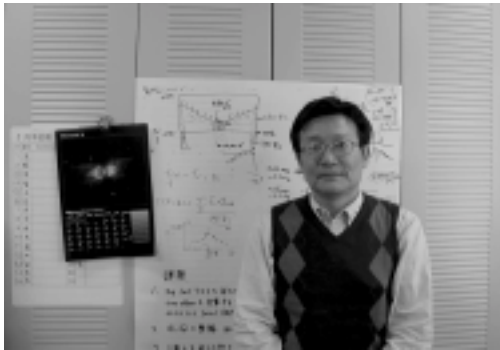




# 宇宙の神秘を追い求めて

## 河合 誠之 研究室 ~ 基礎物理学専攻



河合 誠之 教授

人は昔から空を見上げて様々なことを考えてきた。空を自由に飛べないだろうかと考えたり、どうすれば宇宙へ行けるかと考えたり、いずれは月の上を歩けないかと考えたりした。

今やそれらは実現している。それでも宇宙という無限を前にしてその全貌を明かそうと尽力している。ブラックホールやビッグバンなど宇宙の大きいなる秘密はいくつも発見され、さらにその秘密から、その先の宇宙の神秘を知ることまでできる。

河合研究室では、そんな宇宙の秘密の一つであるガンマ線バーストの研究を行っている。



### 謎のガンマ線から探る宇宙の秘密とは

ガンマ線とは、波長がとて短く非常にエネルギーが高い電磁波のことである。これは原子核反応などで発生する放射線として発見されたが、宇宙からもやってくるのがわかってきた。

1960年代に核実験で放出される放射線を検出する目的の人工衛星によって、地球とは別の方向からたびたびガンマ線が検出された。このガンマ線は宇宙の彼方から放出されていることが確認され、この放出現象をガンマ線バーストと呼ぶようになった。だがその発見から約30年の間、ガンマ線バーストの研究は停滞した。ガンマ線バーストの発生源やその原因をより詳しく研究するには、衛星からのガンマ線観測だけでは不十分だったからである。

ガンマ線は、大気圏内に入ると大気と衝突して吸収されたりシャワー状に素粒子を発生させたりしてエネルギーを失い、ほとんど地上に届かない。また、ガンマ線は可視光のようにレンズ鏡を使って結合させることができないので、人工衛星でも到来方向を正確に決めることは難しかった。そのため、ガンマ線バーストの謎を解明するには、人工衛星の観測でガンマ線バーストを発見し

てその大まかな位置の情報を地上に送り、ガンマ線バーストの発生源を地上から光学望遠鏡で観測する必要があると思われた。しかし、当時は通信網が今のように発達していなかったため、ガンマ線バーストの位置を発生直後に世界各地の天文台に知らせることができなかった。それが1990年代に入り、インターネットなど情報伝達技術が発展していくにつれて、人工衛星と地上が連携した観測方法が可能になったのだ。

1996年にはイタリアとオランダが共同開発し打ち上げられた『BeppoSAX』というX線観測衛星が、世界で初めてガンマ線バーストの方向を正確かつ迅速に突き止めた。これにもとづいて地上から可視光望遠鏡で観測したところ、遠方の銀河中に残光が発見され、ガンマ線バーストは数十億光年もの遠方で発生していることがわかった。残光とは、ガンマ線バーストの発生後に、数時間から長いものでは数ヶ月にわたって放出される弱い電磁波のことで、電波、可視光、X線と広い波長域にわたる。この残光は、ガンマ線とは違い地上でも観測することができる。

