

# 宇宙論的シミュレーションと母銀河観測で 探る継続時間の長いガンマ線 バーストの起源



新 納 悠

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yuu.niino@nao.ac.jp

継続時間の長いガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象といわれ、少なくともその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、大質量星の重力崩壊が常にガンマ線バーストを引き起こすわけではなく、どのような条件の下でガンマ線バーストが発生するのかわかっていない。ガンマ線バースト発生条件として有力な候補は少ない金属量である。ガンマ線バーストが低金属の星によって引き起こされることは理論と観測の両面から示唆されている。しかし、理論と観測の比較は定性的な議論にとどまっており、両者の示唆するものが本当に一致しているのかは確認できていない。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光度の銀河に属しているかを調べた。得られた結果を観測されたガンマ線バースト母銀河、重力崩壊型超新星の母銀河の光度分布と比較した結果、ガンマ線バーストが太陽金属量の 10% 程度以下の低金属星によって引き起こされると考えれば観測されているガンマ線バースト母銀河の特徴を説明できることがわかった。

## 1. ガンマ線バーストとその起源天体

ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象と言われ、軟ガンマ線で 0.1–100 秒間程度観測される突発天体である。ガンマ線バーストは 1960 年代に核実験監視衛星によって発見され、1973 年に地球外に起源をもつ現象であることが報告された<sup>1)</sup>。それ以来 40 年近くにわたって、多くの天文学者や宇宙物理学者がガンマ線バーストの正体を明らかにするべく研究を重ねてきた。

ガンマ線バーストはその継続時間に応じて、長いガンマ線バースト ( $\geq 2$  秒) と短いガンマ線バースト ( $< 2$  秒) の少なくとも 2 種族に分けることができ<sup>2)</sup>、これら二つの種族のガンマ線バーストはそれぞれ別種の天体を起源にもつと考えられている。継続時間の短いガンマ線バーストは中

性子星の連星、あるいはブラックホールと中性子星の連星の合体によって引き起こされるとする説が有力だが<sup>3)</sup>、検証は進んでいない。

一方、長いガンマ線バーストは大質量星がその寿命を終えた際の重力崩壊によって引き起こされると考えられており、その証拠として、いくつかの長いガンマ線バーストについて同じく大質量星の重力崩壊によって引き起こされる Ic 型超新星と同時に発生していることが確認されている<sup>4)</sup>。

しかし、ガンマ線バーストの発生頻度は一般的な重力崩壊型超新星の発生頻度に比べてはるかに低く<sup>5)</sup>、このことは大質量星が重力崩壊したからといって必ずガンマ線バーストを引き起こすわけではないことを意味する。そして、どのような条件のもとでガンマ線バーストが引き起こされるのかはよくわかっていない。

継続時間の長いガンマ線バーストは遠方でも観測可能な星生成の指標として注目されており、ガンマ線バーストを遠方探査の指標として使ううえでもガンマ線バーストの発生条件を理解することが重要である。

この記事では、大質量星の重力崩壊がガンマ線バーストを引き起こす条件についての研究を紹介したい。以下では、特に断らない限り、「ガンマ線バースト」という語は継続時間の長いガンマ線バーストを指す。

## 2. ガンマ線バーストと「金属量」

ガンマ線バーストの発生を左右する要因の有効な候補は重力崩壊する星の「金属量」である。ここで言う金属量とは、星が生まれたときに含有していた水素・ヘリウム以外の元素の割合を指す。

ガンマ線バーストにおいてガンマ線を放射するジェットが作られる仕組みについては複数の説があるが、いずれの場合でも重力崩壊する星が高速回転していることが必要とされる<sup>6)</sup>。一方、金属量の多い大質量星はその成長過程で強い恒星風(星の表面からの物質の流出)を伴うことが知られている。この恒星風には星の角運動量を持ち去り、星の回転を止めてしまう効果がある。したがって金属量が多い場合には、たとえ初期段階で速い回転速度をもっていた星であっても、寿命を迎えて重力崩壊する前に回転を止められてしまうことになる。これではガンマ線バーストは起こらない。

