

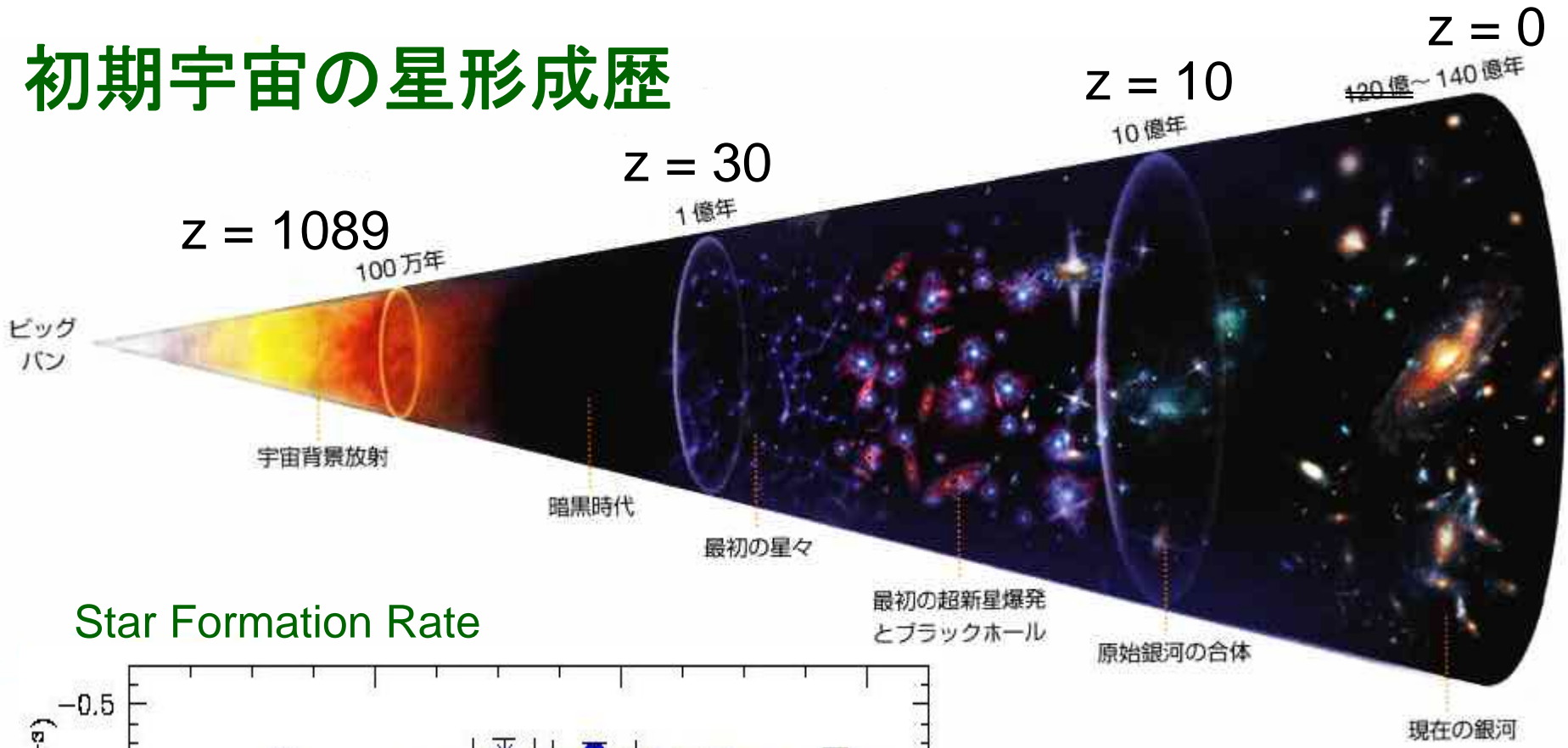
ガンマ線バーストと第一世代天体

金沢大学 自然科学研究科：米徳 大輔、村上 敏夫

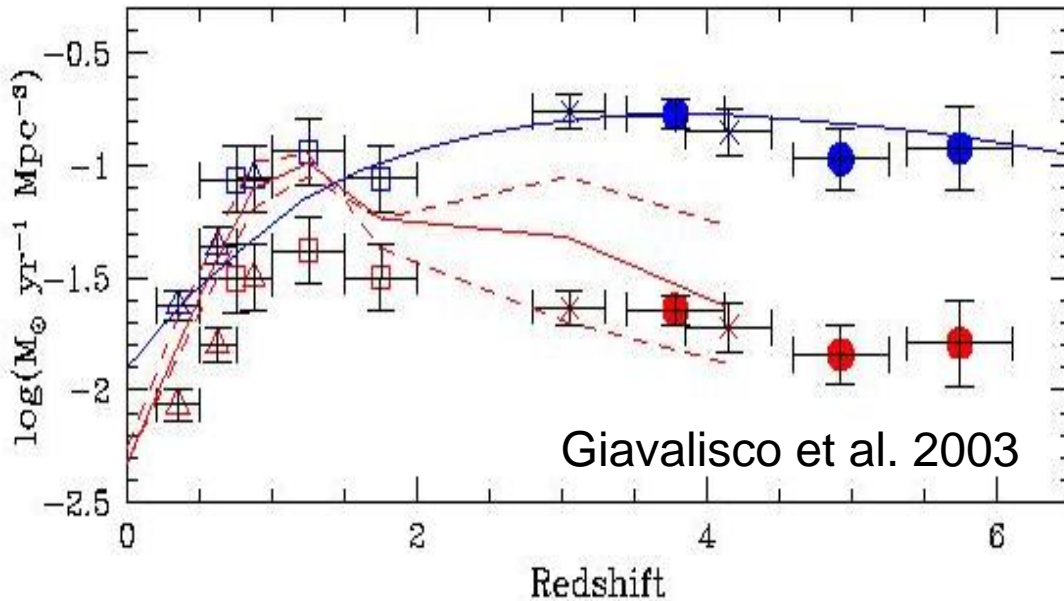
1. ガンマ線バースト
2. 距離指標としての $E_p - \text{luminosity}$ 関係
3. GRB の赤方偏移分布と初期宇宙の GRB 発生率
4. 宇宙再電離と銀河間空間の金属汚染
5. 赤外線背景放射の見積もり

