

# 第一世代天体の赤外線観測の展望

～ 赤外線宇宙背景放射の観測を中心に～

JAXA/ISAS 松浦周二

# はじめに

- 過去の観測
  - 赤外線宇宙背景放射 (CIB)
  - IRAS、COBE、Spitzer衛星によるCIBの観測結果
    - CIBエネルギー超過と第一世代天体
    - TeVガンマ線の銀河間吸収測定によるCIBへの制限
- 現在進行中の観測 ~ より高い精度の観測を目指す ~
  - あかり (ASTRO-F) 衛星
  - ロケット観測 (CIBER)
- 将来計画
  - ソーラーセイルミッション

# 第一世代天体に関する過去の観測

～ 赤外線宇宙背景放射の観測 ～

# 赤外線宇宙背景放射 (CIB)

## ■ 宇宙背景放射

- ・ 点源に分解できない銀河系外放射の重ね合せ
- ・ 様々な光の放射・吸収のすべての歴史を反映
- ・ 面輝度測定であるため遠方天体でも比較的容易に検出

## ■ 赤外線宇宙背景放射 (CIB)

Cosmic Infrared Background radiation

- ・ 大きな赤方偏移の天体からの紫外/可視放射が観測
- ・ 空間減光が小さい

**宇宙論的観測に有望**

**ただし放射成分の分離が必要** (しかも多くの場合困難)

## ■ CIB観測による原初天体検出の試み

70-80年代:  $z \sim 20$ の原始銀河の近赤外域における検出期待  
Partridge & Peebles, Carr & Bond, etc.

80-90年代: 名古屋大グループ ロケット観測実施  
Matsumoto et al., etc.

近赤外域に超過成分あり  
~ $2\mu\text{m}$ にて $z \sim 20$ のLy- $\alpha$ 検出?

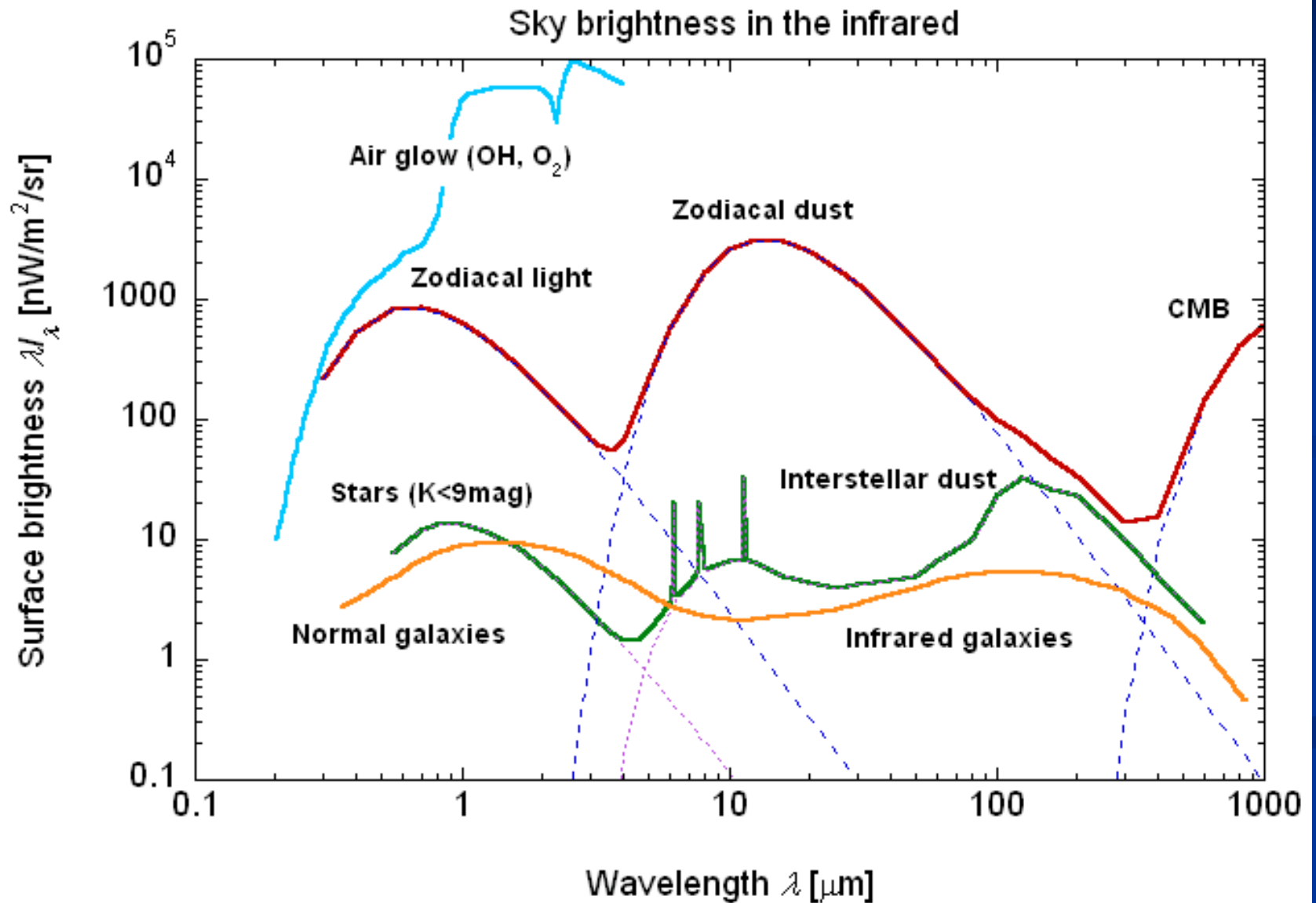
### ● これまでのおもな近赤外線宇宙背景放射観測機

1988 – 1994 観測ロケットK-9M-78, S520-11/15 (ISAS)

1990 COBE/DIRBE (NASA)

1994 SFU/IRTS (ISAS)

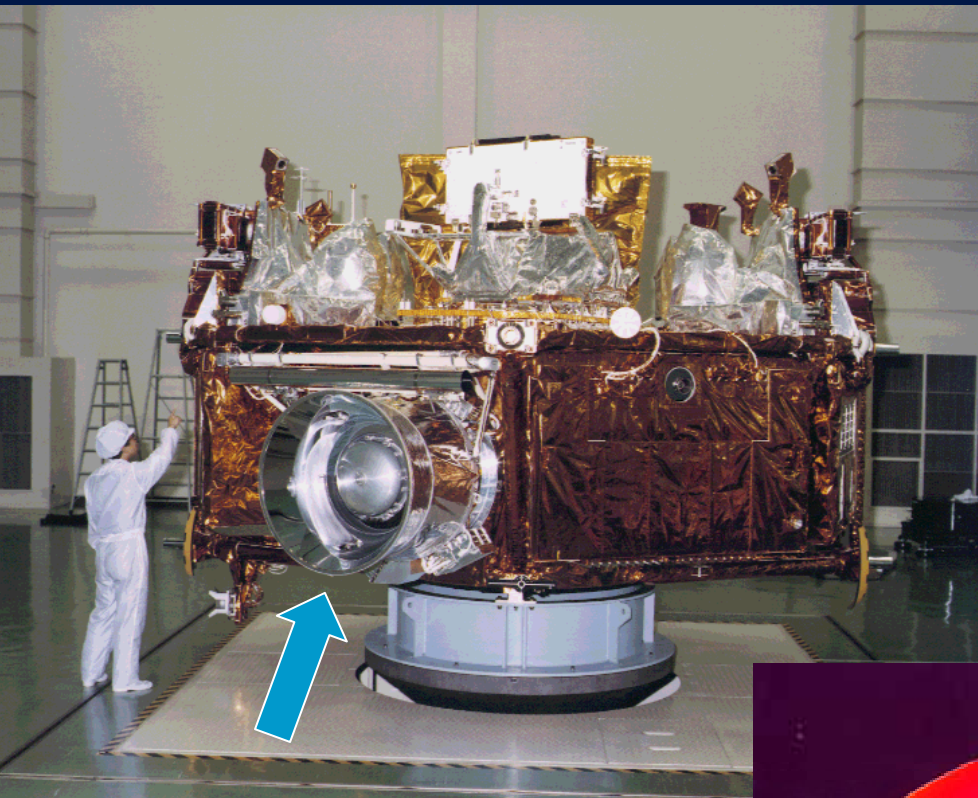
# 赤外域での空の明るさ



# CIB観測装置の必須仕様

- スペースからの観測で大気放射を避ける
  - ロケット、人工衛星
  - $h > 100\text{km}$  (OH layer)
- 冷却望遠鏡により絶対値測光が可能となる
  - $T < 100\text{K}$  @NIR
- 高感度検出器
  - 低ノイズ、低ダークカレント

# IRTS (InfraRed Telescope in Space)



旧 宇宙科学研究所 SFU衛星搭載  
宇宙赤外線望遠鏡 IRTS  
95年3月HIIロケットで打ち上げ

液体He冷却望遠鏡 (口径15cm)

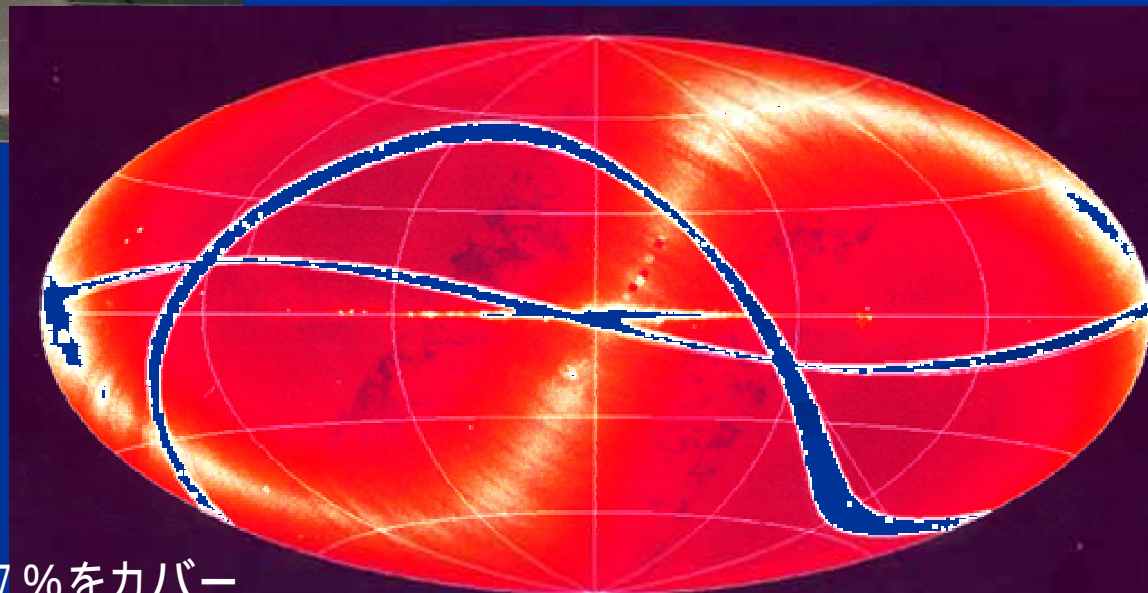
近赤外分光装置 NIRS

角分解能 0.14度

(COBEの5倍の空間分解能)

波長域 1.4 ~ 4.1 $\mu$ m を分光

(COBEの5倍のスペクトル分解能)



