

「あかり」アーカイブデータを用いた 近赤外線面輝度スペクトルの成分分離

Tsumura et al. 2013, PASJ 65, 119: 黄道光(ZL)、データリダクション

PASJ 65, 120: 銀河光(DGL)

PASJ 65, 121: 背景放射(EBL)

JAXA/ISAS赤外線グループ Webリリース

<http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Outreach/results/results.html>

津村耕司

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系

(4月から)

東北大学 国際高等研究教育機構 学際科学フロンティア研究所

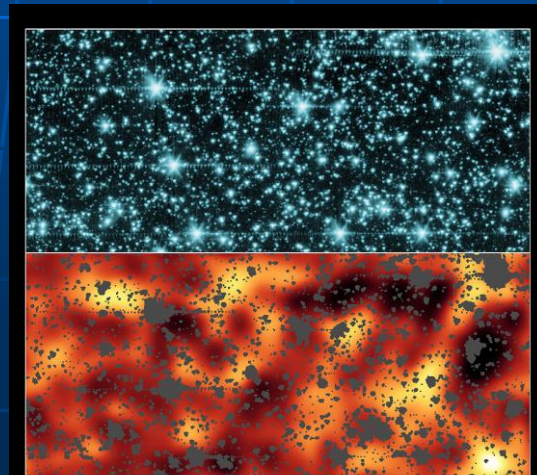
Collaborators:

松浦周二、和田武彦(ISAS/JAXA)、松本敏雄(ASIAA, ISAS/JAXA)
左近樹(東大)、Pyo Jeonghyun(KASI)、田中昌宏(筑波大学)

赤外線での面輝度観測

- 点源が何も写っていない空のスペクトル
- 大気光から逃れるため、スペースからの観測必須
- $SKY = ZL + ISL + DGL + EBL$
 - ZL(Zodiacal Light): 黄道光
 - ISL(Integrated Star Light): 銀河系内の星の積算
 - DGL(Diffuse Galactic Light): 銀河系内のダストによる拡散光
 - EBL(Extragalactic Background Light): 銀河系外からの光

太陽系・銀河系・遠方宇宙を同一のデータセットから探れる！



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

遠方宇宙を探る2つのアプローチ

■ 暗い点源を大望遠鏡で点源検出

- $z \sim 10$ の銀河をHSTで観測!? Bouwens et al. (2011)
- **きわめて明るい特異な天体に限られる**
- 初代天体 (Population III at $z > 10$) の点源検出はSPICAやTMTをもってしても困難

AB等級で34等 @Kバンド, $300 M_{\text{solar}}$

■ 背景放射(EBL)として観測！

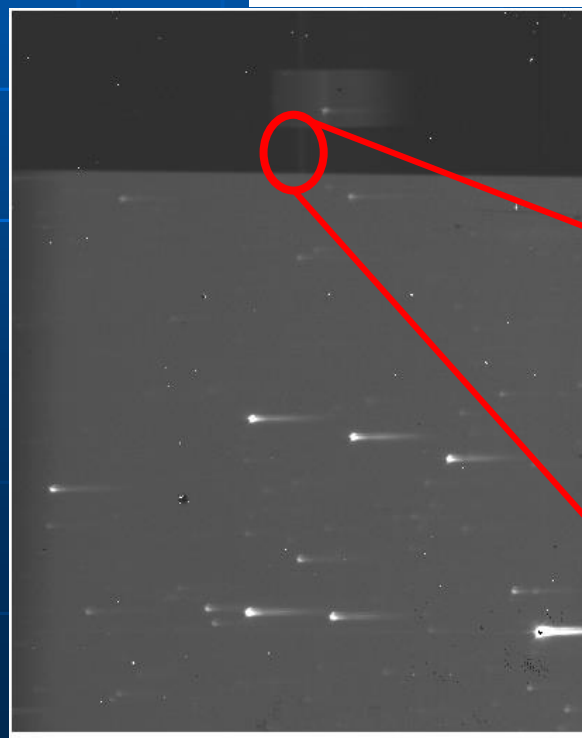
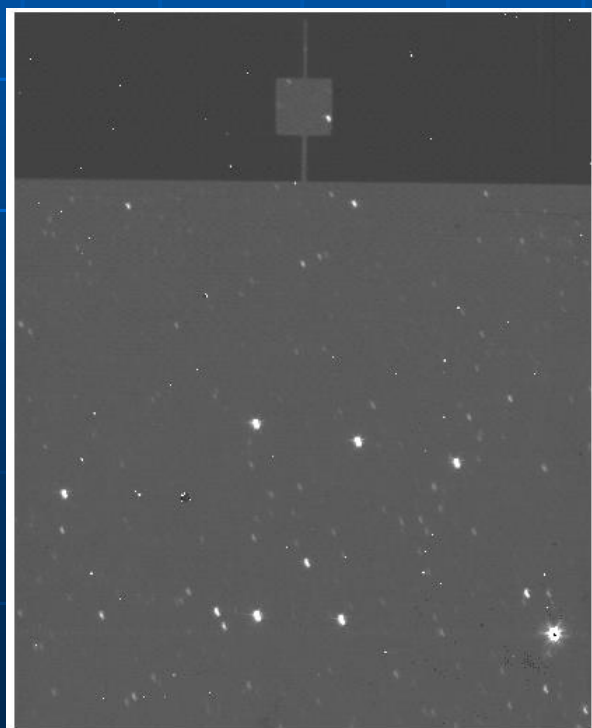
- 点源として分解されない天体からの光を含むはず
- 様々な光の放射・吸収の全ての歴史を反映
- EBLより数倍明るい前景光(ZL・DGL)を分離する必要

「あかり」 InfraRed Camera

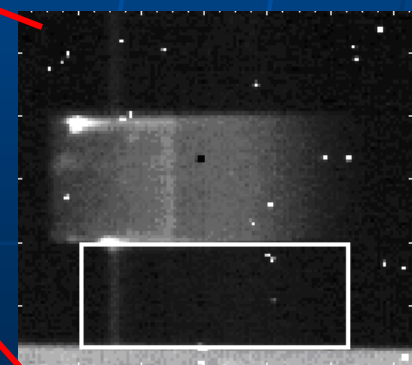


- 過去のIRTSと比べて高い空間分解能でより暗い点源 (19mag)まで除去
 - 銀河系内の星によるコンタミの影響無し (ISL~0)
- コールドシャッターがないSpitzerでは得られないデータ
- マスク領域を利用した独自の暗電流評価法を開発
 - 「あかり」データ解析ツールに採用
 - Tsumura & Wada 2011 PASJ 63,755

カメラ	NIR	MIR-S	MIR-L
検出器の種類	InSb	Si:As	Si:As
ピクセル数	512×412	256×256	256×256
撮像領域(分角)	9.5×10.0	9.1×10.0	10.3×10.2
ピクセル視野(秒角)	1.46	2.34	2.51×2.39



面輝度スリット分光



得られたスペクトルと観測天域の分布

広い空にわたる空のスペクトル
データを取得

$$\text{SKY} = \text{ZL} + \text{DGL} + \text{EBL}$$

10 7 1 2

空間相関を利用して前景光分離

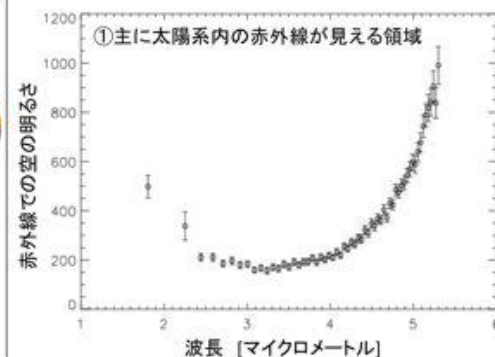
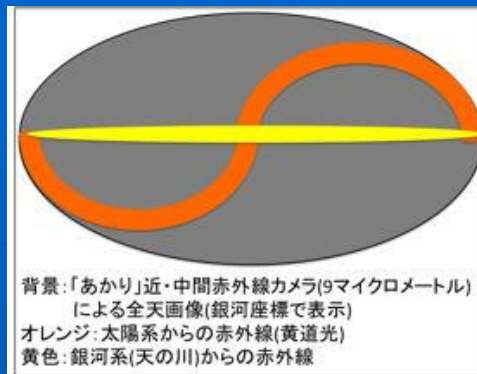
黄道光 (ZL) → 黄緯依存性

銀河光(DGL) → 銀緯依存性

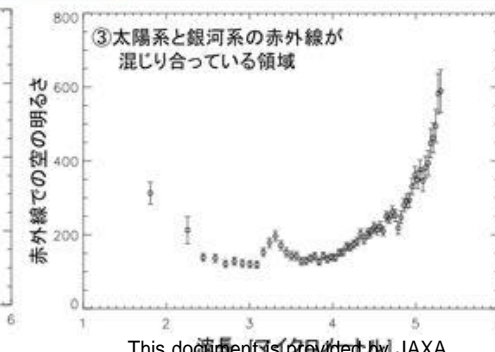
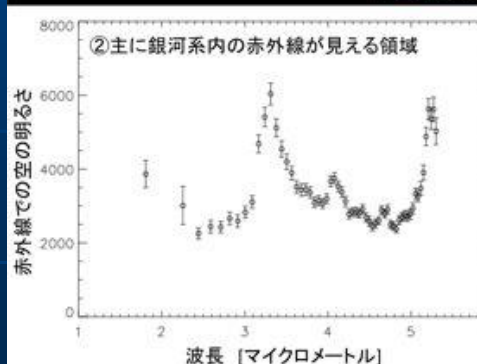
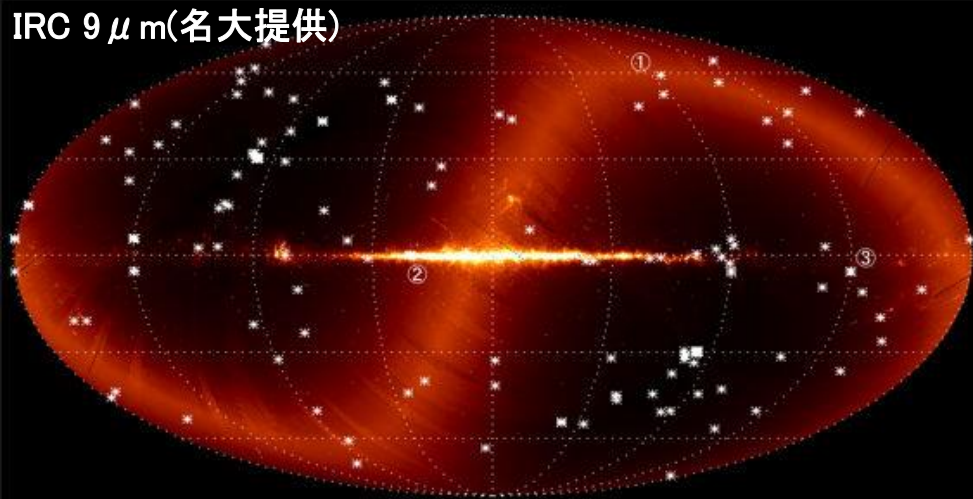
背景光(EBL) → 一様分布

拡散光分光カタログの公開

<http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Archive/>



IRC 9 μ m(名大提供)



天域	データ数
① 「あかり」北黄極(NEP)領域	80
② Spitzer dark 領域	38
③ 銀緯5度以上の領域(①と②を除く)	56
④ 銀河面(-5度<銀緯<5度)領域	35
⑤ 銀緯-5度以下の領域	69

