

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。

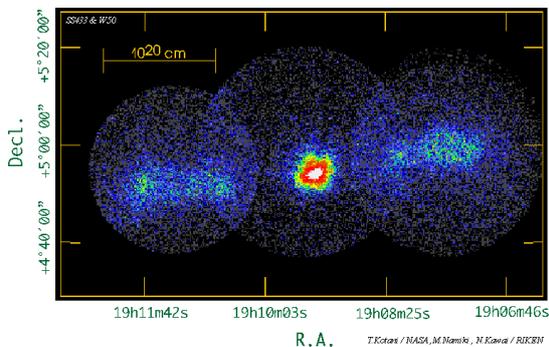


図1 X線天文衛星あすかが撮像したマイクロクェーサーSS433 ジェット。左右の差し渡しは約400光年。中心から吹き出したプラズマの流れが、星間の水素ガスに衝突してX線を放射している。

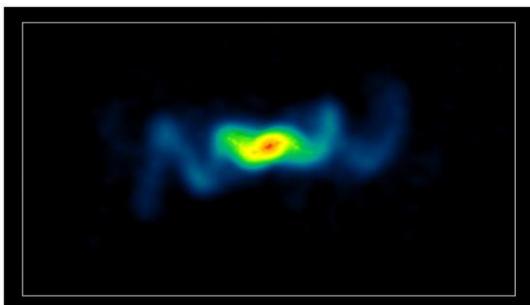


図2 電波で観測したSS433 ジェット (NRAO)。上の図を中心部を大きく拡大したもので、左右の差し渡しは数光年。ジェットがコルク抜きのようなパターンになっていることがわかる。

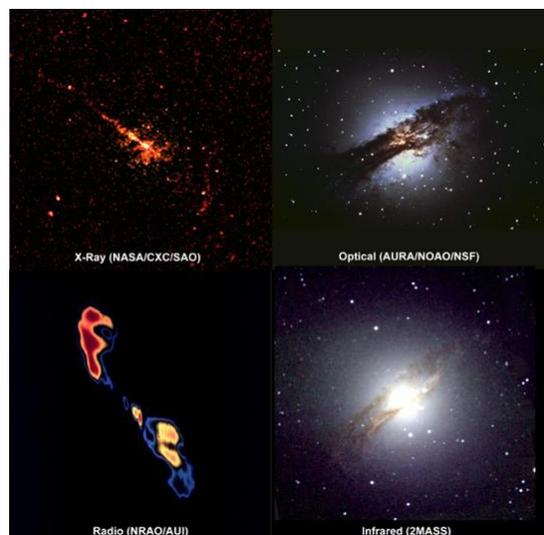


図3 活動銀河ケンタウルス座 A/NGC5128 (NASA/NOAO/NRAO)。右上：可視光では赤道面に黒い帯がみえる。右下：赤外線では塵の帯を通して中心部が輝いている。左下：電波では二つ目玉がわかる。左上：X線では左上方向だけ細く伸びるジェットが写っている。

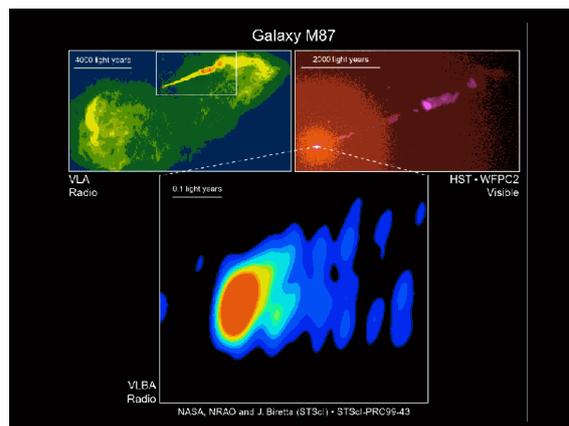


図4 活動銀河おとめ座 A/M87 (NASA/JAXA)。右上：可視光では丸い銀河本体を貫くようにジェットの流れがみえる。左上：電波では星からなる銀河本体はみえないが、高温プラズマのジェットがはっきりみえる。下：中心部を拡大したもので、ジェットは中心から吹き出していることがわかる。

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。

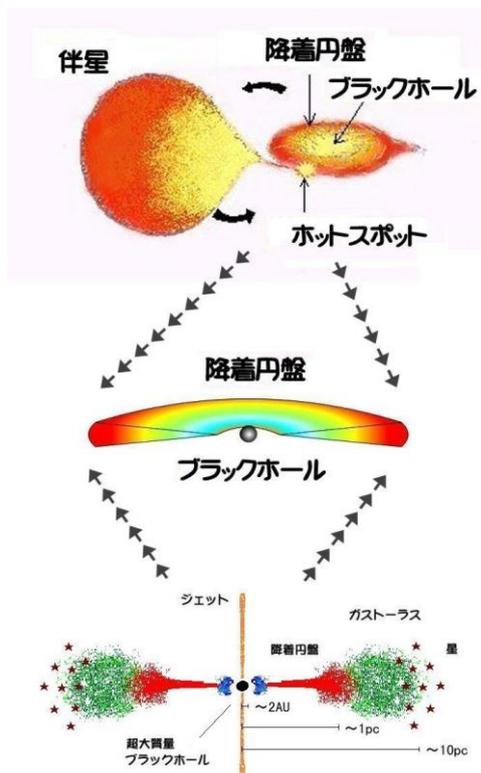


図5 ブラックホール活動天体の描像。

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。

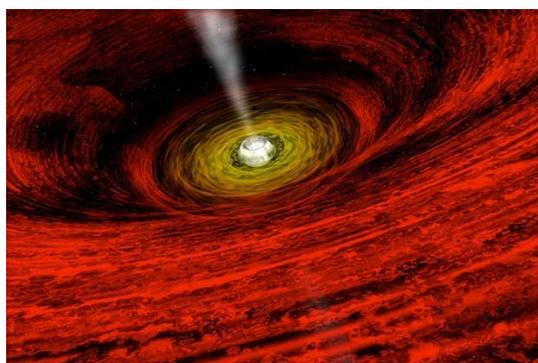


図7 活動銀河中心の想像図。

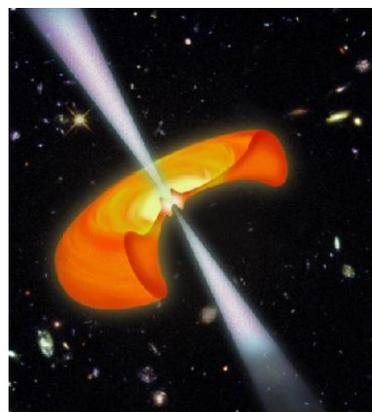


図8 ガンマ線バーストの想像図。

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。

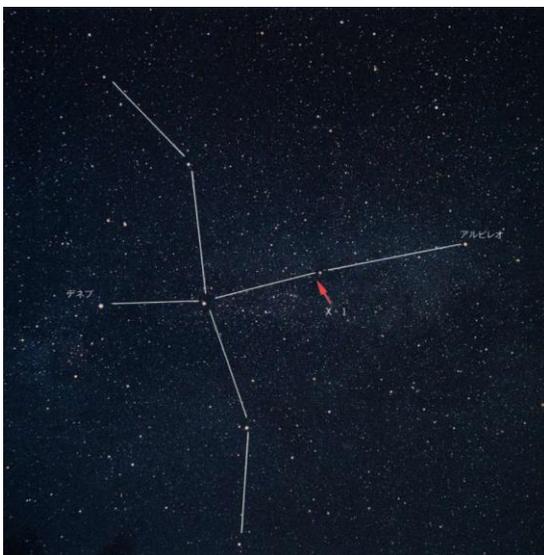


図9 ブラックホール連星はくちょう座X-1。くちばしの星 (アルビレオ) としっぽの星 (デネブ) の真ん中へんで、長い首の付け根あたりに位置する。

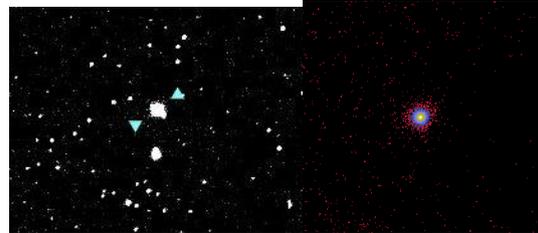


図10 左: 可視光で撮像したはくちょう座X-1の伴星HD226868 (大阪教育大学)。右: X線で撮像したはくちょう座X-1 (NASA)。

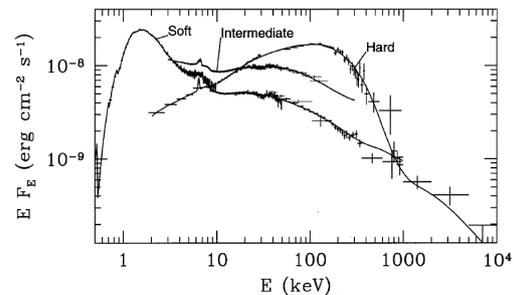


図11 ブラックホール連星はくちょう座X-1のX線スペクトル図。横軸はX線のエネルギー (振動数に比例する) で、縦軸はX線の強さ。いろいろな状態のものが描いてあるが、X線領域で強いエネルギー放射があることがわかる。

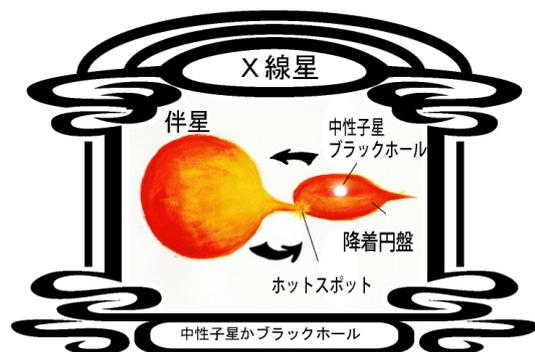


図12 X線連星の模式図。伴星からブラックホールへ降り注いだガスがブラックホール周辺に高温ガス円盤を形成し、そのガス円盤から強いX線が放射されている。

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）。

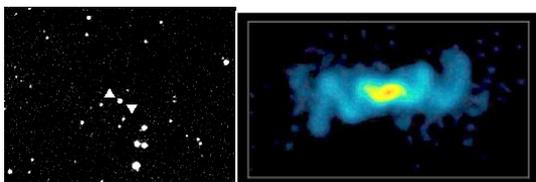


図 13 左：可視光で撮像したマイクロクェーサー SS433（大阪教育大学）。右：電波で観測した SS433（NRAO）。中心から図の左右にコルク抜きのパターンのようにガスが吹き出していることがわかる。

