

# ガンマ線バーストで実現！ 暗黒宇宙を切り開く 距離梯子



米徳



筒井



高橋

## 米徳大輔・村上敏夫

〈金沢大学理工研究域数物科学系 〒920-1192 石川県金沢市角間町〉

e-mail: yonetoku@astro.s.kanazawa-u.ac.jp

## 筒井亮・中村卓史

〈京都大学理学研究科 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町〉

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

## 高橋慶太郎

〈名古屋大学理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

e-mail: keitaro@a.phys.nagoya-u.ac.jp

ガリレオが望遠鏡を宇宙へ向けてから 400 年。この間、人類はより遠くの天体を追い求めてきました。あの海の向こうには、山の向こうには、未知の世界が広がっているに違いない！ という冒険心からか、それとも世界一の座を賭けての競争心からかはわかりませんが、遠くの天体を観測することで『宇宙の真理』に近づいていることは間違いないでしょう。これまでに人類が観測に成功した最も遠い天体はガンマ線バースト (GRB) で、130 億光年彼方 (赤方偏移 8.2) の光をとらえています。本稿の筆者 5 名は GRB 宇宙論プロジェクトを組織し、初期宇宙における観測的宇宙論を推進しています。そして世界で初めて、赤方偏移が 2 を超える宇宙での暗黒エネルギーや暗黒物質量の測定に成功しました。この 100 年余の天文学の歩みに、GRB を用いたわれわれの成果を積み上げて、最新の初期宇宙観測について紹介します。

### 1. 距離を測ること

天体までの距離というのは、天文学における最も基本的な量と言えます。距離がわかれば相手の大きさ、光度、エネルギーなどさまざまな物理量が求まるからです。しかし、距離を測るのは結構難しい。「分光スペクトルの吸収線から赤方偏移を測る」と思われるかもしれませんが、それは天体の後退速度であって、ここでいう距離とは「あの天体までは何メートルか」ということです。

ここから先、4 章までは、いっさい理論的な宇宙モデルは登場しません。純粋な観測事実だけを積み上げて 130 億光年先の距離を測定してご覧にいきます。そして、初期宇宙まで続く距離と赤方偏移の関係 (ハッブル図) から、ダークエネルギーの性質が見えてくるかもしれないというセンセーショナルな話を展開します。

天体までの距離を測定するには「宇宙の距離梯子 (はしご)」というものを使います。名前はヘンテコですが、これは現代天文学にとっても、本稿

を理解していただくのにも重要な概念ですので説明しておきます。われわれは普通、長さを測るときには物差しやメジャーを使います。もっと長い物を測るときは、適当な長さのひもを用意して「物差し何個分」というようにあらかじめ長さを知っておいて、そのひもがいくつ分に相当するか、というように測ったりします。これが「距離梯子」の概念です。未知の長さのひもを、すでに長さのわかっている物差しで「校正」するわけです。いったん校正してしまえば安心して使えます。ただし、最初の物差しが粗末なものだと歪みがどんどん蓄積されて誤差が大きくなってしまいますから注意が必要です。

天文学でも全く同じことが行われていて、それを「宇宙の距離梯子」と呼ぶわけです。次の章からは少し具体例を交えながら、梯子を登ってみましょう。

## 2. 天の川銀河の星

天文学の教科書の最初には、必ずといって良いほど三角測量について記述されています。地球の大きさ、月や太陽までの距離の原始的な測定方法についても大変面白く、その精度にも驚きを感じますが、ここでは割愛し、詳しく説明してある文献<sup>1</sup>などに譲ることにします。

さて、三角測量の重要なポイントは、天体を観測する2地点間の距離が離れているほど見込む角度の差が大きくなるので、遠くの距離を測定できることです。春と秋に同じ星を観測すれば地球と太陽間の距離を有効に使えるので恒星までの距離を求めることができます。歴史的には1838年、ドイツの数学者・天文学者のベッセル（ベッセル関数などで有名）が、はくちょう座61番星を観測し、年周視差の測定に初めて成功したということです。このときの年周視差はわずか0.314秒角（1,000分の1度）で、太陽までの距離の約100万倍の距離（ $1 \times 10^{17}$ メートル）を測定したことになります。ちなみに現在ではヒッパルコス衛星に

