

最遠方宇宙の探求

戸谷 友則

京大・宇宙物理学教室

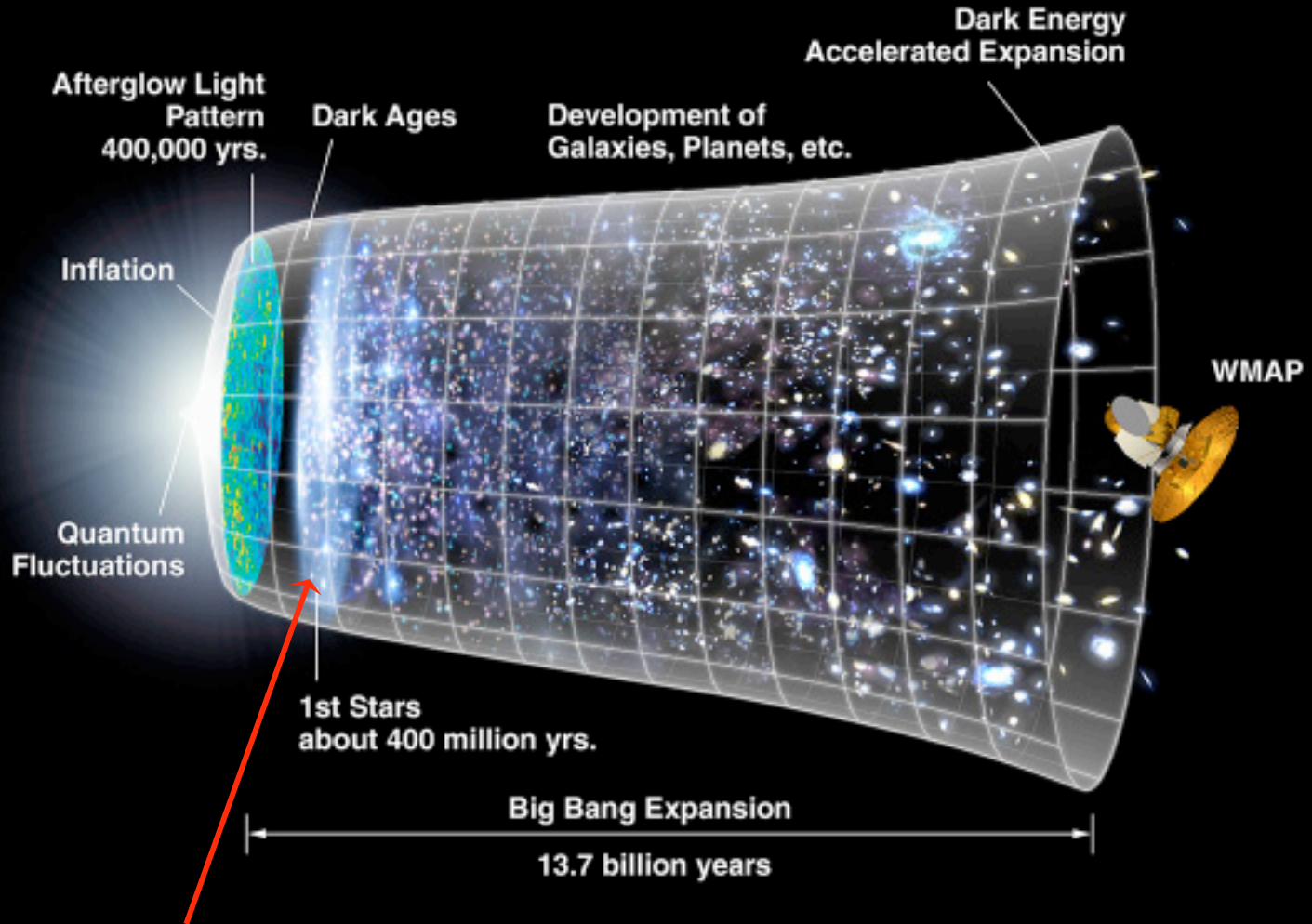


京都大学

宇宙物理学教室

Department of Astronomy
Kyoto University

人類の観測する最遠方の宇宙

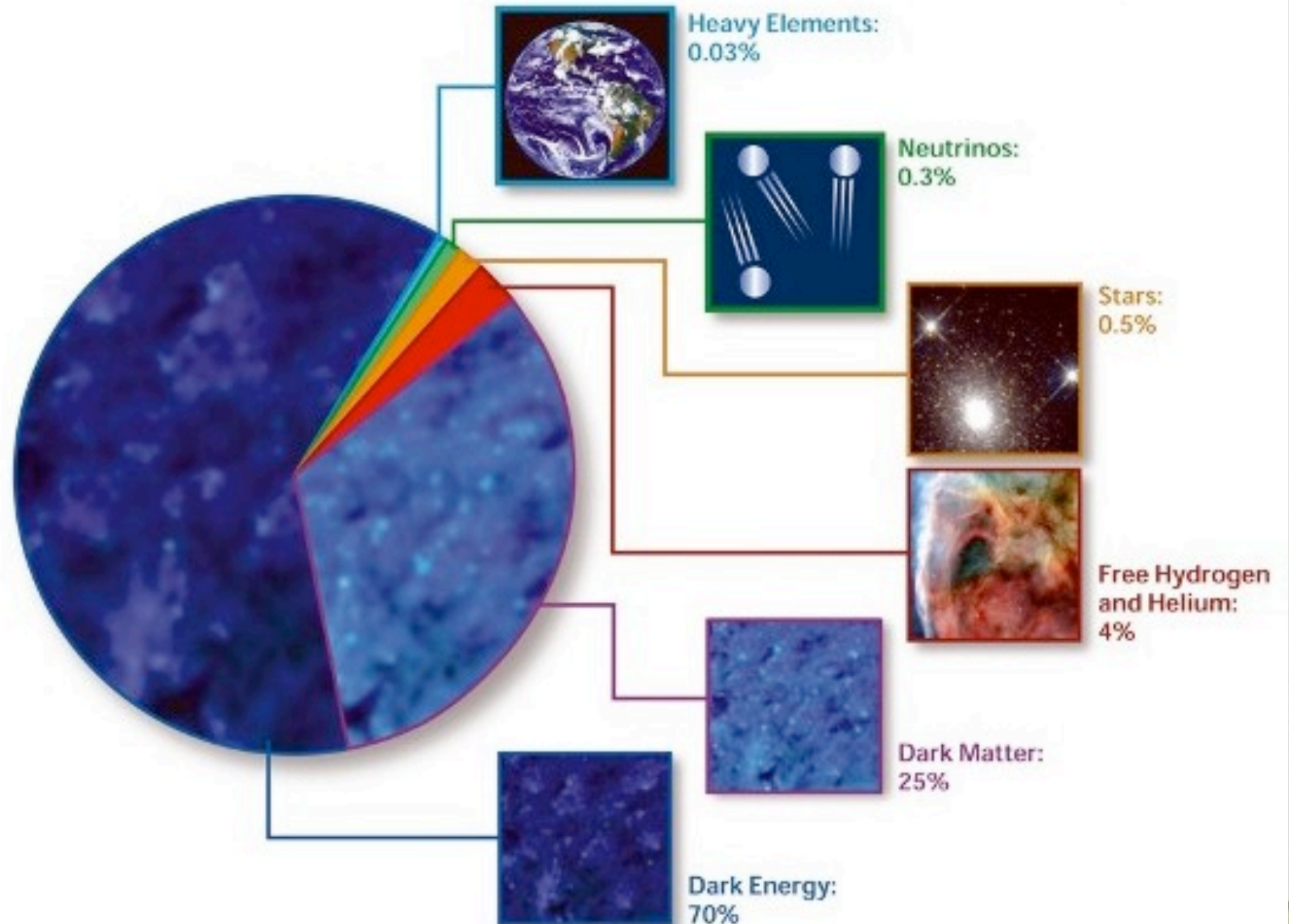


The most distant galaxies, quasars, and GRBs
(about 1 billion yrs after big-bang, 12 billion light yrs away)

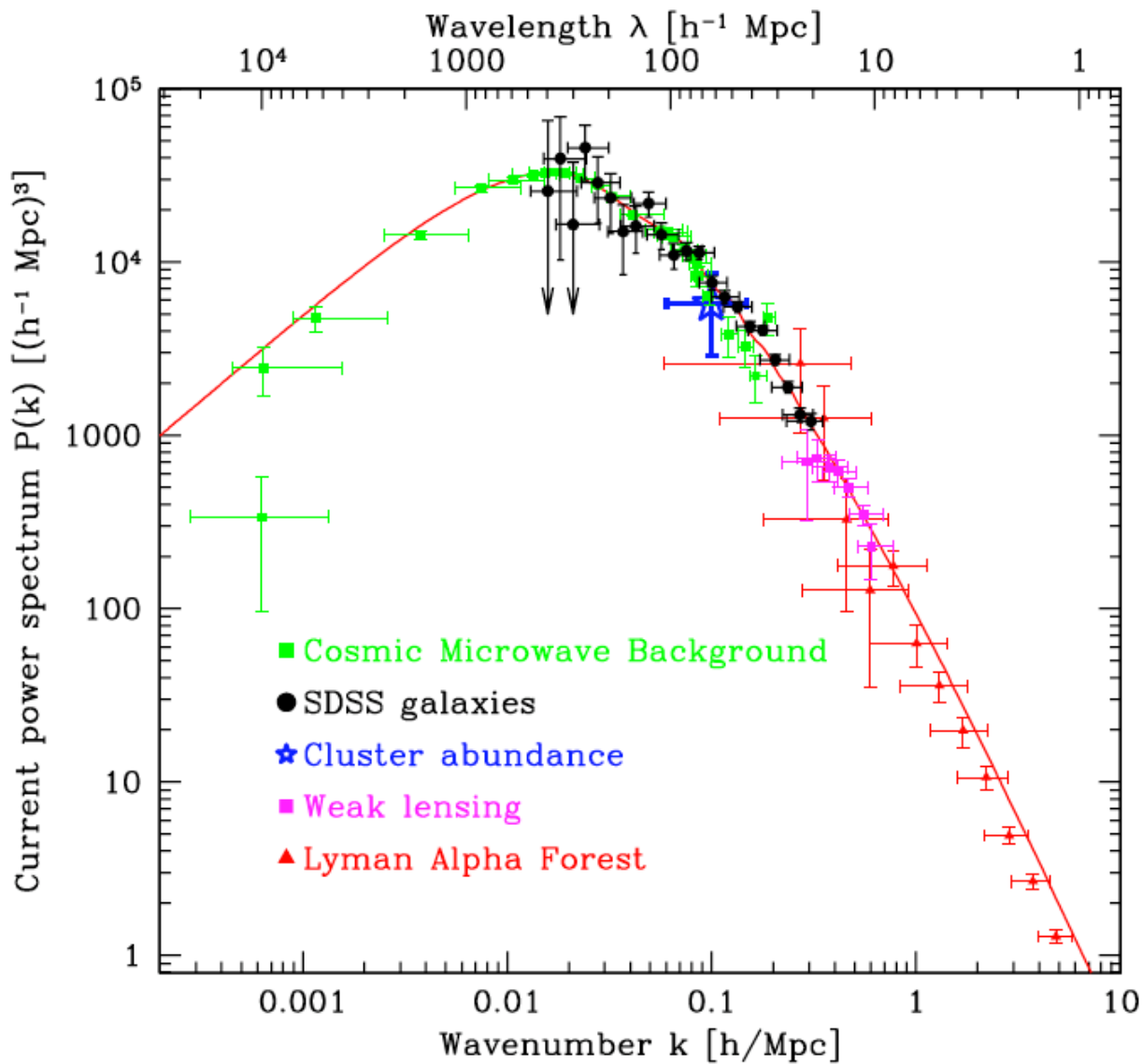
赤方偏移と宇宙膨張

- 赤方偏移 波長 $\lambda_{\text{obs}} = (1+z) \lambda_{\text{rest}}$
- 宇宙の大きさ $R = R_0 / (1+z)$
- 宇宙マイクロ波背景放射 $z=1100$, 宇宙誕生後 40万年
- 最遠方天体
 - 銀河 $z=6.96$ (宇宙誕生後約 10億年)
 - クエーサー $z=6.42$
 - ガンマ線バースト $z=6.7$