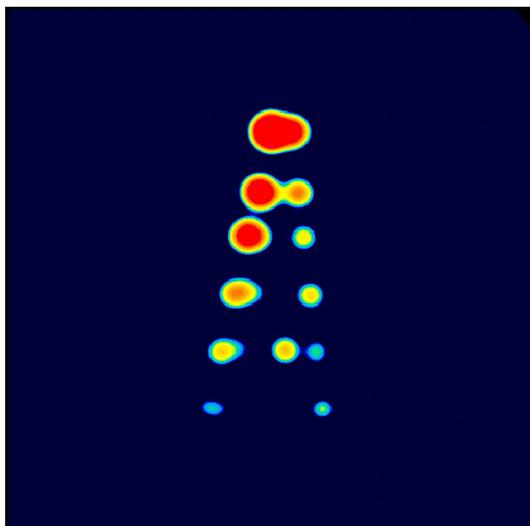


図 14 マイクロクェーサー GRS1915+105（NRAO）。異なる時期に得られた電波画像が上から下へ並べたものである。中心天体から電波を放射するプラズマが吹き出して、図の左右へ飛び去っていくさまがわかる。ジェットの速度は光速の92%。

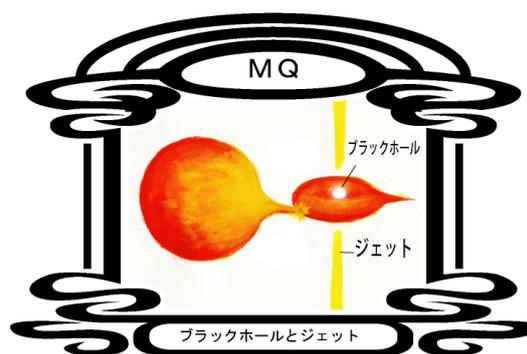


図 15 マイクロクェーサーの模式図。ブラックホール連星のうち、亜光速ジェットをもっているものをマイクロクェーサーと呼ぶ。

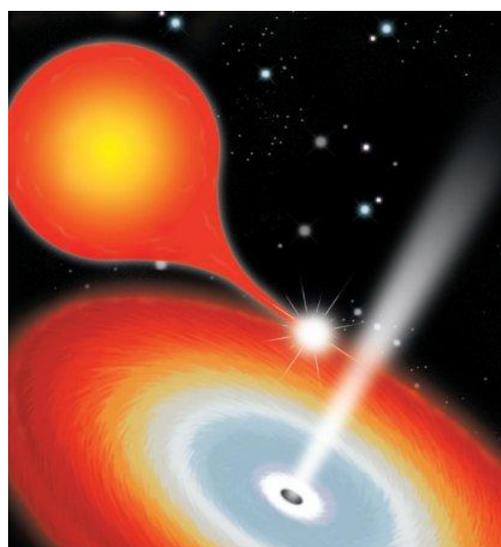


図 16 ブラックホールと普通の星からなるブラックホール連星の想像図。ブラックホールの強い重力が伴星のガスを引きずり込んで、ブラックホールのまわりにガス円盤が形成されている。ブラックホール近傍からはしばしば、高温プラズマガスがジェットとして吹き出している。この図の差し渡しは100万km程度で、ブラックホールの大きさはその10万分の1程度。

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。

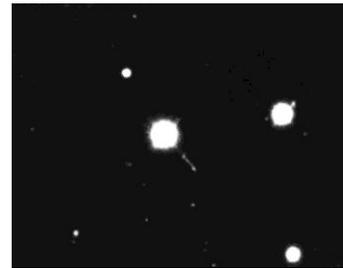


図 19 クェーサー 3C273 (NOAO)。右下に写っているのが宇宙ジェット。

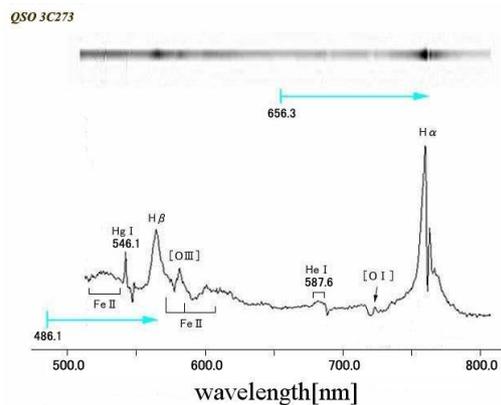


図 20 クェーサー 3C273 の可視域スペクトル。水素バルマー線の一つ H α 線の実験室における波長は 656.3nm だが、クェーサー 3C273 のスペクトル上では H α 線は 760.0nm に位置している (赤方偏移)。

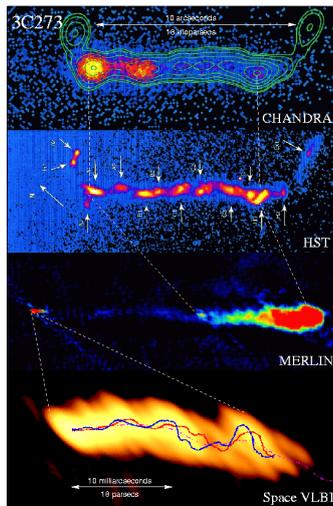


図 21 多波長で観測したクェーサー3C273 のジェット (NASA/STScI/JAXA)。上から、X線 (チャンドラ衛星)、可視光 (ハッブル宇宙望遠鏡)、電波 (マーリン干渉計)、電波 (宇宙電波干渉計はるか) の画像。3 番目のマーリンの画像にはジェット全体が写っており、左端の 3C273 中心核から右方向へジェットが伸びている。1 番目のチャンドラの画像と 2 番目のハッブルの画像にはジェットの先端半分程度のほぼ同じ部分が写っている。一番下のはるか衛星の画像には中心核部分を拡大したものが写っており、数十光年ぐらいの領域がみえている。

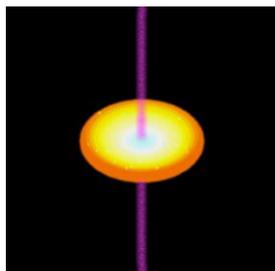


図 22 クェーサーや活動銀河核に存在するブラックホール=降着円盤の想像図。活動銀河の中心には巨大ブラックホールが存在し、その周囲には光り輝くプラズマガスの円盤 (降着円盤) が渦巻いている。ブラックホール近傍からはしばしば、高温プラズマガスのジェットが吹き出ている。図の差し渡しは 1 光年程度で、ブラックホールの大きさはその 10 万分の 1 程度。



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。

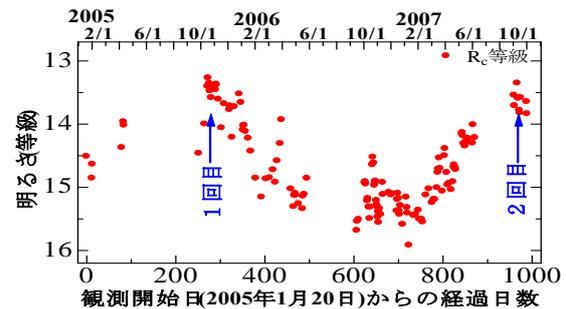


図 24 ブレーザー OJ 287 の光度曲線。OJ287 の天体の特異な点は、約 12 年おきに周期的にバースト (急激に明るくなること) を繰り返していることだ。さらに、1970 年以後の観測で、1 回のバーストが実は 2 つのピークをもっていることが明らかになり、なぜそのようなことが起きるかが大問題になっていた。その謎を鮮やかに解決したのが巨大ブラックホールの連星説である。

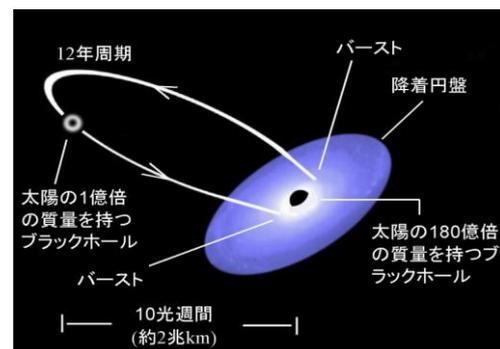


図 25 OJ287 の巨大ブラックホール連星説。超巨大ブラックホール (A) のまわりを巨大ブラックホール (B) が楕円軌道を描いて公転している。A のまわりのガス円盤を B が高速で通過したときに 2 山のバーストが起きると想像されている。

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。

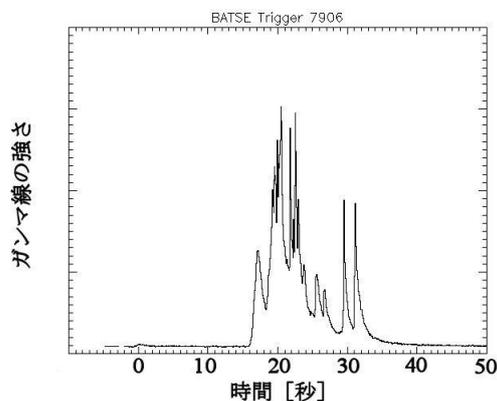


図 26 ガンバ線バーストのガンマ線の時間変化。

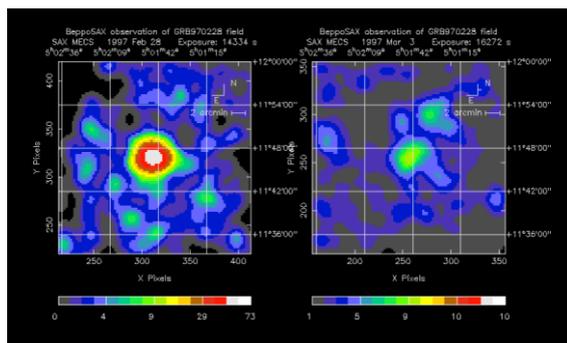


図 27 オリオン座で発見されたガンマ線バースト **GRB970228** の X 線残光 (NASA)。左は 1997 年 2 月 28 日のバースト時で、右は 3 月 3 日で随分と暗くなっている。BeppoSAX 衛星が X 線で観測したもの。