しかし金属量が小さければ恒星風は弱くなり、初期の回転速度の大きい一部の星はガンマ線バーストを引き起こすかもしれない。恒星進化の理論モデルを用いて金属量とガンマ線バースト発生の関係を調べた研究によると、ガンマ線バーストが発生するには起源星の金属量が太陽の金属量(約2%,  $Z_{\odot}$ )の1/10程度より小さくなければならない<sup>6)-8)</sup>。またガンマ線バースト母銀河の観測においても、ガンマ線バースト母銀河は同程度の赤方

偏移にある重力崩壊型超新星の母銀河より統計的に金属量が少ない、光度が暗い、半径が小さいといった傾向が知られており<sup>9), 10)</sup>、ガンマ線バーストが低金属量の領域で発生することを定性的に支持している。

このように、ガンマ線バーストの起源が低金属星であることは理論・観測の両面から示唆されているが、未解決の問題もある。高速で回転している大質量星の成長過程にはわかっていない部分も多く、前述の理論モデルを用いたガンマ線バースト研究も大胆な単純化に基づいたものであり、その結果のすべてを鵜呑みにすることはできない。また、ガンマ線バーストが起きた場所の金属量を観測的に調べることができるのは赤方偏移の小さい一部のガンマ線バーストについてだけであり、銀河の光度や半径から金属量を推定する議論は定性的なものにすぎず、理論モデルと観測データの示すところが本当に一致しているのか確かめることはできていない。

## 3. ガンマ線バースト起源の「低金属星シナリオ」を検証

私たちはガンマ線バーストの金属量依存性を定量的に検証可能にする理論モデルを作りたいと考えた。観測されている母銀河の性質がガンマ線バースト起源星の金属量について何を示唆しているのか調べるためには、議論の対象となる赤方偏移での一般の銀河の性質をよく知らなければならない。

ガンマ線バーストや重力崩壊型超新星といった爆発現象を引き起こすと考えられる大質量星の寿命は非常に短く、銀河の成長のタイムスケールで考えれば誕生したとたんに爆発してしまうのと同じである。したがって、ある銀河の中でこれらの爆発現象が発生する頻度はその銀河の中で生み出されている星の量(星生成率)に比例することになる。このため、ガンマ線バースト起源天体の金属量と発生場所の関係を探るためには、特に金属

量ごとの星生成がどのような銀河によって担われているのかを知ることが重要である。しかし、銀河の星生成率や金属量が統計的によく調べられているのは低い赤方偏移の宇宙に限られており、そのような低赤方偏移でのガンマ線バーストの観測は数例しかない。

#### 4. 宇宙論的シミュレーションの利用

ガンマ線バースト母銀河の観測例がより豊富な遠方での銀河の性質を調べるため、私たちは宇宙論的流体シミュレーションを用いることにした。これは、まだ星や銀河が生まれる前の宇宙のガスやダークマターの分布を初期条件として仮定し、重力や流体力学の運動方程式とガス加熱・冷却や星生成のモデルを組み合わせることで、銀河などの宇宙の構造が形成されてきた歴史をコンピューターの中に再現するものである。これまでの研究によって、最新の宇宙論に基づく初期条件を仮定して、観測されている現在の宇宙の状況がある程度再現する計算が可能になっている<sup>11)-13)</sup>。

私たちは、宇宙論的流体シミュレーションによって計算された赤方偏移 $\sim 1$ の宇宙の情報を解析した。この時代の宇宙は現在の宇宙に比べて星生成率が高いため星生成の現場で起きるガンマ線バーストの発生頻度も高く、より遠方の宇宙に比べるとガンマ線バーストの母銀河の観測にも成功しやすい。したがって、この赤方偏移ではガンマ線バースト母銀河の過去の観測例が多くなっている。さらに、より遠方では観測の難しい重力崩壊型超新星が、赤方偏移 $\sim 1$ ではかろうじて観測可能である<sup>10), 14)</sup>ことも重要な要素である。

重力崩壊型超新星はガンマ線バーストと同様に大質量星の重力崩壊に起因すると考えられているが、ガンマ線バーストのように金属量に依存するのではなく、大質量の星があるところならばどこでも発生すると考えられてる。したがってガンマ線バーストの金属量依存性を調べるには、同程