宇宙の物質構成



宇宙の密度揺らぎスペクトル



暗黒物質による構造形成

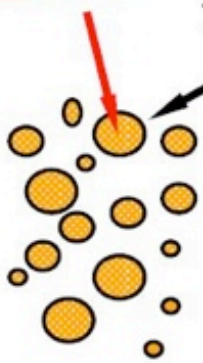
矢作氏による
シミュレーション

銀河と構造の形成

ダークハローの集積

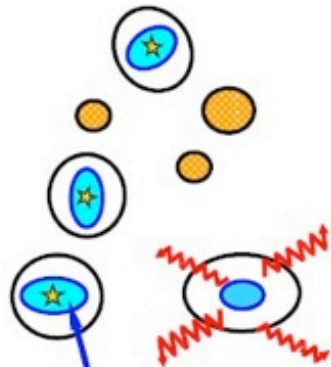
高温ガス

ダークハロー

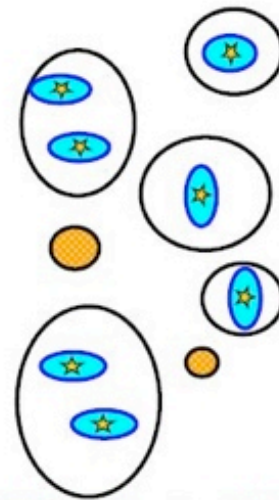


衝撃波加熱による
高温ガスの形成

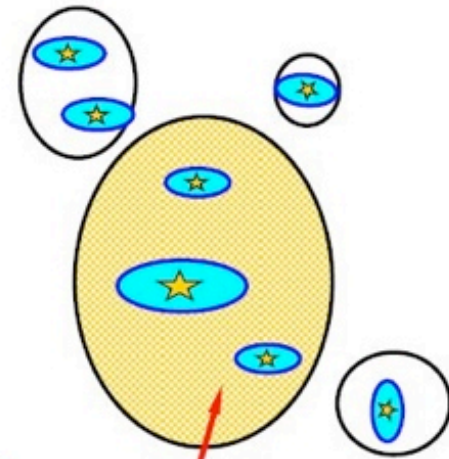
銀河 (星間ガス, 星)