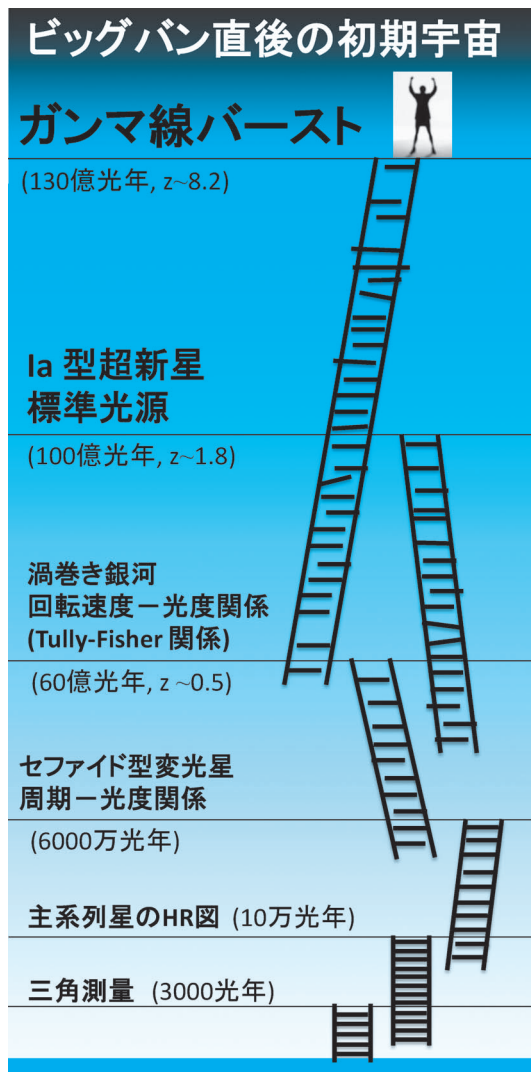


図1 宇宙の距離梯子を示した概念図。赤方偏移を  $z$  で表している。天体の光度と強く相関している物理法則（距離測定用の物差し）を使って、その天体までの距離を測定できます。いわば、天体物理学でしっかりとつながった「梯子」を登ることに相当します。遠方天体の物理法則は、近くの天体の物理法則で校正されていますが、遠くの距離梯子ほど歪みが伝播してしまい、危ない梯子となってしまいます。

よって約3,000光年（ $3 \times 10^{19}$ メートル）の距離が測定されています<sup>2)</sup>。三角測量は幾何学的に距離を求めているので、天体を使っているとはいって

も数学的手法に感じられます。

三角測量で距離が求められるような地球近傍の恒星を観測していくと、色温度と光度（絶対等級）の間に極めて強い相関関係があることが発見されました。かの有名な、ヘルツシュプルング・ラッセル図（HR 図）です。もし、この宇宙のすべての主系列星が HR 図に従っているならば、三角測量では距離が測定できないような遠い星に対して、距離を求めることができます。なぜなら、色温度を測定すれば星の光度（ $L$ ）は一意的に求まるので、観測されたフラックス（ $F$ : 見かけの明るさ）を使って、距離（ $d$ ）を、光度の定義式（ $L = 4\pi d^2 F$ ）を変形した  $d = (L/4\pi F)^{1/2}$  から求められるからです。

三角測量で手の届く範囲の主系列星で HR 図を作り（校正し）、より遠い主系列星へ適用するという、距離梯子の概念があります。天体の性質を使うことで、距離の測定という最も基本的な行為を、数学から天文学へバトンタッチしたわけです。

### 3. 銀河の外へ

さて、銀河系を離れてもっと遠い距離を測定するには別の距離梯子が必要になります。問題は「距離  $d$  を使わずに  $L$  を決める方法」を天体観測から見つけることにあります。それには次のような種類が知られています。HR 図が適用できる領域には、たくさんの変光星が見つっていますが、その中でもセファイド変光星には「変光の周期が長いほど明るい」という性質があることを、1908年に米国のリービットが発見しました<sup>3)</sup>。これは周期を測定すれば光度が一意的に決まりますので距離梯子として使えます。エドウィン・ハッブルはアンドロメダ銀河中のセファイド変光星の周期を測定し、銀河系外の天体であると同定した事はあまりにも有名です。そして1929年、距離梯子が銀河系を抜け出したことで、遠い銀河ほど後退速度が速いという宇宙膨張の発見に結びついた

わけです<sup>4), 5)</sup>。セファイド変光星では約 6,000 万年（ $6 \times 10^7$  メートル）まで測定できています。

1977年、ターリーとフィッシャーは、渦巻き銀河の回転速度と銀河の光度が強く相関していることを発見しました<sup>6)</sup>。銀河内部に星が多ければ銀河の光度は大きくなり、内部の質量が大きければ銀河の回転速度も速くなります（ケプラーの法則）。本当は暗黒物質の分布なども考慮しなくてはなりません、おおよそ理解できます。分光スペクトルのドップラー幅から銀河の回転速度を測定することで、銀河の光度を知ることができます。そして  $d = (L/4\pi F)^{1/2}$  の式から距離を測定できます。1,000 億個もの星の集団である銀河を、まると距離梯子に使えるわけですからその威力は絶大で、約 60 億光年（ $6 \times 10^{25}$  メートル）まで測定できています。このように、60 億光年まで伸びる距離梯子は 140 年にもわたる天文学者の血と汗と努力、そして観測事実の結晶なわけです。そしてわれわれは彼らの「梯子」が安定していることを信じて、さらに遠くを目指すのです。

### 4. Ia 型超新星

現在の宇宙論を語るにあたって、最も重要な距離梯子は Ia 型超新星です。Ia 型超新星とは連星系をなしている白色矮星が相手の恒星から降り積もったガスによってチャンドラセカール限界まで質量を増加させたとき、自らの重力を支え切れなくなって生じる超新星爆発です。電子の縮退圧で支えられる限界（チャンドラセカール限界）は太陽質量の約 1.4 倍です。一定の質量の星が重力崩壊するわけですから、解放されるエネルギーや明るさが大体どれもそろっていて、標準光源になると考えられています。

図 2(上) は Ia 型超新星の可視光での光度曲線で、絶対等級が 1 等級（明るさで 2.5 倍）程度でそろっていることがわかります。もちろんこの絶対等級は、前出のターリー・フィッシャー関係から求めた光度距離を用いて計算されています。これ