yonetoku@astro.s.kanazawa-u.ac.jp

初期宇宙の星形成歴



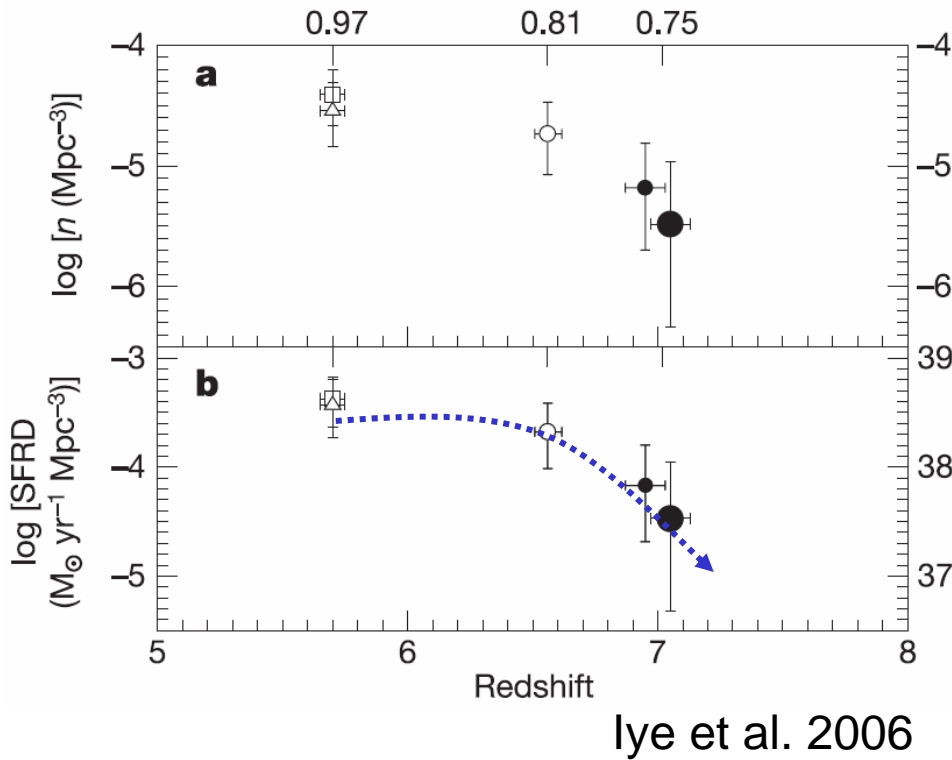
Star Formation Rate



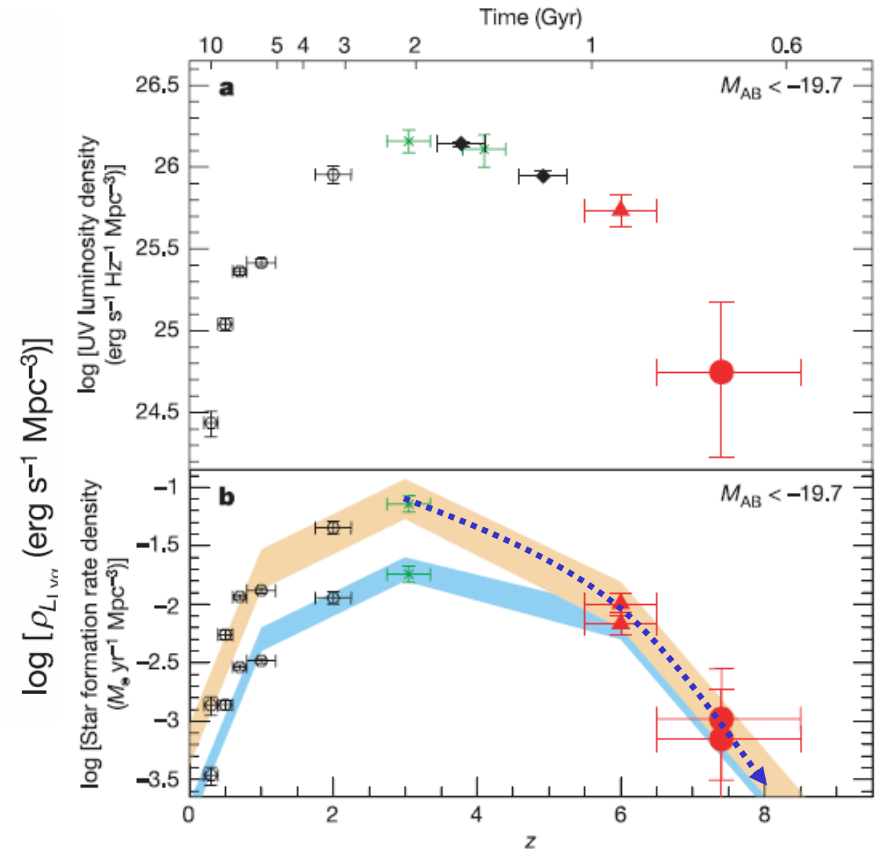
z=2 までは急激に増加し、それより遠方ではフラット。ガス、ダストによる強い吸収を補正する必要がある。

最新の Star Formation Rate

Subaru Deep Field



Hubble Ultra Deep Field

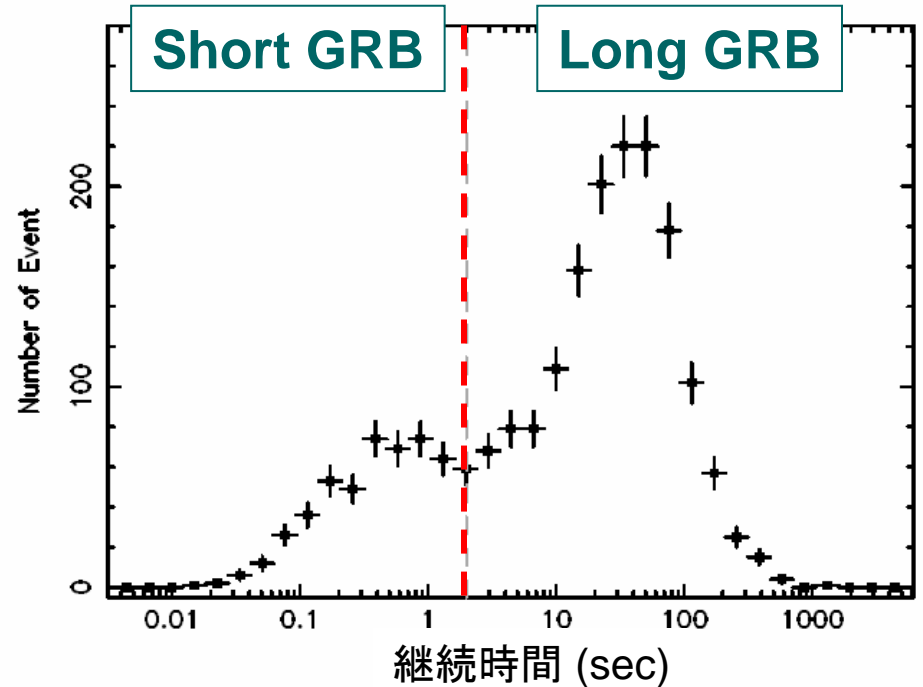
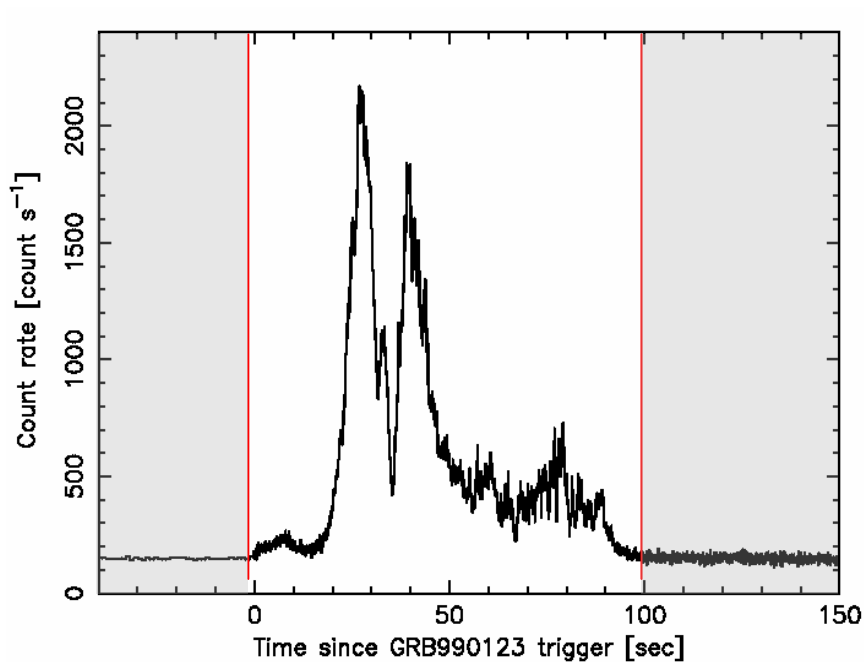


2006年9月14日号の Nature に掲載された
2つの star formation rate.

どちらも遠方では減少する傾向が見られている。

※ 吸収補正は行っていない。

ガンマ線バースト (GRB)



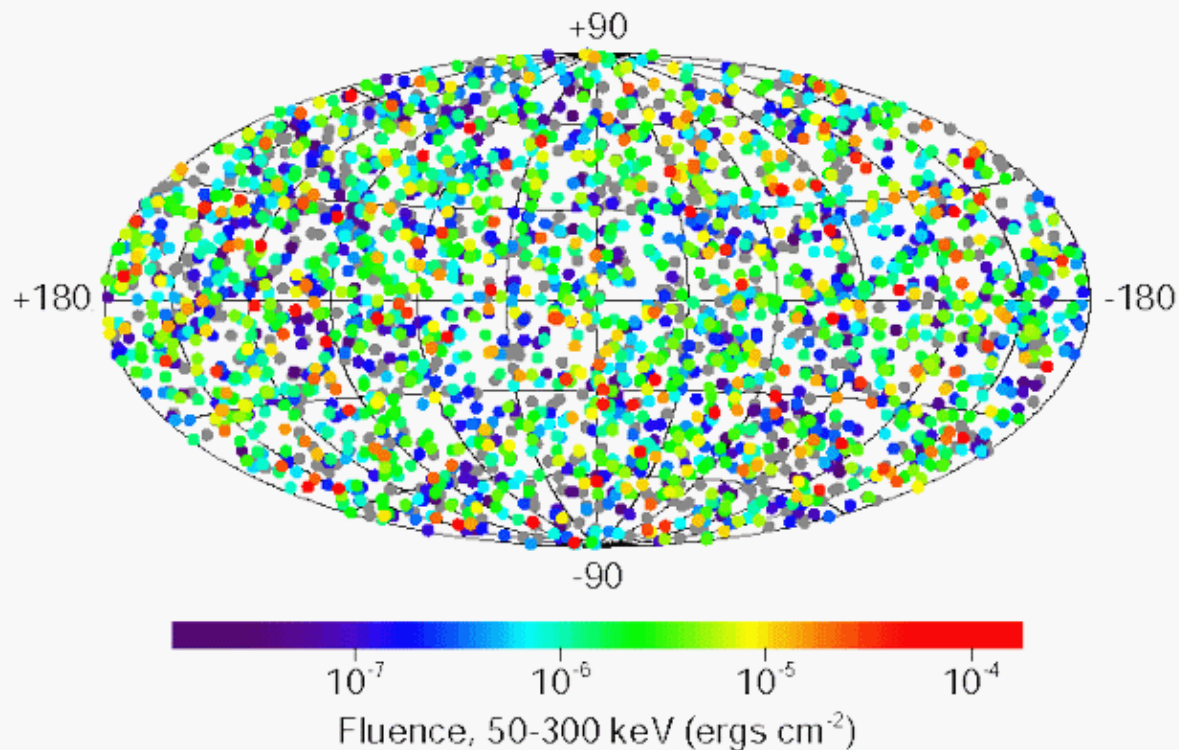
- ① **極めて明るい** (最大光度が 10^{54} erg/sec に達する例もある)
- ② **初期宇宙で発生** (大半は $z > 1$, 現在の最大赤方偏移は $z=6.3$)
- ③ **大質量星の崩壊** (GRB030329/SN2003dh の観測)

