

ガンマ線バーストと宇宙の星形成史

戸谷友則

〈国立天文台 理論天文学研究系 181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: totani@th.nao.ac.jp

ガンマ線バーストはいまだに正体のわからない謎の天体であるが、それが宇宙論的な遠距離で起きている現象であることはほぼ確立した。このことは、ガンマ線バーストが単なる天体現象というだけでなく、それを観測することが宇宙論的なタイムスケールでの銀河の形成や進化と密接な関係があることを示唆する。ここでは、宇宙における大局的星形成史という観点からガンマ線バーストという現象を考え、その面白さや重要性をご紹介します。

1. はじめに

ガンマ線バーストとは、数百キロ電子ボルト ($\text{keV}=10^3\text{eV}$) から数メガ電子ボルト ($\text{MeV}=10^6\text{eV}$) 程度のガンマ線が数十秒程度の間、突然バースト的に放射される謎の現象である。発生頻度はほぼ1日に1回程度で、その天球上での方向は観測の精度の範囲内で完全に一様であり、いかなる非等方性も確認されていない。つい最近までどのくらいの距離で起きている天体現象なのか、我々の銀河系内での現象なのか、はたまた宇宙論的な大遠方からやってくるのかすらわかっていなかった。1997年になって、アフターグローと呼ばれる残光がX線や可視光、電波で発見されるようになり、可視光アフターグローに見いだされた赤方偏移した吸収線の発見から、それが宇宙論的な大遠方でとてつもないエネルギーを解放している現象であることが確立した。そのエネルギーはガンマ線バーストが等方的に放射されていれば 10^{52-53} エルグ、これは超新星爆発で観測されるエネルギーより10倍から100倍も大きい。これら最近の観測の進展については吉田篤正氏の解説記事¹⁾を参照されたい。

ガンマ線バーストを引き起こす天体現象は果たして何なのか、未だに全くわかっていない。しかし、何らかの形で大質量星の重力崩壊に関係した現象

であるというのが大方の研究者の見解である。その根拠として、解放されるエネルギースケールとガンマ線光度の時間変動が挙げられる。 10^{52-53} エルグというエネルギーは大質量星が重力崩壊を起こし、中性子星が作られるときに解放される重力エネルギーにほぼ等しい。通常、超新星爆発で観測されるエネルギーは 10^{51} エルグだが、これは電磁波として放出されるエネルギーで、ほとんどのエネルギーはニュートリノによって放出される。実際、1987年に大マゼラン雲で起きた超新星からはカミオカンデによって11個のニュートリノが検出され、それから推定されるエネルギーは 10^{53} エルグ以上である。従って、通常ニュートリノで放出されるエネルギーがなんらかの形でガンマ線として放射されればガンマ線バーストになるかもしれない。また、ガンマ線バーストは数ミリ秒程度の非常に激しい時間変動を示す。このような激しい時間変動はたとえば活動銀河のような大きな天体では説明が難しい。通常の星程度のコンパクトな大きさの天体と考えられている。

従って、ガンマ線バーストが赤方偏移で $z=1$ を大きく上回る宇宙論的遠方で起きている大質量星の形成に関係した現象であるということはほぼ間違いないといえる。その赤方偏移は最遠方のクエーサーや原始銀河に匹敵し、超新星を大きく凌駕

する。従って、ガンマ線バーストを観測することは、単に一つのバースト現象を観測するというだけでなく、深宇宙における星形成活動を覗き見るということでもある。今後、ガンマ線バーストをこうした銀河の形成や進化との関連で議論することがより重要となっていくと考えられる。本稿では、ガンマ線バーストと宇宙の星形成史や銀河の形成進化との関係を、筆者の最近の研究を中心にいくつかの視点から議論してみたい。