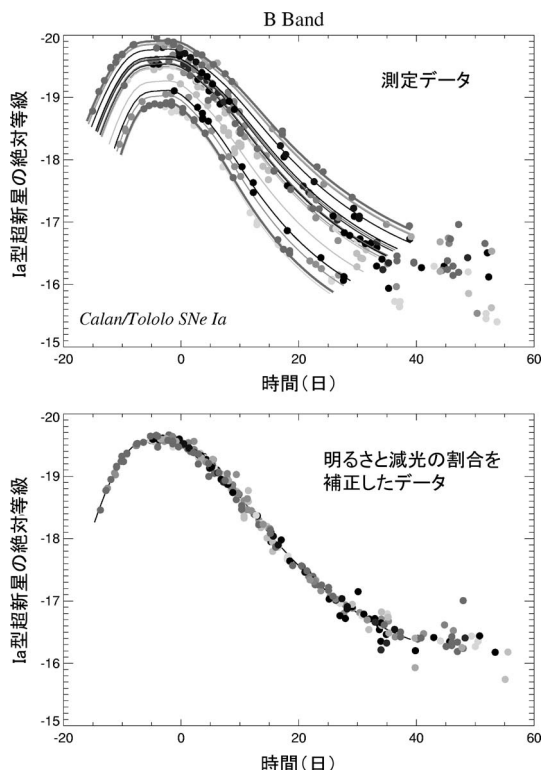


図2 Ia型超新星爆発の光度曲線<sup>9)</sup>。(上図) Bバンドで観測された絶対等級の時間変化で、最大光度が明るい爆発ほど緩やかに減光するという傾向が見られます。(下図) 明るさと減光割合のずれを補正した光度曲線を表しています。すべてのIa型超新星が同一の振舞いで記述できる「標準光源」であることがわかります。

でもとても良い標準光源だと思いますが、1993年にフィリップスは、Ia型超新星は「最大光度が明るいほど緩やかに減光する」という法則を見いだしました<sup>7), 8)</sup>。それを定量化して補正した光度曲線が図2(下)で、なるほどほぼ完全に一致するわけです<sup>9), 10)</sup>。Ia型超新星の減光の様子を観測すれば、ピーク時の光度がわかるという事実は、誰もが信用する標準光源(距離梯子)としての地位を確立しています。

Ia型超新星を使って赤方偏移1.8までの距離が測定されています。赤方偏移は現在とその時代との宇宙の膨張スケールの比を表すので、赤方偏移

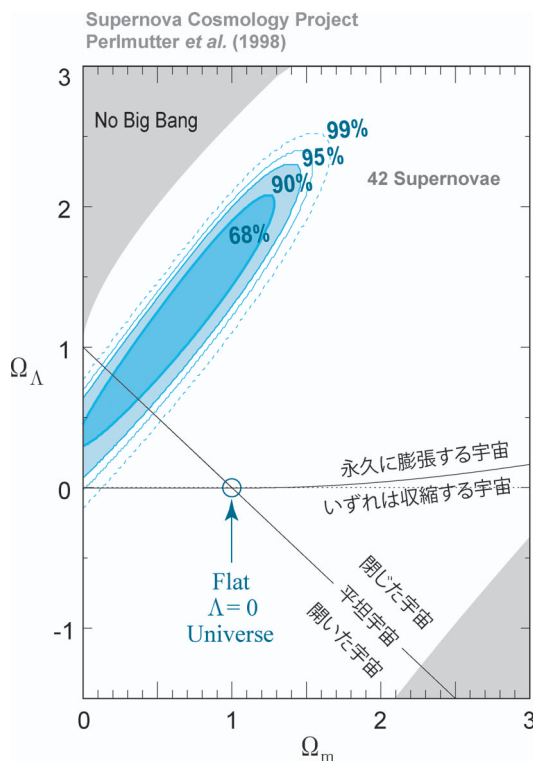


図3 Ia型超新星から測定した宇宙論パラメーター $\Omega_m$ と $\Omega_\Lambda$ <sup>9)</sup>。平坦な宇宙を仮定した場合は $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.27, 0.73)$ となり、宇宙のエネルギー密度の7割は暗黒エネルギーであると考えられています。

と距離との関係がわかると、この宇宙空間がどのように膨張してきたかの歴史を調べることができます。ここで初めて、人間が考えた理論モデルがどれほど正しいかを、観測量と比較しながら調べることができるわけです。最近では、宇宙定数 $\Omega_\Lambda$ を含めた $\Lambda$ -CDMモデルというのが主流で、パラメーターとしては物質量を表す $\Omega_m$ 、宇宙定数の大きさを表す $\Omega_\Lambda$ 、そして現在の宇宙の膨張速度を表すハッブルパラメータが含まれています。

観測量と $\Lambda$ -CDMモデルを比較して $(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$ を測定した等高線を図3に示します。この観測結果と宇宙背景放射の観測を組み合わせることで、われわれは $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.27, 0.73)$ という宇宙に住んでいることが示唆されています。宇宙のエネ

ルギー密度の7割以上を宇宙定数という得体のしれない物(?)が担っていて、それ以外が物質であるというわけです。しかもその物質のほとんどが暗黒物質で、「目に見える物質」は4%に過ぎないと言われています。ほかにも独立な観測によって宇宙定数の存在が示されています。これだけ科学技術が進んでいるのに、宇宙の96%は未知であるという奇妙な事態に陥っています。