度の赤方偏移での重力崩壊型超新星との発生場所の違いを調べる手がかりになる。私たちが作る理論モデルもガンマ線バーストの母銀河の観測データを再現するだけでなく、重力崩壊型超新星の母銀河の観測データも同時に再現し、両者の違いを説明するものでなければならない。

#### 4.1 シミュレーション結果の試験

シミュレーションで得られた情報をガンマ線バースト研究に応用する前に、シミュレーションの結果が赤方偏移 $\sim 1$ の宇宙をどの程度再現して

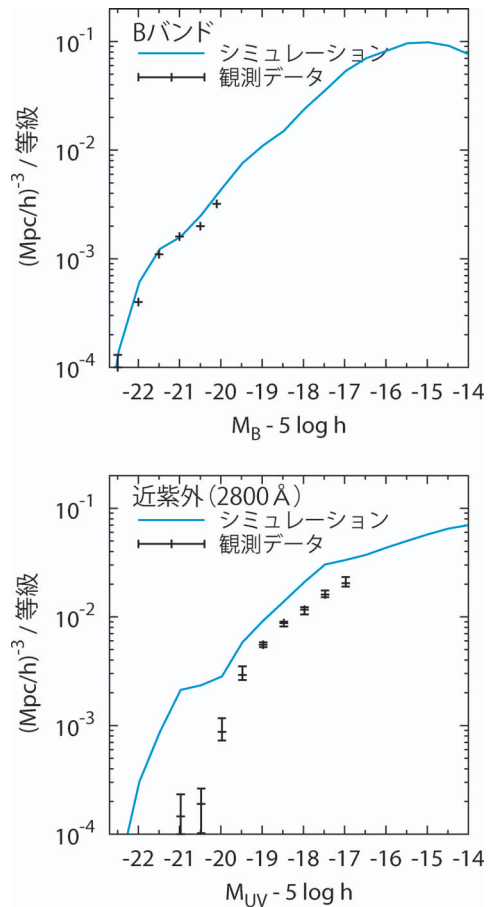


図1 シミュレーションによって作られた銀河と実際に観測された銀河<sup>15), 17)</sup>の光度分布の比較。横軸が銀河の等級、縦軸が各等級の銀河の単位体積当たりの数を意味する。上下のパネルにはそれぞれ共動座標におけるBバンドおよび近紫外線での光度分布を示す。

いるか確かめることにした。前述のとおり、この赤方偏移での一般的な銀河の性質は観測的にはよくわかっておらず、観測に基づく情報だけでガンマ線バースト母銀河のモデルを作ることはできないが、現時点で得られているだけの観測データをシミュレーションによるものと比較した。

比較の結果、シミュレーションで作りに出された銀河の可視光の光度分布 (図 1, 上のパネル) や金属量は現在得られる観測データ<sup>15), 16)</sup>と矛盾しないものであることが確認できた。一方、シミュレーションによる銀河は紫外線において明るい銀河で実際の観測<sup>17)</sup>よりも明るさが過大評価されていることがわかった (図 1, 下のパネル)。この紫外線光度の過大評価にはいくつかの原因が考えられるが、今回のシミュレーションのみから原因を特定することは難しい。紫外線光度の過大評価がガンマ線バースト研究に与える影響を検討しておかなければならない (4.3 章)。

#### 4.2 シミュレーションの中のガンマ線バースト

つづいて、重力崩壊型超新星について期待されるように (i) 金属量に関係なく星生成の現場で発生する突発現象の母銀河と、ガンマ線バーストについて期待されているように (ii) 低い金属量星の生成現場でのみ発生する突発現象の母銀河について、予想される光度分布をシミュレーションの結果をもとに計算した。

(i) については各銀河での発生頻度はその銀河の星生成率に比例するものとし、(ii) については発生頻度は各銀河内である閾値 ( $Z_{crit}$ ) より低い金属量の星に限った星生成率に比例するものとした。シミュレーションから予想される光度分布を求めるには、シミュレーションによって作られた銀河のサンプルを各突発現象の発生頻度で重みづけすればよい。