2. ガンマ線バーストの明るさ分布と宇宙の星形成史

ガンマ線バーストに関する統計的観測量として重要なものに、明るさ分布がある。これは、ある明るさ以上のガンマ線バーストの個数を明るさの関数としてプロット

したもので、いわゆる $\log N$ - $\log S$ 分布である(図1)。ガンマ線バーストの到来方向は全天上で一様であると前述したが、この明るさ分布は方向ではなく奥行きに関するガンマ線バーストの空間分布の情報を与える。基本的には暗いバーストほど遠方にあると考えられるからである。もし、ガンマ線バーストが奥行きに関しても一様に分布しているなら、明るさ分布は図1の破線のようなはずである。(これはガンマ線バーストの絶対光度にばらつきがあったとしても必ず成り立つ。)しかし、1992年にコンプトンガンマ線天文台衛星のBATSE検出器が観測した明るさ分布は当時の予想を大きく裏切り、暗いバースト、従って遠方と考えられるガンマ線バーストの数が一様分布の期待値に比べ有意に少

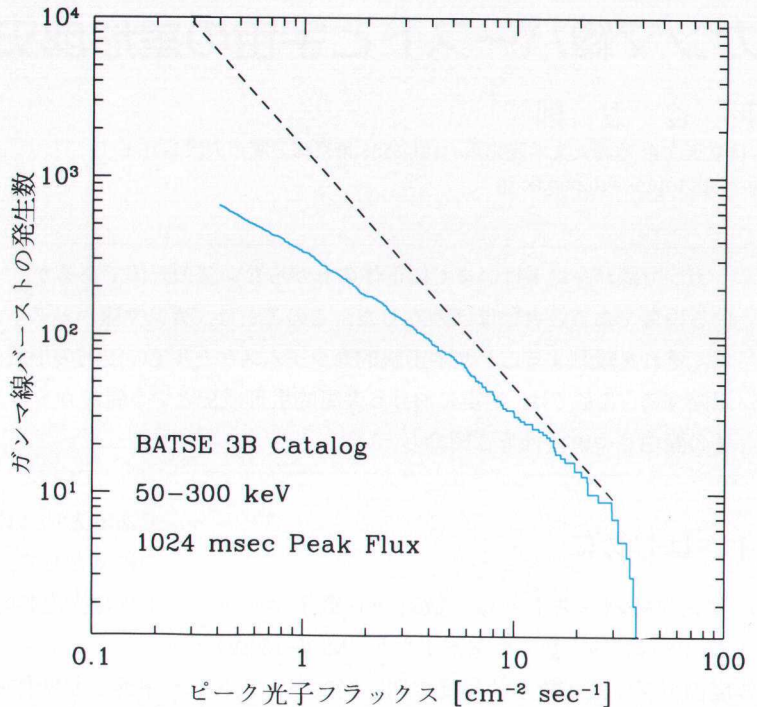


図1：コンプトン衛星BATSE検出器が観測したガンマ線バーストの明るさ分布。横軸は50-300 keVバンドでのピークフラックス。時間幅は1024 msec。縦軸はあるピークフラックス以上のガンマ線バーストの観測数(青の実線)。ガンマ線バーストがユークリッド空間で一様分布をしていれば破線のような分布になると期待される。

なかったのである(図1)。この明るさ分布の異常を説明するために、二つの考えが提出された。一つは、ガンマ線バーストが宇宙論的遠方から来ているとすれば、遠方のバーストは膨張宇宙の幾何学的効果により見かけ上少なくて見え、観測を自然に説明できる。この場合、もっとも暗い、従って遠方のバーストの赤方偏移は1程度であろうと見積もられた。もう一つは、我々の銀河のハローに分布しているという考えで、長く宇宙論説に対抗して存在していたが、周知の通り近年のアフターグローや吸収線の発見によって宇宙論説にはほぼ軍配が上がっている。さて、宇宙論説に決まったのはいいのだが、上記の宇宙論説の議論の中にはある重要な前提がある。ガンマ線バーストの発生頻

度が宇宙論的なタイムスケールのなかで変化していないという前提である。我々の近傍（あるいは現在）と遠方（あるいは昔）のガンマ線バーストの発生頻度が違えば、明るいバーストと暗いバーストの数に違いがでてくるので、明るさ分布の解析と発生頻度の進化は不可分である。発生頻度一定というのはもちろん仮定であり、現実には発生頻度は進化していると思われるが、ガンマ線バーストの正体が分からない以上、その発生頻度の進化が分かるはずもなく、その影響についてはほとんど研究されてこなかった。

