

# ブラックホール活動天体入門

- 1 ブラックホール活動天体と亜光速ジェット現象
- 2 X線星とマイクロクェーサー
- 3 活動銀河とクェーサー
- 4 ガンマ線バースト
- 5 活動天体のエネルギー源－ブラックホールエンジン



# 1 ブラックホール活動天体と亜光速ジェット現象

天の川銀河系内や銀河系外さらに宇宙の果てにおいて、X線星やマイクロクェーサー、活動銀河核やクェーサー、そしてガンマ線バーストなど、電波から可視光さらにX線ガンマ線領域までの広い波長域で膨大なエネルギーを放出している天体が存在している。これらの天体からは、しばしば光速と同程度の超高速でプラズマガスが噴出していることがわかっている。

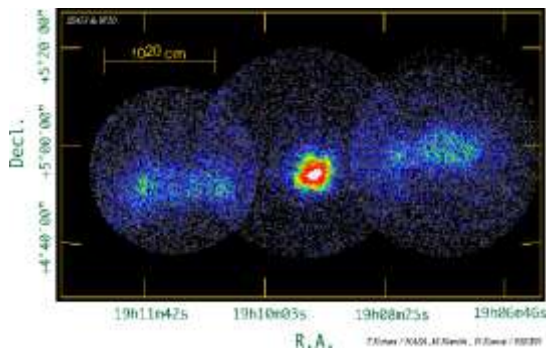


図1 X線天文衛星あすかが撮像したマイクロクェーサーSS433 ジェット。左右の差し渡しは約 400 光年。中心から吹き出したプラズマの流れが、星間の水素ガスに衝突してX線を放射している。

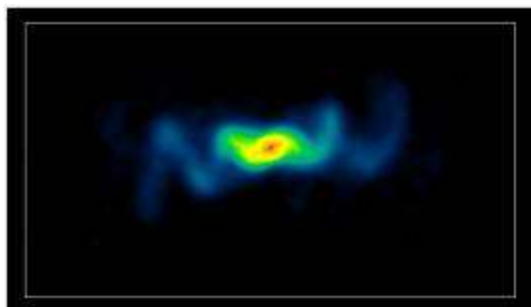


図2 電波で観測したSS433 ジェット (NRAO)。上の図を中心部を大きく拡大したもので、左右の差し渡しは数光年。ジェットがコルク抜きのようなパターンになっていることがわかる。

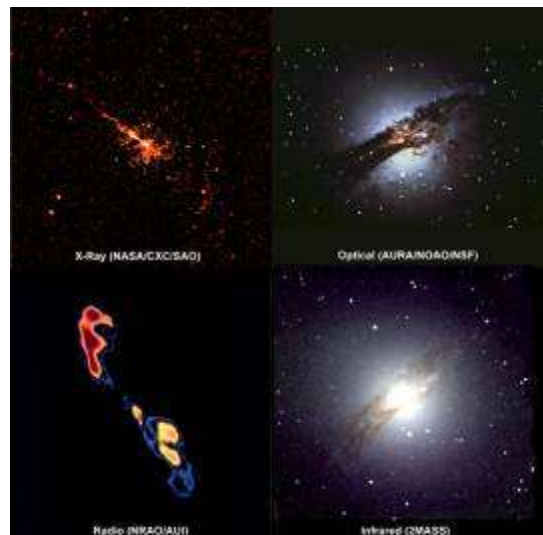


図3 活動銀河ケンタウルス座 A/NGC5128 (NASA/NOAO/NRAO)。右上：可視光では赤道面に黒い帯がみえる。右下：赤外線では塵の帯を通して中心部が輝いている。左下：電波では二つ目玉がわかる。左上：X線では左上方向だけ細く伸びるジェットが写っている。

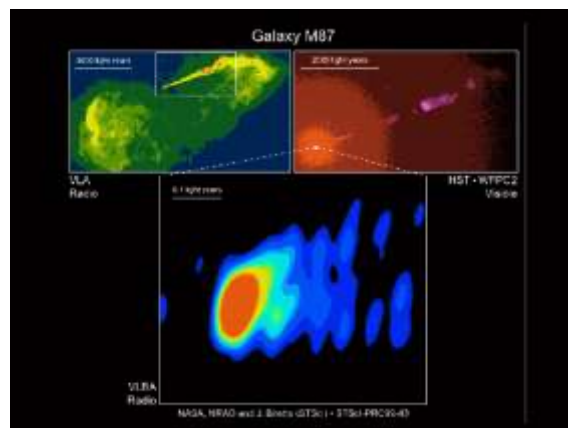


図4 活動銀河おとめ座 A/M87 (NASA/JAXA)。右上：可視光では丸い銀河本体を貫くようにジェットの流れがみえる。左上：電波では星からなる銀河本体はみえないが、高温プラズマのジェットがはっきりみえる。下：中心部を拡大したもので、ジェットは中心から吹き出していることがわかる。

