

# 宇宙の一番星が見えてきた

—ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドで  
発見された**131億光年彼方**の銀河は一味違う—

谷口 義明<sup>1</sup>、 塩谷 泰広<sup>1</sup>、 Jon Trump<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学 宇宙進化研究センター

<sup>2</sup> アリゾナ大学 宇宙物理学教室

# 概要

ハッブル宇宙望遠鏡の深宇宙探査“ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールド”で見つかった131億光年彼方の銀河の性質を調べたところ、宇宙で最初にできた星々（第一世代星）を含む可能性が高いことがわかりました。ハッブル宇宙望遠鏡の新しい赤外線カメラのおかげで、人類は遂に誕生まもない銀河を捉えることができました。

研究グループ代表 谷口 義明

(愛媛大学 宇宙進化研究センター)

連絡先

メール: [tani@cosmos.ehime-u.ac.jp](mailto:tani@cosmos.ehime-u.ac.jp)

電話: 089-927-9579 FAX: 089-927-8430

本資料の内容及び、画像データなどは下記のウェブページで9月7日以降、閲覧・取得できます。

<http://cosmos.phys.sci.ehime-.ac.jp/Cosmos/ASJM10b>

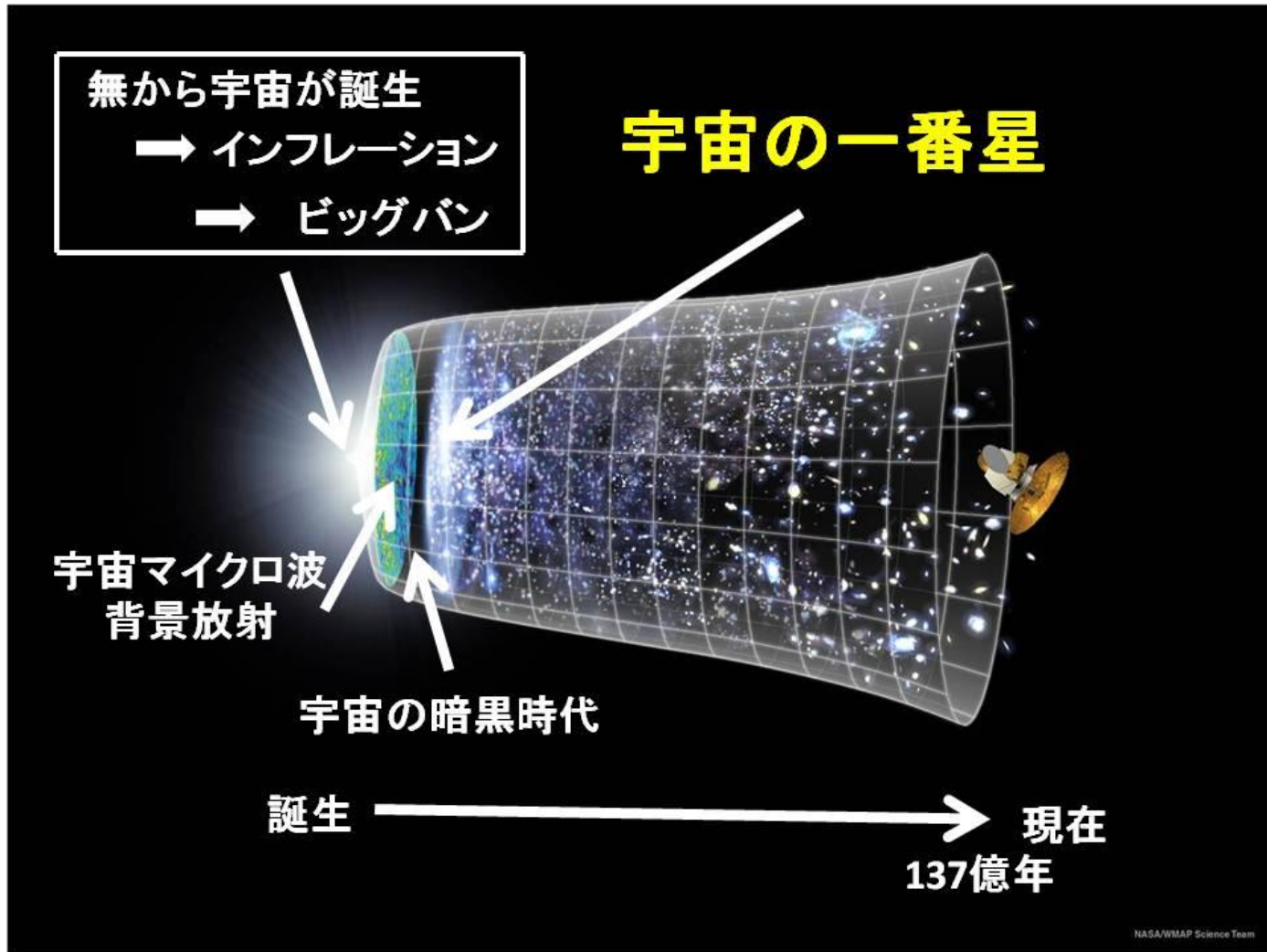
# 本年会での口頭発表

- 9月22日(水) 11:00- C会場
- 公演番号: X01a
- 講演タイトル: 「赤方偏移8の銀河による  
宇宙再電離」
- 発表者: 谷口義明(愛媛大学)

# 本資料の内容

1. 本研究の背景 — なぜ重要か？ [p6 – p10]
2. 遠方銀河探査のドラマティックな戦略変化  
— 可視光から近赤外線へ [p11 – p16]
3. ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールド  
— 史上最強の深宇宙探査 [p17 – p20]
4. 宇宙の一番星が見えてきた [p21 – p25]
5. 補足説明（補遺1-6） [p26 – p36]

