大規模銀河形成シミュレーションで探る ガンマ線バースト発生率の見積もり

加藤 貴弘 (東京大学 宇宙理論研究室)

Abstract

先行研究では観測的な単位体積あたりのガンマ線バースト (GRB) 発生率と星形成率密度の比例係数が $z < 4$ において，$(1+z)^{0.5}$ に比例していることが示唆されており，ある閾値以下の金属量を持った銀河で GRB が起こると仮定し，その関係の時間進化を説明している．しかし，観測的に見積もられた金属量-銀河星質量の関係を用いているため不定性が大きく，$z > 4$ では前述の関係を用いた星形成率密度と既存の観測で得られた星形成率密度との間に不一致が生じてしまう．本研究では Roberson & Ellis (2012) の手法を参考に，Okamoto et al. (2014) による銀河形成シミュレーションの結果を用い，遠方宇宙の GRB の発生率を算出する．そこから，観測的には外挿でしか見積もられていない $z > 4$ における GRB 発生率-星形成率密度の関係を考察した．シミュレーション中の銀河に金属量の閾値を設けるだけでは観測されるガンマ線バースト数を再現できない．銀河の金属量と星形成率に対する閾値を設けることで観測を再現可能であることが分かった．ここから遠方宇宙においてシミュレーション中で発生する GRB の数と観測から見積もられる数の比較が可能になる．本研究の結果は既存の観測 (Berger et al. 2013) の結果と比較可能なものになり，GRB による銀河の星形成史の探求の足がかりとなる．

1 Introduction

現代の観測的宇宙論はコンピュータと観測器の発展とともに，第一原理的な計算により，観測される宇宙を再現可能になってきている．実際に，大規模銀河形成シミュレーション Okamoto et al. (2014) のように，観測とシミュレーションから得られる星形成率 (SFRD) などの物理量が観測と一致する銀河形成モデルが提唱されている．]fig/okmtsfrd.eps 更なるシミュレーションの精度向上を見越し，シミュレーションと観測宇宙の比較対象を広げることで，シミュレーションの妥当性を多方面から調べる事ができる．

一方，現在の観測ではその発生機構は明確に分かっていないものの，様々な突発天体現象を捉えることができるようになってきた．変動時間の長いガンマ線バースト (GRB) は大質量星の最期の爆発である重力崩壊型の超新星爆発 (SN) と関連していると考えられている (S.E.Woosely & J.S. Bloom 2006)．また大質量星の寿命は短いことから，銀河の星形成率 $[M_\odot/\mathrm{yr}]$(SFR) の指標になっている．これらのことから，宇宙の時代ごとの GRB 数は，その時代の宇宙の星形成率の平均である星形成率密度 (SFRD) に関係することが予想される (Rbertson & Ellis 2012)．

本研究では銀河形成シミュレーション内で設定される金属量，SFR などのデータからシミュレーション上でどのような閾値を設けることで近傍の宇宙 ($z < 4$) での GRB 発生率を再現できるかを調べ，シミュレーション上の遠方宇宙 ($z > 4$) にその閾値を適用した時の GRB の発生率を算出した．

2 Methods

本研究では Okamoto et al. (2014) のシミュレーション内で得られる $z < 8$ の各時代の個々の銀河の持つデータを用いて GRB 発生率を求めた．
GRB の発生率と星形成率とを関連させる手法として，Robertson & Elllis (2012) を参考にした．Robertson & Ellis (2012) は GRB の発生率と SFRD の比がレッドシフト依存性を持つものとして，

$$\psi = \frac{(\text{GRB 発生数})}{(\text{SFR})} \propto (1+z)^{\alpha} \qquad (1)$$

の関係を仮定した．ここから，z に依存しない比例係数を議論から排除するために，規格化した量

$$N(<z) \equiv \frac{N(0,z)}{N(0,4)} \tag{2}$$

を比較することにする．$N(z_1, z_2)$ は z_1 から z_2 までの赤方偏移期間の GRB 数を表す．実際に観測される近傍 ($z < 4$) の GRB の数と比較すると $\alpha = 0.5$ で良く合う．この赤方偏移依存性を説明するために銀河の金属量進化が取り上げられている．過去の観測からも GRB が発生する銀河は低金属量であることが示唆されている [1]．しかし，Robertson & Ellis (2012) では金属量のみの閾値を設けて議論を進めた結果 SFR の小さい銀河で GRB が発生するものとしている，これは GRB が大質量星の SN に付随するという描像に反している．

従って，本研究ではシミュレーション内の銀河に金属量に加えて SFR の閾値を設けることで，GRB を発生し得る銀河の数を算出し，(1)(2) をもとに観測される SFRD が示す GRB 発生数の赤方偏移進化と比較する．

3 Results & Discussions

$z < 4$ の近傍宇宙で，金属量 $12 + \log[\mathrm{O/H}]$ のみの閾値を設けた時はモデル曲線との形が一致せず，金属量の制限のみでは近傍で GRB を発生し得る銀河を多く見積もっている (図 1)．[2] 更に，SFR の制限を加えることで観測に合う曲線を与える閾値のセットがいくつか得られた．(図 2, 図 3)(大質量星の発生状況を知りたいので 10^6yr 以下の寿命を持つ星の SFR を用いた．)

