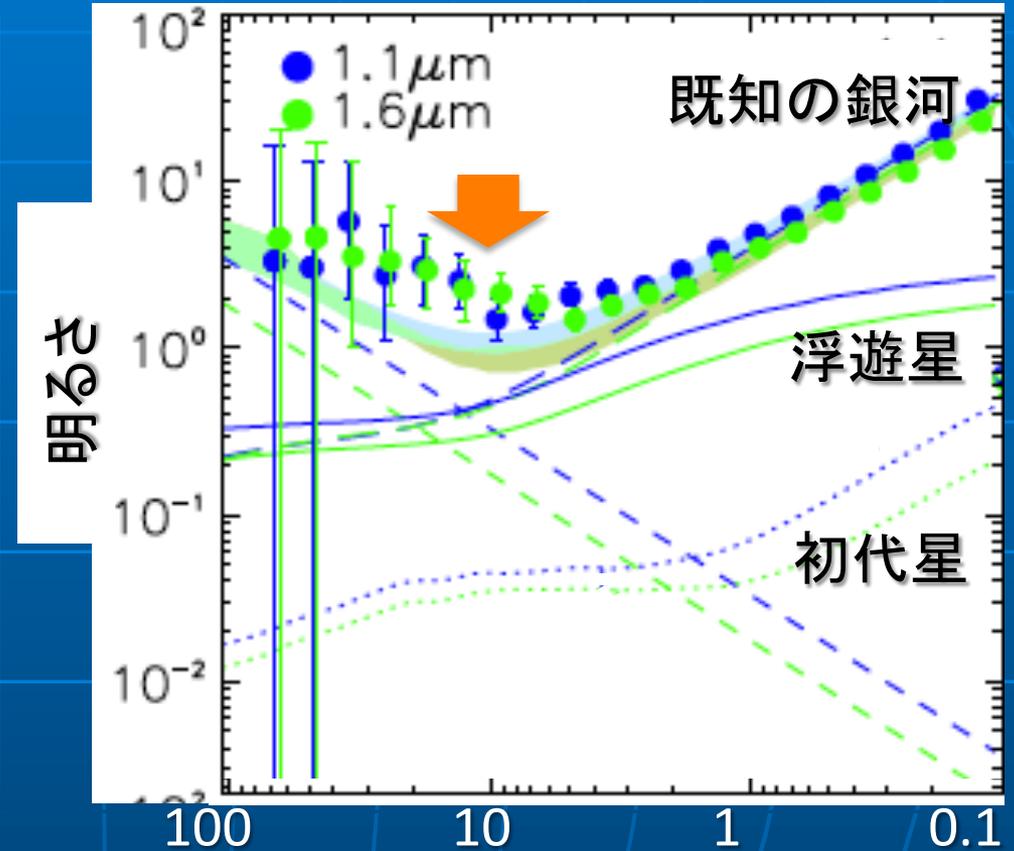
1.6 microns

Patterns of Infrared Light Measured by CIBER

EBLゆらぎの空間スペクトル解析



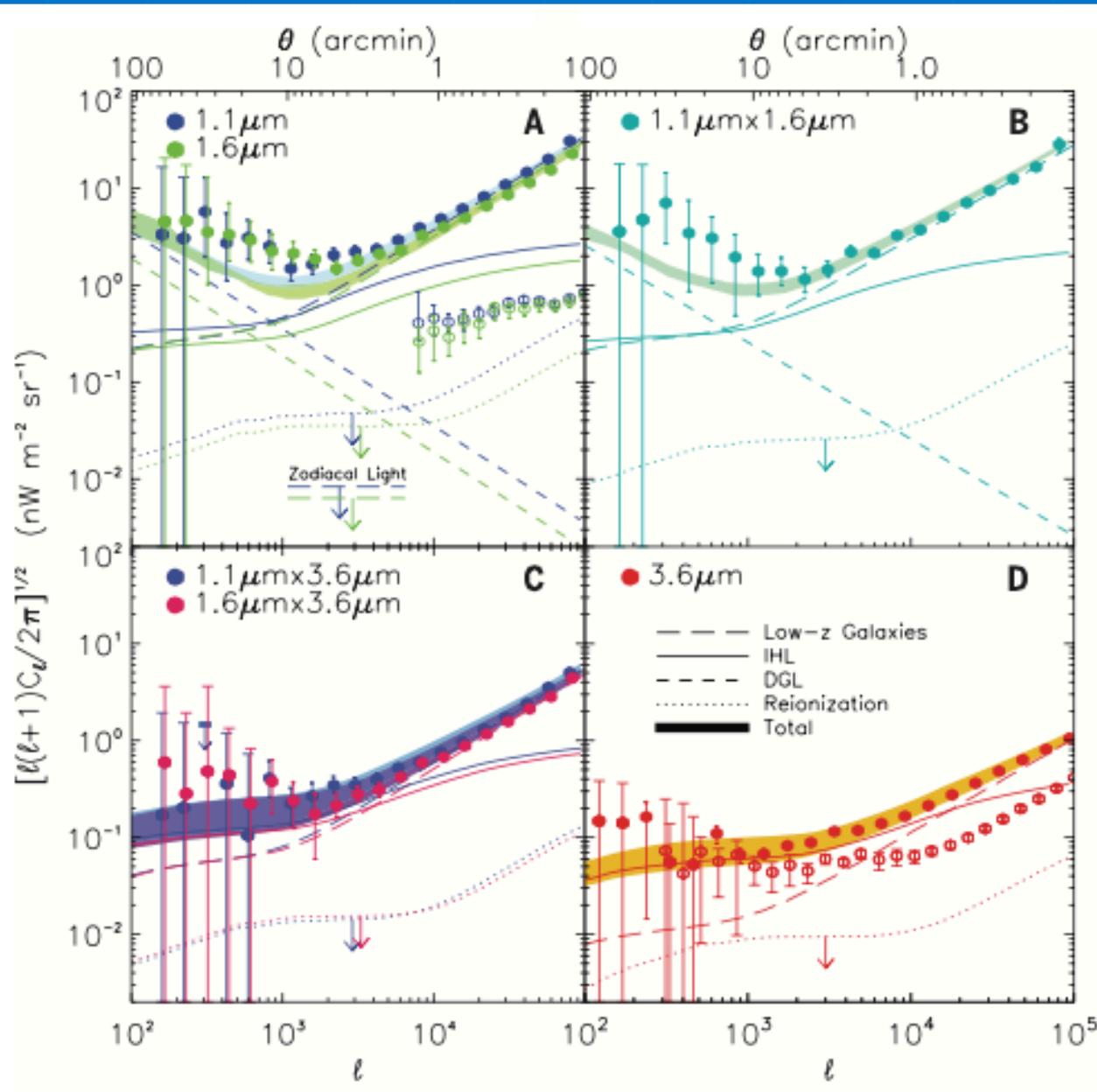
CIBER赤外線カメラの視野 = 2度



Science 2014年11月7日号より

- 「まだら模様」をいろいろな角度成分に分ける「空間スペクトル解析」を実施。
- 既知の銀河(鎖線:小角度で大きい)に浮遊星(実線:大角度で大きい)を加えると、データの大部分を説明することができる。