銀河同士の衝突合体
銀河の進化



銀河団ガス

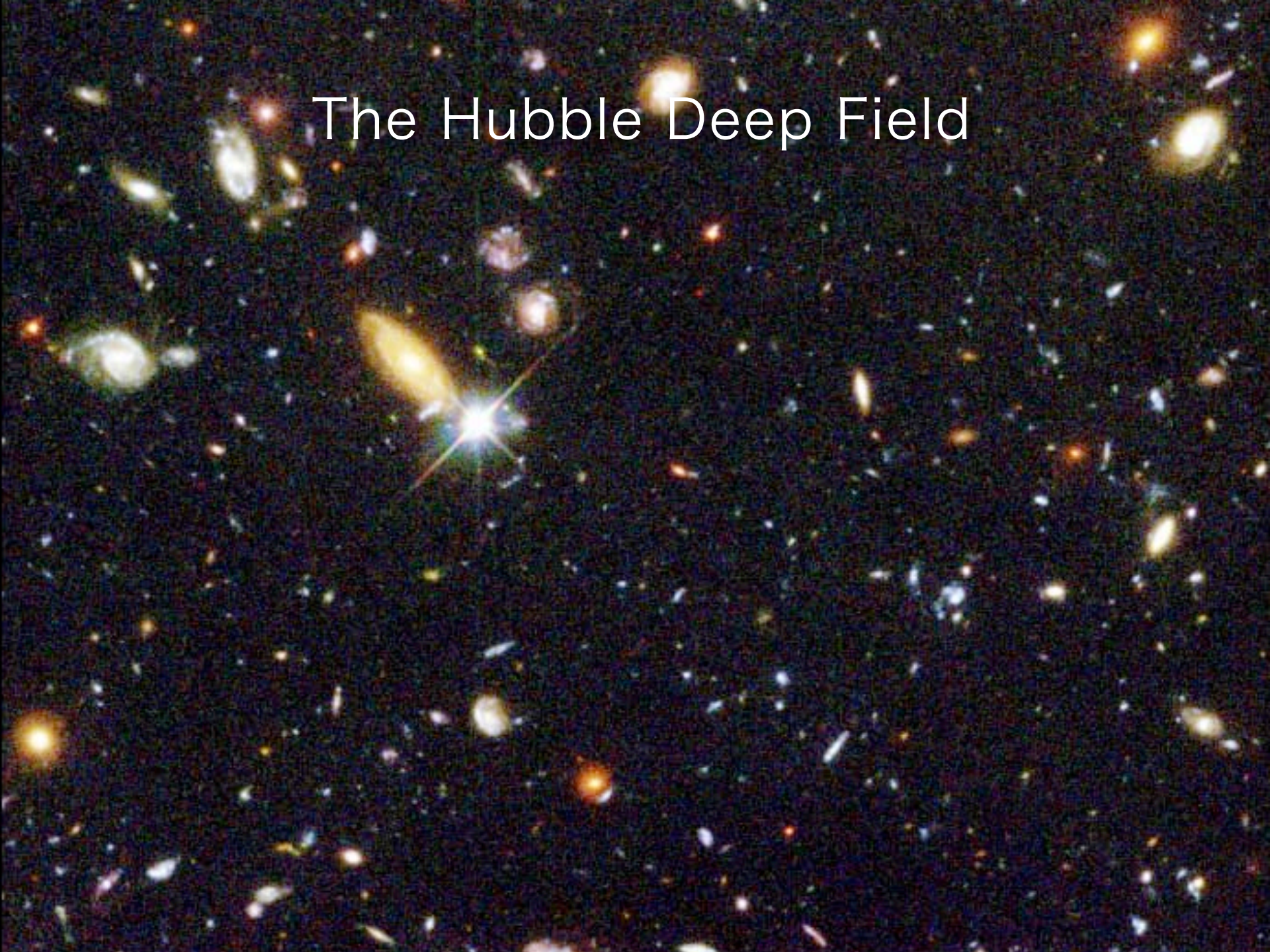


銀河団の形成

高温ガスの冷却・収縮
→ 星間ガスの形成
→ 星形成
→ 超新星爆発による
星間ガスの加熱

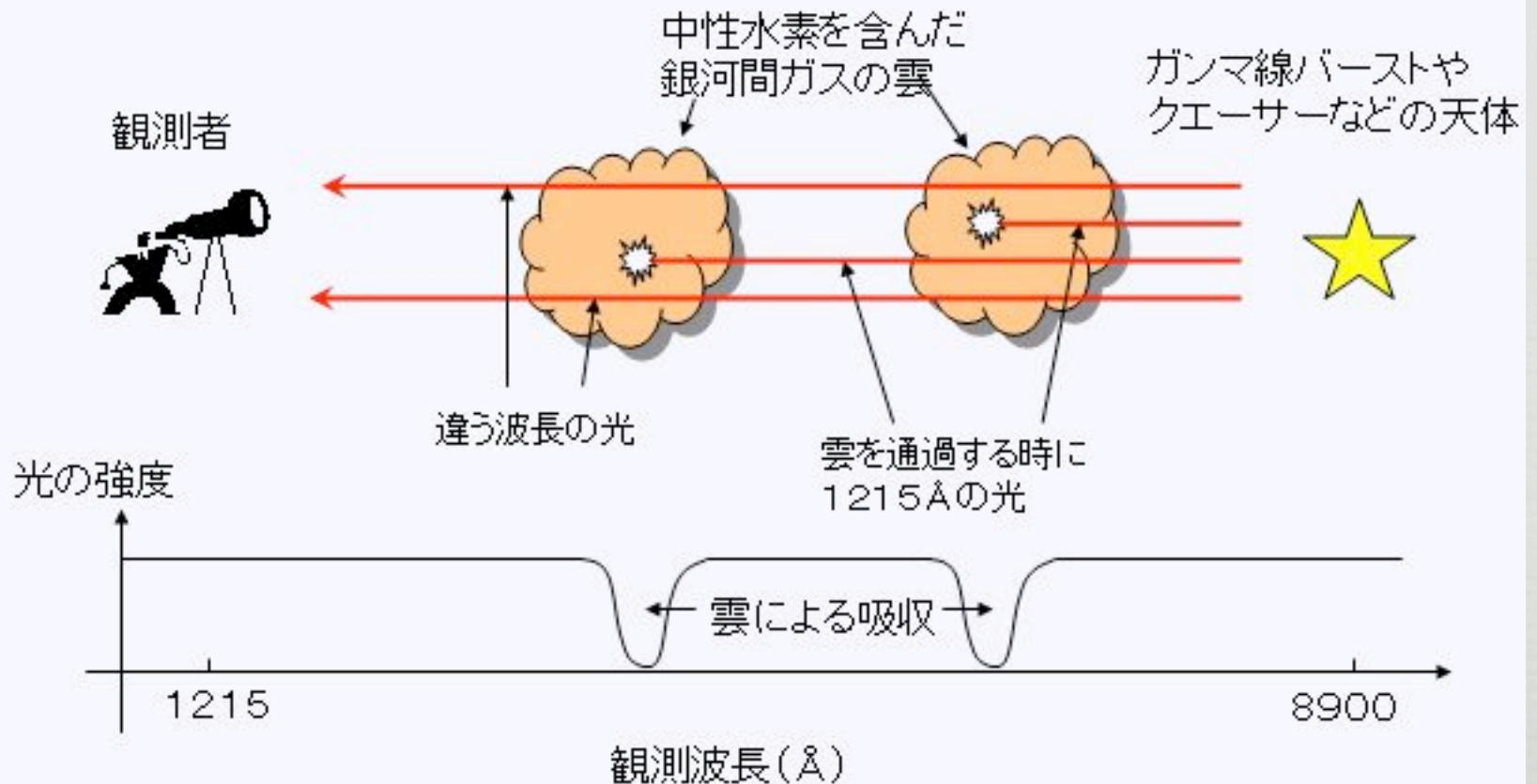


The Hubble Deep Field



遠方銀河の探索

銀河間ガスによるライマン α 吸収の概念図

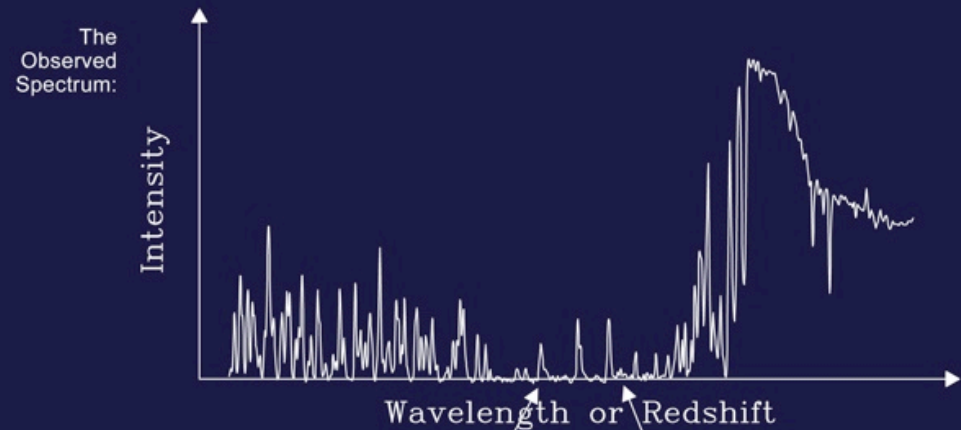
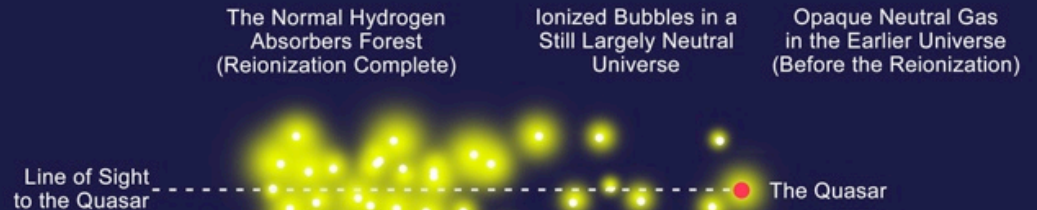


天体を発した光の波長は伝播と共に大きく(赤く)なってゆく
観測者から遠い雲ほど赤い波長で吸収痕を残す

遠方銀河の探査: LBG と LAE

- 銀河間空間の中性水素の存在により、ライマン α (1216Å)、ライマン端(912Å)より短波長の光は吸収を受ける

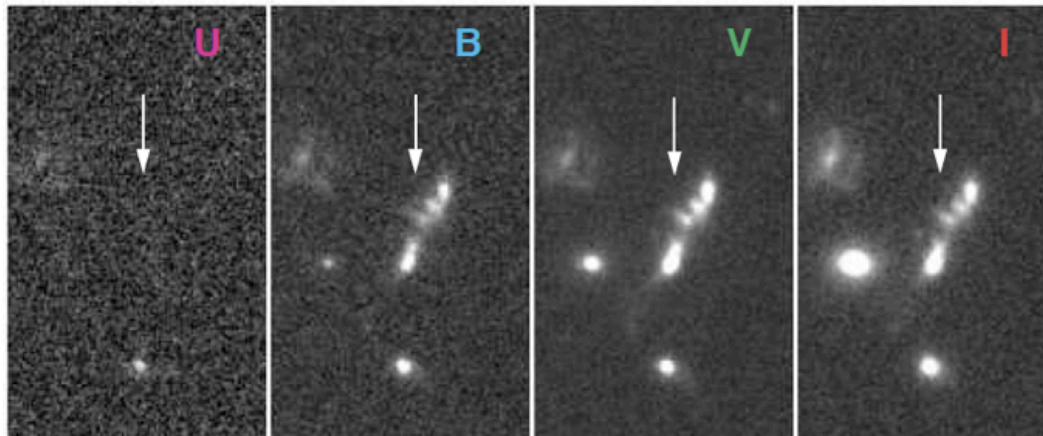
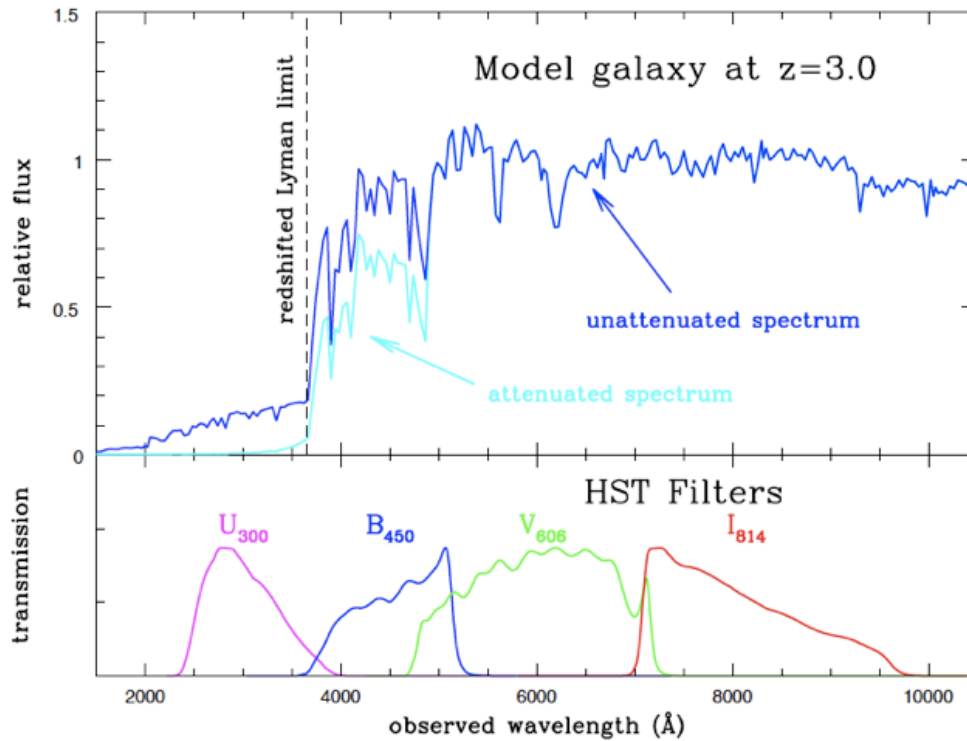
How the Discovery Was Made



Isolated Transmission Spikes Correspond to the Ionized Bubbles Along the Line of Sight

Dark Regions Correspond to the Still Opaque, Neutral Gas Along the Line of Sight

Lyman Break Galaxies (LBGs)



Lyman Alpha Emitters (LAEs)

- ライマン α 輝線をもつ
- 狭帯域フィルターで輝線を検出
- 最高赤方偏移銀河を見つける方法

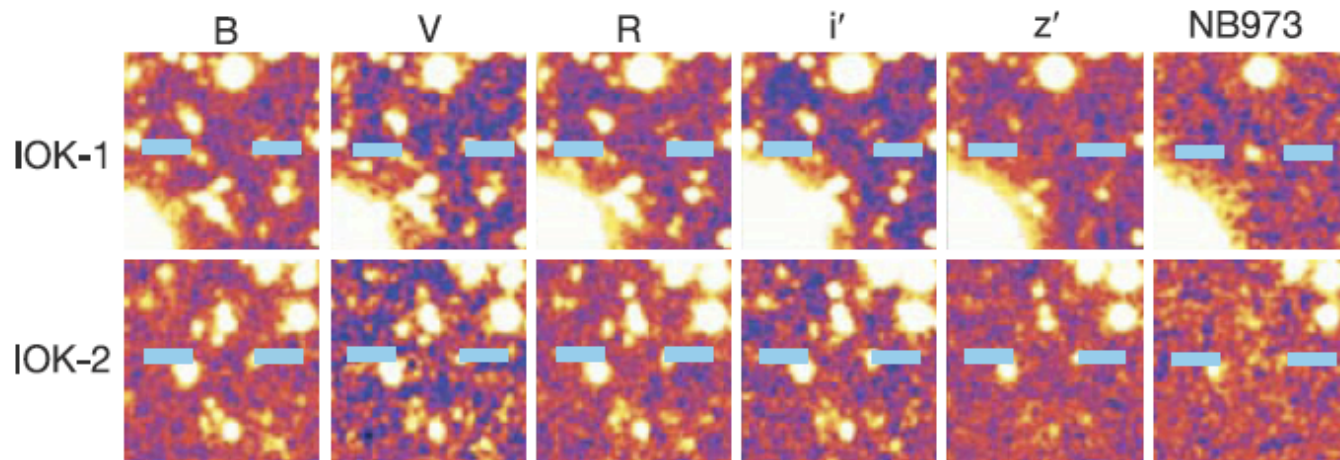


Figure 1 | Multi-waveband $20'' \times 20''$ images of the $z = 6.96$ Lyman α emitter IOK-1 and the unidentified candidate IOK-2. Deep broadband

Lyman Alpha Emitters (2)