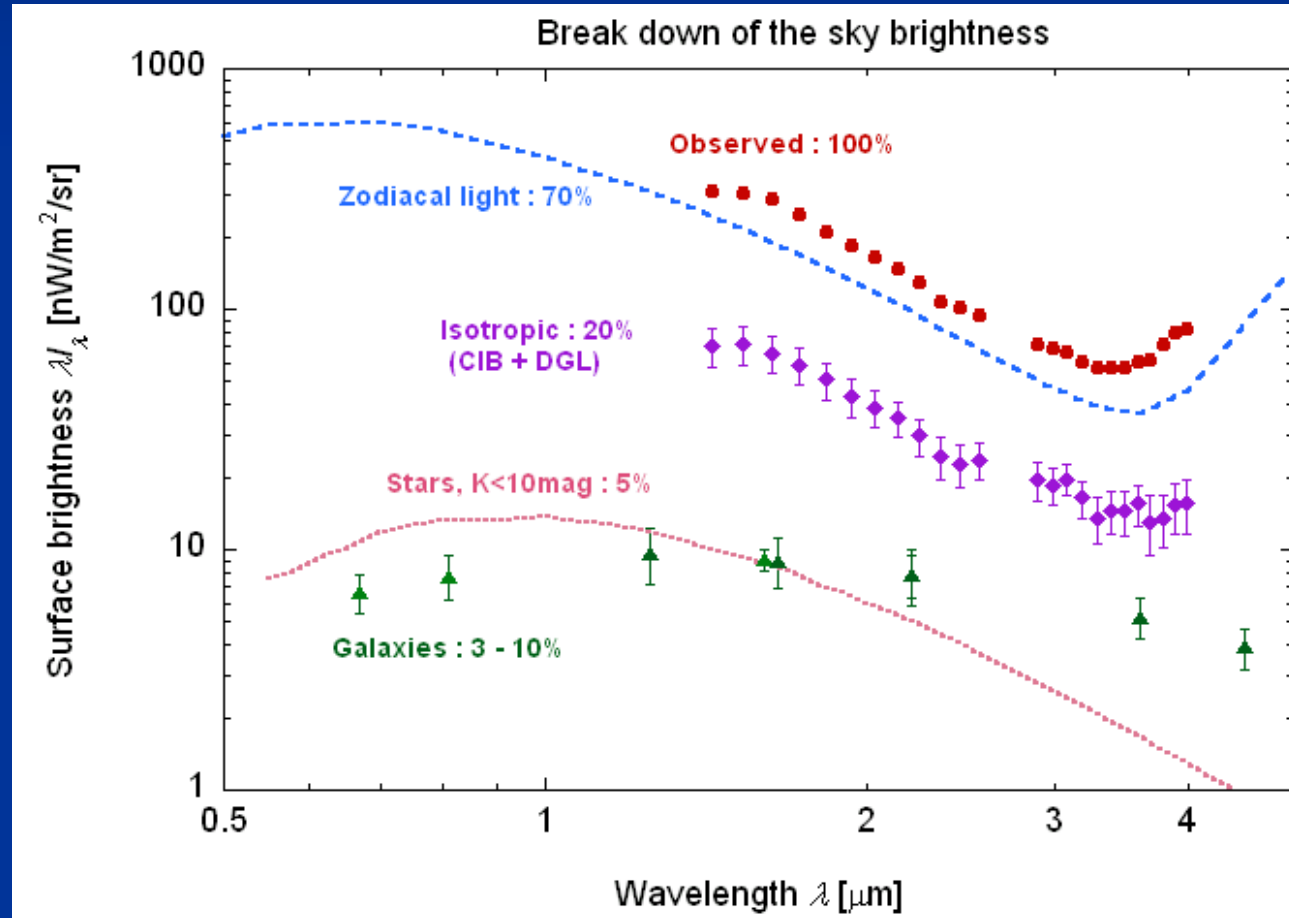
約1ヶ月間に全天の7%をカバー



# 様々な銀河系内の前景放射成分

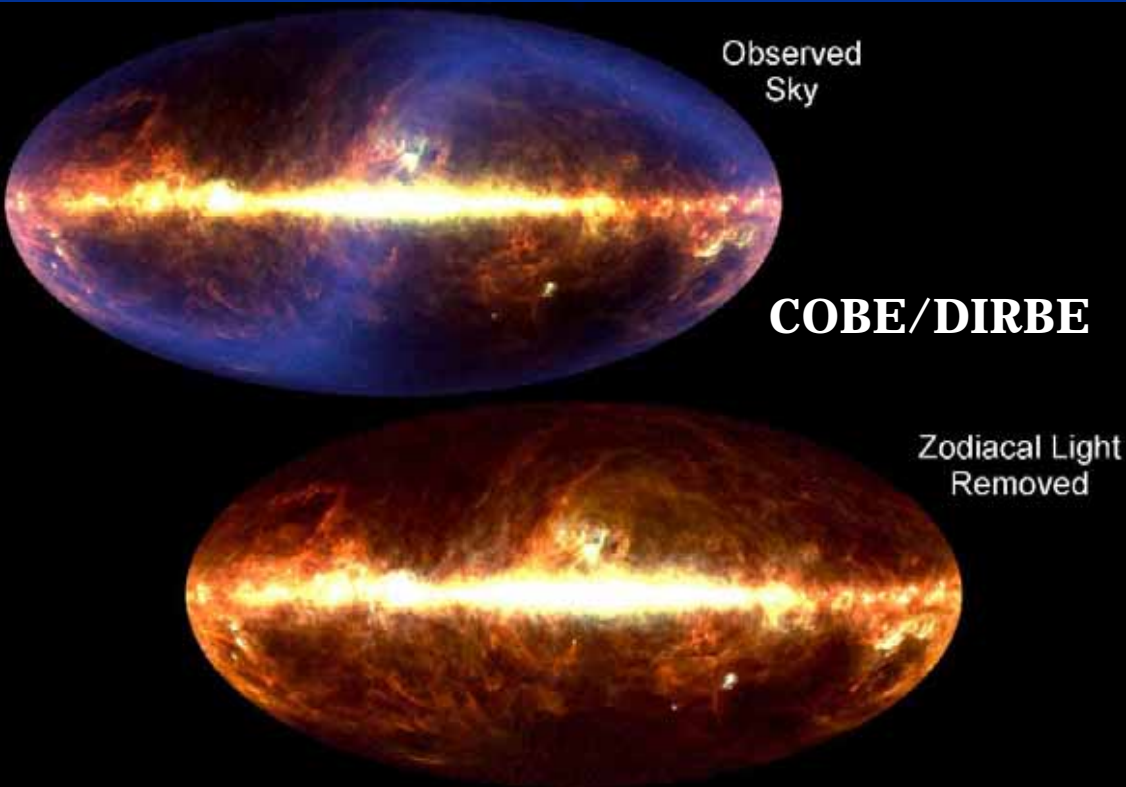
$$I_{SKY} = I_{ZL} (70\%) + I_{SL} (5\%) + I_{DGL} + I_{CIB} (20\%)$$

- $I_{SKY}$  : 空の明るさ
- $I_{SL}$  : 星野光
- $I_{DGL}$  : 銀河系拡散光
- $I_{ZL}$  : 黄道光
- $I_{CIB}$  : 等方成分



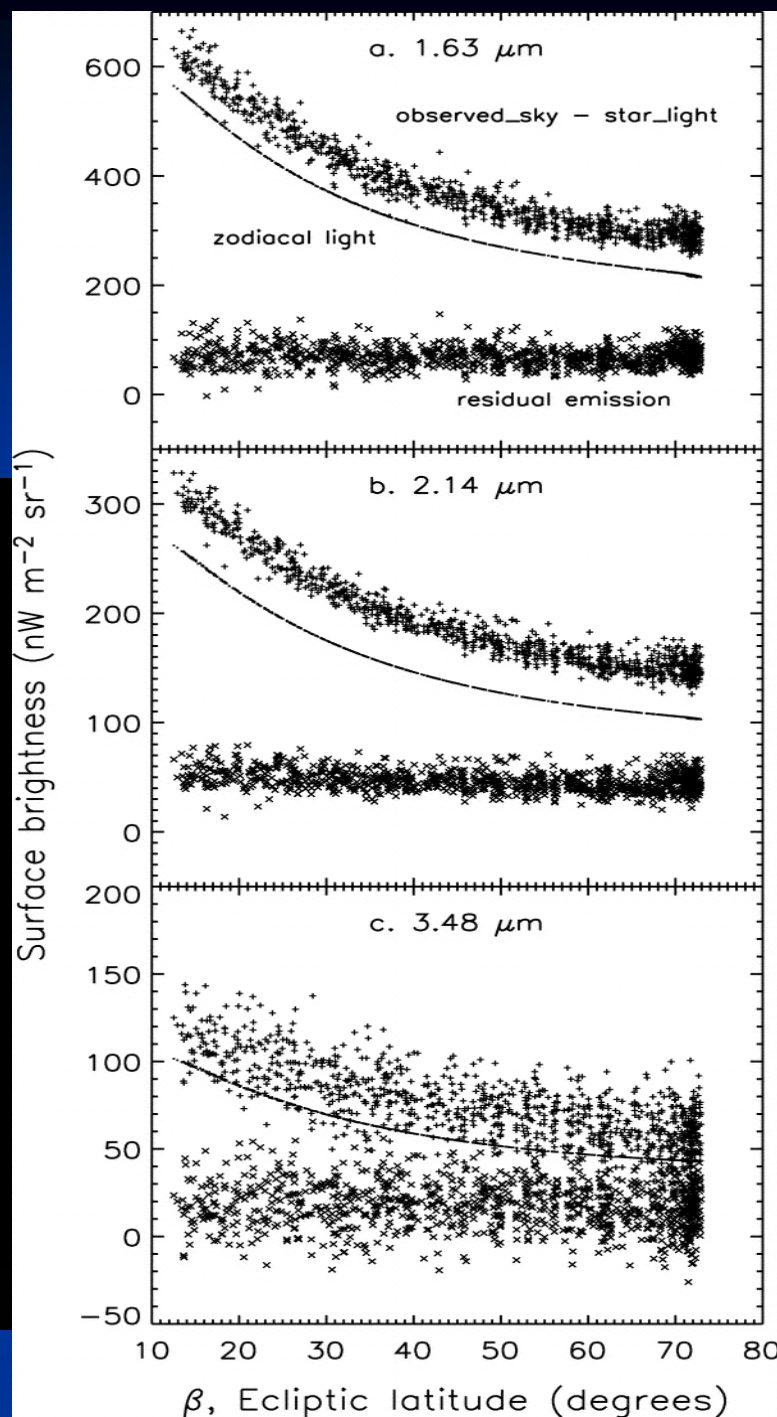
# 等方成分の抽出

- 銀河光 : 銀河モデルによる暗い星の差引き
  - 黄道光 : 黄緯依存性による差引き
- COBE全天マップに基づくモデル  
精度 ~ 5%



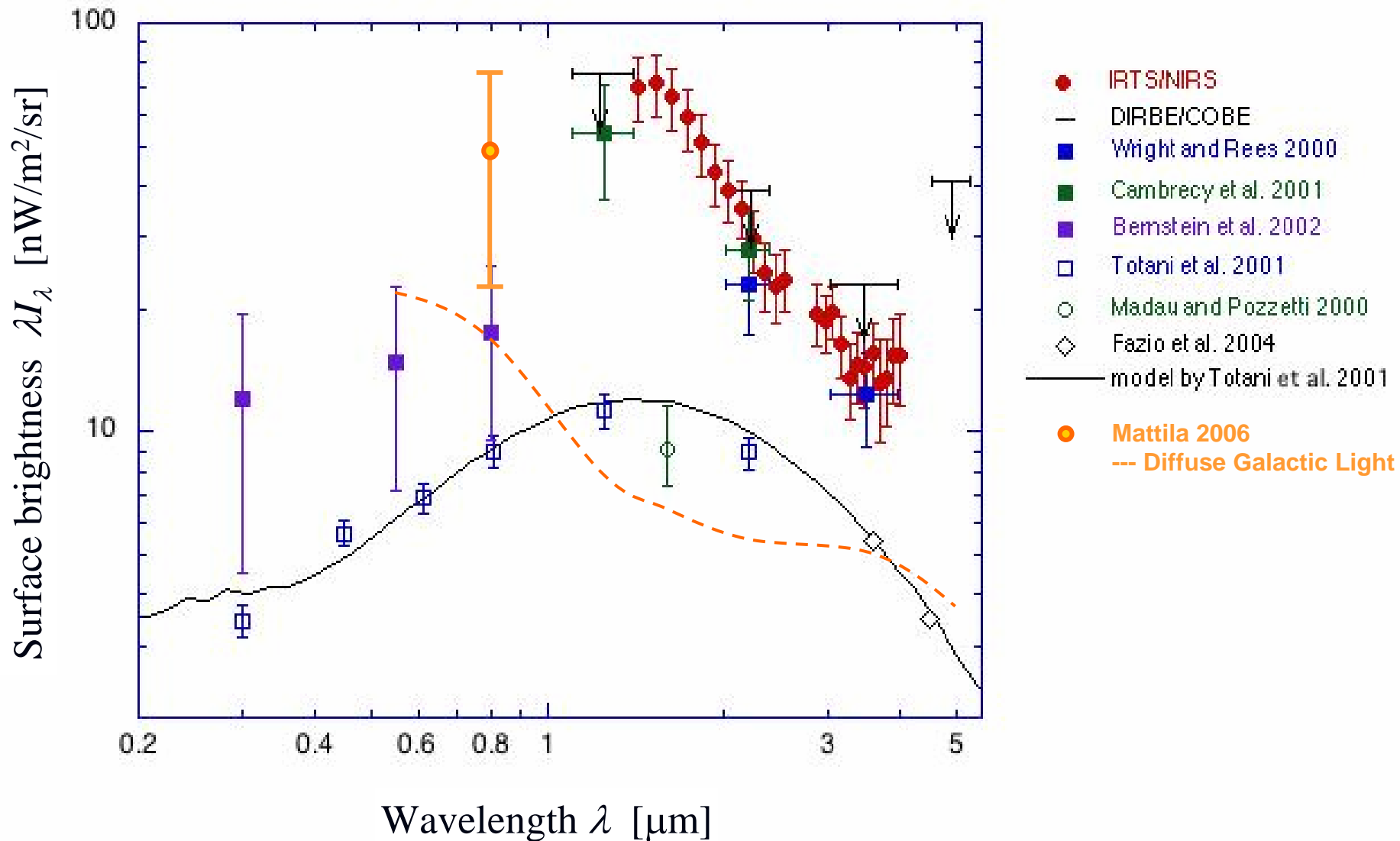
Kelsall et al. (1998) ApJ 508, 44

Arendt et al. (1998) ApJ 508, 74



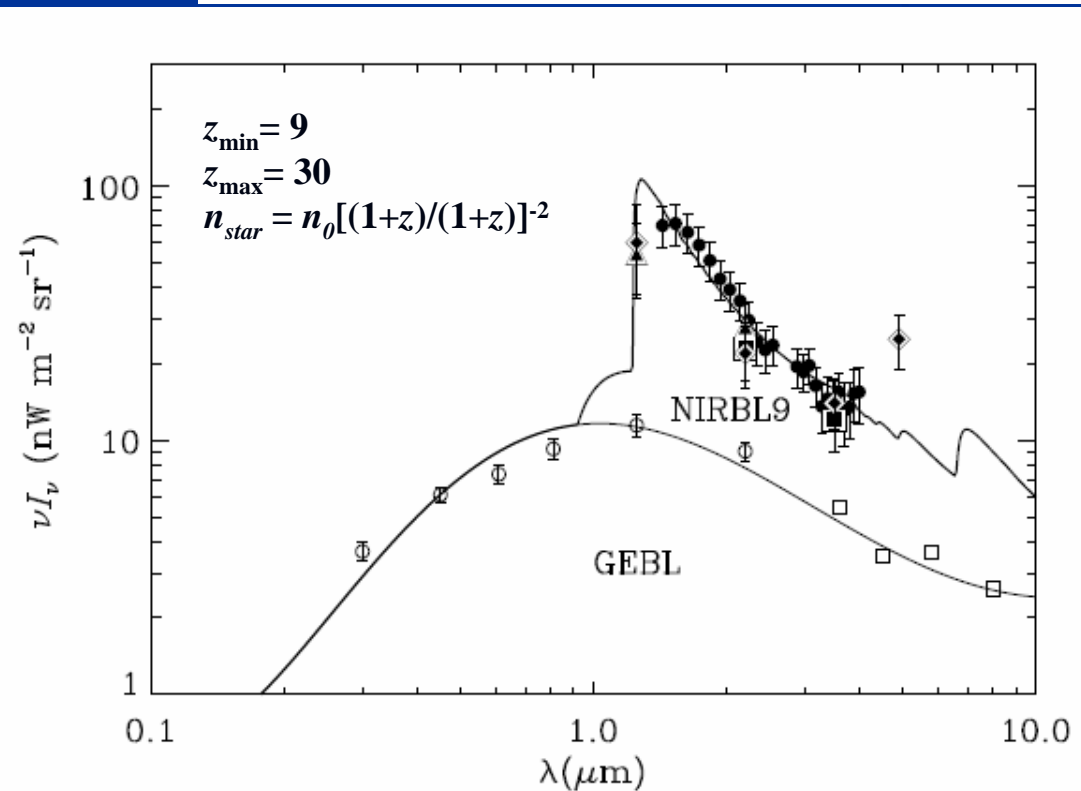
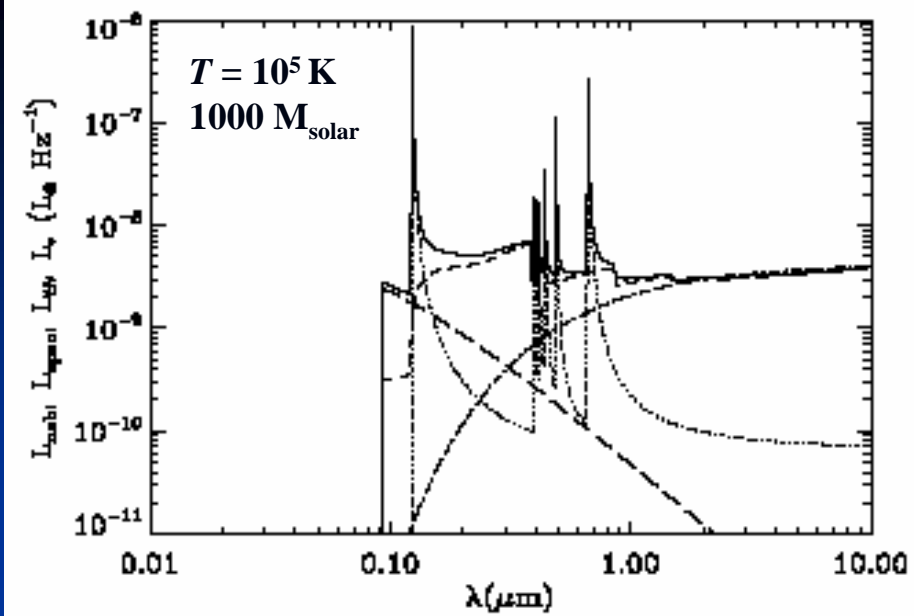
IRTS/NIRS