この宇宙定数  $\Omega_\Lambda$  は現代宇宙論にとって最大の謎の一つです。天文学者や宇宙物理学者だけでなく、素粒子物理学者も注目しています。宇宙誕生間もない頃には、物質のエネルギー密度  $\Omega_m$  が  $\Omega_\Lambda$  よりも十分大きいので、 $\Omega_\Lambda$  は宇宙の進化に全く影響を及ぼしません。しかし、宇宙が膨張すると密度が下がり ( $\Omega_m$  が小さくなって)、赤方偏移が1の頃には  $\Omega_m$  と  $\Omega_\Lambda$  が同程度になります。その頃から宇宙は「加速膨張」に転じ、現在の宇宙は  $\Omega_\Lambda$  に支配されつつあります。ではなぜ、宇宙定数は現在になって効いてくるような値にセットされていたのでしょうか？ また宇宙定数は本当に「定数」、つまり時間進化をしないのでしょうか？ 宇宙定数を含め、宇宙を加速膨張させるようなエネルギーを暗黒エネルギーと呼んでいます。暗黒エネルギーの実体や起源は何なのか、それを探るうえで大きなヒントになるのが  $\Omega_\Lambda$  の時間変化です。そして次に説明するように、ガンマ線バーストは暗黒エネルギーの時間変化を測定する強力な道具となる可能性があります。

## 5. ガンマ線バースト (GRB)

GRB とは数十秒という短時間に、激しい時間変動を伴いながら大量のガンマ線を放出する現象です (図4(上)を参照)。1回のGRBで解放されるガンマ線放射のエネルギーは大きい場合は  $10^{54}$  エルグにも達し、宇宙最大の爆発現象として位置づけられています。この突発的なガンマ線放射はすぐに終わってしまいますが、その後も数日間、X線や可視光、電波で輝く「残光」が伴いま

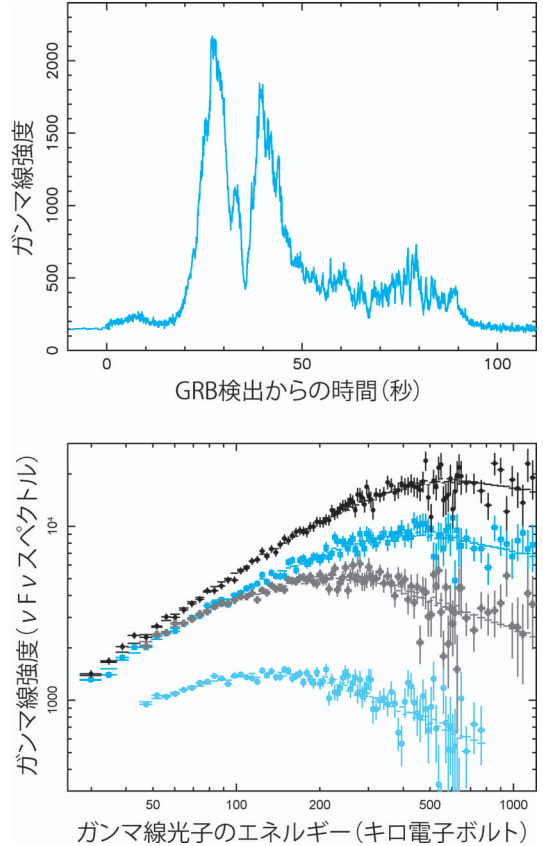


図4 (上図) GRB の光度曲線。激しい時間変動を伴いながら  $10^{52}$  エルグものエネルギーを解放する宇宙最大の爆発現象です。(下図) 観測されたガンマ線スペクトルを比較した図。山型のピークエネルギーが高いほど明るい傾向が見られます。

す。残光の観測から赤方偏移を同定することができ、多くのGRBは100億光年よりも遠い初期宇宙で発生していることが知られています。GRBの起源はエネルギーの大きな超新星爆発であると確認された例があり、大質量の星が崩壊してブラックホールを作り出すときに発生すると考えられています。詳しいGRBの観測や理論については、過去の天文月報に数多く掲載されていますのでご参照ください<sup>11)~15)</sup>。

GRBのガンマ線のスペクトルは折れ曲がったべき関数型で、シンクロトロン放射に代表される

ような非熱的放射をしています<sup>16)</sup>。図4(下)に、いくつかのスペクトルの例を示してありますが、一般的に山なりの形状をしています。この山の頂上に対応するエネルギーをピークエネルギー( $E_p$ )と呼び、最も効率良くガンマ線放射を行っている特徴的なエネルギーを意味します。われわれの研究グループでは、赤方偏移の効果を補正したピークエネルギーと最大光度( $L_p$ )の間に強い相関があることを発見しました。投稿論文<sup>17)-22)</sup>や天文月報の記事<sup>11)</sup>で発表していますので参照してください。これは $E_p$ を観測すれば最大光度 $L_p$ がわかるので距離梯子として使えます。図5(上)にIa型超新星で較正した $E_p-L_p$ 関係を示します。GRBの光度はさまざまですが、光度が4桁にもわたっているにもかかわらず、非常に強い相関関係が成立しています。激しい爆発現象の中に潜んでいる何らかの秩序だと考えられます。しかし、データの統計誤差よりも大きなばらつき(系統誤差)が見られます。これは光度を見積もる際に、絶対に避けられない不定性を残しますので、距離梯子として十分な精度がありませんでした。