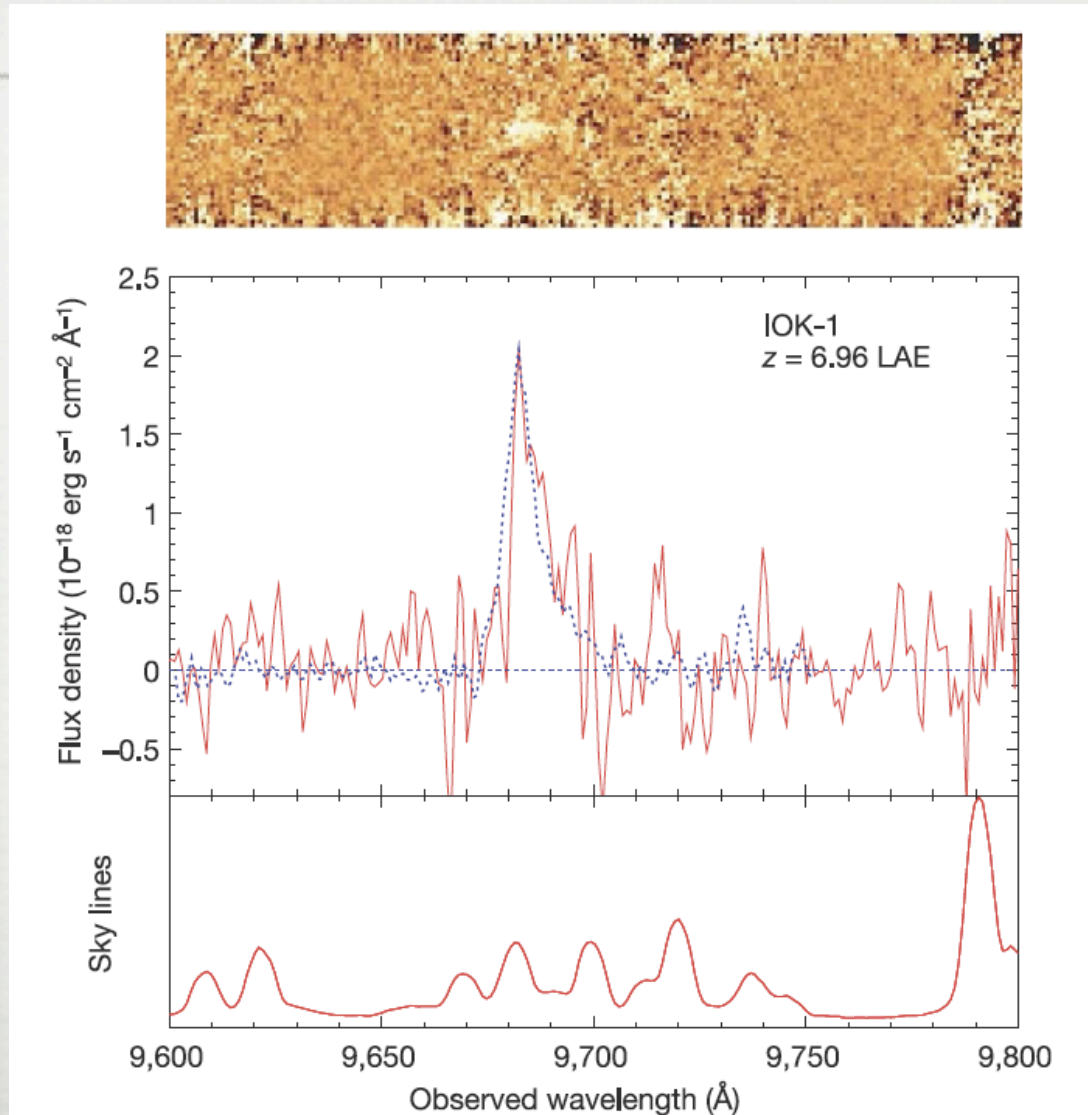
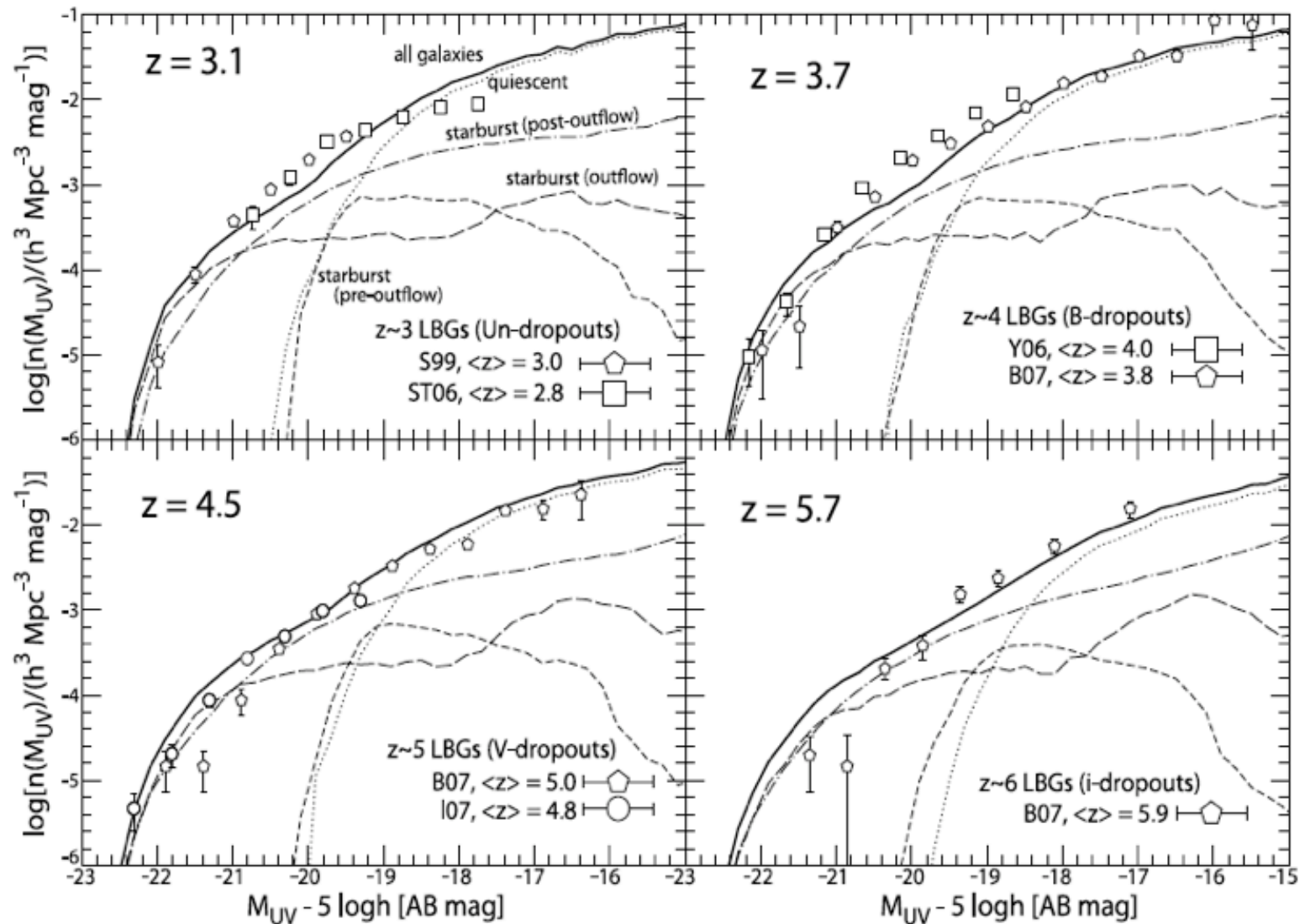