# CIBの放射スペクトル直接観測の現状



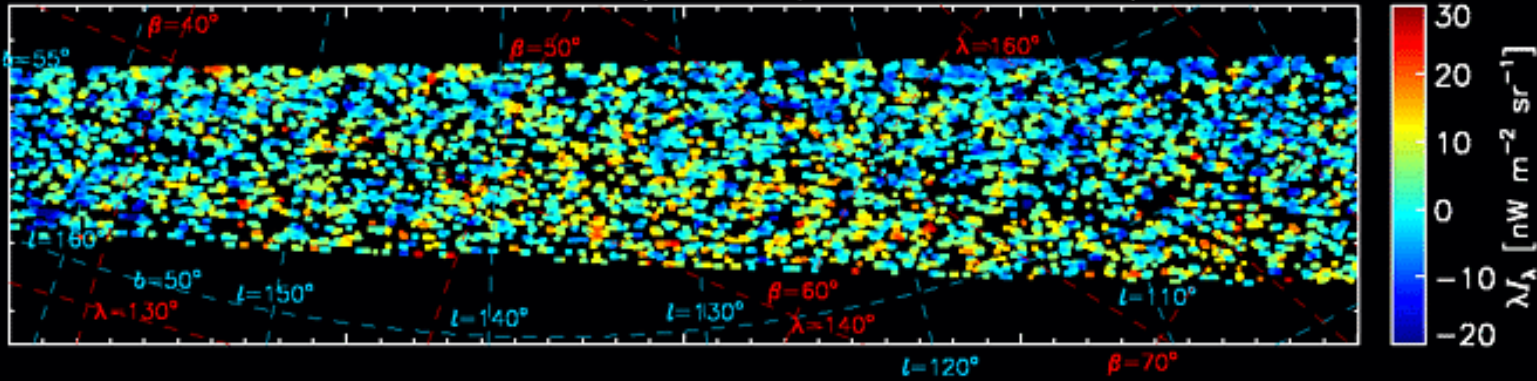
# 赤外超過成分は 第一世代の星か？

- CMB観測による電離ガス の決定  
 $z = 10-30$ で宇宙再電離
- 第一世代の星 ( $z > 10$ )の紫外放射  
 が再電離源  
 近赤外背景放射として観測
- 観測された  $1 - 1.5\mu\text{m}$  付近の  
 ステップ状スペクトル  
 $z > 10$ の大質量星による  
 $\text{Ly-}\alpha$ と紫外連続放射

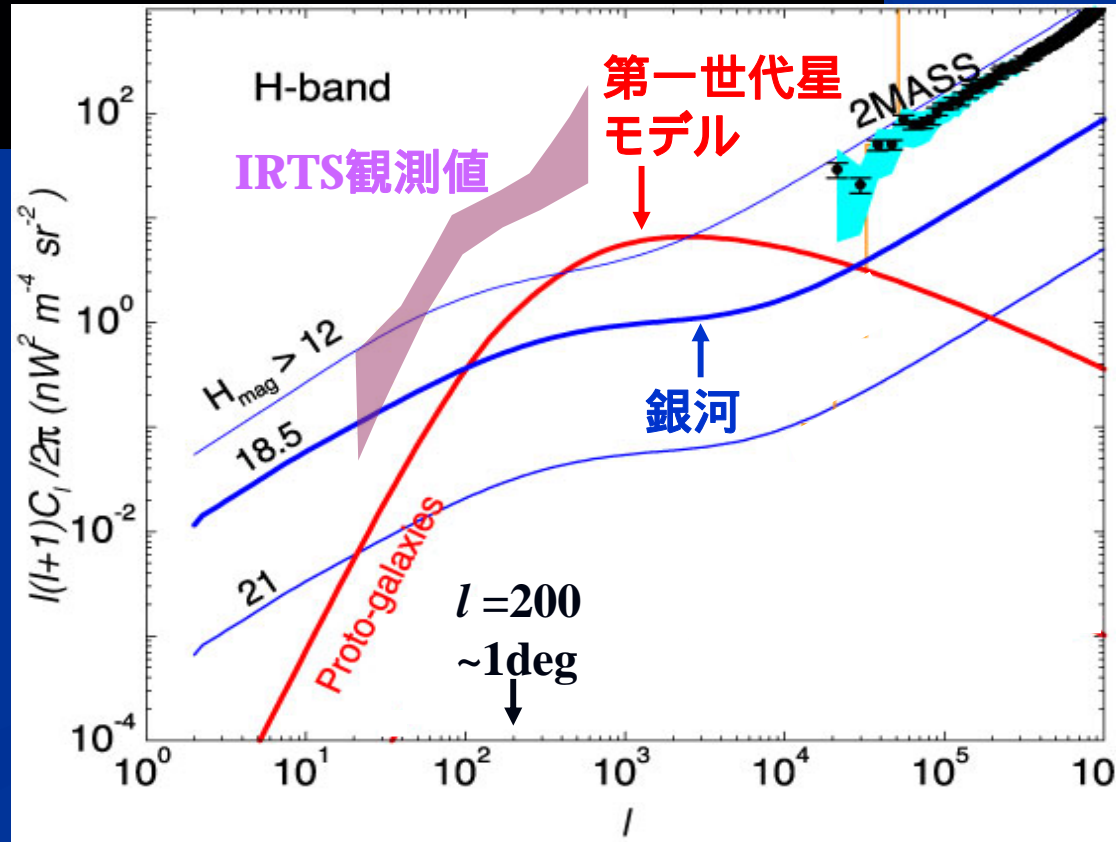


# 背景放射ゆらぎの空間スペクトル

NIRS CIB fluctuation (1.4–2.2 $\mu\text{m}$  ; Ch17–Ch24)



- **第一世代星**: 構造進化が線形領域  
当時のダークマター分布に従う
- **銀河の分布**: 非線形成長段階  
小角度スケールのクラスタリング強
- IRTSで測定されたゆらぎ
  - 1 - 3° の特徴的スケール
  - $z \sim 10 \rightarrow$  comoving  $\sim 100\text{Mpc}$   
宇宙初期の大規模構造？



# SpitzerによるCIBゆらぎの観測

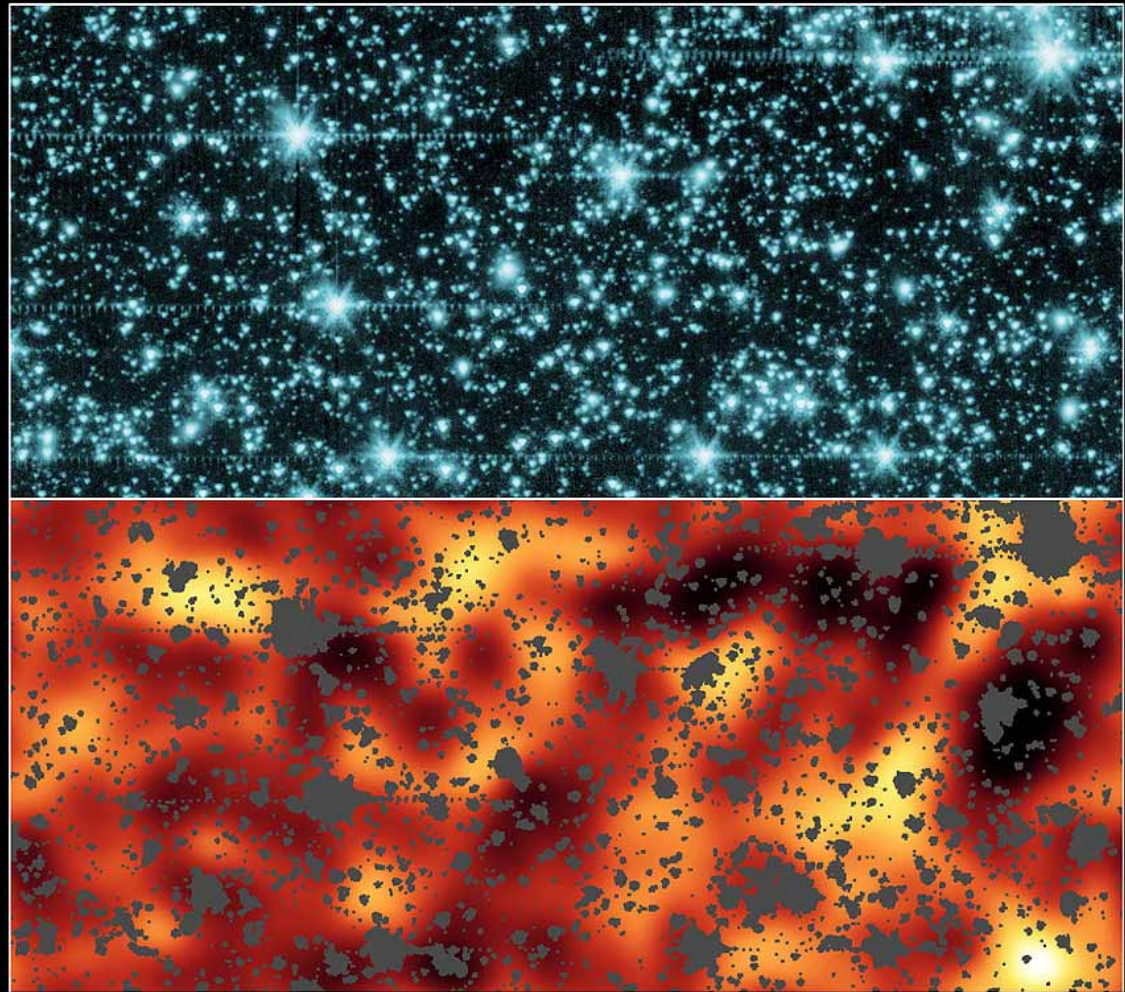
## Spitzer

- 85cm冷却赤外望遠鏡
- $\lambda = 3.6 \mu\text{m}$
- 秒~分角スケールでのゆらぎを検出

上: 点源除去前

下: 点源除去後

- 違う時期における観測で結果が再現  
黄道光起源の否定



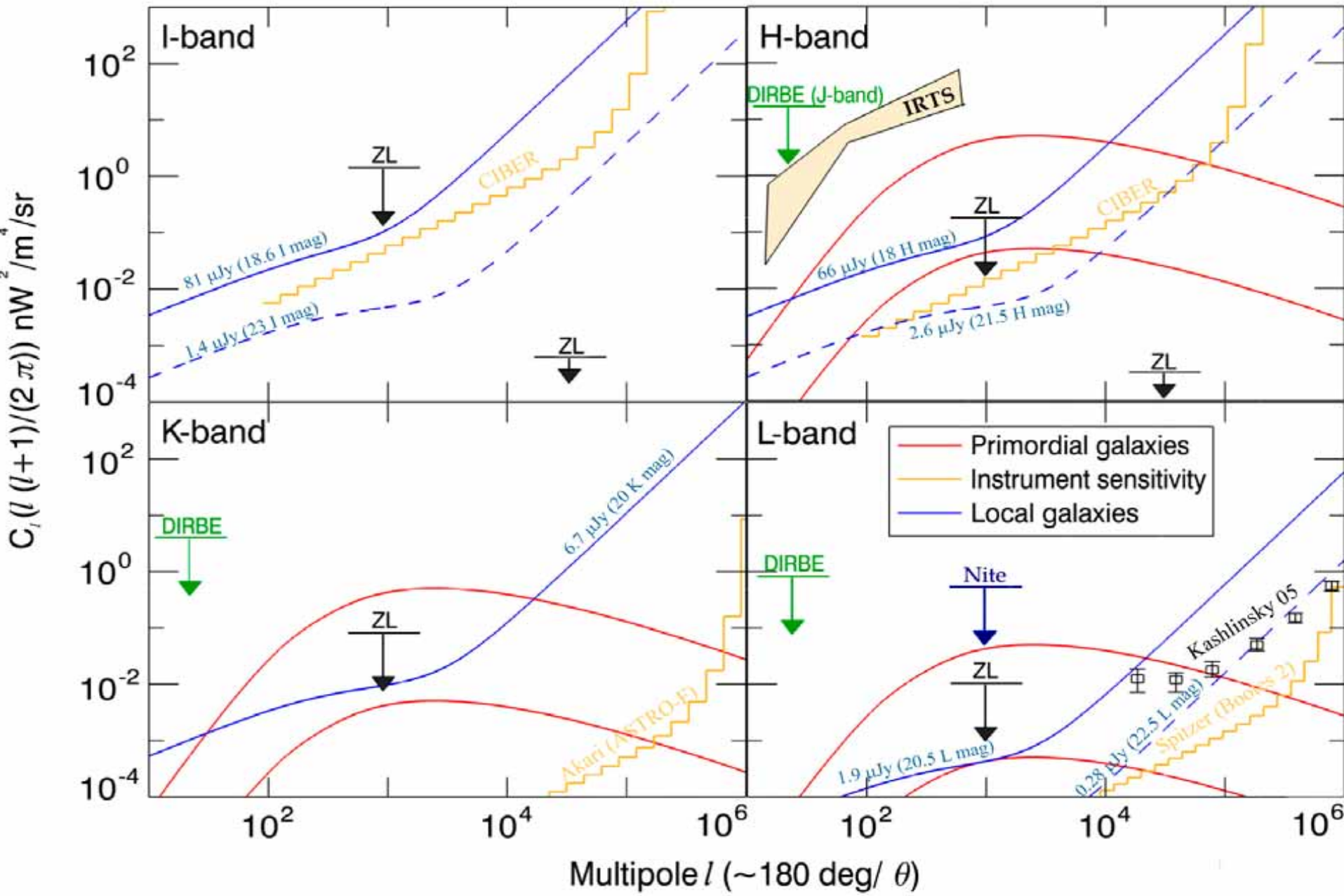
Infrared Background Light from First Stars