宇宙論の距離梯子として使うには系統誤差はなるべく小さいほうが良く、Ia型超新星の場合も「明るいほど緩やかに減光する」というフィリップス関係によって系統誤差が大幅に改善され、標準光源と認識されるに至ったわけです。そこでわれわれは、この $E_p-L_p$ 関係を改善する方法を研究してきました。もしかしたら、 $E_p-L_p$ 関係の中にはもう一つ別の物理量が隠されていて、それを組み込めば改善できるかもしれないと考えました。ちょうどだ円銀河では有効半径・速度分散・表面輝度の3次元プロットをすると、1枚の基本平面(ファンダメンタルプレーン)となる<sup>23)</sup>のと同じ発想です。

さまざまな方法を検討した結果、一つの有力な候補を見つけました。GRBのガンマ線で解放された総エネルギーを $L_p$ で割り算した、時間の次元をもつ量( $t_L$ )です。言い換えると、最大光度で

輝き続けたら $t_L$ 秒間で全エネルギーを解放することに相当し、現象ごとに固有の時間スケールです。だらだらと長く続くGRBでは $t_L$ が長くなりますが、明るいパルス1発の場合は短くなります。ですからGRBの時間変動の激しさに起因している物理量なのかもしれません。この $t_L$ を導入すると、ほぼすべてのGRBが、 $E_p-L_p-t_L$ の3次元空間に平面として存在することを発見しました<sup>22)</sup>。われわれはこれをGRBの基本平面と呼んでいます。

赤方偏移が1.8よりも小さいGRBの基本平面を、Ia型超新星で求められた光度距離を用いて較正した結果が図5(下)です。紙面上で三次元プロットをお見せするのは難しいので、平面を横から見たように示しますが、 $L_p$ は $E_p^{1.82} \times t_L^{-0.34}$ に比例しています。観測量である赤方偏移、 $E_p$ 、そして $t_L$ (観測されたガンマ線総エネルギーをピークフラックスで割り算して計算)を使えば $L_p$ を求めることができ、GRBまでの距離を測れるわけです。図5(上)と比較してデータのばらつきが小さくなっていることがわかります。定量的には、 $E_p-L_p$ 関係の系統誤差は対数スケールで $\sigma=0.35$ でしたが、GRB基本平面では6割も改善され $\sigma=0.15$ となっています。GRBを使った距離梯子の精度を格段に高めることに成功したと言えます。

ここまで $E_p-L_p$ 関係やGRB基本平面を紹介しましたが、これらは完全に経験的な関係式です。たくさんの研究者が物理的解釈に挑戦していますが、現在でも共通の見解はないといって良いでしょう。それでも $t_L$ というたった一つの物理量を導入するだけで距離梯子の精度が高くなるのは事実ですから、GRBという現象そのものを探るうえで重要となるでしょう。歴代の距離梯子には物理的解釈があるため、GRBの基本平面についても起源を解明しなくてはなりません。次節ではGRB宇宙論プロジェクトで推進している応用研究の1例として、赤方偏移が2を超える宇宙での暗黒エネルギー量の測定を紹介します。

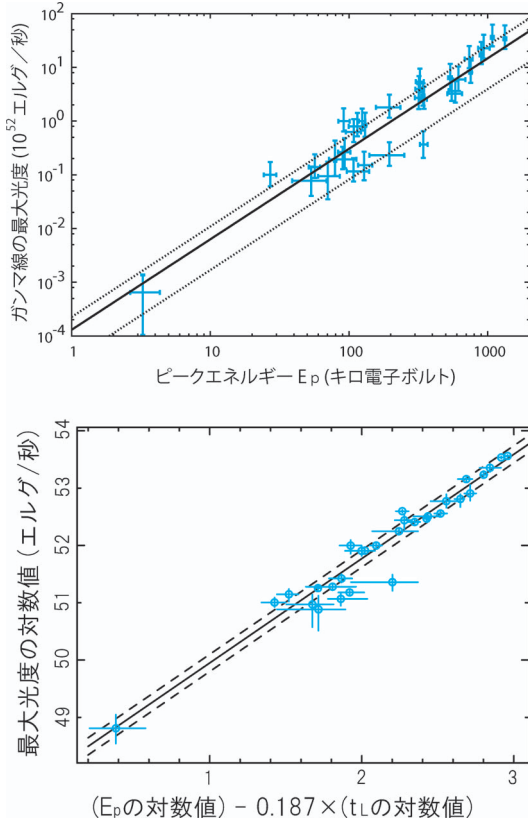


図5 (上図) GRB の  $E_p$ - $L_p$  関係. 非常に強い相関ですが, データの統計誤差よりも大きなばらつき (系統誤差) が存在するため, 宇宙論に適用した際に精度が悪くなります. (下図) 較正した  $E_p$ - $L_p$ - $t_L$  基本平面を2次元で示した図. 上図と比べてデータのばらつきが小さく, 非常に良い相関を示しています. 観測で赤方偏移と  $E_p$ , それに  $t_L$  を測定すれば GRB の光度がわかり, 距離を求めることができます.