Figure 2 | Combined spectrum of $z = 6.96$ galaxy, IOK-1. The bottom panel

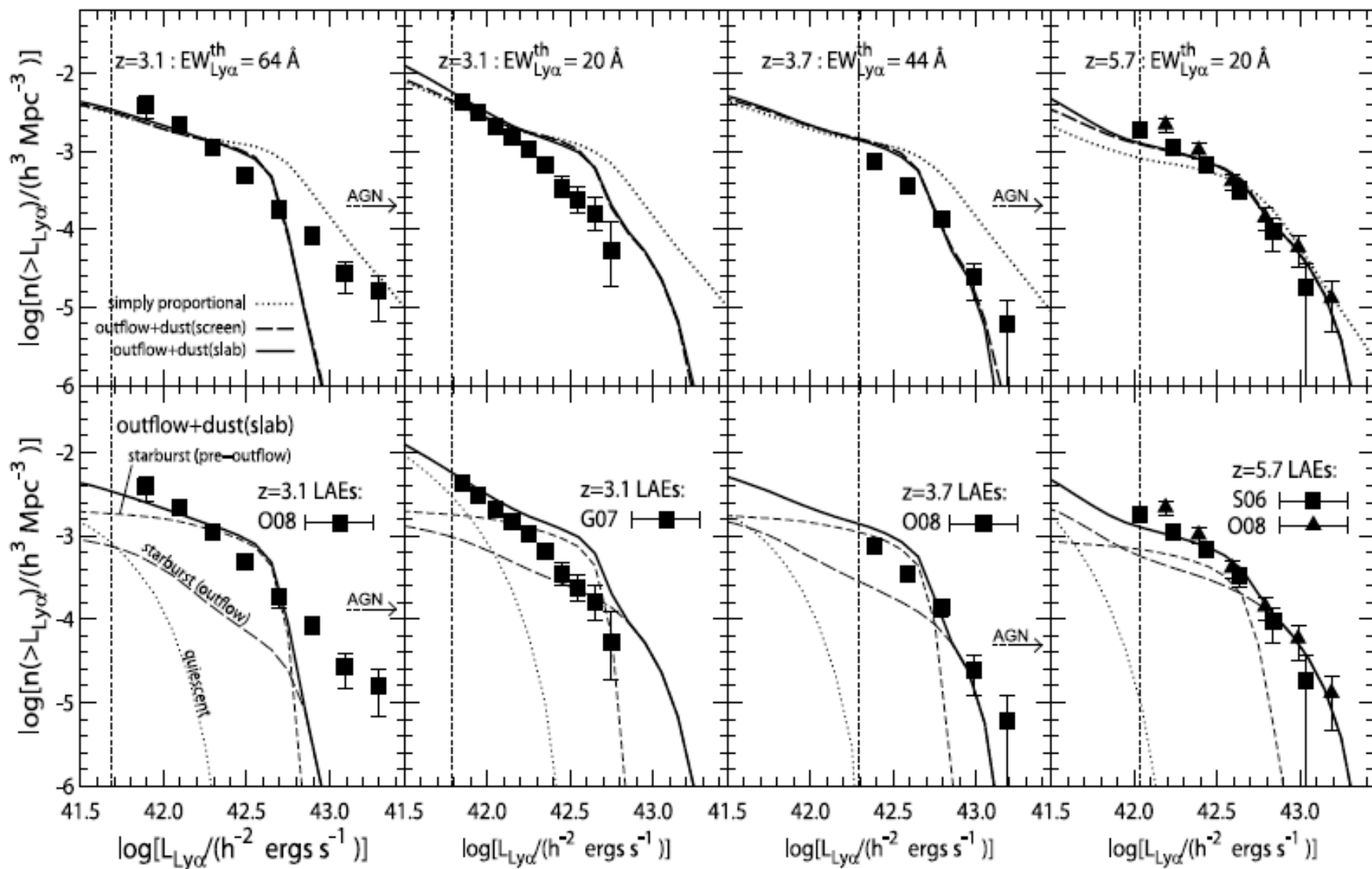
Luminosity Function of LBGs

Kobayashi, TT, Nagashima '09

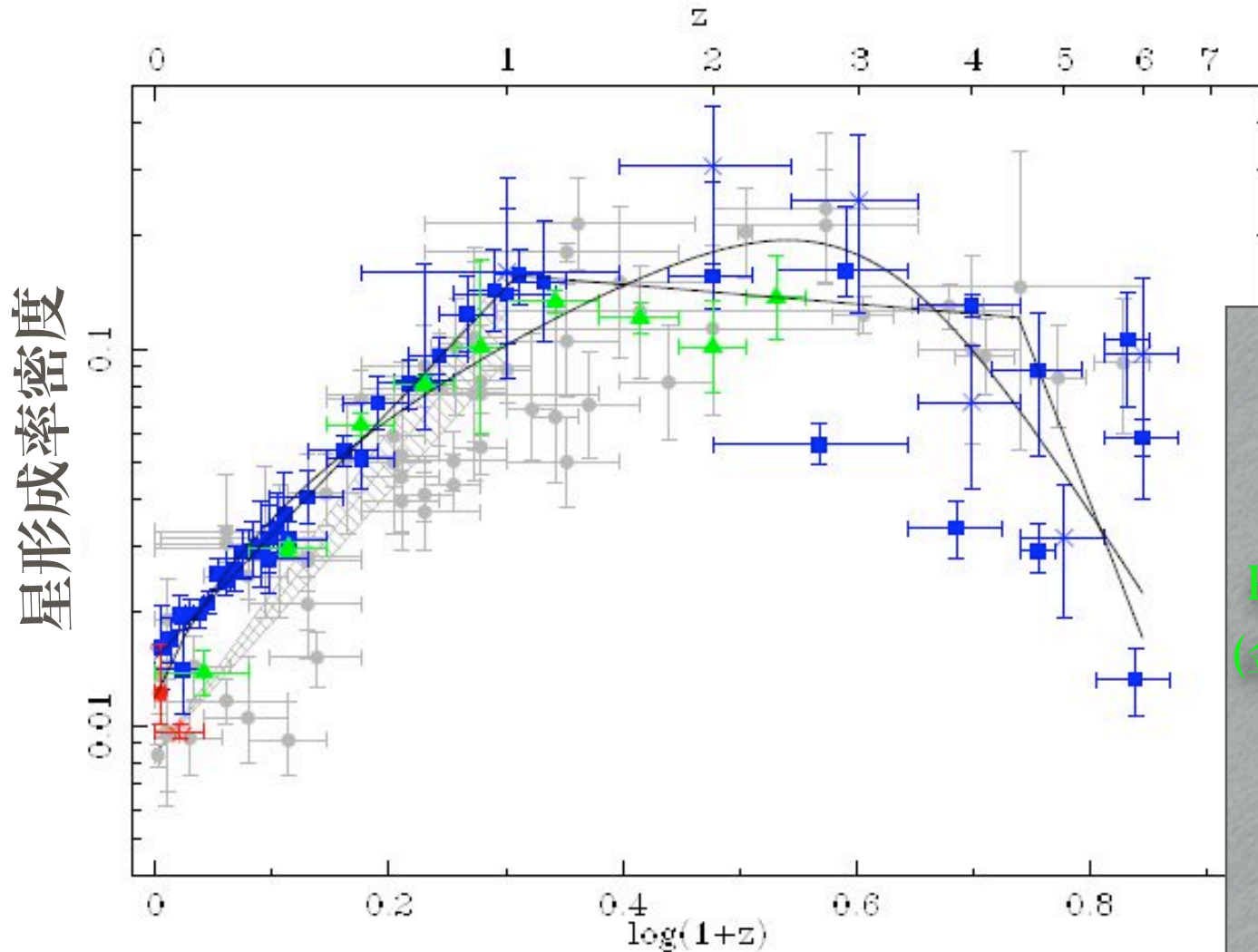


Luminosity Function of LAEs

Kobayashi, TT, Nagashima '09



宇宙の星形成史

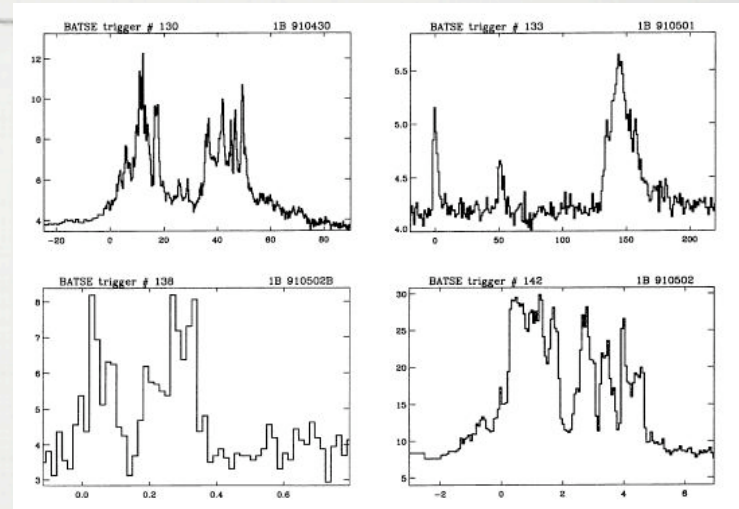


?

Pop. III stars?
(金属量ゼロの星)
@ $z=20?$ 30?

GAMMA-RAY BURSTS

GAMMA-RAY FLUX VS. TIME



- Sudden burst of gamma-rays from a random point in the sky
- discovered around 1970, by a US satellite monitoring nuclear bomb tests in Soviet Union
- typical time duration ~ 1-100 sec
- typical gamma-ray energy ~ MeV
- Flux ~ 1 photon $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

DURATION DISTRIBUTION

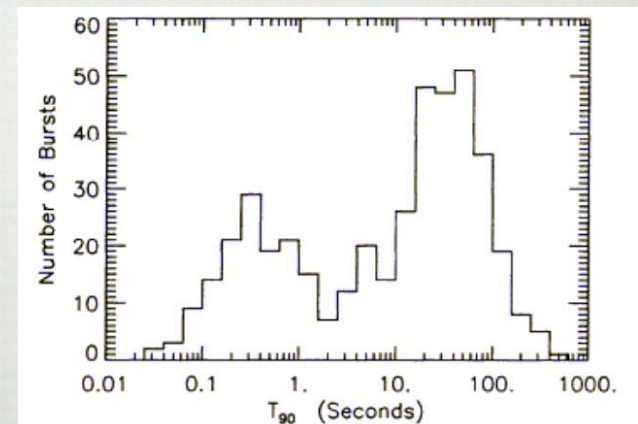
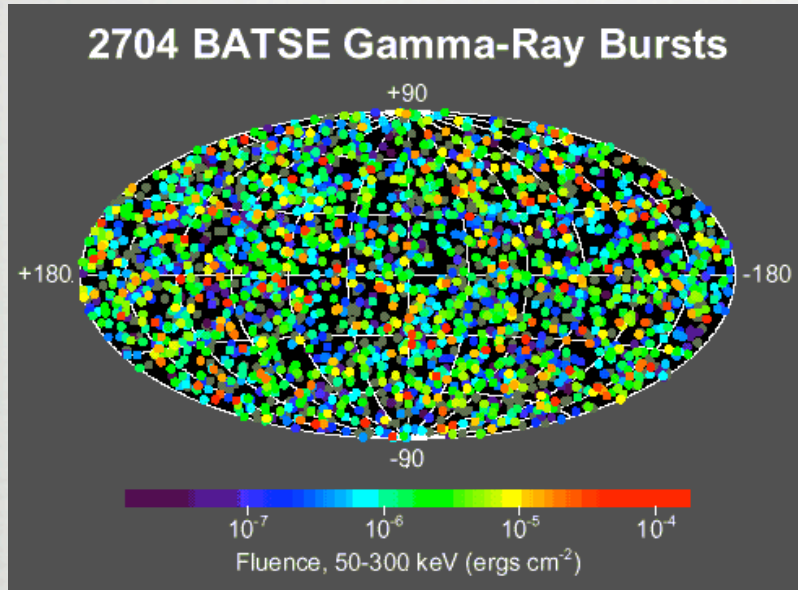
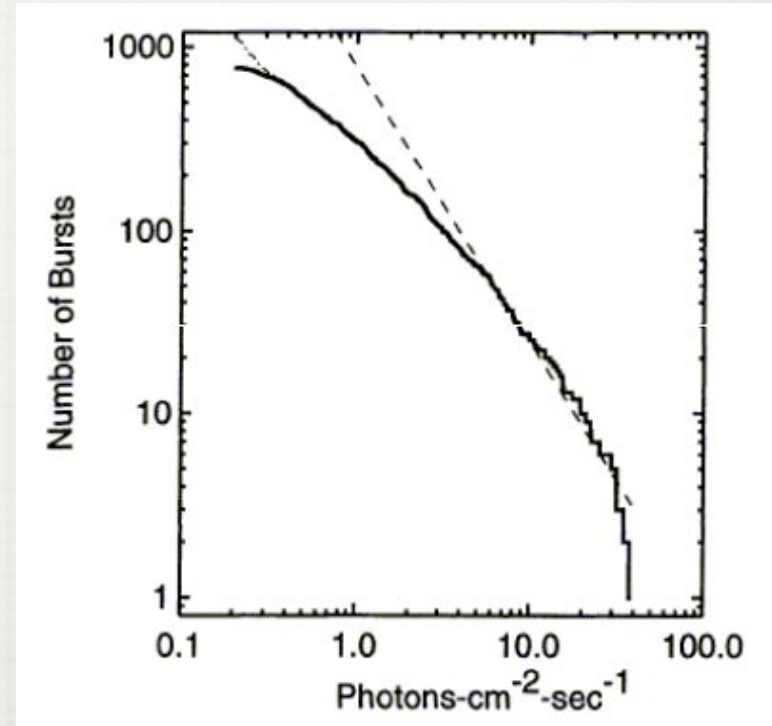


Fig. 11b

Spatial Distribution of Gamma-Ray Bursts



Completely isotropic

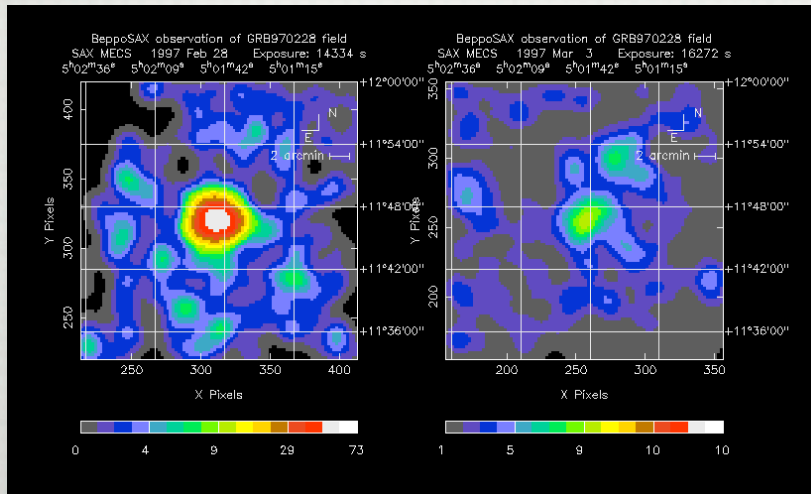


Deficit of faint GRBs compared with expectation in flat 3D space

GRBs are cosmological!