銀河光の分離

- 銀河光(DGL)=銀河系内のダストからの放射

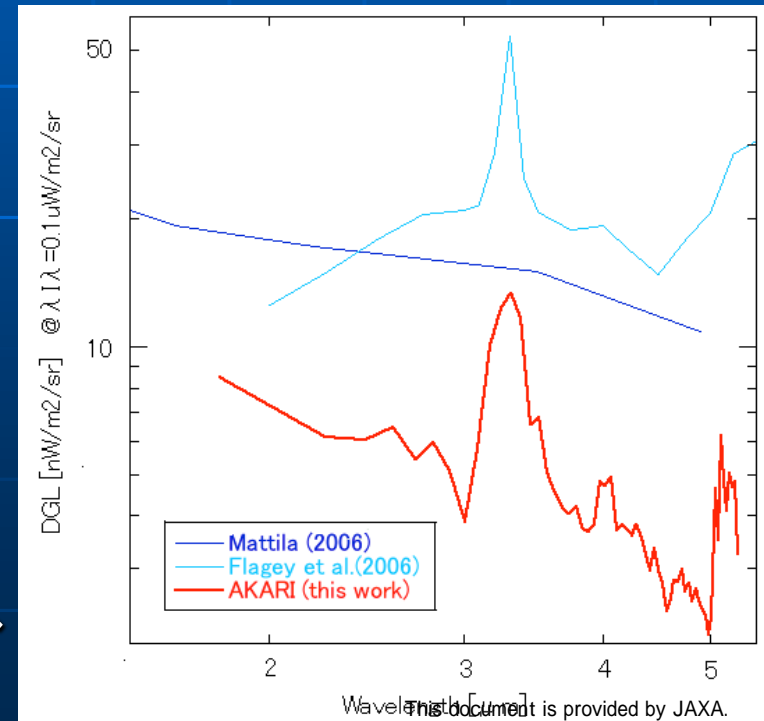
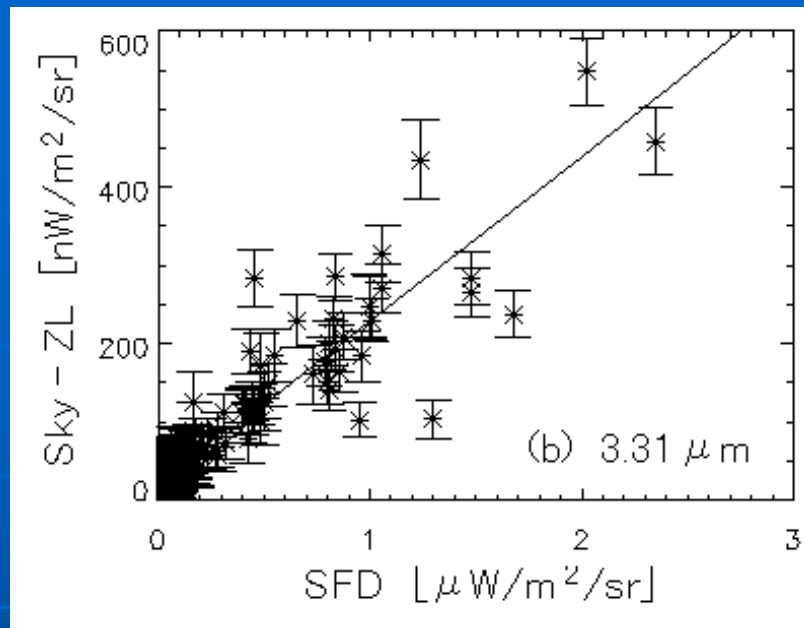
→ ダストの量に相関

- Galactic dust \propto FIR(100 μ m)

$$SKY_{\lambda} = ZL_{\lambda} + DGL_{\lambda} + EBL_{\lambda}$$

$$SKY_{\lambda} - ZL_{\lambda} = DGL_{\lambda} + EBL_{\lambda}$$
$$= a_{\lambda} * I_{100\mu m} + b_{\lambda}$$

- 各波長ごとに遠赤外線データと相関を取り、**近赤外線での銀河光を初めて抽出**
- 得られた銀河光スペクトルを遠赤外線輝度でスケーリングする事で、各天域でのDGLが求まる



黄道光の分離

- 黄緯依存性を利用して黄道光スペクトルを抽出
 - 散乱光成分(<3 μ m)と熱放射成分(>3 μ m)を分離して評価
 - 高温成分(300K)の検出
→サブミクロンサイズのダストの存在を確認

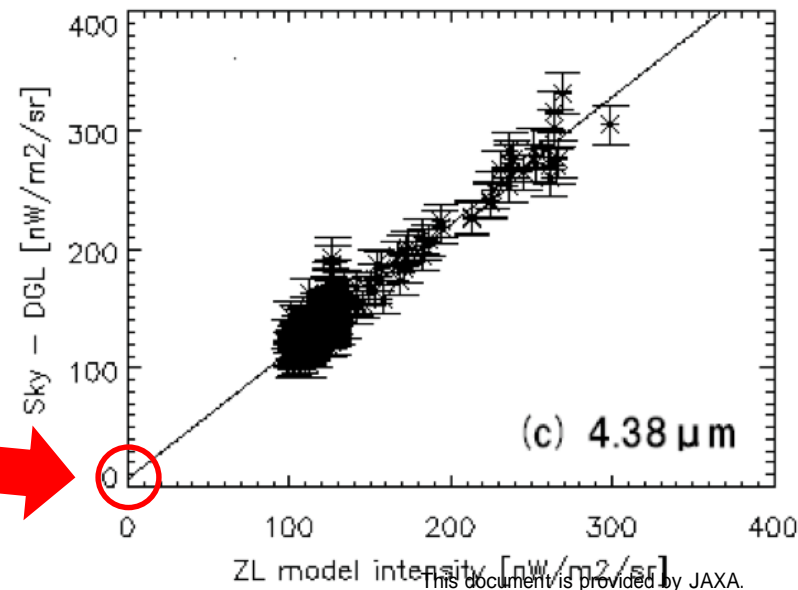
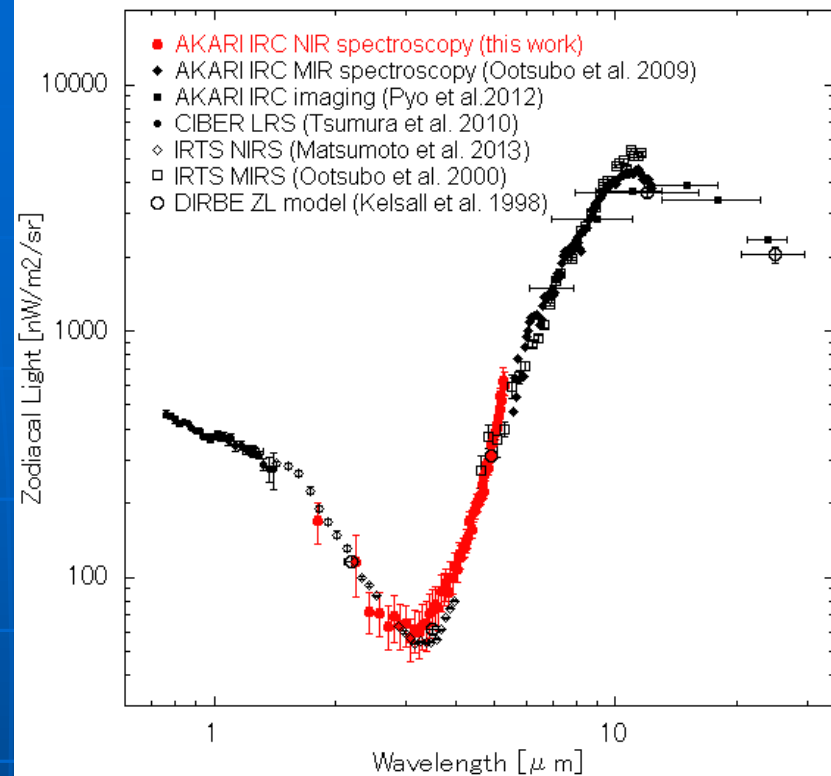
- 黄道光のモデル輝度 (Kelsallモデル)との相関解析

$$\text{SKY}_{\lambda} - \text{DGL}_{\lambda} = \text{ZL}_{\lambda} + \text{CIB}_{\lambda}$$

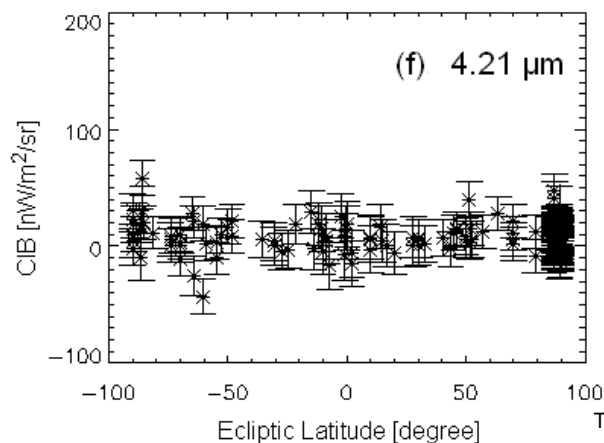
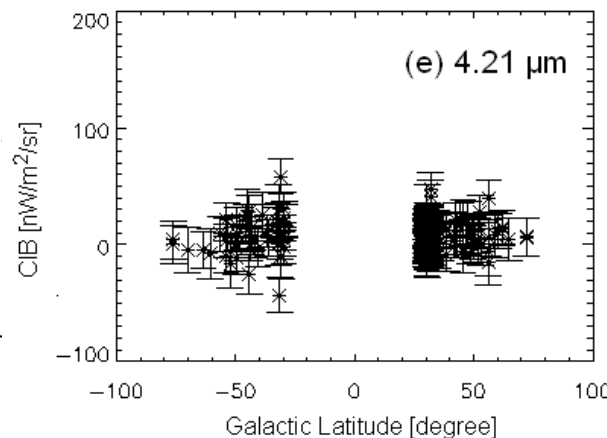
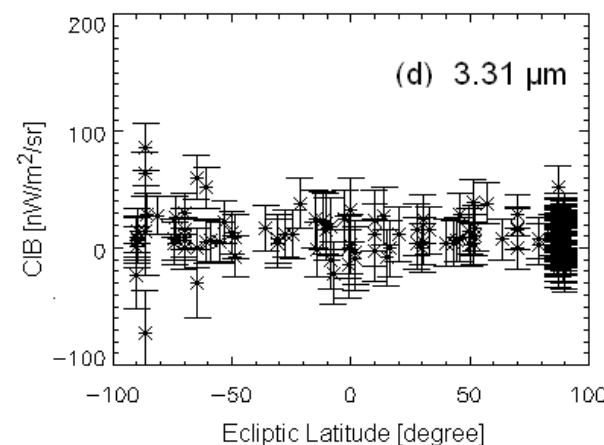
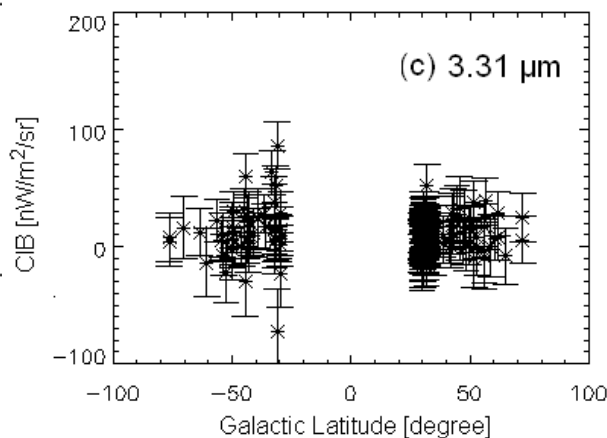
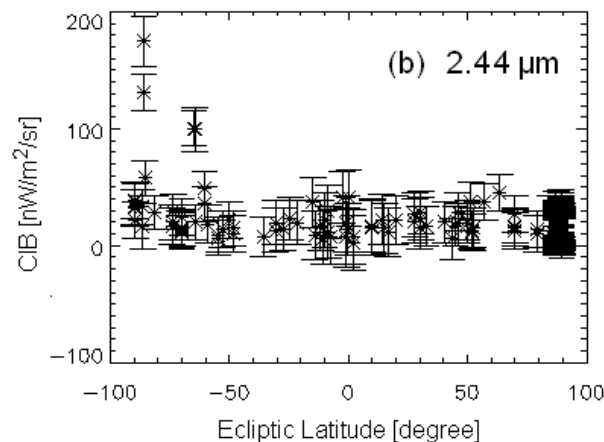
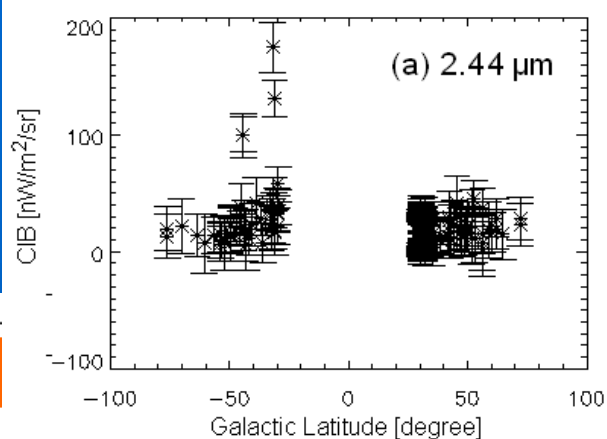
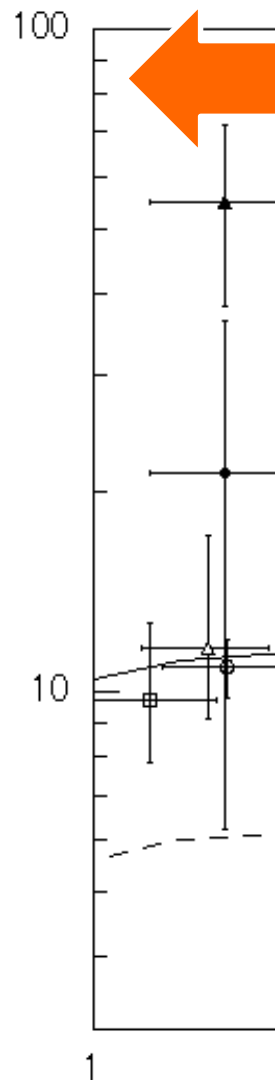
$$= c_{\lambda} * \text{DIRBE} + b_{\lambda}$$