初期宇宙を見渡すプローブとして利用できる。

CGRO 衛星



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

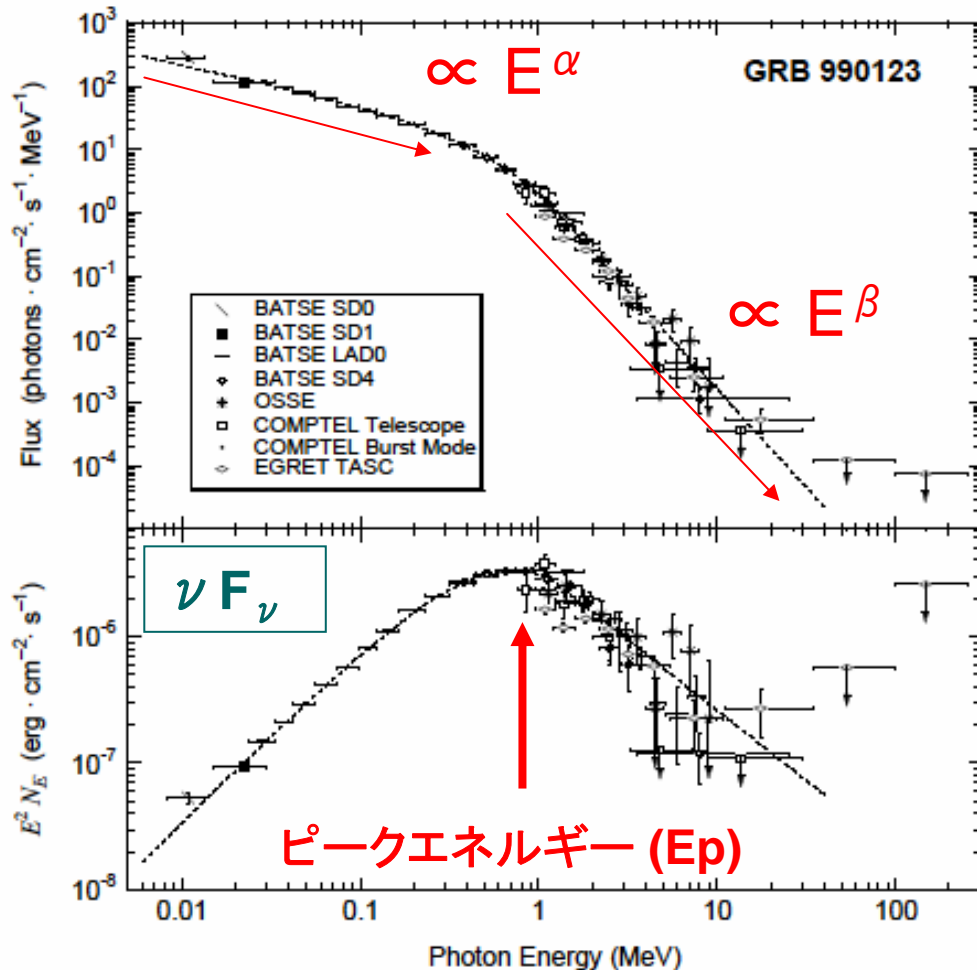


BATSE 検出器は2704例もの GRB を検出しているが、赤方偏移が同定されたのは 12 例のみ。

ガンマ線スペクトル

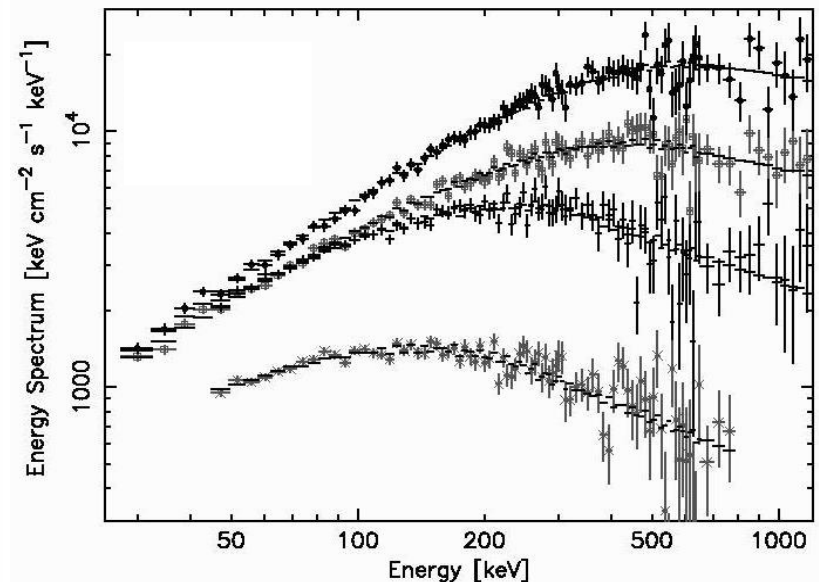
Band et al. 1993

$$N(E) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) & \text{for } E \leq (\alpha - \beta)E_0, \\ A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}} \right)^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha) & \text{for } E \geq (\alpha - \beta)E_0. \end{cases}$$

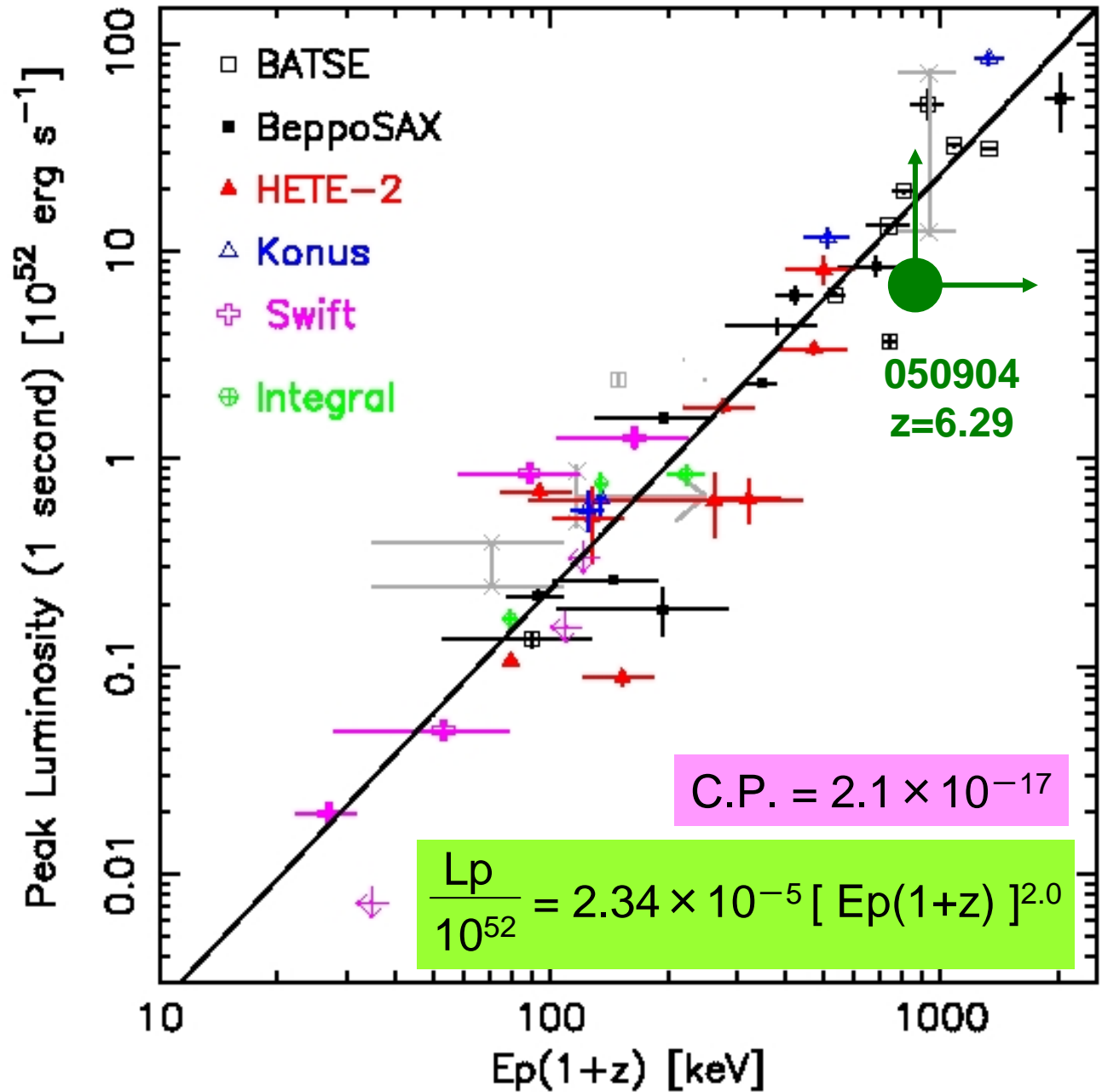


νF_ν スペクトルの極値をピークエネルギー (E_p) と呼び、 $E_p = (2 + \alpha) E_0$ で表される。

見かけのスペクトル



Ep – Luminosity (Yonetoku) Relation



CGRO-BATSE

970508	970828	971214
980326	980329	980703
990123	990506	990510
991216	000131	

Beppo-SAX

970228	980613	990705
990712	000214	010222
011121	011211	020405

HETE-2

010921	020124	020813
021004	021211	030226
030328	030329	030429

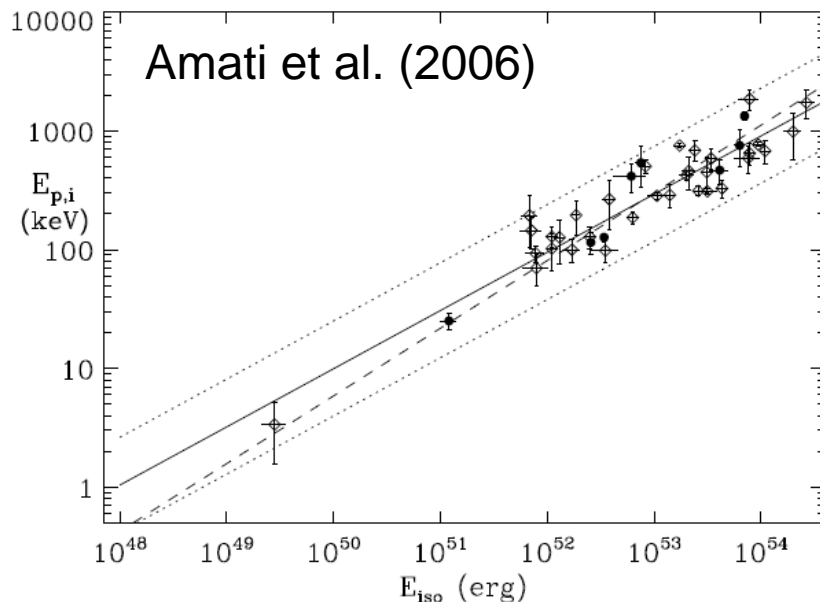
Swift-Konus

050603	050525	050401
040924	050904	050315
050319	050406	050416
051016	060108	060614