## 6. 初期宇宙の暗黒エネルギー

GRB を使って, Ia 型超新星では測れないような, 赤方偏移が2を大きく超えるような初期宇宙へ距離梯子を伸ばすことに成功しました. 2009年4月23日に発生した GRB は赤方偏移が8.2 (130億光年) と同定され<sup>24), 25)</sup>, 最遠方天体の記録を大幅に更新しました. 本稿ではそのデータも含めて, GRB を用いた初期宇宙の暗黒エネルギー量の測定を紹介します.

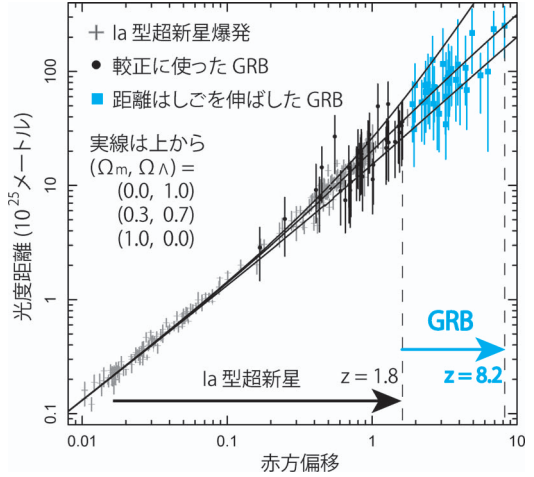


図6 Ia 型超新星と GRB のハッブル図を同時に描いた図. GRB を使えば, Ia 型超新星では測定できないような赤方偏移 8.2 までの距離を測定することができます. 青色のデータが, われわれが世界で初めて測定した距離の範囲です. 3本の実線は, 異なる宇宙論パラメーター ( $\Omega_m$  と  $\Omega_\Lambda$ ) で描いた  $\Lambda$ -CDM モデルで, Ia 型超新星と GRB のデータは両方とも真ん中の線に近い分布を示していることがわかります.

GRB の基本平面を使って, 図6のように赤方偏移8.2までのハッブル図を作ることに成功しました. 念を押しておきますが, この図は観測結果だけを積み上げて伸ばしてきた距離梯子から得られたプロットですので, 理論的な宇宙モデルには依存しない「純粋な観測結果」です. Ia 型超新星の観測だけでは赤方偏移1.8までしかハッブル図を描けませんでした, われわれの研究で, はるか遠方の赤方偏移8.2まで伸ばすことができました. 図6の GRB データには, Ia 型超新星と比較して大きな誤差がついていますが, これはまだ GRB 基本平面の較正に不定性が大きいこと由来します. 将来, より多くの GRB を観測できるプロジェクトが実現されれば不定性を小さくすることができるはず. さらに, 基本平面の系統誤差の原因を取り除くことで, より信頼できる距離梯子を構築したいと考えています.

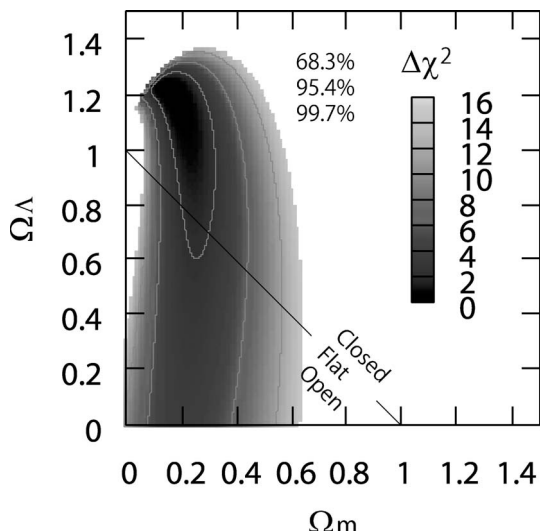


図7 赤方偏移 1.8 以上の GRB で測定した宇宙論パラメータの等高線<sup>20)</sup>. 宇宙が平坦であるという条件の下では  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.24 \pm 0.10, 0.76 \pm 0.10)$  という値が得られている.

さて、GRB でも宇宙論パラメータ ( $\Omega_m, \Omega_\Lambda$ ) を制限することができます。注目すべき点は、新たに得られた赤方偏移 1.8 を超える初期宇宙での値です。これが Ia 型超新星の観測や、宇宙マイクロ波背景放射の観測結果と同値であれば、暗黒エネルギー=アインシュタインの宇宙項という色合いが濃くなりますし、逆に有意に異なった場合は時間変化を伴う性質があると言えるわけです。GRB で作り上げたハッブル図を  $\Lambda$ -CDM 宇宙モデルと比較した結果が図7です。最適値は  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.17, 1.21)$  ですが、宇宙が平坦であるという条件の下では  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.24 \pm 0.10, 0.76 \pm 0.10)$  となります。これは Ia 型超新星や宇宙マイクロ波背景放射の観測結果である  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.27, 0.73)$  と誤差の範囲で一致します。つまり、暗黒エネルギーの性質は宇宙項に近く、時間変化があったとしてもそれほど大きくはないと言えます<sup>20), 22)</sup>。

図8に Ia 型超新星 (Supernovae)<sup>26)</sup>、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)<sup>27)</sup>、銀河団 (Clusters)<sup>28)</sup> そして GRB<sup>22)</sup> で測定された宇宙論パラメータの