観測とよく合う 2 つのモデル (i) 金属量 $<$ 8.7+SFR$>$ 100，(ii) 金属量 $<$ 8.2+SFR$>$ 1 を用いて $4 < z < 8$ での規格化した cumulative の GRB 発生数を図 4 図 5 に示す． どちらのモデルでも $z > 4$ で GRB の発生数は殆どなくなってしまう．

[1] 最近では金属量との相関はないとする研究もされている．(Greiner, j. et al. 2015)

[2] ここで [O/H] は元素の数密度比を表す．太陽の量で規格化はしていない．

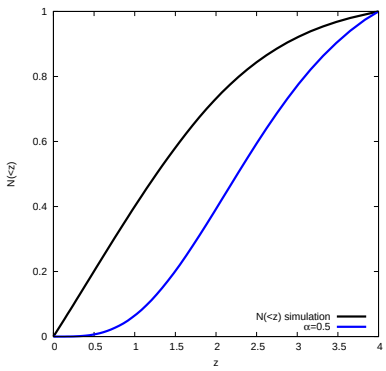

図 1: $z < 4$ で規格化した GRB 発生数の比較図．黒線:金属量 < 8.7 の閾値で選択した cumulative の銀河数，青線:銀河のガス質量 SFR から見積もった GRB 数 (観測にフィットされているモデル)．

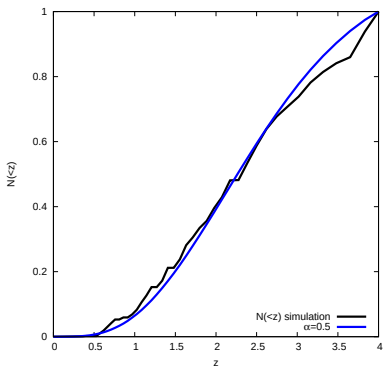

図 2: モデル (i) 黒線:金属量 < 8.7 と SFR$>$ 100 の閾値で選択した cumulative の銀河数．青線:図 1 に同じ．

今後の議論として，観測される GRB 数と本研究で見積もった GRB 発生数を比較可能なものにするために，シミュレーションでは 100Mpc/h で区切られた (同じ領域の深い部分を見ていることに対応するため，時間間隔と同義．)snapshot を用いていることから，その期間に銀河が何個の GRB を発生させるかという議論が残る．今後まずは 100Mpc/h の期間内で選択された銀河は 1 個の GRB を起こすものとし，$z > 4$ で観測される GRB 数と比較する．検出器や GRB 方向に関する因子を除いた上で，残る因子が GRB 発生率として考察できるものになるのかを議論する．

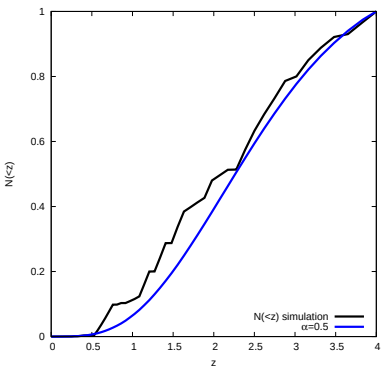

図 3: モデル (ii) 黒線:金属量 < 8.2 と SFR> 1 の閾値で選択した cumulative の銀河数．青線:図 1 に同じ．

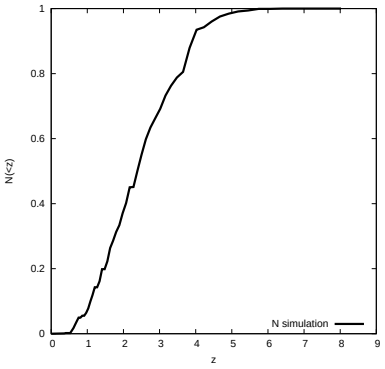

図 4: モデル (i) 黒線:金属量 < 8.7 と SFR> 100 の閾値で選択した cumulative の銀河数．

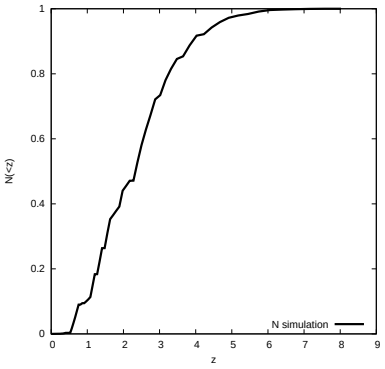

図 5: モデル (ii) 黒線:金属量 < 8.2 と SFR> 1 の閾値で選択した cumulative の銀河数．

Reference

Okamoto, T.,Shimizu, I.,and Yoshida, N., 2014, *PASJ*, 66, 4

Robertson, B.,and Ellis, R., 2012, *APJ*, 774, 95

Greiner, J., et al., 2015, *arxiv*, 1503.05323

Woosley, S. E.,and Bloom J. S., 2006, *Ann.Rev.Astron.Astrophys*,44,507