

宇宙望遠鏡を用いた宇宙の明るさ測定

津村耕司

東北大学 学際科学フロンティア研究所

本日のメニュー

- イントロ
- 赤外線天文衛星「あかり」
 - ISAS/JAXAウェブリリース (2013年12月27日)
 - 何も無い空(そら)を光らせるもの:「あかり」が空の赤外線成分の分離に成功
 - <http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Outreach/results/PR131227/pr131227.html>
- 観測ロケット実験CIBER
 - ISAS/JAXAプレスリリース (2014年11月7日)
 - 宇宙の遠方から未知の光が届いている? ~宇宙赤外線背景放射の大きな「ゆらぎ」を発見~
 - http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2014/1107_yuragi.shtml
- ガリレオ衛星食掩蔽法
 - 国立天文台プレスリリース (2014年6月18日)
 - ガリレオ衛星が「月食」中に謎の発光? すばる望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡で観測
 - http://subarutelescope.org/Pressrelease/2014/06/18/j_index.html
- 将来計画(時間があれば)

1. イントロダクション

天文学者が明らかにしたいこと

- 宇宙はどのように誕生したのか？
- 誕生直後の宇宙はどのようなものだったのか？
- 誕生から、宇宙はどのように進化して現在に至ったのか？
- その中でどのように星や銀河が誕生したのか？
- そして、どのように生命が誕生したのか？
- 我々は宇宙で一人ぼっちなのか？

ここはどこ？ わたしはだーれ？

自分の研究テーマ

■ 宇宙の果て = 宇宙の始まり

- 光の速さは有限
- 1億光年かなたの宇宙は、1億年前の姿
- 遠くを見ること = 過去を見ること
- 天文観測は一種のタイムマシン！

■ 赤外線を用いた観測

- 宇宙からの観測(気球・観測ロケット・人工衛星)
- 冷却望遠鏡

宇宙で最初に誕生した星からの光を捉えたい！

宇宙の誕生と進化

宇宙マイクロ波背景放射

光で観測可能な最遠の宇宙
宇宙誕生からわずか40万年後
Big Bangの残り火
この時点では星や銀河はない

ビッグバン

Big Bang

宇宙の暗黒時代

現在の技術では観測不可能
この時代に**宇宙最初の星**形成
ここを攻めるのが現代天文学のフロンティア！

現在到達している最遠の銀河

宇宙誕生から約5億年
この時点では既に数多くの星や銀河

現在

時間

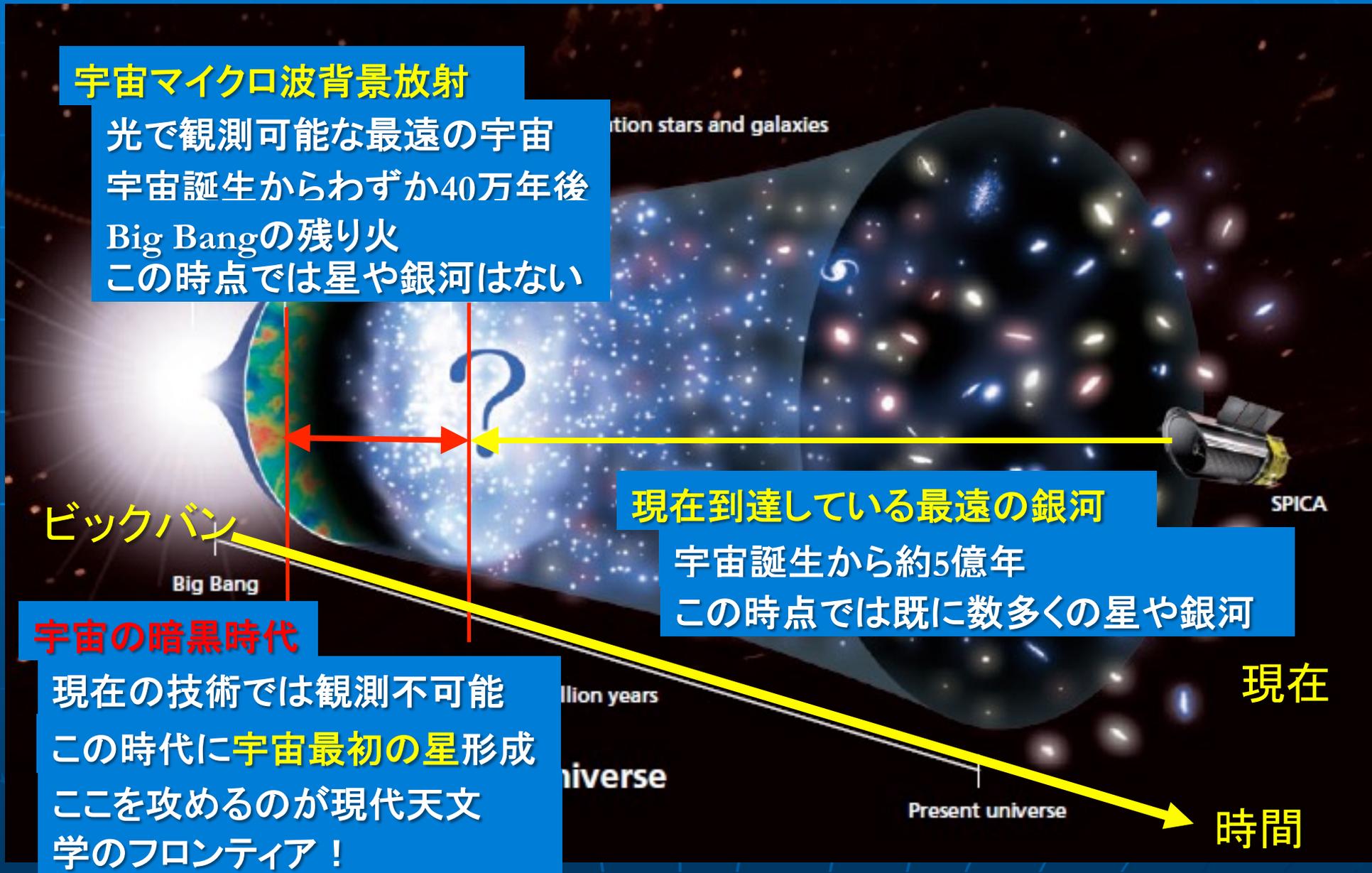
tion stars and galaxies

SPICA

llion years

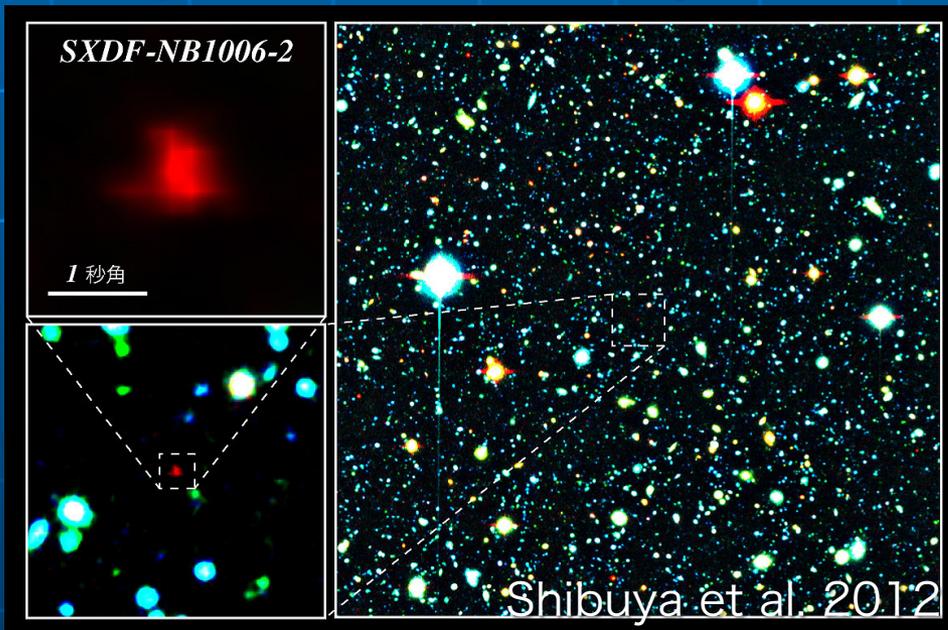
niverse

Present universe



より暗い天体を見るためには？

- 大きな望遠鏡を使う！
 - すばる望遠鏡(口径8.2m)@ハワイ
 - Thirty Meter Telescope (TMT)
2021年稼動目標
(月面の蛍が見える)