これらの天体の中心には、**ブラックホール** (black hole) とそれを取り巻く高温プラズマガスの円盤 – **降着円盤** (accretion disk) – が存在していて、ブラックホール近傍からは、しばしば高温プラズマの流れ – **宇宙ジェット** (astrophysical jet) – が吹き出している。

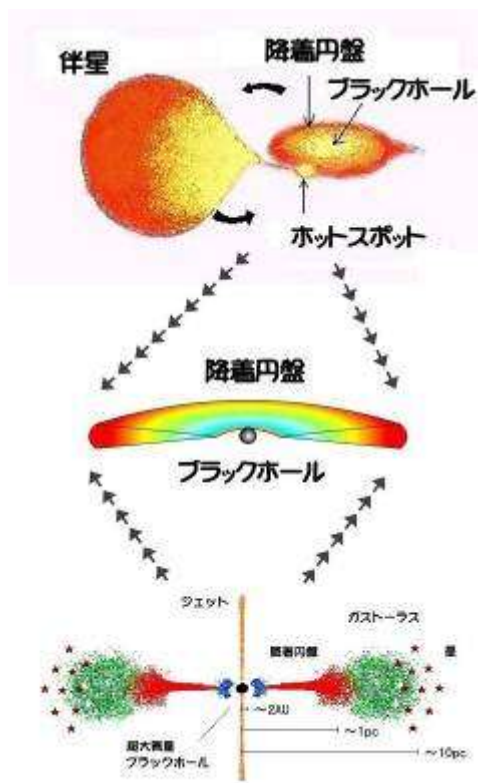


図5 ブラックホール活動天体の描像。

アインシュタインの相対性理論で予想された謎の天体、光さえ出てこられない空間の裂け目、それが、**ブラックホール**だ。

このような光さえ出てこられないはずのブラックホールが、どうして、光り輝く活動天体現象を引き起こしているのだろうか。

またブラックホールは何でも吸い込む天体のはずだが、ではどうして、ブラックホール活動天体から亜光速のプラズマジェットが吹き出しているのだろうか。

以下、まず天の川銀河の中にある X 線星やマイクロクェーサーについて紹介し、つぎに天の川銀河のはるか遠方にある活動銀河核やクェーサーについて述べ、さらに宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストについて触れた後、最後に、これら活動現象の共通の原因であるブラックホールエンジンについて説明する。



図6 はくちょう座 X-1 の想像図。

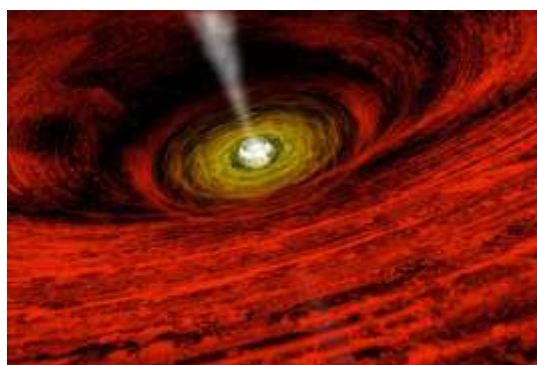


図7 活動銀河中心の想像図。



図8 ガンマ線バーストの想像図。

## 2 X線星とマイクロウェーサー

強いX線を放射している天体を一般に宇宙X線源 (cosmic X-ray source) と呼んでいるが、ある種の星であることがわかっているならば、しばしば**X線星** (X-ray star) と呼ぶ。また大部分のX線星はコンパクト星を含む連星なので**X線連星** (X-ray binary) と呼ぶことも多い。逆に、X線連星はすべて、中性子星かブラックホールと通常の恒星からなる近接連星で、恒星からコンパクト星へガスが降り注いで、コンパクト星の近傍で超高温になったガスがX線を放射していることがわかっている。

コンパクト星を含む連星で、コンパクト星がブラックホールの場合は**ブラックホール連星** BHB (black hole binary) と呼ぶ。



図9 ブラックホール連星はくちょう座X-1。くちばしの星 (アルビレオ) としっぽの星 (デネブ) の真ん中へんで、長い首の付け根あたりに位置する。



図10 左: 可視光で撮像したはくちょう座X-1の伴星HD226868 (大阪教育大学)。右: X線で撮像したはくちょう座X-1 (NASA)。

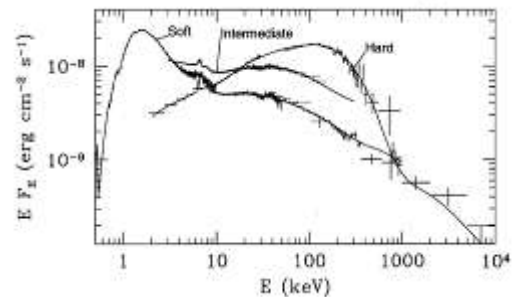


図11 ブラックホール連星はくちょう座X-1のX線スペクトル図。横軸はX線のエネルギー (振動数に比例する) で、縦軸はX線の強さ。いろいろな状態のものが描いてあるが、X線領域で強いエネルギー放射があることがわかる。