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。

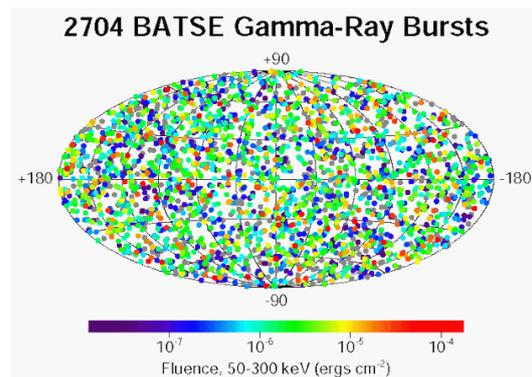


図 28 コンプトン衛星/BATSE で検出した数千例の GRB (NASA)。全天を楕円形に投影した宇宙の地図で、図の赤道部分が天の川銀河の領域。もしガンマ線バーストが銀河系内の天体现象なら、天の川の領域で帯状に分布する。赤ほど明るく青ほど暗いが、どれも全天で一様に分布している。

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。

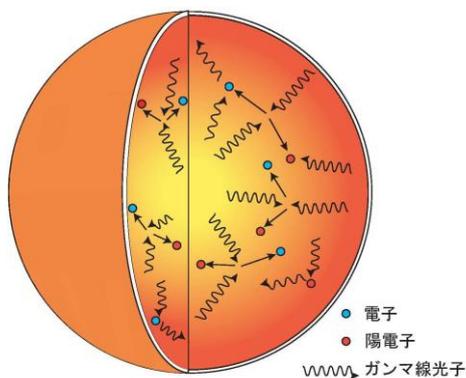


図 29 電子と陽電子と高エネルギー光子のファイアボール。

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。

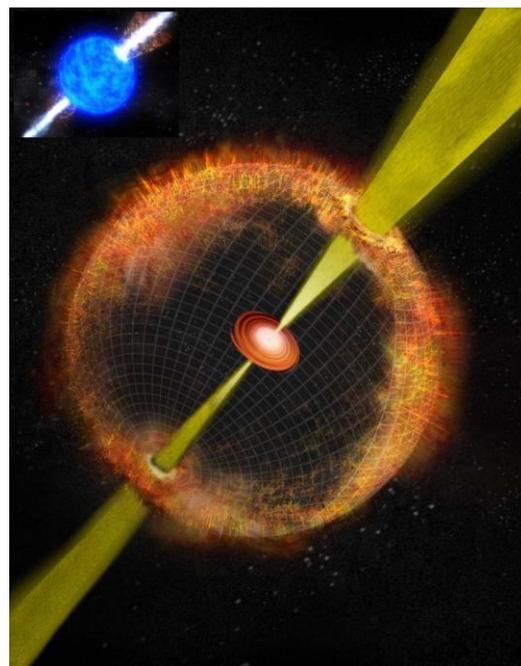


図 30 ブラックホール近傍でできたファイアボールが非球対称に膨張し、重力崩壊する星の外層を貫いて、光速の 99.99%のジェットが吹き出している (NASA)。

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。

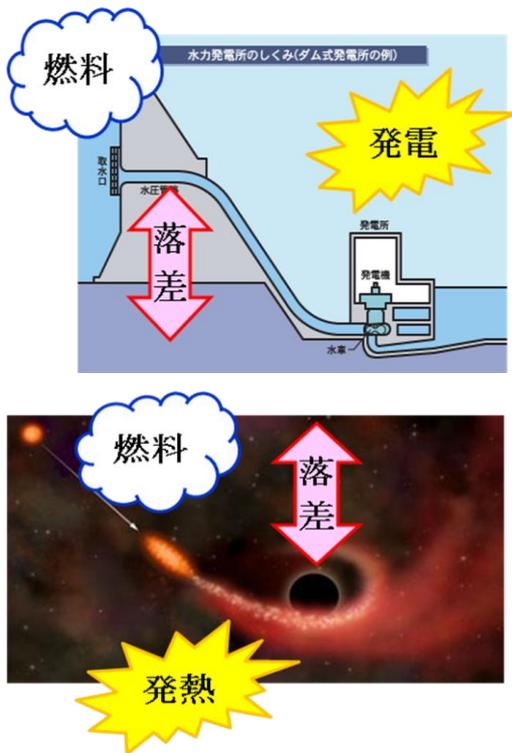


図 31 地上の水力発電所（上）と宇宙の重力発電所（下）。

■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。

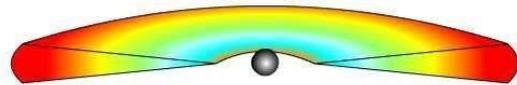


図 32 ブラックホール降着円盤の描像。中心近傍ほど温度が高い。

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。

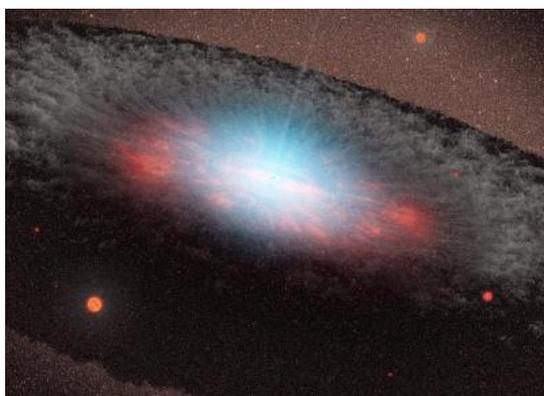


図 33 X線連星の降着円盤（上）と活動銀河の降着円盤（下）の想像図。

■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。

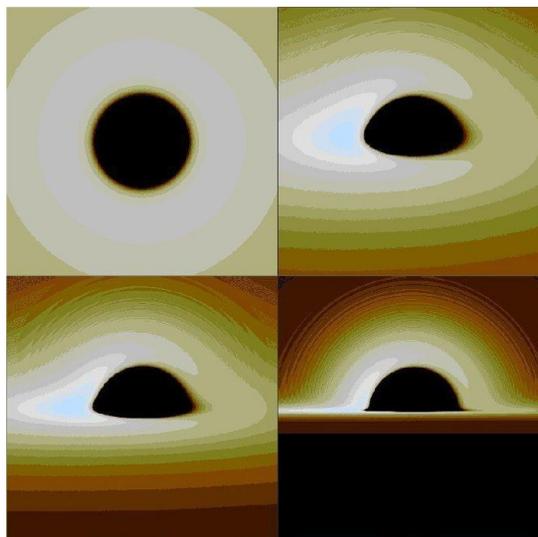


図 34 ブラックホールシルエット。俯角が違う。

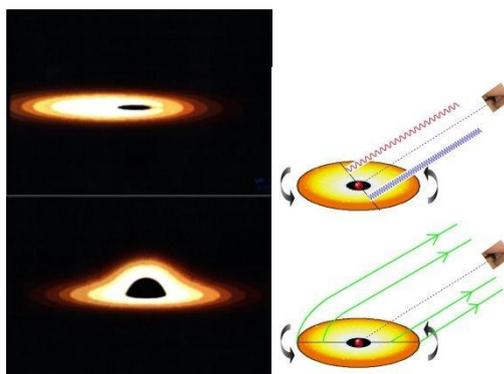


図 35 ブラックホール＝降着円盤の姿が歪んで見える理由は2つある。まず円盤のガスはブラックホール近傍では光速近くのスปีドで回転しているため、手前に近づく側のガスから出た光は非常に強められる（右図の上）。その結果、円盤の画像は左側が明るく見える（左図の上）。一方、ブラックホール近傍では空間が歪んでいるため、光線が曲げられる（右図の下）。その結果、円盤の画像は向こう側が浮き上がったように見える（左図の下）。これらの効果が合わさって、いろいろなシルエットになる。

■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。

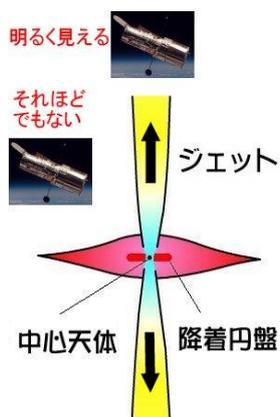


図 36 ブラックホール=降着円盤システムから吹き出す宇宙ジェットの模式図。

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 のガス流が噴き出している。

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。

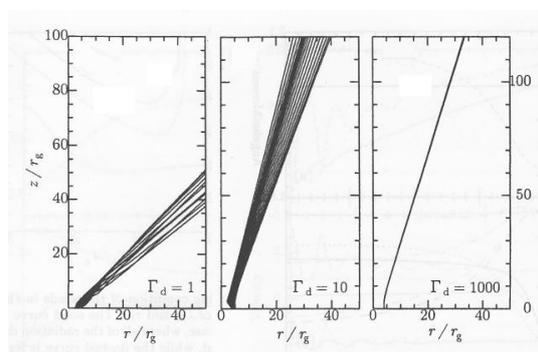


図 37 降着円盤から吹き出すプラズマ流の数値計算。図の原点 (左下) にブラックホールがあって、x 軸に沿って光り輝く降着円盤が広がっている。左から右へと、円盤が明るくなるほど、プラズマ流は細く絞られた流れになることがわかった。

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

電磁波とスペクトル

天文学においては、対象となる**天体** (object) がきわめて遠方にあるため、太陽系内のごく一部を除いて、対象を間近で見たり手で取って直接調べたりすることができない。そのため、対象の状態を知るほとんど唯一の手段は、天体が発する電磁波(光)を“観る”ことである。

すなわち天文学では、電磁波を用いた**観測** (observation) によって、対象に関するさまざまな情報を得ている。具体的には、天体の形状や色などの特性とか天体を作っている物質の化学組成、天体の温度・密度・圧力などの物理状態、空間内の移動や自転・公転そして膨張・収縮・乱流などの運動状態、天体のまわりの時空の性質などの情報が得られる。

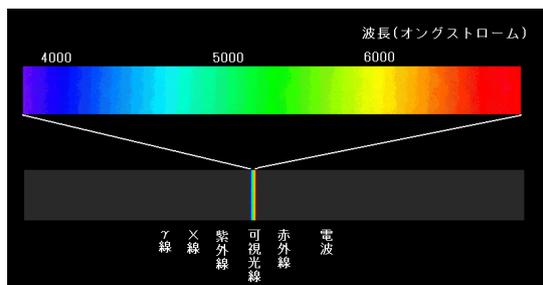


図1 電磁波と可視光。可視光の波長は380nmから780nmぐらい。可視光より波長が短い、紫外線、X線、ガンマ線、波長が長い、赤外線、電波がある。

電波 (radio wave)、赤外線 (infrared)、可視光 (visual light)、紫外線 (ultraviolet)、X線 (X-ray)、ガンマ線 (gamma-ray) など、光の仲間を一般に**電磁波** (electromagnetic wave) と呼ぶ。

