

新納悠 (京都大学宇宙物理学教室)
in collaboration with
J.-H. Choi, 小林正和,
長峯健太郎, 戸谷友則 & B. Zhang



ガンマ線バーストの金属量依存性と 母銀河の光度分布 (arXiv:1006.5033)

ABSTRACT

継続時間の長いガンマ線バースト (以下、単にGRB) の少なくとも一部は大質量星の重力崩壊によって引き起こされると考えられている。しかし、GRBの発生頻度は一般的な重力崩壊型超新星(以下、SN)の発生頻度にくらべて遥かに少なく、どのような条件の下で大質量星の重力崩壊がGRBを引き起こすのかはよく分かっていない。恒星進化の理論モデルはGRBの発生には起源となる星の金属量が少ないことが必要であると示唆している。またGRB母銀河の観測においても、GRB母銀河は同程度の赤方偏移のSN母銀河よりUV光度が統計的に暗いことや、GRB母銀河にはLy α 輝線の強い銀河が多いことが知られており、GRBが低金属量の領域で発生しやすいとする理論予想と定性的に合致する。しかし、分光観測によって母銀河の金属量を知ることができるのは近傍 ($z < 0.5$) で起きた少数のGRBにかぎられており、銀河のUV光度やLy α 輝線強度を定量的に金属量と結びつけるのは難しい。この研究では、宇宙論的流体シミュレーションを用いて赤方偏移 $z \sim 1$ 銀河の性質を再現し、金属量ごとの星生成領域がどのようなUV光度の銀河に属しているかを調べる。得られた結果を観測されたGRB母銀河、SN母銀河の光度分布と比較することで、GRBが発生する金属量の条件について母銀河観測に基づいた定量的な議論を行う。

宇宙論的シミュレーション

GRBの金属量依存性と母銀河の光度分布の関係を調べるため、私たちは最新のSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) コードであるGADGET-3を用いて宇宙論的シミュレーションを行い $z = 1.0$ の数値銀河を作った。以下では、計算領域のサイズが100 Mpcと34 Mpcである2つのシミュレーションボックスの結果を相補的に用いる(図1)。各シミュレーションボックスはガスやダークマターを表す粒子を約 10^8 個含んでおり、質量解像度は $10^7 M_\odot$ 程度である。

シミュレーションの中の銀河

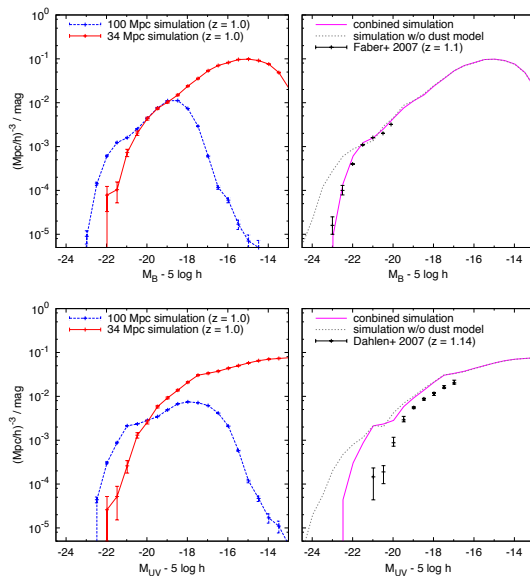


図1: 銀河静止系におけるBバンドおよび近紫外(2800 Å)の光度分布関数。二つのシミュレーションボックスは異なる質量範囲の銀河を再現する。

得られた数値銀河の、銀河静止系におけるBバンドおよび近紫外での光度分布を図1に示す。光度の計算にはBruzual & Charlot (2003)を用いた。Bバンドではシミュレーションは観測によく一致するが、近紫外においては明るい銀河の光度に過大評価が見られる。考えられる要因の一つは、我々のシミュレーションが活動銀河核フィードバックの効果を考えていないことである。この過大評価の影響はGRB母銀河の光度分布を議論する際に考慮されなければならない。