図12 X線連星の模式図。伴星からブラックホールへ降り注いだガスがブラックホール周辺に高温ガス円盤を形成し、そのガス円盤から強いX線が放射されている。

可視光や電波などの観測から、いくつかのブラックホール連星は、亜光速でプラズマガスが吹き出している相対論的ジェットをもっていることがわかってきた。そのようなブラックホール連星は、ジェットの速度が亜光速であること、中心がX線源であるように非常にエネルギーが高い現象であること、中心天体はブラックホールである可能性が高いことなどから、クェーサー（後述）のミニチュア版だと考えられ、**マイクロクェーサー**（microquasar）と総称される（マイクロは100万分の1）。

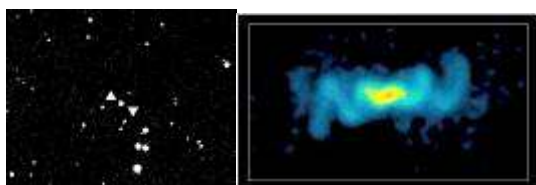


図 13 左：可視光で撮像したマイクロクェーサー SS433（大阪教育大学）。右：電波で観測した SS433（NRAO）。中心から図の左右にコルク抜きのパターンのようにガスが吹き出していることがわかる。

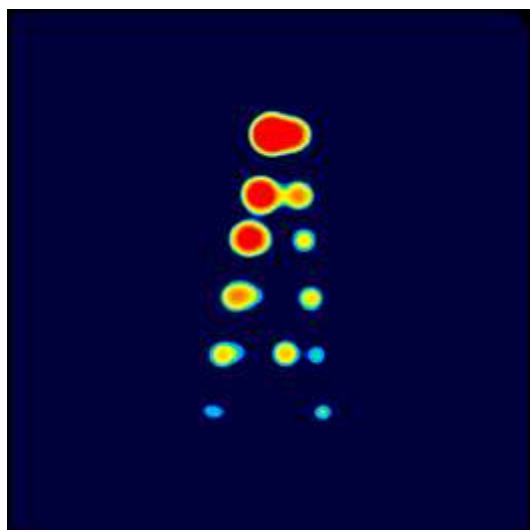


図 14 マイクロクェーサー GRS1915+105（NRAO）。異なる時期に得られた電波画像が上から下へ並べたものである。中心天体から電波を放射するプラズマが吹き出して、図の左右へ飛び去っていくさまがわかる。ジェットの速度は光速の92%。

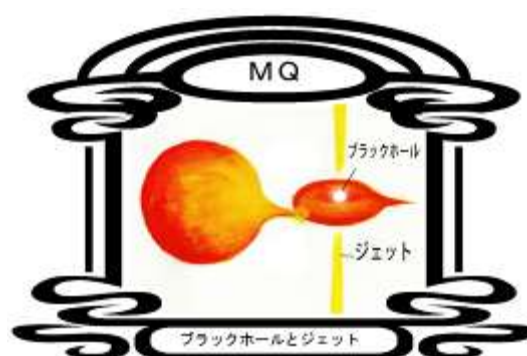


図 15 マイクロクェーサーの模式図。ブラックホール連星のうち、亜光速ジェットをもっているものをマイクロクェーサーと呼ぶ。

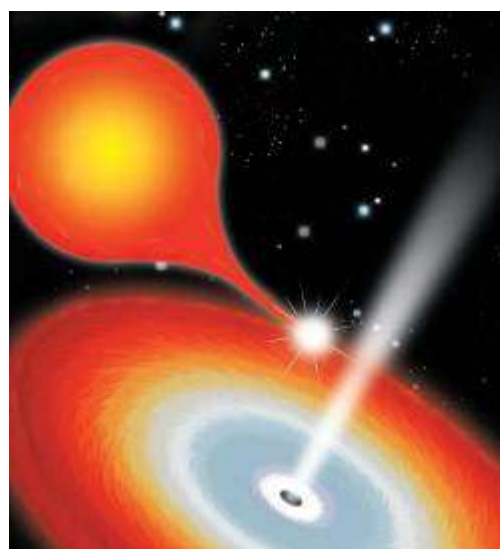


図 16 ブラックホールと普通の星からなるブラックホール連星の想像図。ブラックホールの強い重力が伴星のガスを引きずり込んで、ブラックホールのまわりにガス円盤が形成されている。ブラックホール近傍からはしばしば、高温プラズマガスがジェットとして吹き出している。この図の差し渡しは100万km程度で、ブラックホールの大きさはその10万分の1程度。