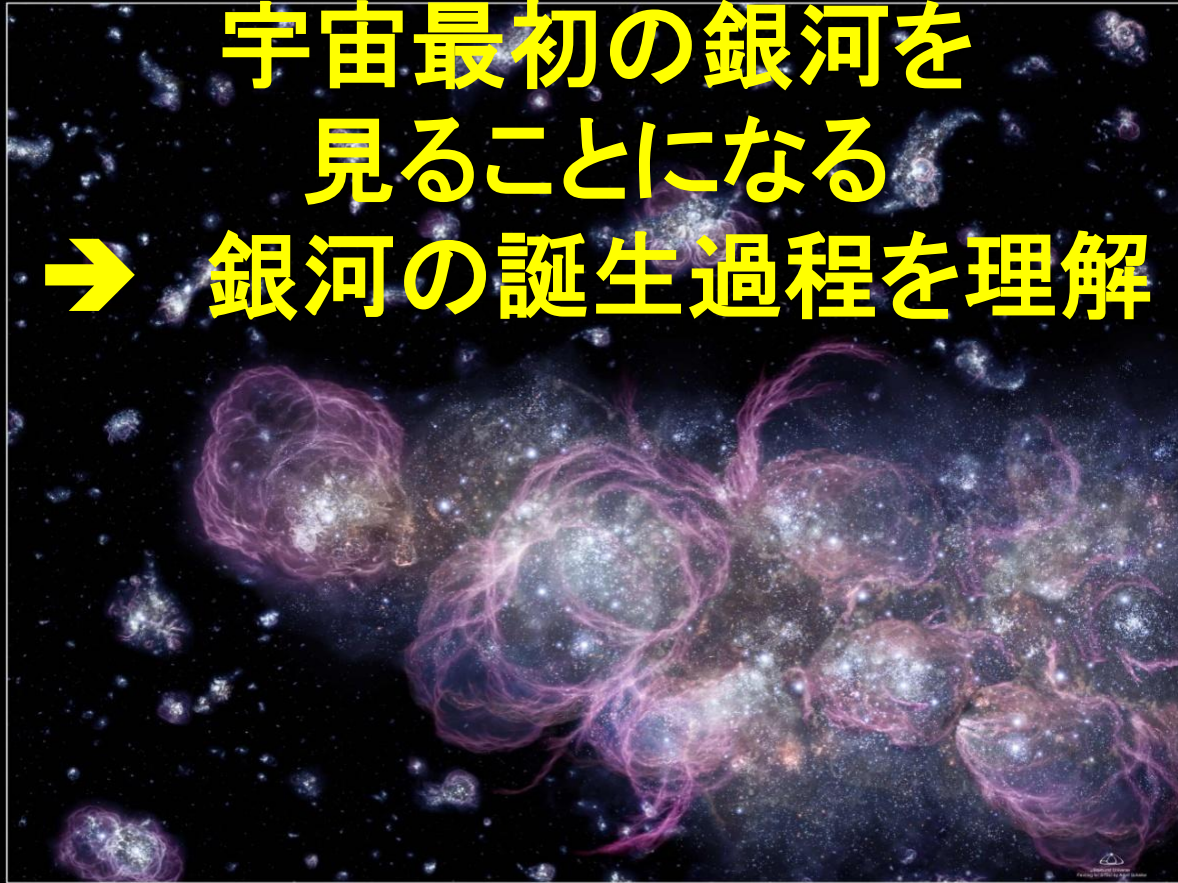
# 宇宙の一番星はいつ生まれた？



宇宙の歴史(イラスト)  
NASA/WMAP

# 宇宙の一番星はなぜ重要か？

宇宙最初の銀河を  
見ることになる  
→ 銀河の誕生過程を理解



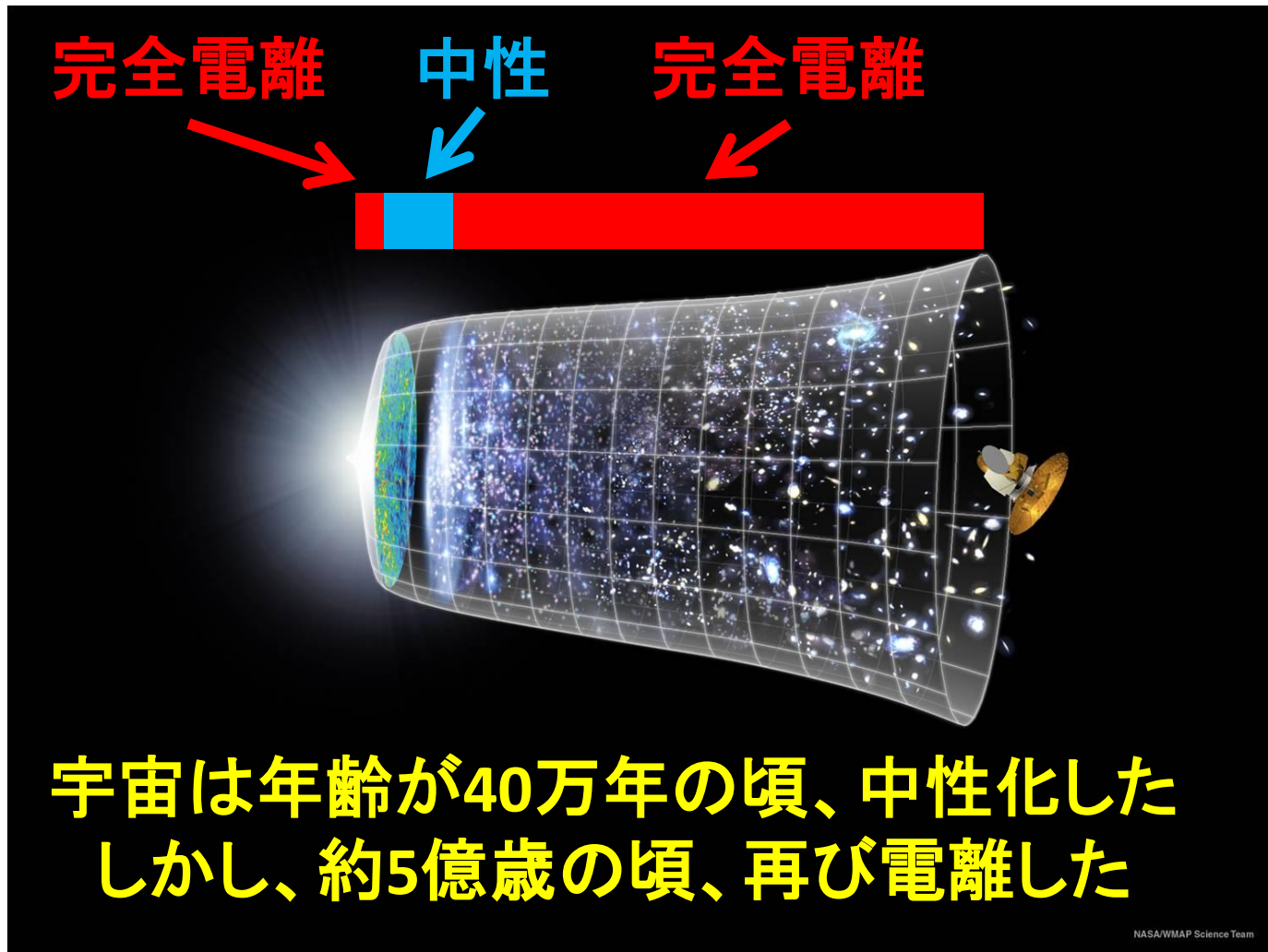
Artist's View of Star Formation in the Early Universe

Painting by Adolf Schaller • STScI-PRC02-02

宇宙の一番星が生まれている様子 (イラスト)

NASA/STScI

# 宇宙の一番星はなぜ重要か？

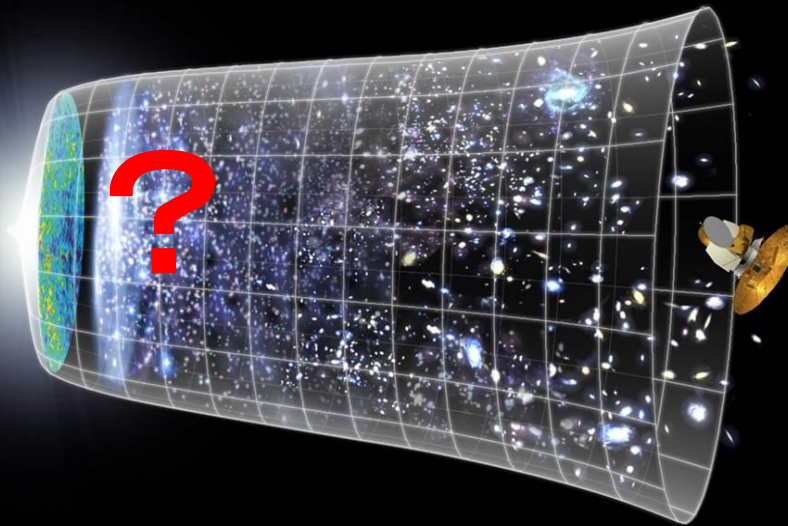


宇宙の歴史(イラスト)  
NASA/WMAP



# 宇宙の一番星はなぜ重要か？

銀河と宇宙空間の歴史がカップル？



宇宙を再電離したのは誰だ？

NASA/WMAP Science Team

宇宙の歴史(イラスト)  
NASA/WMAP

# 宇宙の一番星の秘密

ビッグバンで生成された

水素とヘリウムだけから成る星(補遺1)