図 2 ではシミュレーションから得られた結果と観測されたガンマ線バースト母銀河および重力崩壊型超新星の母銀河の光度分布と比較する。(i) の光度分布と (ii) の光度分布 ( $Z_{crit} = 0.1 Z_{\odot}$ ) の場

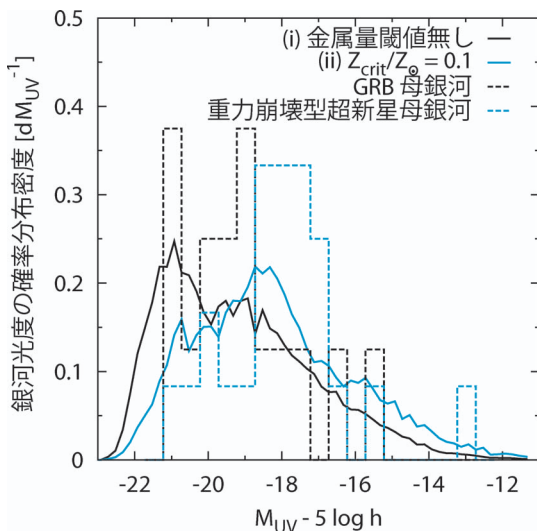


図 2 シミュレーション結果から得られたガンマ線バースト母銀河および重力崩壊型超新星母銀河の光度分布と、実際に観測された母銀河光度分布<sup>10)</sup>の比較。シミュレーションの結果を実線、観測データを破線で表す。

合) を比較すると (ii) のほうが典型的に 1 等程度暗く、これは観測されている重力崩壊型超新星母銀河とガンマ線バースト母銀河の光度の違いにほぼ等しい。

私たちは (i) の結果およびさまざまな  $Z_{crit}$  に対する (ii) がそれぞれガンマ線バーストや重力崩壊型超新星の母銀河観測の結果とどの程度一致しているのかを、統計検定手法の一つであるコルモゴロフ・スミルノフ検定を用いて調べた。その結果、重力崩壊型超新星は金属量と無関係に星生成率に比例して発生するが、ガンマ線バーストは太陽金属量の 10% 程度以下の金属量の低い星の生成率だけに比例して発生するものと考えれば、重力崩壊型超新星とガンマ線バーストの母銀河の光度分布を同時に説明できることがわかった。

#### 4.3 銀河の紫外線光度と結果への影響

シミュレーションによる構造形成はそれ自体が発展途上の研究分野であり、銀河形成のすべてを再現できるわけではない。シミュレーションの結果をガンマ線バーストのような天体の研究に応用

する際には、シミュレーションで考慮されていない効果や観測と矛盾する部分が最終的な結果に与えている影響を検討しなければならない。

今回用いたシミュレーション結果には前述のように紫外光度の過大評価が見られる。これについては、シミュレーションによって作られた銀河の明るさの計算を標準的なものからあえて変更して銀河の明るさを暗くした場合に、期待されるガンマ線バースト母銀河の光度がどの程度影響されるかを試した。結果、シミュレーションと一般銀河の比較で見られた程度のずれはガンマ線バーストに関する結果に大きな影響を与えないことが確認できた。

## 5. 星間減光の影響

この研究では、これまでに観測されたガンマ線バースト母銀河の光度分布を宇宙論的流体シミュレーションに基づくモデルと比較することでガンマ線バーストの起源を探った。このような議論をする際に気をつけなければいけないのが、すべてのガンマ線バーストについて母銀河が見つまっているわけではないという事実である。各母銀河の性質によって母銀河の見つけやすさが変わる可能性もあり、現在の母銀河観測サンプルは見つけやすい種類の銀河に偏ったものになっているかもしれないからだ。

金属量の議論をする際にとりわけ気をつけなければいけないのが母銀河の星間塵による減光の効果である。ガンマ線バーストは名前のおりガンマ線で観測される現象だが、ガンマ線の観測だけではガンマ線バーストが起きた場所を特定するのは容易ではない。ガンマ線バーストの母銀河を特定するには、エックス線や可視光など、より幅広い波長域で観測される残光の観測が必須である。