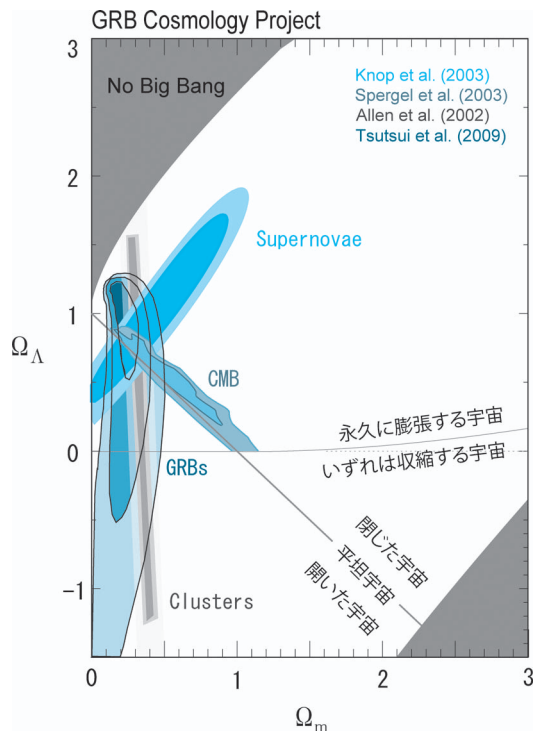


図8 さまざまな天体を観測して測定された宇宙論パラメータの等高線。それぞれの観測結果は、 $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$  付近に集中しています。等高線の向きがさまざまな理由については本文を参照してください。

等高線を重ねて描いています。CMB の温度ゆらぎのパターン (角度相関) は、宇宙空間の曲率に強く依存しますが、測定された等高線は平坦宇宙を表す  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$  の直線によく沿っています。この宇宙は平坦宇宙であると言えそうです。また、銀河団の数は宇宙の構造がどれだけ速く重力により成長するかで決まりますので、これは宇宙に存在する物質の量  $\Omega_m$  への強い制限を与えます。GRB と Ia 型超新星は、距離梯子を伸ばして  $\Lambda$ -CDM モデルと比較するという同じ手法を使っていますが、観測している赤方偏移の範囲が異なるので、等高線が違う方向を向いています。GRB は赤方偏移が 2 を超える宇宙を観測していて、この時期の宇宙膨張は  $\Omega_m$  に強く依存します。ですから等高線が縦向きになっているわけです。



将来の GRB 観測のために 1 点だけ補足させてください。図 6 のハッブル図でもわかるように、大きな赤方偏移にいくほど宇宙論パラメータの依存性が顕著に見えてきます。ですから測定誤差が大きくても等高線は Ia 型超新星の結果（2003 年までの観測）と遜色ない質になっています。GRB の突発的ガンマ線放射の光度は非常に明るいので、仮に赤方偏移が 10 や 20 で発生したとしても観測できます。これは初期宇宙を探るには強力なアドバンテージです。しかも、全天で 1 日に 1 回程度の割合で発生しているので、観測の機会が多いことも特徴です。しかし、短時間で暗くなってしまうから、GRB 発生後、すぐに望遠鏡を向けて観測することが必須で、赤方偏移を同定するには困難が伴います。近い将来、もっと遠くを、より高い精度で観測できれば、GRB 観測で暗黒エネルギーや暗黒物質の性質を解明できるかもしれないという大きな期待を寄せています。

## 6. これからの GRB 初期宇宙観測

2010 年代は ALMA<sup>29)</sup>, SPICA<sup>30)</sup>, 30 メートル望遠鏡 (TMT)<sup>31)</sup> といった超大型の観測装置が動き出しますので、天文学の大きな飛躍が期待されています。より精密な分光観測も、もっと遠くの天体の観測も、近傍の極めて暗い天体を検出することもできるようになるでしょう。

遠方銀河を見つけるには、フィルターを交換しながら何週間も同じ場所を観測するという、ある種のチカラ技を行使することもあります。たくさん銀河の中から、強く赤方偏移を受けている「赤い銀河」を探すわけです。しかし、視野が狭い観測装置の場合はハズレの可能性もありますので、「どこを観測すれば遠い天体があるのか？」は、たいへん貴重な情報となります。

Swift 衛星が活躍するようになった 2004 年から現在までに、赤方偏移が 6.3<sup>32), 33)</sup>, 6.7<sup>34)</sup>, そして 8.2<sup>24), 25)</sup> と着実に記録を伸ばし、ついに銀河を抜かして最遠方天体の記録を大幅に更新しました。

宇宙で最初に誕生した星（第一世代星）は、太陽質量の 100 倍にも達する大質量星が多いだろうと予想されていますので、その最期に GRB を発生させる可能性が高いと考えられます。GRB は短時間ではありますが非常に明るく輝くので、銀河を観測するよりも、ずっと遠方の宇宙を観測できるはずで。