Spitzer Space Telescope • IRAC

NASA / JPL-Caltech / A. Kashlinsky (GSFC)

ssc2005-22a

# 背景放射ゆらぎの観測結果



# 赤外線背景放射の超過は本当に 第一世代天体起源か？

~ TeV 線の銀河間吸収測定による否定的観測結果 ~

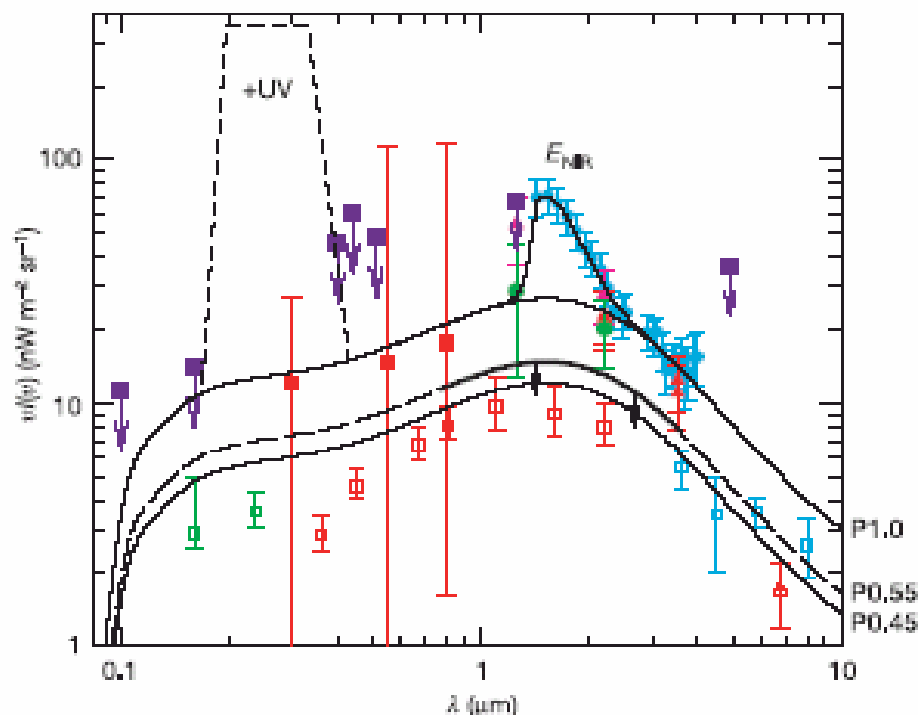
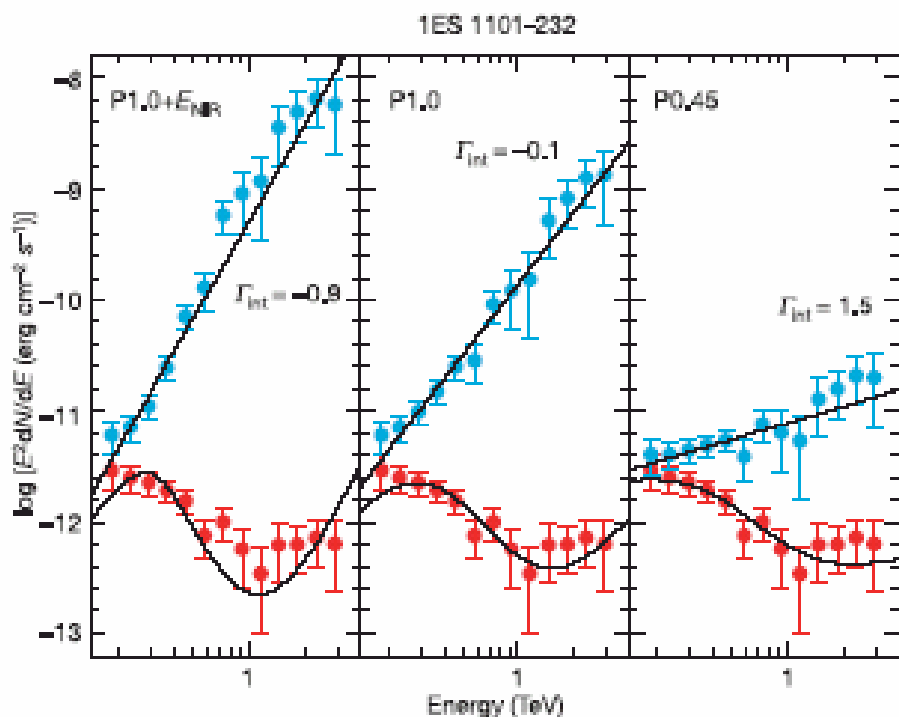


# TeVガンマ線の銀河間吸収測定によるCIBへの制限(1)

- $\gamma(\text{TeV}) + \gamma(\text{NIR}) \rightarrow e^- + e^+$  による銀河間吸収,  $E(\text{NIR}) \times E(\text{TeV}) \sim 2m_e c^2$
- 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,  $\Gamma$ が異常でないかにより判断

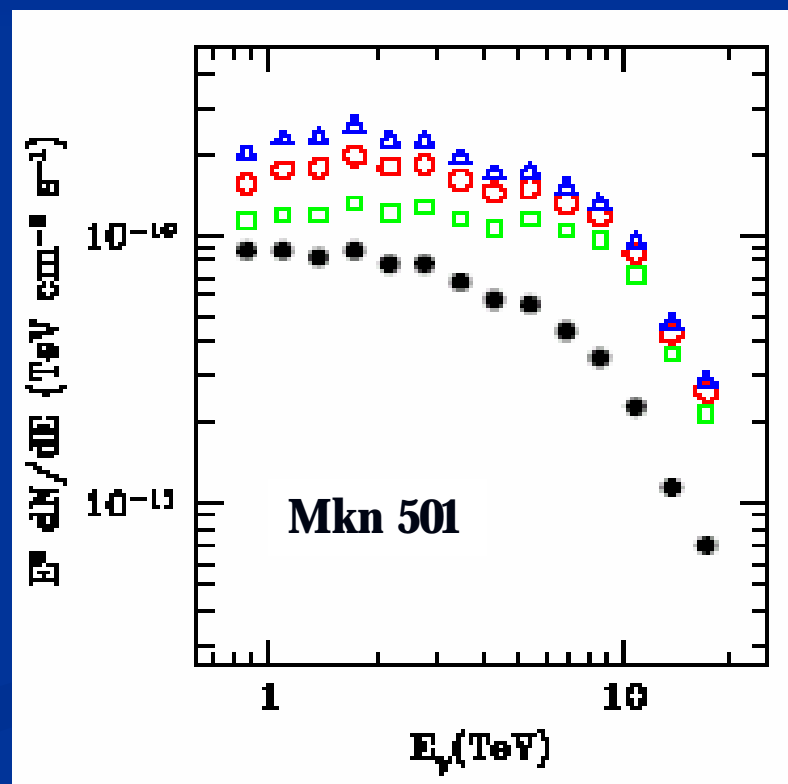
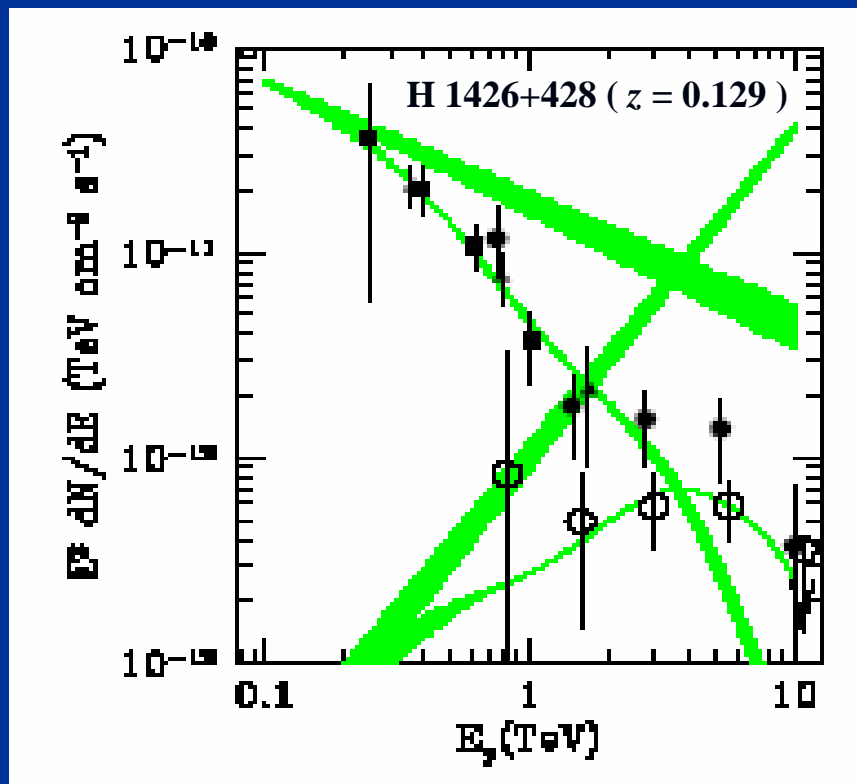
## 結果

- 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  $\rightarrow$  : 矛盾がない



# TeVガンマ線の銀河間吸収測定によるCIBへの制限(2)

- 同観測手法は、CAT, Whipple, HEGRAなど他にもあるが再現性が良くない
- $\Gamma > 1.5$  となる新しい物理メカニズムが提案
  - 吸収が小さい近傍のblazar (Mkn 421, Mkn 501) ではその兆候はない
- 今後、さまざまな吸収量(距離)における観測と多くのサンプルが期待される



**現在進行中の赤外背景放射観測**

**～ より高い精度の観測を目指して～**

# AKARI observations of Cosmic Near-infrared Background Radiation



PI: Shuji Matsuura



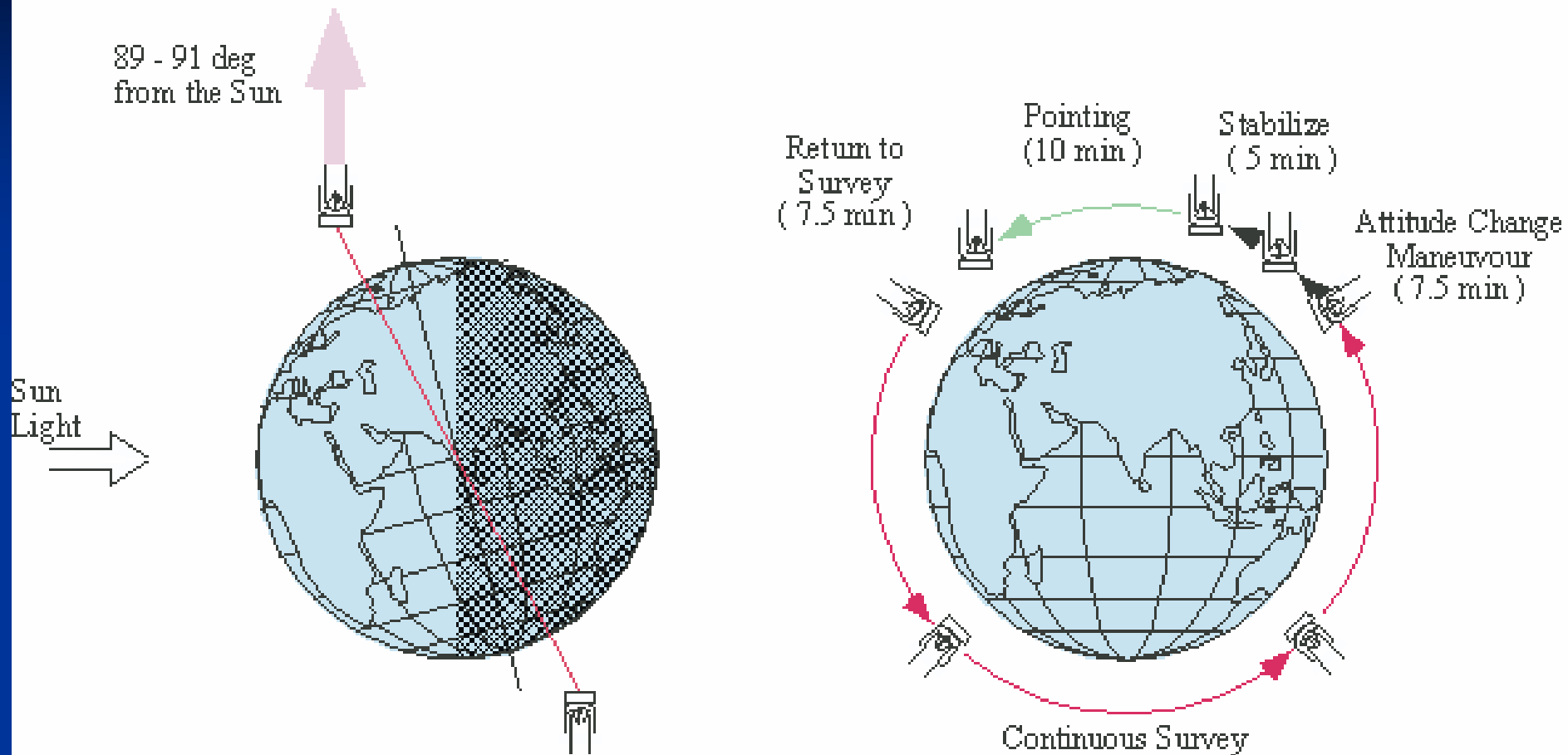
M. Kawada, H. Shibai (Nagoya), T. Matsumoto, H. Matsuhara, T. Wada, S. Makiuti, C. Pearson (ISAS), T. T. Takeuchi (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille), S. Serjeant, T. Takagi (Kent), R. Savage (Sussex), S. Oyabu, M. Tanaka (NAOJ), M. Noda (Nagoya City Science Museum), Y. Taniguchi (Tohoku), and the other Cosmic background WG members