各波長でのEBLゆらぎ



装置起因の不定性

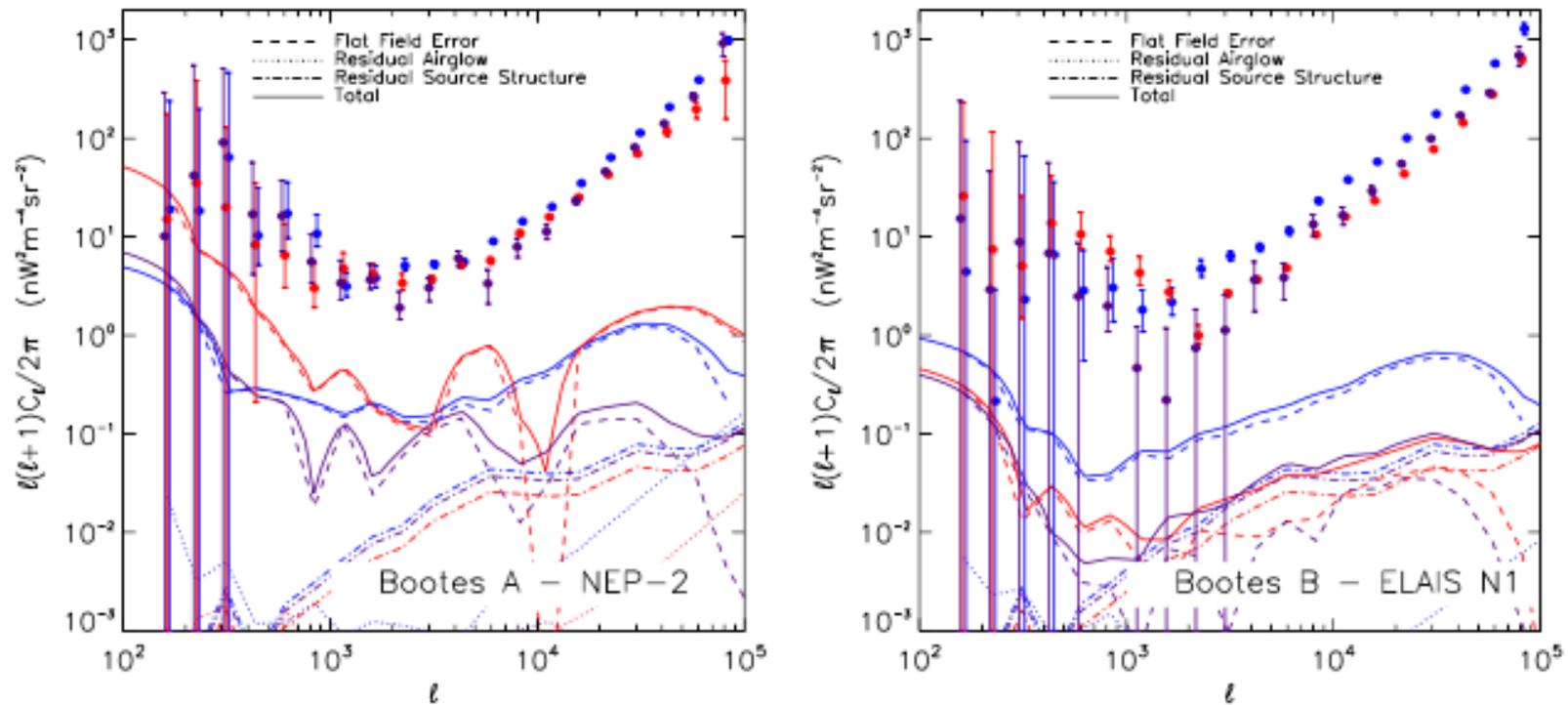