Integral

041218

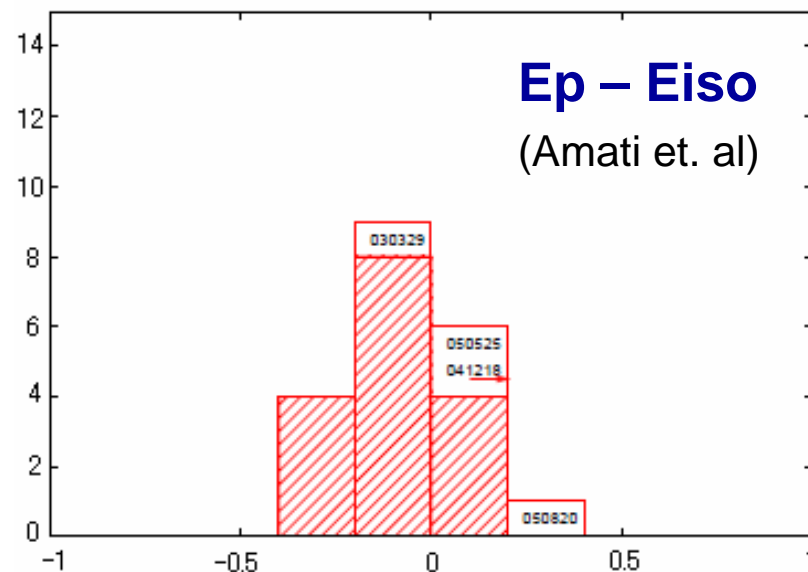
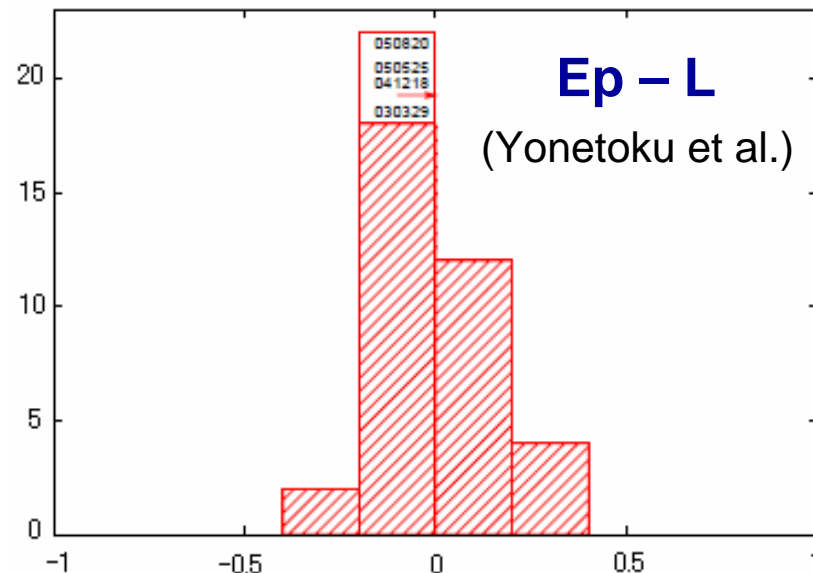
Ep – Eiso 関係



Ep – Eiso (Amati) relation も非常に強い相関を示すが、Ep – L と比較してデータ分散が大きい。

距離指標としては Ep – L 関係が適切

相関関係の分散幅



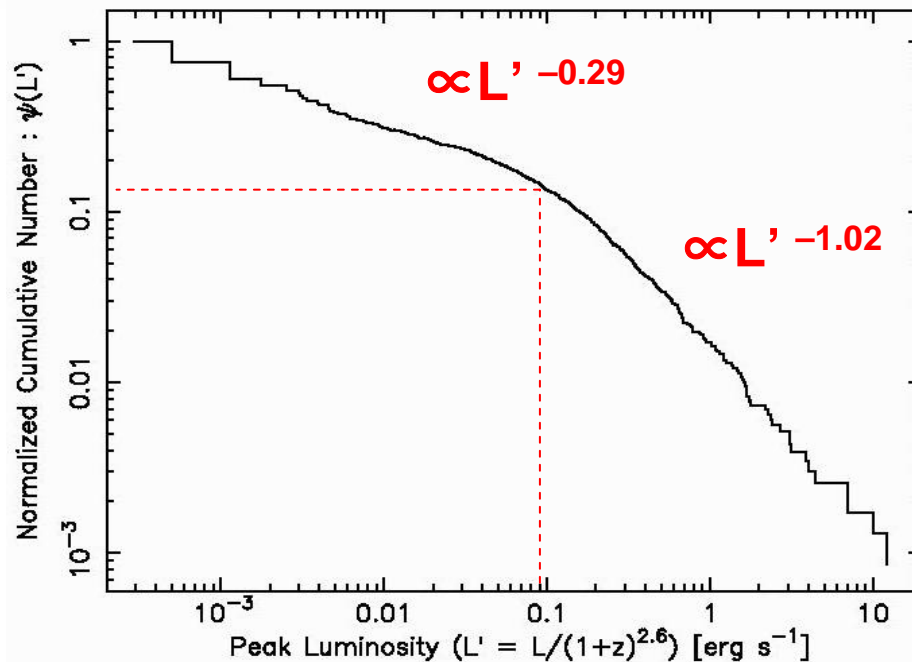
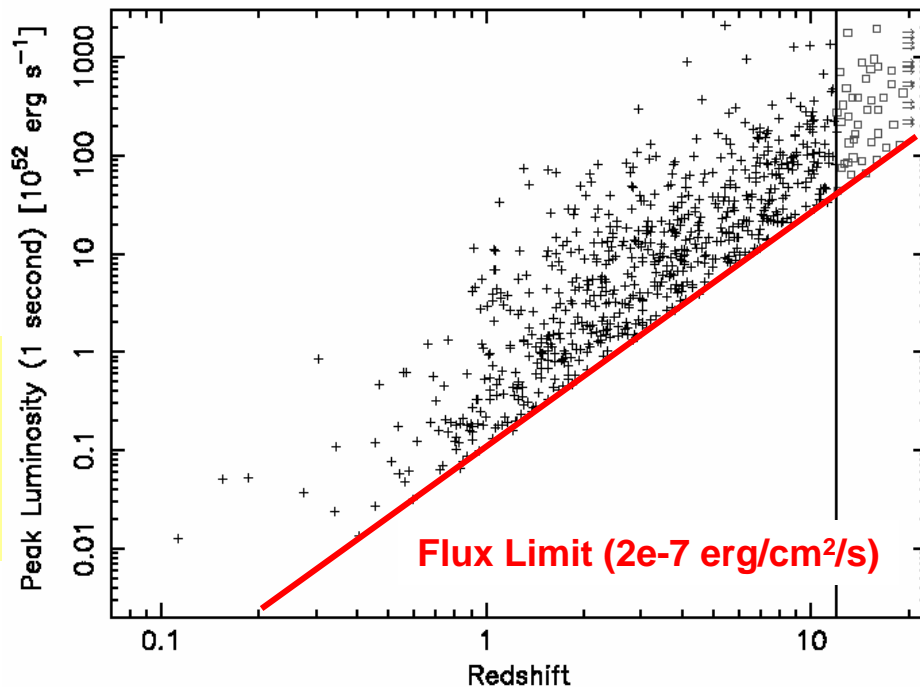
赤方偏移分布