ただし、観測できるのは遠方の極めて明るい特異な天体のみ

「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



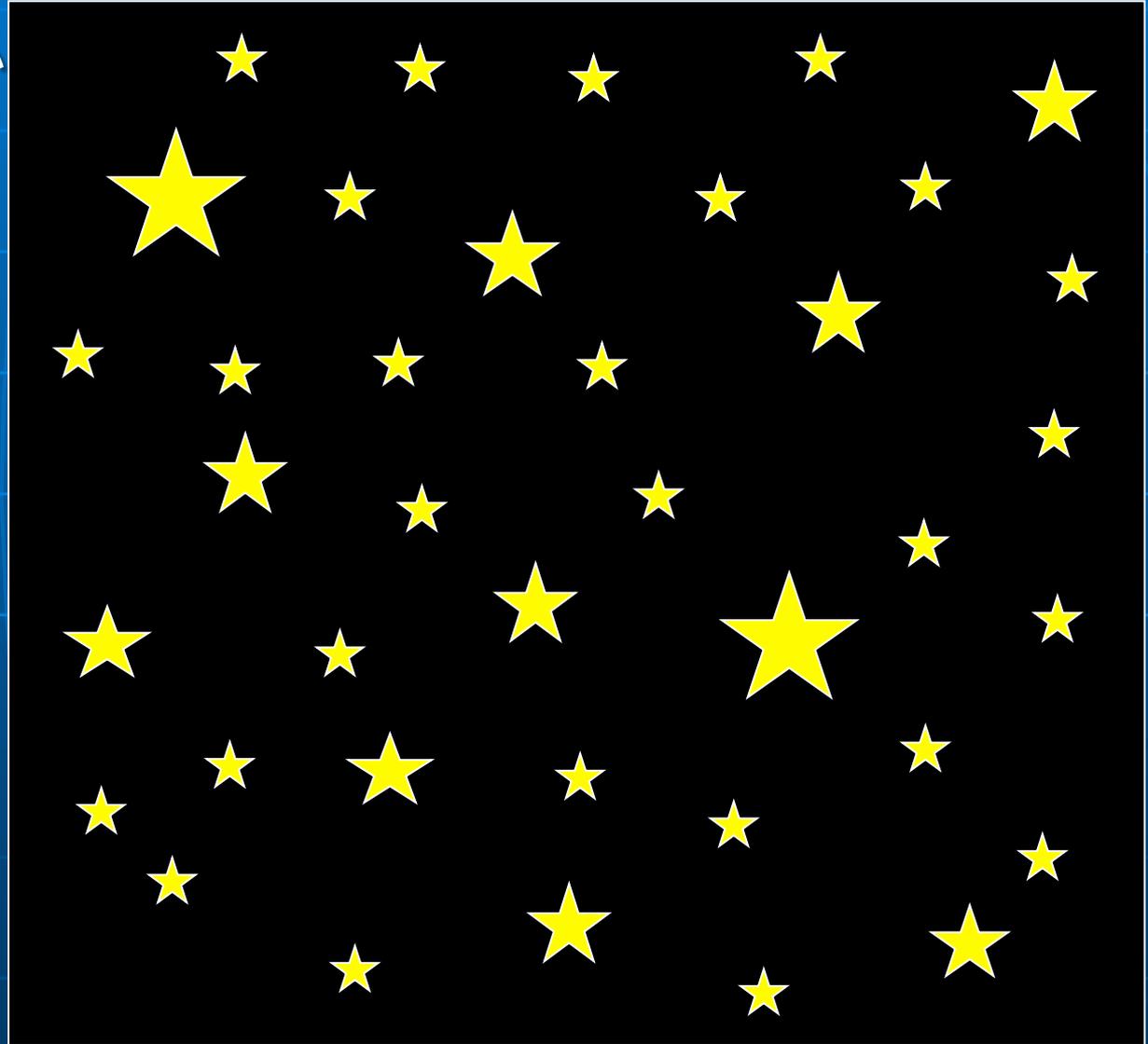
ハレアカラ山頂の
黄道光

点源観測と面輝度観測

一見、何も無いところ
にも、より遠方の天体か
らの光は届いている！

→ 面輝度として観測

精度の良い面輝度
観測は小型の望遠
鏡でも実現可能



観測にとっての障害① 地球大気

■ 空気が邪魔

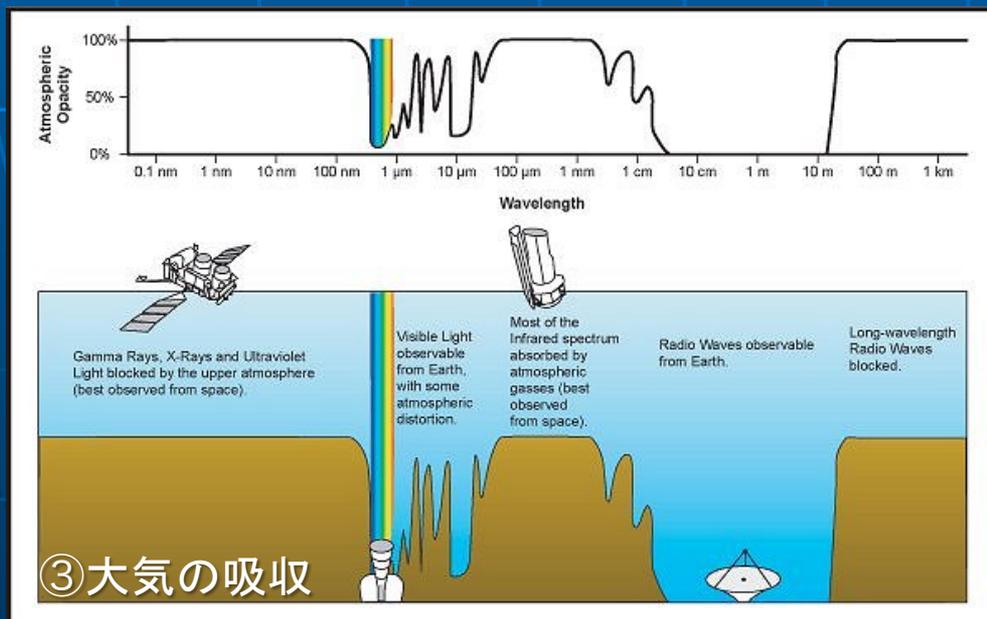
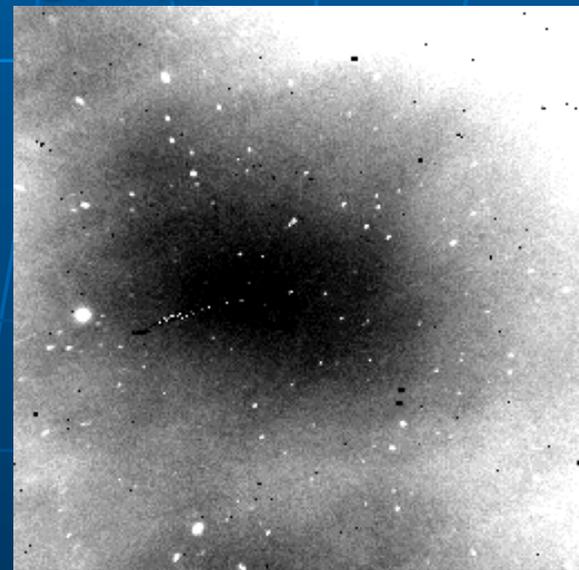
- ①空気による像のふらつき(シーイング)
- ②空気自身の明るさ (特に赤外線)
- ③空気による光の吸収 (特に赤外線)

→ **大気圏外から観測！！**

①シーイング



②大気光



観測にとっての障害② 黄道光

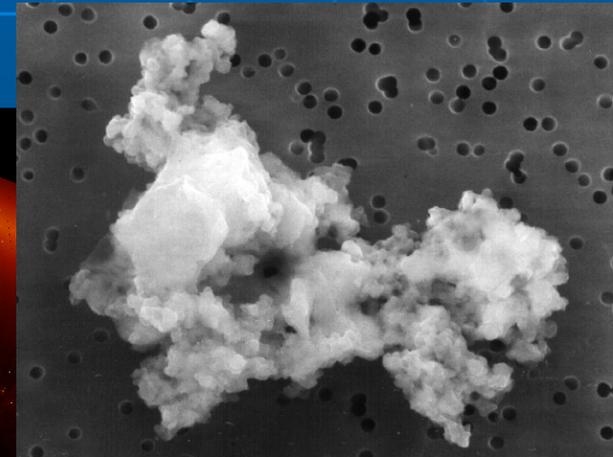
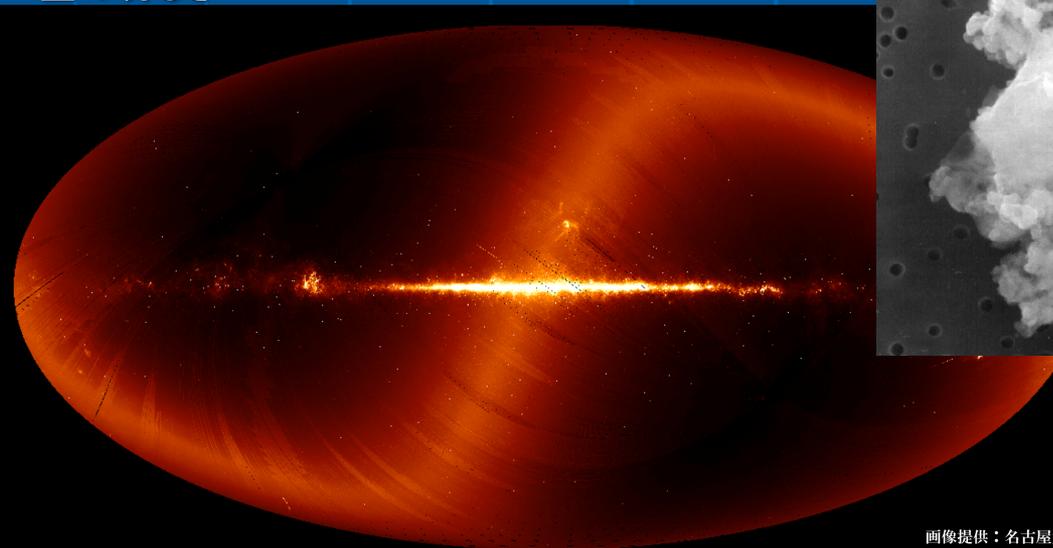
- 大気圏外からの観測でも、次は「**太陽系からの明るさ=黄道光**」が邪魔になる
 - 太陽系内に漂うダスト(惑星間塵)が太陽光を散乱して光っている

大気中から採取された惑星間ダスト
(画像: NASA)

赤外線天文衛星「あかり」による中間赤外線での
空の明るさ



ハレアカラ山頂の黄道光



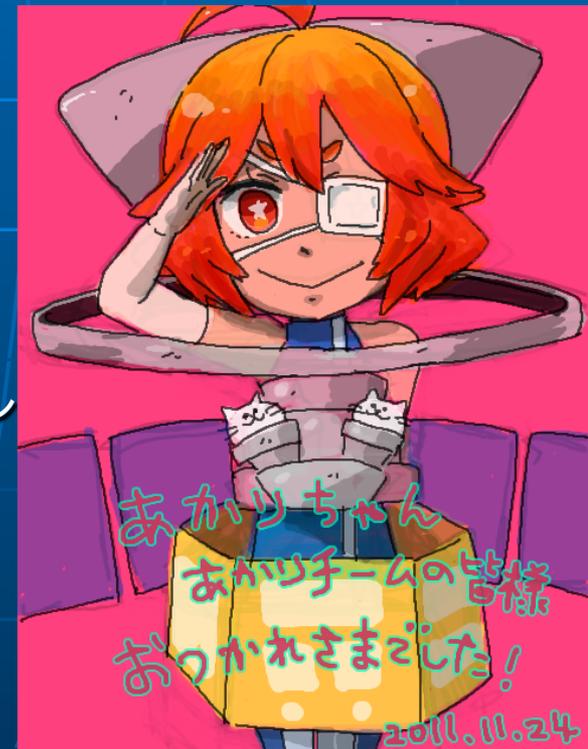
画像提供: 名古屋大学

2. 赤外線天文衛星「あかり」

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)

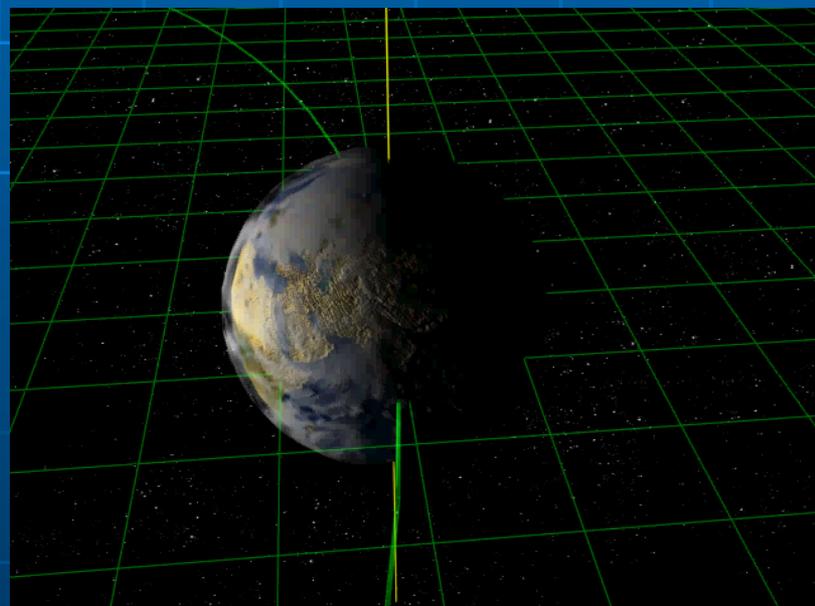
赤外線天文衛星あかりちゃん

<http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Outreach/manga/AKARIchan.html>



赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)

- 日本初の赤外線天文衛星
 - 2006年2月22日打上げ
 - M-V-8号機@内之浦
 - 2011年11月24日停波
- 有効径68.5cmの冷却望遠鏡
 - 液体ヘリウム + 冷凍機 (Phase-1,2)
 - 液体ヘリウム枯渇後(2007年8月)は冷凍機のみ (Phase-3)
- メインミッション: 全天サーベイ
 - ポインティング観測も可能
- 2種類の観測装置
 - Far-Infrared Spectrometer (FIS)
 - **InfraRed Camera (IRC)**
- 太陽同期極軌道
 - 太陽・地球からの熱入力を最小化
 - North Ecliptic Pole (NEP)を定期的に観測



