

宇宙初代のガンマ線バーストで探る 宇宙暗黒時代



井 上 進

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: inoue@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

ガンマ線バーストは宇宙で最大の爆発現象であり、宇宙で最初の星形成期にも発生することが期待されるので、その極めて明るく広波長域にわたる放射は、現在観測未到の宇宙暗黒時代の様子を探る重要な手段となるはずである。電波・サブミリ波から高エネルギーガンマ線に至るまで、各波長での特徴的な性質を利用し、ガンマ線バーストを通じて宇宙初代星と宇宙再電離期をさまざまな角度から探る方法と、その観測的展望について解説する。

1. はじめに

宇宙で一番最初の星は、いつ、どうやって生まれたのであろう？ 宇宙で一番最初の銀河は？ その後、どのように星や銀河は増えていき、やがては生命を育むような、豊かで美しい階層構造をもつ宇宙へと進化していったのであろうか？

われわれはまだこれらの問いに答えることはできない。上のような宇宙初代の天体は遠すぎて、現在世界最先端の望遠鏡をもってしてもその光を直接捕らえることはできておらず、観測情報がほとんどないからである。

一方、間接的な情報として、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB: cosmic microwave background) の揺らぎの観測がある。CMB は、遠い昔、宇宙全体がほぼ一様で熱い火の玉状態だった頃の残り火である¹⁾。その強度はほぼ一様であるが、詳しく観測すると微小な揺らぎ (強度の濃淡) が見られ、火の玉時代でも宇宙の物質自体に小さな揺らぎ (密度の濃淡) があったことを示している。

物質を構成する原子は、火の玉状態では電離し

てイオンと電子に分かれ、放射と強く相互作用しているが、宇宙が膨張しておよそ 3,000 度以下まで冷えると、それらは結合して中性の原子になり、放射は CMB となって自由に伝播するようになる (いわゆる宇宙の晴れ上がり)。すると物質の圧力が減少し、密度揺らぎはその自己重力の影響で成長し始め、徐々に密度のコントラストが強くなっていく。やがて一番濃い部分がさらに収縮し、宇宙で一番最初の星の種となっていった、と考えられている。

最初の星が生まれて輝き始めても、すぐさま宇宙に光が満ちるわけではない。周囲にある原子がほぼ中性のため、星から放たれた紫外線はそれを再び電離する際に吸収され、自由に進むことができない。十分多くの星が生まれ、それらの紫外線によって宇宙全体の再電離が十分進んだ後、初めて光に満ち満ちた宇宙へと変わるのである¹⁾。

宇宙の晴れ上がりから、最初の星が生まれ、宇宙の再電離が終わるまでの間を、宇宙暗黒時代と呼ぶ^{*1)}。図 1 で、宇宙の大まかな歴史の中での宇宙暗黒時代を示してある。現時点では、大口径の

^{*1)} 狭義で、宇宙の晴れ上がりから最初の星が輝き始めるまでのみを宇宙暗黒時代と呼ぶ場合もある。

赤方偏移 z	時刻 t	予想されるイベント または観測事実
∞	0	ビッグバン(宇宙の始まり)
~ 1100	~ 38 万年	宇宙の晴れ上がり →密度ゆらぎ成長
$\sim 60?$	~ 3600 万年?	最初の星(種族III)誕生 →宇宙再電離開始
?	?	最初の低質量星(種族II)誕生
----- 現在の直接観測最前線 -----		
$\sim 10?$	~ 4.8 億年?	最遠方銀河候補
6.96	7.8億年	最遠方銀河
6.7	8.2億年	最遠方ガンマ線バースト
~ 6	~ 9.5 億年	宇宙再電離終了
1.4	93億年	太陽系形成
0	137億年	現在

宇宙暗黒時代

図1 宇宙暗黒時代を示した宇宙の年表。赤方偏移と時刻の関係は最新の宇宙論パラメーターに基づく。

望遠鏡を用いて、宇宙再電離期の終わり頃にある天体がようやく見え始めてきている段階にある。それ以前、特に宇宙初代の星が生まれる時代は、CMBの間接的情報を除き、観測の手がかりが全くない未知の領域である。そこで何が起きたのかは、今のところ理論的推測に頼るしかない。謎に満ちた、まさに暗黒の時代なのである。

ではこの時代を探っていくにはどうしたらいいのか？ここでガンマ線バースト(GRB: gamma-ray burst)の登場である。GRBは、数秒から数十秒の間、主にガンマ線帯域で、宇宙で最も明るく輝く爆発現象である。ここ10年間程の研究で、GRBは、宇宙論的な距離にあり、大質量星の進化の最終段階で発生することがわかってきた*2。また、電波からX線を含む広い波長域にわたり、数日以上かけて徐々に減光していく残光放射を伴うこともわかった*3, *4)。最近では、V等級で最大5.3等という、人間の裸眼でも見えるほど明るかったGRBまで見つかった*5)。

GRBは、宇宙初代の大質量星にも付随して起きる可能性が十分にある。また、その極めて明るい多波長放射は、超遠方の宇宙からでも、現在もしくは近い将来の望遠鏡で観測可能であると期待される(2章)。このような宇宙初代GRBの多波長放射は、各波長における特徴的な吸収過程や伝播効果などを通じて、宇宙暗黒時代に対する貴重な情報をわれわれにもたらしてくれはずである(3, 4章)。本記事では、宇宙暗黒時代を照らす灯台としてのGRBの可能性を、さまざまな観点から解説する。

2. 宇宙初代ガンマ線バーストの観測可能性

宇宙論的な距離は、赤方偏移 z で表すことができる*3)。また、その距離から放たれた光はわれわれに届くまでに時間がかかるので、 z は宇宙における過去の時刻にも対応している。例えば、 $z=1, 3, 10, 30$ はそれぞれ、3.3, 6.5, 9.7, 11.7 Gpcの距

