ガンマ線天文学 〜日本の戦略〜 東大宇宙線研 2010年11月17日

# 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 *r* = 0.089±0.030

→ z<sub>rion</sub>〜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、<mark>第一世代星</mark>

#### 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<sup>5</sup> K
  - → 大量の紫外線
  - → バリオンの10<sup>-5</sup>が星になれば 宇宙全体の電離可能
- 再結合輝線ヘエネルギー転化
   → Ly-α 1216Å
   HeII 1640Å
- z >10 ならば近赤外波長で観測





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 ~10?

 $\diamond$ 

 $\diamond$ 

 $\diamond$ 

Ļ

7500 $7500$ $8000$ $8500$ $9000$ $9500$ $148+5251$ $z=6.42$ $a$		$\lambda$ (Å)
140+3231 = 2-0.42 $1030+0524 = 2-6.28$ $1623+3112 = 6.22$ $1048+4637 = 6.20$ $250+3130 = 6.13$ $1602+4228 = 6.07$ $137+3549 = 6.01$ $137+3549 = 6.01$ $137+3549 = 6.01$ $137+3549 = 6.01$ $137+3549 = 2-6.01$ $137+364 = 2-6.01$	7000 7500	8000 8500 9000 9500
$\begin{array}{c} 030+0524 \ z=6.28 \\ 623+3112 \ z=6.22 \\ 048+4637 \ z=6.20 \\ 250+3130 \ z=6.13 \\ 602+4228 \ z=6.07 \\ 630+4012 \ z=6.05 \\ 137+3549 \ z=6.01 \\ 0818+1722 \ z=6.00 \\ 306+0356 \ z=5.99 \\ 335+3533 \ z=5.95 \\ 411+1217 \ z=5.93 \\ 840+5624 \ z=5.85 \\ 0005-0006 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.83 \\ 836+0054 \ z=5.82 \\ 0002+2550 \ z=5.80 \\ 927+2001 \ z=5.79 \\ 044-0125 \ z=5.74 \\ \end{array}$	1148+5251 z=6.42	M Therease
$\begin{array}{c} 623+3112 \ z=6.22 \\ 048+4637 \ z=6.20 \\ 250+3130 \ z=6.13 \\ 602+4228 \ z=6.07 \\ 630+4012 \ z=6.05 \\ 137+3549 \ z=6.01 \\ 3818+1722 \ z=6.00 \\ 306+0356 \ z=5.99 \\ 335+3533 \ z=5.95 \\ 411+1217 \ z=5.93 \\ 840+5624 \ z=5.85 \\ 136+0054 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.83 \\ 136+0054 \ z=5.80 \\ 927+2001 \ z=5.79 \\ 1414+0125 \ z=5.74 \\ 1414+0125 \ z=5.$	1030+0524 z=6.28	M~~~
$\begin{array}{c} 048+4637 \ z=6.20 \\ 250+3130 \ z=6.13 \\ 6d2+4228 \ z=6.07 \\ 630+4012 \ z=6.05 \\ 137+3549 \ z=6.01 \\ 306+0356 \ z=5.99 \\ 335+3533 \ z=5.95 \\ 411+1217 \ z=5.93 \\ 840+5624 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.83 \\ 636+0054 \ z=5.82 \\ 0002+2550 \ z=5.80 \\ 0002+2550 \ z=5.79 \\ 044-0125 \ z=5.74 \\ \end{array}$	1623+3112 z=6.22	M
$\begin{array}{c} 0.48 \pm 4037 \ 2 = 0.20 \\ 250 \pm 3130 \ z = 6.13 \\ 602 \pm 4228 \ z = 6.07 \\ 630 \pm 4012 \ z = 6.05 \\ 137 \pm 3549 \ z = 6.01 \\ 306 \pm 0.356 \ z = 5.99 \\ 335 \pm 3533 \ z = 5.95 \\ 411 \pm 1217 \ z = 5.93 \\ 840 \pm 5624 \ z = 5.85 \\ 436 \pm 5007 \ z = 5.83 \\ 836 \pm 0.054 \ z = 5.82 \\ 0002 \pm 2550 \ z = 5.80 \\ 0002 \pm 2550 \ z = 5.79 \\ 044 - 0.125 \ z = 5.74 \\ \end{array}$	1048+4637 == 6 20	
250+3130 z=6.13 $602+4228 z=6.07$ $630+4012 z=6.05$ $137+3549 z=6.01$ $306+0356 z=5.99$ $335+3533 z=5.95$ $411+1217 z=5.93$ $840+5624 z=5.85$ $436+5007 z=5.83$ $836+0054 z=5.82$ $927+2001 z=5.79$ $944-0125 z=5.74$		munimum have a second second
$\begin{array}{c} 602 \pm 4228 \ z = 6.07 \\ \hline \\ 137 \pm 3549 \ z = 6.01 \\ \hline \\ 306 \pm 0356 \ z = 5.99 \\ \hline \\ 335 \pm 3533 \ z = 5.95 \\ \hline \\ 411 \pm 1217 \ z = 5.93 \\ \hline \\ 840 \pm 5624 \ z = 5.85 \\ \hline \\ 436 \pm 5007 \ z = 5.85 \\ \hline \\ 436 \pm 5007 \ z = 5.80 \\ \hline \\ 927 \pm 2001 \ z = 5.79 \\ \hline \\ 044 - 0125 \ z = 5.74 \\ \hline \\ \end{array}$	1250+3130 z=6.13	Man and a start and a start a