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

$$SKY = ZL + DGL + EBL$$

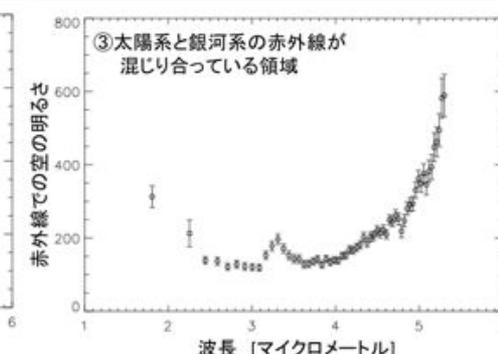
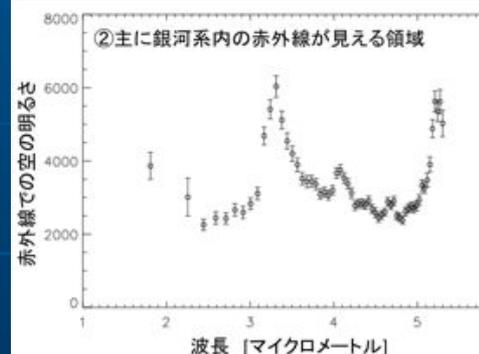
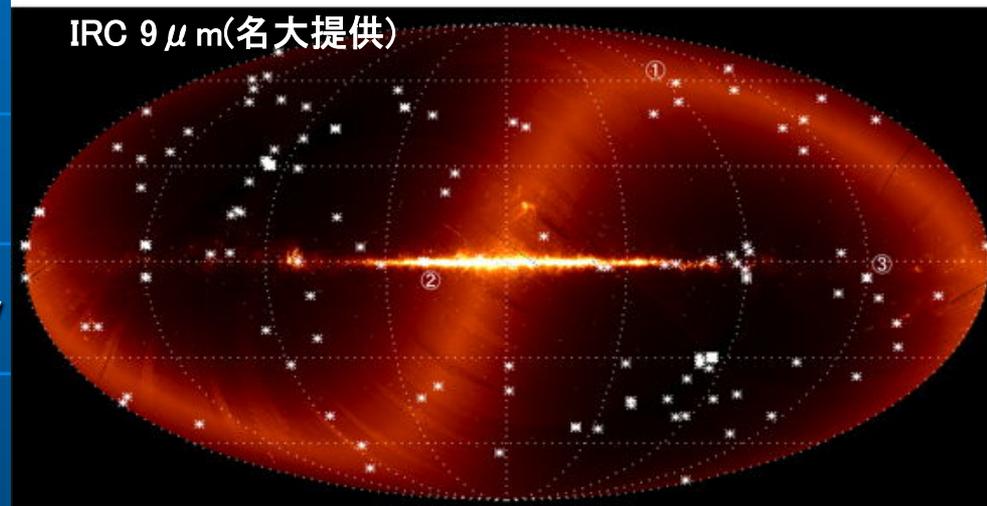
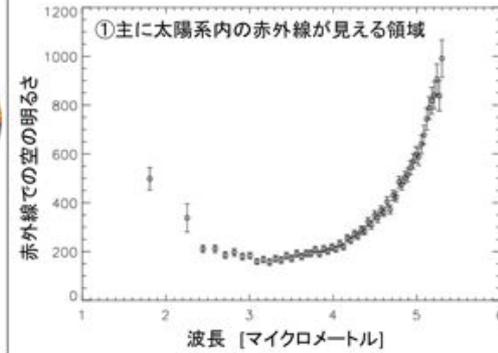
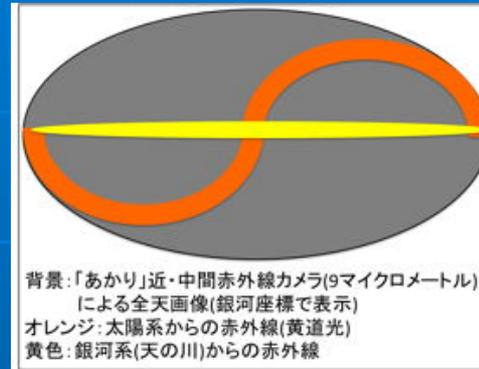
空間相関を利用して前景光分離

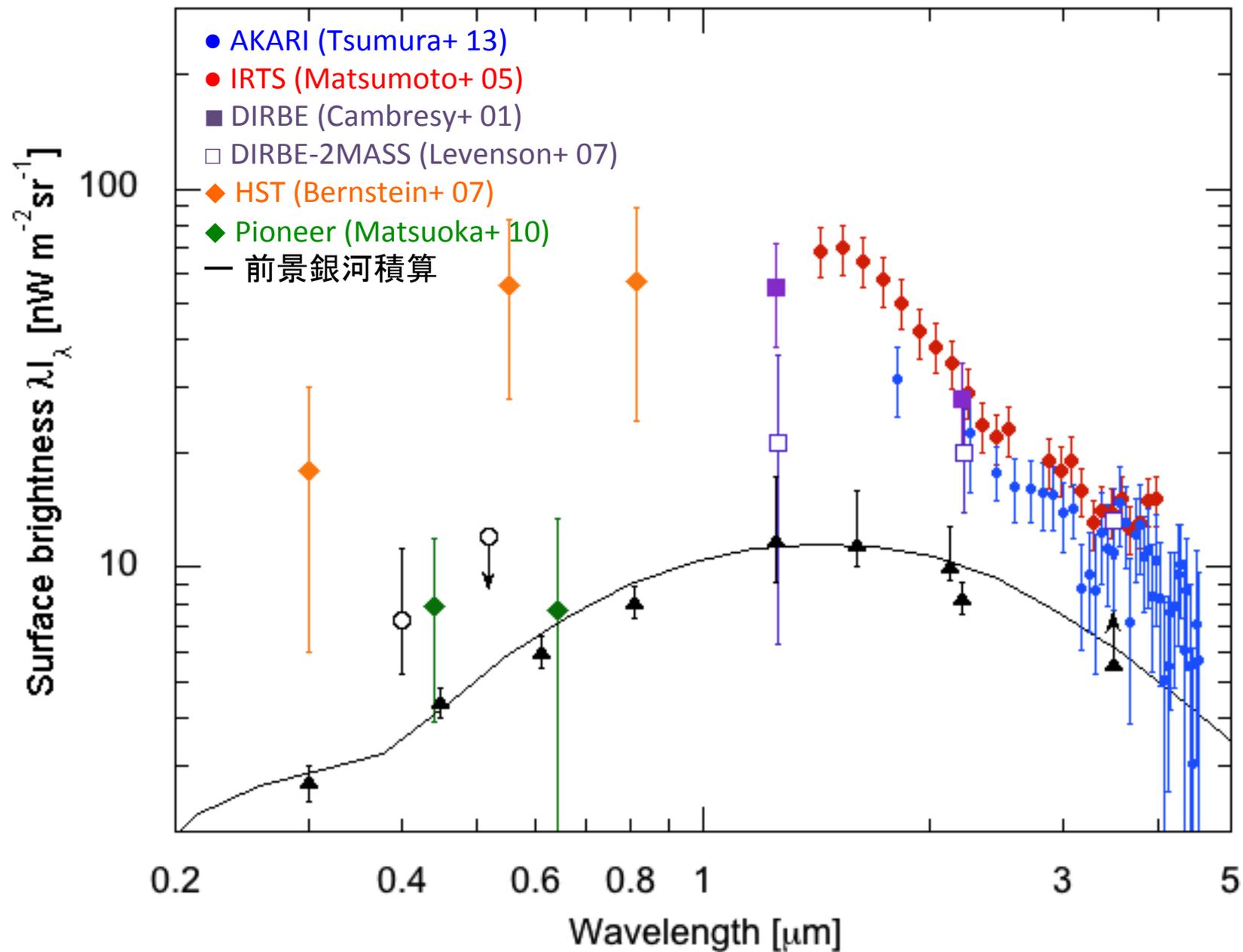
- 黄道光 (ZL) → 黄緯依存性
- 銀河光 (DGL) → 銀緯依存性
- 背景光 (EBL) → 一様分布

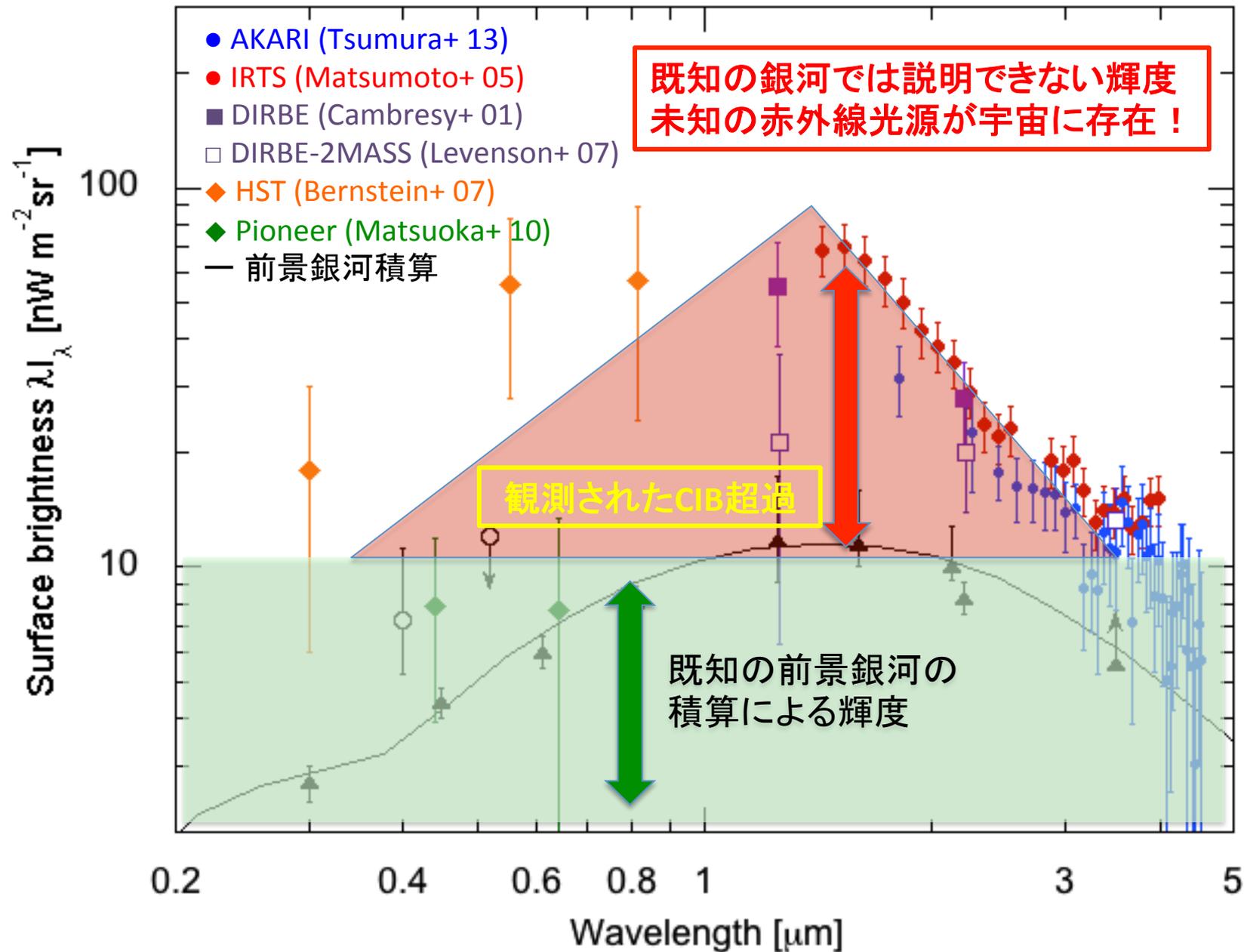
拡散光分光カタログの公開

http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Archive/Catalogues/IRC_diffuse_spec/