→ 初代星と呼ばれる

太陽など、現在観測される星は

重元素(炭素以上の重い原子)を含む

宇宙の一番星は太陽などの星と性質が違う！

→ 未解明の物理過程を探る(補遺2)

# 遠方銀河ランキング

## —分光観測で距離が測定された銀河— (2010年8月27日現在)

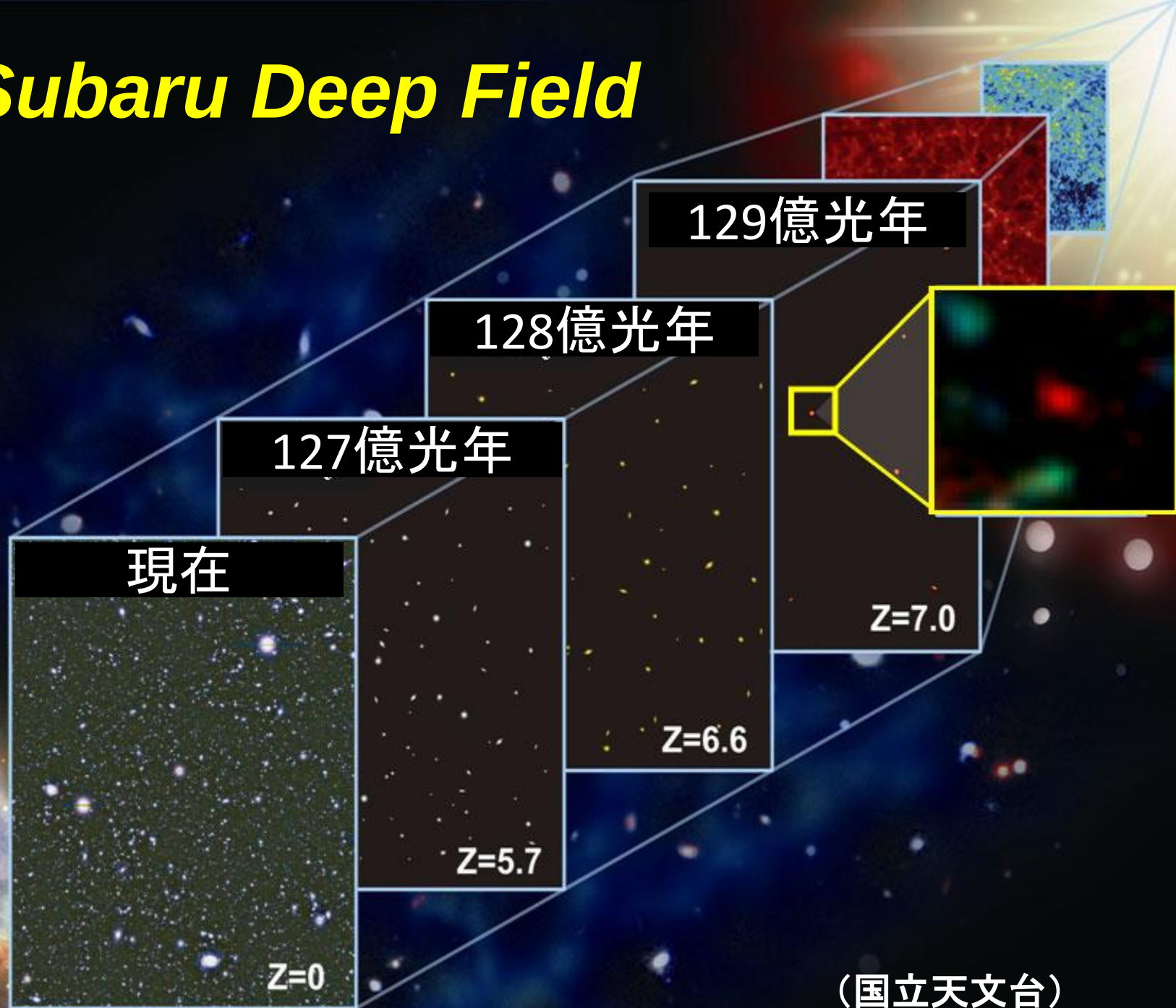
| 順位 | 銀河名                    | 赤方偏移  | ルックバック<br>タイム (億年) | 論文の著者 (発表年)                               |
|----|------------------------|-------|--------------------|-------------------------------------------|
| 1  | IOK-1                  | 6.964 | 128.8              | Iye, M., et al. (2006) <sup>¶</sup>       |
| 2  | SDF J132522.3+273520   | 6.597 | 128.2              | Taniguchi, Y., et al. (2005) <sup>†</sup> |
| 3  | SDF J132520.4+273459   | 6.596 | 128.2              | Kashikawa, N., et al. (2006) <sup>‡</sup> |
| 4  | SXDF Himiko            | 6.595 | 128.2              | Ouchi, M., et al. (2008) <sup>§</sup>     |
| 5  | SDF J132357.1+272448   | 6.589 | 128.2              | Kashikawa, N., et al. (2006) <sup>‡</sup> |
| 6  | SDF J132343.4+272954.4 | 6.587 | 128.2              | Kashikawa, N., et al. (2006) <sup>‡</sup> |
| 7  | SDF J132342.2+272644.5 | 6.587 | 128.2              | Kashikawa, N., et al. (2006) <sup>‡</sup> |
| 8  | SDF J132450.7+272159.7 | 6.587 | 128.2              | Kashikawa, N., et al. (2006) <sup>‡</sup> |
| 9  | SDF J132432.5+271647   | 6.580 | 128.2              | Taniguchi, Y., et al. (2005) <sup>†</sup> |
| 10 | SDF J132518.8+273043   | 6.578 | 128.2              | Taniguchi, Y., et al. (2005) <sup>†</sup> |

<sup>¶</sup> Iye, M., et al. 2006, Nature, 443, 186; <sup>†</sup> Taniguchi, Y., et al. 2005, PASJ, 57, 165;

<sup>‡</sup> Kashikawa, N., et al. 2006, ApJ, 648, 7; <sup>§</sup> Ouchi, M., et al. 2009, ApJ, 696, 1164.