Ep - L 関係から距離の推定

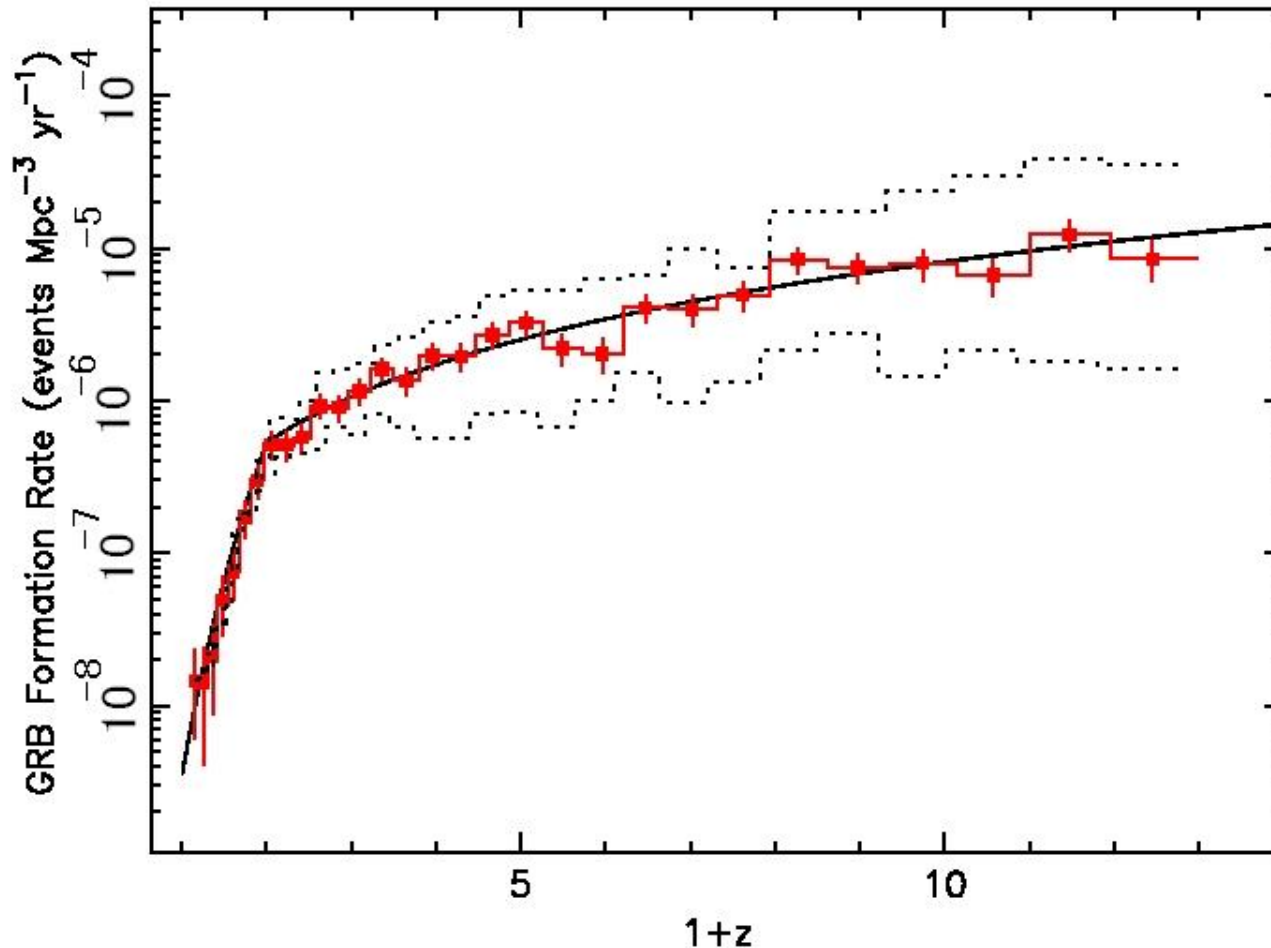
$$\frac{d_L^2}{(1+z)^{2.0}} = \frac{2.34 \times 10^{47}}{4 \pi F_p} E_p^{2.0}$$

Luminosity Function

各赤方偏移で Luminosity Function が成立すると仮定し、Flux Limit よりも暗い GRB の数を見積もる。



GRB Formation Rate



BATSE の
実効観測時間 = 4.5 年
GRB の数 = 700 events

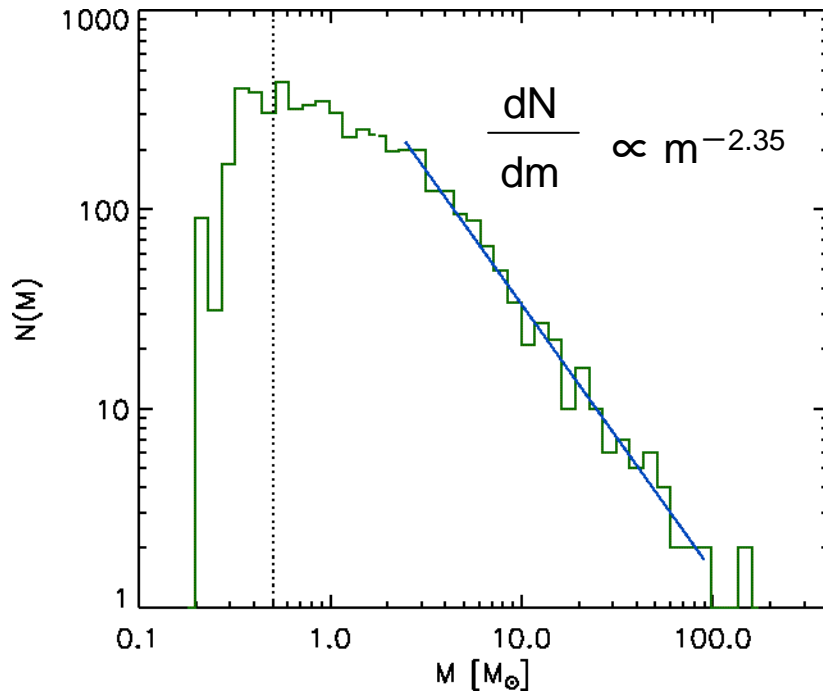
ジェットの開き角 $\theta_j = 0.1$ radian

$$d\Omega = \frac{\theta_j^2}{2} \text{ で立体角補正}$$

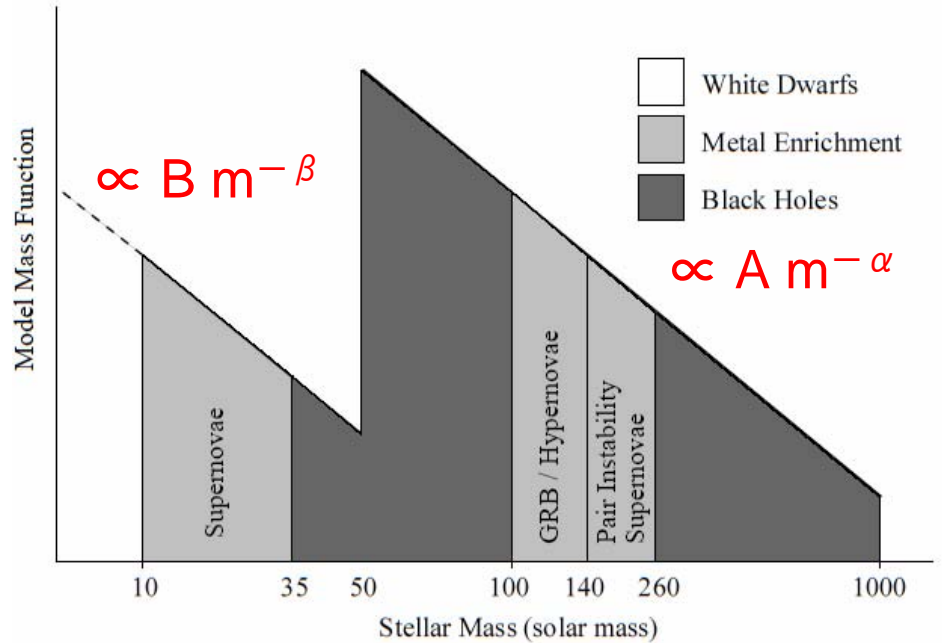
星の初期質量関数(IMF)

● 近傍の星

Salpeter (1955)



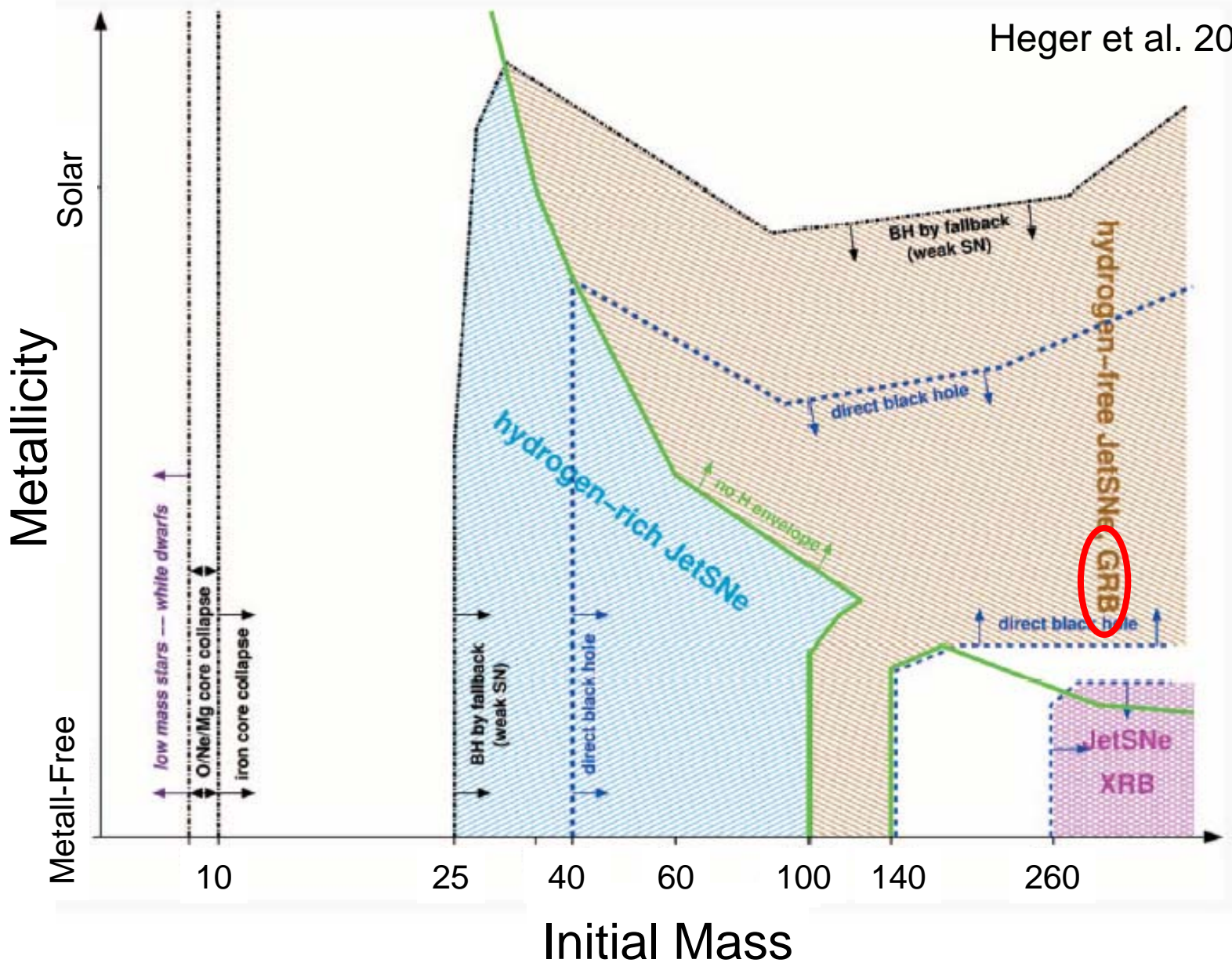
● Pop-III 星 (Nakamura & Umemura 2000)