# ASTRO-F Mission (AKARI)



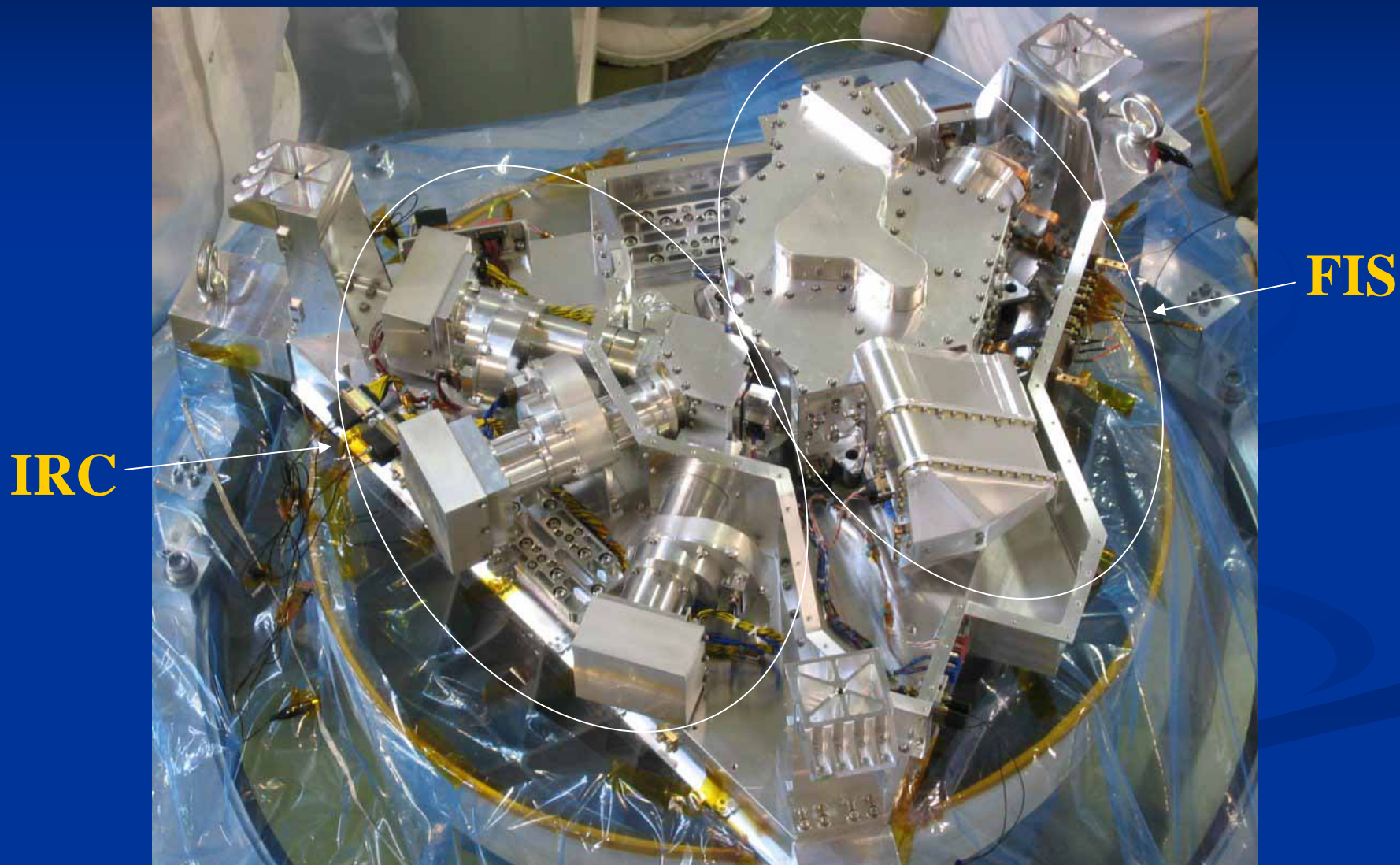
- 口径68.5cm 液体ヘリウム冷却望遠鏡
- ミッション期間： 1.5年
- 全天サーベイ：
  - 遠赤外 (50 - 180  $\mu\text{m}$ ) 4バンド
  - 中間赤外 (9, 20  $\mu\text{m}$ ) 2バンド
- 指向観測：
  - 1観測あたり最大露出時間 10分
  - 赤外カメラ: Infrared Camera (IRC)
  - 近中間赤外： 2 - 26  $\mu\text{m}$
  - 多波長バンドフィルター切り替え
  - 10'x10' FOV
- 現在の状況
  - 2006年2月打ち上げ
  - 2006年4月観測開始
  - Phase-1期観測完了

# 観測モード

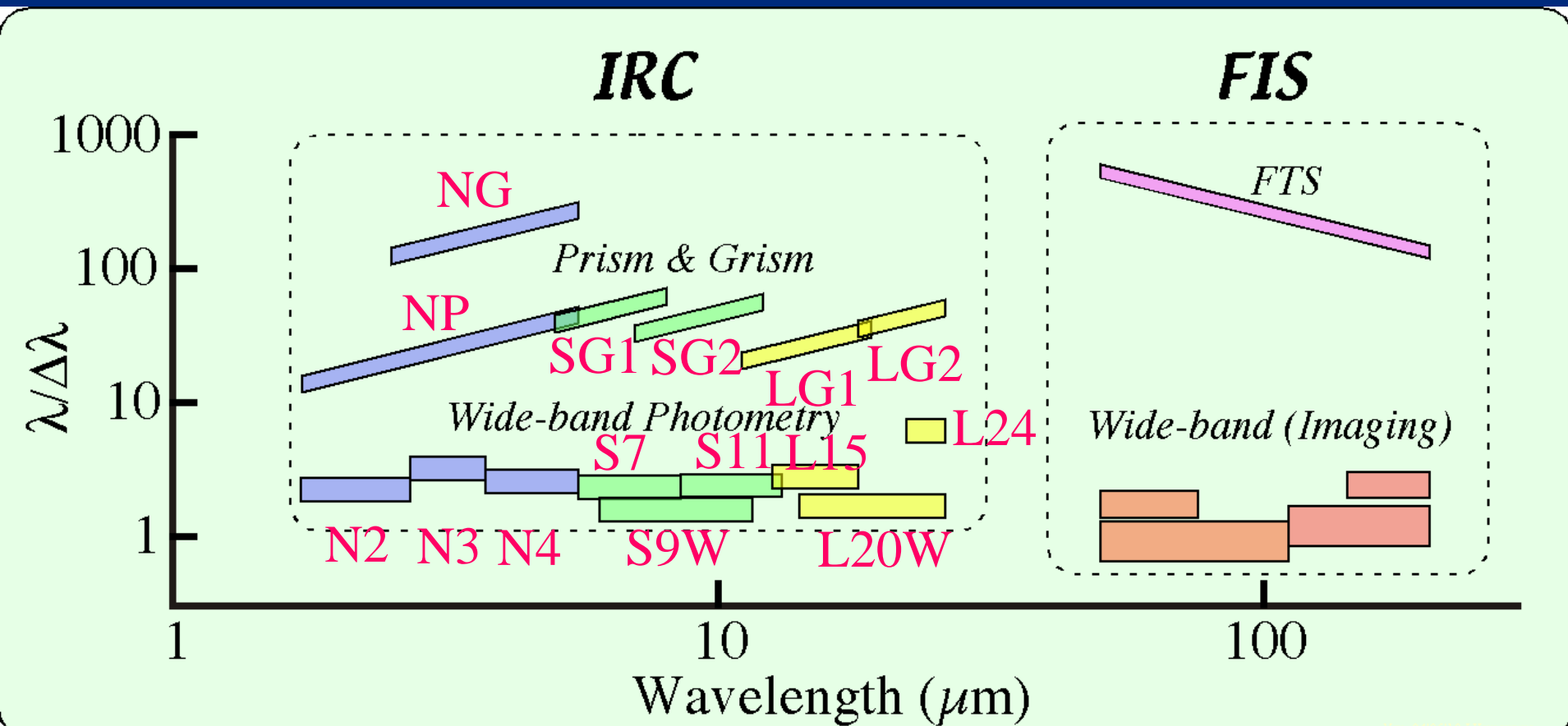


- サーベイ観測 (100 min/rev)
- 指向観測
  - MAX 10 min exposure
  - MAX 3 times/rev

# AKARI焦点面装置



# AKARI Wavebands





# AKARIによるCIB観測内容

## 撮像観測

- 2 26 $\mu\text{m}$ の近中間赤外9バンド撮像
  - Spitzer: 第一世代星の寄与が小さい $> 3.5\mu\text{m}$ のみ
  - 中間赤外観測による黄道光寄与推定
- $K < 20\text{mag}$ の点源寄与を除去した測定
  - IRTS:  $K < 10\text{mag}$
- 2秒角 ~ 2度角にわたる広帯域ゆらぎスペクトル
  - IRTS: 10分角 ~ 10度角
- 長期間にわたる同一天域のくりかえし観測
  - 季節変動が予測される黄道光の分離

## 分光観測

- より長い波長(高赤方偏移)のCIBスペクトル
- バルマー輝線の検出

# NEP wide/deep survey

NEPはVisibilityが高いため集中的なマッピング観測が可能

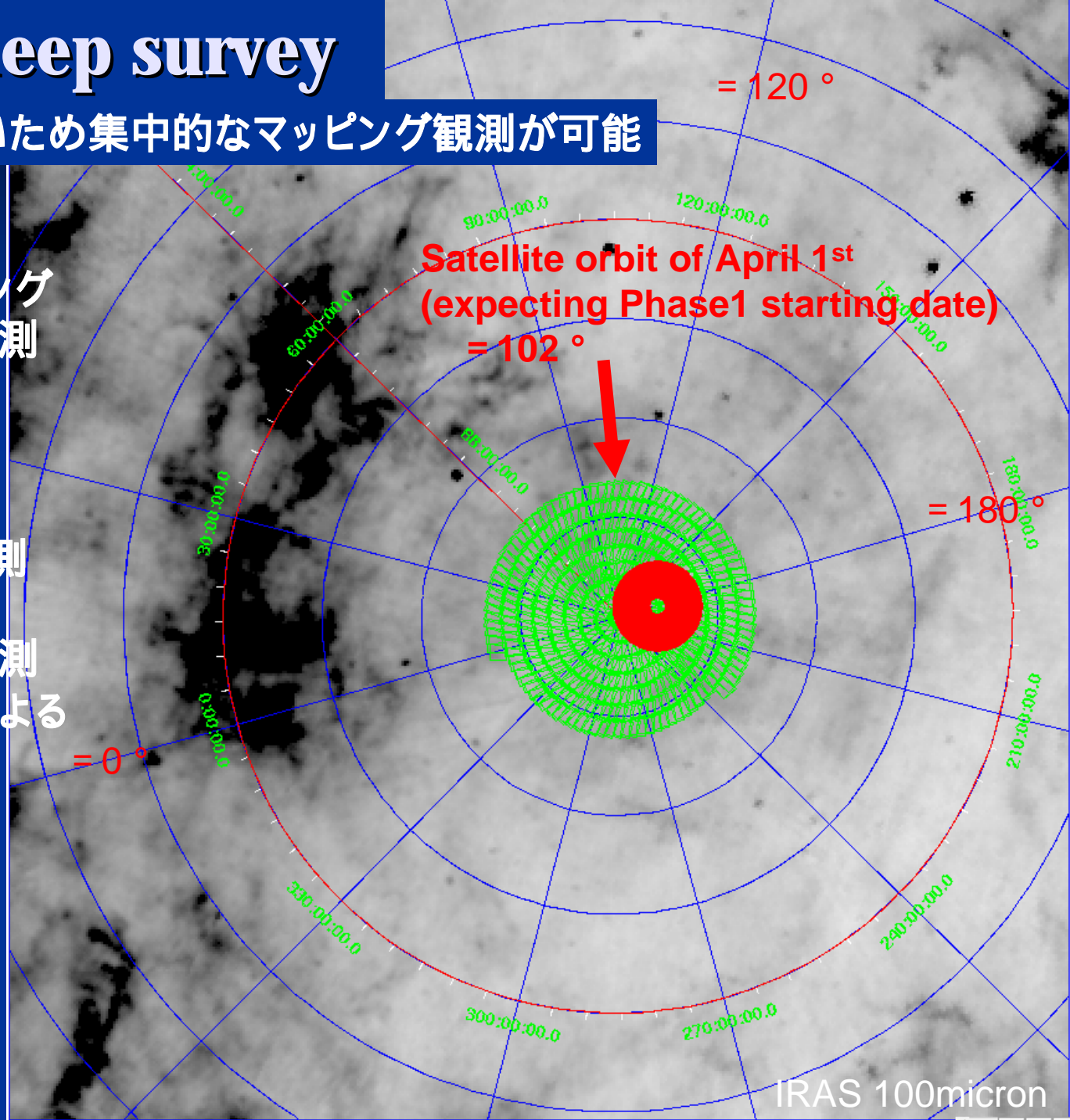
## NEP-Wide survey:

- ◆ 6平方度広域マッピング
- ◆ CIB大角度ゆらぎ観測  
IRTS結果の検証

## NEP-Deep survey:

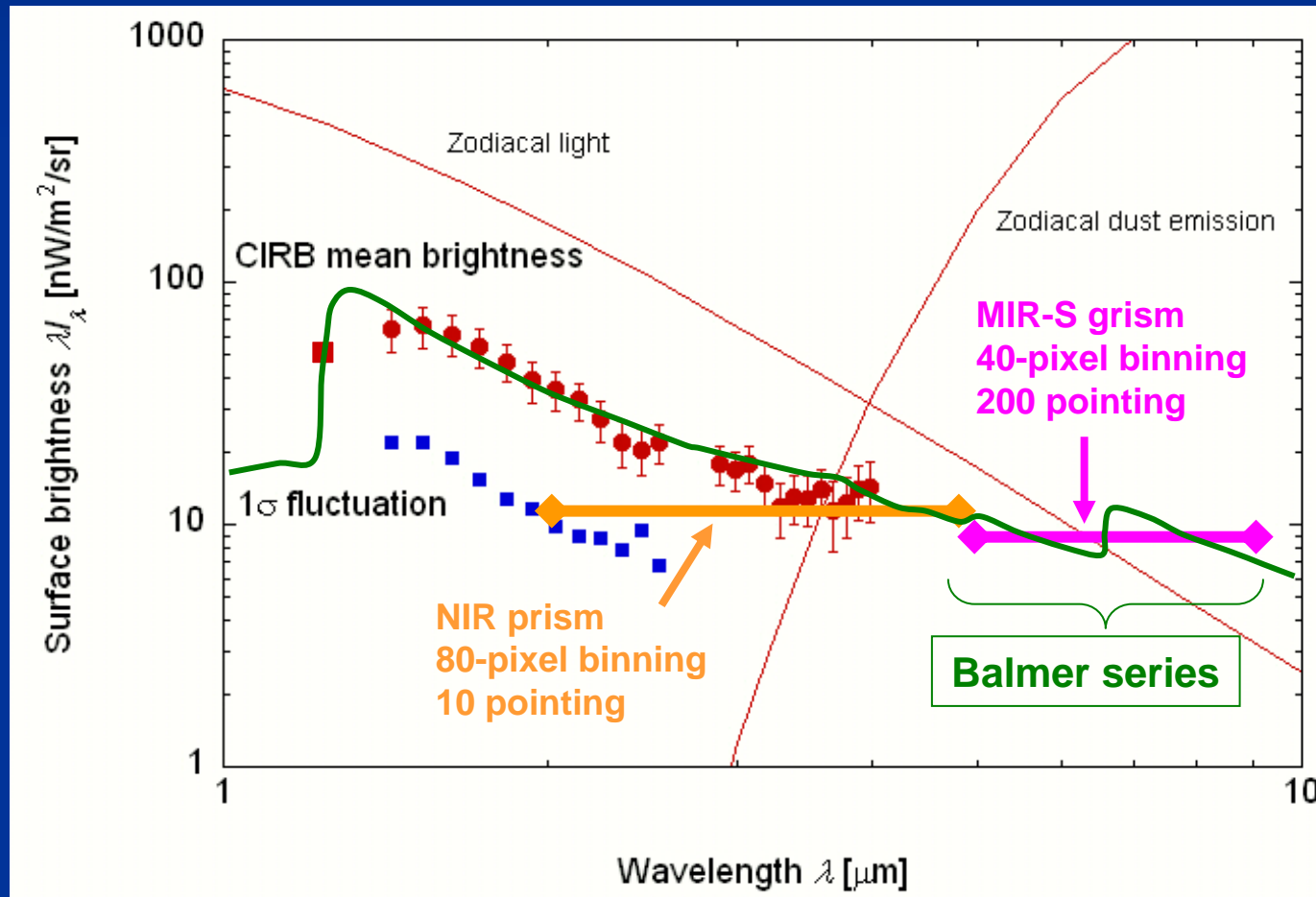
- ◆ 0.5平方度の深い観測  
同一点の多数観測
- ◆ CIB小角度ゆらぎ観測
- ◆ 季節変動モニターによる  
黄道光寄与の評価