## なんと、全て**すばる望遠鏡**の成果！

# Subaru Deep Field



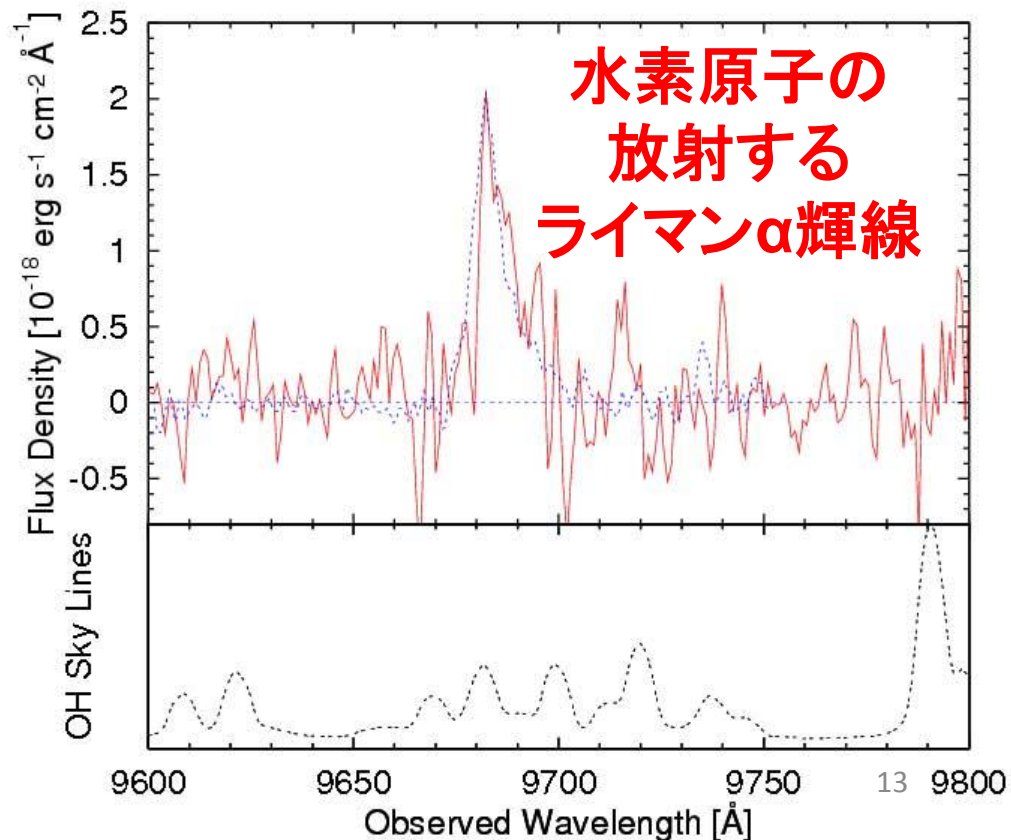
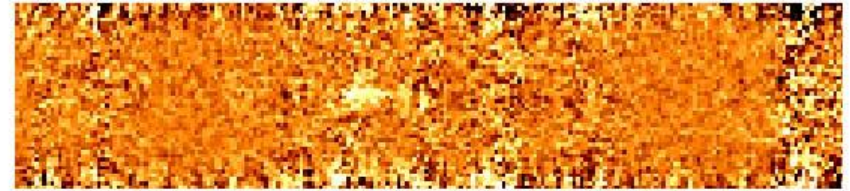
(国立天文台)



# IOK-1: 可視光の探査で見つかった 最も遠い銀河: 129億光年彼方

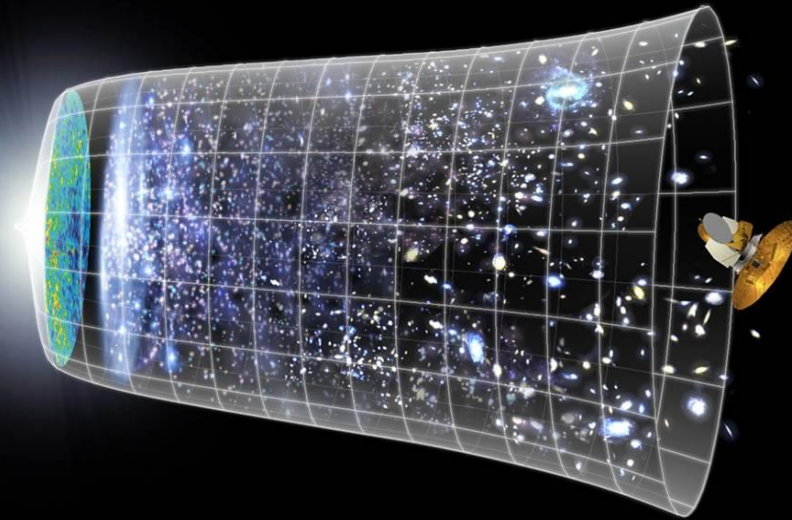


(Iye et al. 06, Nature, 443, 186)



# 宇宙の一番星はいつ生まれた？

宇宙年齢が  
1億年から数億年の頃生まれた



130億光年より  
遠い銀河を調べろ！

NASA/WMAP Science Team

宇宙の歴史(イラスト)  
NASA/WMAP

宇宙の一番星を見たければ  
130億光年より遠い銀河を探せ！

それらは可視光では見えない！

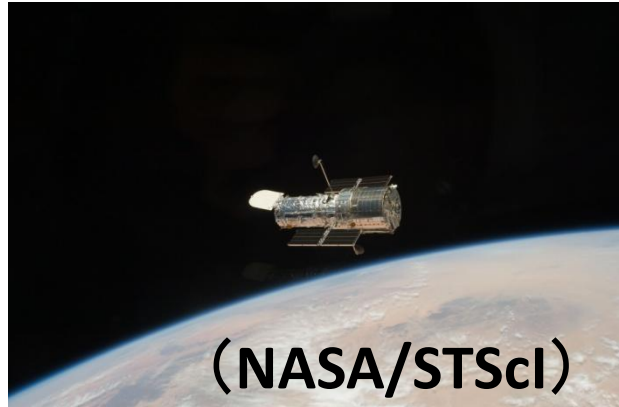
(補遺3)

赤外線を探せ！

# 130億光年より遠い銀河を 赤外線で探す



(国立天文台)



(NASA/STScI)

地上望遠鏡は不得意

- ・大気による吸収
- ・熱雑音が高い

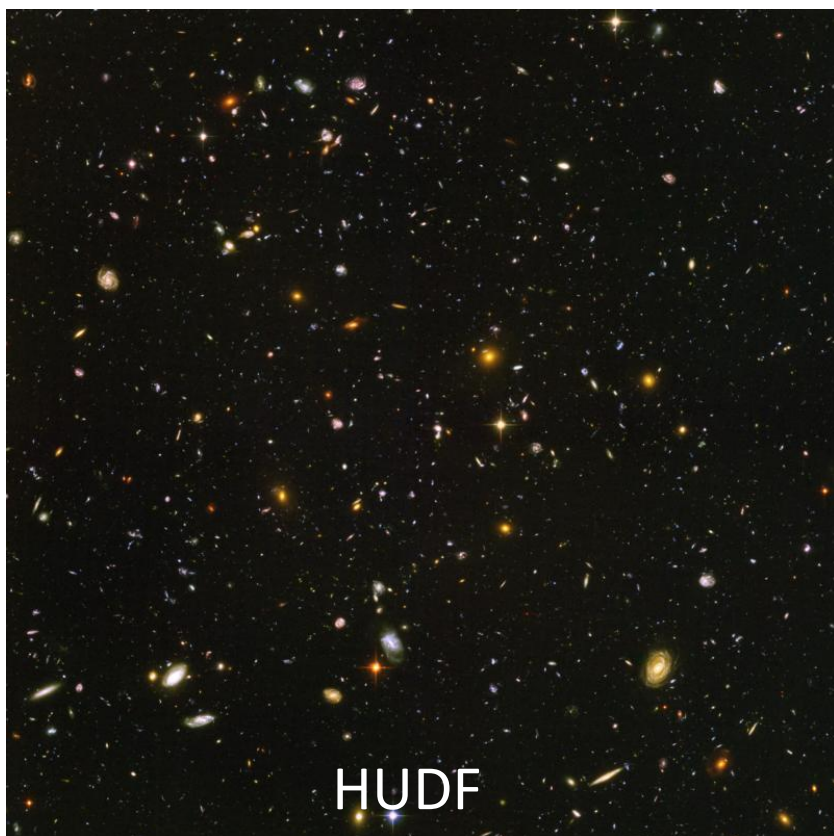
宇宙望遠鏡が最適

- ・大気の影響なし
- ・熱雑音もなし



# ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールド

## ハッブル宇宙望遠鏡による 史上最強の可視光深宇宙探査



(NASA/STScI)

2004年9月リリース

高性能サーベイカメラACSによる  
約11日に及ぶ可視光観測  
30等級の銀河まで検出  
(銀河の個数=約1万個)