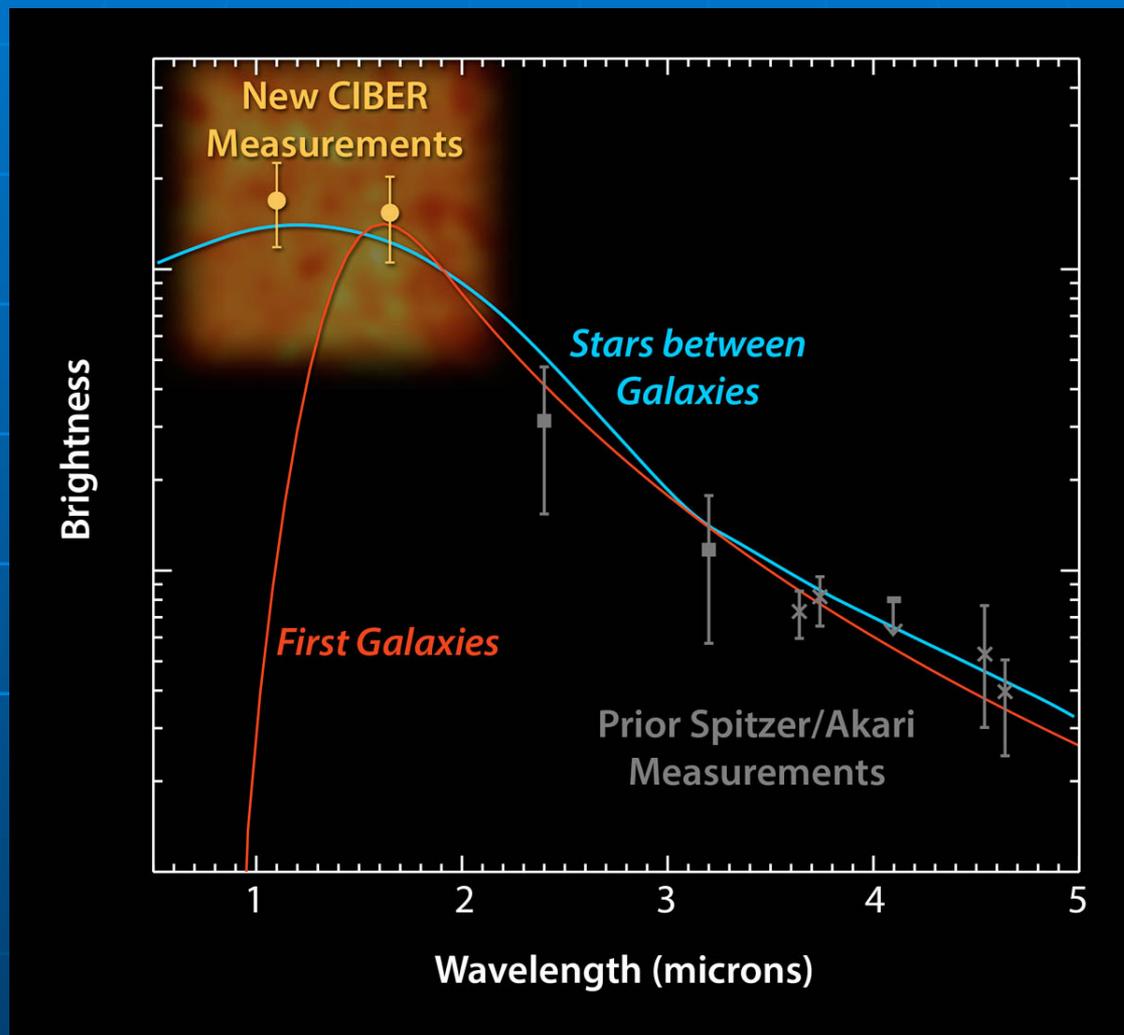