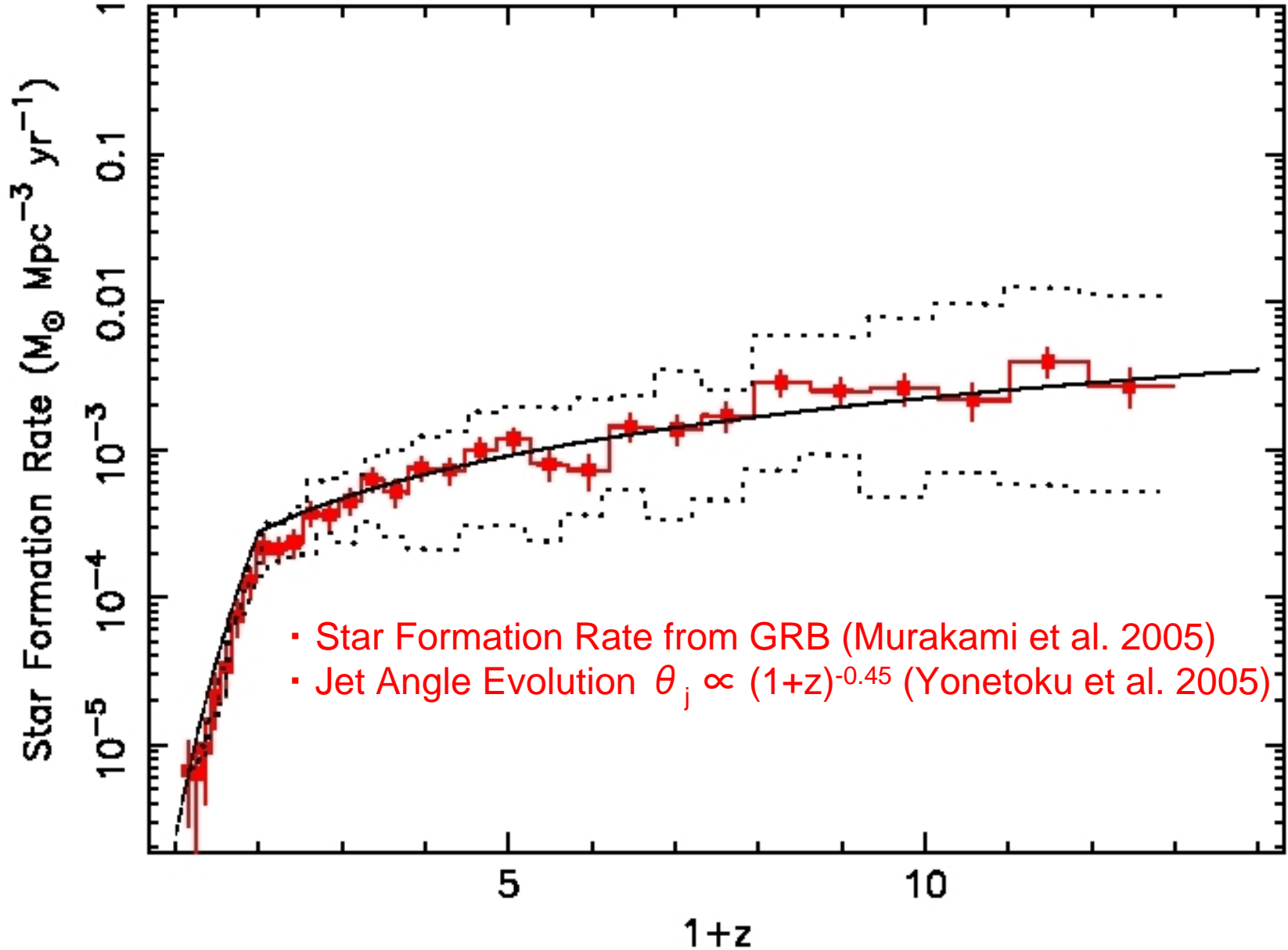
($\alpha = \beta = 2.35$ として計算する)

初期宇宙では $50M_{\text{sun}}$ 以上の大質量星が多く作られる。
その一部は、一生の最期で GRB を発生すると考えられる。

Heger et al. 2003



Star Formation Rate



宇宙の相転移

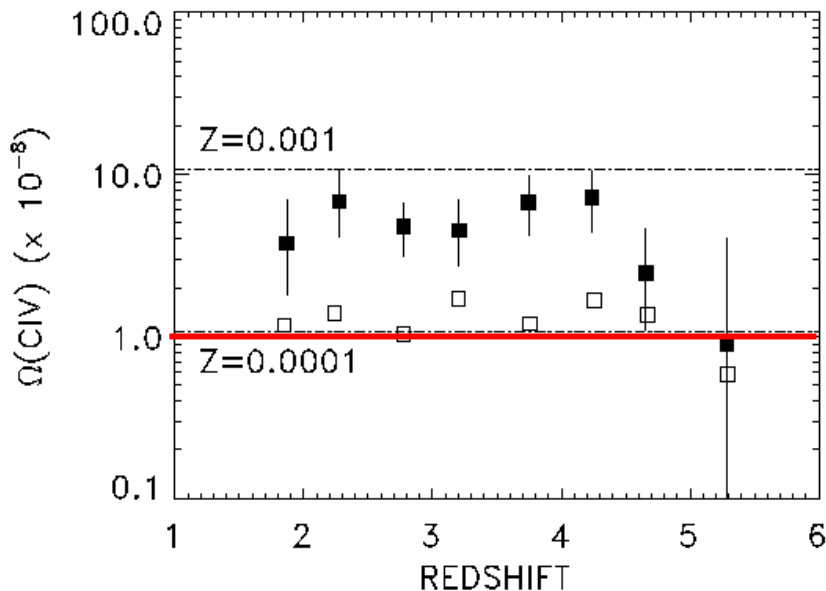
ビッグバンで作られる元素は水素とヘリウム (電離状態)

$z = 1089$: 宇宙の晴れ上がり (中性化: CMB)



$z = 0$ (現在): 電離状態

銀河間空間の金属量 (Songaila 2001)