630+4012 z=6.05 137+3549 z=6.01 306+0356 z=5.99 335+3533 z=5.95 411+1217 z=5.93 840+5624 z=5.85 436+5007 z=5.85 436+5007 z=5.83 436+5007 z=5.83 436+5007 z=5.84 436+5007 z=5.74 436+5007 z=5.74	1602+4228 z=6.07	Annual and a second
137+3549 z=6.01 $818+1722 z=6.00$ $336+0356 z=5.99$ $335+3533 z=5.95$ $411+1217 z=5.93$ $840+5624 z=5.85$ $436+5007 z=5.83$ $436+5007 z=5.83$ $636+0054 z=5.82$ $136+0054 z$	1630+4012 z=6.05	
137+3349     2=0.01       1818+1722     z=6.00       336+0356     z=5.99       335+3533     z=5.95       411+1217     z=5.93       1840+5624     z=5.85       1840+5624     z=5.85       1840+5624     z=5.85       1836+0006     z=5.83       1836+0054     z=5.82       1927+2001     z=5.79       194-0125     z=5.74	1137,3540,6.01	man man and and a second and a
$\begin{array}{c} 818 + 1722 \ z = 6.00 \\ \hline 306 + 0356 \ z = 5.99 \\ \hline 335 + 3533 \ z = 5.95 \\ \hline 411 + 1217 \ z = 5.93 \\ \hline 840 + 5624 \ z = 5.85 \\ \hline 1366 + 5007 \ z = 5.85 \\ \hline 436 + 5007 \ z = 5.83 \\ \hline 836 + 0054 \ z = 5.82 \\ \hline 1002 + 2550 \ z = 5.80 \\ \hline 1002 + 2550 \ z = 5.74 \\ \hline 1004 - 0125 \ z = 5.7$	1157+3549 2=0.01	Man and a second s
306+0356 z=5.99 $335+3533 z=5.95$ $411+1217 z=5.93$ $840+5624 z=5.85$ $436+5007 z=5.83$ $336+0054 z=5.82$ $326+0054 z=5.82$ $326+0054 z=5.80$ $327+2001 z=5.79$ $340+0125 z=5.74$	0818+1722 z=6.00	Manuf Manuf Manuf Manuf Manuf Manuf
$\begin{array}{c} 335+3533 \ z=5.95 \\ 411+1217 \ z=5.93 \\ 840+5624 \ z=5.85 \\ 0005-0006 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.83 \\ 0002+2550 \ z=5.80 \\ 0002+2550 \ z=5.79 \\ 004-0125 \ z=5.74 \\ \end{array}$	1306+0356 z=5.99	
411+1217       z=5.93         1840+5624       z=5.85         136+5007       z=5.85         436+5007       z=5.83         0836+0054       z=5.82         0002+2550       z=5.80         0927+2001       z=5.79         044-0125       z=5.74	1335+3533 z=5.95	
$\begin{array}{c} 411+1217 \ z=5.93 \\ 840+5624 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.83 \\ 0002+2550 \ z=5.80 \\ 0002+2550 \ z=5.80 \\ 0002+2550 \ z=5.79 \\ 044-0125 \ z=5.74 \\ 044-0125 \ z=5.7$	mannen	and the second s
$\begin{array}{c} 840+5624 \ z=5.85 \\ 436+5007 \ z=5.83 \\ 836+0054 \ z=5.82 \\ 0002+2550 \ z=5.80 \\ 927+2001 \ z=5.79 \\ 044-0125 \ z=5.74 \\ \end{array}$	1411+1217 z=5.93	m m
$\begin{array}{c} & & & & & & & & & & & & & & & & & & &$	0840+5624 z=5.85	morn danced and marked and a roberty
436+5007 z=5.83 2836+0054 z=5.82 2002+2550 z=5.80 2927+2001 z=5.79 1044-0125 z=5.74	0005-0006 z=5.85	V V V V V V V V V V V V V V V V V V V
$\frac{436+5007}{2=5.82}$ $\frac{836+0054}{2=5.82}$ $\frac{10002+2550}{2=5.80}$ $\frac{10002+2550}{2=5.79}$ $\frac{10002+2550}{2=5.74}$		
0002+2550 z=5.80	1430+3007 2=3.83 	Mary Manunder of the many Mary Mary Mary
002+2550 z=5.80 0927+2001 z=5.79 044-0125 z=5.74 044-0125 z=5.74	0836+0054 z=5.82	
0927+2001 z=5.79	0002+2550 z=5.80	
044-0125 z=5.74	0927+2001 z=5.79	Markel
044-0125 z=5.74	and the share and the second state of the seco	where a second share and share a second share a sec
	1044-0125 z=5.74	Mar war war war war war war war war war w
7000 7500 8000 8500 9000 9500	7000 7500	8000 8500 9000 9500
		Ean at al An I 2004 2