$$C_{\lambda} \sim 1 (\pm 5\%)$$

Y切片がEBL



Surface Brightness [nW/m²/sr]



ground Light (EBL)

et al. 2013)

et al. 2001)

ewek 2003)

Levenson et al. 2007)

)

galaxies

2000

0

2011

2011

mag)

せからの有意
確認

EBLエクセスの原因は？

■ 黄道光モデルの不定性？

- 今回の「あかり」の解析では、星の影響を取り除いた上での広い空間分布相関による前景光評価
- DIRBE、IRTS、「あかり」はいずれもKelsallモデルをベースにしている
- Kelsallモデルには取り込まれていない黄道光の
一様成分の存在？
(地球周辺のダストシェル？ 有松・オールト雲ダスト？)
- ロケット実験CIBER/LRS・NBSによるEBL/黄道光の直接測光を進めている
- ガリレオ衛星食掩蔽法による黄道光不定性によらない観測も進めている

EBLエクセスの原因は？

■ 赤方偏位 $z \sim 10$ での大規模星形成？

- EBLゆらぎの結果とはコンシステント($\delta I/I \sim 0.01$)
 - あかり: Matsumoto et al.(2012)
 - Spitzer: Kashlisky et al.(2013)
- 一般的なモデルから予想される星形成率と比べて10倍程度高い星形成率が必要
- TeVガンマ線Blazerによる制限に関しては新たな進展
 - $z > 0.6$ のblazerの発見(Furniss et al. 2013)
 - 遠方blazerと「普通の」EBLとの矛盾を解決する新たなモデル
 - 宇宙線からの2次ガンマ線 (Essay&Kusenko 2010等)
 - Axionからのガンマ線 (Sanchez-Conde et al. 2007等)
 - それらのモデルを含めると、EBLエクセスも許容される

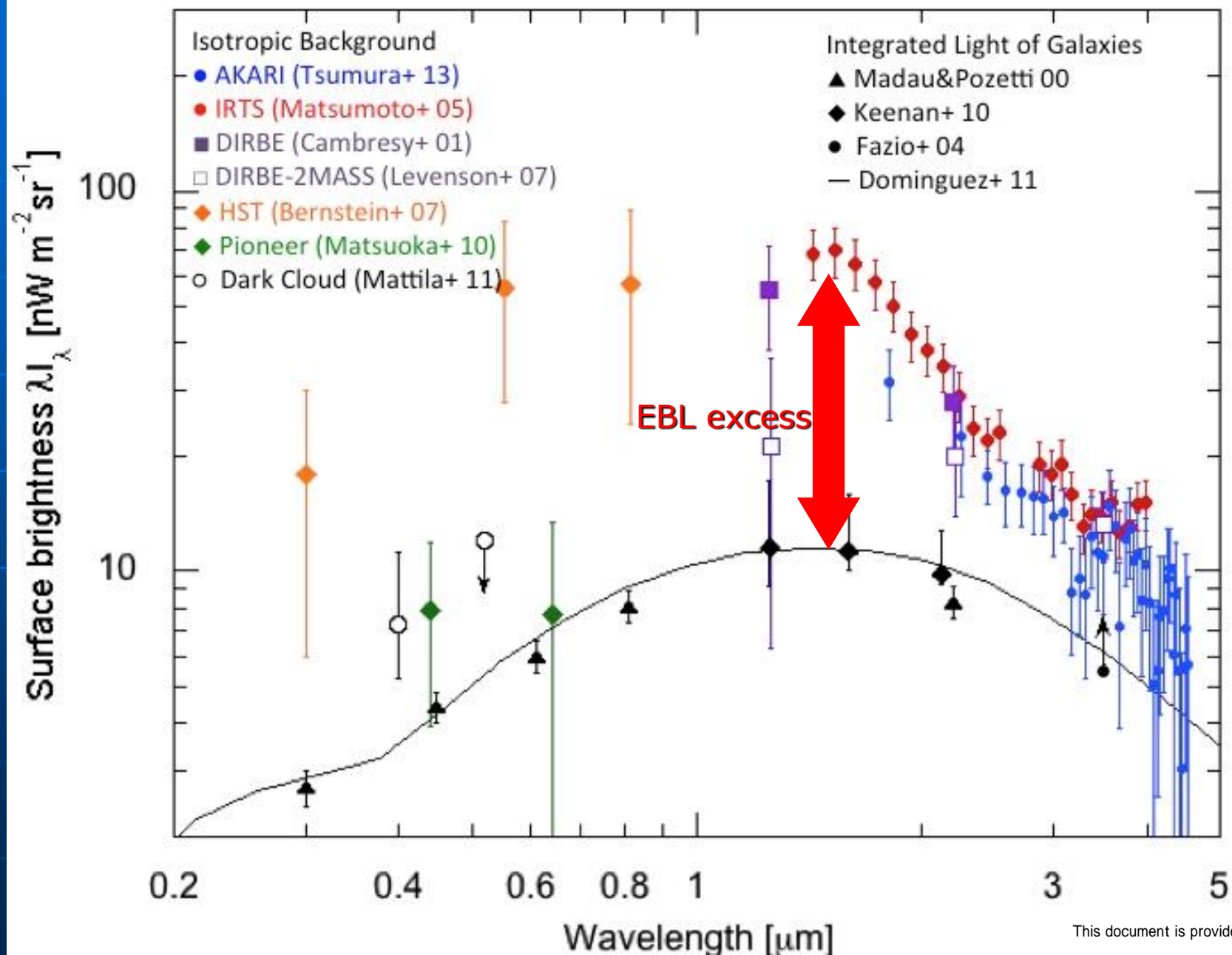
■ 他の起源の可能性は？

まとめ

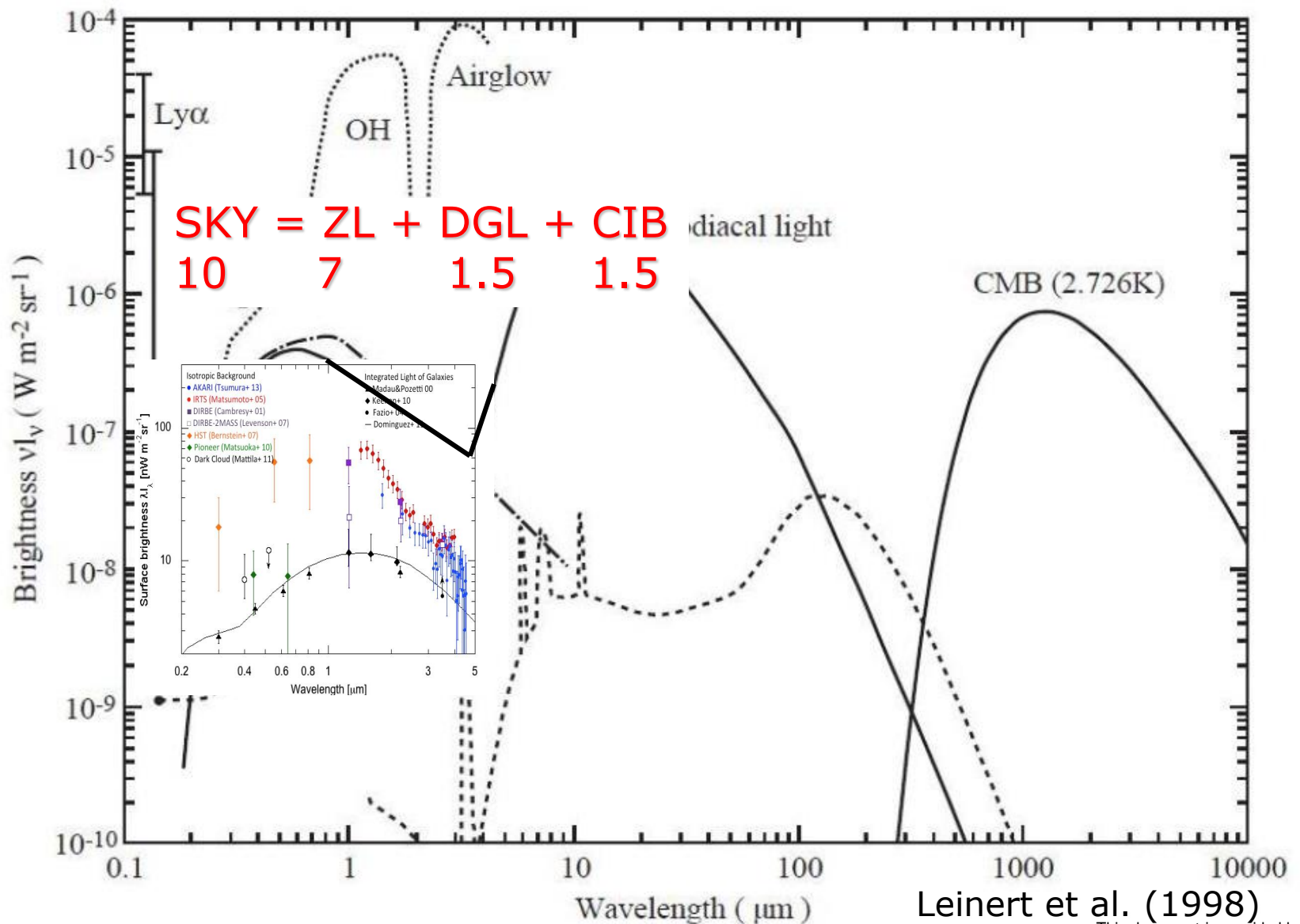
- 「あかり」IRCを用いて1.8-5.3 μm のEBLスペクトルを求めた
 - コールドシャッターが無いSpitzerでは不可能
 - 高い点源検出限界のため、星からのコンタミが無い初めてのEBL観測
 - 広く分布したデータセットから、黄緯・銀緯などの空間分布相関を用いて前景成分を分離
- <4 μm の波長域で既知の銀河の足し合わせからのEBLエクセスを確認
 - 過去のIRTSやDIRBEの結果と一致
 - ただしKelsallの黄道光モデルに依存
- EBLエクセスの原因についてはまだ詳細な議論が必要
 - ロケット実験CIBERによる観測結果に乞うご期待

補足

EBL excess



ZL subtraction error?