(1) 光子の波長と振動数とエネルギー

電磁波 (光子) は、波としては、特定の**波長** λ (ラムダ) と**振動数** ν (ニュー) をもつ。それらは独立ではなく、真空中では、それらの積、

$$\lambda \nu = c$$

は**光速** c ($=3 \times 10^8 \text{m}$) に等しい。波長の基本単位は m (SI 単位系) や cm (cgs 単位系) だが、 nm (ナノメートル=10億分の1m) を用いることも多い。一方、1秒あたりの振動数は Hz (ヘルツ) で測る。

電磁波が粒子として振舞うとき、1個の光子は特定の**エネルギー** E をもつ。光子のエネルギー E は、振動数に比例する (波長に反比例する) :

$$E = h \nu$$

ここで h はプランク定数 ($=6.626 \times 10^{-34} \text{J/s}$) である。エネルギーの単位は eV ($=1.6022 \times 10^{-19} \text{J}$) や keV ($=10^3 \text{eV}$)、 MeV (10^6eV) などを用いる。X線や γ 線領域ではエネルギーで測ることも多い。

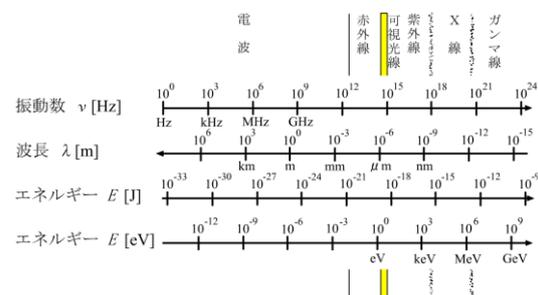


図2 電磁波スペクトル。上から、さまざまな電磁波の振動数、波長、エネルギーを対応させたもの。

(2) 黒体放射

プラズマガスと放射（光子）との間で、光子が原子やイオンによって頻りに吸収放出されると、放射場は一様かつ等方で熱力学的な平衡状態になる。このような場合に放射される光が**黒体放射** (blackbody) で、その光の強度分布が**黒体放射スペクトル** (blackbody radiation) だ。人間 (300K 程度)、溶鉱炉の鉄 (数千 K 程度)、星 (数千~数万 K)、降着円盤 (数千万 K) など、温度に対応する黒体放射を出している。

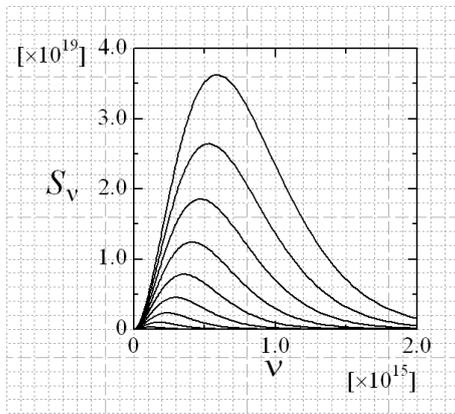


図3 通常スケールで表した黒体放射スペクトル。横軸は振動数 ν で、縦軸はスペクトル強度 S_ν 。黒体放射の温度は1000Kから10000Kまで。

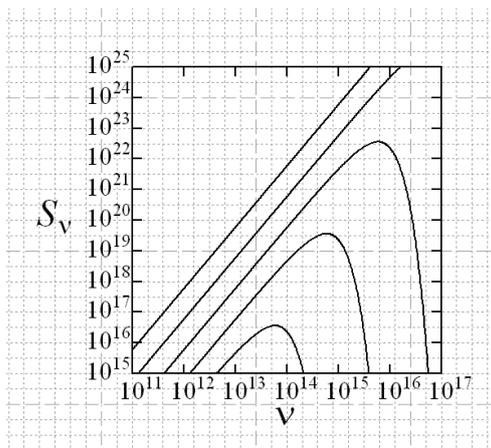


図4 対数スケールで表した黒体放射スペクトル。横軸は振動数 ν の対数で、縦軸は強度 S_ν の対数。黒体放射の温度は 10^3 Kから 10^7 Kまで。

黒体放射はプラズマガスと熱平衡になっているので、そのスペクトルの形はプラズマガスの温度だけで一意的に決まる。

具体的に黒体放射 (**プランク分布**) を式で表すと、振動数ごとの光の強さは、

$$B_\nu(T) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

と表される。ただし、 c ($=3 \times 10^8 \text{m}$) は光速、 h ($=6.626 \times 10^{-34} \text{J/s}$) はプランク定数、 k_B ($=1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$) はボルツマン定数である。パラメータは温度だけである。

また、黒体放射スペクトルはピークをもっている。そのピーク的位置は、

$$\nu_{\max} = 5.88 \times 10^{10} T [\text{Hz}]$$

$$\lambda_{\max} = 2.90 \times 10^3 / T [\mu\text{m}]$$

で与えられ、**ウィーンの変位則**と呼ばれる。ウィーンの変位則は、黒体放射スペクトルのピークが、温度が高くなるほど高振動数（短波長）側に移動することを意味している。すなわち温度が高いほど、可視光から紫外線、さらにX線へピークが移動する。

さらに単位時間単位振動数あたりの黒体放射強度を振動数で積分したものを：

$$B(T) = \int_0^\infty B_\nu(T) d\nu = \sigma T^4$$

を全黒体放射強度という。ただし、 σ ($=5.671 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$) はステファン・ボルツマンの定数である。この関係は**ステファン・ボルツマンの法則**と呼ばれる。ステファン・ボルツマンの法則から、温度が高くなるほど急激に黒体放射エネルギーが強くなることがわかる。

(3)原子スペクトル

輝線や吸収線は、普通は天体を作っているガス原子内の電子の状態遷移で生じる。原子核のまわりの電子は、量子力学的な理由から、飛び飛びのエネルギー状態しかとれない。そして電子があるエネルギー状態から別のエネルギー状態に遷移する際に、2つの状態のエネルギー差に応じて、特定の波長の光を放出したり吸収したりする。それらの光を**原子スペクトル**（atomic spectrum）と呼ぶ。

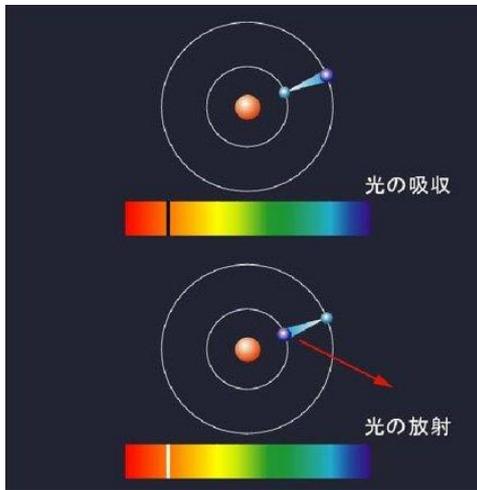


図5 光の吸収と放出。

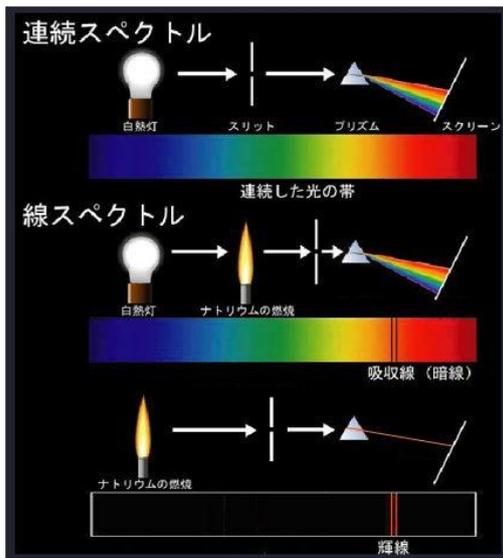


図6 輝線と吸収線の形成。

黒体放射スペクトルのような連続光を放射している光源を観測しているとしよう。もし光源と観測者の間にガス雲がある場合には、ガス中の原子内の電子は光源からの連続光のある特定の波長を吸収する。高いエネルギー状態に遷移した電子はすぐに低いエネルギー状態に落ちるが、その際に吸収したのと同じ波長の光を放出する。すなわち、光の放出と吸収が釣り合っていれば、ガスは同じ波長の光を放出するが、放出は等方的に生じる。その結果、その波長において、観測者の方向に到来する放射は減少するので、結局、光源からの連続スペクトルに吸収線が生じることになる。一方、光源に照らされたガス雲を横の方から見れば、（場合によっては光源の連続スペクトルに重なって）輝線が見えるのである。

星のスペクトルは、星が背後の光源になっているため吸収線になることが多い。一方、星雲や活動銀河のスペクトルはしばしば輝線になっている。

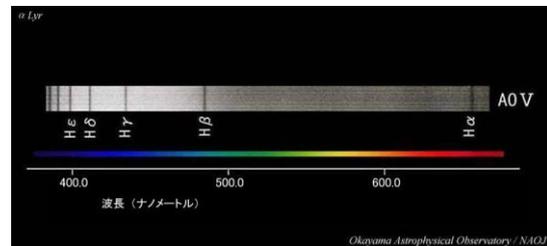
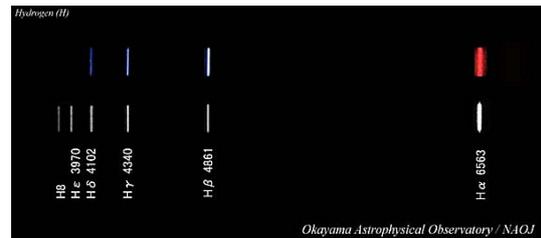


図7 水素のバルマー線。上は実験室で得られた輝線スペクトル。下はこと座アルファ星（ベガ）のスペクトルで吸収線になっている。どちらも並び方が同じパターンになっていることがわかる。

宇宙でもっとも豊富な元素は水素である。そのためスペクトル線も水素が起源のものが一番目立つし、よく調べられている。水素原子内の電子のエネルギー状態は、一番エネルギーの低いものから、基底状態、第1励起状態、第2励起状態などと呼ばれているが、これらの状態間のエネルギー差は決まっており、また規則性があるため、スペクトル線の波長やその現れ方から、水素原子のものだと特定できるのである。さらに水素原子のスペクトル線については、基底状態とたくさんある励起状態との間を電子が遷移する際に生じる輝線や吸収線を**ライマン系列** (Lyman series)、第1励起状態とそれよりエネルギーの高い状態（たくさんある）間の場合を**バルマー系列** (Balmer series)、第2励起状態の場合を**パッシェン系列** (Paschen series) などと呼んでいる。