*2 正確には、大質量星との関係が確実視されているのは、継続時間が2秒以上の“long”GRBのみであり、それより短い“short”GRBは別起源の可能性がある。

*3 その距離から放たれた光の波長は、われわれに届くまでの間に宇宙膨張の効果で $1+z$ 倍長くなる。

離^{*4}を表し、また現在からさかのぼってそれぞれ 78, 115, 133, 136 億年前の時刻に対応する。前述の宇宙晴れ上がりは $z \sim 1,100$ にあたり、宇宙再電離期の終わりはいろいろな観測から $z \sim 6$ であることがわかっている (3 章)。一方、宇宙初代星の形成期は現在の理論から $z \sim 10-60$ と推定されている (4 章)。

現時点で、距離が確認できている最遠方の天体は、ライマン α ・エミッターと呼ばれる特殊な銀河で、 $z=6.96$ である⁶⁾。このような銀河は、最近すばる望遠鏡などで効率よく発見できるようになったが、それ以前、1960 年代から長い間は、最遠方天体の地位はクエーサー^{*5}が占めていた。一方、GRB は、初めてその距離が同定されたのが 1997 年で、遠方天体としての歴史は浅いが、脅威的なペースで z の記録が伸びており、2005 年の $z=6.3$ の GRB の発見⁷⁾に続き、2008 年には $z=6.7$ に更新され⁸⁾、最遠方クエーサーを追い越した。銀河も抜いて GRB が最遠方天体の座をつかむのは時間の問題かもしれない。

さらに遠方の宇宙暗黒時代であっても、GRB が発生さえすれば、それは十分観測できると考えられる。GRB の発生機構については、よくわかっていない側面も多いが、以下、現在の理解をごく簡単に述べる (詳細は参考文献 3, 4 を参照)。大質量星の進化の最終段階で、中心部で核反応の燃料が尽きると、重力崩壊が起きて中性子星もしくはブラックホールが形成され、その際、超相対論的速度をもつジェット的なプラズマ流が放出される。GRB 放射の主成分である、短時間の MeV 帯域ガンマ線 (いわゆるプロンプト放射) は、このプラズマ流の内部から、何らかの機構で発生する。さらに、このプラズマ流が周囲の物質とぶつ

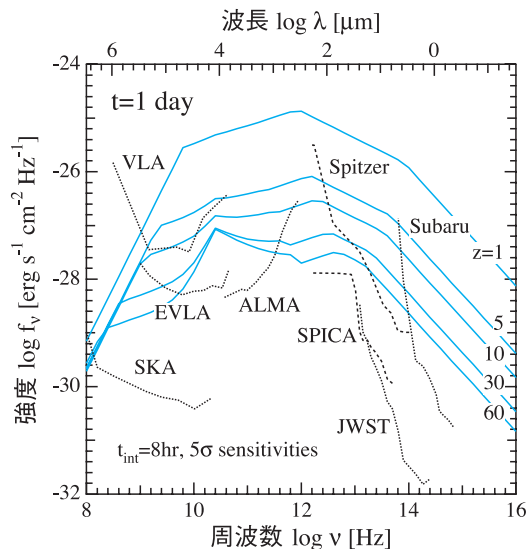


図2 GRB 残光放射の多波長スペクトルの予想と測光観測可能性。実線は、発生から観測者時間 1 日後で、 $z=1, 5, 10, 30, 60$ のスペクトル。点線・破線は、VLA, EVLA, SKA, ALMA, Spitzer, SPICA, すばる, JWST について、8 時間積分で 5σ の連続光に対する感度。

かることで、相対論的な衝撃波が形成され、そこで加速された高エネルギー電子によるシンクロトロンもしくは逆コンプトン放射⁹⁾が、電波から X 線・ガンマ線にわたる残光放射を起こす。この残光放射は、衝撃波が減速するにつれて徐々に減光していく。

プロンプト放射の光度は $L \sim 10^{52}-10^{54} \text{ erg s}^{-1}$ に及び、瞬間的には宇宙で最も明るい天体になる (これに比べ、クエーサーの光度は最大でも $L \sim 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$)。GRB のプロンプト放射は、現在最遠方の $z=6.7$ よりはるかに遠い、 $z \sim 10-60$ の宇宙暗黒時代であっても、Swift 衛星^{*6}などで十分観測できるはずである^{10), 11)}。

^{*4} 1 Gpc (ギガパーセク) はおよそ 30 億光年。ここでいう距離はいわゆる共動距離で、宇宙論パラメーターが $h=0.7, \Omega_m=0.28, \Omega_\Lambda=0.72$ の場合^{1), 2)}。

^{*5} 銀河の中心部にある巨大ブラックホールへの物質降着によって輝く天体³⁾。

^{*6} <http://swift.gsfc.nasa.gov>

残光放射のほうは、超新星残骸の相対論版のようなものであり、物理過程が比較的良好にわかっているため、モデル計算による予想が可能である。モデルのパラメータとして、GRBの総エネルギー、周囲の物質の密度、電子加速の効率、磁場の強度などがあるが、近傍のGRBの残光観測との比較から求められた典型的な値を採用する(詳細は参考文献12を参照、周囲の物質密度については4章で後述)。図2は、 $z=1-60$ の間で起きるGRB残光の多波長スペクトルと、電波・サブミリ波・赤外の各波長において、現在または将来の装置(VLA^{*7}, EVLA^{*8}, SKA^{*9}, ALMA^{*10}, Spitzer^{*11}, SPICA^{*12}, すばる^{*13}, JWST^{*14})による測光観測の可能性を示したものである。