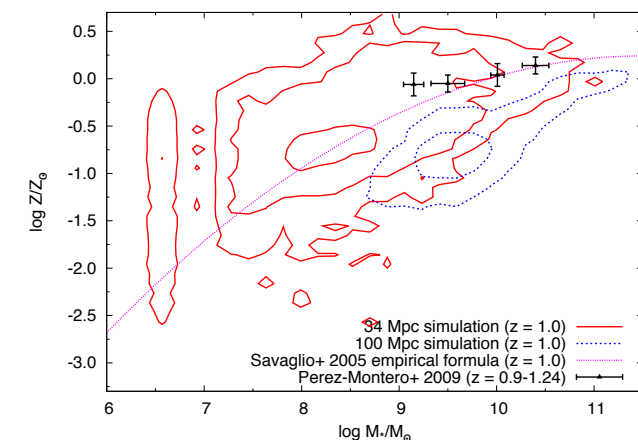


図2: 数値銀河のM-Z関係。各等高線は $d^2N/d\log M \cdot d\log Z = 0.005, 0.05 \text{ \& } 0.5 [h^3 \text{Mpc}^{-3}]$ に対応する。

数値銀河の質量-金属量(M-Z)関係を図2に示す。シミュレーションの結果はSavaglio et al. (2005)やPérez-Montero et al. (2009)の観測と合致する。

GRB母銀河

各数値銀河でのGRB発生頻度はその銀河内の金属量の少ない ($< Z_{\text{crit}}$) ガスによる星生成率(SFR)に比例するものとする。数値銀河を各銀河のGRB発生頻度で重み付けすることにより、様々な値の Z_{crit} についてGRB母銀河の光度分布を計算する。

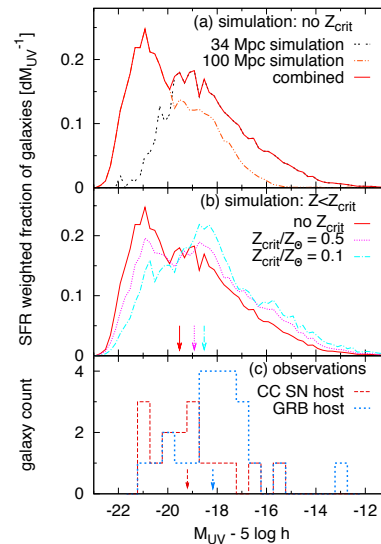


図3: GRB母銀河の光度分布。各パネルには(a) 金属量しきい値を考えない場合、(b) さまざまな Z_{crit} を仮定した場合の光度分布の変化、(c) Fruchter et al. (2006)による観測が示されている。二つのシミュレーションボックスの結果をパネル(a)でのみ個別に示す。パネル(b)および(c)の矢印は各分布の中央値。

シミュレーションから得られたGRB母銀河の光度分布を観測データ(Fruchter et al. 2006)と共に図3および図4に示す。シミュレーションの結果は上述の近紫外光度過大評価の影響を受けているが、金属量のしきい値を設定しない場合の結果はSN母銀河の観測と一致している。一方、 $Z_{\text{crit}} \leq 0.1 Z_\odot$ の場合には、シミュレーションはGRB母銀河の観測と一致する。これら、シミュレーションの結果と観測の一致はKolmogorov-Smirnov (KS)検定によって確かめられる(図5の赤と青)。

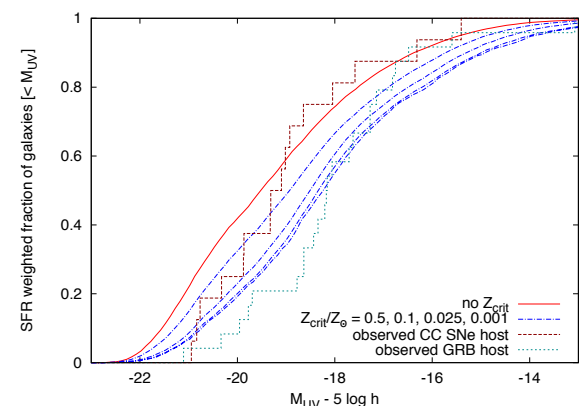


図4: GRB母銀河の累積光度分布。シミュレーションの結果と観測データを重ねて示す。

図1に見られる近紫外光度過大評価が私たちの結果に与える影響を調べるため、 $M_{\text{UV}} < -20$ の明るい銀河について一般の銀河の光度分布関数が観測にあうよう(図1右下パネルの bright-end slopeの傾きを2倍)に銀河の明るさを修正し、GRB母銀河の光度分布がどのように変わるか調べた。結果、そのような修正を加えてもシミュレーションと観測の一致がよりよくなるだけで、結論には影響しないことがわかった(図5の暗色)。