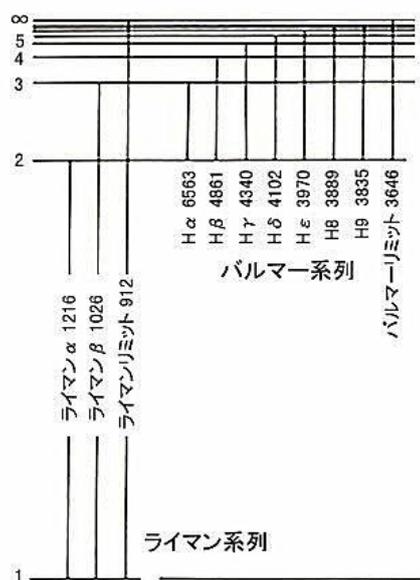


図8 水素のスペクトル系列。ライマン系列はおおむね紫外線領域に、バルマー系列は可視光領域にある。

(4) 赤方偏移

天体からのスペクトル線を同定したときに、観測される波長 λ (振動数 ν) と、地球上の実験室内で同じ原子から出てくる光のスペクトル線の波長 λ_0 (振動数 ν_0) はしばしば異なっている。

このようなスペクトル線の偏移の大きさを表す量として、観測される波長 λ と実験室で測定された波長 λ_0 の比から1を引いたもの：

$$z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\nu_0}{\nu} - 1$$

を用い、これを**赤方偏移** (redshift) と呼ぶ。

もし λ が λ_0 より大きく波長が長い方へずれていれば、 z は正になり（狭い意味での）赤方偏移となる。可視光の場合、波長が長い光は赤い光であり、これが赤方偏移という呼び名の由来である。逆に波長が短い（青い）方へずれていれば、 z は負であり青方偏移 (blue shift) となる。

スペクトル線の偏移を起こす原因には、(1)天体と観測者の間の相対的な運動によるドップラー効果、(2)強い重力場による重力赤方偏移、(3)宇宙膨張に伴う赤方偏移がある。たとえば、ドップラー効果による赤方偏移の場合、観測者と天体の相対速度を v 、光速を c とすると、

$$\frac{v}{c} = z$$

という関係が成り立つので、赤方偏移から速度を導ける。なお、速度が光速近くなると、以下の相対論的な関係式になる。

$$\frac{v}{c} = \frac{2z + z^2}{2 + 2z + z^2}$$

ブラックホール活動天体の観測

- 1 天体の観測—撮像・測光・分光
- 2 望遠鏡のしくみと性能
- 3 光検出と CCD 受光器



51cm 反射望遠鏡



ニート彗星

ソムブレロ銀河 M104

大阪教育大学 天文学研究室

1 天体の観測—撮像・測光・分光

■天体の撮像観測

点源にせよ広がった天体にせよ、観測装置の焦点にできた天体の画像を得る観測が、**撮像観測** (imaging) である。撮像観測によって、天球面に投影した天体の構造などがわかる。ただし、天体の光は微弱なので、データとして役に立つ画像を得るためには、しばしば、何枚も同じ領域を撮像してデータを重ね合わせる必要がある。

また、天体の微細な構造がどこまで細かく見えるのかを示す能力が**空間分解能** (spatial resolution) である。天体までの距離がわからなければ、見分けられる能力は、天体の構造を見込む角度で決まるので、**角分解能** (angular resolution) ともいう。空間分解能・角分解能は、望遠鏡の口径と観測波長の比で決まる。



0.1

図1 視力検査で用いるランドルト環。視力表から5m離れた位置から、直径7.5mmのランドルト環に空いた1.5mmの隙間がわかれば視力が1である。このとき、隙間を見込む角度は、 $0.017^\circ = 1$ 分角 ($1/60^\circ$)。すなわち、視力1とは1分角の角分解能に相当する。角分解能と視力は反比例していて、0.1分角の角分解能なら視力10になる。

■天体の測光観測と光度曲線

天体の明るさや色を定量的に測定する観測が**天体測光／測光観測** (photometry) である。測光観測を時間的に継続すると天体の明るさの時間変化がわかる。また、いくつかの波長帯で測光するとスペクトルの傾向がわかる。そのような天体の明るさの変化を時間の関数として表したものを**光度曲線** (light curve) と呼ぶ。

時間的な変化を細かく知るためには、高い**時間分解能** (time resolution) が必要になる。

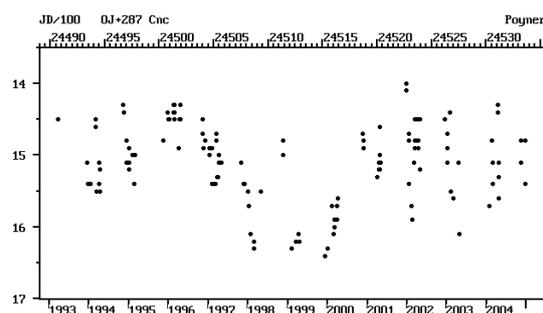


図2 とかげ座 BL 型銀河 OJ287 の光度曲線。横軸は時間 [年] で縦軸は等級。この活動銀河では約11年の周期の変光があり、巨大ブラックホール連星の公転周期と考えられている。

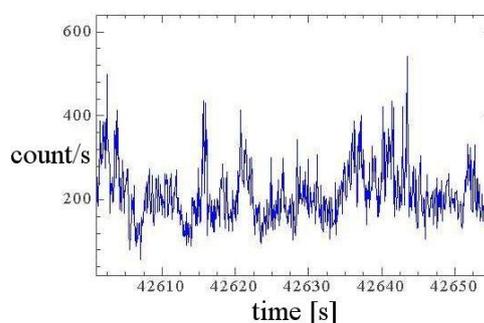


図3 はくちょう座 X-1 の X 線光度曲線。横軸は時間 [秒] で縦軸は X 線光子の個数。

■天体の分光観測とスペクトル図

天体の光を波長別に分けてスペクトルを求める観測が**天体分光／分光観測／スペクトル観測** (spectroscopy) がある。電磁波は、波長の長い方から、電波・赤外線・可視光・紫外線・X線・ガンマ線となり、また可視光の中では、長い波長から赤・橙・黄・緑・青・藍・紫と虹の七色に並ぶ。分光観測によって、天体の組成やガスの温度や運動状態など、天体の詳細な物理状態がわかる。ただし、分光観測では天体の光を波長別に分けてしまうため、測光観測よりも大量の光が必要なので、一般に、望遠鏡の口径を大きくしたり光の蓄積時間を長くしなければならない。

詳しいスペクトルを得るためには、高い**波長分解能／スペクトル分解能** (spectral resolution) が必要である。



図4 電磁波スペクトル。

また、分光とは違うが、光の波としての性質、とくにその偏り具合を調べる観測が**偏光観測** (polarimetry) である。偏光観測によって、天体周辺や光が伝わってくる途中の宙域における電場や磁場、ガスやダスト分布などの様子がわかる。

天体の光を分光したときに、光の強さを波長ごと（あるいは振動数／周波数ごと）に表したグラフを**スペクトル図** (spectral diagram) と呼ぶ。スペクトル図を用いると定量的な分析が可能になる。電波や赤外線の領域でも、可視光と同じく、横軸を光の波長（あるいは振動数／周波数）、縦軸を各波長（あるいは各振動数）での光の強さとして、スペクトル図を表す。エネルギーの高いX線の領域では、横軸には波長の代わりに光のエネルギーを取ることが多い。

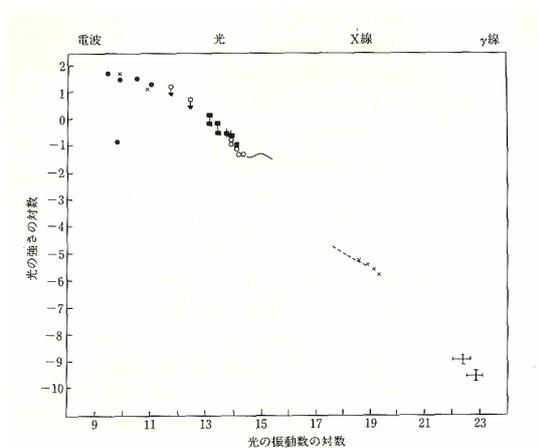


図5 ケーサー**3C273**のスペクトル図。

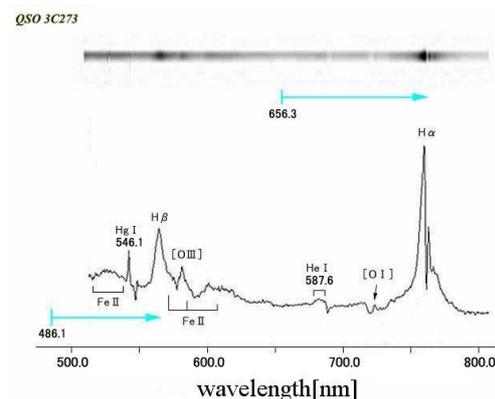


図6 ケーサー**3C273**の可視域スペクトル。水素バルマー線の一つ $H\alpha$ 線の実験室における波長は 656.3nm だが、ケーサー**3C273**のスペクトル上では $H\alpha$ 線は 760.0nm に位置している（赤方偏移）。

■連続スペクトルと線スペクトル

天体からやってくる光は、さまざまな波長の電磁波からなっている。そのスペクトル図を描くと結構デコボコがあるが、そのデコボコを除いた滑らかな成分を**連続スペクトル** (continuum, continuous spectrum) という。また連続スペクトルより上に飛び出ている部分を**輝線スペクトル** (emission line)、下に引っ込んだ部分を**吸収線スペクトル** (absorption line) と呼ぶ。実際のスペクトル上では、輝線はもちろん明るい線として見え、吸収線は暗線として見える。

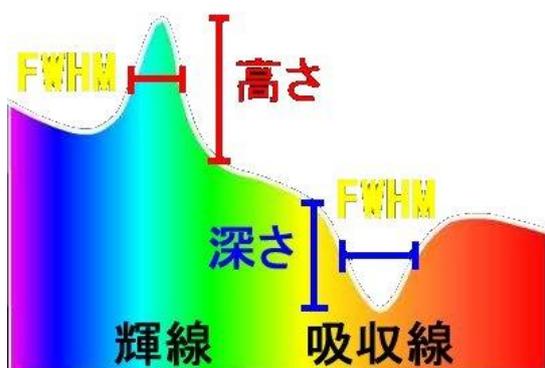


図7 スペクトル図の輝線と吸収線。

白熱電球や太陽の光などはさまざまな波長の光を含んでおり、比較的滑らかな連続スペクトルになる。またブラックホール周辺の降着円盤も連続スペクトルを放射している。

一方、星のスペクトルやクェーサーのスペクトルでは、ある特定の波長近傍でとくに光が強かったり弱かったりして、輝線スペクトルや吸収線スペクトルがみられる。惑星状星雲など希薄なガス雲もしばしば輝線スペクトルを放射する。