### 3 活動銀河とクェーサー

数千億の星と大量のガスそして正体不明の暗黒物質が集まった**銀河** (galaxy) は、かつては、とても巨大だが、静謐で変化のない天体システムだと思われていた。



図 17 子持ち銀河 M51 (大阪教育大学)。



図 18 巨大楕円銀河・電波銀河 M87 (すばる望遠鏡)。中心から吹き出すジェットもはっきり写っている。

しかし電波観測や X 線観測などによって、従来の銀河の描像は 20 世紀後半に劇的に変化した。中心核でモンスターが暴れている銀河が、つぎつぎと見つかると、**活動銀河** (active galaxy) とか**活動銀河中心核**・活動銀河核 AGN (active galactic nuclei) などと呼ばれるようになったのだ。さらに 21 世紀に入り、銀河の描像はふたたび塗り替えられた。“ふつう”の銀河の中心にもモンスターが眠っていそうなのだ。顕在化して

いるか休眠中かだけの違いで、おそらくほとんどすべての銀河の中心には、超巨大なブラックホールが存在しているようだ。

活動銀河には、中心部が明るく青っぽいセイファート銀河 (Seyfert galaxy) や、強い電波を出す電波銀河 (radio galaxy) などさまざまなタイプがある。とくに、強い“輝線”をもち、かつそれらが非常に大きな赤方偏移を示す活動銀河を**クェーサー** (quasar) と呼ぶ。



図 19 クェーサー 3C273 (NOAO)。右下に写っているのが宇宙ジェット。

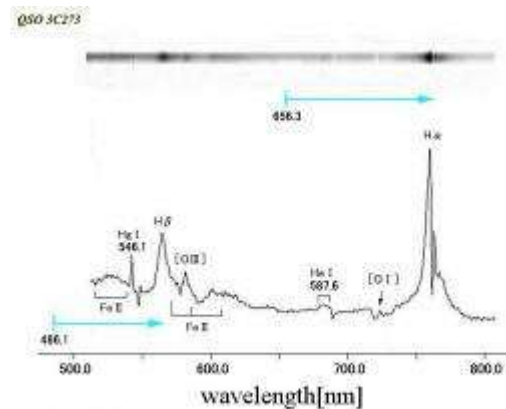


図 20 クェーサー 3C273 の可視域スペクトル。水素バルマー線の一つ H $\alpha$  線の実験室における波長は 656.3nm だが、クェーサー 3C273 のスペクトル上では H $\alpha$  線は 760.0nm に位置している (赤方偏移)。

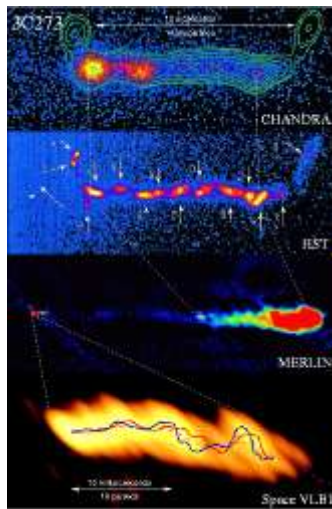


図 21 多波長で観測したクェーサー3C273 のジェット (NASA/STScI/JAXA)。上から、X線 (チャンドラ衛星)、可視光 (ハッブル宇宙望遠鏡)、電波 (マーリン干渉計)、電波 (宇宙電波干渉計はるか) の画像。3 番目のマーリンの画像にはジェット全体が写っており、左端の 3C273 中心核から右方向へジェットが伸びている。1 番目のチャンドラの画像と 2 番目のハッブルの画像にはジェットの先端半分程度のほぼ同じ部分が写っている。一番下のはるか衛星の画像には中心核部分を拡大したものが写っており、数十光年ぐらいの領域がみえている。

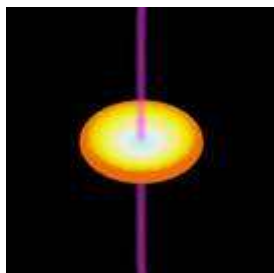


図 22 クェーサーや活動銀河核に存在するブラックホール=降着円盤の想像図。活動銀河の中心には巨大ブラックホールが存在し、その周囲には光り輝くプラズマガスの円盤 (降着円盤) が渦巻いている。ブラックホール近傍からはしばしば、高温プラズマガスのジェットが吹き出ている。図の差し渡しは 1 光年程度で、ブラックホールの大きさはその 10 万分の 1 程度。