EBLとILG

- 銀河積算(ILG)の背景放射に対する寄与はAB等級23等辺りで飽和

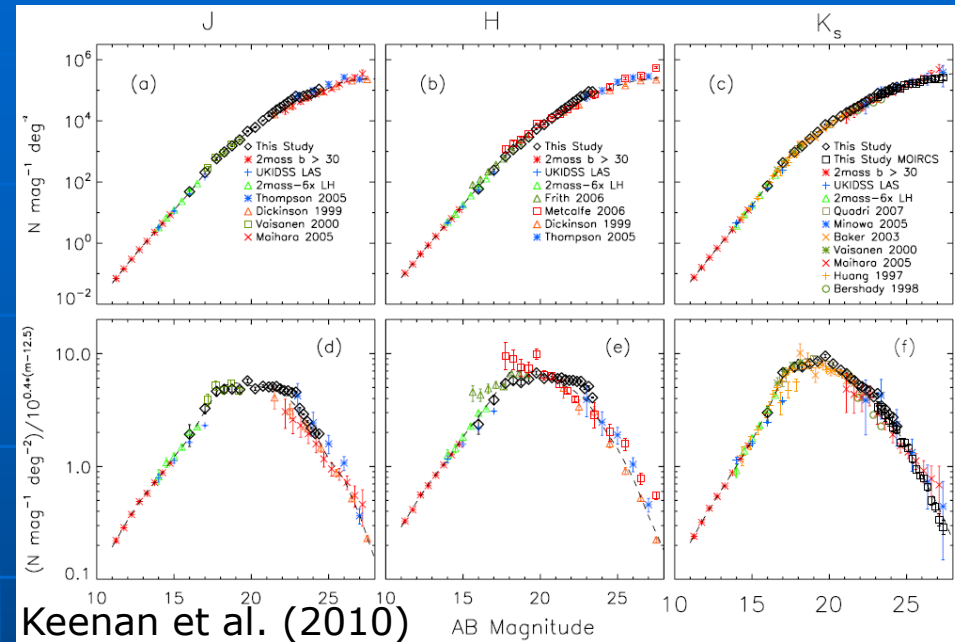
- これ以上深く観測しても銀河ではEBLを説明不可

- 初代天体は大質量

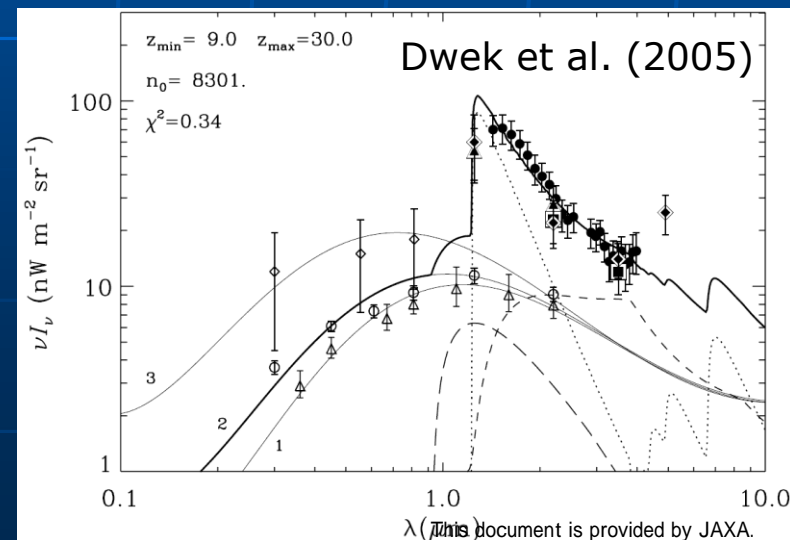
- 強力な紫外線が周りの中性水素に吸収され、Ly α として再放射

- CIBの1.5 μ mピークは $z \sim 12$ に対応

- CMBによる再電離期の結果とよく一致($z: 20 \sim 6$)

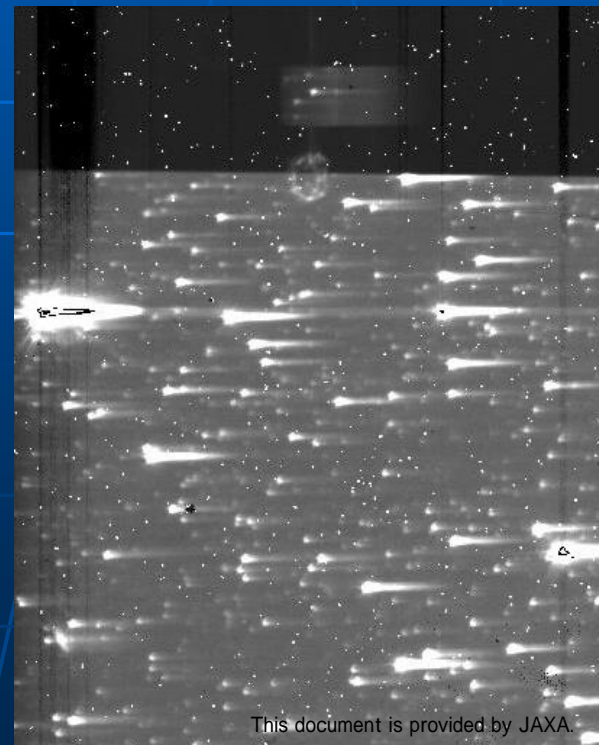
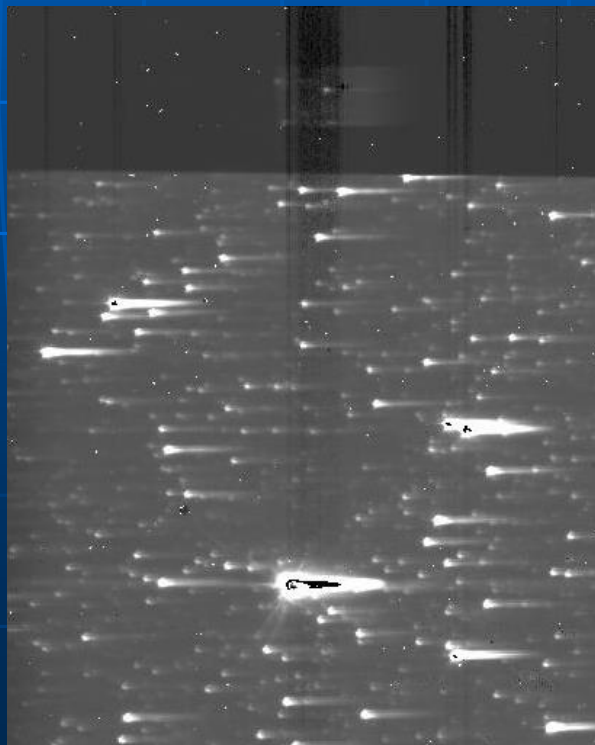


Keenan et al. (2010)



面輝度分光解析に用いたデータセット

- プリズム分光している公開データをDARTSから取得
 - Phase-1,2で地球光コンタミがない期間（2006年9月～2007年5月）
 - 全部で 349点
- これらのうち、使えないデータを除外（349点→278点）
 - 迷光やコンタミによる汚染
 - 特定の領域を観測したデータ



SAAによる暗電流の増加

南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA)
では、荷電粒子の衝突確率が激増

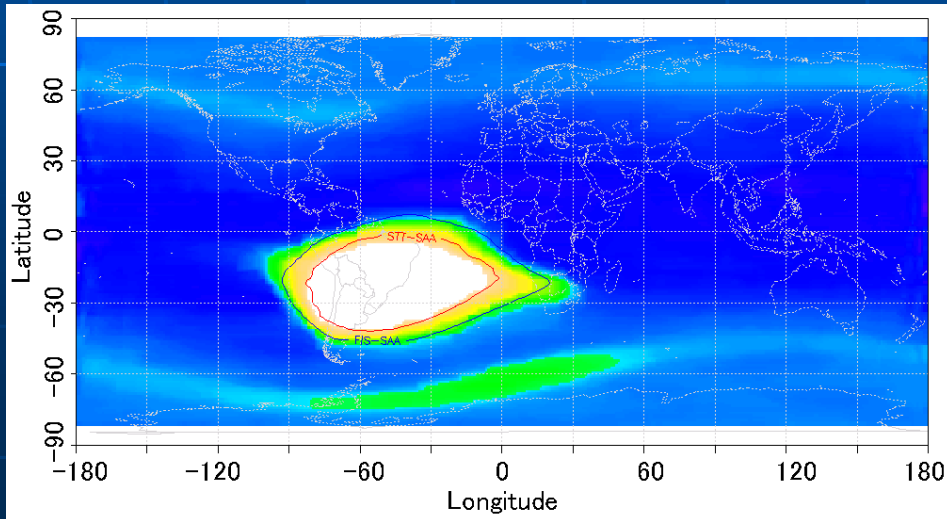


荷電粒子の衝突により、暗電流が増加する
検出器上の暗電流の分布の構造はSAA通過前後で異なる

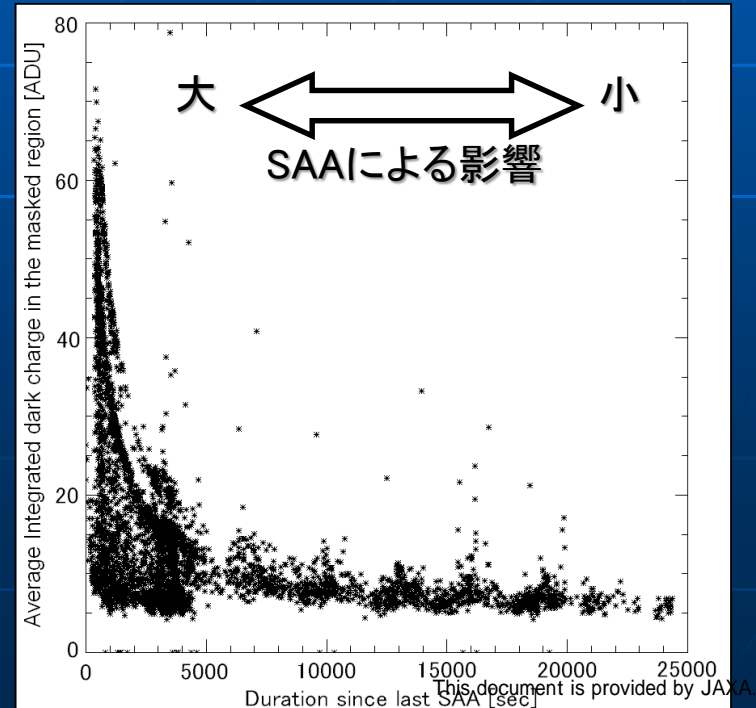
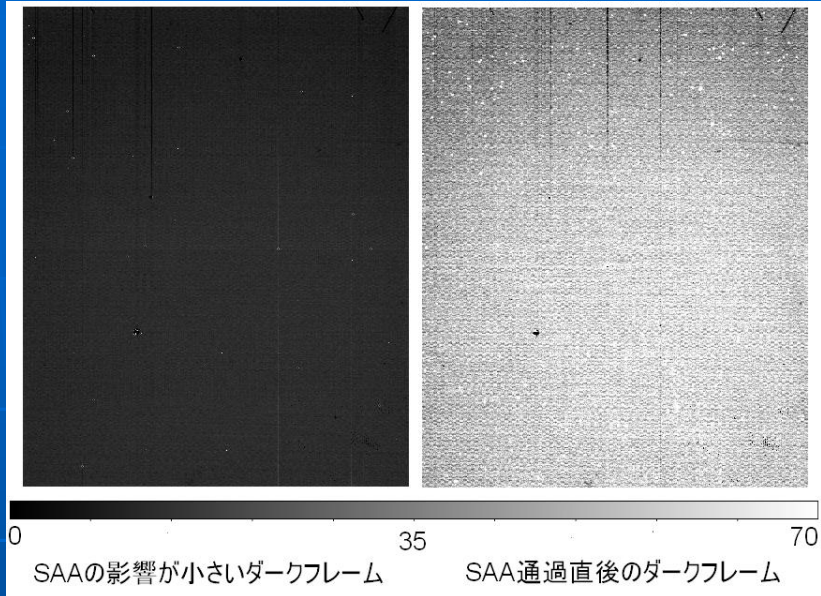