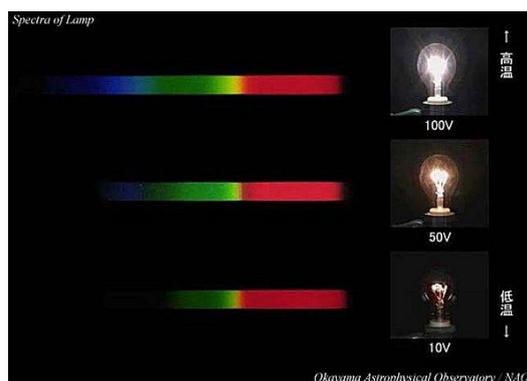


図8 白熱電球のスペクトル。連続スペクトルになっている。

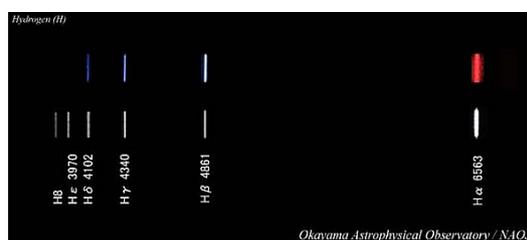


図9 水素のスペクトル。輝線スペクトルである。

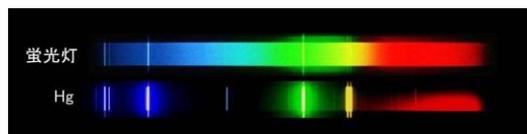


図10 蛍光灯と水銀放電管のスペクトル。蛍光灯には水銀が含まれていることがわかる。



図11 太陽のスペクトル。連続スペクトルに数多くの暗線がみられる。

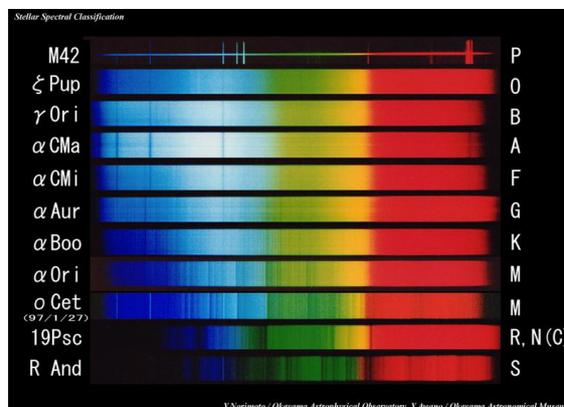


図12 さまざまな主系列星のスペクトル。

2 望遠鏡のしくみと性能

天体望遠鏡 (telescope) は天体の光を集めるための器械である。はるか宇宙の彼方から旅してきた光は、望遠鏡の焦点に集められて、そこに天体の像を結ぶ。その天体像を接眼鏡を通してみたり、受光装置で記録して調べることによって、宇宙の姿を垣間見ることができる。

■望遠鏡の構造

天体望遠鏡の役割は、天体からの光をできるだけたくさん集め (**集光**)、シャープな像を作り (**結像**)、そしてその像を大きくして見る (**拡大**) ことである。

一般的な望遠鏡は、光を集める**主鏡**を収めた**鏡筒**と、鏡筒を支える**架台**からできている。主鏡や鏡筒の光学系や架台には、いろいろなタイプがある。



図13 望遠鏡の構造

■屈折式と反射式

天体望遠鏡は、主鏡のタイプによって、大きく**屈折望遠鏡** (refractor) と**反射望遠鏡** (reflector) に分かれる。

屈折望遠鏡は、凸レンズを対物鏡として、それが作る実像を接眼鏡で拡大するものである。一方、反射望遠鏡は、回転放物面のできた凹面反射鏡を対物鏡としたものである。

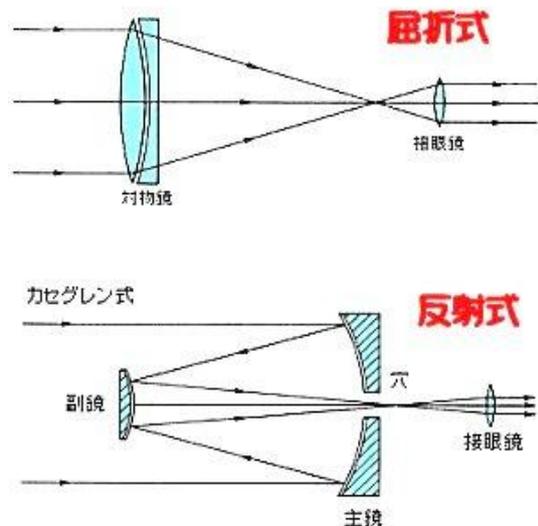


図14 屈折望遠鏡 (上) と反射望遠鏡 (下)。

屈折望遠鏡にせよ反射望遠鏡にせよ、光を集めるレンズあるいは凹面鏡のことを**主鏡** (primary mirror) と呼ぶ。また主鏡の直径を**口径** (diameter) という。口径が大きいほど、光を集める能力 (**集光力**) も細かい構造を見分ける能力 (**分解能**) も高くなるので、望遠鏡の性能はおおむね口径の大きさで決まる。

■赤道儀と経緯台

望遠鏡を乗せて天体を追いかける架台には、**赤道儀式**と**経緯台式**の2種類がある。赤道儀式では、地球の自転軸に平行な軸（**極軸**）とそれに直交する軸（**赤緯軸**）のまわりを動くようになっていて、極軸を回転させることによって天体の日周運動を追尾する。また極軸と赤緯軸を駆動することにより、空のあらゆる方向へ望遠鏡を向けることができる。経緯台式では、鉛直方向の軸と水平方向の軸のまわり動くようになっている。

後者の経緯台式の方が、天体を追尾するのは複雑になるが、鉛直軸と水平軸で支えるので機械的には安定である。天体の追尾はコンピュータで制御できるようになったので、最近の大口径望遠鏡では、安定な経緯台がよく使われている。

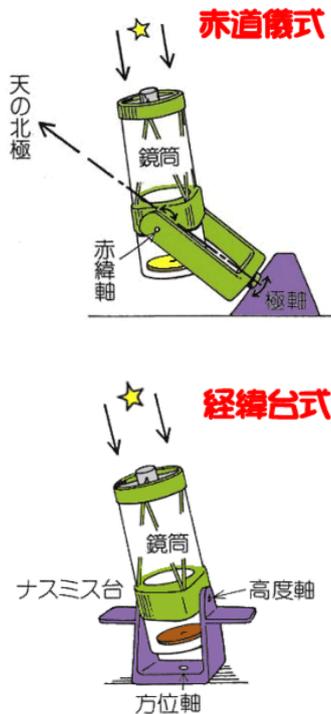


図 15 赤道儀式望遠鏡(上)と経緯台式望遠鏡(下)。

■望遠鏡の分解能

空間的に見かけ上ある角度離れた2点を見分ける能力を、分解能（空間分解能とか角分解能）と呼ぶ。

肉眼の分解能は角度にして1′（1分角）程度である（視力で1ぐらい）。一方、ガリレオの望遠鏡（口径2.5cm）でさえ、その分解能は肉眼の20倍もあった（視力で20ぐらい）。たとえば、月は見かけの直径が30′（=0.5°）ほどなので、肉眼では、月の直径の30分の1（約100km）ぐらいのもの、すなわち月の山や海のような模様がわかる程度だ。しかしガリレオの望遠鏡（～肉眼の20倍）なら、5kmぐらいのもの、すなわち大きなクレーターが見えたのである。

望遠鏡の分解能 θ （ラジアン）は、観測波長 λ に比例し望遠鏡の口径 D に反比例する：

$$\theta \sim \lambda / D$$

たとえば可視光の波長を600nmとすると、

$$D=0.7\text{cm (瞳の直径)}$$

$$\theta \sim 0.3' \quad (\text{視力 } 3)$$

$$D=2.5\text{cm (ガリレオの望遠鏡)}$$

$$\theta \sim 5'' \quad (\text{視力 } 12)$$

$$D=10\text{cm (小型望遠鏡)}$$

$$\theta \sim 1'' \quad (\text{視力 } 60)$$

$$D=51\text{cm (大阪教育大学望遠鏡)}$$

$$\theta \sim 0.24'' \quad (\text{視力 } 250)$$

$$D=8\text{m (すばる望遠鏡)}$$

$$\theta \sim 0.016'' \quad (\text{視力 } 4000!)$$

のようになる。ただし、上記の値は理想的な場合であって、さまざまな要因によって、実際の分解能は悪くなる。とくに地上から観測する場合は、特殊な補正をしない限り、大気のゆらぎなどの影響で望遠鏡の分解能は0.1″（秒角）ぐらいが限度である。

3 光検出と CCD 受光器

本格的な天体観測では、望遠鏡の焦点にできた天体の像を **観測装置** で受け、データとして記録し、定量的な解析をする。観測装置には、**撮像カメラ**、**測光器**、**分光器** などがある。現在では、観測データはデジタル化されて電子記録媒体に保存され、解析プログラムなどを用いて、位置や明るさを精密に測るなどの整約処理が行われた後、天体を解き明かす情報へと生まれ変わる。