なお、残光放射の主たる部分は周囲の物質中に伝播する前方衝撃波から生じるが、GRB発生後の早い段階で、一部の波長帯では、ジェット・プラズマ中の逆行衝撃波からの放射が重要となる場合があり、上のモデルはそれを考慮してある。サブミリ波帯のとがった形状のスペクトル成分がそれである。

注目すべき点は、ある決まった観測者時間で比較すれば、 z (つまり距離)が非常に大きくなって、残光がそれほど暗くならない点である。これは、宇宙の膨張による時間の遅れの影響で、 z が大きければ大きいほど、より減光が進んでいない(つまり明るい)段階の残光放射を見ることになるからである¹⁰。この効果は、よりすばやく減光する逆行衝撃波成分のほうで、より顕著である¹²。その結果、 $z\sim 10-60$ という超遠方の宇宙であっても、GRBが発生さえすれば、広い波長域に

おいて十分観測が期待できることがわかる。

では、GRBは、宇宙暗黒時代にどれくらいの頻度で発生するのであろうか？これは今のところ、かなり不定性が大きい、いろいろな推定がある。Swift衛星で観測されたGRBの z の分布に基づくと、全GRB(年間約100発)のうち、数%ほどが $z>6$ で起きる、と評価されている¹³。 $z>10$ では理論モデルの評価しきれないが、年間数発程度という予想もある^{11, 14}。宇宙初代の大質量星がGRBを起こすかどうかについても、議論の余地はあるが、可能性としては十分にある¹⁵。以下では、たとえ数発であっても、 $z>6$ のGRBに対して適当な観測ができれば、宇宙暗黒時代について極めて貴重な情報をもたらしてくれる可能性を議論する。

3. 宇宙再電離期：観測的宇宙論のフロンティア

上述のように、現在観測されている最遠方の天体は宇宙再電離期の終わり頃にあり、ここが現在の観測的宇宙論のフロンティアとなっている。最初の星が輝き始めてから、宇宙の最電離が時間とともにどのように進んでいったか、という履歴は、その間の銀河の形成にも大きな影響を与えるので、この宇宙最電離史を明らかにすることは、最重要課題の一つである^{1, 16}。

3.1 中性水素によるライマン α 吸収

宇宙再電離を探るにあたり、まず基本となるのは銀河間ガスの中性水素によるライマン α 遷移(1,215 Å)より長い波長の光の吸収であり、ガン・ピーターソン(GP: Gunn-Peterson)効果と

*7 <http://www.vla.nrao.edu>

*8 <http://www.aoc.nrao.edu/evla>

*9 <http://www.skatelescope.org>

*10 <http://www.nro.nao.ac.jp/alma/J>

*11 <http://ssc.spitzer.caltech.edu>

*12 <http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA>

*13 <http://www.naoj.org>

*14 <http://www.jwst.nasa.gov>

呼ばれる¹⁷⁾。再電離が $z \sim 6$ で終了していることがわかるのは、 $z \geq 6$ のクエーサーのスペクトルでGP効果が現れてくるのが観測されているからである¹⁶⁾。

この方法の問題点は、中性水素の割合がほんの0.1%を超えるだけで、ほとんどすべての(1,215 Å以上の)光が吸収されてしまうので、再電離の終了期を探るには適しているものの、それ以前の中性水素がより多い時期の電離状態を調べることが困難なことである。一つの打開策として、1,215 Åよりわずかに短い波長域の詳しい分光観測をし、吸収線の裾の減衰翼の形状を測る方法がある^{*15)}。これについては、すばる望遠鏡による $z = 6.3$ のGRBの観測ですでに重要な成果が得られており¹⁸⁾、今後の観測にも期待がかかるが、詳細は別の記事¹⁹⁾に譲る。

なお、GP効果は、遠方GRBの z の測定にも重要な役割を果たす。低い z では、スペクトル中の金属の吸収線を同定して z を決められるが、 $z \sim 6$ を超えてくると、地球大気の影響で難しくなってくる。しかしライマン α 付近のGP効果を精度よく分光すれば z の決定は可能で、 $z = 6.7$ のGRBではこの方法が実用された⁸⁾。図3は、図2の赤外の部分を拡大したもので、各 z のスペクトル中のライマン α の位置と、いくつかの観測装置による分光の感度を比較してある。 $z \sim 15$ まではすばる望遠鏡、 $z \sim 30$ までは将来の30メートル望遠鏡TMTに補償光学付きで z 測定可能だが、それ以上の z になると、JWSTやSPICAなどのスペース望遠鏡が必要になることがわかる。

上で述べたように、GRBは大質量星の進化に伴って起きるので、GRBの発生率は星形成率の指標にもなる。したがって、 $z > 6$ で多くのGRBの z さえ決められれば、宇宙暗黒時代における星

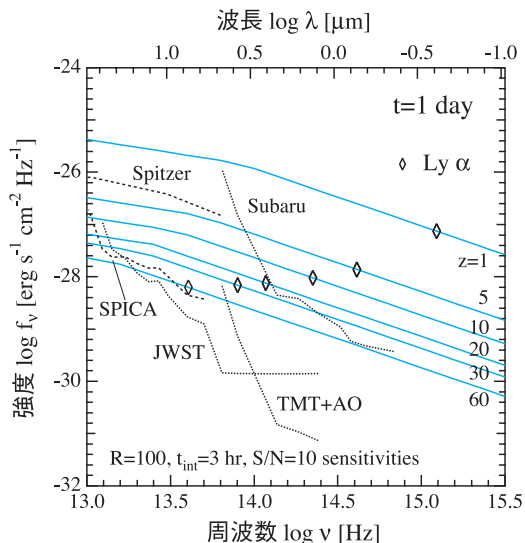


図3 図2の赤外帯域を拡大したもの。実線は $z = 1, 5, 10, 20, 30, 60$ の各スペクトルで、菱形の印はその中のライマン α の赤方偏移した周波数を示している。点線・破線は、すばる、TMT+AO(補償光学付の30メートル望遠鏡)、JWST、Spitzer、SPICAについて、波長分解能 $R = 100$ 、3時間積分分で $S/N = 10$ の分光に対する感度。