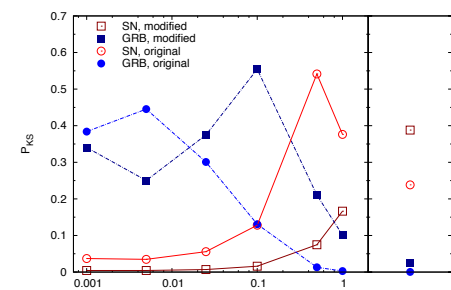


図5: ある Z_{crit} を仮定した場合のシミュレーション結果と、GRBおよびSN母銀河の観測の間のKS優位確率。シミュレーション本来の結果を原色、近紫外光度を修正した結果を暗色で示す。

結論

宇宙論的流体シミュレーションを用いてGRBの金属量依存性と母銀河の光度分布の関係を調べた。私たちの計算結果は、GRBが $Z_{\text{crit}} \sim 0.1 Z_\odot$ 以下の低金属な星生成をトレースすることを示した。これにより、従来定性的にしか議論されていなかったGRB起源天体の理論研究とGRB母銀河の観測から得られる示唆の合致が定量的にも確かめられた。

BACKGROUND

GRB起源天体

継続時間の長いガンマ線バースト (以下、単にGRB) の少なくとも一部が重力崩壊型超新星 (以下、SN) に伴って発生するという描像は広く受け入れられている。しかし、GRBの発生頻度はSNよりもずっと低く、どのような星がGRBを発生させるのかはよく分かっていない。

低金属星とGRB

GRBが発生するには重力崩壊する大質量星の核がブラックホール降着円盤などの中心エンジンの形成に十分な角運動量を持っていないことが指摘されているが、一般にはこの条件を満たすことは難しい。大質量星は進化の過程で恒星風による質量放出を起こし、その際に核の角運動量が持ち去られてしまうためである。恒星風は重元素吸収線に対する輻射圧によって駆動されるため、低金属星では質量放出率が小さくなることが知られている。このことから、初期の角運動量が大きい大質量星でも金属量の少ないものは核の角運動量を保ったまま進化し、そのような星がGRBになるというシナリオが提案されている ($Z < \text{several} \times 0.1 Z_\odot$, Woosley & Heger 2006, Yoon & Langer 2005)。

観測的にもGRBが低金属領域で発生することが知られている。近傍 ($z < 0.3$) のGRB母銀河の分光観測は、GRB母銀河の金属量が同程度の赤方偏移にあるフィールド銀河やSN母銀河に比べて小さいことを示している (e.g. Stanek et al. 2006)。また、 $z \sim 1$ のGRB母銀河は同程度の赤方偏移にあるSN母銀河より統計的に暗く、半径が小さいことも知られている (Fruchter et al. 2006)。

GRBの金属量依存性について理論予想と観測事実は定性的に合致しているが、両者を定量的に比較することは難しい。分光観測による金属量の見積もりは近傍の少数のGRB母銀河に対してのみ可能であり、より遠方でも測定可能な光度や半径といった物理量を金属量と定量的に結びつけることは単純ではない。

本研究の目的

本研究では宇宙論的流体シミュレーションを用いて $z \sim 1$ の銀河を統計的に再現し、GRB発生頻度が一般の星生成をトレースする場合と低金属の星生成をトレースする場合について、期待される母銀河の光度分布を調べる。シミュレーションの結果と観測を比較することで、GRB起源天体の理論研究の示唆とGRB母銀河の観測が定量的に合致しているのかを確かめる。

reference

Niino et al. (2010) arXiv:1006.5033
Woosley & Heger (2006) ApJ, 637, 914
Yoon & Langer (2005) A&A, 460, 199
Stanek et al. (2006) ACTA ASTRONOMICA, 56, 333
Fruchter et al. (2006) Nature, 441, 463
Bruzual & Charlot (2003) MNRAS, 344, 1000