図 23 可視光で撮像した活動銀河の一種であるブレーザー OJ 287 (大阪教育大学)。左 (2007 年 1 月 7 日) より右 (2007 年 9 月 14 日) の方が明るい。

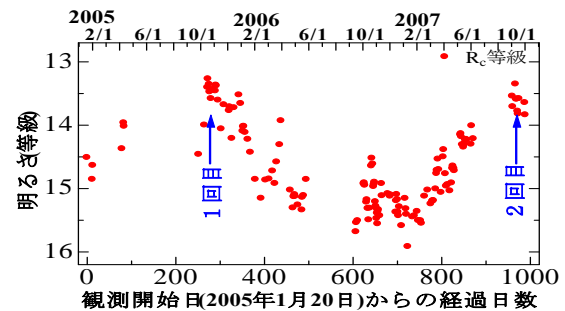


図 24 ブレーザー OJ 287 の光度曲線。OJ287 の天体の特異な点は、約 12 年おきに周期的にバースト (急激に明るくなること) を繰り返していることだ。さらに、1970 年以後の観測で、1 回のバーストが実は 2 つのピークをもっていることが明らかになり、なぜそのようなことが起きるかが大問題になっていた。その謎を鮮やかに解決したのが巨大ブラックホールの連星説である。

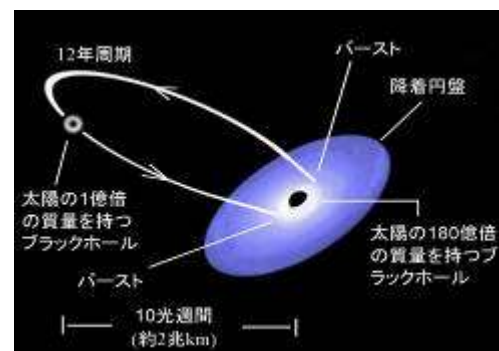


図 25 OJ287 の巨大ブラックホール連星説。超巨大ブラックホール (A) のまわりを巨大ブラックホール (B) が楕円軌道を描いて公転している。A のまわりのガス円盤を B が高速で通過したときに 2 山のバーストが起きると想像されている。

## 4 ガンマ線バースト

現在知られている天体现象の中で、宇宙でもっともエネルギーが高くて激しい現象の一つが、宇宙の彼方で起こっている**ガンマ線バースト** (gamma-ray burst) だ。

ガンマ線バーストというのは、もっともエネルギーの高い電磁波であるガンマ線の領域で、20 秒ぐらい続く強いガンマ線が放出される、激しい爆発現象である。

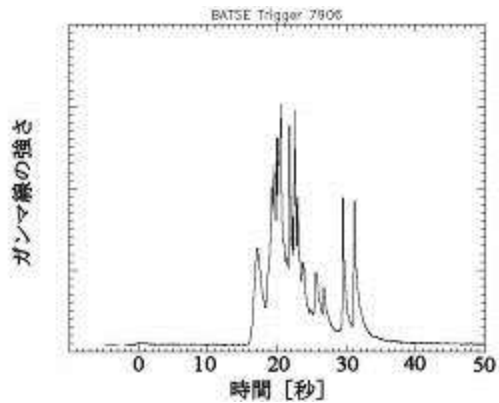


図 26 ガンバ線バーストのガンマ線の時間変化。

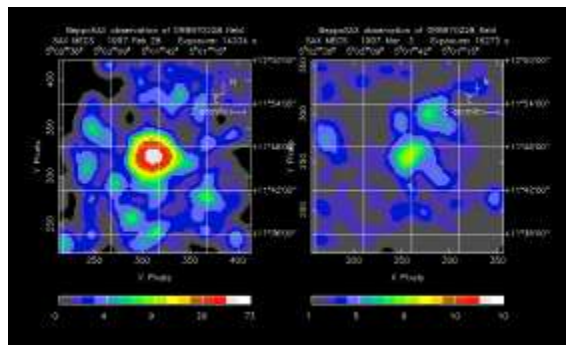


図 27 オリオン座で発見されたガンマ線バースト GRB970228 の X 線残光 (NASA)。左は 1997 年 2 月 28 日のバースト時で、右は 3 月 3 日で随分と暗くなっている。BeppoSAX 衛星が X 線で観測したもの。

ガンマ線バーストは核実験査察衛星によって 1960 年代から気づかれていたが、詳しく調べられるようになったのは、1991 年 4 月にスペースシャトルアトランティスが軌道上にガンマ線観測衛星コンプトン天文台を投入してからだ。そして、ガンマ線バーストがあらゆる方向でまんべんなく発見されたことから、大部分のガンマ線バーストは宇宙の彼方の現象であることがわかった。