形成率の進化について、間接的だが貴重な情報が得られることになる²⁰⁾。

3.2 低周波電波の分散効果と宇宙再電離史

宇宙再電離に話題を戻すと、再電離史の初期を探るためには、中性水素のみならず、銀河間ガスの電離した成分を調べることも不可欠である。WMAP衛星^{*16)}によるCMBの詳細な観測から、電離銀河間ガスによるトムソン散乱の効果と考えられる偏光の揺らぎが検出されており、 $z \sim 1,100$ まで積分した電離ガスの光学的厚みが $\tau_T \sim 0.09$ という結果が得られている²⁾。しかし、これはあくまでも大きな z まで積分した平均の値であり、再電離にとって重要な制限ではあるが、再電離史そのものの詳細は教えてくれない。実際、GP効

*15 吸収線の中心部に比べ吸収断面積が小さいので、中性水素がより多くても全吸収を起こさず、その量を測ることができる。

*16 <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

果と CMB 偏光の双方の観測と合致した再電離モデルとして、長い時間かけて徐々に電離が進むものや、一度目の電離の後、いったん再結合し、その後もう一度電離が起きる二重電離モデルなど、さまざまなものが提唱されている¹⁶⁾。

そこでわれわれは、低周波電波の分散効果に着目した(参考文献 22, 23 も参照)。電波は、電離した物質中を伝播する際に分散を起こし、周波数の逆 2 乗に比例して到達の時間が遅れることが知られている⁹⁾。この効果は、例えば銀河系内のパルサーにおいて、電波パルスがちょうどこの周波数依存性で遅れてやってくる現象として顕著に見られ、その詳細な観測は、間にある星間物質の電離成分を調べる主要な手段となっている。同じように、GRB からの低周波電波の遅れを見ることで、銀河間物質の電離成分を調べ、その z の依存性から、宇宙の再電離史を有効に探ることはできないだろうか？

図 4 は、観測周波数 30 MHz における電波の到達の遅れの z に対する依存性を、何通りかの再電離モデルについて比較したものである。 $z > 10$ では遅れがおよそ 10 時間にも及ぶことがわかる。ライマン α 吸収とは対照的に、分散効果はガスが中性のときは全く起きず、電離が進んで初めてその影響が出てくる。異なる z の GRB からの電波の遅れを測定して比較することで、どのくらいの z で再電離が進むのか、それは徐々に起きるのか、それとも二重電離モデルのように複雑な振舞いをするのか、答えを出せる可能性がある。

問題は、GRB の低周波電波が、この目的に適したように強く突発的に出るかどうか、である。実は、この帯域の残光放射ではシンクロトロン自己吸収⁹⁾が強く効いてしまい、GRB といえども、残念ながらそれほど明るくならない(図 2)。しかも光度曲線はゆっくりと増光する傾向にある。通常

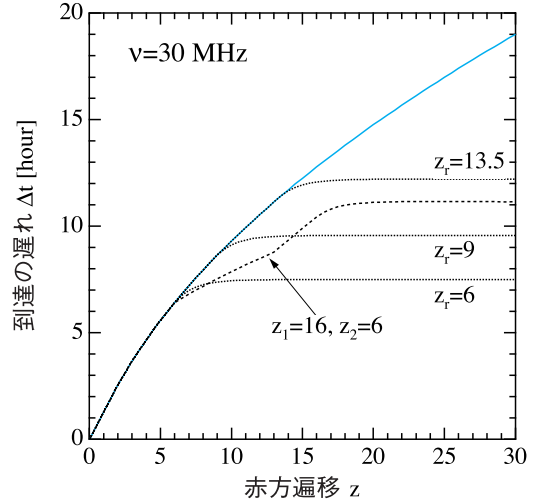


図 4 観測周波数 30 MHz における電波の到達の遅れ Δt の赤方偏移 z に対する依存性。実線は常に完全電離の銀河間物質を仮定した場合、点線は z_r 付近で徐々に再電離するモデルで $z_r = 6, 9, 13.5$ の 3 通り、破線は $z_1 = 16$ と $z_2 = 6$ の 2 回再電離が起きるモデル。

の残光以外に、パルスのような低周波電波放射があることが望ましいが、そのような成分の理論的予想はいくつかある(参考文献 21 を参照)。また、GRB とは同定されていないが、1.4 GHz で 30 Jy^{*17} の強度に及ぶ電波のバースト現象が観測されており、銀河間物質によると考えられる分散効果もはっきりと見えている。現在建設中の LOFAR^{*18} や将来の SKA のような広視野の電波望遠鏡で、このような現象がもっと多く観測され、宇宙再電離の解明に有効に活用されるかもしれない。

3.3 高エネルギーガンマ線と紫外線背景放射

近い将来、高エネルギーガンマ線も宇宙再電離の研究にとって重要な役割を果たす可能性がある。近年のガンマ線天文学の発展は目覚ましく、TeV 帯域では世界各地で新世代のチェレンコフ望遠鏡が活躍しており、GeV 帯域では最新鋭の