さて、ガンマ線バーストの発生位置がよるか遠

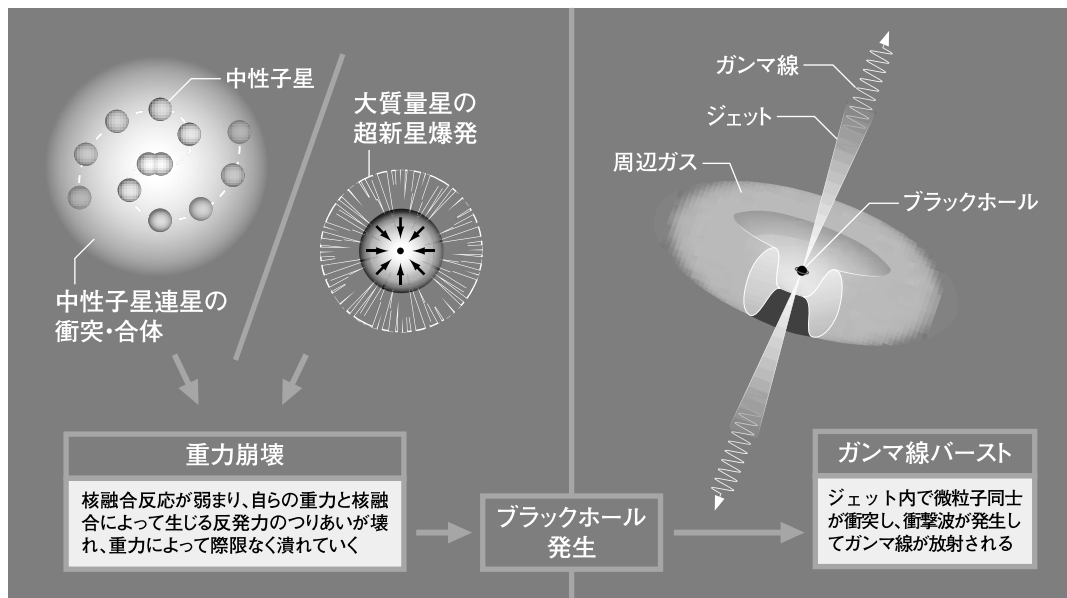


図1 ガンマ線バースト発生の原因とその様子

方であることを考慮すると、放出されたエネルギーは拡散されて人工衛星で観測される頃には非常に弱くなっているはずである。それでも検出できるということは、ガンマ線バーストは並外れたエネルギーを放出しているということになる。これより、ガンマ線バーストの発生源は超高エネルギー現象である必要がある。それほど膨大なエネルギーを発生する宇宙の現象といえば、極超新星爆発か中性子星連星の衝突・合体ぐらいしか考えられない(図1)。超新星爆発は恒星が内部の核融合反応をし尽くしてしまった時、つまり星が「死ぬ」時に起こる爆発現象のことであり、極超新星爆発はその中でも特に太陽の20~30倍程度の大質量星の場合をさす。極超新星爆発は爆発が起きた後も重力崩壊がとまらないため、ブラックホールができる。また、通常の超新星爆発ではブラックホールにならず中性子星となるのだが、その中性子星同士が衝突・合体してもブラックホールになる。これら二つの可能性のどちらでも結果としてブラックホールが誕生する。実際にガンマ線バーストが発生した場所では超新星爆発が確認されている。

また、当初はブラックホールの誕生時に放出されるガンマ線は電球の光と同様に全方向に放出されると思われていた。ところが1999年1月に観測

されたガンマ線バーストのエネルギーをこの予測のもとに計算すると、考えられるブラックホール誕生のエネルギーを遥かに越えてしまった。そこからガンマ線バーストは全方向にガンマ線を放出するのではなく、放射の向きがごく限られた一方向に固定されていることも推測された。そう考えれば、バーストのエネルギーは一つの方向へ絞られるので単位面積当たりの強さはその分強くなる。そのため、観測したガンマ線から考えられる発生源のエネルギーは少なく済む。これでガンマ線バーストはブラックホール誕生の際に放出されたものだという辻褄が合う。

ガンマ線バースト発見から30年以上経って、ようやくガンマ線バーストの全貌が見えてきたわけである。では、現在のガンマ線バーストの研究はどうなっているのだろうか。

先程も触れたように、現在ではガンマ線バーストの観測を効率よく行うためにインターネットによって各国の研究者たちの間で情報を共有している。人工衛星がガンマ線バーストを検知するとその発生位置の情報を地上に伝達するようになっていく。2005年3月までは『HETE 2』という日本とフランスとアメリカが共同開発した人工衛星が、現在では2004年に打ち上げられたアメリカとイギリスとイタリアが開発した『Swift』という人