- IRC全9バンドのデータ
- 約1年間で観測を完了



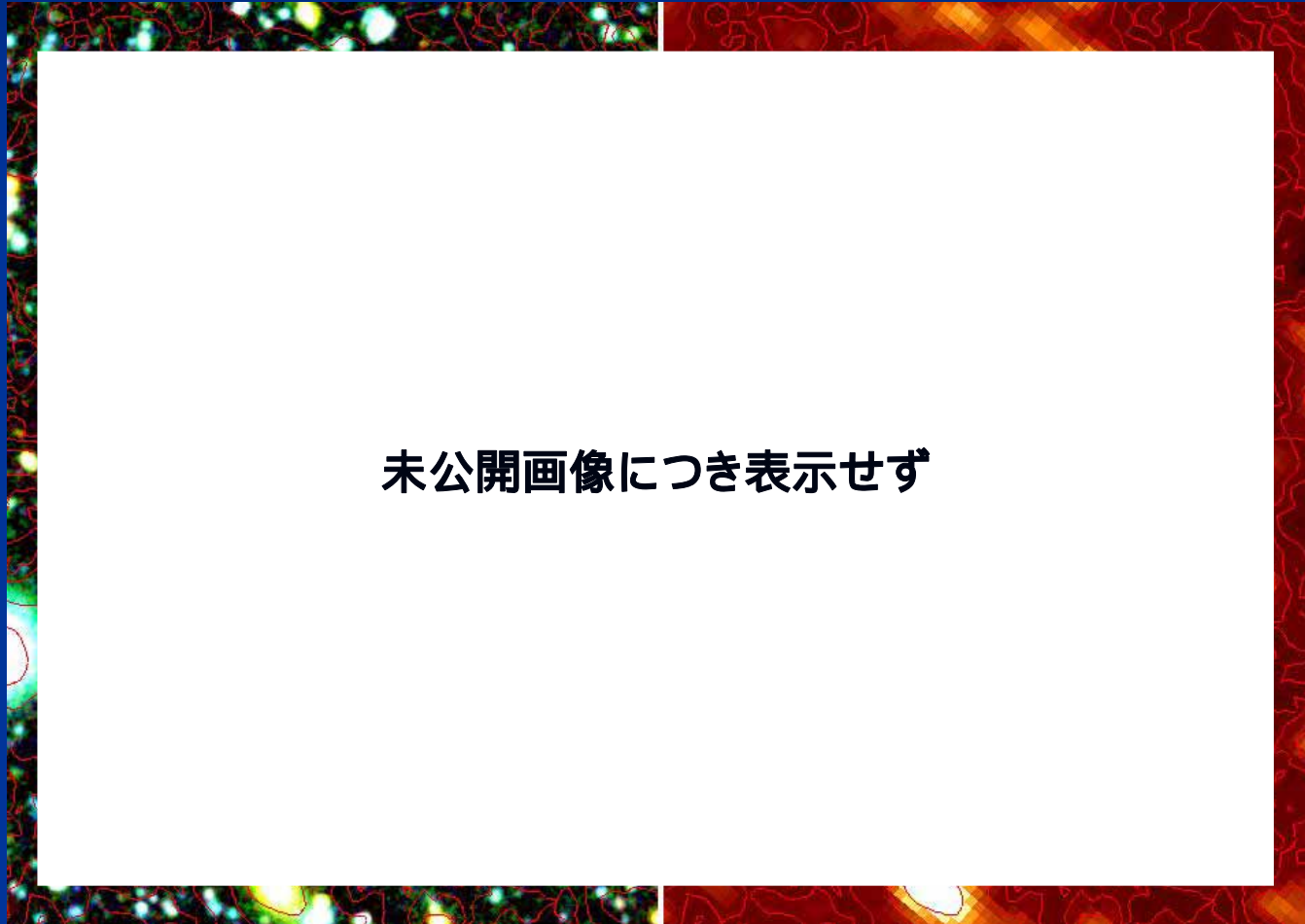
# AKARI CIB分光観測

- より高い赤方偏移( $z > 10$ )の寄与、Nebular emission
- 中間赤外域でのバルマー線 ( $H_\alpha$   $H_\beta$ , ...) 検出をめざす
  - $H_\alpha$  :  $z = 9 \rightarrow 6.4\mu\text{m}$ 、Ly- $\alpha$  の10%程度の強度



# AKARI NEPサーベイの初期画像

- 観測装置は所定の性能を発揮、サーベイは順調に進行中



すばるBRZバンド合成画像

あかり3 $\mu$ mバンド画像

# ロケット観測プロジェクト

## Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER)



**ISAS / JAXA**

Toshio Matsumoto  
Shuji Matsuura  
Takehiko Wada  
Kohji Tsumura

**Nagoya U.**

Mitsunobu Kawada  
Naoshi Sugiyama



**KASI**

Dae-Hee Lee

**Hyung Hee U.**  
Soojong Pak



**Caltech / JPL**

John Battle  
Jamie Bock  
Andrew Lange  
Ian Sullivan



**UC San Diego**

Brian Keating  
Tom Renbarger



**UC Irvine**

Asantha Cooray

# CIBER観測装置

## Low Resolution Spectrometer (LRS)

- CIB超過の $1\mu\text{m}$ 付近のスペクトルピーク検出

## Imager (Hバンド、Iバンド)

- $10'' \sim 2^\circ$  にわたる広帯域空間スペクトル
- 銀河クラスタリングとの区別
  - Iバンド 銀河の寄与**大**
  - Hバンド 第一世代星の寄与**最大**

## Narrow Band Spectrometer (NBS)

- 黄道光のフラウンホーファー線の吸収線/連続成分比から黄道光の寄与を測定

# 低分散分光器(LRS)

口径5cmの屈折望遠鏡  
プリズム分光 ( $R \sim 20$ ) + マルチスリット (5)  
256 × 256 HgCdTe array (NICMOS-3)  
FOV  $\sim 5.9^\circ$

GENESIA

Camera Unit



設計図面(非公開)

10.91

# 撮像測光装置 (IMGER)

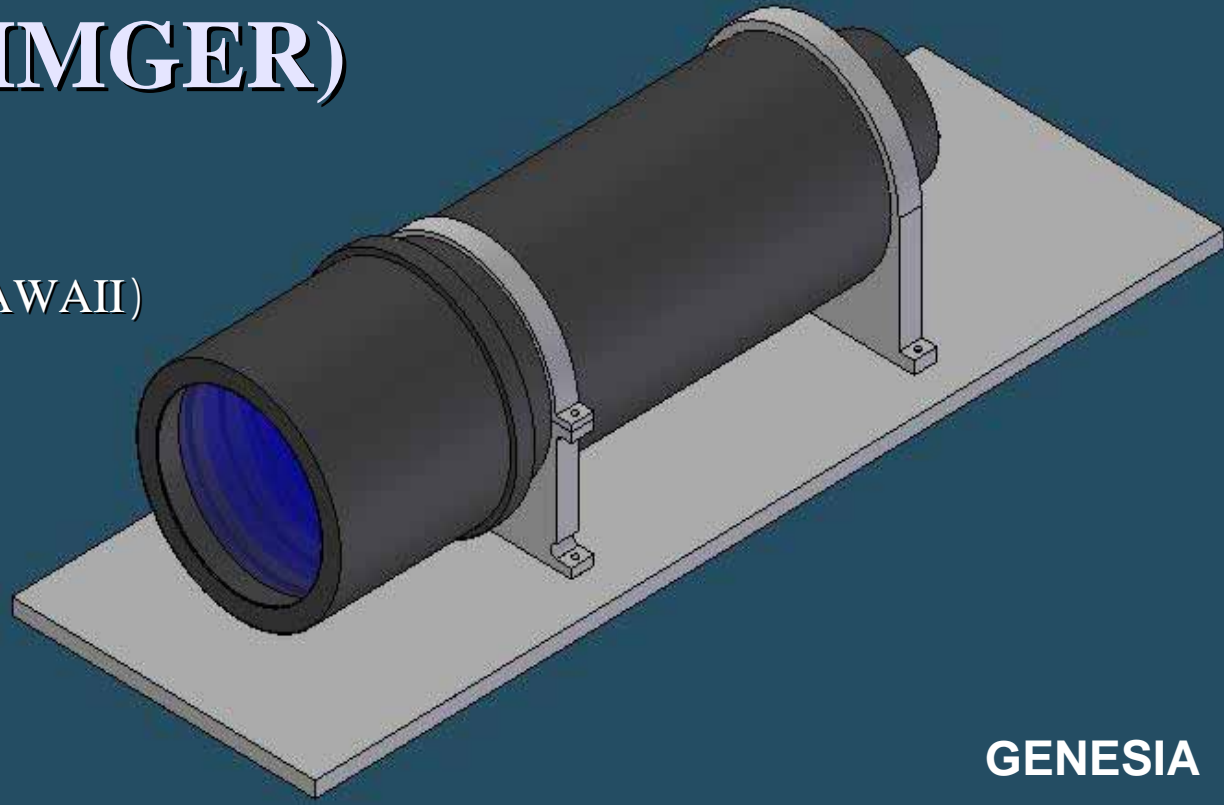
口径11cm 屈折望遠鏡

H, Iバンド2色撮像

1024 × 1024 HgCdTe array (HAWAII)

FOV : 2° × 2°

H < 20mag の点源検出



GENESIA

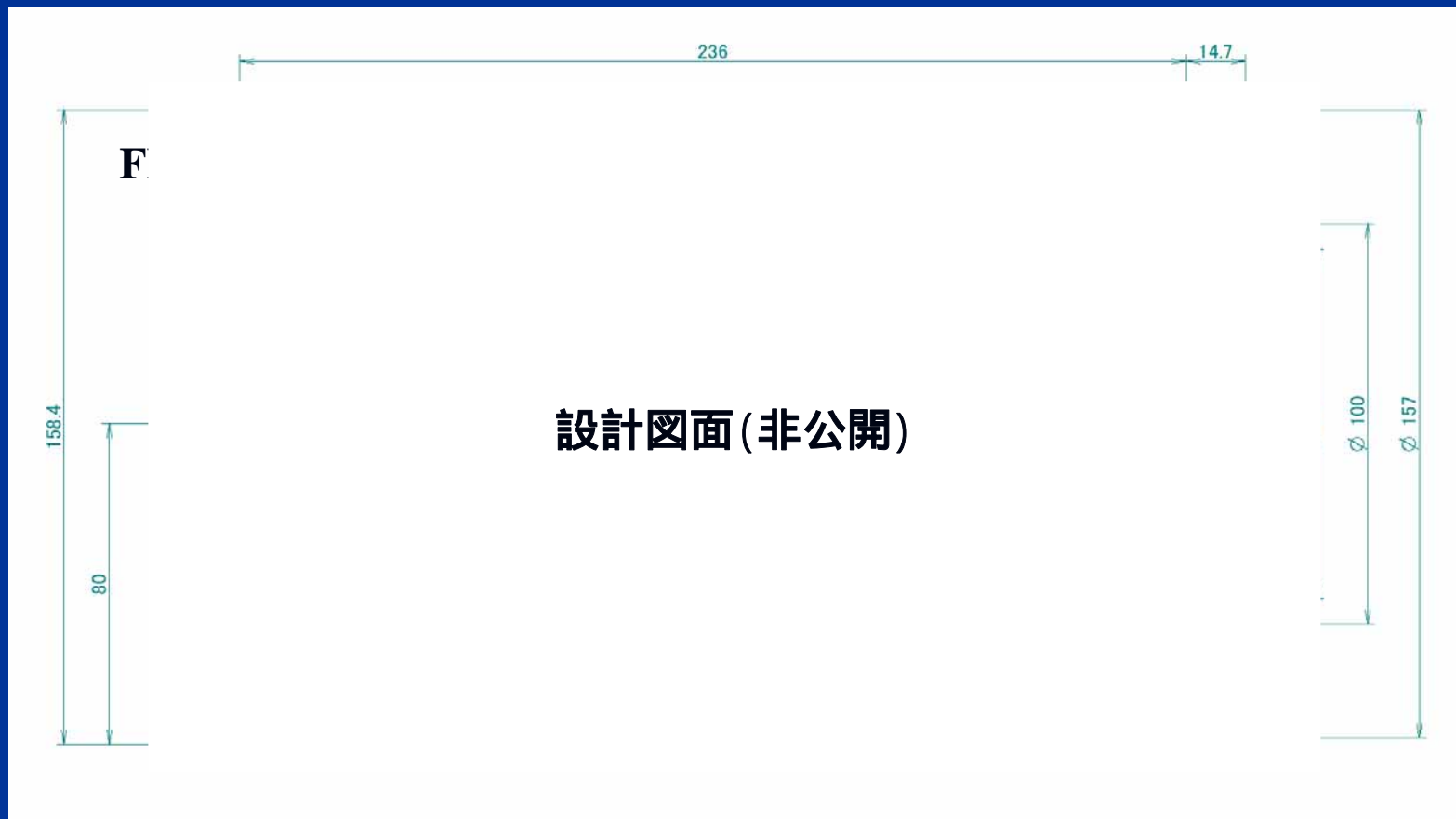


設計図面(非公開)