増加した暗電流の緩和時間は約10000秒(1周期以上)

拡散光のデータ解析において、SAA通過後の
暗電流値の増加とその分布の補正が必要



Doi et al. in prep.



This document is provided by JAXA.

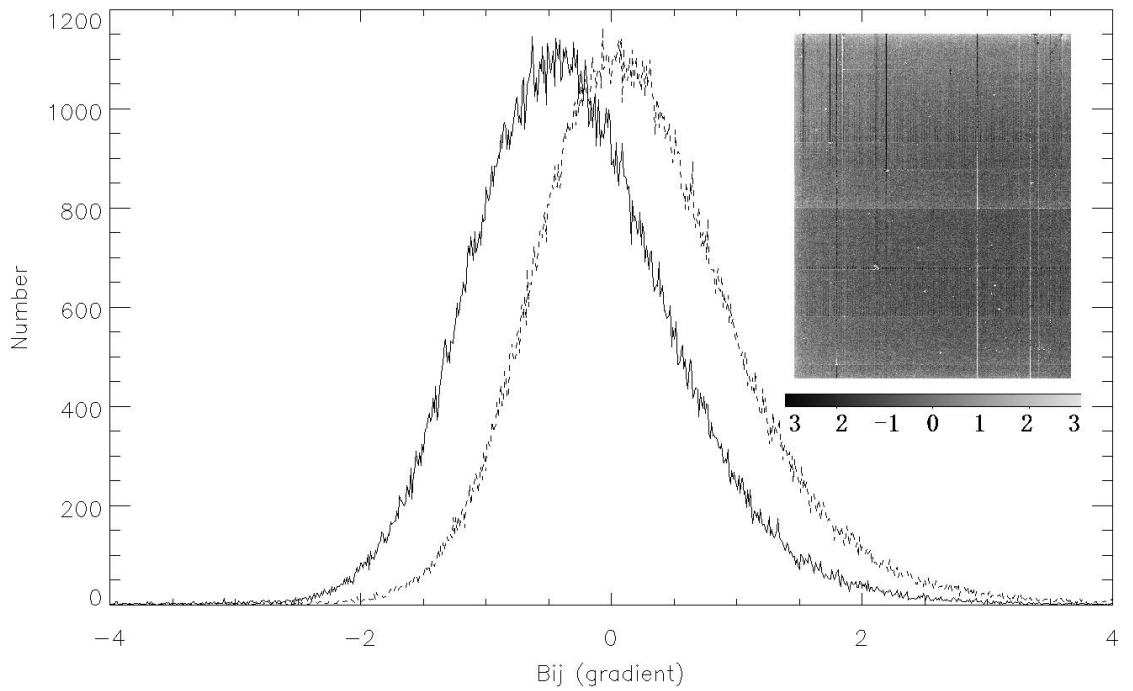
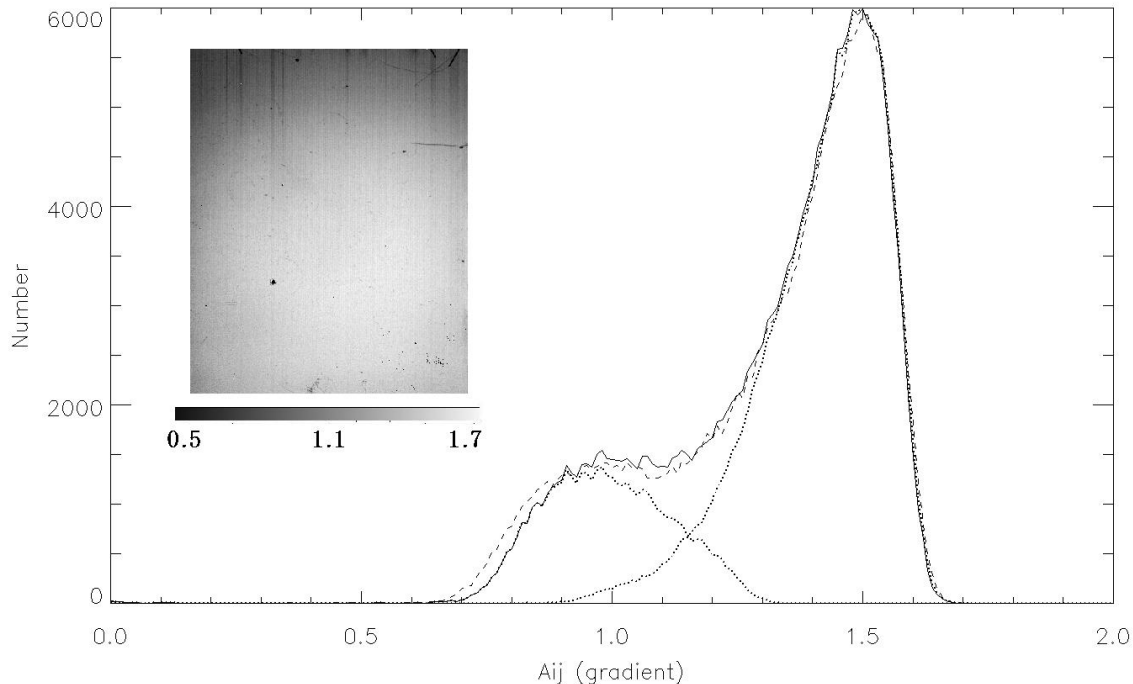
マスク領域

- 液体ヘリウム
ダークフレーム
- マスク領域の暗電圧
- この線形フレームでも、マスク領域を

$$D_{ij} =$$

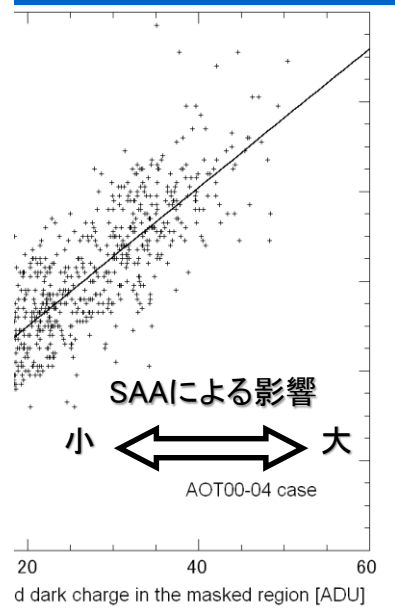
AOT00-04
AOT00-04

IRCデータリダクション



推定法

(1) PASJ 63, 755

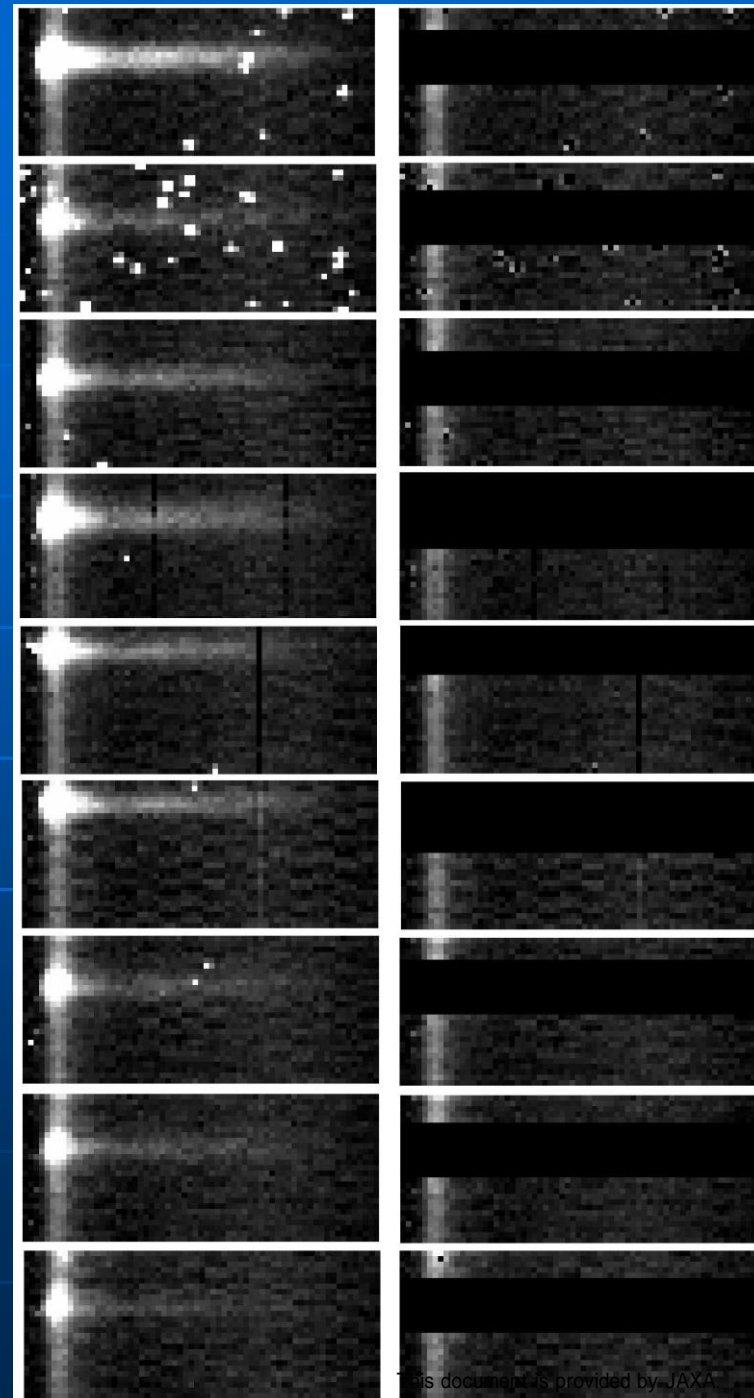
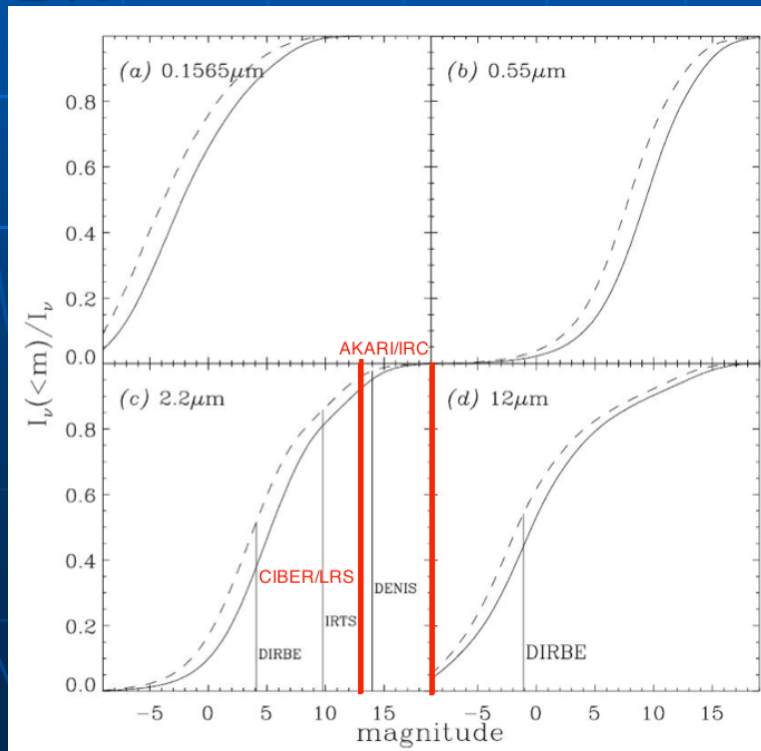