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







3. 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

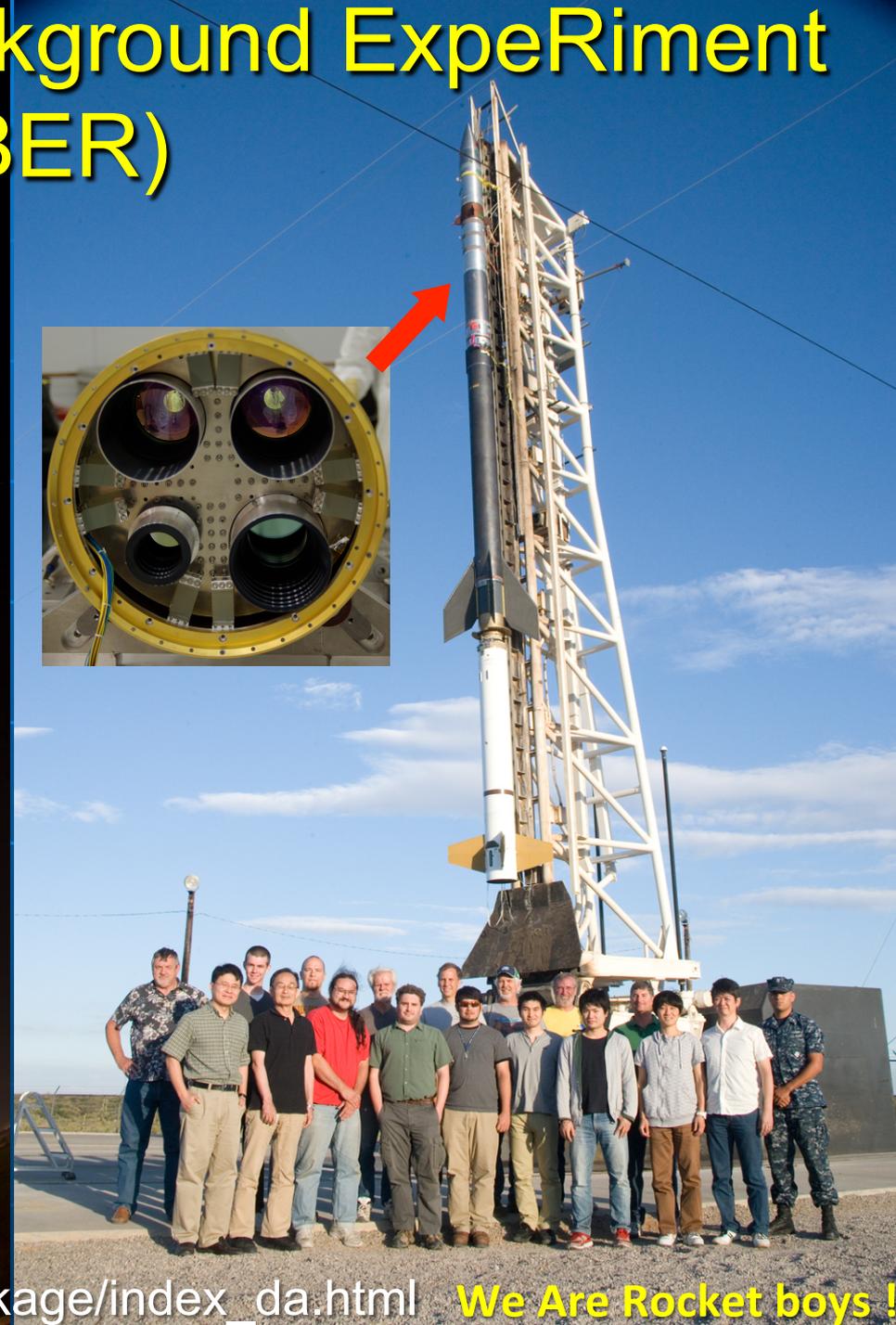
4度の打上げ・観測に成功!

第1回実験 2009年2月

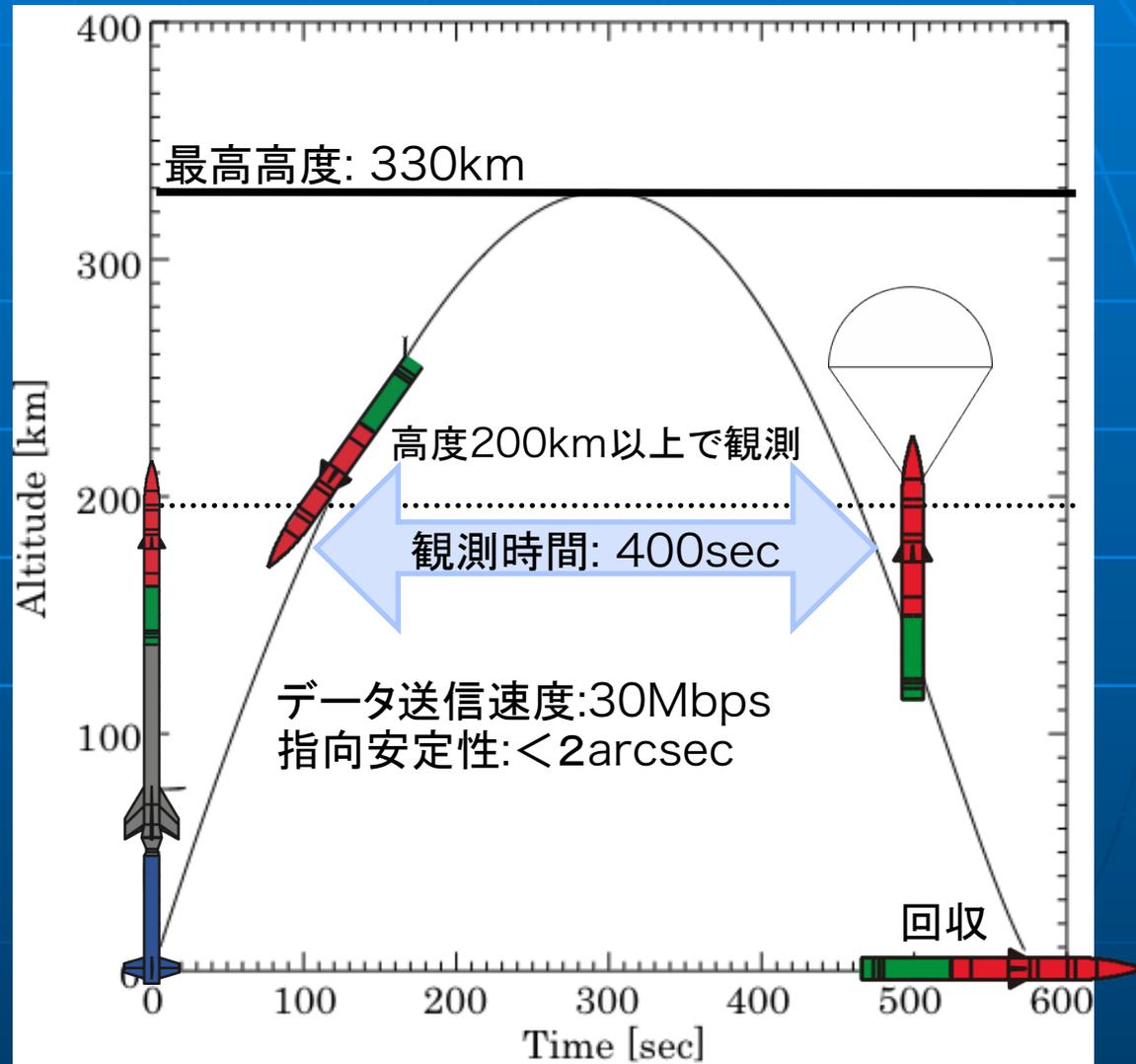
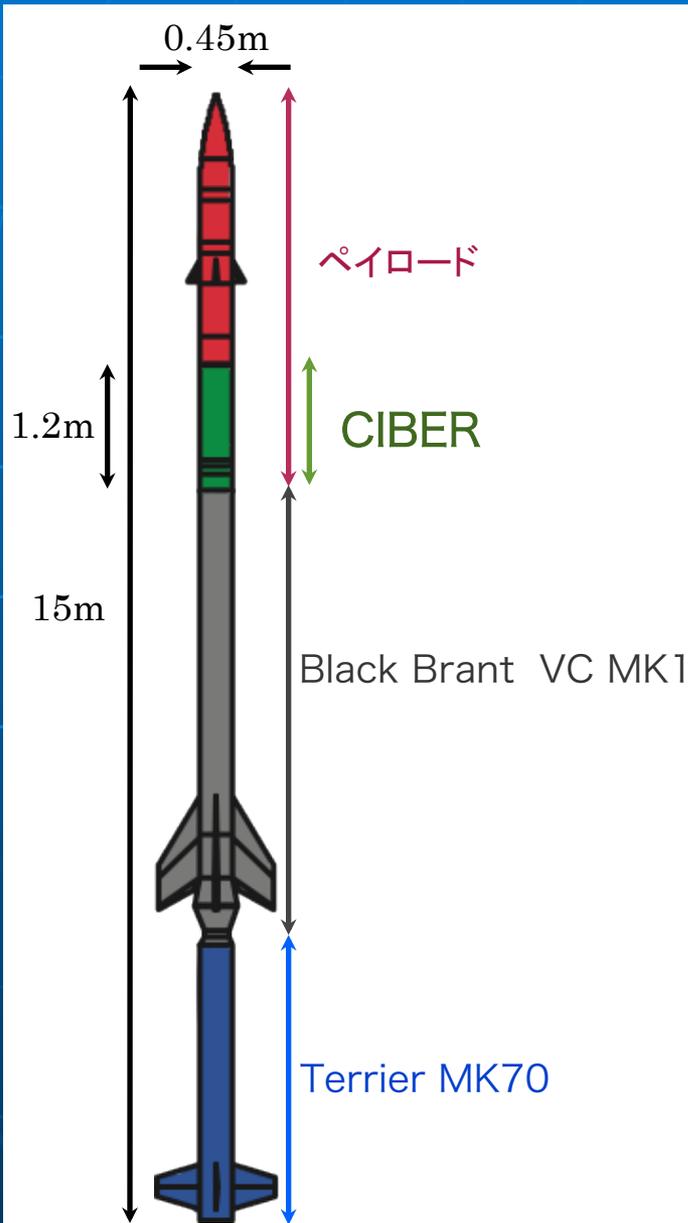
第2回実験 2010年7月

第3回実験 2012年3月

第4回実験 2013年6月



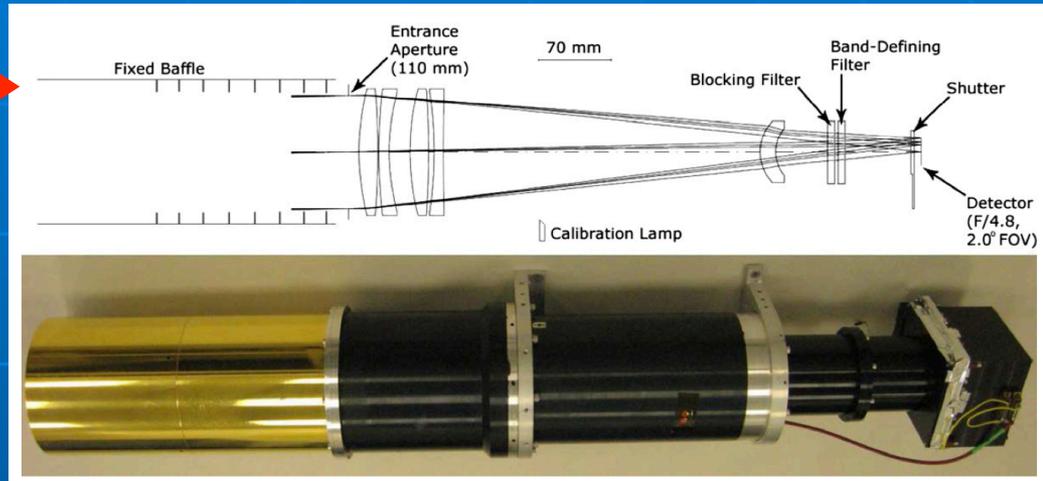
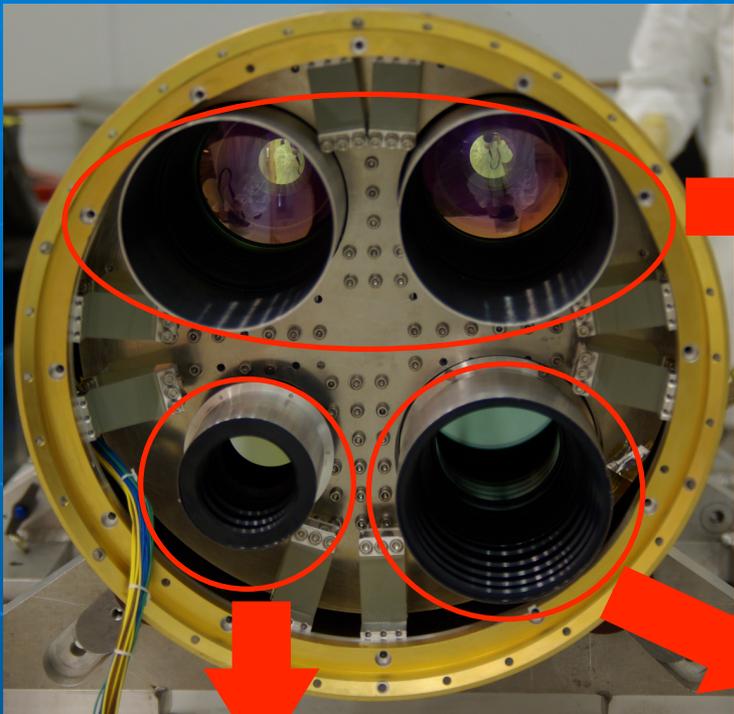
ロケット実験の概要 (第1-3回目の場合)