- A breakthrough in 1997, by discovery of “afterglows” in other wavebands than gamma-rays
- The brightest explosion in the universe!
 - 3×10^{54} erg = 3×10^{47} J
 - (isotropic radiation assumed)

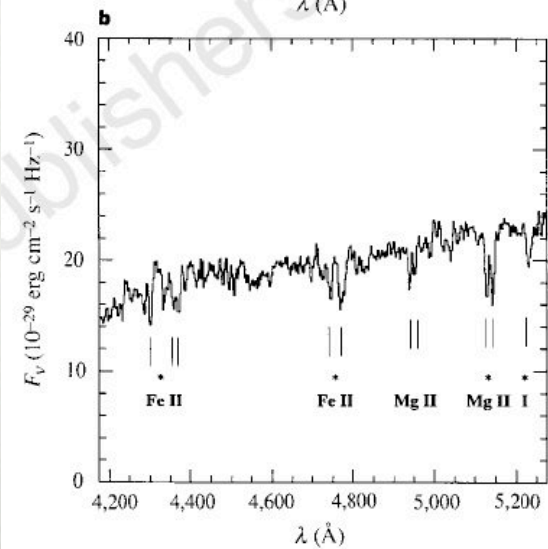
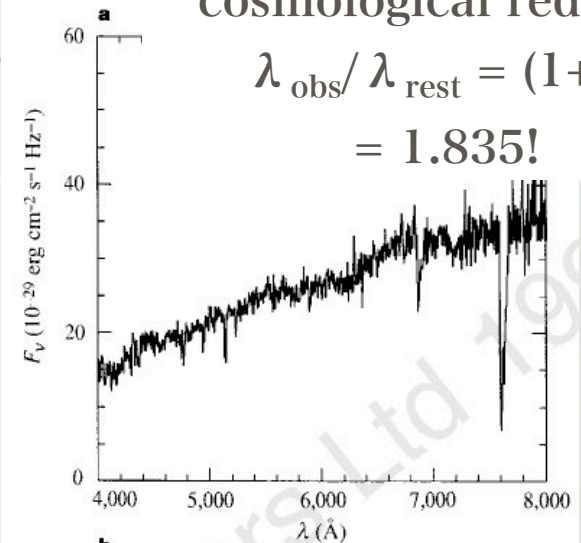
THE FIRST-DISCOVERED X-RAY AFTERGLOW



cosmological redshift

$$\lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{rest}} = (1+z)$$

$$= 1.835!$$



Various Energy Scales

□ lightning/thunder	10^{10} J
□ atomic bomb	10^{14} J
□ hydrogen bomb	10^{16} J
□ earthquake (Richter scale 8)	10^{17} J
□ rest mass energy (Mc^2) for 1 kg	10^{17} J
□ solar flares	10^{22-25} J
□ energy emitted by the Sun in 1 yr	1.3×10^{34} J
□ supernova (explosion energy)	10^{44} J
□ rest mass energy of the Sun (2×10^{30} kg)	2×10^{47} J
□ largest GRB (isotropic equivalent)	3×10^{47} J
□ Importance of GRBs in Astronomy	Priceless!

Stellar Evolution and GRBs, Supernova, Hypernova

massive stars

hypernova
GRBs
black holes

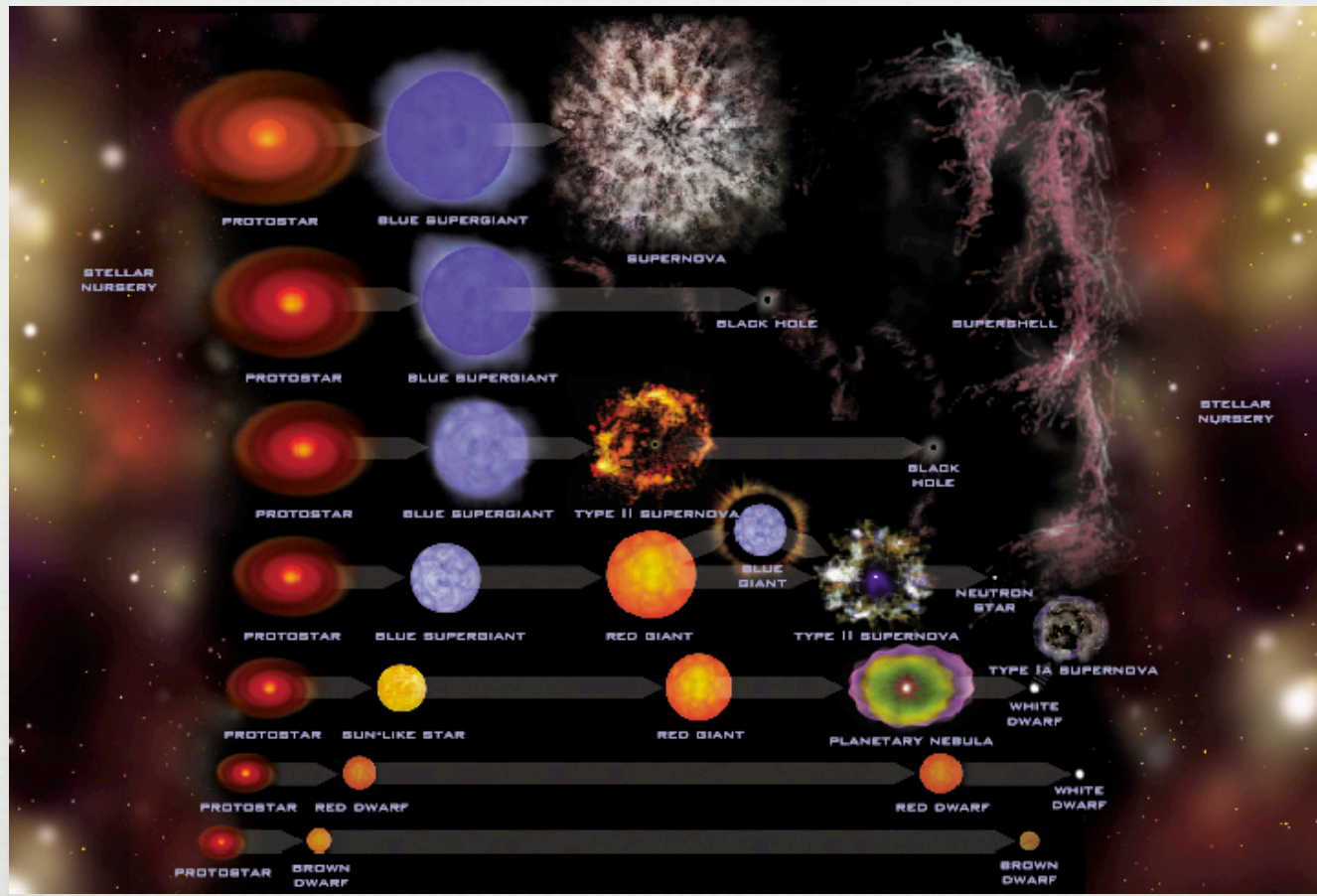
Sun-like stars

supernova
neutron stars

dwarf stars

white dwarfs

brown dwarfs

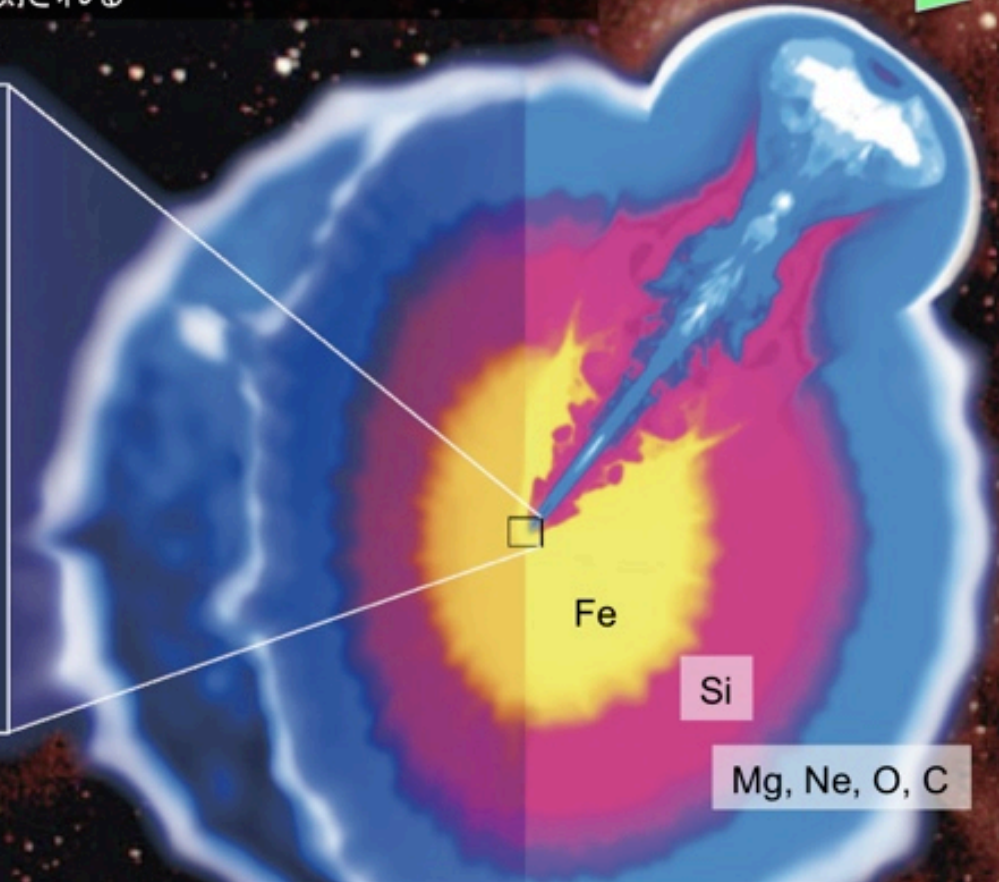
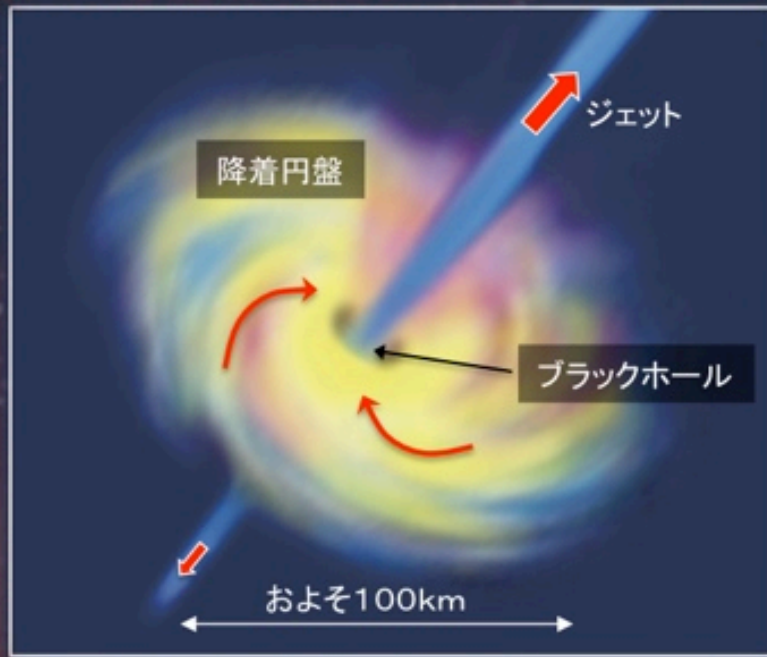