筆者はガンマ線バーストに関する研究に入る以前、銀河進化や観測的宇宙論に関する研究を行っていた。1997年頃から、高赤方偏移の銀河観測に基づく星形成率の宇宙論的進化の観測データが始め、理論的な銀河進化モデルとの比較といった研究が始まり、筆者もそれに関する仕事をする中で「宇宙の大局的星形成史」という概念に関心を寄せるようになった。一方で、ガンマ線バーストという謎めいた現象にも以前から興味を持っていたため、この宇宙の星形成史がガンマ線バーストの解析に役立つのではないかという考えに至るのにそう時間はかからなかった。前述したように、ガンマ線バーストが宇宙論的な距離からやってくるなら、その源は大質量星の重力崩壊に関係しているであろう。大質量星の寿命は宇宙年齢に比べはるかに短く、宇宙論的タイムスケールで物事を考えるときには無視して良い。となれば、ガンマ線バーストの発生頻度は宇宙の星形成史によってほぼ決まるといい。今までの明るさ分布解析では一定とするか、ある

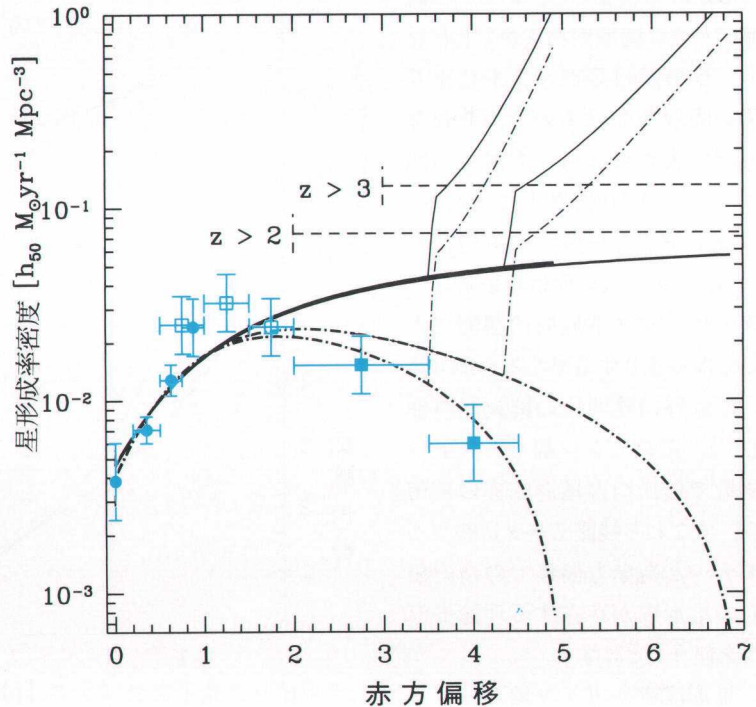


図2：宇宙の星形成史。横軸は赤方偏移、縦軸は単位体積あたりの星形成率である。観測データ（青点）は紫外線光度密度に基づく。曲線はモデル計算。実線と一点鎖線の違いは、銀河進化モデルにおいて銀河の外からのガスの流入があるかないかによる。銀河形成が $z = 5$ で起きた場合と7で起きた場合の二つの曲線が描かれている。楕円銀河が赤方偏移2もしくは3以上で形成された場合、それ以前に期待される平均的星形成率が点線で示してある。

いは人工的な関数を仮定するしかなかったバーストの発生頻度の進化を、初めて物理的な根拠から計算できるはずである。このような観点から、ガンマ線バーストの明るさ分布を解析してみることにした。

図2は紫外線の光度から推定した宇宙の星形成史の観測データと、筆者らの計算した理論モデルの比較である²⁾。赤方偏移1以下の部分ではほぼ一致しているが、赤方偏移2以上では一つ問題がある。楕円銀河は、標準的には高赤方偏移における爆発的星形成によって形成されたと考えられているが、それから予想される星形成率（破線）に比べ観測データははるかに小さいのである。これは楕円銀河の形成に関する我々の考えが間違っ