打上場: White Sands Missile Range

Wide-Field Imagers

1.0/1.6 μm でのCIBゆらぎ観測

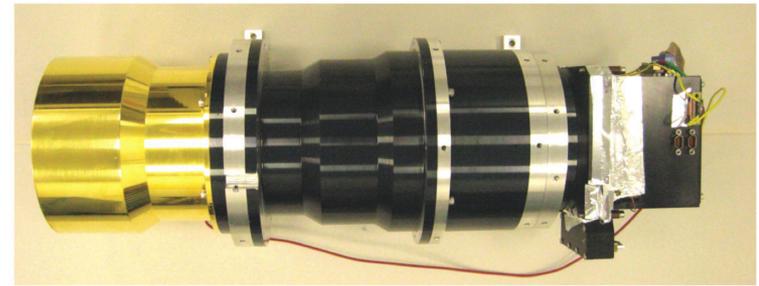
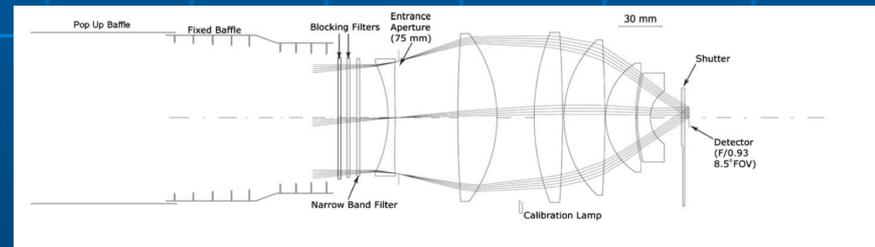
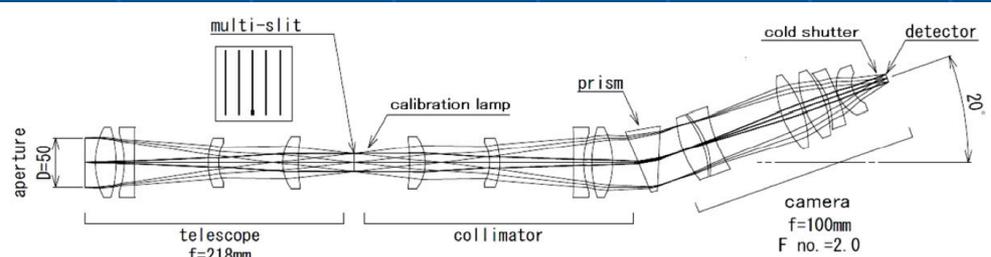


Narrow Band Spectrometer (NBS)

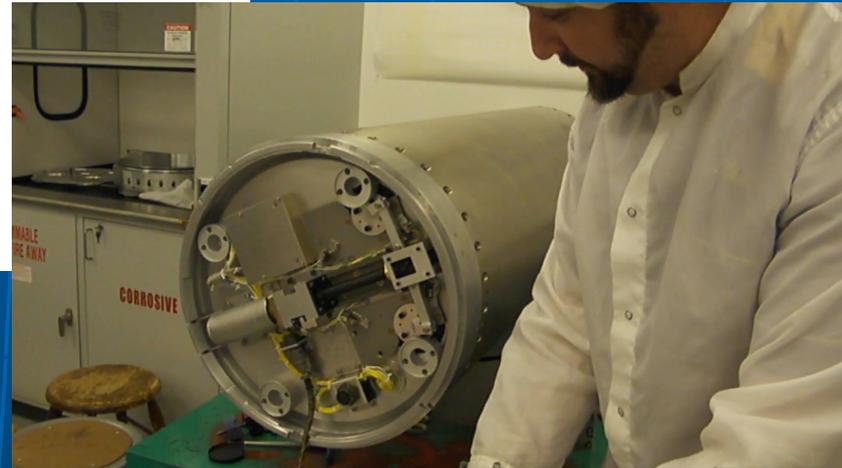
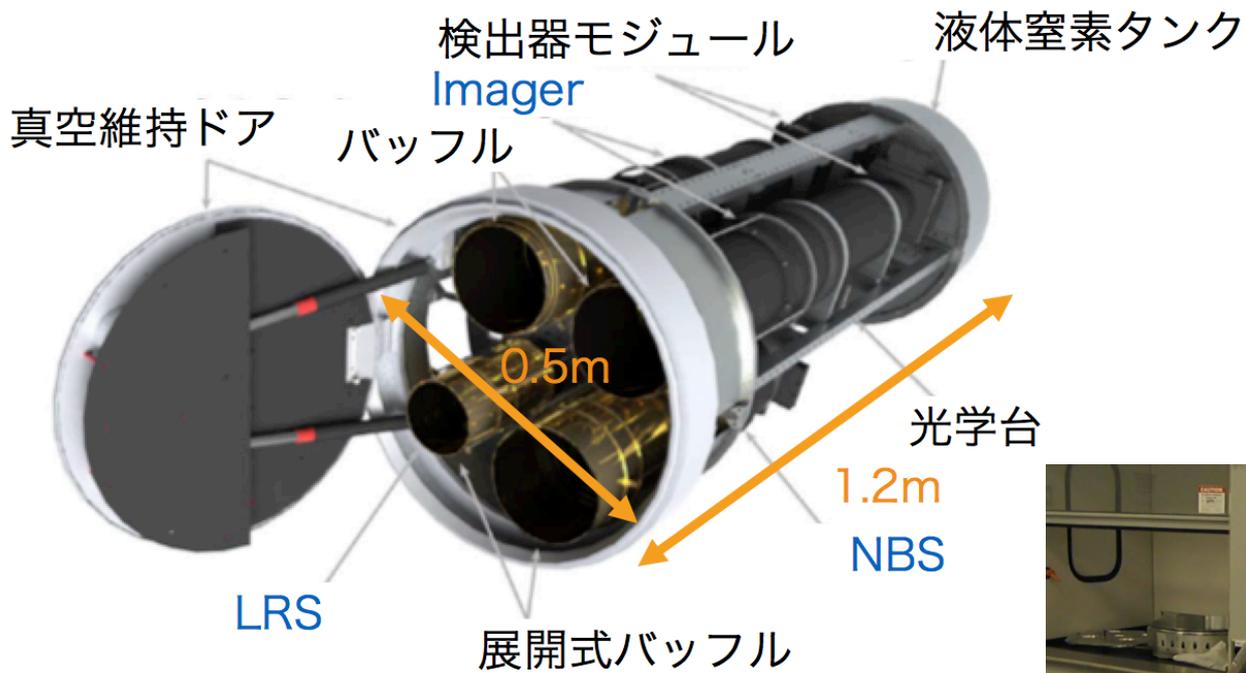
フラウンホーファー線観測による黄道光の絶対値測定

Low Resolution Spectrometer (LRS)