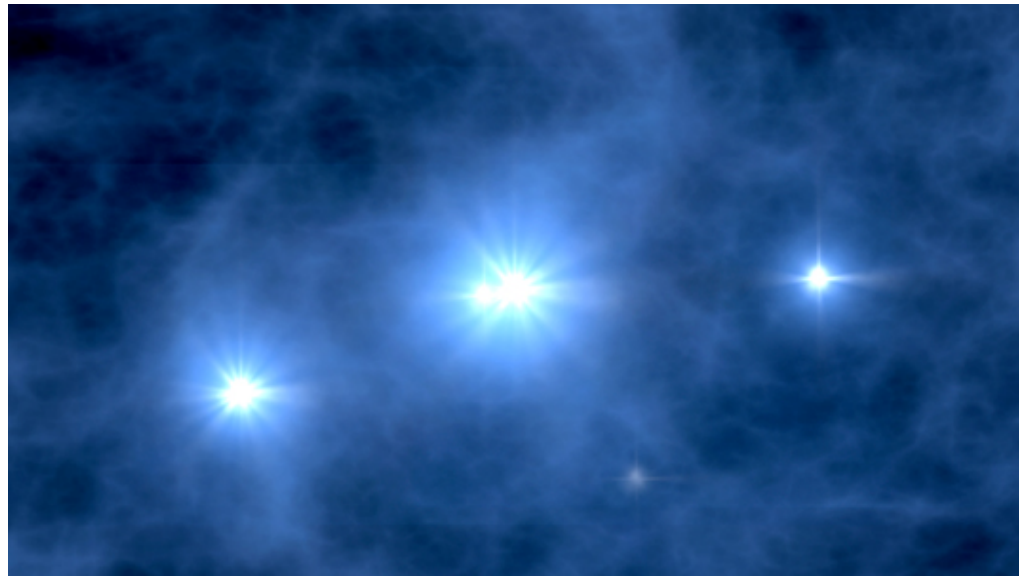
第一世代星の星生成率で宇宙の再電離を説明できるか？

銀河間空間に一様に分布する $10^{-4} Z_{\text{sun}}$ の金属元素は、いつ、誰が作ったのか？

赤外線背景放射は第一世代星から発せられた光なのか？

宇宙再電離

50 M_{sun} 以上の大質量星は
温度 10^5 K の黒体輻射で
エディントン光度で輝く。



WMAP より

$$L_{\text{EDD}} = 1.3 \times 10^{38} (M / M_{\text{sun}}) \text{ [erg / sec]}$$

$$\text{Pop-III の SFR [} M_{\text{sun}} / \text{Gpc}^3 / \text{yr]}$$

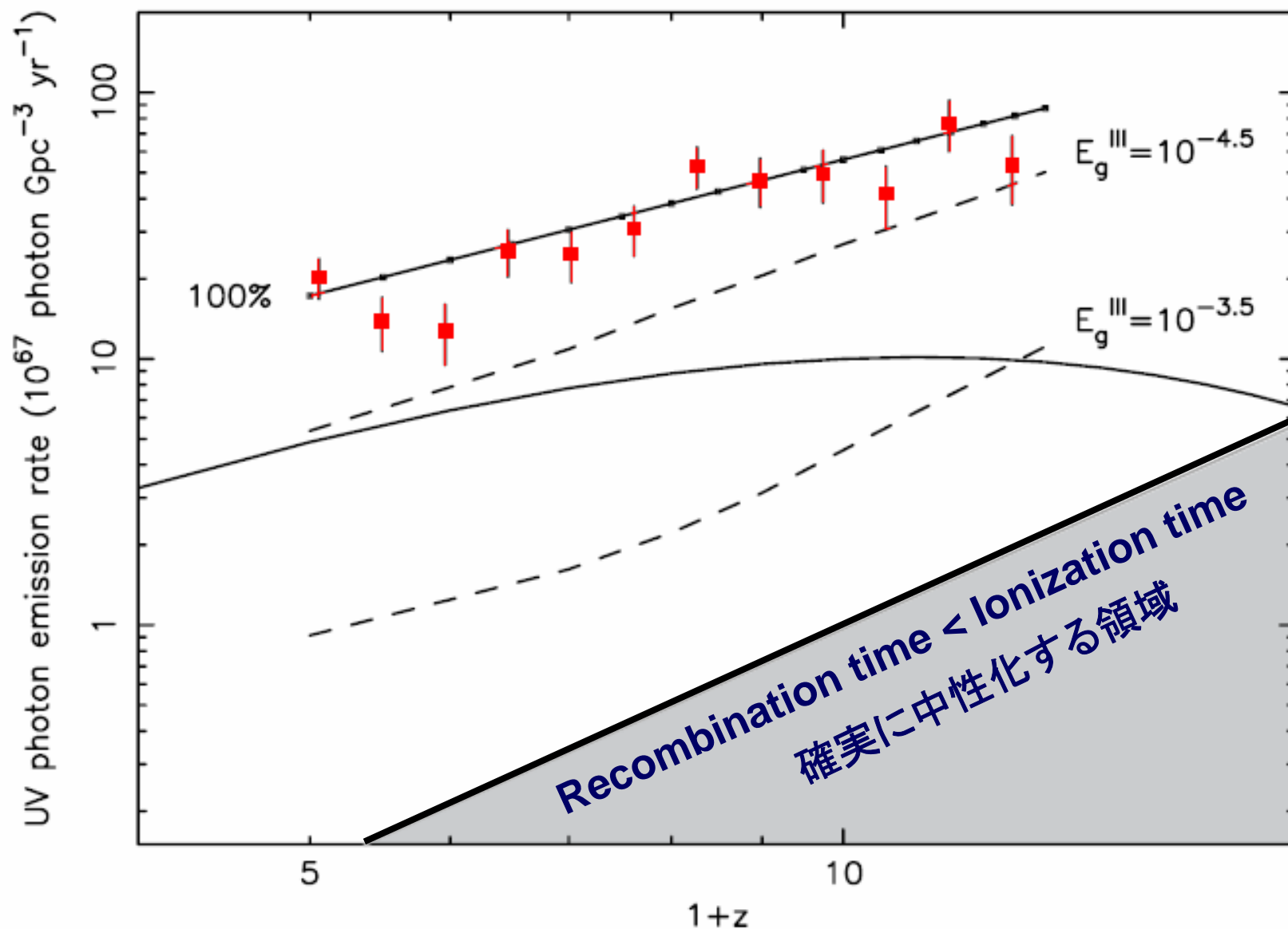
$$\text{紫外線光子 (} h\nu > 13.6\text{eV)} = 8.75 \times 10^{68} \text{ [photon / Gpc}^3 / \text{yr]}$$

$$\text{バリオン(水素)数密度 } \frac{\Omega_m \rho_c}{m_p} = 7.66 \times 10^{75} \text{ [Gpc}^{-3}\text{]}$$

宇宙は 10^{7-8} 年の間に、Pop-III 星によって再電離できる。

電離状態の時間発展

Murakami, Yonetoku et al. 2005



銀河間空間の金属汚染

質量レンジ毎の星生成率

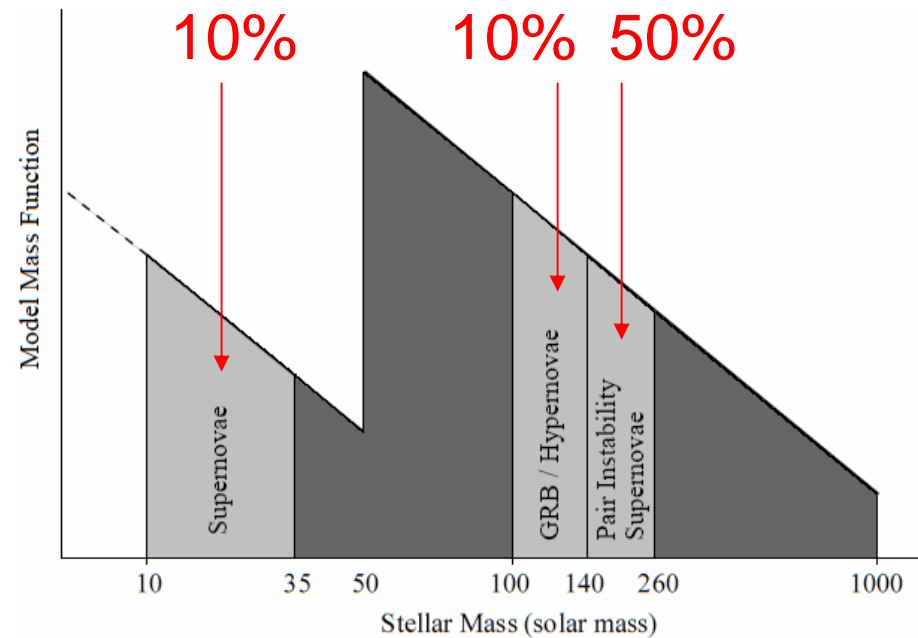
$$\dot{M}_{\text{SN}} = 7 \times 10^2 \quad (10 < m < 50)$$

$$\dot{M}_{\text{GRB}} = 2.3 \times 10^6 \quad (100 < m < 140)$$

$$\dot{M}_{\text{pair}} = 3.7 \times 10^6 \quad (140 < m < 260)$$

$$(M_{\text{sun}}/\text{Gpc}^{-3}/\text{yr})$$

金属元素の合成量 (Heger et al. 2002)



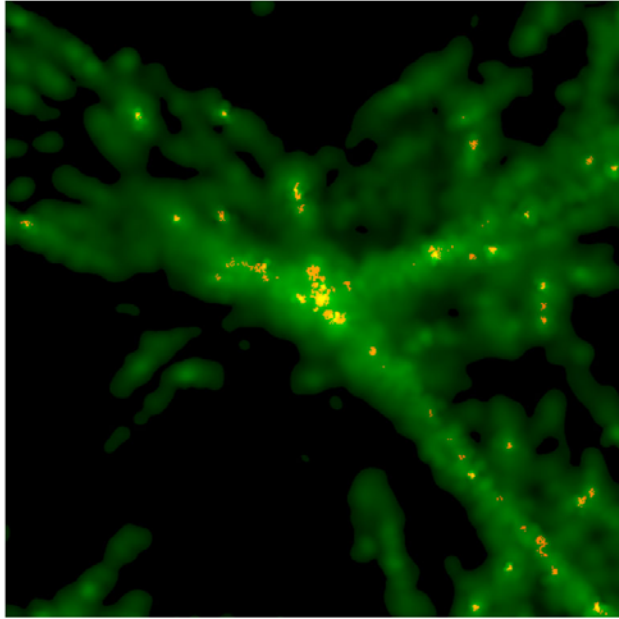
Pop-III 星の爆発によって撒き散らされる金属元素量は

$$\dot{M}_{\text{metal}} = 2 \times 10^6 (M_{\text{sun}}/\text{Gpc}^{-3}/\text{yr})$$