いるかも知れないし、あるいは観測データに問題があるかもしれない。紫外線は星間ダストにより強い吸収を受けるので、それを考慮に入れば高赤方偏移の観測データは10倍以上にもなり、理論的予測と一致する可能性もある。どちらなのかは将来的には遠赤外のダスト放射の観測によってははっきりするであろうが（詳しくは谷口義明氏の解説記事参照³⁾）、このガンマ線バーストの解析では二つの星形成史のモデル、すなわち観測データに基づくモデルと高赤方偏移での楕円銀河の星形成が存在する理論モデルを使うことにする。

星形成率とガンマ線バーストの発生率をどう結び付けたいだろうか？ もし、ガンマ線バーストがII型超新星など、大質量星の重力崩壊に直接関係した現象なら星形成率とガンマ線バーストの発生率は比例すると考えて良い。しかし、筆者がこの仕事を行った当時、ガンマ線

バーストの最も有力なモデルは連星中性子星の合体であった。（最近には他にも有力なモデルができていますが、本稿では割愛させて頂く。）この場合、二つの中性子星が重力波を放出しながら合体するまでの時間は連星形成時の二つの中性子星間の距離に依存し、時として宇宙年齢程度に長くなる。従って、この連星合体までの時間の遅れを簡単なモデルによって考慮に入れてガンマ線バーストの発生頻度を計算した。ガンマ線バーストの発生頻度の進化为計算できれば、あとは観測データとの比較で、この場合、未知のパラメータであるガンマ線バーストの距離がフィッティングパラメータと

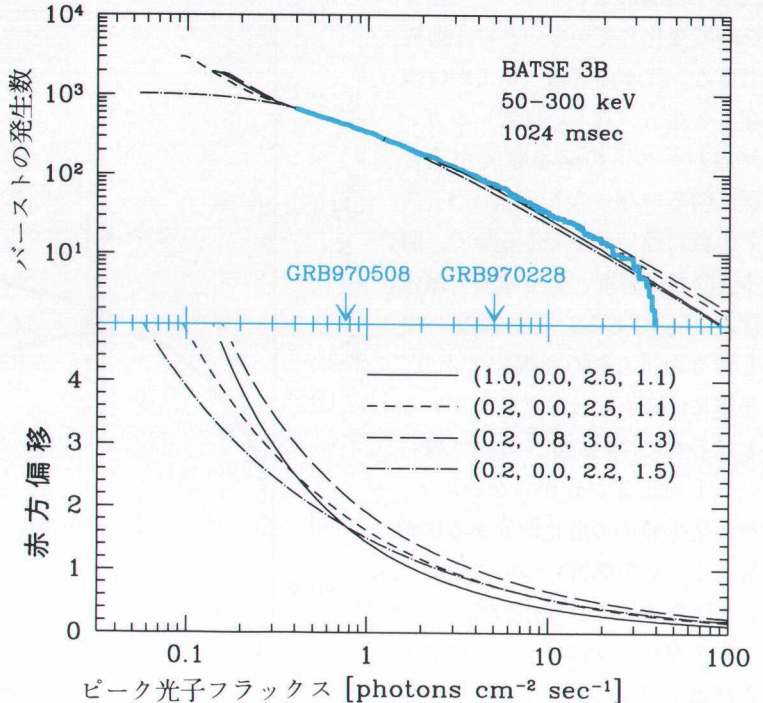


図3：(上パネル)ガンマ線バーストの明るさ分布(図1)の観測データと理論モデルの比較。青の実線は観測データ、その他は理論曲線。(下パネル)各理論モデルについて、ピークフラックスとガンマ線バーストの赤方偏移の関係。括弧内の4つの数値はモデルパラメータで順に、宇宙の密度パラメータ(Ω_0)、宇宙定数(Ω_Λ)、最も暗い(遠い)バーストの赤方偏移、及びガンマ線バーストのエネルギースペクトルのパワーインデックスである。最初にアフターグローが発見されたGRB970228、及び最初に赤方偏移が決定されたGRB970508 ($0.825 \leq z < 2.3$)のピークフラックスも図中に示してある。一点鎖線のモデルでは観測に基づく星形成史、そのほかの曲線では理論的な星形成史のモデルが使用されている。