0.7-2.2 μm でのCIB分光観測



CIBERの観測装置



- 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。

ロケット打上げ準備

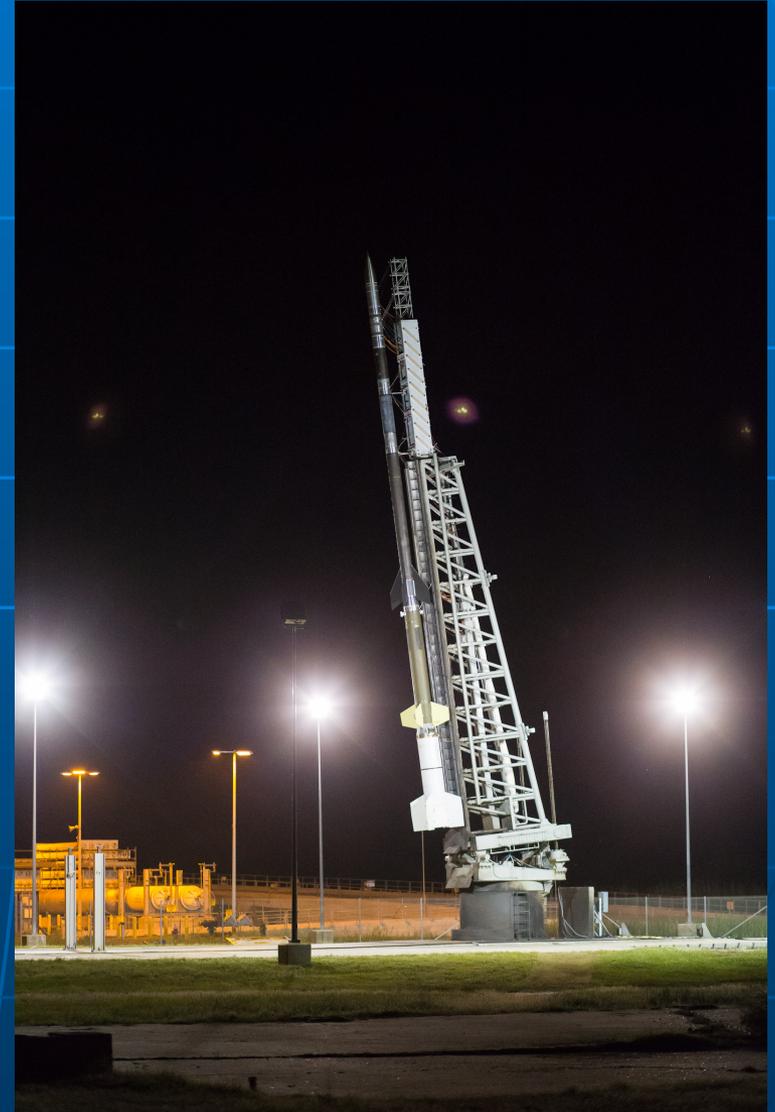


打上げ直前の様子

Launcherに取り付け時



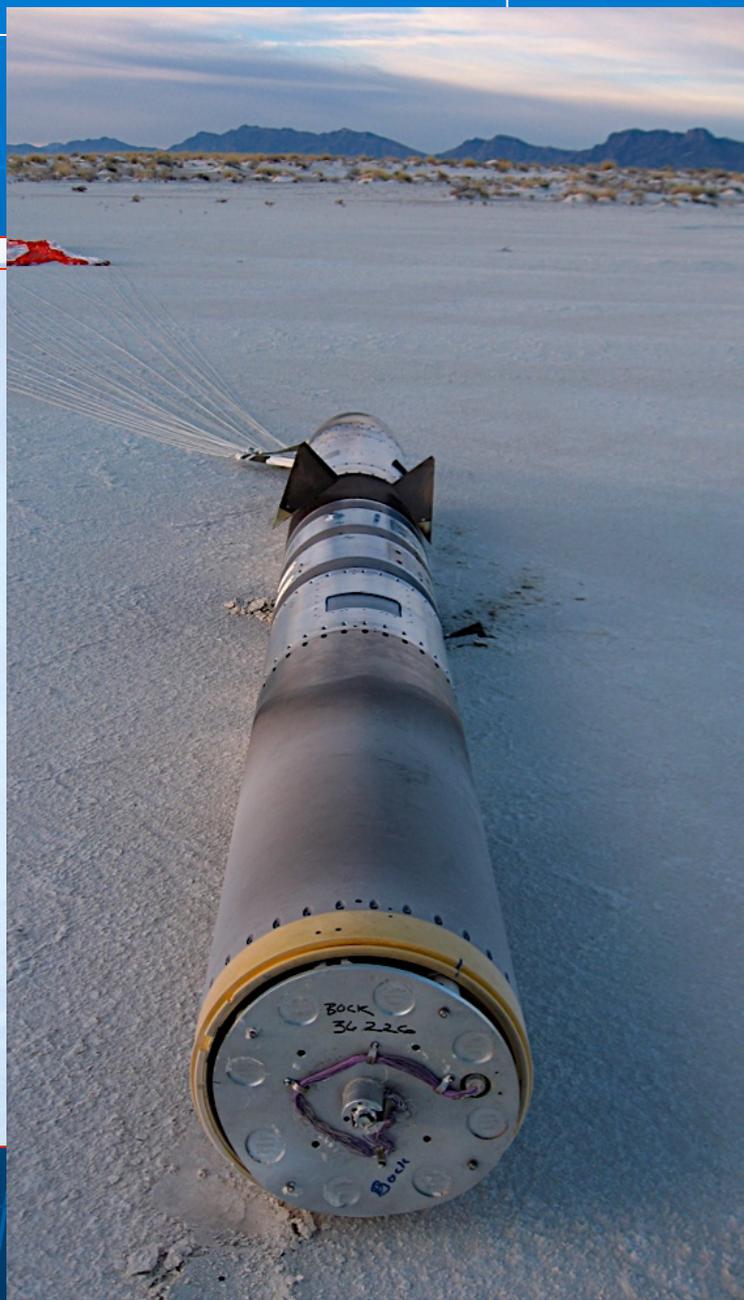
打ち上げ直前



ロケット打上げ



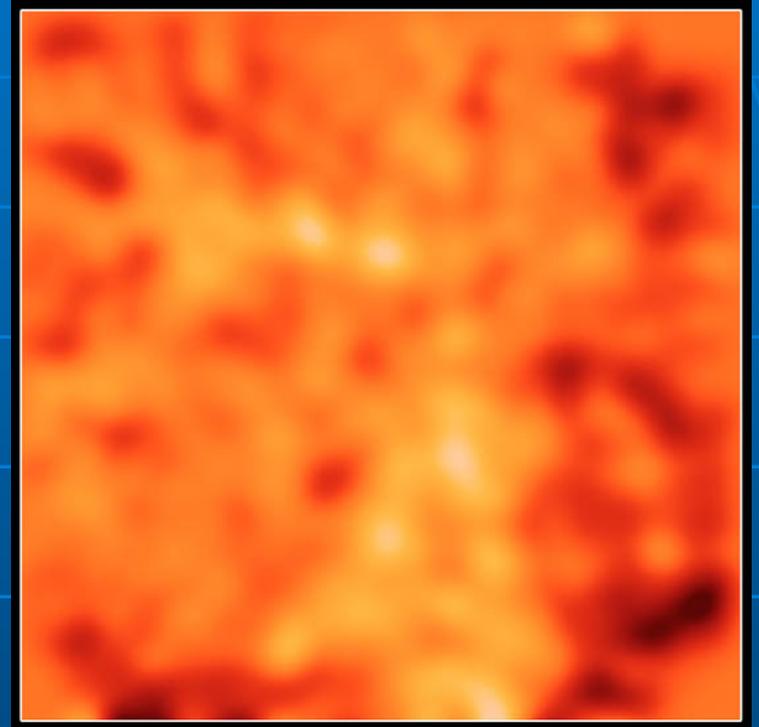
Flight → Recovery



CIBERの科学成果

- ロケット実験CIBERにより宇宙赤外線背景放射の大きな「ゆらぎ=まだら模様」を捉えた.
- 画像解析の結果, 系外銀河のハロー領域に, これまでの予想の約10倍も多い星々が存在することを示した.
- 2014年11月7月付けのScienceに掲載
- 記者会見&プレスリリース

JAXA, Tohoku Univ., NASA JPL/Caltech



CIBER赤外線カメラの視野 = 2度

宇宙赤外線背景放射の「まだら模様」の濃淡を示したもの. 大角度成分のみを取り出す画像処理を行なっている. 観測波長は1.1マイクロメートル.

未知の赤外線光源の候補

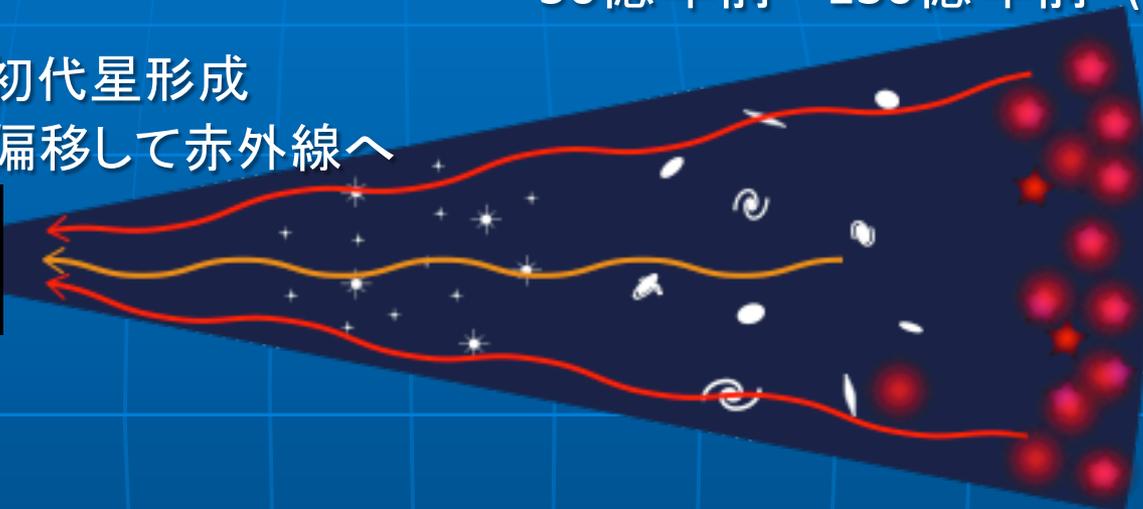
現在



138億年前

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



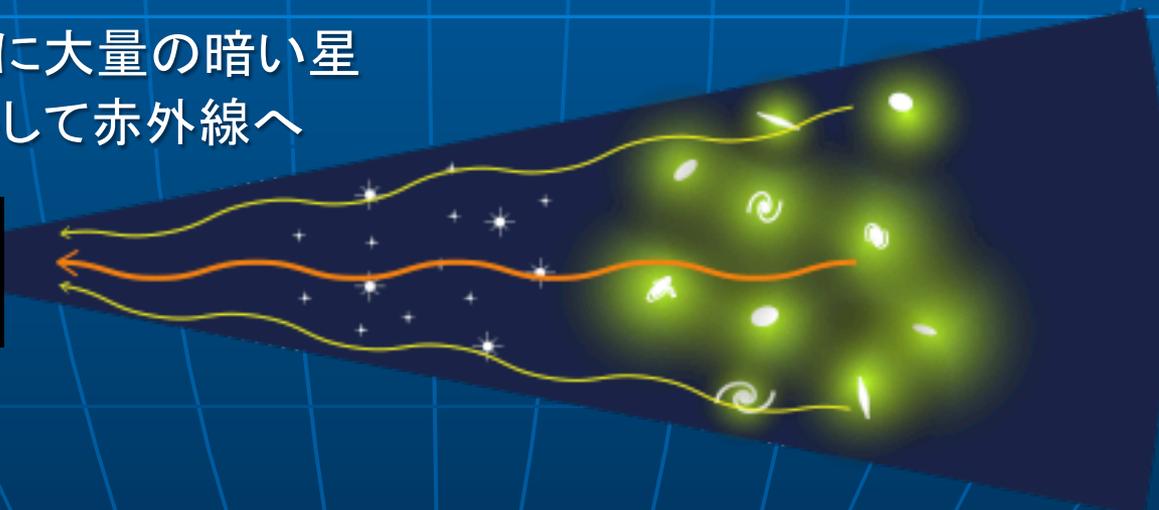
50億年前

130億年前

(宇宙誕生)

ハロー星モデル

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



ハロー星の構造形成シミュレーション

NASA JPL/Caltech



3. ガリレオ衛星食掩蔽法

Tsumura et al. 2014, Astrophysical Journal 789, 122

Jupiter + Ganymede (JHK)
Subaru IRCS+AO188
2012/Jul./21

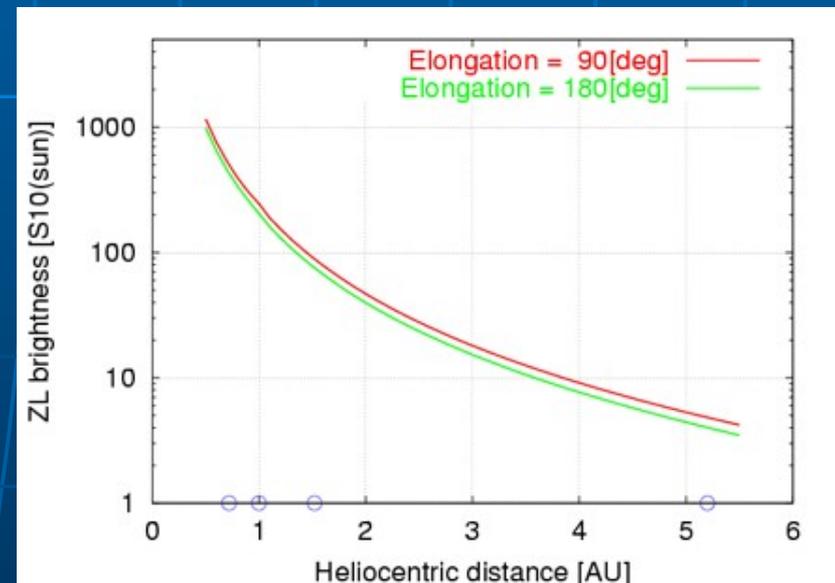
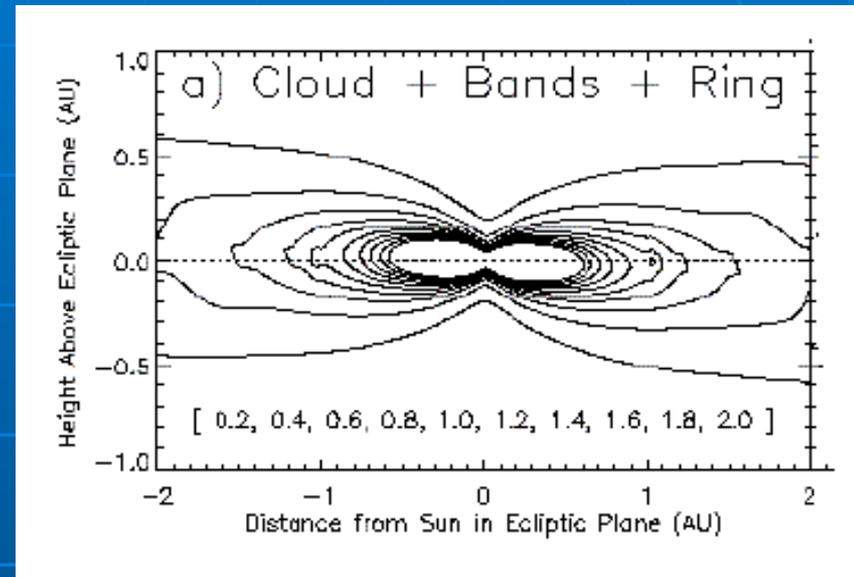


背景放射観測最大の敵 黄道光

- 5AU付近では最大の前景光である黄道光が背景放射以下の輝度に

木星からの直接観測！

- ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群探査機搭載 EXZIT(2020年代後半)
- ガリレオ衛星食掩蔽法



ガリレオ衛星食掩蔽法

- 黄道光不定性によらないEBL観測

- 木星のガリレオ衛星の食を観測

- ・ イオ: 火山活動

- ・ エウロパ

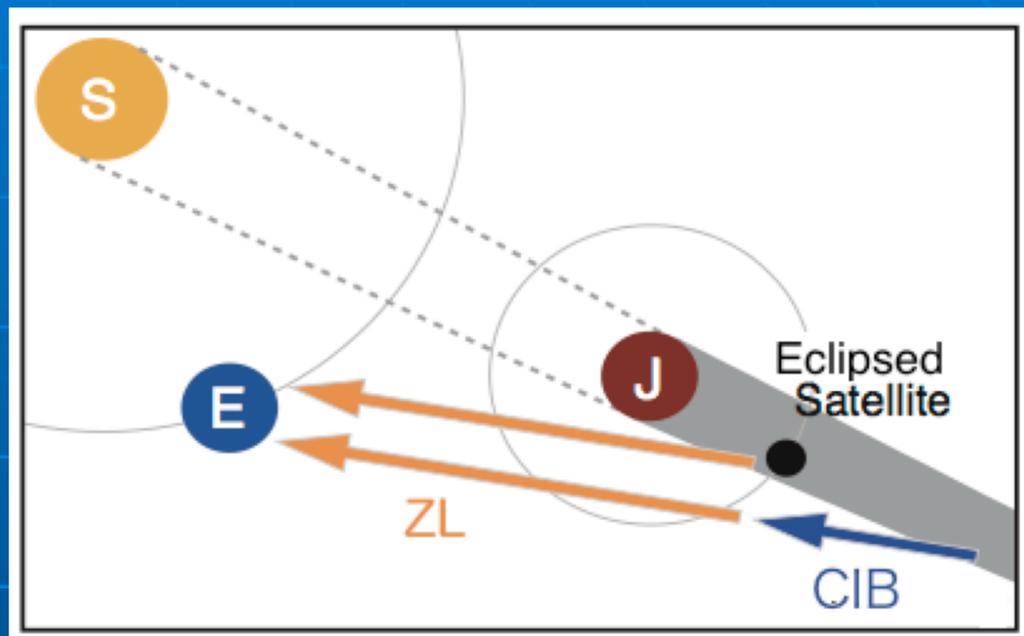
- ・ ガニメデ

- ・ カリスト

- 他の衛星系は?