rk

ムが正式採用

点源のマスク

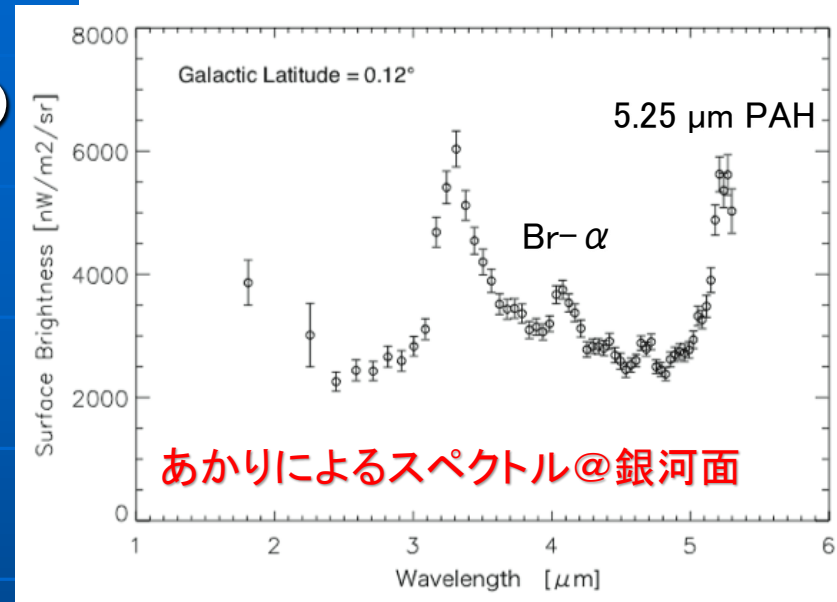
- スリット上の星はマスクして、拡散光のスペクトルを抽出
 - <19Vega等級@2 μ mの星を除去
 - ISLはほぼ無視できるレベル ISL=0
- 宇宙線によるホットピクセルもマスク
- マスク後に足し合わせて1次元のスペクトルを得る



IRCで検出されたDGL中のPAHバンド

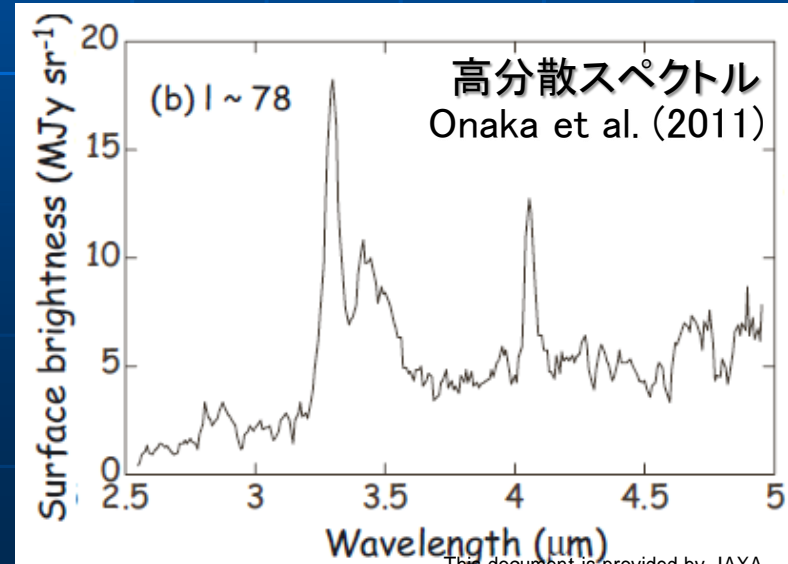
■ DGL中に3.3 μ m PAHバンドの検出

- 過去のIRTSより高波長分解能
- 星の影響(ISL)もより小さい



■ 非対称なバンド形状

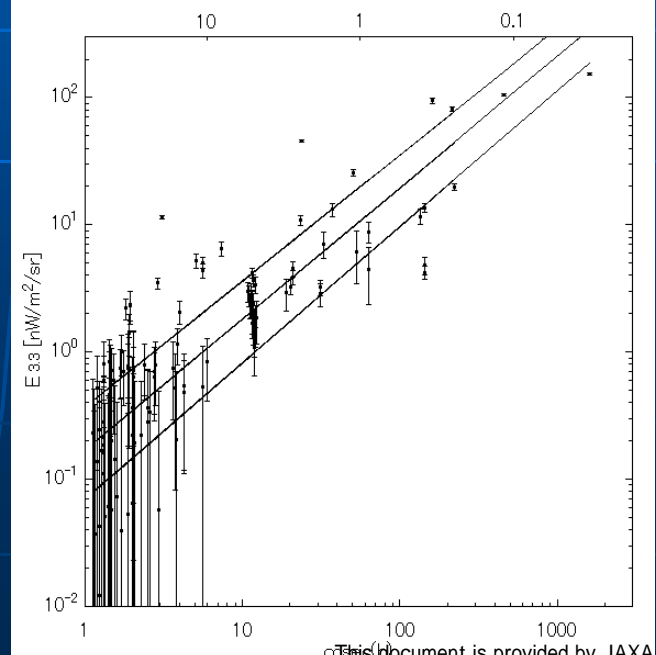
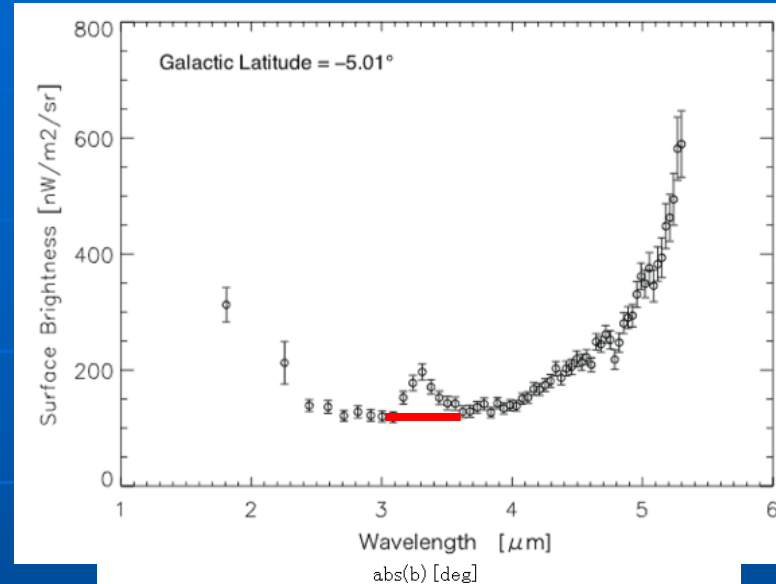
- 3.4 μ m、3.5 μ mバンドの存在
- 高分散分光データではそれらは分解されて検出されている (Onaka et al. 2011)



PAHバンドの抽出

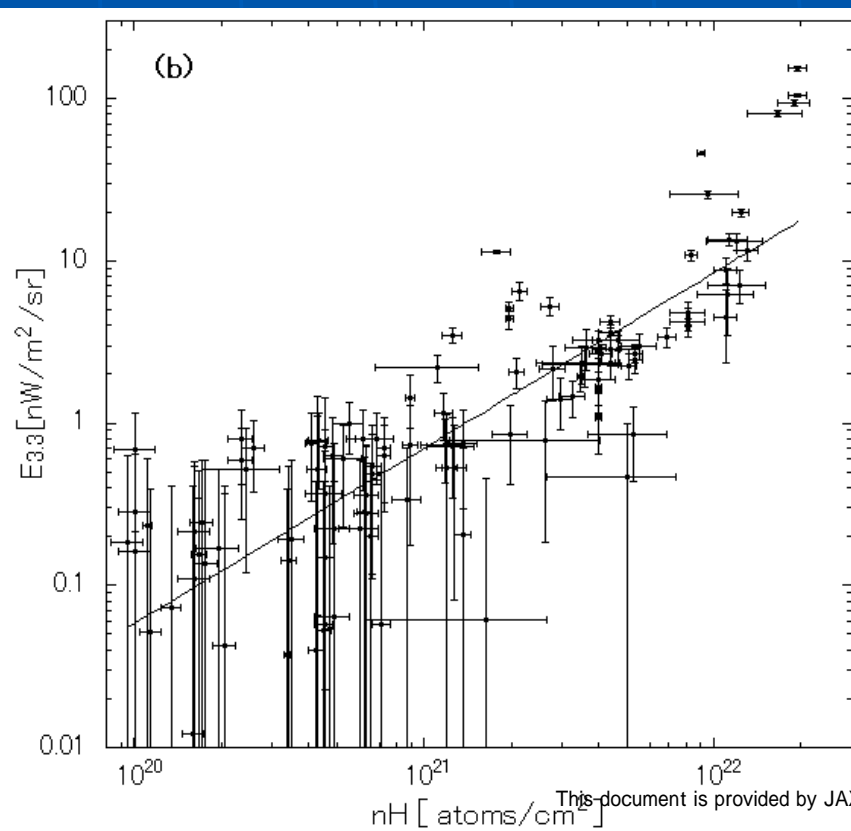
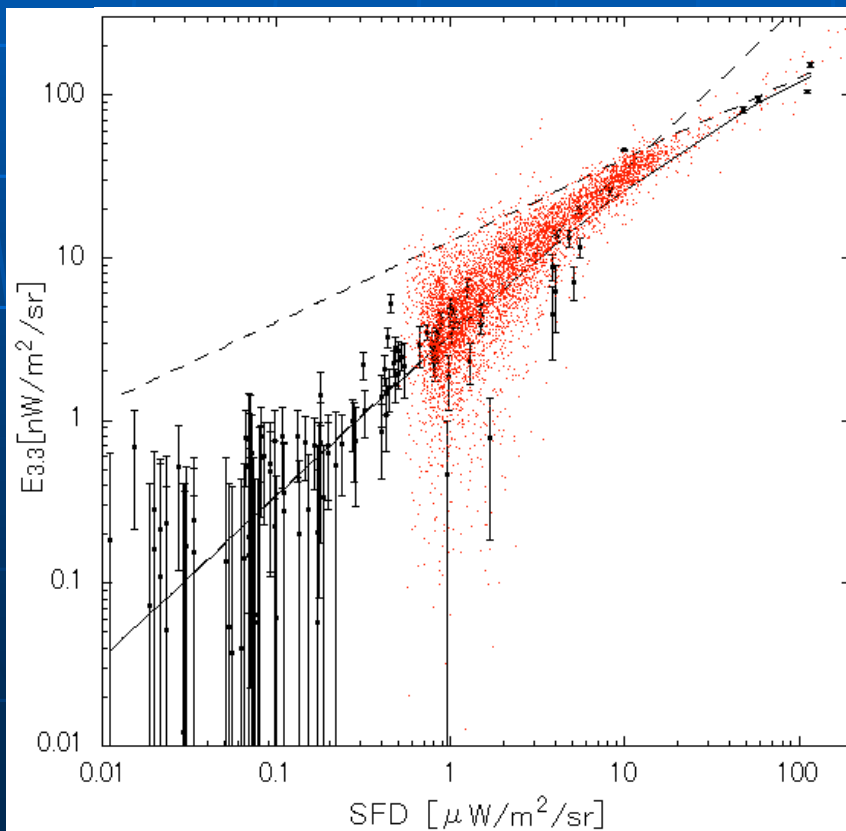
- 3.2 μm と3.6 μm の強度から連続成分を推定し、3.3 μm での強度を求める
 - IRTSでの手法と同じなので直接比較が可能 (Tanaka et al. 1996)
- 銀緯と良い相関
 - 銀緯 > 15degあたりからPAHバンドを検出している
 - IRTSでは銀緯 > 5deg
 - PAHバンドの黄緯依存性は確認できなかった