なる。ここでは、最も暗い(遠い)バーストの赤方偏移を用いることにする。

図3の上のパネルにある理論曲線は観測データにあう明るさ分布のモデル曲線をいくつか描いたものである。典型的に、最も遠いバーストの赤方偏移が2から3程度であれば明るさ分布のデータを説明できる。この値は従来の値、赤方偏移1よりも大きい。この理由は以下のように理解できる。過去の方が星形成率が高いため、ガンマ線バーストの数も多い。従って、暗いバーストの数が増える。一方で宇宙論的效果は暗いバーストを減らす。従って、星形成で増えた分を減らして観測に合わ

せるためにはより強い宇宙論的効果、従ってより大きなガンマ線バーストの距離スケールが必要となるのである。この結果、ガンマ線バーストの全放射エネルギーも大きくなり、放射が等方的なら従来の 10^{51} エルグから 10^{52} エルグ程度になる。このガンマ線バーストの放射が等方的かどうかという問題にも、明るさ分布の解析は一つのヒントを与えてくれる。今までは発生頻度の進化に着目して解析してきたが、絶対的なガンマ線バーストの発生数は理論的に予想される連星中性子星合体の百分の一程度しかない。これは、ガンマ線バーストの放射が全方位の百分の一程度の領域にだけビームされて放射されていると考えると説明がつく。さらに、実質的な全放射エネルギーも百分の一になるため、ガンマ線バーストの理論モデルの構築の際、巨大なエネルギーをどうガンマ線で出すかという難問が解決しやすくなる。

また、図3の一転鎖線では観測データに基づく星形成史が、それ以外では理論モデルに基づく星形成史が使われている。高赤方偏移で楕円銀河形成のある理論モデルのほうでは、暗いバーストが多くなっている。現在の明るさ分布のデータでは両者の判別はしにくいだが、理論モデルのほうが無理なく一致する。より感度のよい検出器がより暗いガンマ線バーストの明るさ分布を将来観測できれば銀河形成の問題にも重要な情報をもたらすだろう。

以上のような研究をまとめて論文として発表したのは1997年夏である⁴⁾。海外にもほぼ同時期に同じ観点でガンマ線バーストの明るさ分布を解析したグループがあったが、筆者の論文が最も早く出版され、ガンマ線バーストの解析に宇宙の星形成史という概念を持ち込んだ最初の論文として認められたのは幸いであった。また、当時はBep-poSAX衛星がアフターグローをまさに発見した直後であり、論文を投稿した段階ではガンマ線バーストが宇宙論的かどうかはまだ混沌として決着していなかった。例えば、投稿後にアフターグローが固有運動をしているという話がでたりして、非常

に心配したりもした。(もし本当であればガンマ線バーストはかなり近くの現象になり、宇宙論的という仮定をしている筆者の論文は潰れてしまう。結局、後で間違いということになったが。)5月8日のガンマ線バーストGRB 970508のアフターグロー中に赤方偏移した吸収線が発見されるという画期的な事件があり、宇宙論的起源が確定したのは論文審査中のことであった。早速筆者の理論解析から予想されるこのガンマ線バーストの赤方偏移を調べてみると、赤方偏移 z は2程度(図3)である。これは観測的に決まったこのガンマ線バーストの赤方偏移、 $0.835 < z < 2.3$ と一致していた。当然、この点は論文の最終稿に含めることにした。

ここまでの話の中で、実はある重要な仮定がなされている。ガンマ線バーストの絶対光度は全てのガンマ線バーストで一定という仮定である。こうしなければガンマ線バーストの明るさと距離に関係をつけることができない。しかし、ガンマ線バーストは非常に多様性に富んだ現象であり、この仮定がどの程度許されるのかはよくわかっていない。どのくらい絶対光度にばらつきがあるのかすらわかっていないため、便宜的に一定と仮定していたのであるが、絶対光度のばらつきがこれまでの結論に影響を与える可能性は否定できない。しかし将来的にはより多くのガンマ線バーストで赤方偏移が測定され、赤方偏移分布の情報も手にはいるようになれば、ガンマ線バーストの起源のみならず銀河の形成進化に関しても、より信頼性のある解析ができるようになるだろう。日本でも、ガンマ線バースト探査のためHETE II衛星が今年中に打ち上げられ、多くのアフターグローを発見することが期待される。また赤方偏移の決定には「すばる」のような大型光学望遠鏡の活躍が期待される。はやくそのような態勢が実現してほしいものである。