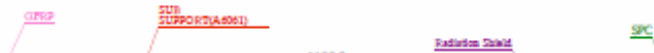
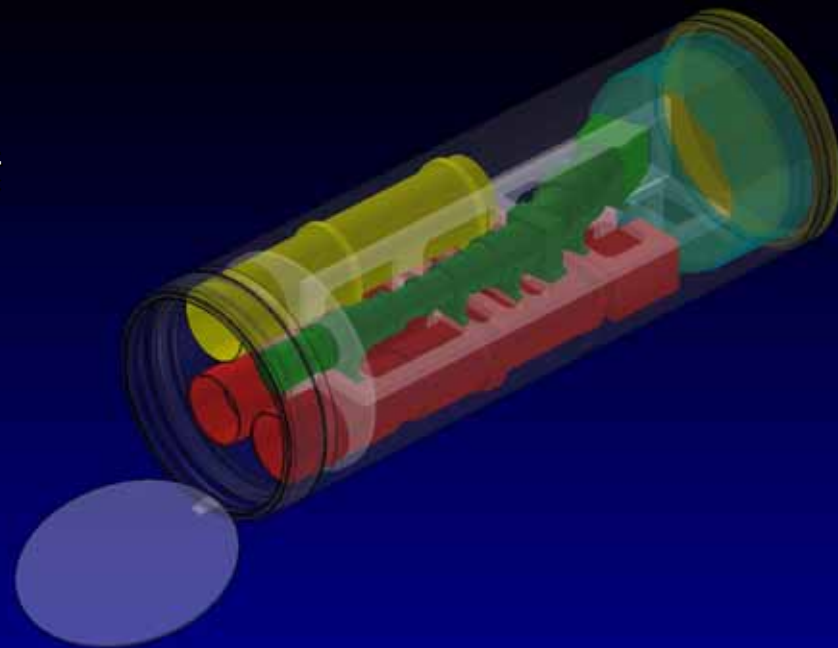
# 狭帯域分光器 (NBS)

- 口径7.5cm 屈折望遠鏡
- 256 × 256 HgCdTe array (PICNIC)
- 直視型固定ファブリペローフィルタ
- 円環干渉縞の測定を2次元アレイにて検出



# クライオスタット

- ・ 検出器、光学系含む全システムを液体窒素温度(77K)に冷却、保持
- ・ 20G打ち上げ耐振動構造
- ・ 上空での真空蓋開けシステム
- ・ 名古屋大装置開発室にて設計製作

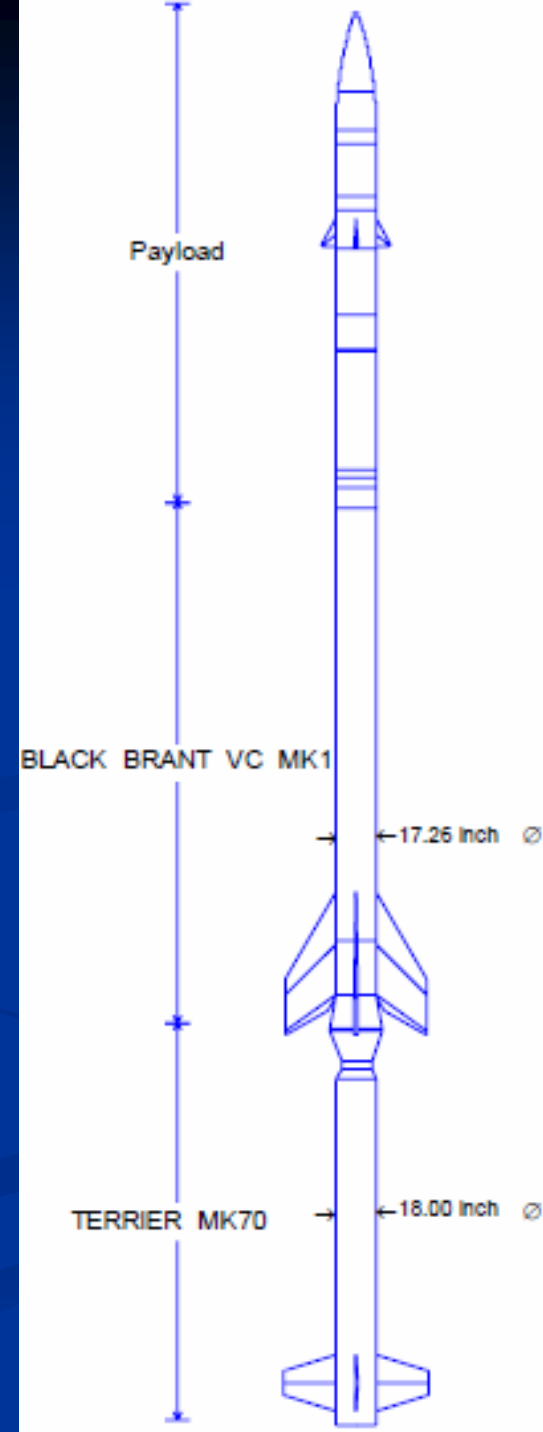


設計図面(非公開)



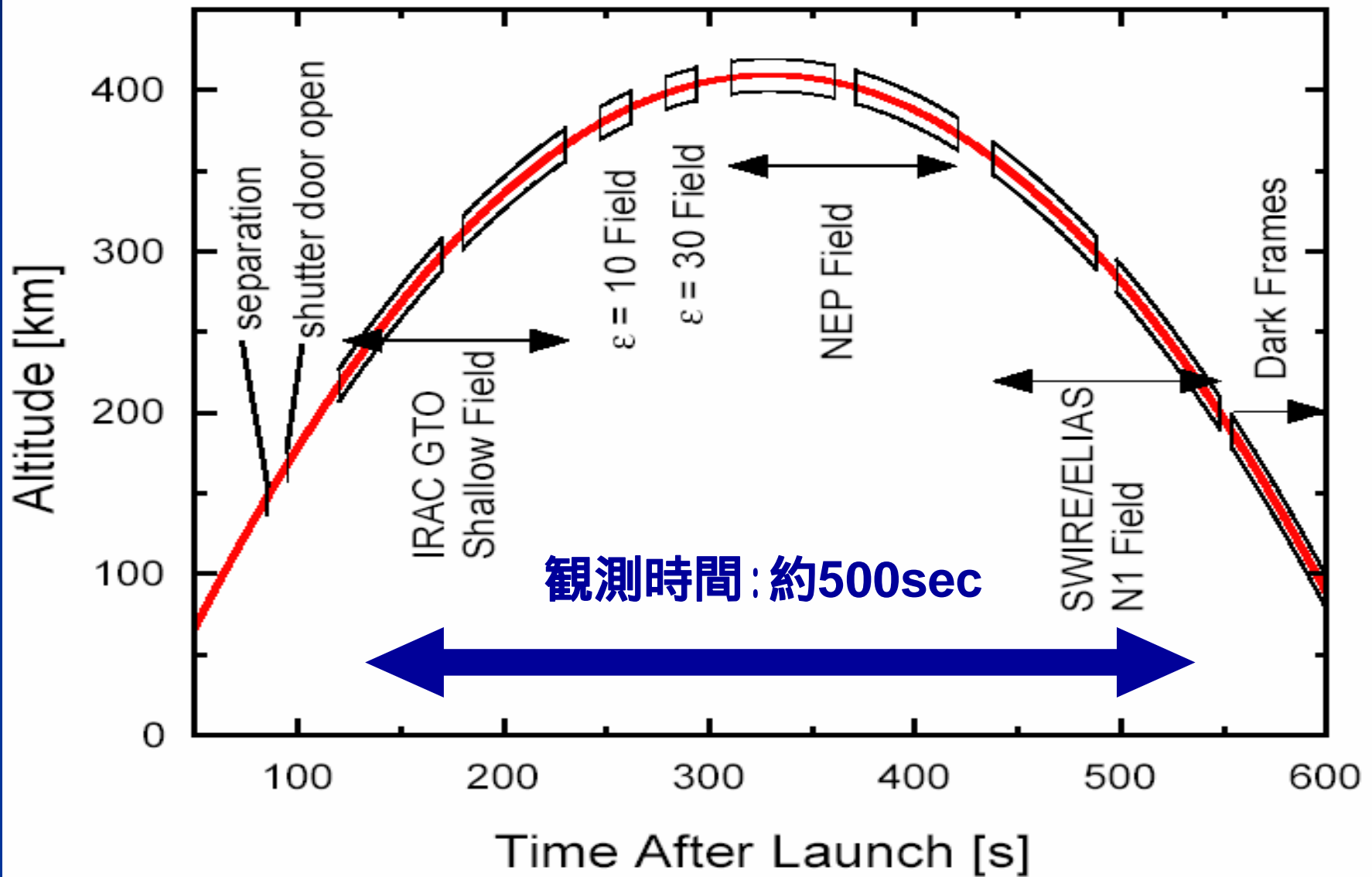
# 打ち上げロケット

- Terrier-Black Brant ロケット
- アポジ高度 : 400 k m
- NASAのWhite Sands基地  
(ニューメキシコ州)での打ち上げ
- 観測後、観測装置を回収し再利用



# 観測シーケンス

## CIBER Trajectory and Observations



# 計画の現状と予定

## ■ 現状

光学系・クライオスタットなどハードウェア設計完了  
読み出し回路・GSEなど電気系の設計完了

## ■ 予定

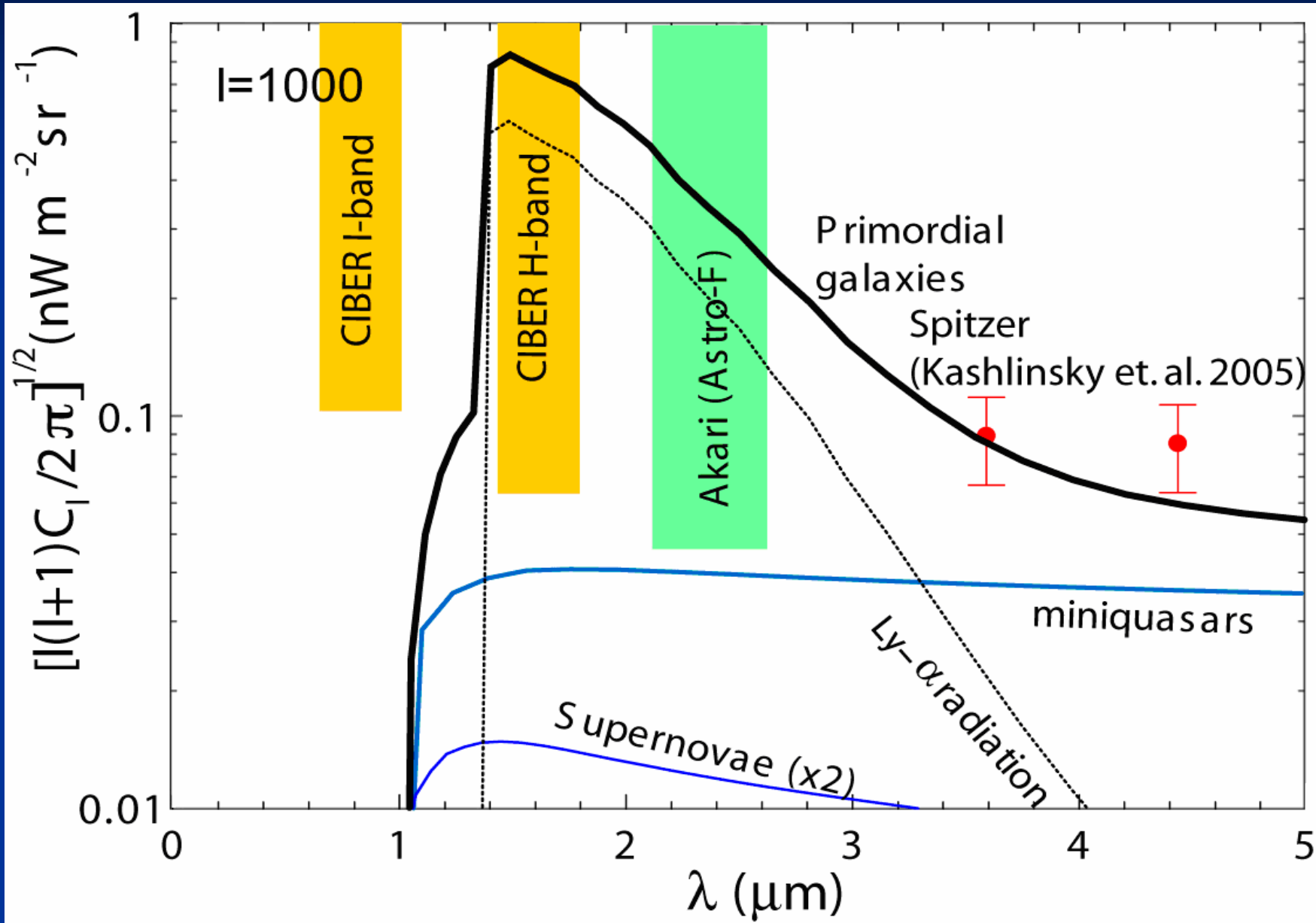
2006年度: ハードウェアの製作・光学系の性能評価

検出器の立ち上げ

2007年度: 組み立て・最終試験

2008年春に打ち上げ

# CIBERとAKARIのあわせ技



# AKARI + CIBER

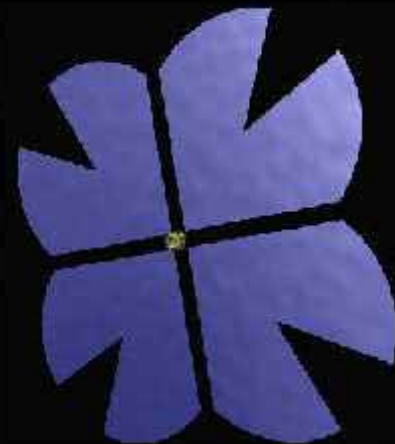
- 可視～近赤外～中間赤外の超広帯域
  - ゆらぎ空間スペクトル
  - 放射スペクトル
- + AKARI遠赤外サーベイ
  - ダスト成分の寄与(放射、散乱、減光)の評価
- いずれも実現が目前