天域: ろ座

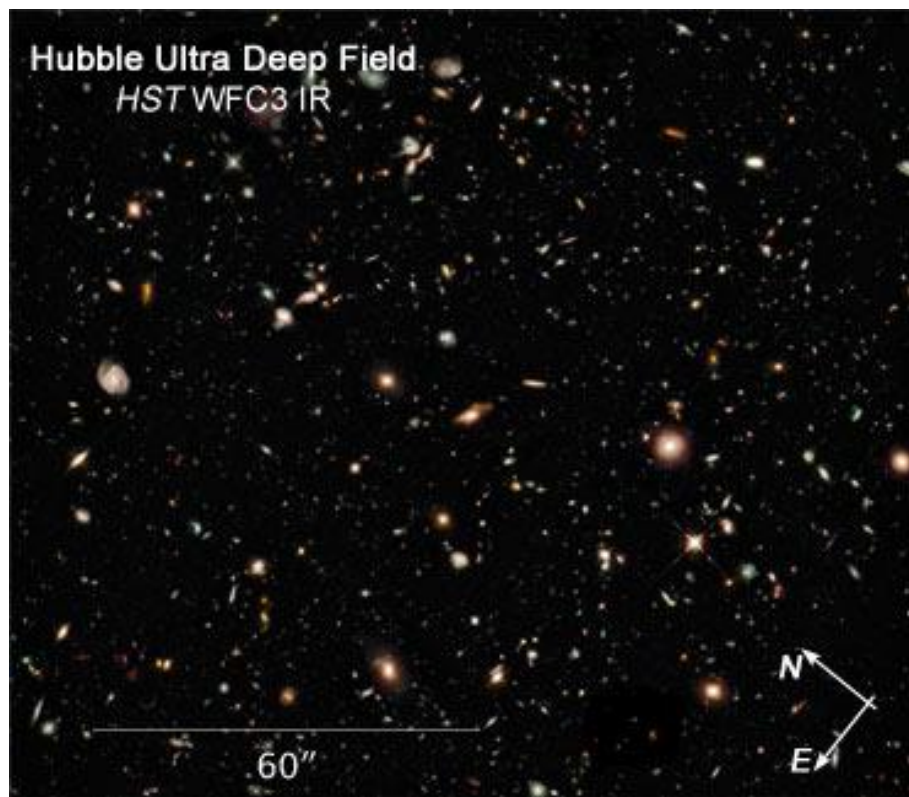
R.A.  $3^{\text{h}} 32^{\text{m}} 40^{\text{s}}.0$

Dec.  $-27^{\circ} 48' 00''$

天域の広さ= 3分角 × 3分角

# ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールド

## ハッブル宇宙望遠鏡による 史上最強の近赤外深宇宙探査



(NASA/STScI)

2010年1月リリース

広視野カメラ3号機WFC3による  
約2日に及ぶ近赤外観測  
28.5等級の銀河まで検出  
(銀河の個数=約5千個)

天域: ろ座

R.A.  $3^{\text{h}} 32^{\text{m}} 40^{\text{s}}.0$

Dec.  $-27^{\circ} 48' 00''$

天域の広さ=  $2.4$ 分角  $\times$   $2.4$ 分角

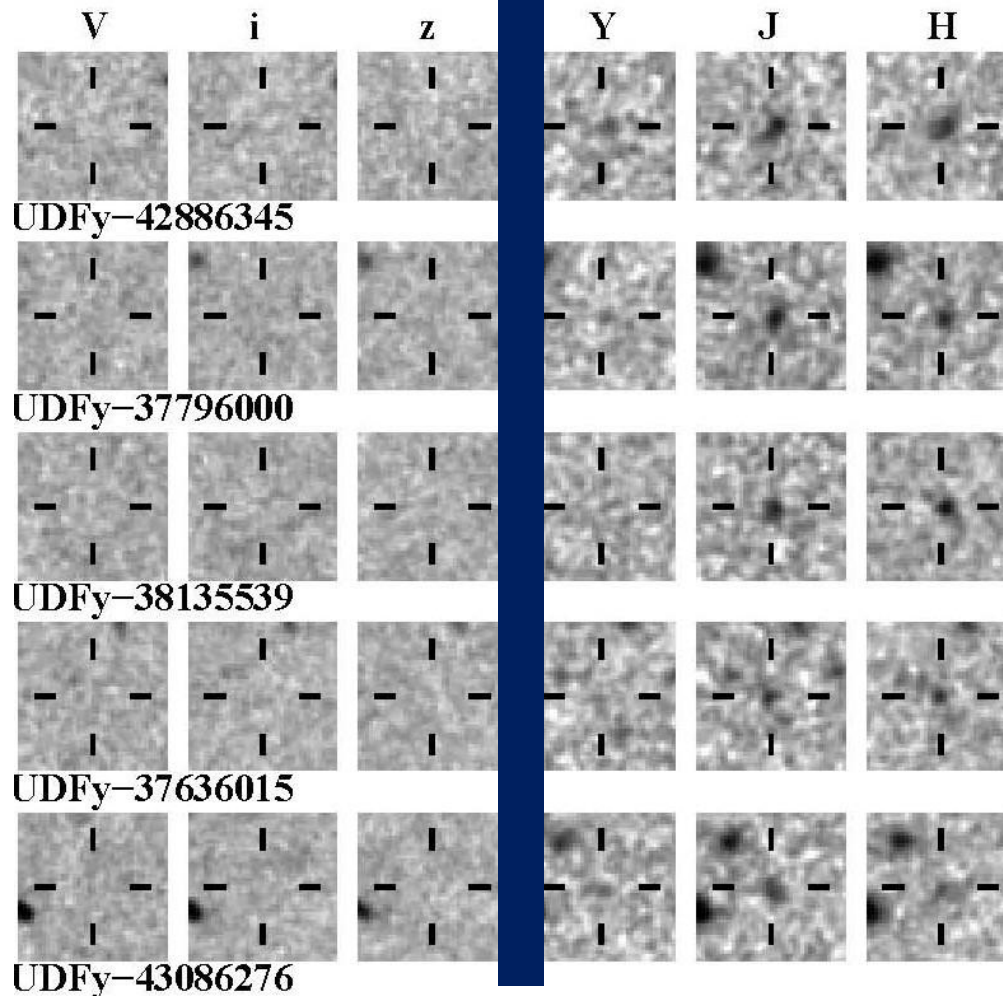
# HUDFで発見された 131億光年彼方の銀河

可視光

近赤外

見えない

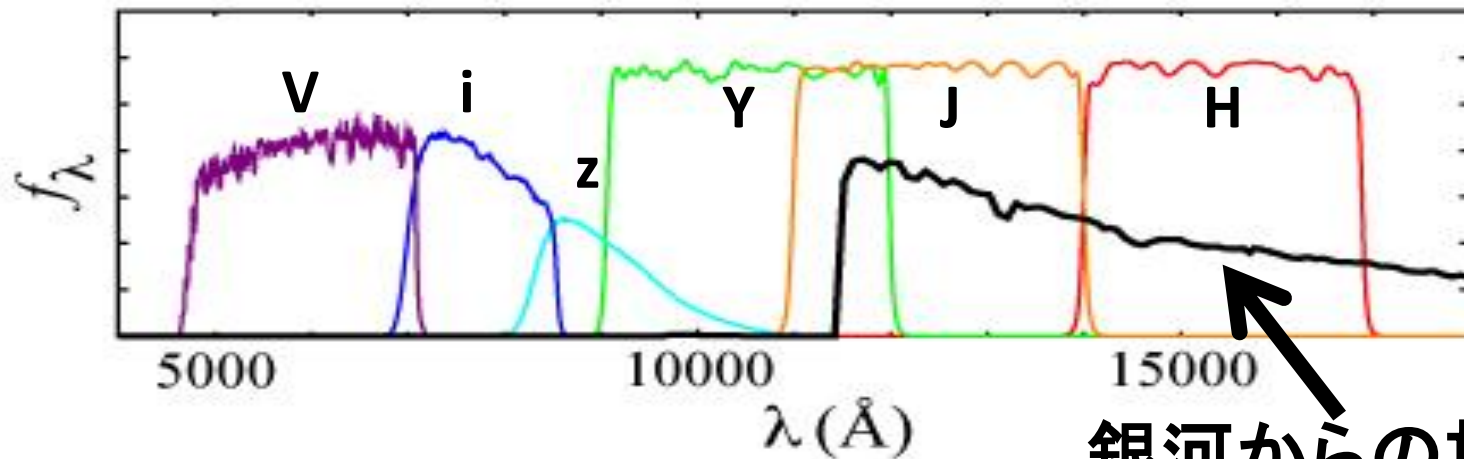
見える



(Bouwens et al. 2010, ApJ, 709, L133)