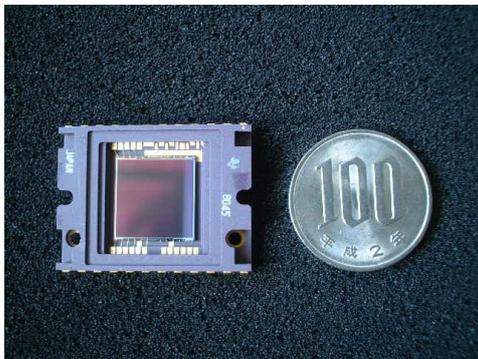


図 16 CCD 素子 (『宇宙スペクトル博物館』)。



図 17 冷却 CCD カメラ。

■CCD 受光器

望遠鏡で集めた光を検出するには、伝統的な写真術と、近年開発され、現在では写真にほぼ取って変わった感のある CCD など固体画像素子がある。

現在では、デジタルカメラや携帯電話にも使われている電荷結合素子 CCD は、光電効果を利用して入射した光を電子に変えて貯める半導体素子である。CCD の基本的な構造は、石英 SiO_2 などの絶縁層を、ポリシリコンなど透明度のよいもので作った電極とシリコン Si のベースでサンドイッチしたものである。シリコンベースの上には、大きさが 10 ないし 20 ミクロン程度の電氣的に仕切られた多数の微小区画 (ピクセル) ができていて、これが一つの素子となる。ここに光子が入射すると、光子は電極と絶縁層を素通りしてシリコンベースに入る。そしてそこで光電効果により、シリコンから光電子が飛び出す。光電子はプラスの電圧をかけられた電極に集まるが、電極はシリコンと絶縁されているので、光電子は電極に流れ込まずにシリコンの表面の各ピクセルに溜まっていく。溜った電子を一定の方式で移動させて外部で読み取り、コンピュータで CCD 上の各ピクセルごとの量を計測して、天体の画像として再現し記録する。

■CCD 受光器の性能

光検出器の性能を示すものに、量子効率、波長感度、そしてダイナミックレンジと呼ばれるものがある。すべてにおいて、CCD は写真より優れている。

まず、入射してきた光子のうち、実際に信号として有効に記録される光子の割合を**量子効率** (quantum efficiency) という。入射した光子の数と受光器が出力する電子の数との比、あるいは写真上の銀粒子の数との比といってもよい。もちろん量子効率が大きい方がいいのはあきらかだ。肉眼の量子効率は 1%以下である。写真乾板の量子効率は、たかだか数%である。光電管の場合、量子効率は 10%程度になる。一方、CCD はきわめて量子効率が高く、70%ないし 90%にも達する。

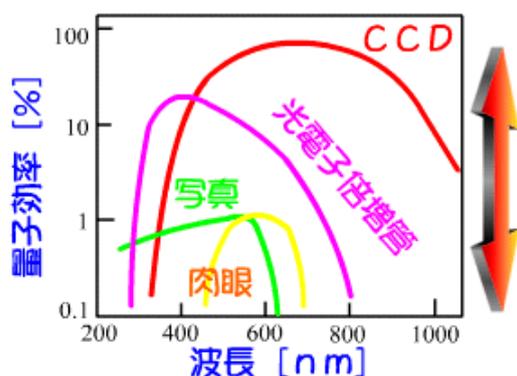


図 18 量子効率と波長感度特性。

天体からの光を受光器で検出するとき、受光器はすべての波長の光に反応するのではなく、ある限られた波長域の光にのみ反応する。そのときの波長ごとの感度を**波長感度特性** (spectral sensitivity) という。たとえば、肉眼は黄色から緑色の光にもっともよく感じる。写真乾板は 300nm から 700nm ぐらいの青い光をよく感じる。一方、CCD は青から近赤外まで (400nm~900nm) 伸びた、広い波長感度を有している。最近では紫外線や X 線領域にも感度をもつ CCD も開発されている。

さらに、検出器で測定する光の強さの

最大値と最小値の比を**ダイナミックレンジ** (dynamic range) という。最小値は検出器のノイズによって決まり、最大値は強い光をあてたときの飽和現象によって定まる。ダイナミックレンジが大きいと、たとえば、等級差の大きな天体を同時に観測できる。写真のダイナミックレンジは、せいぜい 100 程度だが、CCD のダイナミックレンジは 10 万から 100 万にも達する。しかも、CCD の場合、露光と信号の出力の間には単純な比例関係が成り立つので (直線性がよい)、データ処理が非常に容易になっている。

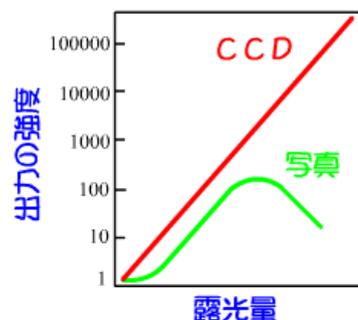


図 19 ダイナミックレンジ。横軸は露光量 (受光した光の量) で、縦軸は出力の強度 (写真の黒みや電気信号として記録された量)。



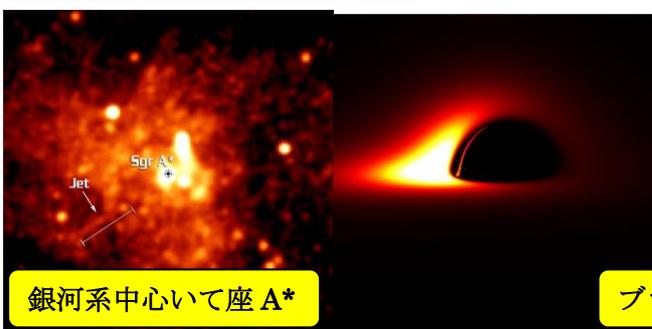
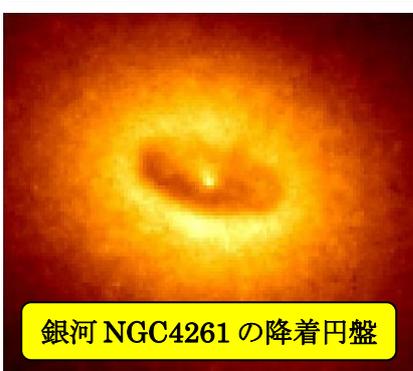
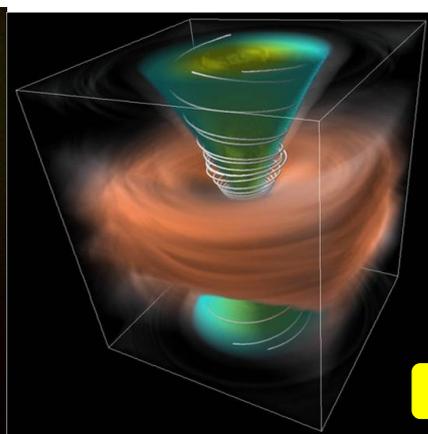
図 20 口径 51cm の反射望遠鏡 (大阪教育大学)。

参考文献

福江 純他『天文マニア養成マニュアル』恒星社
厚生閣

ブラックホール活動天体の理論

- 1 ブラックホール降着円盤
- 2 ブラックホールジェット
- 3 ドップラー効果と光行差



大阪教育大学 天文学研究室

1 ブラックホール降着円盤

■天体活動を引き起こす降着円盤

質量をもった天体のまわりに周辺からガスが降ってきたとき、ガスはしばしば天体を中心として回転しながら円盤状に降り積もり、摩擦/粘性を通じて重力エネルギーを解放して、光輝くようになる。このようなガス円盤を**降着円盤** (accretion disk) と呼んでいる。X線星や活動銀河中心核のブラックホールの周りにも降着円盤が渦巻いている。

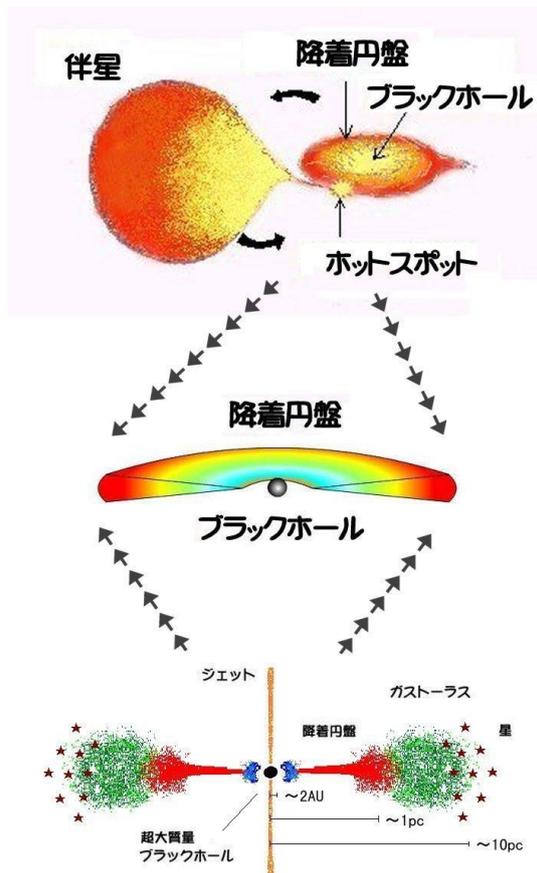


図1 近接連星(上)や活動銀河中心核(下)など、さまざまな天体における降着円盤(中)の活動。天体の種類はまったく違っても、降着円盤の仕組みは共通である。

■降着円盤の基本的描像

降着円盤は、一般に電離した水素ガスからできていて、薄い円盤状で不透明であり、直感的には平たい星のようなものだ。

ガスは降着円盤の中を、太陽系の惑星のように、中心ほど速い回転速度で回っている。ただし、惑星と異なり、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、ガスは円盤内を少しずつブラックホールへ向けて落下する。さらにガス同士が擦れあって、ガスは激しく加熱される。その結果、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。

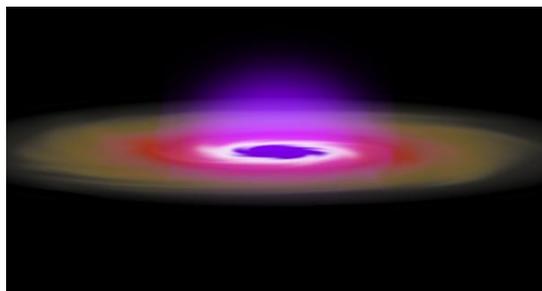
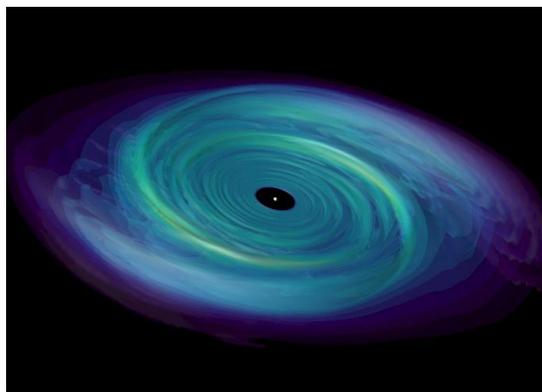


図2 ブラックホール降着円盤の想像図。

■降着円盤の基本的パラメータ

このような降着円盤の性質を特徴付ける主要な要素が、**ブラックホールの質量 M** と単位時間当たりに降ってくるガスの量を表す **質量降着率 N** である。前者はダム落差に相当する重力勾配を作り、後者はダムへの降水量に相当する燃料供給率である。また円盤状の天体なので、**見る方向**（角度）も重要な要素の一つである。