工衛星がその役目を負っている。衛星の性能が格段に上がったため、現在では週に二回程度ガンマ線バースト発生の情報が入ってきている。またこの情報は、情報を共有している世界中の研究者・観測者に伝えられる。このようなネットワークがあってこそガンマ線バーストの観測が可能となったのである。

さて、ガンマ線バースト発見の情報が伝達されてきたら、その情報を頼りに望遠鏡で残光を観測する。ここで回折格子やプリズムなどの装置を用いてスペクトル解析をし、この残光の波長がどれだけ伸びているかを確かめる。波長が伸びているのは、ビッグバン以来宇宙空間が伸び続けているのが原因である。そのため、遙か遠方で発生した電磁波は地球へと向かう間に宇宙空間の伸びの影響を受けて波長が伸びてしまう。この現象を赤方偏移という（詳しくはコラム参照）。この残光の赤方偏移の度合いからガンマ線バーストはどれだけ遠方で起きたのか、どれだけ昔に起きたのかを知ることができる（10億光年先なら10億年前に起こったとわかる）。

先程、ガンマ線バーストは極超新星爆発か中性

子星連星の合体・衝突によって発生すると述べた。この二つの現象は共に恒星が活動を停止した後に起こる現象である。そのため、もしガンマ線バーストが100億年前に発生したとしたら、100億年以上前にそこに恒星が存在したということである。ガンマ線バーストが古いものであればあるほど、宇宙における星の存在の起源を探ることができるのだ。

現在、河合研究室では岡山県にある国立天体物理観測所と山梨県の明野にある東京大学宇宙線研究所を拠点にして地上からの観測を日々行っている。また、ハワイにあるすばる望遠鏡も用いることができる。上記の通り、衛星からガンマ線バーストについての情報を得て、世界中の同志たちと連絡を取り合いながら観測・実験を行っているのである。

岡山と明野にある望遠鏡は特殊な鏡を用いて光を三色の波長に分け、それらを同時に撮る機能を備えている。三色に分けて観測をすることで、解析すべき波長の範囲をある程度特定できる。これがすばる望遠鏡での精密なスペクトル解析の際に役に立っている。

## 最古のガンマ線バーストとの邂逅

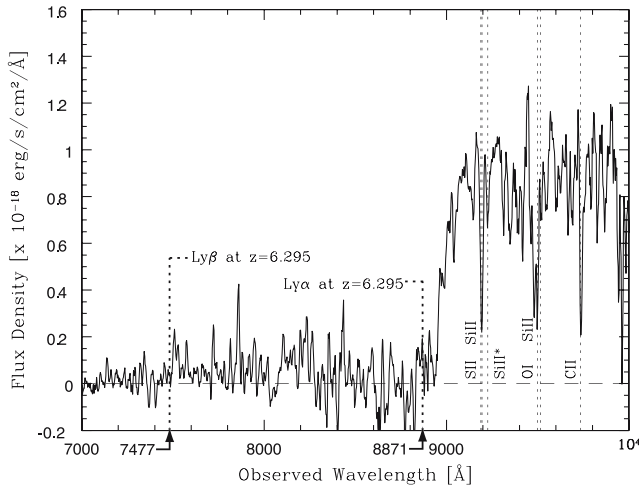
河合先生はガンマ線バーストの研究でとても素晴らしい成果を挙げている。それは宇宙誕生からわずか約9億年後に発生したとされる、現在発見されている中で最も古いガンマ線バースト『GRB050904』の発見である。

このGRB050904も衛星Swiftから全世界の研究者たちに発見の情報が伝達された。ここで各国の観測チームがそれぞれ情報を伝達しあいながら独自に観測・解析していくのである。