- ・ 火星: まだ惑星間塵の中のため不適

- ・ 土星以遠: 食がまれなため観測不可能



Satellite in eclipse

ZL

Surrounding sky

ZL+CIB

例)すばるでの観測

Europa ingress

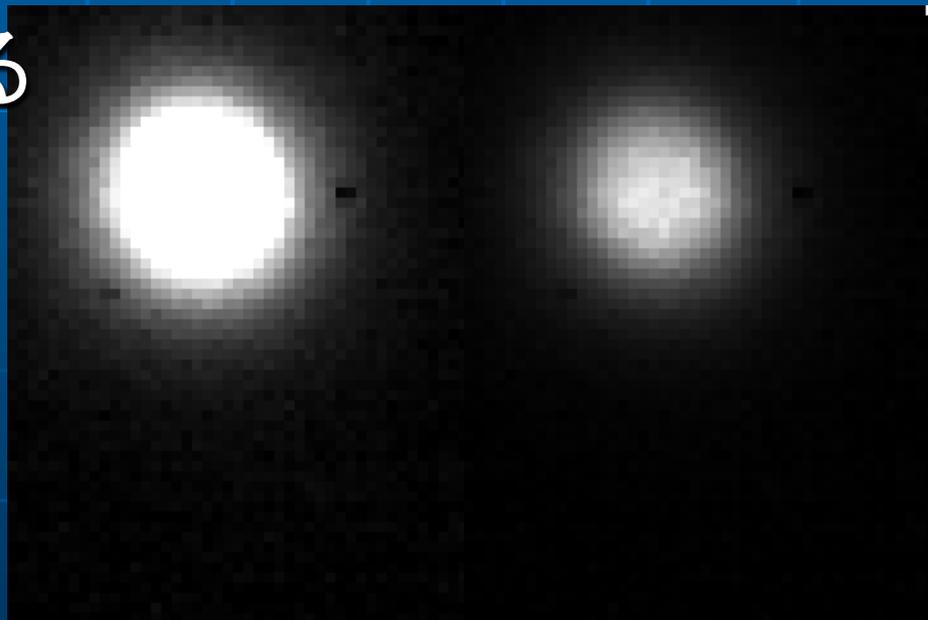
Subaru IRCS+AO188 (J-band)

2012/Jul./21

- IRCS imaging + AO188
- 右の図はエウロパの食開始時の様子
- 木星の陰に入ると急激に暗くなる
- 影のエッジの様子も見える (エウロパが半月状に)
- 完全に影の中に入った衛星を測光する

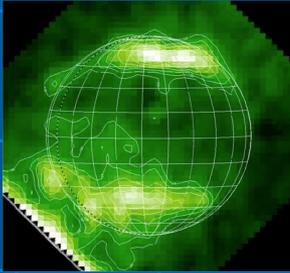
Europa

Ganymede



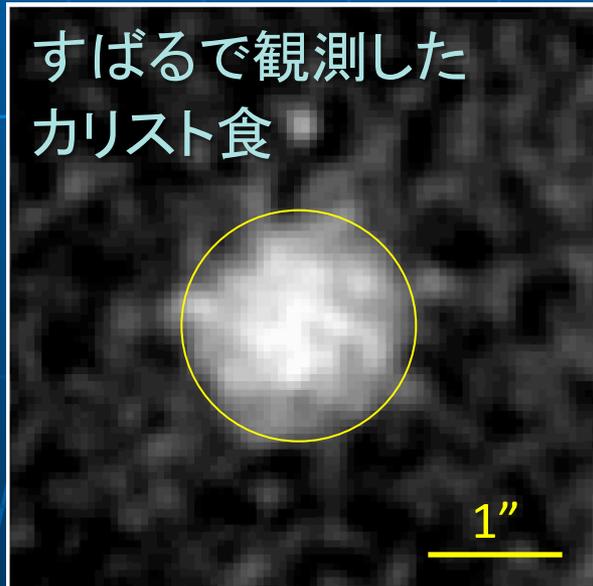
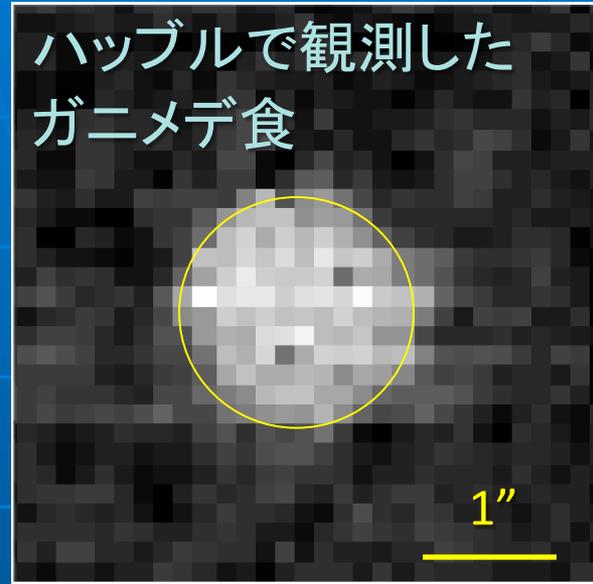
観測結果

- ・ 予想に反してガニメデとカリストが木星の影中で明るく観測された
 - 通常の状態の 10^{-6} の明るさ
 - 明るさは一様(全体的に光っている)



ガニメデにおけるオーロラ現象
McGrath et al. (2013)

- ・ 高感度のすばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡による観測から、初めて発見した新現象
- ・ 研究主目的とは異なる副産物



すばる望遠鏡 プレスリリース

- 2014年6月18日にすばる望遠鏡からプレスリリース・記者会見をしていた。
- 日経サイエンス2014年9月号等にも掲載



動画：研究代表者の津村耕司さん（東北大学 学際科学フロンティア研究所）による解説。（2014年6月18日撮影）（クレジット：国立天文台）

すばる望遠鏡
National Astronomical Observatory of Japan

ホーム > 観測成果 > 2014年

文字サイズの変更 小 中 大

観測成果

ツイート この記事印刷する

観測成果

- 2014年
- 2013年
- 2012年
- 2011年
- 2010年
- 2009年
- 2008年
- 2007年
- 2006年
- 2005年
- 2004年
- 2003年
- 2002年
- 2001年
- 2000年
- 1999年

観測成果

ガリレオ衛星が「月食」中に謎の発光？ すばる望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡で観測

2014年6月18日

東北大学、JAXA 宇宙科学研究所、国立天文台などの研究者を中心とする研究チームは、すばる望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測から、ガリレオ衛星（木星の周りを回る4大衛星：内側からイオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト）が、木星の影に入り太陽光に直接照らされていない「食」の状態にも関わらず、わずか（通常の100万分の1程度）に輝いているという現象を発見しました（[図1](#)）。詳しい原因ははっきりとは解明されていませんが、研究チームは、木星の上層大気に存在する「ちや」で散乱された太陽光が、ガリレオ衛星を間接的に照らしているのではないかと考えています（[注1](#)）。これは、月が地球の影に完全に隠れてしまう皆既月食の時でも月が赤く光るのと似た現象です。今後この現象を継続的に調べることで、これまで観測が難しかった木星の「ちや」の性質に迫れるだけでなく、近年数多く発見されている太陽系外の惑星の大気についても新たな知見が得られると期待されます。（[研究代表者による解説動画](#)）

食中のガニメデ(すばる望遠鏡) 食中のガニメデ(ハッブル宇宙望遠鏡)

食中のカリスト(すばる望遠鏡)

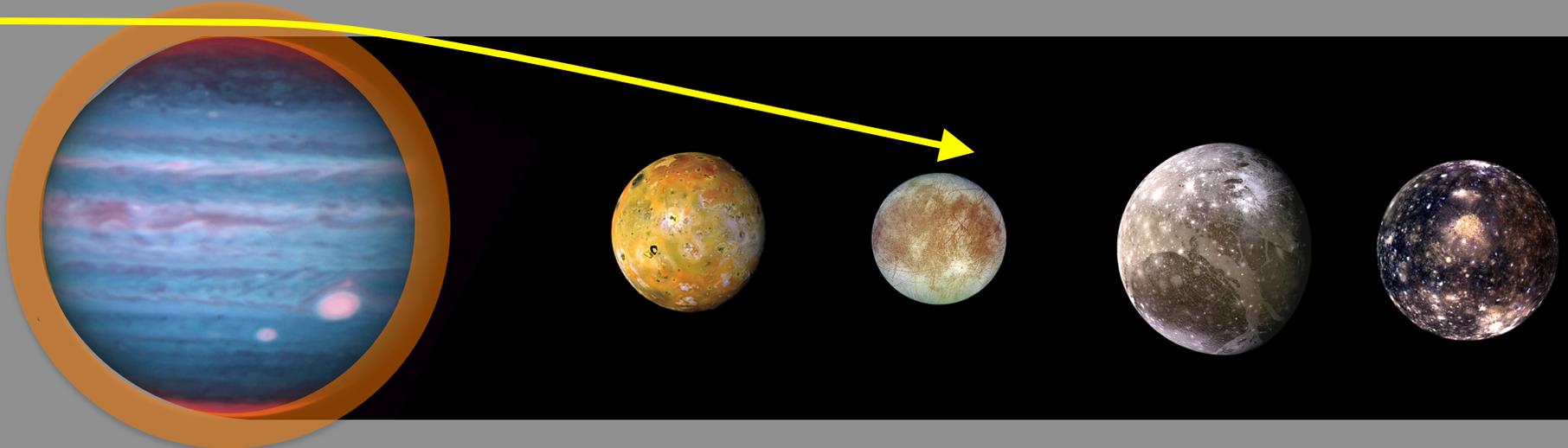
図1：食中にも発光が観測された木星の衛星ガニメデ（上段）およびカリスト（下段）の赤外線画像。左はすばる望遠鏡、右はハッブル宇宙望遠鏡の観測で得られたもの。各画像の視野は4秒角四方。黒丸は各衛星の観測時の視直径を示します（[文字・記号が入っていないバージョン](#)）。また、エウロパが木星の影の中に入り、「食」の状態になる様子をすばる望遠鏡が撮影したムービーが[こちら](#)（上から順にエウロパ、ガニメデ、木星が写っています）。（クレジット：国立天文台/JAXA/東北大学）

検討した仮説

木星大気による屈折 (月食でも月が赤く光るのと同じ)

- 屈折だけを考えると、ガリレオ衛星食はもっと明るくなるはず (観測とあわない)