さらに、1997 年になって、ガンマ線バーストが、X 線・可視光・電波などの領域で残光を伴っていることが発見された。それら残光の観測によって、ガンマ線バーストの発生源が詳しく突き止められた。そしてその結果、大部分のガンマ線バーストは、100 億光年も彼方の現象であることがはっきりした。

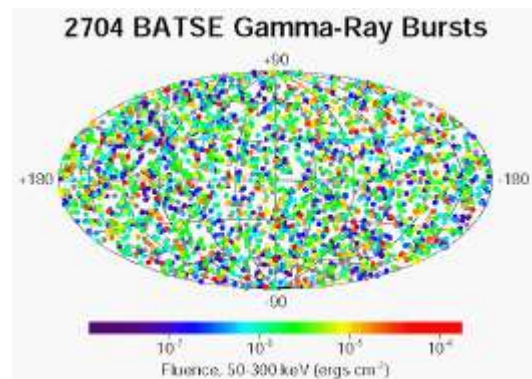


図 28 コンプトン衛星/BATSE で検出した数千例の GRB (NASA)。全天を楕円形に投影した宇宙の地図で、図の赤道部分が天の川銀河の領域。もしガンマ線バーストが銀河系内の天体现象なら、天の川の領域で帯状に分布する。赤ほど明るく青ほど暗いが、どれも全天で一様に分布している。



またいくつかのガンマ線バーストは、超新星と関連していることが明らかになってきた。ただし、ガンマ線バーストに関連する超新星は、きわめて規模が大きな**極超新星** (hypernova) のようだ。

超新星 (supernova) は太陽の 8 倍以上の質量をもつ重い星が、その進化の最期に重力崩壊を起こして、星全体が爆発する現象だ。さらに、極超新星は、おそらく誕生時に太陽の 30 倍以上の質量をもっていたような非常に重い星が、進化の果てに最終的に重力崩壊を起こしたものだろうと思われる。そのため、太陽の 10 倍程度の質量の星が重力崩壊して起きる“通常”の超新星に比べて、10 倍以上もの膨大なエネルギーを発生する。また、この極超新星爆発の際に、中心にはブラックホールが形成されると同時に、ガンマ線バーストも生じるのではないかと想像されている。

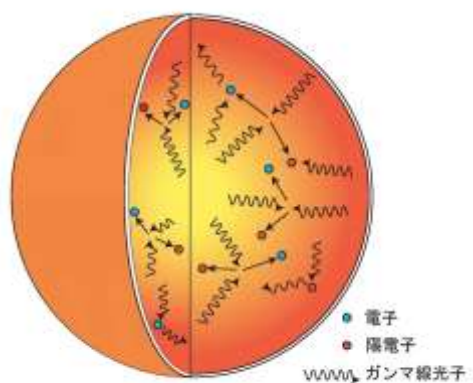


図 29 電子と陽電子と高エネルギー光子のファイアボール。

ガンマ線バーストの実体は、ほぼ光速で膨張する超高温の爆発現象—**ファイアボール** (fireball) と呼ばれる—だと思われる。

ただし、ファイアボールのでき方などはよくわかっていない。大質量星が重力崩壊して極超新星となったとき、中心部分はブラックホールへ崩壊しつつも、なんらかの原因によって、その周辺の中心核に高温高密度のファイアボールが生じ、さらになんらかの理由によって、ファイアボールは球状に膨張せずにジェット状に吹き出るのではないかと推測されている。崩壊しつつある恒星大気を貫いて噴出するジェットの速度は、実に光速の 99.99%にも達しており、正面方向からジェットを観測すると非常に高エネルギーのガンマ線バーストとして見えるのだ。

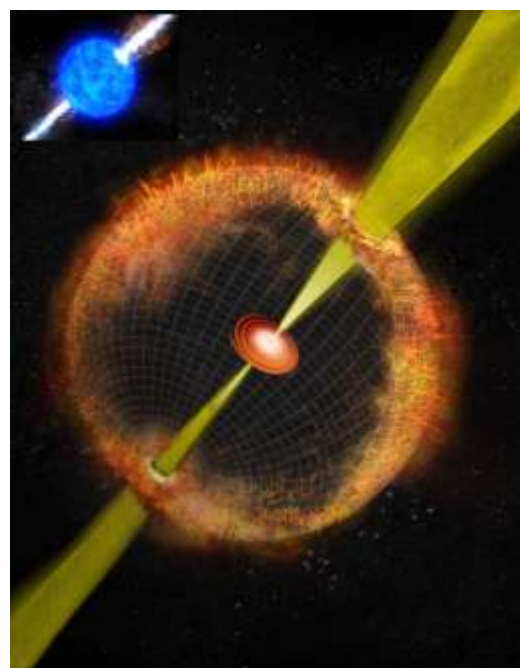


図 30 ブラックホール近傍でできたファイアボールが非球対称に膨張し、重力崩壊する星の外層を貫いて、光速の 99.99%のジェットが吹き出している (NASA)。