Figure S16: **Instrumental systematic uncertainties in the CIBER fluctuations measurement.** The CIBER auto- and cross-spectra for Boötes A – NEP in the second flight (left) and Boötes B – ELAIS-N1 in the third flight (left) are shown for 1.1 $\mu\text{m} \times 1.1 \mu\text{m}$ (blue), 1.6 $\mu\text{m} \times 1.6 \mu\text{m}$ (red), and 1.1 $\mu\text{m} \times 1.6 \mu\text{m}$ (purple). In each case, the estimated systematic uncertainty associated with flat field error (dashed), residual airglow (triple dot dash), and residual halos from masked sources (dot dash) are indicated. The total instrumental systematic uncertainty is shown as a solid line for each band and field combination.

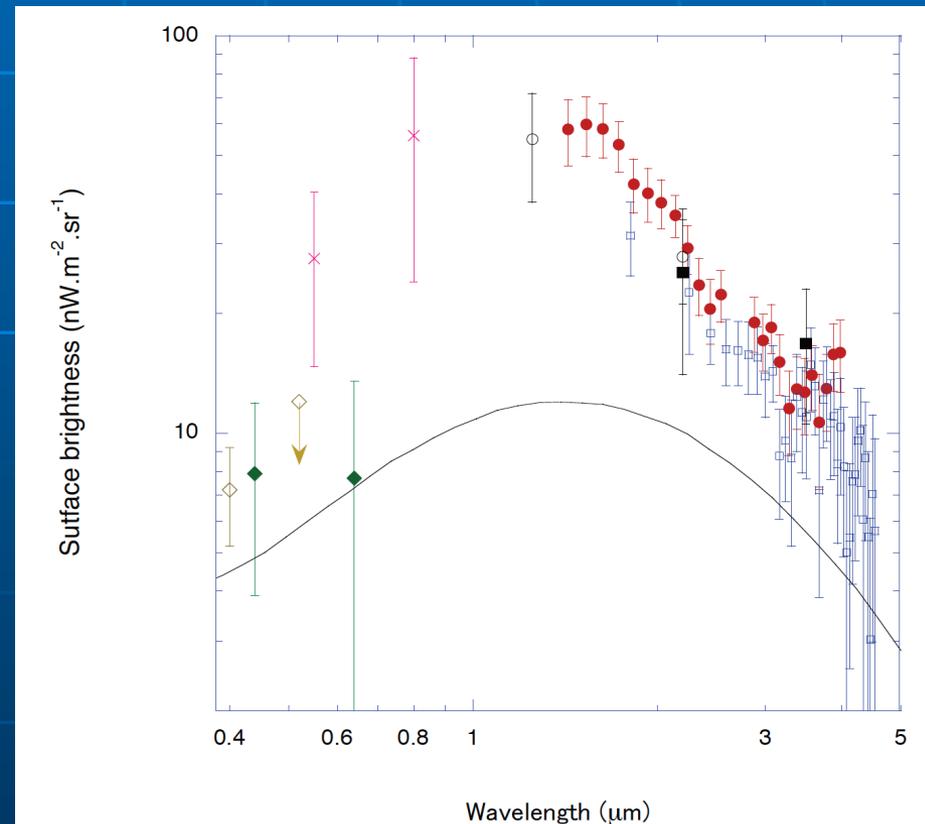
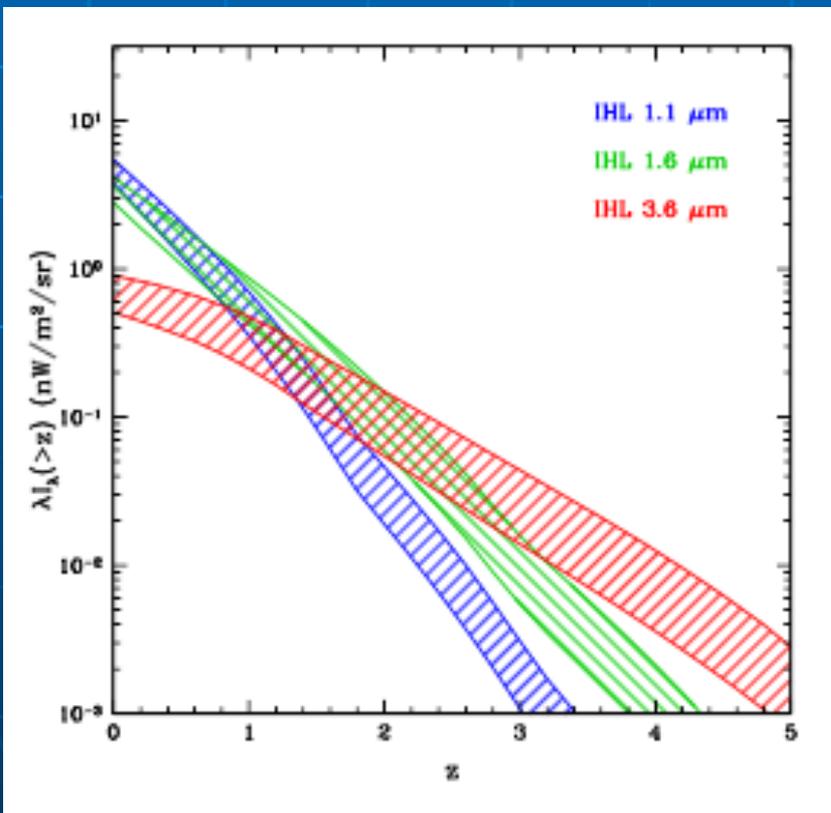
EBLゆらぎの波長スペクトル



過去の衛星観測で得られた「まだら模様」の大きさ。
今回のCIBER実験による新しい結果は、ハロー星説を支持している。

ハロー星モデルで絶対値は説明可能か？

- ハロー星の寄与は $10\text{nW}/\text{m}^2/\text{sr}$ 程度
- EBLエクセスを部分的には説明できるが、全ては説明できていない



まとめ

- ロケット実験CIBERにより、宇宙赤外線背景放射大きなゆらぎ成分があることを発見した。
- 発見したゆらぎの大きさは、既知の銀河全ての影響を考慮した予測値の2倍以上あり、これを説明するには、宇宙に未知の赤外線光源がなければならない。
- ゆらぎの原因となる未知の赤外線光源として、系外銀河のハロー領域に、普通の観測では見えないほどの暗い星が大量に存在するという仮説を提示した。
- ダークマターのトレーサーとして新たな観測手段となる。
- 最終結論のためには、CIBERよりもさらに精度の高い観測が必要である。