観測の際に使う望遠鏡は大きいほうがより精密に観測できる。しかし、アメリカやヨーロッパ諸国では巨大望遠鏡を自前でいくつも所有して自由に使えるのに対して、河合先生が所属する日本のチームが使用可能な巨大望遠鏡はハワイのすばる望遠鏡だけである。しかも、すばる望遠鏡も年に数回しか使用できないことになっている。そのような不利な状況のもとで、どのようにして日本のチームは最古のガンマ線バーストを発見したのだろうか。

GRB050904を感知したという情報を得たのが2005年9月4日である。アメリカ・ヨーロッパの各チームは、直後から大小さまざまな望遠鏡を用いて残光の観測を行っていた。その頃日本チームはすばる望遠鏡の利用を二日間待たされていた。その間に主要な解析は他のチームによって行われていた。それによって、これはかなり古いガンマ線バーストであるかもしれないという可能性が示されていた。

発見から三日経ってようやくすばる望遠鏡の分光器が使えるようになり、赤方偏移のスペクトル解析を開始した。解析方法としてスペクトル解析がやりやすいようにプリズムによる分光観測を行うことにした。この解析は、既に他国のチームが行っている可能性があった。よって徒労に終わる危険もあったのだが、それでも先生方は解析を行った。残光は時間が経てば経つほど弱くなっていき、発生から三日経過した残光はその時点で明るさを失いつつあった。そのため、時間的にも余裕



{ Ly $\alpha$  : ライマン・アルファ(輝線)  
 { Ly $\beta$  : ライマン・ベータ(輝線)  
 { S : 硫黄の吸収線  
 { Si : ケイ素の吸収線  
 L これらが既定値より  
 約7.3倍に伸びている

↓  
 赤方偏移量  $z = 6.3$   
 128億光年先と判明

図2 GRB050904のスペクトル解析の結果

がなかった。

ぎりぎりでの観測は大成功であった。データは鮮明に事実を映し出していた。図2がその観測データである。良く見ると普通なら1216オングストロームである特徴的なLy $\alpha$ 線(ライマン・アルファ：宇宙で最も豊富に存在する水素原子が強く吸収または放射する波長)による吸収端が9000オングストローム付近にあり、他の硫黄やシリコンなどによる吸収線を見てもやはり同等に伸びていることがわかった。図中の点線がそれである。観

測したLy $\alpha$ の波長からコラムで述べるようにして赤方偏移量を求めると、約6.3であった。

残光の赤方偏移量6.3を用いると、計算によってガンマ線バーストの発生源が128億光年先であること、つまり128億年前にガンマ線バーストが発生したということがわかった。宇宙誕生が137億年前であるとされているので、宇宙誕生から9億年しか経っていない非常に初期の宇宙で発生したガンマ線バーストだということがこれでわかったのである。



## 宇宙の秘密を解きあかすために

河合先生は今、宇宙ステーションにX線全天観測装置「MAXI」を宇宙ステーションに搭載させようとしている。東京工業大学、理化学研究所、青山学院大学、日本大学、大阪大学などが協力して作っている。これは、ブラックホールや中性子星の活動を調べるのが主な目的だが、ガンマ線バーストも1年に10発は観測できる。2009年には打ち上げて観測開始する予定だ。

また、2008年にはガンマ線天文衛星である「GLAST」が打ち上げられる予定であり、ガンマ線天体の観測と共にガンマ線バーストも観測する目的で、観測精度が大幅に上がっている。GLASTにも共同研究として開発に参加している。人工衛星には寿命があるため、こういった次世代の衛星開発はこの先も続いて、新たな人工衛星の

投入もし続けていくことだろう。

これまでに、宇宙誕生から9億年後にはガンマ線バーストが発生するほどの超新星爆発が起きていると判明した。しかし、この超新星爆発の発生源は宇宙で最初にできた星(ファーストスター)ではないらしい。それでは、ファーストスターは一体いつできたのだろうか。水素とヘリウムしかない原始の宇宙空間からどうやってできたのか。そして、そこから未だ知らない宇宙の秘密、たとえば宇宙の起源についての新しい発見があるかもしれない。