2010 年代の後半に、高感度の X 線・ガンマ線観測装置と 1 メートル級の近赤外線望遠鏡を搭載した GRB 観測衛星を実現したとしましょう<sup>35)-37)</sup>。宇宙空間は地上と比較して可視光や近赤外線バックグラウンドが非常に少ないので、1 メートル鏡でも高感度の観測が可能です。この人工衛星を使ってどれが遠い GRB かを判定し、すぐさま超大型望遠鏡と協力して追観測を行えば、赤方偏移 20 という宇宙に本当に手が届くかもしれません。きっと第一世代星と呼ばれる宇宙で最初にできた天体（が爆発したところ）でしょうか。超大型望遠鏡にとっても期待以上の成果に結びつくはずで、そして赤方偏移が 20 という「超」初期宇宙での星形成史や宇宙再電離、重元素合成といった歴史を観測できると期待できます。この宇宙で最初の星が誕生してから現在に至るまでの 130 数億年の歴史を、GRB の光でひも解こうというわけです。そして、本稿で紹介したような GRB 宇宙論を展開することで、暗黒エネルギーや暗黒物質といった、21 世紀物理学で最も重要なテーマに迫れるでしょう。

本稿で紹介したような赤方偏移が 2 を大きく超える時期の宇宙論は、この数年で開拓され始めた新境地です。これまでの宇宙論との整合性を保ちつつ、初期宇宙観測でしか知ることのできない物理がきっとあるはずで。現在、われわれの GRB 宇宙論プロジェクトは極めて少人数ですが、世界を主導する立場でこの分野を作り上げています。今後はたくさんの方と議論しながら、新しいアイデアを生み出したいと思います。

参考文献

1) 須藤 靖, 2006, ものの大きさ, 東京大学出版会  
 2) ヒッパルコス衛星ホームページ  
<http://www.rssd.esa.int/index.php?project=HIPPARCOS>  
 3) Leavitt H. S., 1908, *Annals of Harvard College Observatory* 60, 87  
 4) Hubble E. P., 1929, *ApJ* 69, 103  
 5) Hubble E. P., 1929, *PNAS* 15(3), 168  
 6) Tully R. B., Fisher J. R., 1977, *A&A* 54, 661  
 7) Phillips M. M., 1993, *ApJL* 413, L105  
 8) Riess A. G., et al., 1995 *ApJ* 438, 17  
 9) Supernova Cosmology Project ホームページ  
<http://supernova.lbl.gov/public/>  
 10) Kim A., et al., 1997, *ApJ* 476, L63  
 11) 村上敏夫, 米徳大輔, 中村卓史, 2004, *天文月報* 97, 516  
 12) 坂本貴紀, 2005, *天文月報* 98, 507  
 13) 田代 信, 「すざく」GRB ToO チーム, 2007, *天文月報* 100, 254  
 14) 河合誠之, 青木賢太郎, 戸谷友則, 2007, *天文月報* 100, 17  
 15) 井上 進, 2009, *天文月報* 102,248  
 16) Band D. L., et al., 1993, *ApJ* 413, 281  
 17) Yonetoku D., et al., 2004, *ApJ* 609, 935  
 18) Murakami T., et al., 2005, *ApJL* 625, L13  
 19) Yonetoku D., et al., 2005, *MNRAS* 362, 1114  
 20) Kodama Y., et al., 2008, *MNRAS* 391(1), L1  
 21) Tsutsui R., et al., 2008, *MNRAS* 394(1), L31  
 22) Tsutsui R., et al., 2009, *JCAP* 08, 015  
 23) Djorgovski S. G., Davis M., 1987, *ApJ* 313, 59  
 24) Tanvir N. R., et al., *Nature* 461, 1254  
 25) Salvaterra R., et al., *Nature* 461, 1258  
 26) Knop R. A. et al., 2003, *ApJ* 598, 102  
 27) Spergel D. N., et al., 2003, *ApJS* 148, 175  
 28) Allen et al., 2002, *MNRAS* 334, L11  
 29) ALMA ホームページ  
<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>  
 30) SPICA ホームページ  
[http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA\\_HP/index.html](http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/index.html)  
 31) TMT ホームページ <http://www.tmt.org/>  
 32) Kawai N., et al., 2006, *Nature* 440(7081), 184

33) Totani T., et al., 2006, *PASJ* 58, 485  
 34) Greiner J., et al., arXiv: 0810.2314  
 35) Grindlay J., et al., arXiv: 1002.1173  
 36) Tsutsui R., et al., 2010, 「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第三回領域シンポジウム集録, in press  
 37) Yonetoku D., et al., 2010, 「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第三回領域シンポジウム集録, in press

**The Realization of the Cosmic Distance Ladder Pioneering into the Dark Universe with Gamma-Ray Bursts**

**Daisuke YONETOKU and Toshio MURAKAMI**

*College of Science and Engineering, School of Mathematics and Physics, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan*

**Ryo TSUTSUI and Takashi NAKAMURA**

*Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

**Keitaro TAKAHASHI**

*Department of Physics and Astrophysics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan*

Abstract: 400 years have passed since Galileo focused the universe with his astronomical telescope. Between the histories of astronomy, the human being has aspired to see the more remote astronomical object. We do not know whether it is an adventurous spirit for unknown universe, or a racing spirit for the world record. But we can say that it might be sure to approach “Truth of universe” by observing distant objects. The most distant object ever observed is a Gamma-Ray Burst (GRB) from the 13 billion light years (redshift of 8.2). Authors of this article organize the GRB Cosmology Project, and promote the observational cosmology in the early universe. We succeeded the measurement of the amount of dark energy and dark matter in the redshift range beyond 2. Adding our new results of GRBs to the ones of astronomical history over the century, we introduce the latest observational cosmology.