EVOLUTION

ガンマ線バーストの想像図

ほぼ光速のジェットが外層を突き破ったときにガンマ線バーストとして観測される

観測方向



中心部で重力崩壊によりブラックホールが生まれ、降着円盤とジェットが形成される

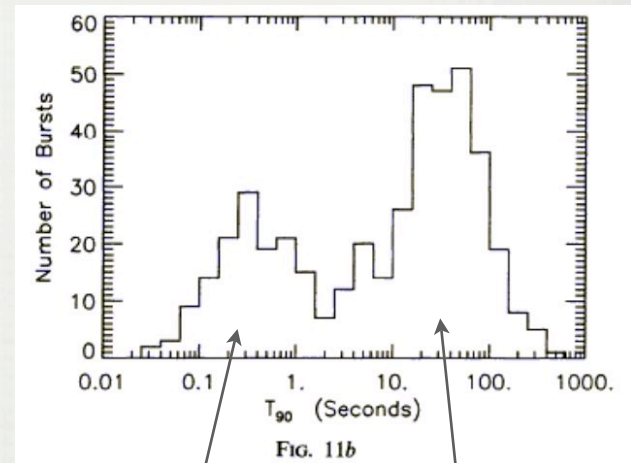
太陽の数十倍の重さを持つ大質量星
(水素、ヘリウムなどの外層がはがれている)

Another origin of GRBs?

- short duration GRBs occurs with a long delay time from star formation
 - Not a core-collapse supernova!
- Mergers of binary neutron stars or black holes?



DURATION DISTRIBUTION



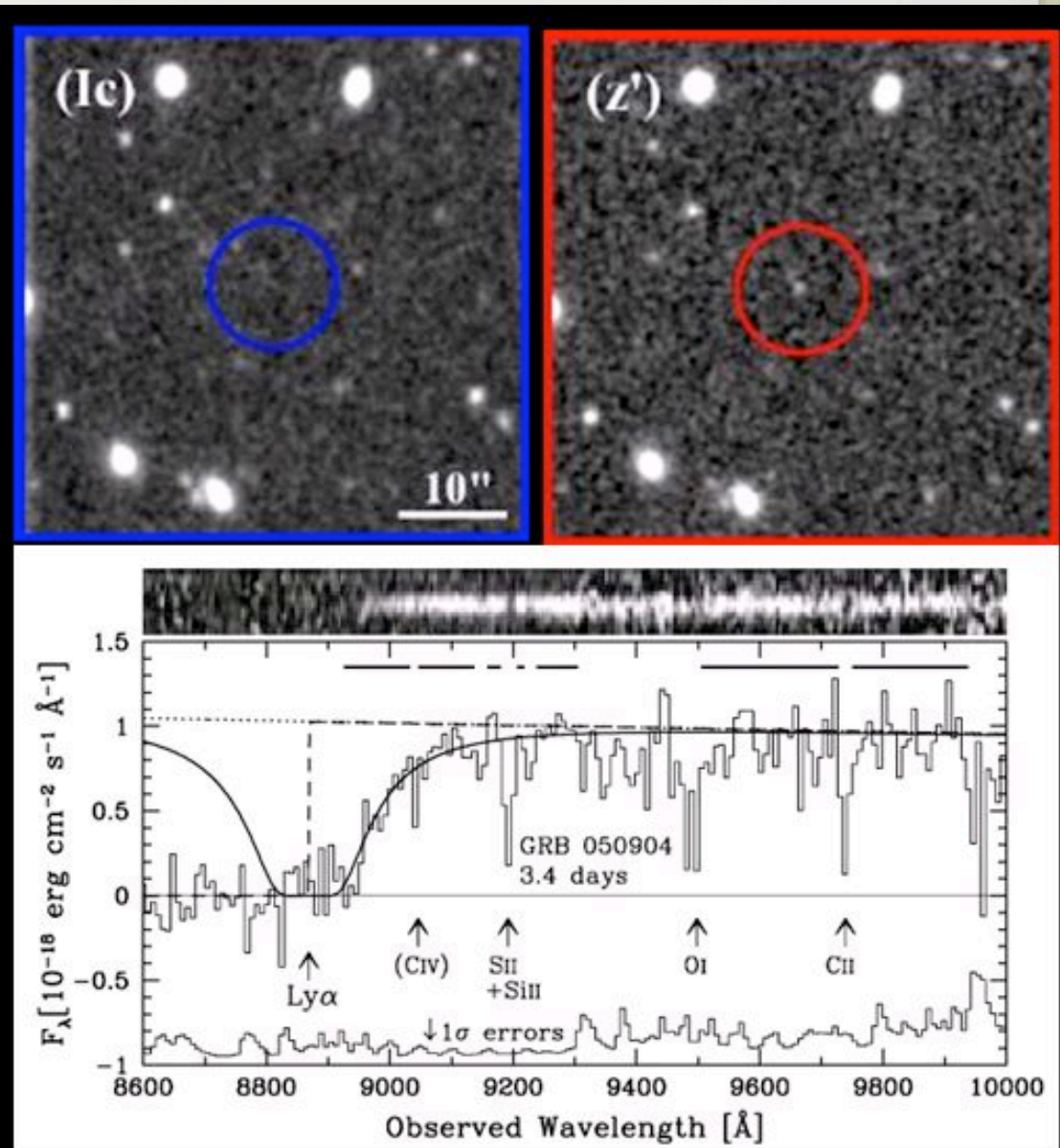
short
(merger?)

long
(collapsar)

High Redshift GRBs

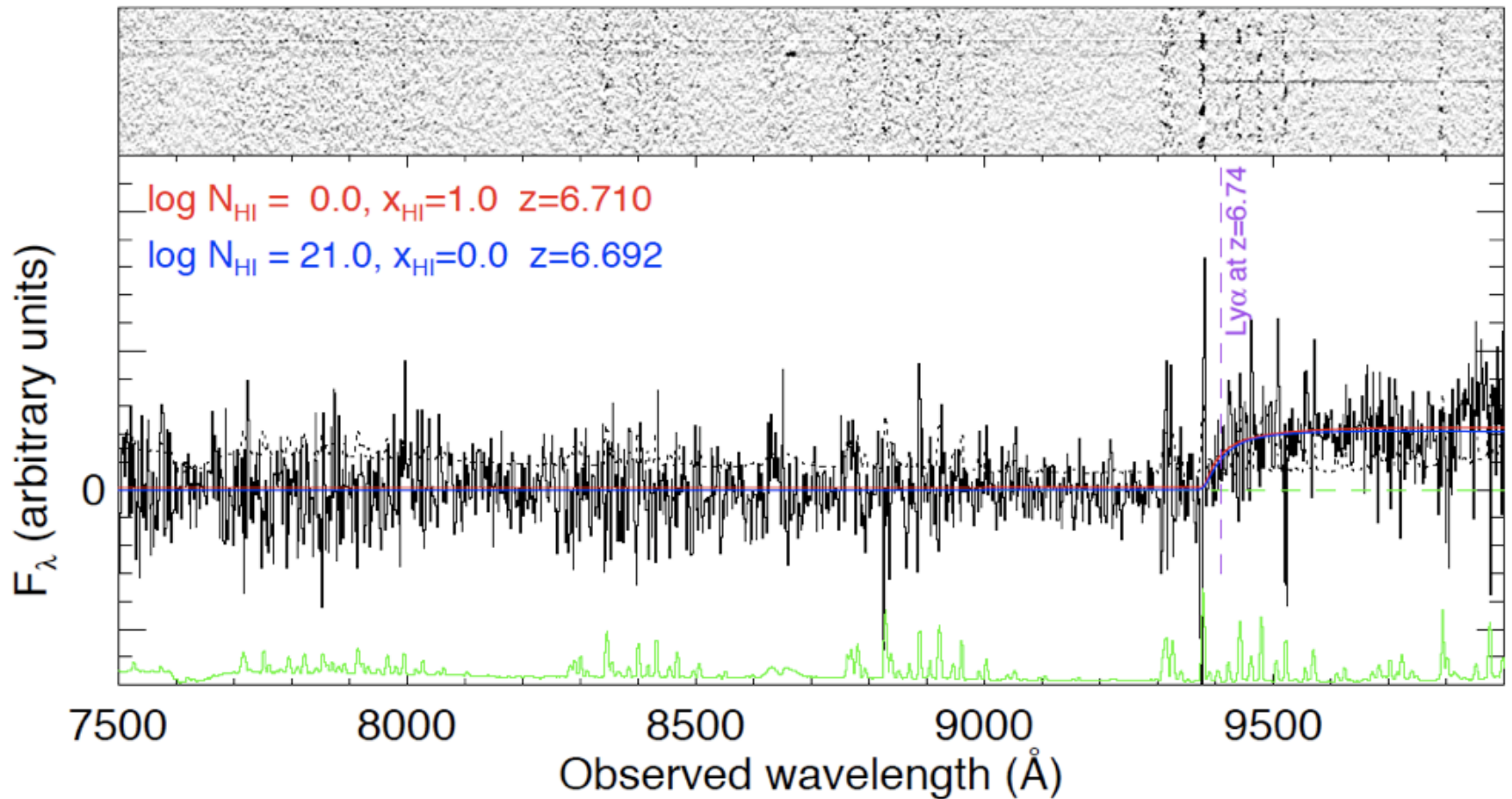
- GRB 050904 @ $z=6.29$
- すばる望遠鏡により日本チームが分光で z 確定
 - 京大からは太田、戸谷
- Kawai+'06

- 中性水素による減衰翼 (damping wing) の確認
 - 「宇宙最電離」への示唆
 - $z=6.3$ で宇宙はすでに電離
 - TT et al. '06