ガンマ線バーストの可視残光観測は、ガンマ線やエックス線による観測に比べてずっと良い精度でガンマ線バーストの位置を決めることができるが、ガンマ線バーストが星間塵による減光を受け

ている場合には検出が難しくなる。さらに、各銀河のもつ星間塵の量はその銀河のもつ金属（ここでは水素・ヘリウム以外の意味）の量と強く関連していると考えられている。もし、現在特定されているガンマ線バースト母銀河の観測サンプルが星間塵による減光の少ない銀河に偏っているとすれば、ガンマ線バースト起源天体の性質とは関係なく、母銀河が金属量の少ない銀河に偏って見えることもありうる。

このような星間塵の効果は重力崩壊型超新星についても考えられるもので、むしろガンマ線バーストの可視残光より暗い超新星の観測こそ星間塵の影響を強く受けるはずである。したがってガンマ線バースト母銀河が重力崩壊型超新星の母銀河よりも暗いという観測事実はこのような星間塵の効果のみによって説明できるものではない。しかし、星間塵の効果がガンマ線バースト母銀河の観測サンプルに与える影響を評価しておくことは、今後ガンマ線バーストの起源についてより緻密な議論を可能にしていくために有益である。

ガンマ線バーストの母銀河が星間塵の少ないものに偏った場合にガンマ線バースト母銀河の光度分布に現れる影響を調べるため、ガンマ線バーストは星生成率に比例して発生するが母銀河内の減光量が一定の値 ( $E_{B-V, \text{crit}}$ ) より大きい場合は母銀河として同定できないという仮定のもとに、シミュレーションから期待される母銀河の光度分布を調べた。

さまざまな  $E_{B-V, \text{crit}}$  について期待される母銀河の光度分布を調べた結果、現実的にガンマ線バースト観測に影響を与えようような  $E_{B-V, \text{crit}}$  値の範囲では、星間塵減光によるサンプルの偏りは母銀河の光度分布に大きな影響を与えないことが示された。これは母銀河観測からガンマ線バーストの起源天体を探っていくうえで重要な示唆である。

しかし一方、私たちの星間塵モデルは各銀河のなかの平均的な減光量を与えるだけの単純なものであり、いくつかのガンマ線バースト観測におい

てはガンマ線バースト視線上の星間塵減光は母銀河全体の平均的なものとは大きく異なることが示されていること<sup>18)</sup>にも注意が必要である。

このガンマ線バースト視線上と銀河全体の減光の違いは、ガンマ線バーストの視線上に分子雲のような規模の吸収体が位置していることによって引き起こされるという解釈が広く受け入れられているが、まだ決定的な証拠はない。今回の研究に私たちが用いたシミュレーションには分子雲程度の小さな構造を見分けるだけの解像度はなく、ガンマ線バーストの減光に関するさらなる議論は将来の課題としたい。

## 6. まとめと展望

継続時間の長いガンマ線バースト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が、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わかっていない。ガンマ線バーストが金属量の少ない星を起源とすることは理論と観測の両面から示唆されてきたが、観測的に得られている情報は定性的なもので、理論と観測の示唆が定量的に合致しているか否かは確かめられてこなかった。

ガンマ線バースト母銀河が同程度の赤方偏移の重力崩壊型超新星母銀河に比べて光度が統計的に暗いことは、ガンマ線バーストの起源が低金属であることを示す重要な観測的証拠の一つである。ガンマ線バースト母銀河と重力崩壊型超新星母銀河の光度分布の違いを金属量と定量的に結びつけることを可能にするため、私たちは観測データと直接比較可能な理論モデルを作った。

私たちはまず、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光度の銀河に属しているかを調べた。得られた結果を観測されたガンマ線バースト母銀河および重力崩壊型超新星母銀河の光度分布と比較した結果、重力崩壊型超新星の発生頻度は金属量と関係なく一般の星生

成に従う一方、ガンマ線バーストの発生頻度は太陽金属量の10%程度以下の金属量の星生成のみに従うと考えれば、観測された母銀河の光度分布を再現できることがわかった。

この結果は、これまで定性的にしかり理解されてこなかったガンマ線バースト母銀河の観測データが、定量的にも理論研究の示唆と合致するものであることを初めて確かめたものである。