HUDF: Hubble Ultra-Deep Field



### z~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<mark>超過成分</mark>



#### TeVガンマ線の銀河間吸収によるCIBの測定





■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  $\rightarrow$  O : 矛盾がない

![](_page_8_Figure_3.jpeg)

Aharonian et al., Nature, 440, 1018 (2006)

#### 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
 Γ < 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</li>

![](_page_9_Figure_2.jpeg)

Kneiske & Dole, 2010

## 超過成分は本当に銀河系外起源か?

![](_page_10_Figure_1.jpeg)

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1µm付近の観測なし

![](_page_11_Figure_4.jpeg)

### 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 ΔI/I~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

![](_page_12_Figure_4.jpeg)

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

![](_page_13_Figure_4.jpeg)

IRTSやCOBEよりもはるかに高い角分解能が必要

### **Space Infrared Telescopes**

![](_page_14_Picture_1.jpeg)

Launch: 2004 Telescope: 85cm¢ Wavelength: 3.5-200µm Pointed observations

![](_page_14_Picture_3.jpeg)

Launch: 2006 Telescope: 68.5cm¢ Wavelength: 3.5-200µm All-sky survey

![](_page_15_Picture_0.jpeg)

# 我々は目標に近づいている

![](_page_16_Figure_1.jpeg)

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*~10 *Ly*-αピーク(1µm)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, λ/∆λ~20)
- フラウンホーファー線(狭帯域フィルタ分光, λ/Δλ=1200)

![](_page_17_Figure_4.jpeg)

![](_page_17_Picture_5.jpeg)

#### 宇宙赤外線背景放射観測ロケット実験CIBER

![](_page_18_Picture_1.jpeg)

## 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

![](_page_19_Picture_4.jpeg)

![](_page_19_Picture_5.jpeg)

## **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)

![](_page_20_Figure_3.jpeg)

#### 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

![](_page_21_Picture_2.jpeg)

## 次期ロケット実験シリーズ CIBER-2

ゆらぎ振幅

Liquid Nitrogen tank

- 可視域を含むゆらぎSED詳細測定
  - 赤方偏移分布

Pop-up baffle

- 第一世代の星モデル詳細
- より高い点源感度(角分解能)

10 cm secondary

- 大口径望遠鏡(30cmφ)
- 大規模フォーマット検出器(2k x 2k)

Beam is split to

four focal planes

![](_page_22_Figure_7.jpeg)

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

Black liner on shutter door 30 cm primary Radiation shield

23

![](_page_23_Figure_0.jpeg)

![](_page_24_Figure_0.jpeg)

# 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

![](_page_25_Figure_5.jpeg)

![](_page_25_Figure_6.jpeg)

#### 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

EXT

# **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ければならない。

 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(δI/I~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。