3. ガンマ線バーストからの TeV ガンマ線放射と宇宙赤外線背景放射

これまでは明るさ分布という視点でガンマ線バーストと宇宙の星形成史の関係を議論してきたが、以下では全く別の視点からガンマ線バースト観測と銀河の形成進化との関係について書きたい。ガンマ線バーストから、テラ電子ボルト $\text{TeV} = 10^{12}\text{eV}$ という超高エネルギーガンマ線が放出されている可能性が最近議論されている。ちなみにガンマ線バーストから通常放射されるガンマ線のエネルギーは $\text{keV} - \text{MeV}$ ($10^3 - 10^6\text{eV}$) 程度であり、従ってガンマ線バーストの典型的な光子のエネルギーより 100 万倍も高いエネルギーの光子が放射されているかも知れないのである。複数の観測グループから示唆的な観測の報告^{5), 6)}があり、まだ決定的な検出と言える状況ではないようだが、事実とすれば極めて興味深い。筆者は最近、このガンマ線バーストからの TeV 領域光子の放射を説明することができる理論モデルを提出した^{7), 8)}。そのモデルでは、TeV ガンマ線は陽子のシンクロトロン放射で放射される。シンクロトロン放射は荷電粒子が磁場中を回転運動する際に放出される光で、宇宙では電子のシンクロトロンは電波から X 線にいたるまで幅広いバンドで頻繁に観測されている。しかし、陽子のシンクロトロンは通常は放射効率が悪く、観測されることは極めて稀である。しかし今の場合、陽子のエネルギーは 10^{20}eV というとてつもないエネルギーであり、この場合は陽子の持っているエネルギーはガンマ線バーストのタイムスケールと同じ程度の時間で効率よく放射される。このような高エネルギーの陽子は、ガンマ線バーストのエネルギーから推定される典型的な磁場中ではショック加速により加速可能であるということも示すことができる。また、この 10^{20}eV というエネルギーは地球上で観測される超高エネルギー宇宙線とほぼ同じエネルギーである。超高エネルギー宇宙線の起源もま

た宇宙物理学の中の大問題の一つであるが、ガンマ線バーストが起源ではないかという説は以前からあり、それとこの TeV ガンマ線放射との関係は興味深い。

さて、それと宇宙の星形成史はどう関係するのだろうか？ TeV という超高エネルギーの光子は、宇宙空間を何の障害もなく伝搬できるわけではない。宇宙空間は様々な波長の電磁波の背景放射で満ちている。TeV 領域のガンマ線は赤外線領域の背景放射と相互作用し、電子-陽電子対を生成する。この反応は TeV ガンマ線が宇宙論的な距離にある源からやってくる場合、反応率が 1 に近づき、従って急速に吸収されるようになる。従って、ガンマ線バーストに限らず、一般的に宇宙論的距離にある天体からの TeV ガンマ線の吸収の度合いを観測できれば宇宙赤外線背景放射に関する貴重な情報を与える。そして、この赤外線背景放射の起源は銀河、すなわち星からでる光なのである。波長 5 ミクロンを境に、短波長側では星からの直接光で形成され、長波長側では星からでた紫外線が星間ダストに吸収され、暖められたダストからの熱放射で形成されている。従って、宇宙赤外線背景放射の量を測ることは現在までに宇宙で形成された星の総量を測ることであり、その進化を見ることは宇宙の星形成史を見ることである。ガンマ線バーストからの TeV ガンマ線に関する最近の観測的示唆が事実なら、その強度からいって宇宙で最も遠い TeV ガンマ線源となり、その観測は銀河の形成進化の研究にも重要な情報を与えるのである。

図 4 は、筆者が最近計算した光学から遠赤外線領域における銀河光起源の宇宙背景放射の理論スペクトルと観測データの比較である。左側の山は星からの直接光、右側の山はダストからの再放射成分である。TeV 領域ガンマ線の吸収の観測は大体 3-30 ミクロンの背景放射の情報を与える。ちょうど星の直接光とダスト成分が入れ替わるころであり、星の光のうちどのくらいの割合がダス