*17 $1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$

*18 <http://www.lofar.org>

Fermi 衛星^{*19}も稼働し始めた。

宇宙の再電離にとって、星などから放たれた紫外線の背景放射が肝心であることは言うまでもない。したがって、ガスの状態だけでなく、この背景放射を観測することも極めて重要である。しかし、対応する波長域で全天一様の放射を直接測定するのは容易ではない。すなわち、 $z > 6$ の背景放射の成分を $z < 6$ のものと識別することもほぼ不可能である。

一方、GeV-TeV 帯域の高エネルギーガンマ線は、そのエネルギーに応じて赤外から紫外領域の背景放射の光子と電子・陽電子対生成 ($\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$) を起こして吸収される。これを利用し、GP 効果の観測から吸収体の中性ガスを調べるのと同様に、GeV-TeV ガンマ線源のスペクトルにおける対生成吸収の効果から、赤外から紫外の背景放射の性質を探ることが可能である。実際、最近の HESS^{*20} や MAGIC^{*21} 望遠鏡によるブレーザー天体^{*22} の TeV ガンマ線観測から、近傍の赤外線や可視光の背景放射に対して重要な制限が得られている^{25), 26)}。

$z \geq 5$ では、赤方偏移が強くなるのと光子密度が高くなることで、GeV 帯域ガンマ線で紫外線背景放射による吸収が効いてきて、宇宙再電離にとって本質的な情報が得られるようになると期待される^{27), 28)}。われわれは、CMB の偏向揺らぎ、クエーサーの GP 効果、近赤外線源の深探査など、多くの遠方宇宙の観測結果と合致した宇宙再電離モデルにおける、現実的な紫外線背景放射の理論計算²⁹⁾を用いて、 $z = 5-20$ の間で予想されるガンマ線対生成吸収を調べた²⁸⁾。各 z にあるガンマ線源について、観測エネルギー E に対する吸収の光学的厚み $\tau(E)$ の結果を、スペクトル減衰因子 $\exp(-\tau(E))$ の形で、図5に示す。ちょうど

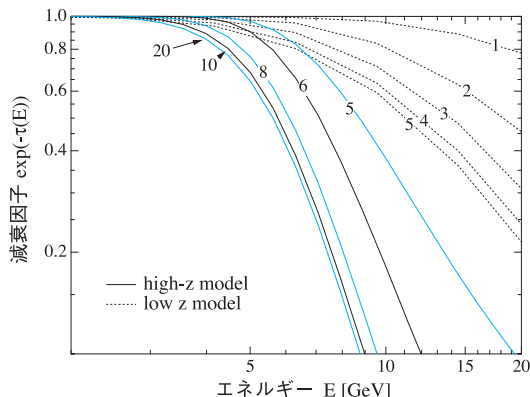


図5 各 z のガンマ線源について、観測エネルギー E に対し、背景放射との対生成吸収によるスペクトル減衰因子 $\exp(-\tau(E))$ 。 $z = 5-20$ の実線はわれわれのモデル²⁸⁾、 $z = 1-5$ の点線は Kneiske らのモデル³³⁾。

Fermi 衛星の帯域にあたる数 GeV から数十 GeV にかけて、ガンマ線源のスペクトルにカットオフが生じ、また、背景放射が 912 Å (ライマン吸収端) 以下の波長で急激に落ちていることに起因し、 $z \sim 5-8$ の範囲では z ごとに有意な違いが出ることがわかる。Fermi 衛星、もしくは将来の 5@5 望遠鏡³⁰⁾ などにより、 $z \geq 5$ の GRB やブレーザーの高エネルギー成分^{31), 32)} でこの効果が観測できれば、宇宙再電離期の紫外線背景放射の強度と進化について、極めて貴重な制限となるはずである。

さらには、上記の過程で生じた電子・陽電子対が起こす遅延された二次的ガンマ線を通じ、微弱な銀河間磁場を調べられる可能性もあり³⁴⁾⁻³⁶⁾、このような磁場は間接的に宇宙再電離と関連しているかもしれない³⁷⁾。いずれにしろ、ガンマ線天文学が観測的宇宙論に大きな寄与をする時代も遠くないかもしれない。

*19 <http://fermi.gsfc.nasa.gov>

*20 <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>

*21 <http://magic.mppmu.mpg.de>

*22 巨大ブラックホールへの降着で輝く天体のうち、相対論的ジェットから生じる非熱的放射が卓越しているもの³⁾。

4. 宇宙初代星形成期：未知なる領域へ

今のところ赤方偏移が確実な最遠方天体は $z \sim 7$ だが、多色測光による推定から、さらに遠方かもしれない銀河の候補天体が $z \sim 10$ まで見つまっている³⁸⁾。しかし $z > 10$ になると候補天体すらなく、 $z \sim 1,100$ の宇宙晴れ上がりに至るまで、直接観測未到の領域に突入する。15-16世紀の大航海時代の世界地図では、大陸の果ての未知の地帯は“Terra Incognita”（ラテン語で“Unknown Land”）と記されていたが、宇宙では $z > 10$ がそれにあたり、非常に興味をそそられる、闇に包まれたミステリー・ゾーンである。宇宙で最初の星はその間どこかで生まれたはずである。

4.1 宇宙初代星形成の理論的予想

直接観測が皆無である一方、CMBの観測から、幸い $z \sim 1,100$ 以前の宇宙の状態は比較的良好にわかっている。それを初期条件とし、宇宙の晴れ上がりから宇宙初代星の形成までの進化を、現在の物理学の知識に基づき理論的に予想することは、ある程度可能である。近年、この分野の理論研究は非常に精力的に行われており、さまざまな知見が得られてきた^{39), 40)}。宇宙で最初の星の形成について特筆すべき点は、形成時のガスに重元素が存在しないため、金属線やダストの影響が無視でき、現在の宇宙における星形成に比べ、理論的取り扱いがより簡便になることにある。さらに、やはり現在では重要な磁場、宇宙線、乱流などの効果も小さいと思われる。形成過程で金属やダストが効かない星は種族 III 型星と呼ばれ、効率の悪い水素分子放射でしかガスが冷却して収縮できないため、原始星雲の質量が大きくなり、最終的に生まれる星も大質量で典型的に太陽の数百倍ほどになると考えられる³⁹⁾。その形成時期は z