# 将来計画

～ あらたな展開へ～



# ソーラーセイルミッション ~惑星探査機を用いる新しい天文観測~

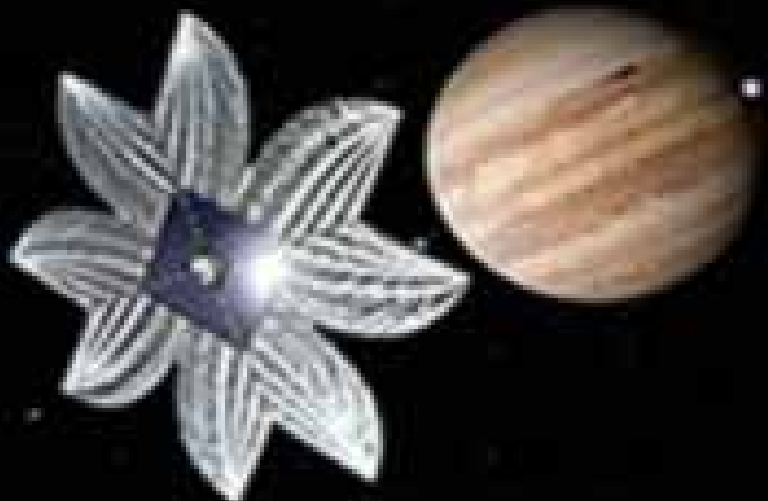


JAXA/ISASにて開発進行中の深宇宙探査機  
推進システム

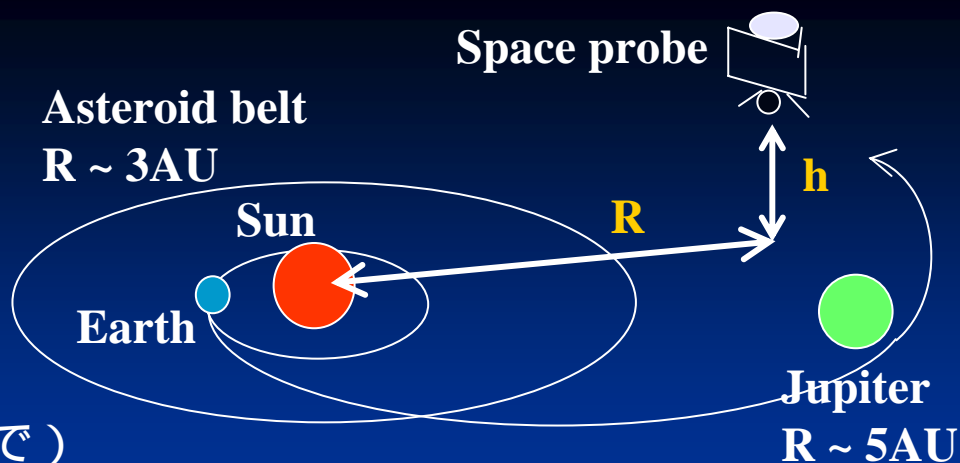
- 光圧、太陽風による推進とは別モノ
- 数10mの太陽電池つきセイル(帆)を展開
- 電気推進システムへの電力供給

木星および小惑星トロヤ群の探査

クルージング中の惑星間ダスト計測、  
ガンマ線観測、**赤外背景放射観測**など



# 深宇宙におけるCIB観測



## 黄道光

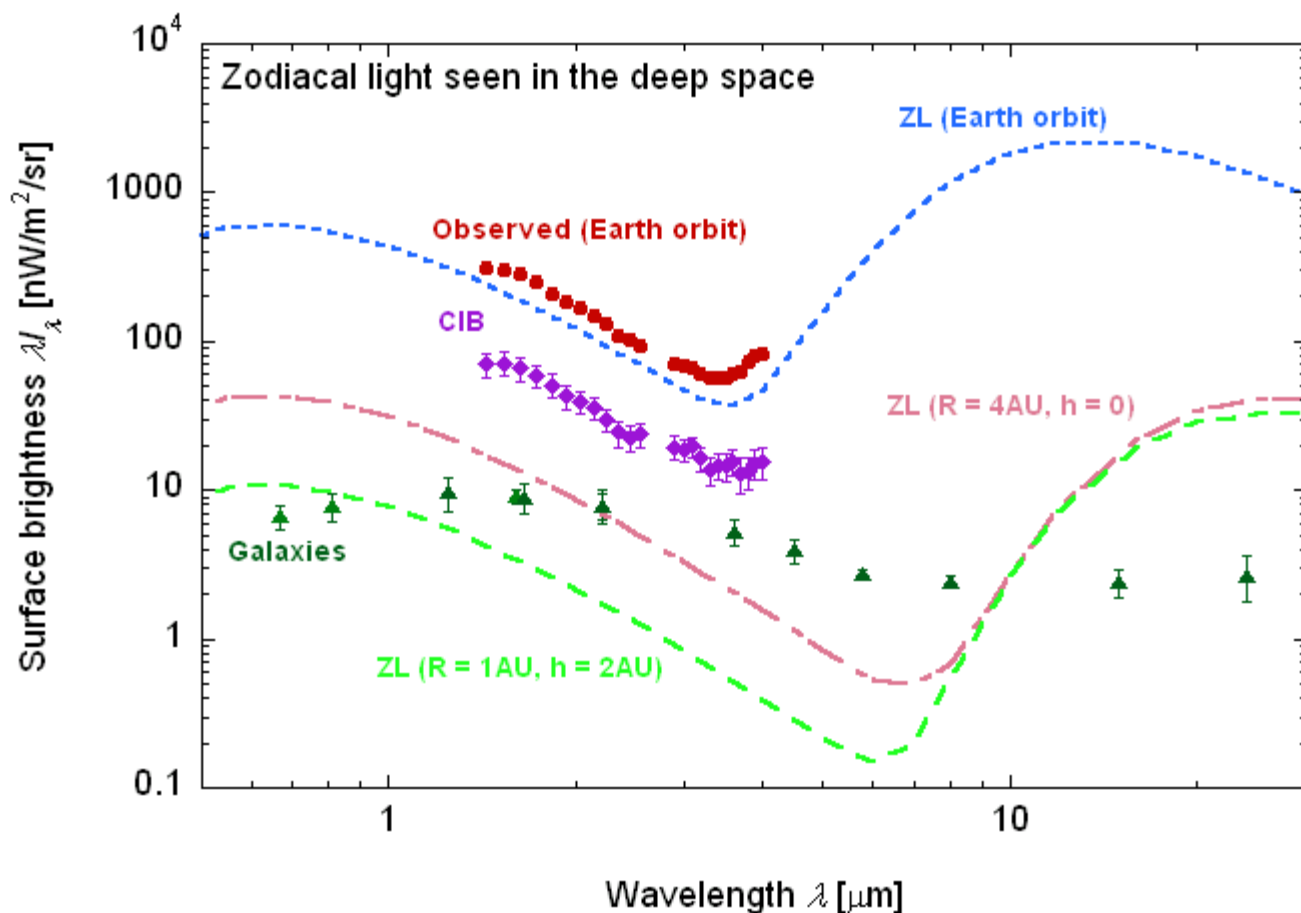
- 1AUでは空の明るさの7割を占める
- 小惑星帯より遠方  
または黄道面外軌道では激減  
(もちろん現在の黄道ダストの知識範囲で)

- CIB直接検出が可能に！

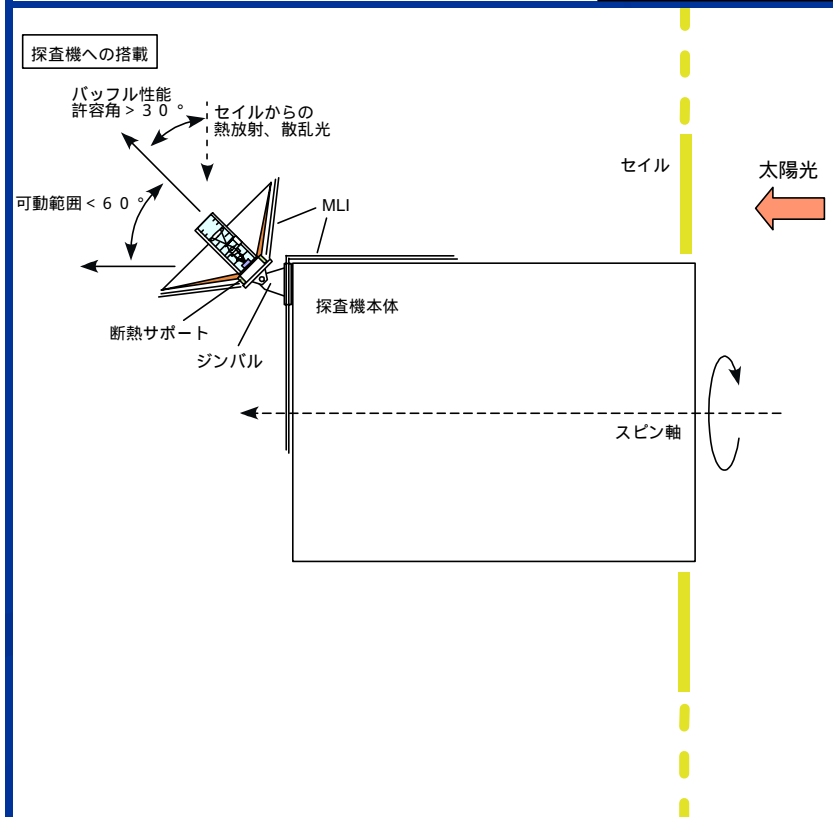
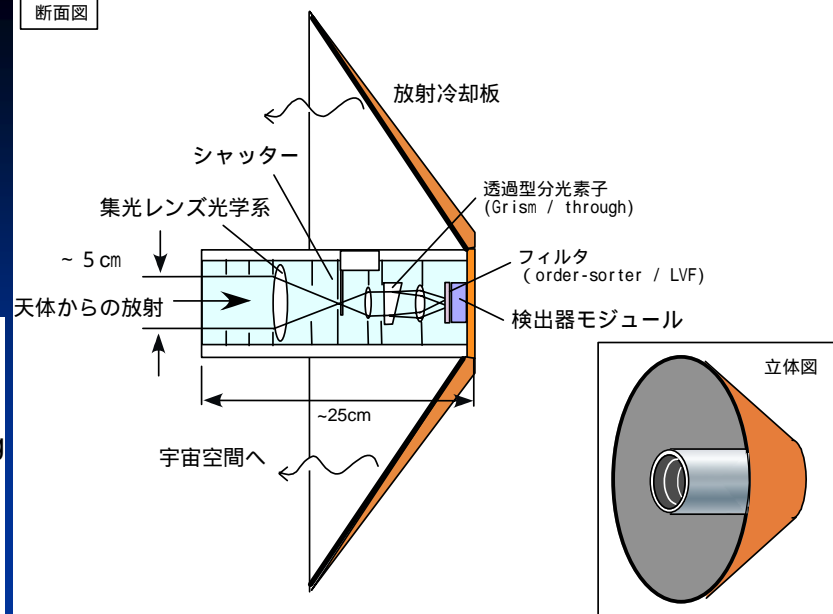
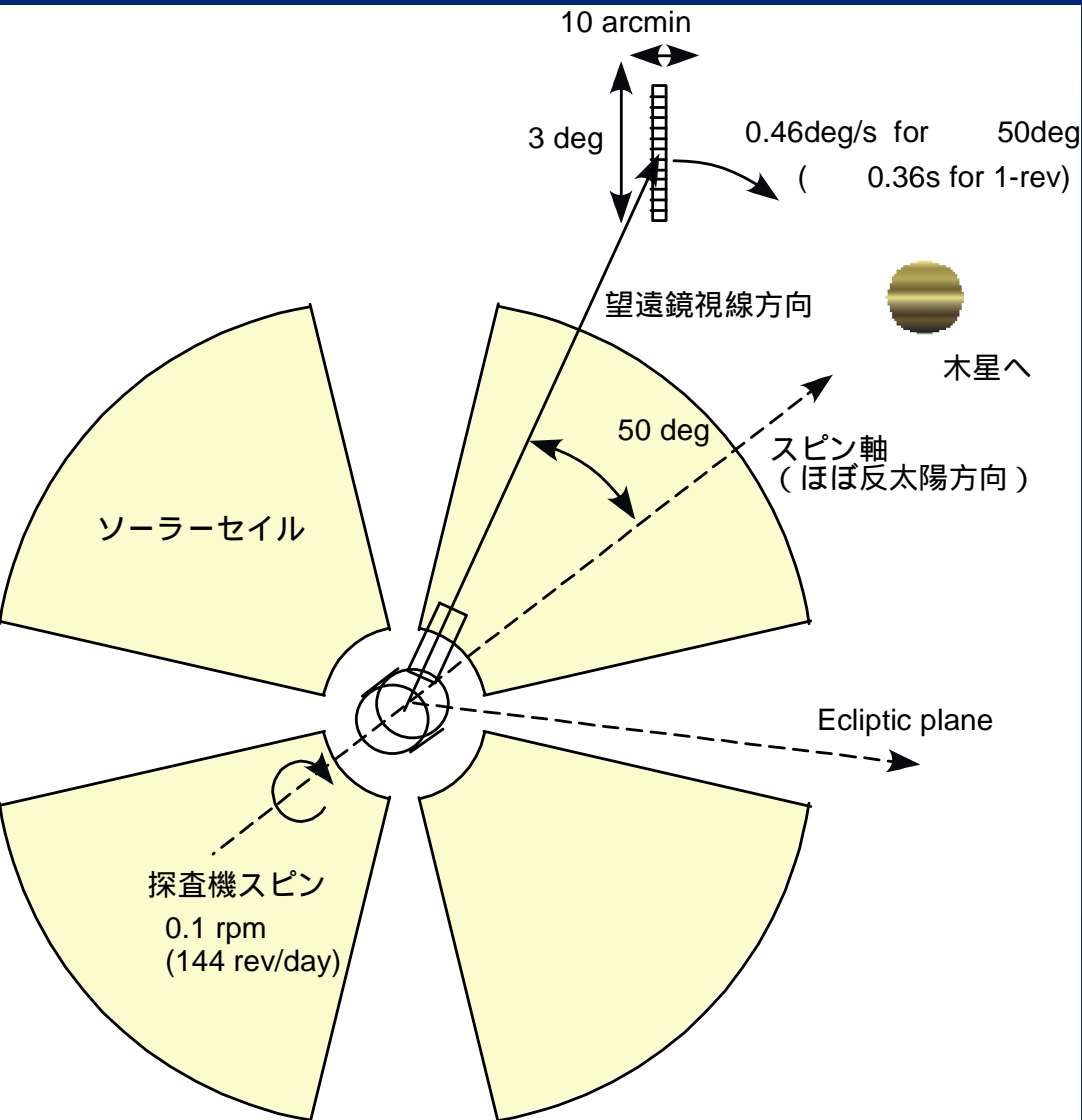
- IRTSと同様の仕様
- CIBERの技術的基盤

## 課題

- 通信速度
- 長期耐久性
- 長波長観測では冷却



# 観測装置概略



# ソーラーセイルミッション

objectives :

- spectral structure around 1 micron
- large-scale structure at high- $z$

Advantages of interplanetary space probe :

- No zodiacal light
- long integration time
- effective radiation cooling

$R > 3\text{AU}$  or  
out of ecliptic plane



specification :

telescope aperture :	$\sim 5 \text{ cm}$
wave-band :	$0.8 \sim 2 \mu\text{m}$
spectral resolution :	$R \sim 20$
FOV :	$\sim 1^\circ$
	( $10'$ / pixel)
temperature :	$< 70\text{K}$
weight :	$\sim 3 \text{ kg}$
(optional case : MIR photometer)	$\sim 7 \text{ kg}$



## 展望のまとめ

- 「CIB超過成分 = 第一世代天体」と言いきるにはまだ早く、さらに詳細な観測が必要
- 近赤外域に限ればCIB観測に技術的な困難ない
- 現在進行中の観測は第一世代天体に関する強い観測的制限を与える
- 将来計画の早急な実現