大気(気体)による屈折



検討した仮説

木星大気による屈折 ×

- 屈折だけを考えると、ガリレオ衛星食はもっと明るくなるはず
- 「雲」による吸収を考える必要がある
(ここまでは1980年代の研究で示唆されていた)

「雲」(固体の微粒子)による吸収



検討した仮説

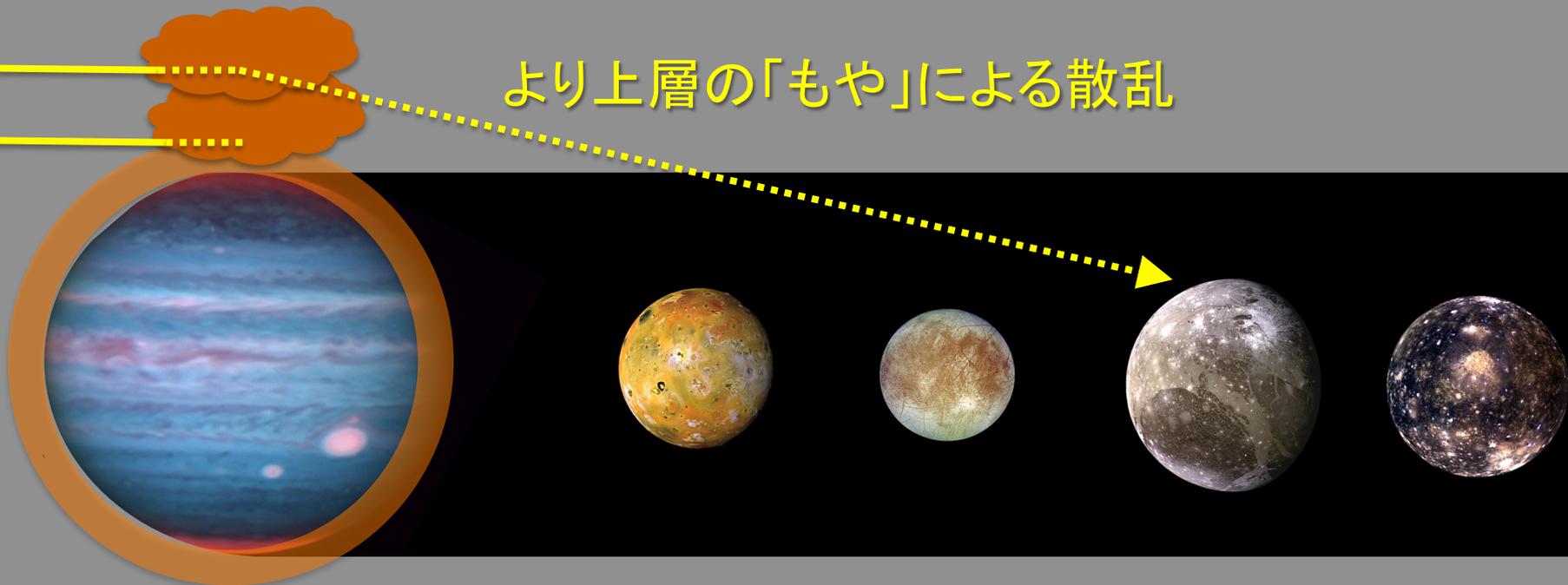
木星大気による屈折 ×

- 屈折だけを考えると、ガリレオ衛星食はもっと明るくなるはず
- 「雲」による吸収を考える必要がある

より上層大気での「もや」による散乱 ○

(今回の新発見: より上層に存在する「もや」を初めて観測的に示唆)

より上層の「もや」による散乱

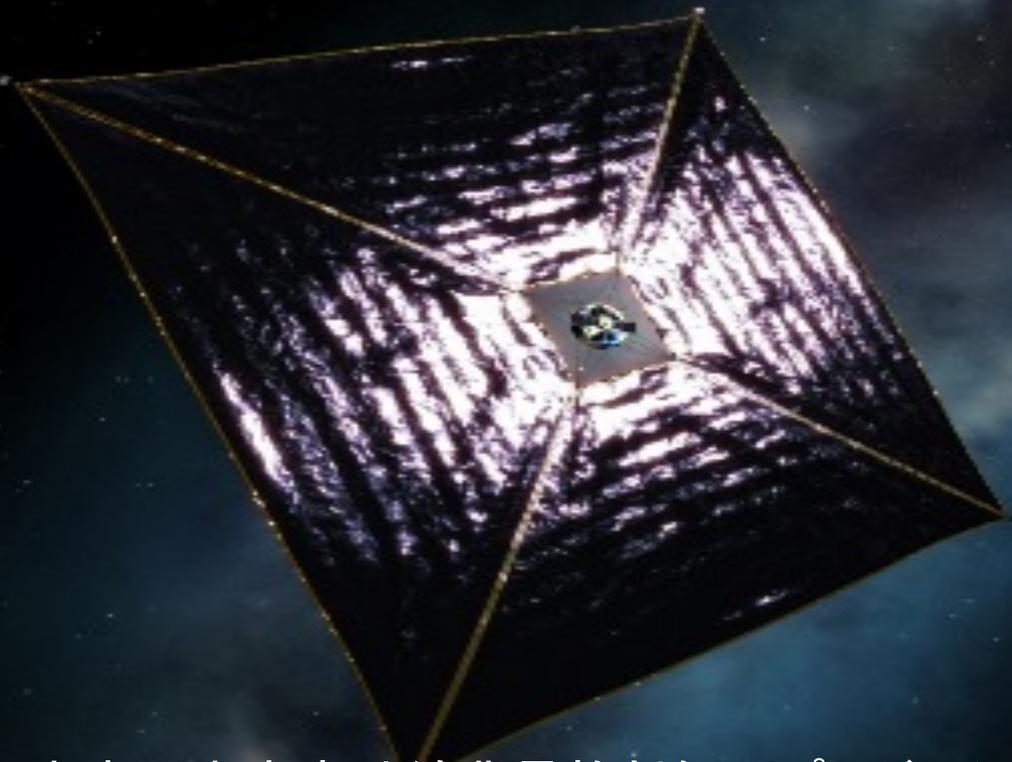
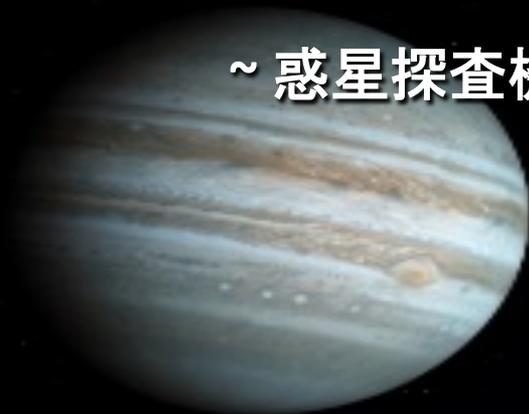


4. 将来のEBL観測

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

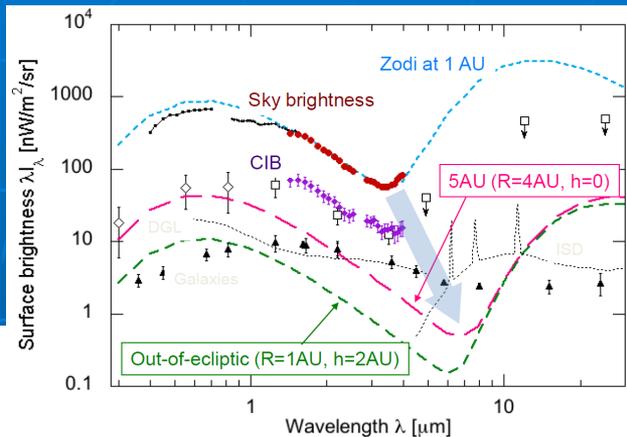
http://www.ir.isas.jaxa.jp/~matsuura/darkage/index_da.html

文科省サイエンスカフェ「目指せ木星」

<http://www.ustream.tv/recorded/21982305>

より良い環境をもとめて

太陽系内のチリが観測の邪魔をしている
惑星探査機を用いてチリのない深宇宙から観測



サンプルリターン

トロヤ群小惑星
ランデブー観測



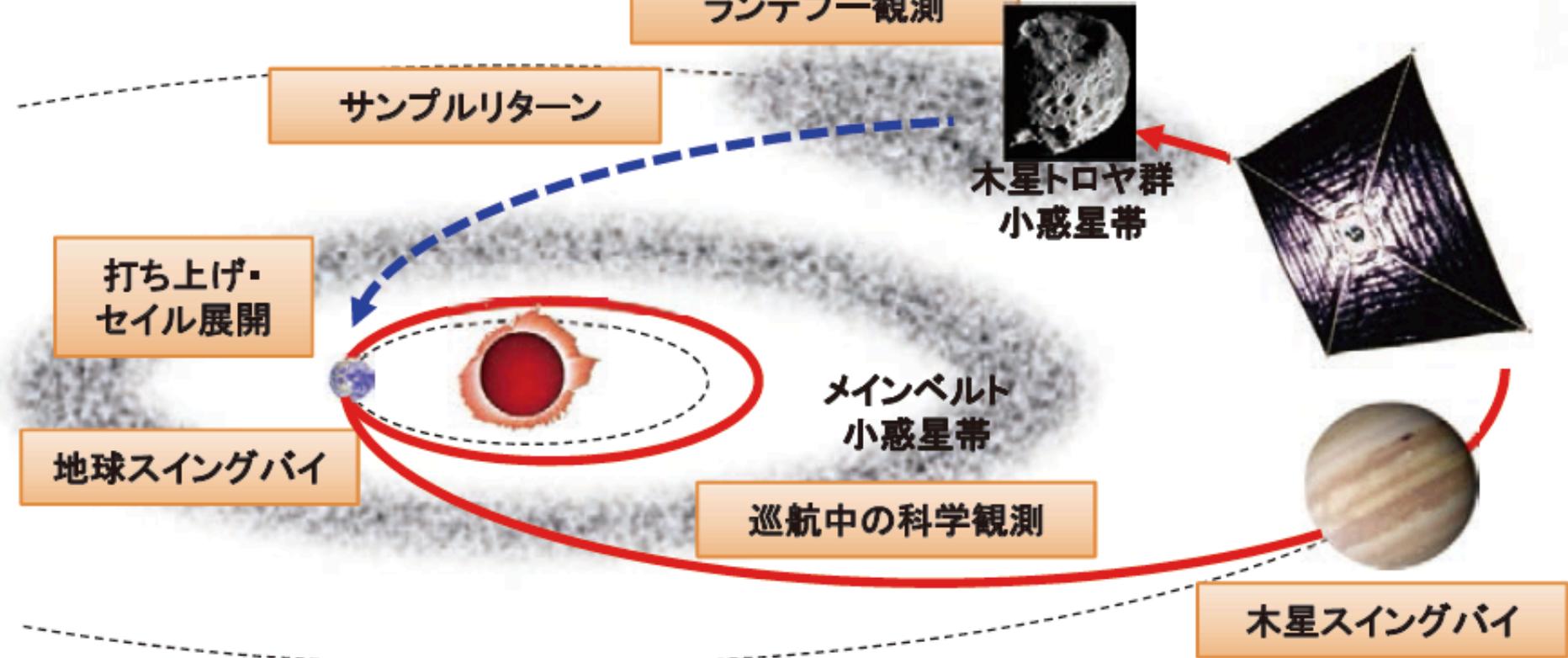
打ち上げ・
セイル展開

メインベルト
小惑星帯

地球スイングバイ

巡航中の科学観測

木星スイングバイ



まとめ

- 赤外線で「背景放射＝宇宙の明るさ」を測定
 - 大型望遠鏡でさえ見えない暗い天体からの光を、まとめて観測する
 - 「あかり」やCIBERの観測から、既知の星や銀河では説明できない背景放射を観測
 - **宇宙の未知の赤外線光源**
- 最大の邪魔もの(太陽系からの明るさ＝黄道光)に邪魔されない観測を検討中
 - ガリレオ衛星を用いた掩蔽
 - 惑星探査機を用いて木星軌道からの観測