≤ 60 と予想されている⁴¹⁾。

大質量の種族 III 型星は、紫外線を強く放射して周囲のガスを電離し、またその最後に超新星爆発を起こして周囲のガスを圧縮しながら重元素をまき散らすはずである。種族 III 型星の形成が進んでいくと、これらの輻射場や重元素が後の世代の星形成に影響を及ぼすようになり、様相がより複雑になってくる。特に、形成時ガスの重元素量がある程度以上に増えると、効率のよい金属線やダストによる冷却が効くようになり、主に太陽質量程度の種族 II 型星の形成へ移行すると考えられる^{41), 42)}。その時期や具体的機構についてはまだ不明な点も多いが、種族 II 型星形成への遷移は、寿命の長い星が初めて生まれ、その周りの惑星系で（少なくともわれわれが知っているような）生命が初めて安定に進化できるようになると考えると、宇宙の歴史上で非常に意義深いイベントかもしれない*²³⁾。

しかし、これらはいくまで现阶段での理論的予想に過ぎず、観測で実証されなければ現実であるかどうか全くわからない。例えば、最初に金属やダストがないのは疑いの余地はないが、一方で本当に磁場や宇宙線の影響はないのであろうか？ 最近では、ダークマターの対消滅による加熱が効いて上記の描像が変わる、という主張まで登場し⁴³⁾、終止が付かない状態である。大体理論屋と言うのは（私もその一人であるが）、面白ければよいと考える輩も多いので、観測による裁定が下されない限り真の理解は得られない。 $z \sim 60$ でも観測可能な GRB (2章) が、その役目を果たしてくれるのではないだろうか。

4.2 電波・サブミリ波の原子・分子吸収線と初代星形成

初代星形成を有効に探る可能性の一つとして、われわれは GRB 残光中の原子・分子吸収線観測

*²³⁾ いつまでも大質量で寿命が 100 万年ほどの種族 III 型星のみだったとすると、宇宙に生命は生まれなかったのではないだろうか。

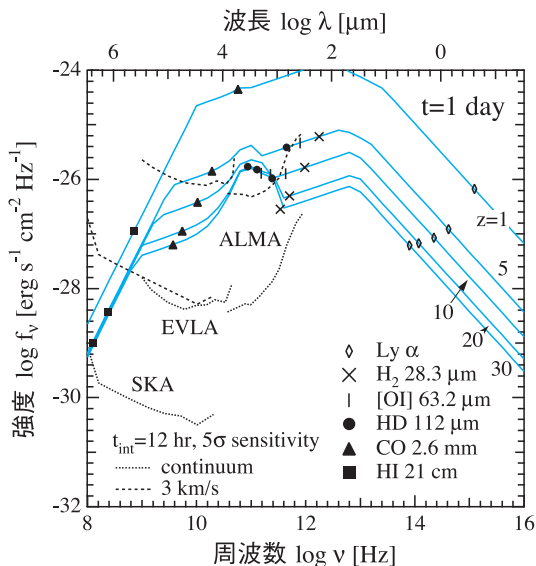


図6 GRB 残光放射の多波長スペクトルと吸収線の観測可能性。実線は、発生から観測者時間1日後の $z=1, 5, 10, 20, 30$ の各スペクトルで、各種の印は、その中の H_2 , HD, CO, [OI] の第一遷移、および HI 21 cm, ライマン α の赤方偏移した周波数を示している。また、ALMA, EVLA, SKA について、点線は連続光、破線は分解能 3 km/s での分光に対する、12 時間積分で 5σ の感度を重ねてある。

に着目した（詳細は参考文献 12 を参照）。まず、異なる金属量に応じて種族 III 型、II 型双方の場合を含めた初代原始星雲進化のモデル⁴¹⁾に基づき、星雲コアで予想されるさまざまな原子・分子吸収線の光学的厚みを評価した。その結果、 H_2 の吸収線は常に弱いが、ある条件では、金属量がゼロであっても、HD 分子の回転順位線の吸収が比較的強くなり、種族 III 型も含めた初代星形成の物理を探る貴重な手段となりうるということがわかった。さらに、金属量の太陽組成に対する比が 0.1% 以上に増えると、CO の回転順位線や [OI] などの禁制線の吸収が強くなり、これは種族 II 型へ

の星形成の遷移を探るうえで重要となる。また、CO は複数の回転順位が効いてくるので、その強度比が求められれば原始星雲の温度などの物理状態が特定できる可能性がある。

ではこのような吸収線は GRB の残光で実際に観測可能であろうか？ 図 6 では、比較的明るい GRB の残光スペクトルの各 z での予想と、その中のいくつかの吸収線の周波数を示し、ALMA, EVLA, SKA による分光観測の感度と比較してある。SKA を用いれば、CO の分光は十分可能であり、HD, [OI] の分光も（容易ではないが）ALMA で実現できる可能性がある。

さらに考察が必要な点は、GRB が起きる段階で、上記のような光学的厚みをもつ原始星雲が周辺に十分な確率で存在するかどうか、である。GRB の親星が生まれた星雲自身では、親星からの紫外線による解離で、大部分の分子は失われてしまっているかもしれない。一方で、星団の中で星形成が起きる場合、もしくは親星が形成した HII 領域^{*24}の外縁で星形成が誘発される場合などでは、GRB の比較的近傍の 100 pc^{*25}以内にこのような星雲があることが十分考えられる。