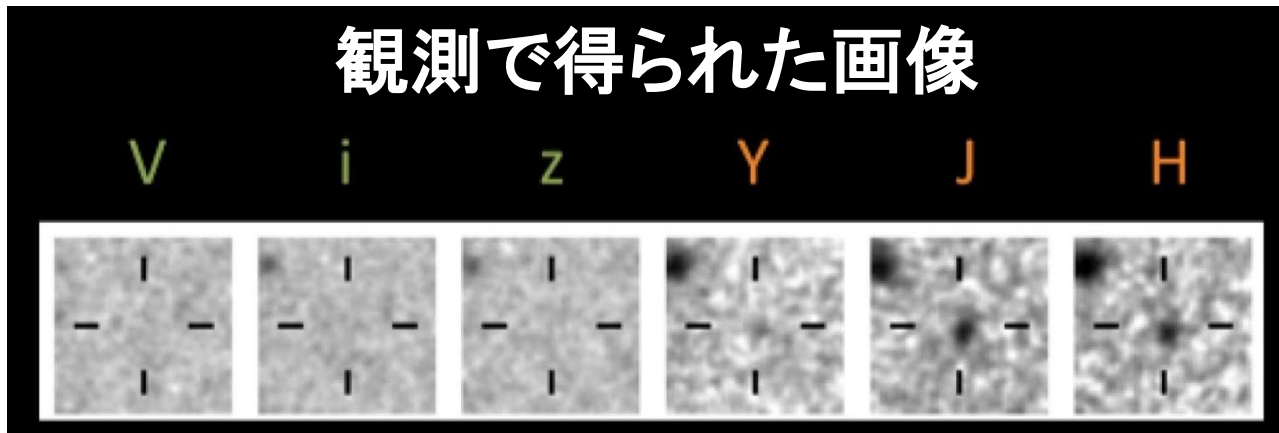
# 131億光年彼方の銀河が 可視光で見えない理由

## フィルターの透過特性



銀河からの放射

## 観測で得られた画像



# 宇宙の一番星、銀河誕生、宇宙再電離 これらを矛盾なく説明できるか？

HUDFで発見された銀河の距離は131億光年

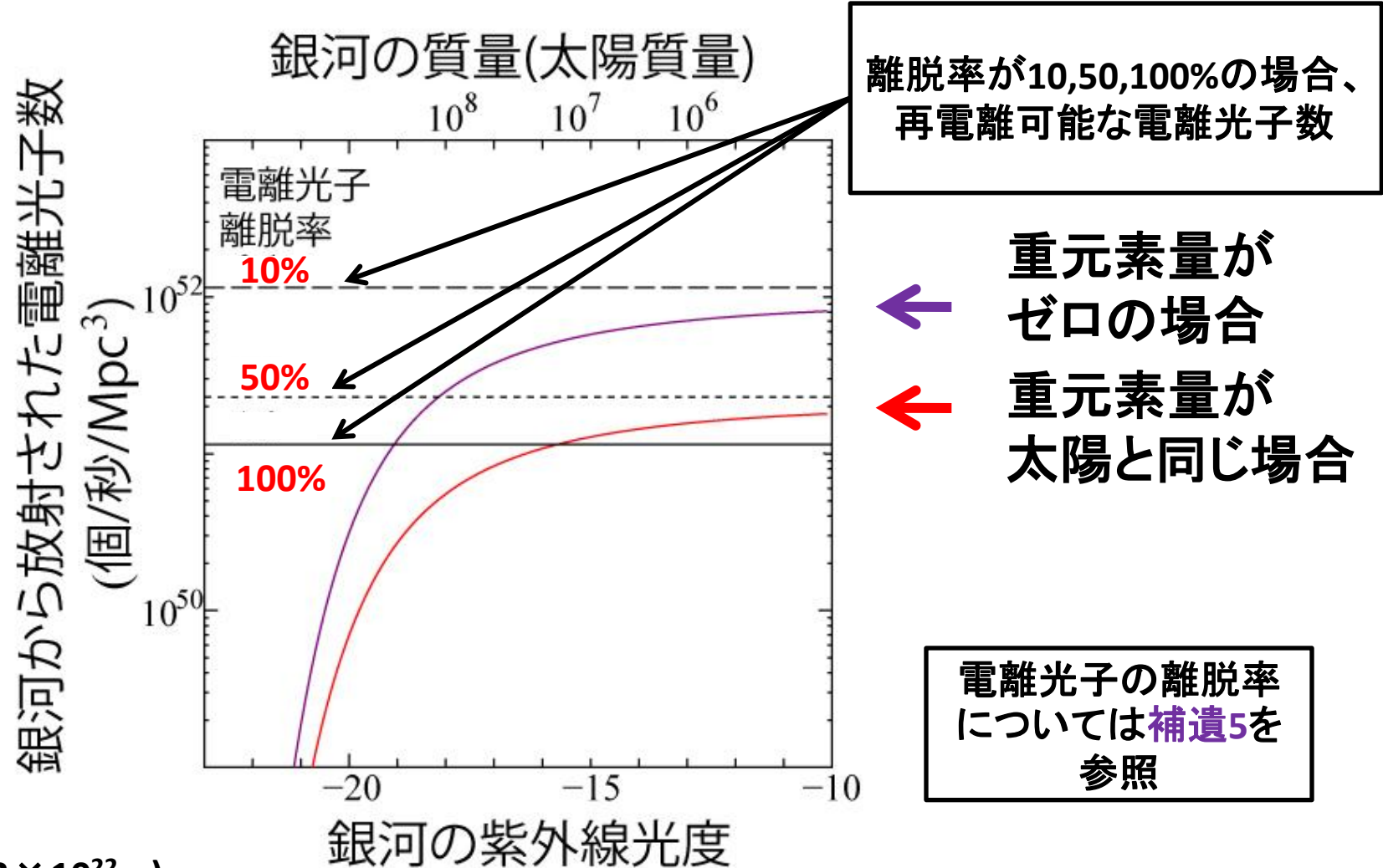
→ 宇宙年齢6億歳の頃の銀河

この頃、宇宙（銀河間空間）は完全電離している

1. HUDFで発見された銀河は  
宇宙を完全電離できるか？

2. できるとすれば、その条件は何か？

# HUDFで発見された131億光年彼方の 銀河は宇宙を再電離できたか？

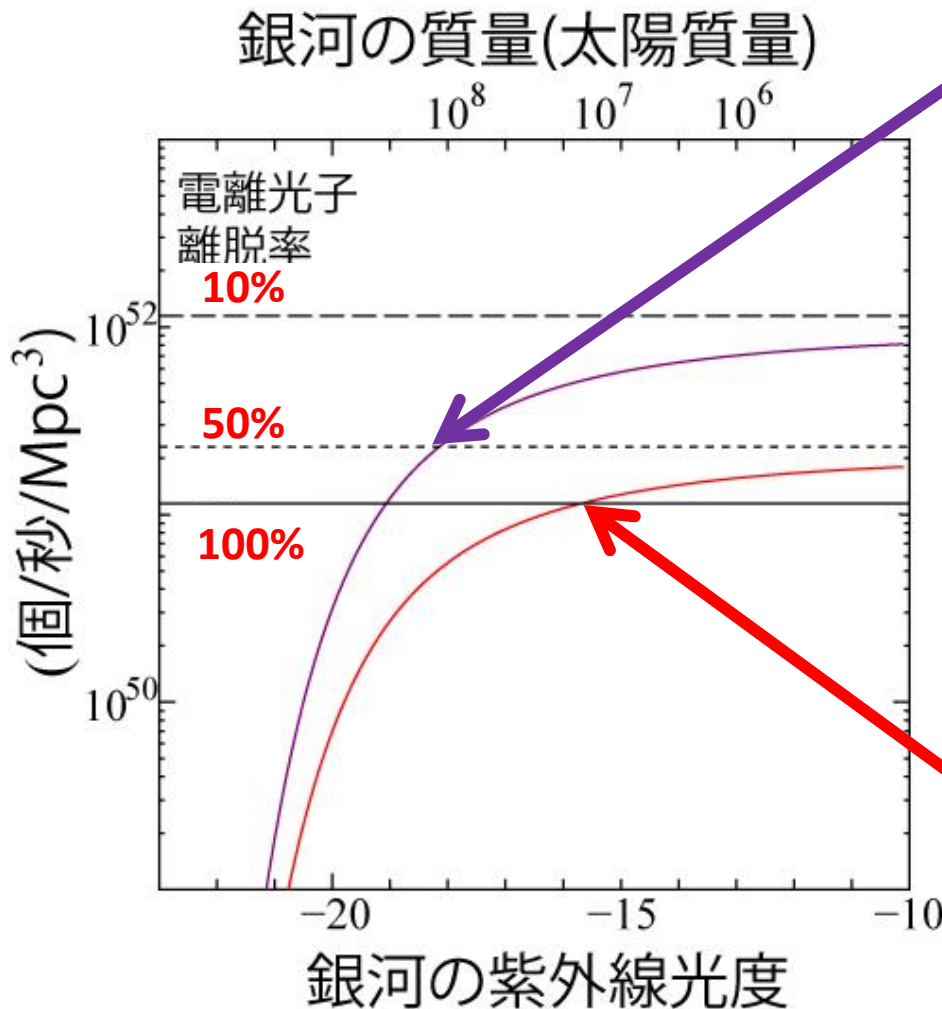


(1 Mpc =  $3 \times 10^{22}$  m)



# 前頁の図の見方

銀河から放射された電離光子数



離脱率が50%でも、太陽質量の1億倍以上の銀河からの電離光子があれば再電離可能

← 重元素量がゼロの場合

← 重元素量が太陽と同じ場合

離脱率が100%でも、太陽質量の千万倍しかない銀河からの電離光子が再電離に必要

# HUDFで発見された131億光年彼方の 銀河は宇宙を再電離できたか？

## 重元素量が太陽と同じ場合

離脱率 < 50% だと再電離不可能 → 困難  
離脱率 = 100% だと再電離可能だが、  
非常に暗い銀河まで必要

## 重元素量がゼロの場合

離脱率 < 50% でも再電離可能 → 簡単  
非常に暗い銀河まで必要としない

# まとめ

1. HUDFで発見された131億光年彼方の銀河は131億光年彼方の銀河であることを確認した
  2. これらの銀河が宇宙の一番星をたくさん含んでいれば、宇宙再電離が可能  
(太陽並みに重元素を含んでいる星では不可能)
- HUDFで発見された131億光年彼方の銀河は宇宙の一番星をたくさん含んでいる！

# 元素の生成

## 1. ビッグバン元素合成

宇宙最初の3分間で**水素**と**ヘリウム**を  
合成(90%は水素原子)

微量のリチウムも合成