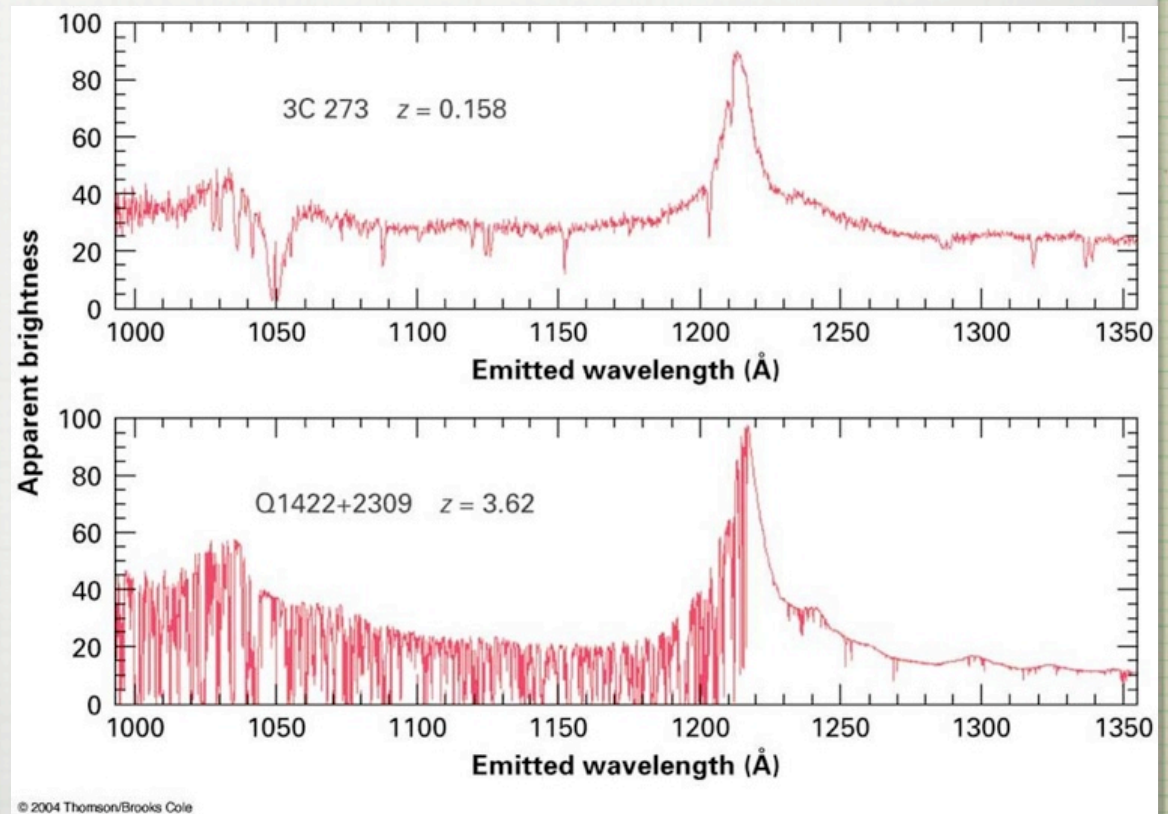
High Redshift GRBs

□ GRB 080913 @ $z=6.7$

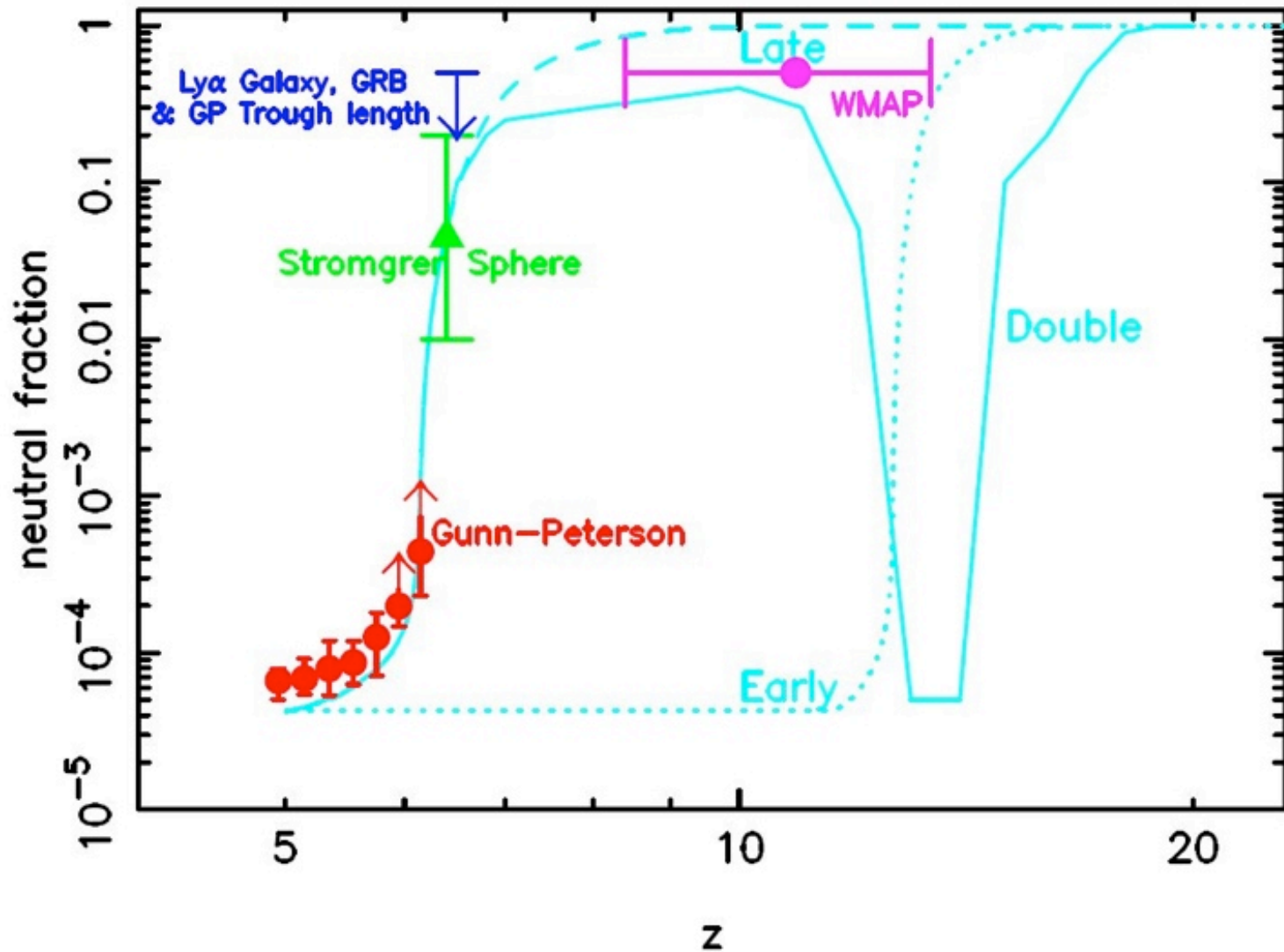


Reionization

- 宇宙の水素は誕生後40万年で電離状態から中性原子へ（晴れ上がり）
- 現在の宇宙でも水素が中性だとすると、銀河間空間の透明度は：
 - $\tau = n \sigma l \sim 10^5!$
 - 現在の宇宙の水素はほとんど電離されている
- 「宇宙の再電離」
 - いつ？
 - どうやって？
 - 初代銀河、星形成

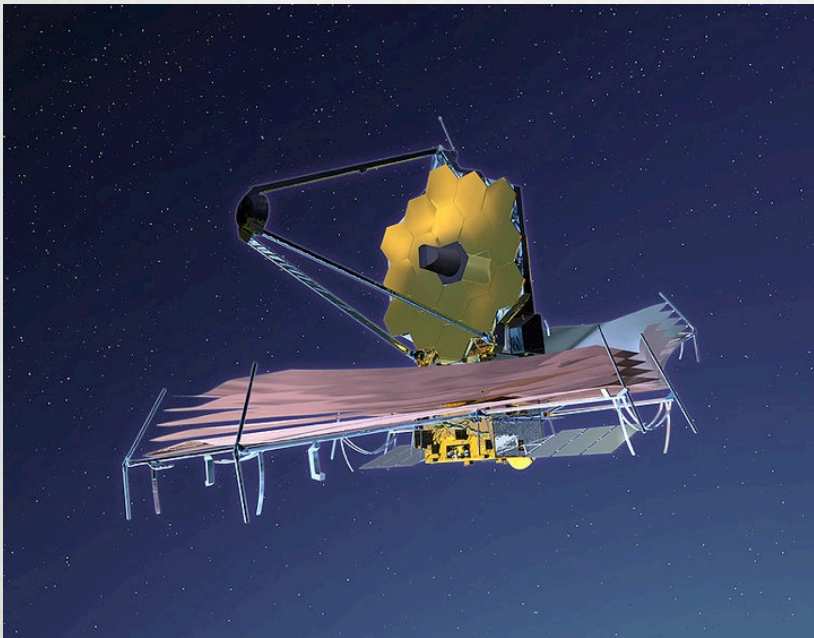


宇宙の電離史

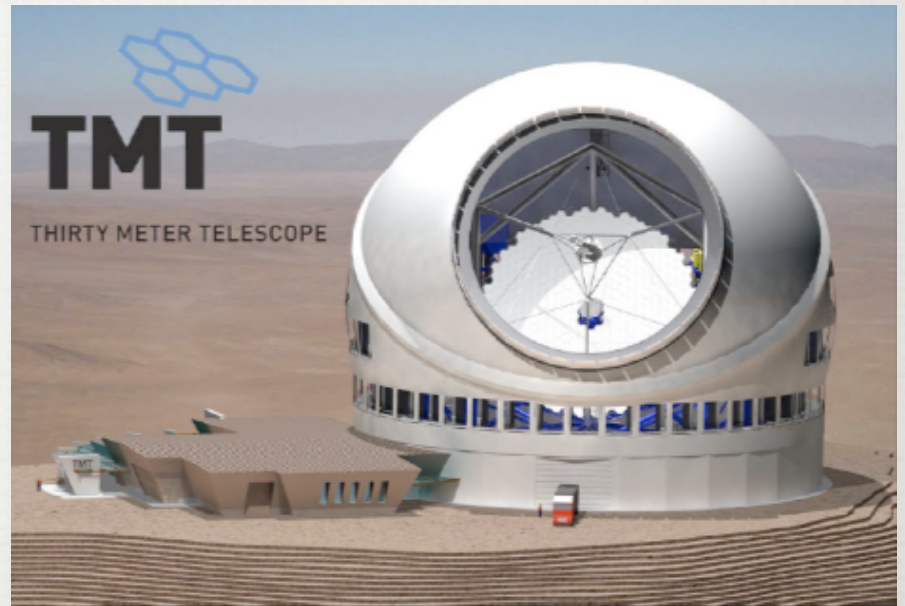


将来への展望

- さらなる遠方天体の探求



James Webb Space Telescope



Thirty Meter Telescope

将来への展望

□ 塵に隠された遠方天体の探索



Atacama Large Millimeter Array (ALMA)