→ 黄道光に付随するPAHはなし



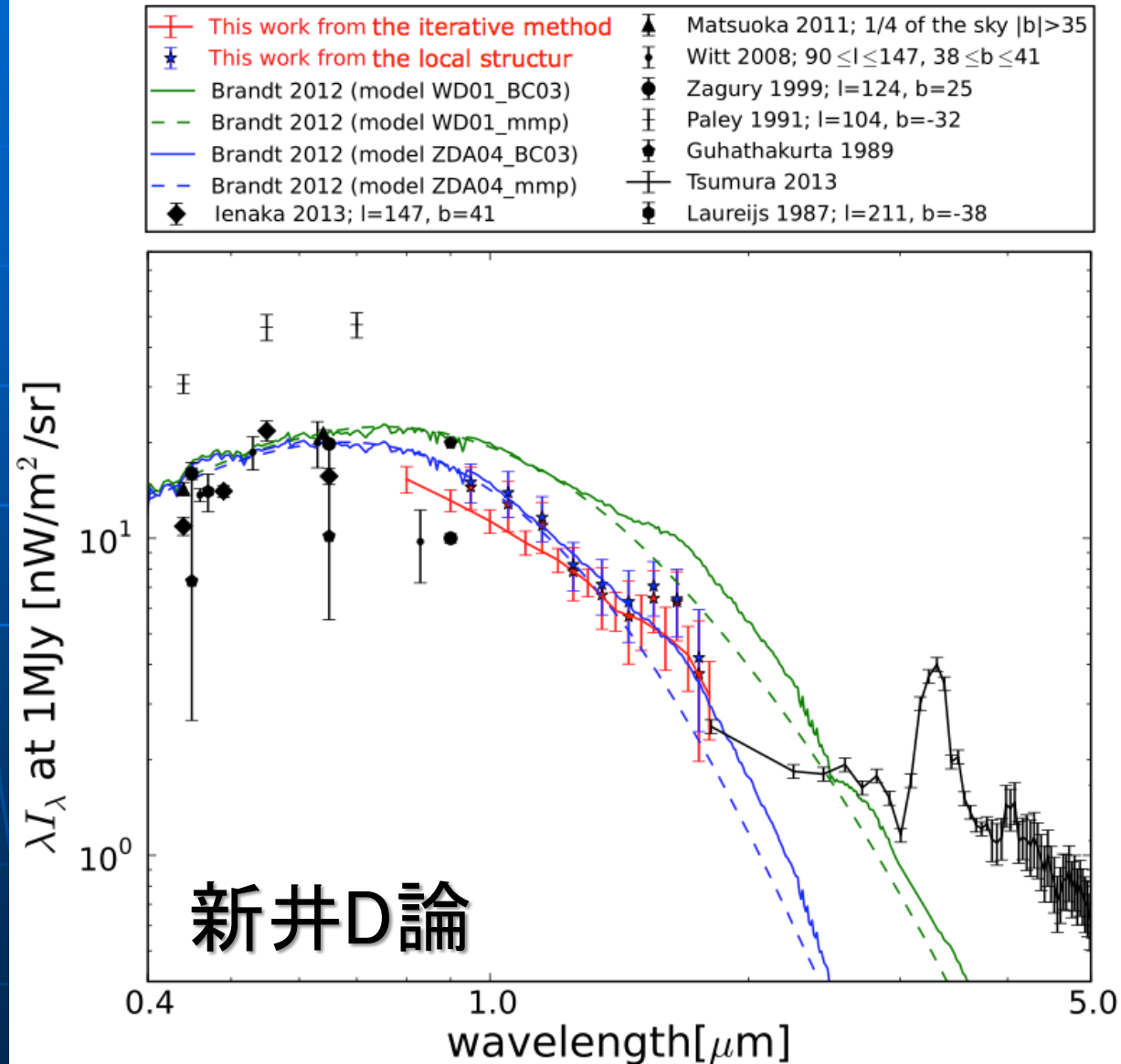
星間ダスト・ガスとの相関

- 星間ダスト(SFD100 μ m)、星間ガス(nH)と良い相関
 - ・ 銀河面で知られていた相関を一般の星間空間に拡張
 - ・ 星間ガスより星間ダストとの方が良い相関
 - 空間分解能の違いによる影響
 - ・ PAHはダストやガスとよく混ざっている



可視光DGLとの比較

- CIBERによる可視-近赤外線DGLと連続的につながるスペクトル
- CIBERと「あかり」が初めてDGLスペクトルの抽出に成功



黄道光スペクトルの黄緯依存性

- 過去の観測から、熱放射成分のピーク付近($>5\mu\text{m}$)で決めた色温度は黄緯によって異なる

IRAS 12, 25, 60 μm (Hauser+84)

Plane: 244 ± 44 K

Pole: 275 ± 57 K

ISO 5-16 μm 分光 (Reach+03)

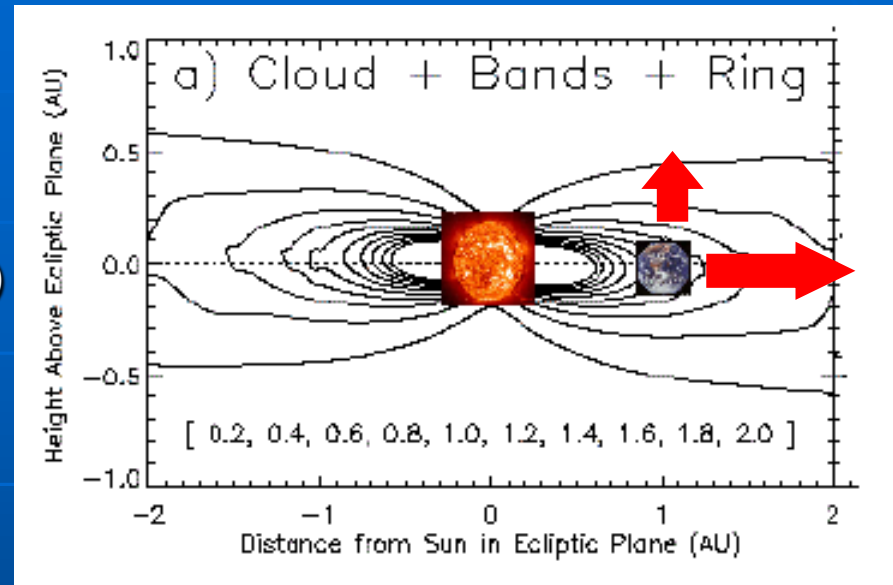
Plane: 268.5 ± 0.4 K (60deg)

244.1 ± 0.6 K (120deg)

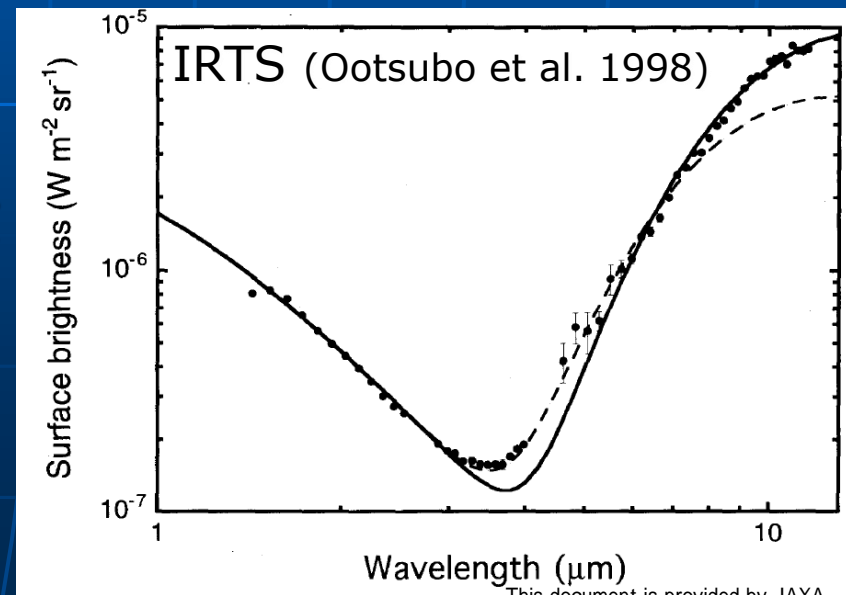
Pole: 274 ± 1.1 K

- 黄道面では、遠くの冷たいダストまで見ているため

- IRTSでは $<5\mu\text{m}$ で黄緯変化しない高温成分(300K)を検出 (Ootsubo+98,00)



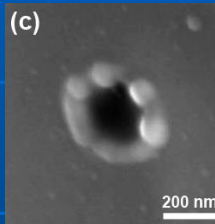
Kelsall et al. 1998



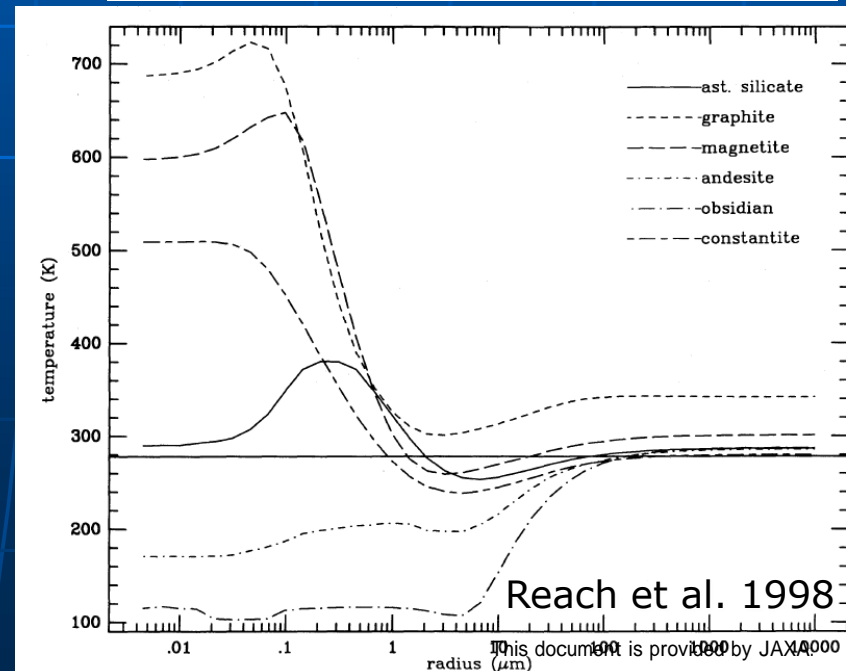
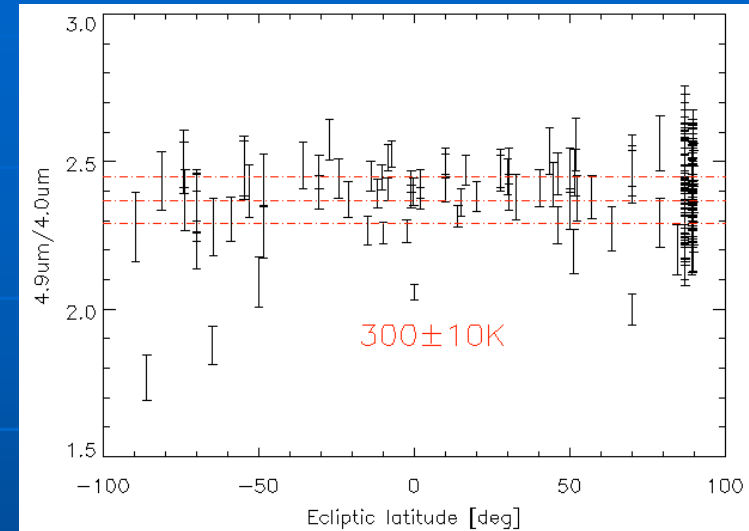
黄道光スペクトルの黄緯依存性