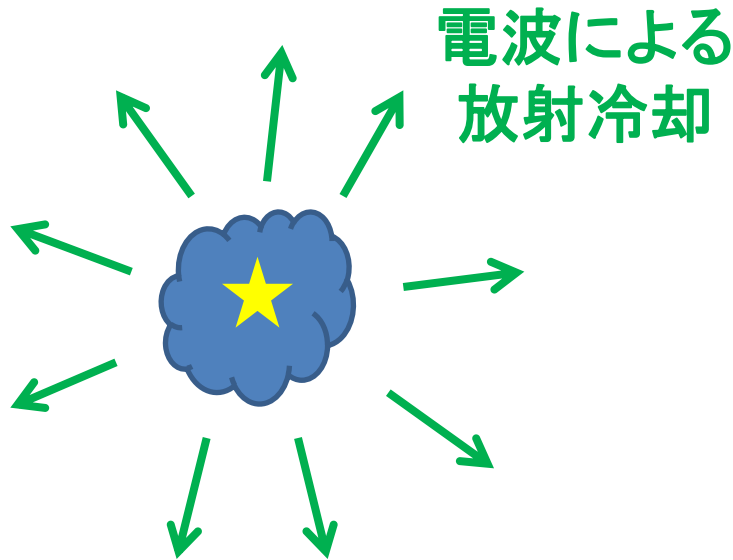
## 2. それ以外の元素(**重元素**と呼ぶ)の起源

星内部の核融合

超新星爆発時の中性子捕獲による生成

# 宇宙の一番星の性質

## 普通の星



重元素を含む分子の放射で  
温度が下がり、太陽程度の質量の  
星が分子ガス雲から生まれる

## 宇宙の一番星



重元素がないため、放射で  
温度が下がらない。  
そのため、太陽の千倍程度の  
大質量星が分子ガス雲から生まれる

# 宇宙の一番星の性質

太陽などの重元素を含む星に比べて  
同じ質量の星でも温度が高い

→ 電離光子をたくさん放射できる

→ 宇宙再電離に有効！



## 宇宙論的赤方偏移

130億光年より遠い銀河は  
なぜ可視光で見えないのか？

宇宙膨張の影響で、遠方の銀河から放射される  
電磁波は波長の長い方(赤い色)にシフトする  
(宇宙論的赤方偏移と呼ばれる)

130億光年より遠い銀河からの情報は  
赤方偏移のため、全ての電磁波情報が  
赤外線帯にシフトして観測される

# 宇宙年齢と赤方偏移の関係

| 赤方偏移 | 宇宙年齢(億年) | ルックバックタイム(億年) |
|------|----------|---------------|
| 0    | 137.2    | 0             |
| 1    | 60.8     | 76.5          |
| 2    | 34.4     | 102.9         |
| 3    | 22.6     | 114.7         |
| 4    | 16.2     | 121.0         |
| 5    | 12.3     | 124.9         |
| 6    | 9.8      | 127.4         |
| 7    | 8.0      | 129.2         |
| 8    | 6.7      | 130.5         |
| 9    | 5.7      | 131.5         |
| 10   | 5.0      | 132.3         |