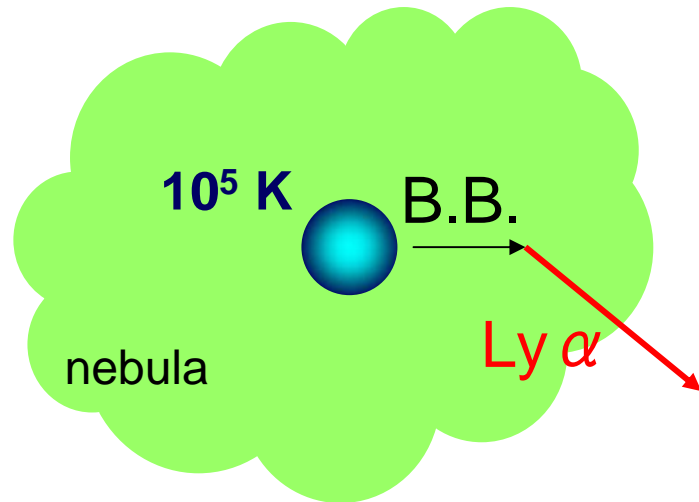
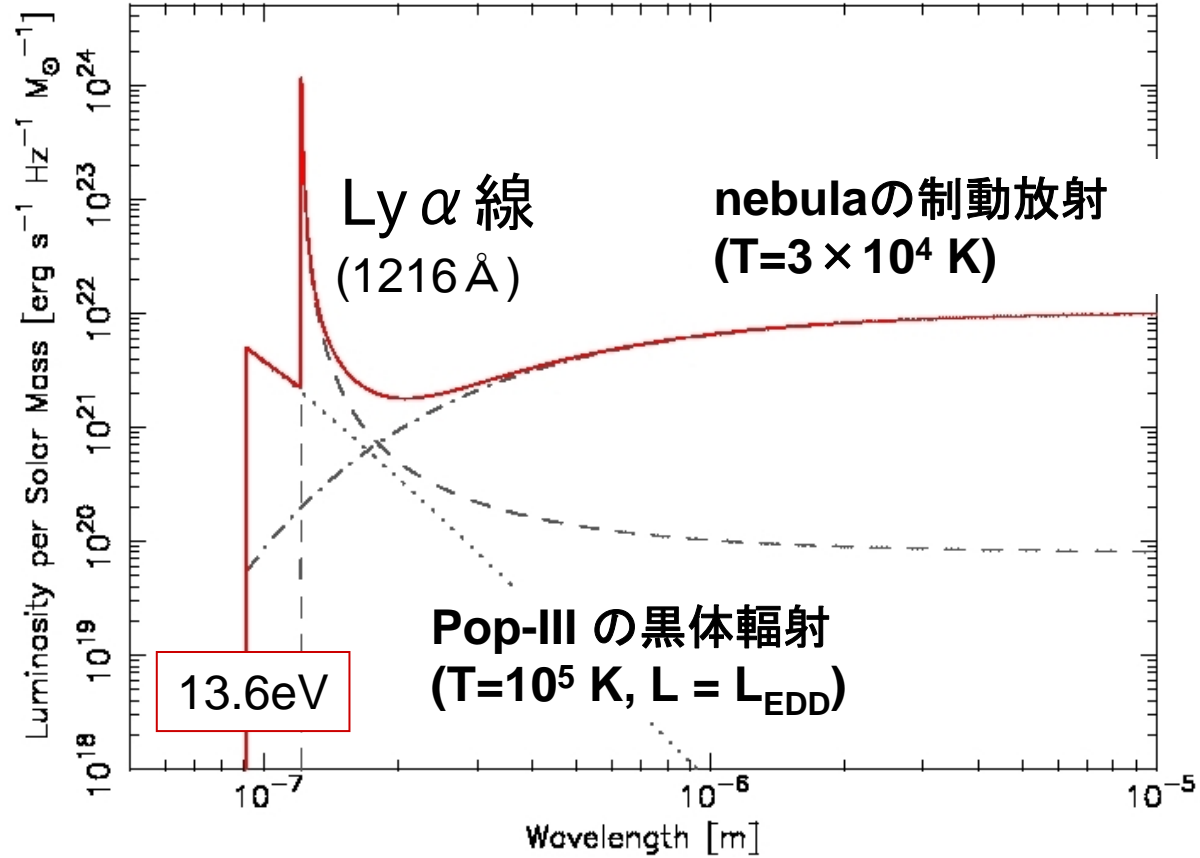
10⁷ 年以上、Pop-III 星が生存を続ければ、銀河間空間の金属量は $Z = 1.2 \times 10^{-4} Z_{\text{sun}}$ に達する。

Pop-III 周辺のスเปクトル

$f_{\text{esc}} = 0$ の場合



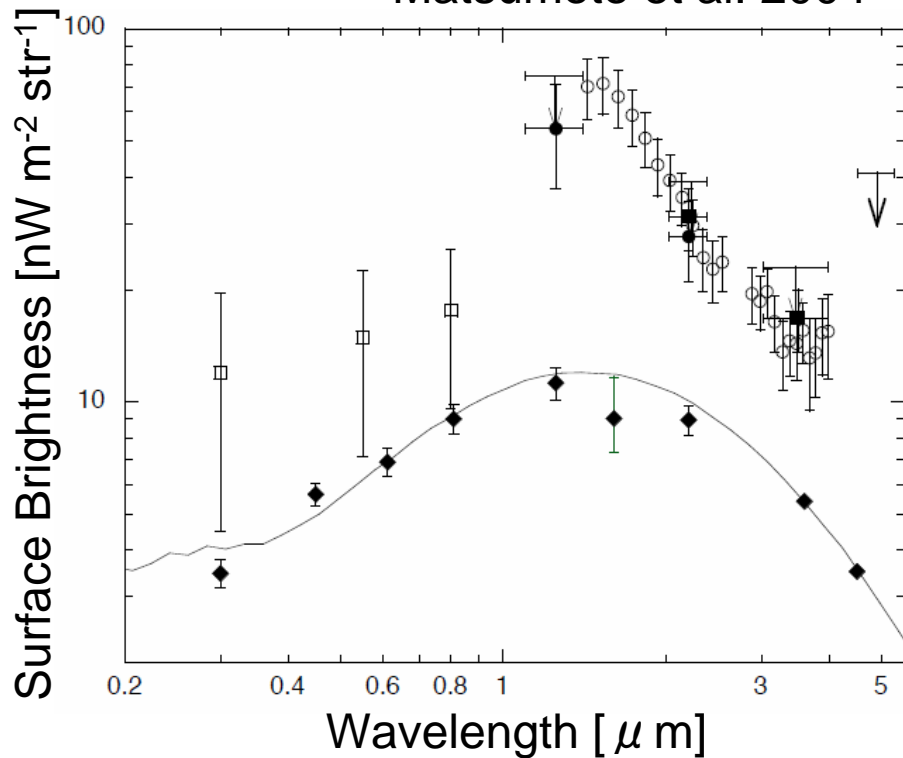
(Barton et al. 2004)



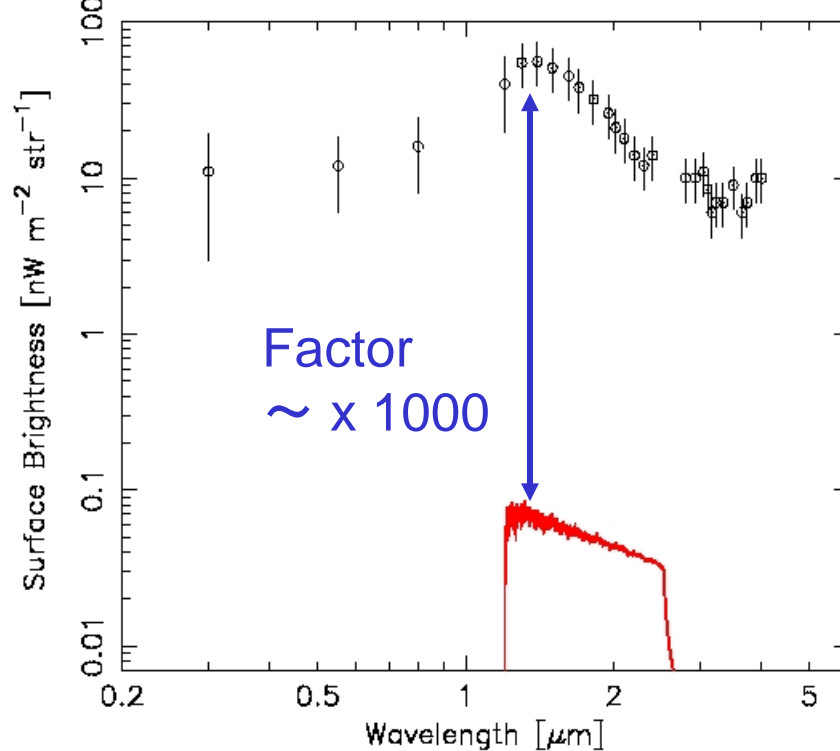
$$\nu_{\text{obs}} I_{\nu} = \frac{c}{4\pi} \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} dz \left| \frac{dt}{dz} \right| \frac{\nu(z) L_{\nu}(z) \rho(z) \tau}{(1+z)}$$

赤外線背景放射との比較

Matsumoto et al. 2004



$z_{\min} = 9$, $z_{\max} = 20$ まで拡張



**GRB 発生率から求めた Pop-III 星生成率では、
IRTS で観測された赤外線背景放射を説明できない。**

まとめ

- GRB のガンマ線スペクトル中に $E_p - L$ relation を発見した。
- $E_p - L$ 関係を距離指標として、GRB で暗黒時代を切り開き Pop-III Star Formation Rate を導出した。

- (1) **Pop-III 星によって宇宙再電離は可能。**
その後の星の進化によっては再々中性化へ向かう可能性もある。
- (2) **銀河間空間の重元素は宇宙がまだ小さかった時代に、Pop-III 星によって撒かれた可能性を観測的に示した。**
- (3) **GRB-SFR では赤外線背景放射の強度を説明できない。**

我々はガンマ線バーストという現象を通じて、既に暗黒時代を観測しているはずである。