トに吸収されて遠赤外線において再放出されているのかという問題に関し重要な情報をもたらすと考えられる。ガンマ線バーストからの TeV ガンマ線放射がまだ完全に確立していないのが残念だが、もし本当に放射されているなら、近い将来に確実に観測されるであろうし、それは銀河の形成進化の研究にもインパクトを与えると期待される。

4. おわりに

ガンマ線バーストに関する研究は筆者独自の研究ですが、ガンマ線バーストの研究に参入するきっかけとなった銀河の進化や観測的宇宙論に関する研究は私の学生時代の指導教官であった東大物理学科の佐藤勝彦教授と、東大理学部天文センターの吉井譲教授との共同研究です。この場を借りて両氏に感謝の意を表したいと思います。また、学生時代にお世話になり、本記事を書くきっかけを与えてくださった須藤靖東大助教授にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 吉田篤正, 1998, 天文月報 91, 338
- 2) Totani T., Yoshii Y. and Sato K., 1997, ApJ, 483, L75
- 3) 谷口義明, 1998, 天文月報 91, 528
- 4) Totani T., 1997, ApJ, 486, L71
- 5) Amenomori M. et al., 1996, A&A, 311, 919
- 6) Padilla L. et al., 1998, A&A, 337, 43
- 7) Totani T., 1998, ApJ, 502, L13
- 8) Totani T., 1998, ApJ, 509, L81

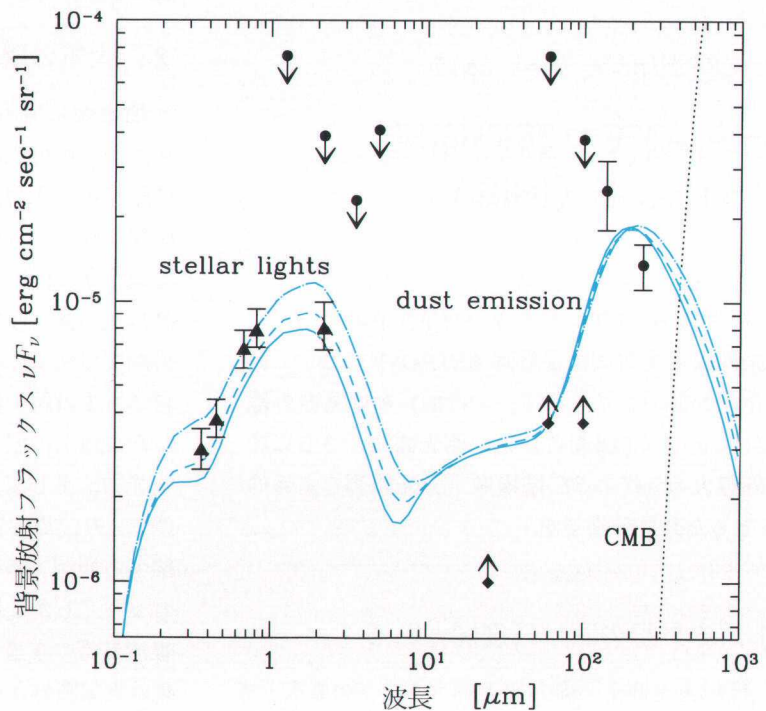


図4：宇宙赤外線背景放射のスペクトル。観測データはハッブルディープフィールド（三角）、COBE衛星（丸）、及び赤外線衛星IRAS（ダイヤモンド）による。3つの曲線は筆者による理論計算である。3つのモデルは宇宙論パラメータの違いで、それぞれ $(h, \Omega_b, \Omega_\Lambda) = (0.5, 1, 0)$ （実線）、 $(0.6, 0.2, 0)$ （破線）、 $(0.7, 0.2, 0.8)$ （一点鎖線）。

Gamma-Ray Bursts and Cosmic Star Formation History

Tomonori TOTANI

National Astronomical Observatory, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: Although the origin of gamma-ray bursts (GRBs) is still a complete mystery, it has been confirmed that they are coming from cosmological distances. This suggests that observing GRBs can be a probe to formation and evolution of galaxies on a cosmological time scale. Here I discuss GRBs from a viewpoint of cosmic star formation history and show how they are interesting and important.