「あかり」でも、黄緯変化が検出されなかった

- 黄緯によらず300K ($<5\mu\text{m}$)
- IRTSの高温成分を確認
- 高温成分を説明するためには、サブミクロンサイズのダストの存在が必要
 - はやぶさサンプル上のマイクロレーター

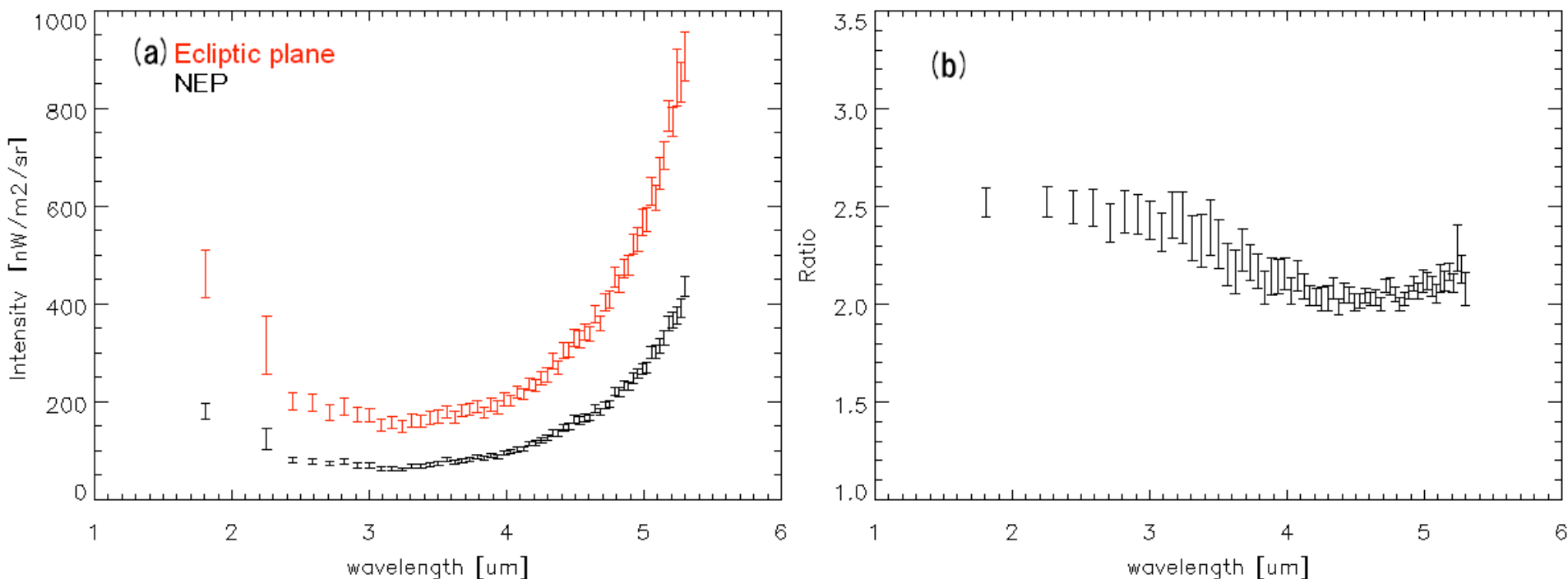


- 同様の温度差は彗星等にも例
17P/Holmes(2007)
 - $360 \pm 40\text{K}$ @ $3\text{-}4\mu\text{m}$
(Yang et al. 2009)
 - $\sim 200\text{K}$ @ $12.4\mu\text{m}$, $24.5\mu\text{m}$
(Watanabe et al. 2009)
 - サブミクロンダスト(高温)と大きなダスト($>1\mu\text{m}$)の混合
(Ishiguro et al. 2010)



黄道光の季節変化

- 同じ天域では、黄道光のスペクトル形状は変化せずに季節変化
- 散乱成分と熱放射成分の強度比は、天域に依存する
→ 黄道光を2成分に分けてモデル化して分離



黄道光のモデル化

■ 黄緯依存性を用いて黄道光スペクトルのテンプレートを抽出

- 散乱光成分(5800K)と熱放射成分(300K)に分離

■ 黄道光の絶対値はDIRBEモデル(Kelsall et al.1998)を用いる

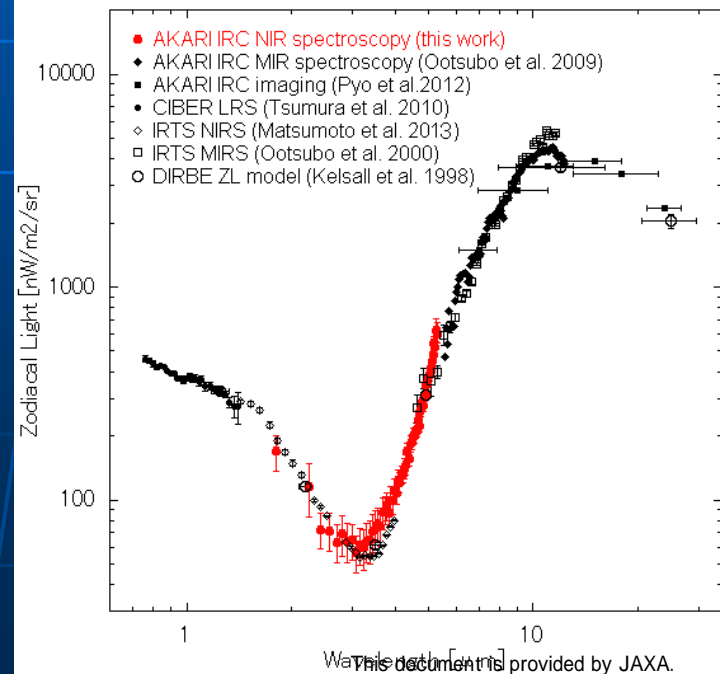
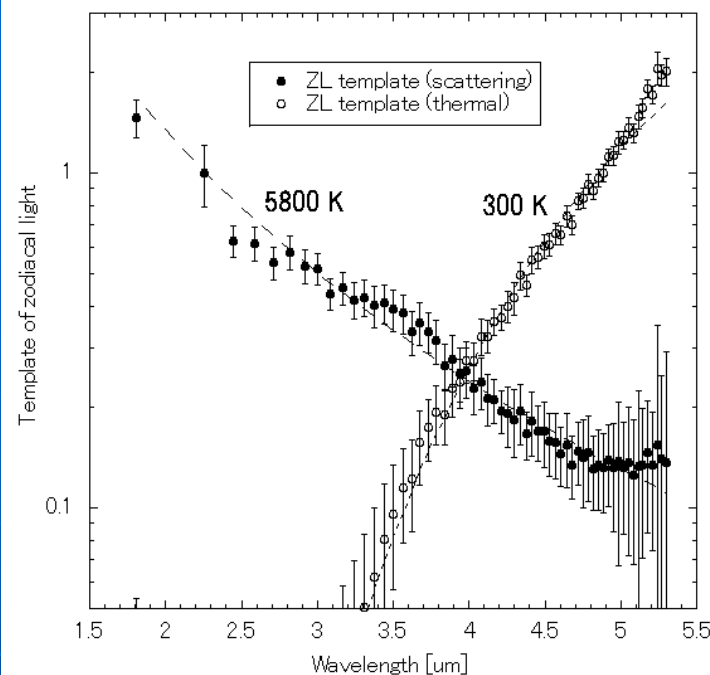
- 散乱光成分: 2.2 μm モデル値
- 熱放射成分: 4.9 μm モデル値

$$ZL_i(\lambda) = ZL_i^{\text{scat}}(\lambda) + ZL_i^{\text{thermal}}(\lambda),$$

$$ZL_i^{\text{scat}}(\lambda) = \text{DIRBE}_i^{2.2\mu\text{m}} \times ZL_{\text{temp}}^{\text{scat}}(\lambda),$$

$$ZL_i^{\text{thermal}}(\lambda)$$

$$= [\text{DIRBE}_i^{4.9\mu\text{m}} - ZL_i^{\text{scat}}(4.9\mu\text{m})] \times ZL_{\text{temp}}^{\text{thermal}}(\lambda).$$



TeV γ 線blazer観測からの制限

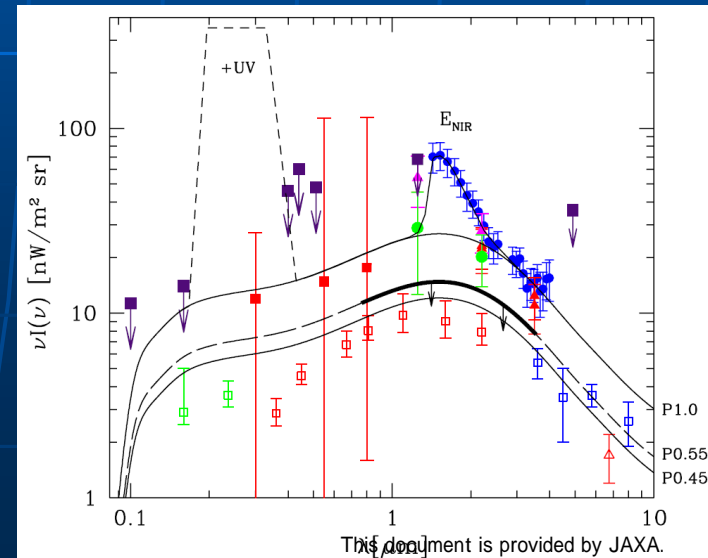
- CIBが銀河系外起源なら、TeV γ 線とCIBが反応し、TeV γ 線はCIBによって銀河間吸収を受ける

$$\gamma(\text{NIR}) + \gamma(\text{TeV}) \rightarrow e^- + e^+$$
$$E(\text{NIR}) + E(\text{TeV}) > 2m_e c^2$$

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\Gamma}$$

- 吸収前のスペクトルをべき乗と仮定し、 Γ が観測や理論と一致するか($\Gamma > 1.5$)を調べる
→ CIB直接観測と矛盾 Aharonian et al.(2006) など

- TeVガンマ線とCIBを共存させる最近のアイディア
 - Cosmic rayからの2次ガンマ線 (Essey&Kusenko 2010 等)
 - ガンマ線 \leftrightarrow Axionカップリング (Sanchez-Conde et al. 2007 等)



CIB and TeV-gamma rays