# 電離光子の 銀河からの離脱率

$N_{\text{ion}}$  = 星々から放射される

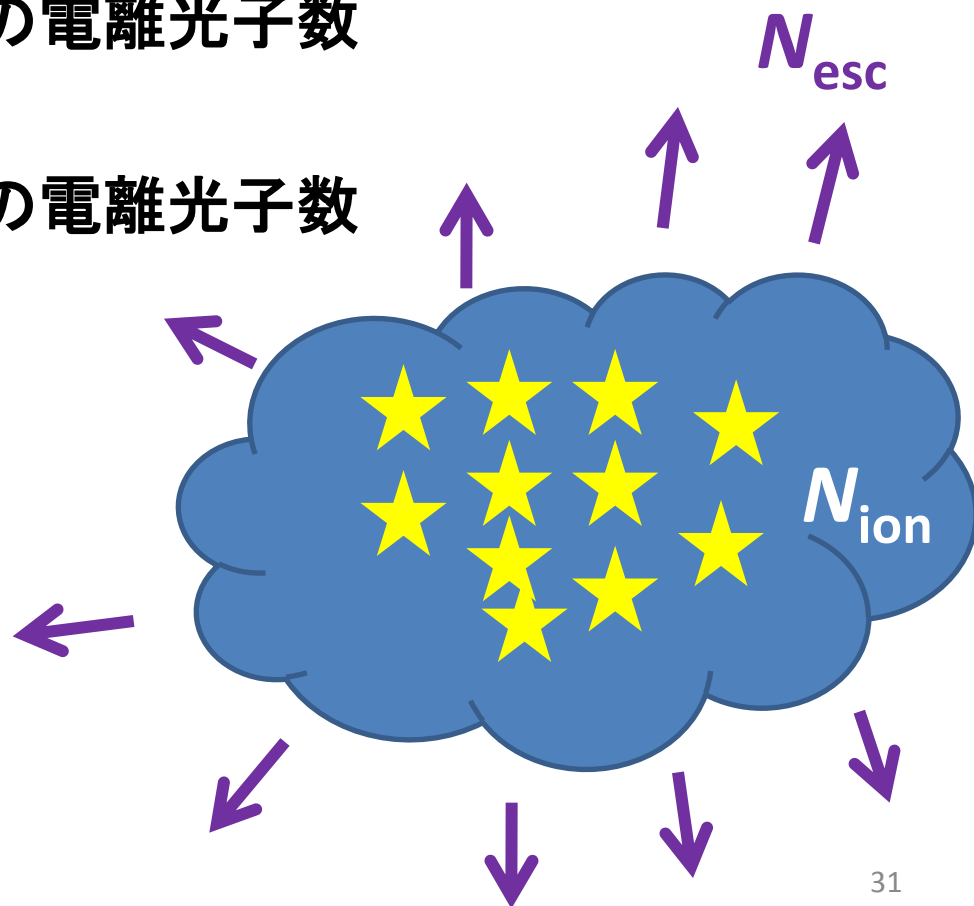
単位時間・単位体積当たりの電離光子数

$N_{\text{esc}}$  = 銀河から脱出した

単位時間・単位体積当たりの電離光子数

$$f_{\text{esc}} = N_{\text{esc}} / N_{\text{ion}} \times 100 \%$$

一般の銀河では電離光子は  
銀河の水素原子の電離に  
消費されるので  $f_{\text{esc}} = 0 \%$  !

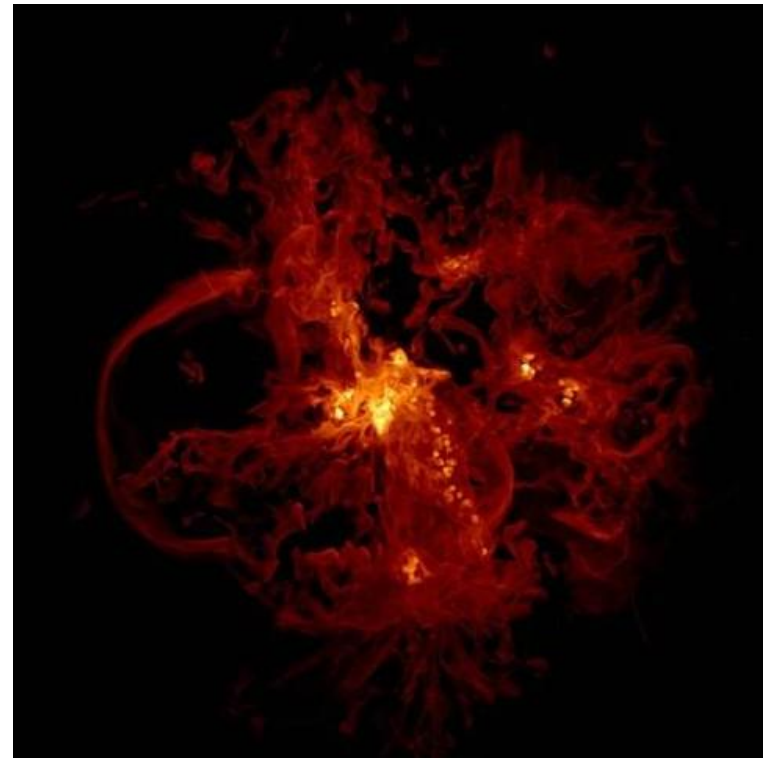


# 電離光子を離脱しやすくする要因

宇宙の一番星たちは約100万年後に  
超新星爆発を起こして死ぬ。  
爆風波で周りのガスは電離され、  
水素原子による吸収がおこらなくなる。

➔ 電離光子の離脱率が高くなる

生れたての銀河は  
超新星爆発の爆風波に  
まみれている !?



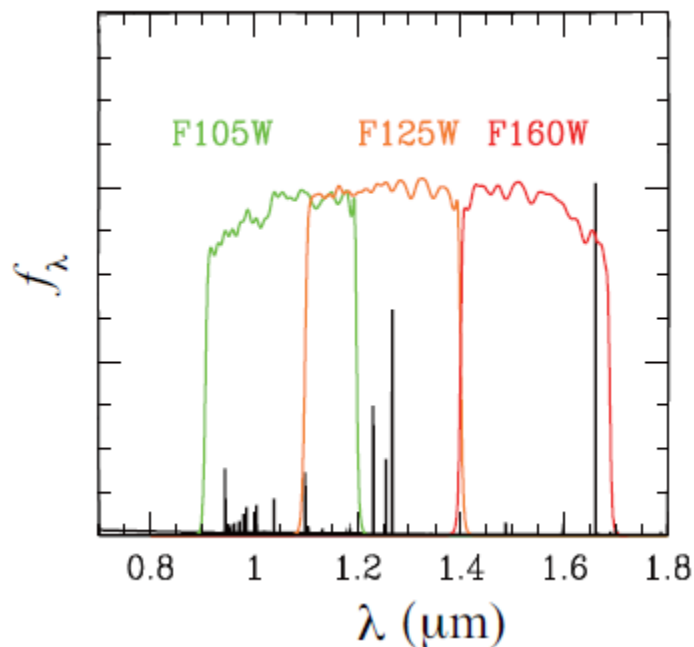
(Mori & Umemura, 2006, Nature, 440, 644)

# HUDFで発見された銀河の信ぴょう性について

HUDFで発見された131億光年彼方の銀河が  
本当に131億光年彼方の銀河であることを  
確認する必要がある

“100億光年彼方の星生成矮小銀河である”  
可能性が残されていたが、  
私たちがその可能性がないことを確認した

# HUDFで発見された 131億光年彼方の銀河は 本当に131億光年彼方の銀河なのか？



可視光で見えないが、近赤外線で見える銀河がある

➔ 100億光年彼方の星生成輝線銀河



# **HUDFで発見された 131億光年彼方の銀河は 100億光年彼方の星生成銀河か？**

- 100億光年彼方の星生成銀河が  
131億光年彼方の銀河と間違われる可能性は？**
- 普通の銀河の1/100の質量を持つ矮小銀河**
  - 輝線を強く放射する**
  - 塵粒子による吸収を受けている**
- このような銀河と間違える可能性は低い  
(100万回に1回程度起こりえる)**

# 結論

**HUDFで発見された  
131億光年彼方の銀河は  
本当に131億光年彼方の銀河である**

**(塩谷泰広、谷口義明 他、  
2010年春季年会、講演番号X42a、  
「最果ての銀河は本当に最果ての銀河か？」)  
(Taniguchi, Shioya, & Trump 2010, ApJ, 印刷中)**