## 5 活動天体のエネルギー源ーブラックホールエンジン

### ■宇宙の重力発電所

地上の水力発電所では、河に建設したダムが落差を作り、流れ込んだ水がその落差を落ちて発電する。一方、宇宙におけるブラックホールの周辺では、ブラックホールの重力が“超”落差を作り、周囲から降り注ぐ水素ガスが落下することで、強烈なエネルギーが発生できる。活動天体のエネルギー源はこのような宇宙の**重力発電所**で、しばしば**ブラックホールエンジン** (black hole engine) とも呼ばれる。

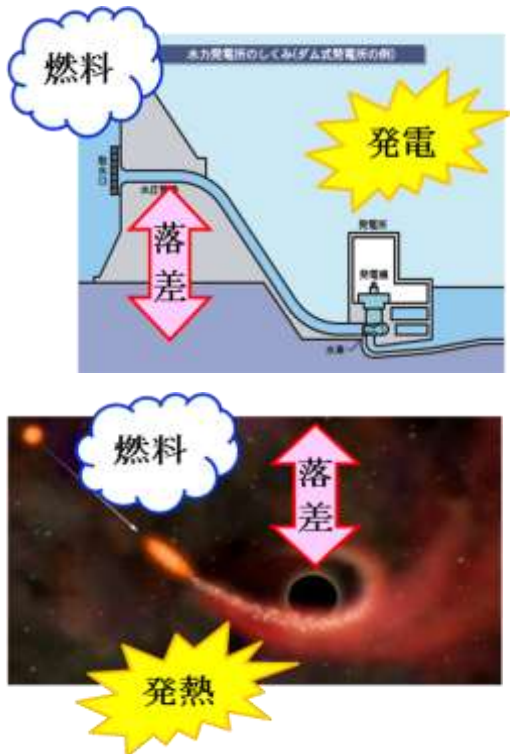


図 31 地上の水力発電所（上）と宇宙の重力発電所（下）。

### ■ブラックホール=降着円盤システム

原始星・白色矮星・中性子星・ブラックホールさらに超巨大ブラックホールなど、重力をおよぼす天体に周囲から降り積もってきたガスによって、中心天体の周囲に形成されたガスの円盤を**降着円盤** (accretion disk) と呼んでいる。

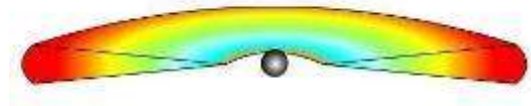


図 32 ブラックホール降着円盤の描像。中心近傍ほど温度が高い。

降着円盤は、原始惑星系・激変星・X線星・活動銀河など、宇宙における活動的な天体において、その活動の中心的な役割を担っていると考えられている。そして降着円盤は、しばしば活動天体の強烈なスペクトルや活動天体から噴出するジェットの原因になっていると信じられている。

降着円盤は、一般に電離した水素ガスからできていて、名前の通り円盤状で不透明であり、直感的には平たい星だと考えることができる。ガスは降着円盤の中を、太陽系の惑星のように、中心ほど速い回転角速度で回っている。降着円盤の中では、ガス同士が互いに接しているため、隣接するガ

ス層の間で摩擦が働く。その結果、ガス同士が擦れあって、ガスは激しく加熱される。さらに、高温になったガスはついには光を放射して輝き始める。この降着円盤からの強烈な電磁放射が活動銀河などの明るさの根源だ。このエネルギーの源は、中心のブラックホールなどに対して、ガスがもっていた位置エネルギー（**重力エネルギー**）である。本来は非常に暗いはずのブラックホールや中性子星が、その周辺にできた降着円盤の存在で非常に明るい天体に変身し、観測可能になるのだ。



図 33 X線連星の降着円盤（上）と活動銀河の降着円盤（下）の想像図。

### ■ブラックホールシャドウ

ブラックホールは光さえ出でこれない天体だ。だから観ることはできないような気がするが、決してそうではない。光り

輝く衣を纏うことによって、ブラックホールのシルエットを見ることが可能になる。それを**ブラックホールシャドウ** (black hole shadow) と呼ぶ。