なお、図 2, 3, 6 の残光モデルにおいて、周囲の物質密度は、高い z でも 1 cm^{-3} という一定値を仮定したが、少なくとも親星が種族 III 型の場合は、その HII 領域によって物質が掃かれる効果で、残光衝撃波が起きる 1 pc 以下のスケールではこのような密度になると予想されている⁴⁴⁾。

吸収線観測はテクニカルな課題もある。ALMA や SKA のような望遠鏡による分光観測では、ある時刻で同時に観測できるバンド幅は狭い範囲に限られる。定常光源なら時間とともに広い帯域をスキャンすればよいが、時々刻々と減光していく GRB は時間が勝負である。あらかじめ狙う吸収線を定め、それがどの観測周波数帯に現れるか観

*24 星からの紫外線で電離された周囲のガスの領域。

*25 1 pc（パーセク）はおよそ 3 光年。

測前に推定するために、迅速な赤方偏移の情報が必要となる。例えば ALMA の場合、GRB 発生後 1 日以内に赤方偏移が数%の精度で決められていることが求められるが、これは現在の中小口径の光赤外望遠鏡によるすばやいフォローアップ観測で可能なはずである。いずれにしろ、突発天体に対応できる体制に加え、光赤外と協力した戦略が必要で、チャレンジングな観測となるであろうが、他の方法では得られない貴重な情報が期待でき、ALMA, SKA にとってぜひ検討すべき可能性である。

このほかにも、宇宙初代星形成の理論を観測的に検証し、その正体に迫るために必要な情報としては、金属量とその組成、初期ダストの量と性質、周辺の密度分布、磁場・宇宙線・乱流の効果とその進化など、枚挙にいとまがない。また、種族 III 型星の存在自体もまだ観測で未確認⁴⁵⁾なので、その兆候を探すことも極めて重要である。それぞれについて GRB の利用法が考えられるが、詳細は今後の別の機会に譲りたい。

5. まとめと今後の展望

GRB の極めて明るい多波長放射は、謎に満ちた宇宙暗黒時代を照らしてくれる貴重な光源である。観測的宇宙論のフロンティアである宇宙再電離期にとっては、GRB がすでに銀河やクエーサーなどによる他の観測手法と相補的な役割を担っており、ここでは低周波電波から高エネルギーガンマ線を利用した将来の可能性も紹介した。観測未開拓の宇宙初代星形成期においては、GRB が最有力の手段になるかもしれない、ここで議論した電波・サブミリ波による手法のほか、今後のさらなる研究が望まれる。また、この記事では紹介しなかったが、プロンプト放射の光度とスペクトルの間に見られる特徴的な相関関係を利用

して、ダークエネルギーなどの宇宙論パラメータの性質を調べられる可能性もある⁴⁶⁾。

将来観測計画としては、上に述べたもの以外に、新しいタイプの GRB 観測衛星として、JANUS, EXIST^{*26}, XENIA などが検討されている。日本では、科研費の特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」が現在進行中で、理論・観測双方において盛んな活動が展開されている。

無論、前人未到の宇宙暗黒時代に挑むには、宇宙最大の爆発現象の GRB をもってしても容易なことではなく、たいへんチャレンジングで困難を伴う観測も多くなるであろう。私事で恐縮であるが、最後に非常に教訓になる逸話を紹介したい。私がドイツ、ガーヒングの MPA (マックス・プランク宇宙物理学研究所) にて、ラシード・スニャエフ (Rashid Sunyaev) 氏のグループでポスドクを過ごしていたとき、昼食時などにスニャエフはいろいろためになる昔話をしてくれたものだが、その中でも特に印象に残っているものがある。彼がまだ大学院生だった頃、指導教官のヤコフ・ゼルドビッチ (Yakov Zeldovich) とともに、CMB の宇宙論的揺らぎについて (今となっては非常に先駆的な) 理論計算の論文を書いた⁴⁷⁾、*27。その研究をソ連の学会で発表したところ、「そんな数万分の一ほどの揺らぎが観測できるわけないので何の意味があるのか」と聴衆に散々批判された。まだ若かったスニャエフがどぎまぎしていると、ゼルドビッチがすくっと立ち上がり、「皆さんの懸念もわかるが、これが観測できる日もいつくるかもしれないので、ご理解いただききたい」と言った。すでに業界の重鎮だったゼルドビッチの一言で聴衆は静まったそうで、「強力な指導教官をもつことは重要だ」がスニャエフのオチだったが、とにかく、CMB の揺らぎはその 22 年後に

*26 <http://exist.gsfc.nasa.gov>

*27 有名な銀河団での散乱によるスニャエフ・ゼルドビッチ効果とは別の仕事。

COBE 衛星によって実際に検出され、WMAP 衛星で追認の後、2006 年のノーベル物理学賞につながったことは周知のとおりである。

私はこれを聞いて以来、「こんなことは実際に観測できそうにないから意味ない」とは決して考えないようにしている。人類の技術の進歩は、想像以上のペースで進むこともあれば、全く予想外の展開を見せるときもある。とにかく観測を試みて初めてわかることも多々ある。すぐに実現できなくとも、長い目で見て重要になる可能性が少しでもあれば、いろいろな提案をしておくのは価値あることではないだろうか。GP 効果にしても、1965 年の提唱から実際に観測された 2001 年まで、実に 36 年を要しているのである。