宇宙の神秘を追究するにはファーストスターの発見は非常に重要で、宇宙研究者の最大の目標の一つとなっている。河合先生もガンマ線バーストの研究を通じて宇宙の神秘を日々探っている。

## コラム ～ 赤方偏移 ～

赤方偏移とは、宇宙空間の膨張によって宇宙を走る電磁波の波長が段々と伸びていく現象のことである。可視光で言えば紫色から赤色の方へ偏移することから赤方偏移と呼ばれている。

宇宙を走る電磁波は時間が経てば経つほど空間の膨張の影響を受けて波長が伸びていく。逆にその電磁波の波長の伸びを調べることで、その電磁波がどれくらい前に発せられたものかを調べることができる。

波長の伸びを表す量として赤方偏移量 $z$ がある。それは以下の式で定義される。

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

ここで、 $\lambda$ は電磁波の元の波長、 $\Delta\lambda$ は電磁波の赤方偏移による波長の伸びである。

また、地球から見たら宇宙空間の膨張の影響によって全ての天体は後退しているように見える。その後退速度 $v$ は相対論的ドップラー効果の式を元にして赤方偏移量 $z$ と次のような関係式になっている。

$$z + 1 = \frac{\sqrt{1 + v/c}}{\sqrt{1 - v/c}}$$

そして、後退速度 $v$ と天体の距離 $d$ は、 $z$ が小さい時はハッブルの法則によって比例関係にあることが知られている。

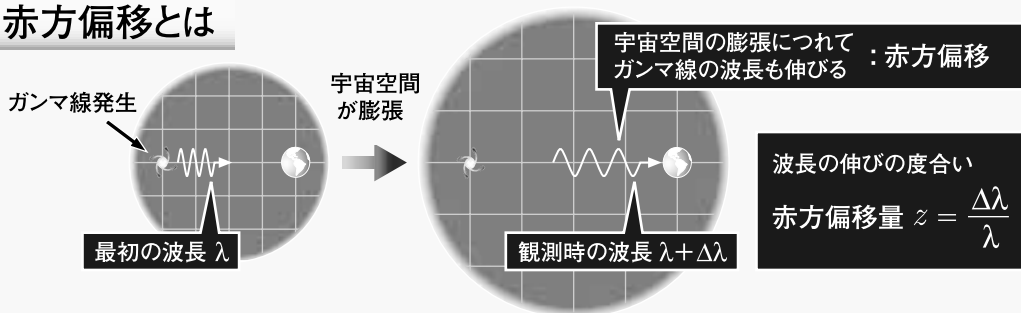
$$v = H \times d$$

ここで、 $H$ はハッブル定数で、この宇宙空間に固有の空間の伸び率を表す数である。またこれは時間によって変化していて、現在では72程度であることが知られている。

$z$ が大きい場合は、天体の距離を求める式は複雑な積分式になってしまう。それは電磁波が宇宙を走る時間が長いため、ハッブル定数 $H$ が大きく変化してしまうことに起因する。

ここで求めた天体の距離 $d$ の単位はメガパーセクである。1パーセクとは3.26光年のことである。よって、 $d$ の値に $3.26 \times 10^6$ を掛ければ単位が光年になる。

### 赤方偏移とは



「2005年9月のガンマ線バーストの観測の時が自分の人生の中で一番わくわくした。」本文で述べたGRB050904の話の最後に河合先生がそうおっしゃっていたのが、今でも印象に残っています。研究をし続けていくには、既存の知識や技術の習得とともに、意欲・やりがいがあれば成功

しないのでしょうか。

紙面の都合上で研究の全てを紹介することはできませんでした。この場でお詫び申し上げます。

最後になりますが、ご多忙なスケジュールの中で度重なる取材に快く応じてくださった河合先生に厚く御礼を申し上げます。 (青木 優)