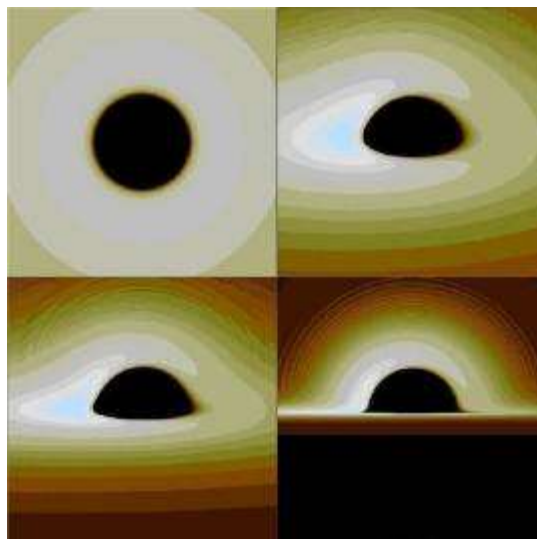


図 34 ブラックホールシルエット。俯角が違う。

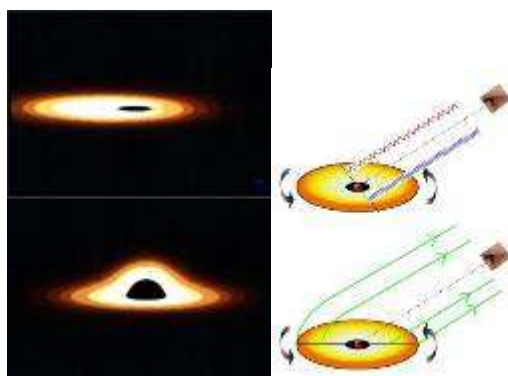


図 35 ブラックホール＝降着円盤の姿が歪んで見える理由は2つある。まず円盤のガスはブラックホール近傍では光速近くのスปีドで回転しているため、手前に近づく側のガスから出た光は非常に強められる（右図の上）。その結果、円盤の画像は左側が明るく見える（左図の上）。一方、ブラックホール近傍では空間が歪んでいるため、光線が曲げられる（右図の下）。その結果、円盤の画像は向こう側が浮き上がったように見える（左図の下）。これらの効果が合わさって、いろいろなシルエットになる。

## ■ブラックホールジェット

ブラックホールは物質を吸い込み光輝くだけではない。意外なことに、ブラックホール近傍からは、高温プラズマの噴流が吹き出している。これら、中心の天体から、天体をはさんで双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの流れを、**宇宙ジェット** (astrophysical jet) と呼ぶ。



図 36 ブラックホール=降着円盤システムから吹き出す宇宙ジェットの模式図。

宇宙ジェットは、ブラックホールを取り巻く降着円盤のガスの一部が、ガスの圧力や放射圧や磁場の力などいろいろな原因によって、円盤面と垂直方向に噴き出したものだと考えられている。

宇宙ジェットは最初、活動銀河において発見された。すなわち、クェーサーや電波銀河において、中心核のほんの 1 光年程度の領域から、銀河本体を中心として双方向に、はるか 100 万光年もの長さにわたって銀河間の虚空を貫いて吹き出す電波構造として発見された。また特異星 SS433 と呼ばれる通常の恒星とコンパクト星からなる近接連星系においては、コンパクト星の周辺

に形成された降着円盤から、実に光速の 26% (約 78000km/s) もの速度でジェットが噴き出していることが観測されている。星間に広がる分子雲の中で生まれたばかりの原始星周辺からも、双極ジェットと呼ばれる毎秒 10 数 km のガス流が噴出している。

宇宙ジェットや降着円盤は、重力天体の周辺で生じる動的な段階に伴って現れる普遍的な現象だと考えられている。

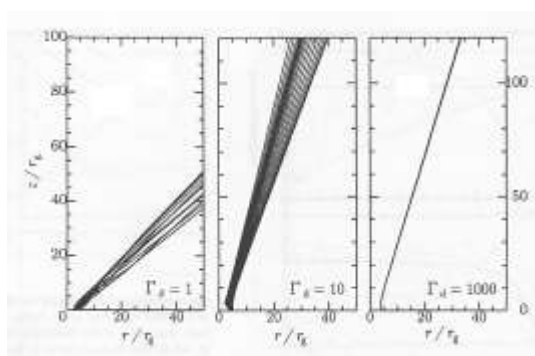


図 37 降着円盤から吹き出すプラズマ流の数値計算。図の原点 (左下) にブラックホールがあって、x 軸に沿って光り輝く降着円盤が広がっている。左から右へと、円盤が明るくなるほど、プラズマ流は細く絞られた流れになることがわかった。

ブラックホールの胃袋は無限に大きいが、吸い込み口 (ブラックホールの境界) は有限の大きさなので、いっぺんに何でも吸い込めるわけではない。吸い込みきれない物質をジェット状に吹き出すこともあり、しかもブラックホールの強い重力場のもとで、ときとして超高エネルギーのジェットが形成されるのだろう。

### 参考文献

- 福江 純『ブラックホール宇宙』サイエンスアイ新書  
 福江 純『ブラックホールを飼いならす!』恒星社厚生閣