私たちはさらに、星間塵による減光の効果で母銀河の観測サンプルに偏りが生じた場合にガンマ線バースト起源天体に関する議論にどのような影響が出るかを調べた。私たちが用いたシミュレーションの結果によれば、このような観測サンプルの偏りによる影響は重大ではないことが示唆された。しかし、ガンマ線バースト観測に影響を与える減光は、今回の研究で考慮された母銀河全体の平均的なものだけではなく、ガンマ線バーストが発生した星生成領域周辺の分子雲のような構造による影響が重要であるとする研究もあり、まだ最終的な結論は出せない<sup>18)</sup>。

ガンマ線バーストの可視光追観測の観測例が増えるに従って、減光に関する問題以外にもガンマ線バーストの起きた場所の環境が母銀河全体の平均的なものとは異なる可能性を示す観測例が出てきている<sup>19)</sup>。今回の研究で私たちが用いた宇宙論的流体シミュレーションは個々の銀河内部の構造を調べるには必ずしも十分な解像度をもっていない。今後増えていくであろうガンマ線バースト観測のデータを活かしてガンマ線バースト起源天体の性質をより詳細に明らかにしていくためには、個々の銀河内部の構造まで考慮して実際のガンマ線バースト発生環境と観測によって得られる情報を結びつける議論が必要である。

謝 辞

本稿の内容は、2011年に筆者が共同研究者である Jun-Hwan Choi 氏、小林正和氏、長峯健太郎氏、戸谷友則氏、Bing Zhang 氏とともに発表した投稿論文<sup>20)</sup>に基づいている。この研究に関して、筆者は日本学術振興会特別研究員奨励費による助成を受けている。

参 考 文 献

- 1) Klebesadel R. W., Strong I. B., Olson R. A., 1973, ApJ 182, L85
- 2) Kouveliotou C., et al., 1993, ApJ 413, L101
- 3) Katz J. I., Canel L. M., ApJ 1996, 471, 915
- 4) Hjorth J., et al., 2003, Nature, 423, 847
- 5) Podsiadlowski Ph., et al., 2004, ApJ 607, L17
- 6) Woosley S. E., Heger A., 2006, ApJ 637, 914
- 7) Yoon S., Langer N., 2005, A&A 443, 643
- 8) Yoon S., Langer N., Norman C., 2006, A&A 460, 199
- 9) Stanek K. Z., et al., 2006, Acta Astronomica 56, 333
- 10) Fruchter A. S., et al., 2006, Nature 441, 463
- 11) Springel V., 2005, MNRAS 364, 1105
- 12) Choi J.-H., Nagamine K., 2009, MNRAS 393, 1595
- 13) Choi J.-H., Nagamine K. 2010, MNRAS 407, 1464
- 14) Riess A. G., et al., 2004, ApJ 600, L163
- 15) Faber S. M., et al., 2007, ApJ 665, 265
- 16) Pérez-Montero E., et al., 2009, A&A 495, 73
- 17) Dahlen T., et al., 2007, ApJ 654, 172
- 18) Perley D. A., et al., 2009, AJ 138, 1690
- 19) Thöne C. C., et al., 2008, ApJ 676, 1151
- 20) Niino Y., et al., 2011, ApJ 726, 88

**Progenitors of Long Duration Gamma-Ray Bursts: Implications from Their Host Galaxies**

Yuu NIINO

*Division of Optical & Infrared Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: It is broadly accepted that at least some of the long gamma-ray bursts (GRBs) originate from dying massive stars. However, the occurrence rate of GRBs is much lower than that of normal core-collapse supernovae (SNe), and the conditions required for a GRB to occur from a SN still remain as one of the most outstanding questions about GRBs. Using cosmological smoothed particle hydrodynamic simulations, we compute the UV luminosity distribution of GRB host galaxies for two different cases: (i) GRBs simply trace star formation, and (ii) GRBs preferentially occur in low metallicity environment. We compare the simulation with observations, and discuss the low metallicity preference of GRBs. We reproduce the observed luminosity probability distribution function of GRB host galaxies when we assume that GRBs originate from stars with metallicities  $Z < 0.1Z_{\odot}$ .