$z > 10$ の GRB は明日にも発生して観測されるかもしれない。それが、太古の宇宙の深い闇に差す一筋の光明となることに強い期待を込め、この記事を書く。

謝 辞

まず第一に、この記事の執筆を薦めていただき、そのうえで辛抱強く叱咤激励し続けてくださった編集部の和田桂一氏に深く感謝いたします。次に、大向一行氏、Benedetta Ciardi 氏、Ruben Salvaterra 氏、Andrea Ferrara 氏ほか、ここで紹介した研究にご協力して下さった共同研究者の皆様全員に御礼を申し上げます。また、観測について貴重な助言をいただきいた山田 亨氏、今西昌俊氏、原稿に対して有益なコメントをいただいた井岡邦仁氏、家 正則氏に謝辞を述べたいと思います。最後に、前所属のマックス・プランク宇宙物理学研究所、マックス・プランク原子核物理学研究所、国立天文台理論研究部の皆様、そして現所属の京都大学天体核研究室の皆様、特に毎日 GRB その他について楽しく議論させていただいている中村卓史氏に感謝の念をお伝えいたします。科研費特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」、および京都大学理学研究

科グローバル COE プログラム「普遍性と創発性から紡ぐ次世代物理学」から援助をいただいています。

参考文献

- 1) 二間瀬敏史, 池内 了, 千葉証司 (編), 2007, 「宇宙論 II—宇宙の進化」, 日本評論社
- 2) Dunkley J., et al., ApJS, 180, 306
- 3) 小山勝二, 嶺重 慎 (編), 2007, 「ブラックホールと高エネルギー現象」, 日本評論社
- 4) Meszaros P., 2006, Rep. Prog. Phys. 69, 2259
- 5) Racusin J. L., et al., 2008, Nature 455, 183
- 6) Iye M., et al., 2006, Nature 443, 186
- 7) Kawai N., et al., 2005, Nature 440, 184
- 8) Greiner J., et al., 2008, ApJ, submitted, arXiv:0810.2314
- 9) Rybicki G. B., Lightman A. P., 1979, *Radiative Processes in Astrophysics*. Wiley
- 10) Lamb D. Q., Reichart D. E., 2000, ApJ 536, 1
- 11) Naoz S., Bromberg O., 2007, MNRAS 380, 757
- 12) Inoue S., Omukai K., Ciardi B., 2007, MNRAS 380, 1715
- 13) Tanvir N. R., Jakobsson P., 2007, astro-ph/0701777
- 14) Bromm V., Loeb A., 2006, ApJ 642, 382
- 15) Woosley S. E., Heger A., 2006, ApJ 637, 914
- 16) Fan X., Carilli C. L., Keating B., 2006, ARAA 44, 415
- 17) Gunn J., Peterson B., 1965, ApJ 142, 1633
- 18) Totani T., et al., 2006, PASJ 58, 485
- 19) 河合誠之, 青木賢太郎, 戸谷友則, 2007, 天文月報 100, 17
- 20) Totani T., 1999, ApJ 511, 41
- 21) Inoue S., 2004, MNRAS 348, 999
- 22) Ioka K., 2003, ApJ 598, L79
- 23) 井岡邦仁, 2004, 天文月報 97, 523
- 24) Lorimer D. R., et al., 2007, Science 318, 777
- 25) Aharonian F., et al., 2006, Nature 440, 1018
- 26) Albert J., et al., 2008, Science 320, 1752
- 27) Oh S. P., 2001, ApJ 553, 25
- 28) Inoue S., Salvaterra R., Choudhury T. R., Ferrara A., Ciardi B., Schneider R., MNRAS, submitted
- 29) Choudhury T. R., Ferrara A., 2006, MNRAS 371, L55
- 30) Aharonian F. et al., 2001, Astropart. phys 15, 335
- 31) Asano K., Inoue S., Meszaros P., ApJ, submitted, arXiv:0807.0951
- 32) Inoue S., Takahara F., 1996, ApJ 463, 555
- 33) Kneiske T. M., Bretz T., Mannheim K., Hartmann D. H., 2004, A&A 413, 807

- 34) Plaga R., 2005, *Nature* 374, 430
- 35) Ichiki K., Inoue S., Takahashi K., 2008, *ApJ* 682, 127
- 36) Takahashi K., Murase K., Ichiki K., Inoue S., Nagataki, S., 2008, *ApJ* 687, L5
- 37) Gnedin N. Y., Ferrara A., Zweibel E., 2000, *ApJ* 539, 505
- 38) Bouwens R., Illingsworth G., 2006, *New Astron. Rev.* 50, 152
- 39) Bromm V., Larson R., 2004, *ARAA* 42, 79
- 40) Yoshida N., Omukai K., Hernquist L., 2008, *Science* 321, 669
- 41) Omukai K., Tsuribe T., Schneider R., Ferrara A., 2005, *ApJ* 626, 627
- 42) Greif T. H., et al., arXiv:0808.1647
- 43) Freese K., et al., arXiv:0808.0472
- 44) Kitayama T., Yoshida N., Susa H., Umemura M., 2006, *ApJ* 613, 631
- 45) Nagao T., et al., 2008, *ApJ* 680, 100
- 46) Tsutsui R., et al., *MNRAS*, submitted, arXiv:0807.2911
- 47) Sunyaev R. A., Zeldovich Y. B., 1970, *Astrophys. Space Sci.* 7, 3

Probing the Cosmic Dark Ages with the First Gamma-Ray Bursts in the Universe
Susumu INOUE

Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: Gamma-ray bursts, the biggest explosions in the Universe, are expected to arise even during the first epochs of star formation in the Universe. Their extremely luminous, broadband emission should serve as crucial probes of the cosmic dark ages, beyond the realm of current observations. Utilizing the characteristic properties of each waveband from radio and sub-millimeter to high-energy gamma rays, we discuss various potential ways of probing first star formation and cosmic reionization through gamma-ray bursts and their observational prospects.