X 線星やマイクロクェーサーにおける典型的な恒星ブラックホールの場合、

質量 $M=10$ 太陽質量

質量降着率 $N=1.4 \times 10^{18}$ g/s

程度である。

また活動銀河やクェーサーにおける超巨大ブラックホールの場合、

質量 $M=10^8$ 太陽質量

質量降着率 $N=1.4 \times 10^{25}$ g/s

$=10^8$ 太陽質量/年

程度にもなる。

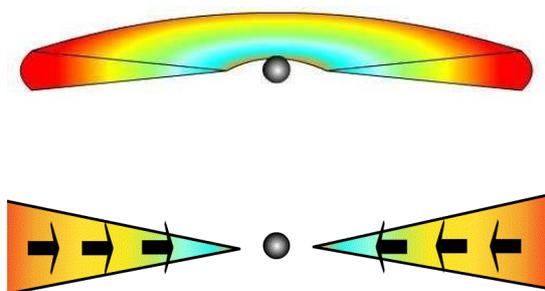


図3 ブラックホール降着円盤の構造。ブラックホール（黒っぽい球）のまわりに薄いガス円盤が渦巻いている。ガスは回転しながら少しずつブラックホールへ落ちていく。円盤のガスは内側ほど温度が高い。なお、ブラックホールのすぐ近くでは、ブラックホールの強い重力のためにガス円盤が存在できない領域がある。そのため、ブラックホールの半径の3倍のところに円盤の内縁がある。

■降着円盤の表面温度分布

星は球状の天体なので、表面の温度はほぼどこでも一様で、太陽だったらほぼ6000Kである。しかし降着円盤の**表面温度**は一様ではなく、中心近傍ほど温度が高い。

降着円盤では、ガス同士の摩擦によって解放された重力エネルギーは、ガスの熱エネルギーに変換し、最終的には、降着円盤の表面から放射エネルギーとして放射される。ブラックホールが作る重力勾配は中心ほど大きくなるので、単位体積あたりのエネルギー解放も中心ほど大きく、円盤ガスの温度も中心に近づくほど高くなるのだ。

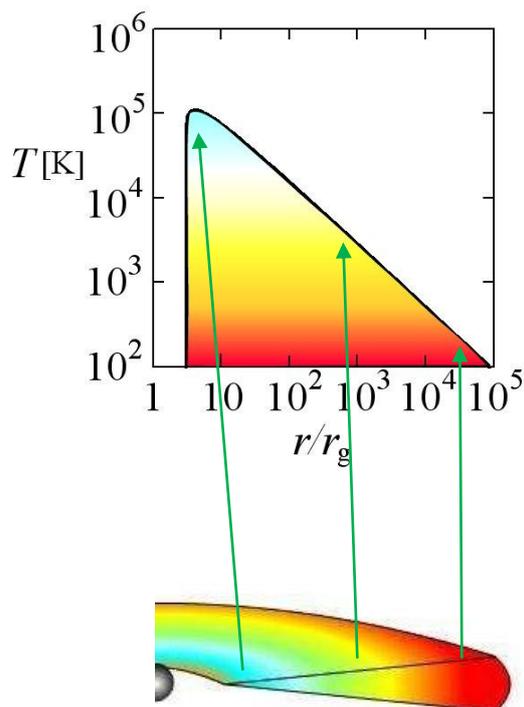


図4 降着円盤の表面温度分布。横軸はシュバルツシルト半径を単位とした中心からの距離で、縦軸は絶対温度で表した表面温度（ともに対数）。中心ほど温度が高く周辺に行くほど温度が低い。中心のブラックホールの質量は1億太陽質量で、質量降着率は1億太陽質量/年の場合。

■降着円盤の放射スペクトル

降着円盤の表面は、ほぼ黒体放射をしているが、円盤の表面温度は場所（半径）によって異なるために、円盤全体から放射されるスペクトルは単純な黒体放射スペクトルとは異なったものになる。さまざまな場所（半径）から放射された、それぞれの場所（半径）での温度に相当する黒体放射スペクトルを足し合わせたものになるからだ。これを**円盤黒体放射**（disk blackbody）と呼んでいる。円盤黒体放射は、一般的に、単一温度の黒体放射を左右に引き延ばしたようなスペクトルになる。

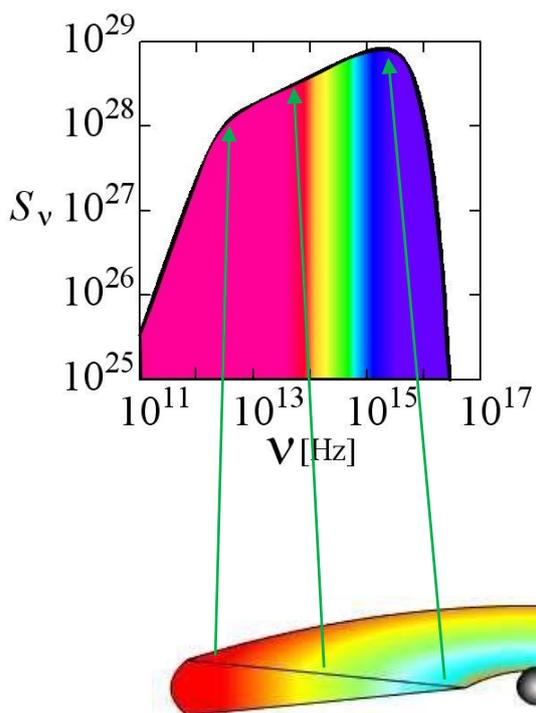


図5 降着円盤の放射スペクトル。横軸は Hz で表した振動数で、縦軸は放射の強度（ともに対数）。中心の高温領域からは振動数の高い放射が出て、周辺に行くほど低温になり放射の振動数も低くなる。中心のブラックホールの質量は 1 億太陽質量で、質量降着率は 1 億太陽質量/年の場合。

■降着円盤の光度

円盤の表面温度分布が決まり、円盤表面が各場所（半径）でその温度の黒体放射を出していると仮定すれば、円盤表面から単位時間単位面積あたりに放射されるエネルギーを計算することができる。そしてそれを円盤表面全体にわたって足し合わせれば、降着円盤全体から単位時間あたりに放射されるエネルギー、すなわち円盤の**光度**（luminosity）が得られる。

典型的なパラメータの場合で計算すると、X 線星やマイクロクェーサーの場合は、

$$\text{光度 } L = 1.3 \times 10^{32} \text{ W}$$

活動銀河やクェーサーの場合、

$$\text{光度 } L = 1.3 \times 10^{39} \text{ W}$$

ぐらいになり、ブラックホール活動天体の明るさを説明できる。

この標準円盤の光度は、典型的な活動銀河の光度を十分に説明できる。

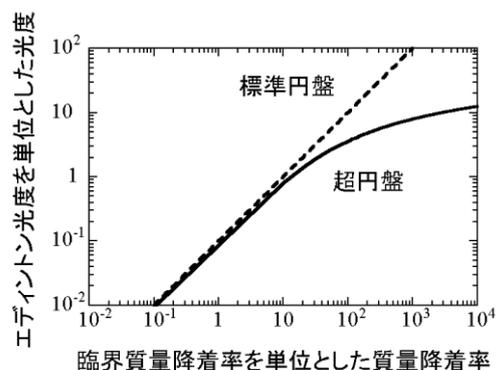


図6 降着円盤の光度。横軸はある臨界量を単位とした質量降着率で、縦軸はある臨界量を単位とした光度。通常の状態（破線）では、質量降着率に比例して降着円盤の光度は大きくなる。ただし、あまり質量降着率が大きくなると（実線）、降り積もってきたガスの重力エネルギーを放射に変換する効率が悪くなり、光度は押さえられ気味になる。

2 ブラックホールジェット

■ブラックホールジェット

電波・可視光・X線による観測で明らかにされたように、ブラックホール活動天体の中心からは、しばしば双方向に細長く伸びたプラズマガスの噴流—**宇宙ジェット**—が吹き出している。宇宙ジェットの根元はブラックホールのごく中心部にあり、その速度は場合によっては光速のオーダーにも達している。この高エネルギープラズマの噴流を**ブラックホールジェット** (blackhole jet) と呼ぶ。

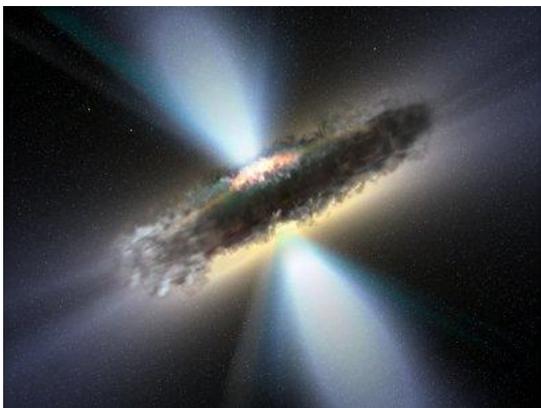
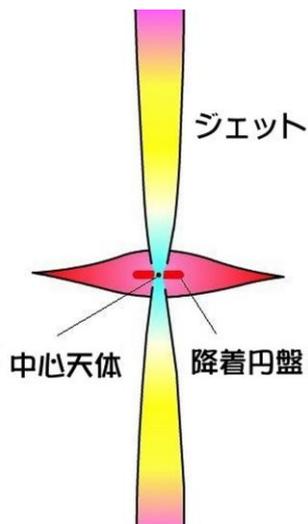


図7 ブラックホールジェットの模式図(上)と想像図(下)。

■ドップラーブースト

たとえば、ブラックホール近傍から吹き出したプラズマガス—宇宙ジェット—を正面方向から観測すると、ジェットのガスは観測者に対して高速で近づいてくる。このとき、ジェットから放射される光は、ドップラー効果によって波長が短くなるとともにエネルギーが高くなる。

また同時に、光行差のために光は前方方向へ集束される。たとえば、光源と一緒に運動している観測者からみて光が等方的に放射されているとしても、静止した観測者からみれば光は光源と共に移動しているように見え、結果として、光束は前方へ集中することになる。

これらの両方の結果が合わさって、ジェットの観測される明るさは本来の明るさよりも非常に明るくなる。このような相対論的効果を**ドップラーブースト** (Doppler boost) とか**相対論的ビーミング** (relativistic beaming) 呼ぶことがある。

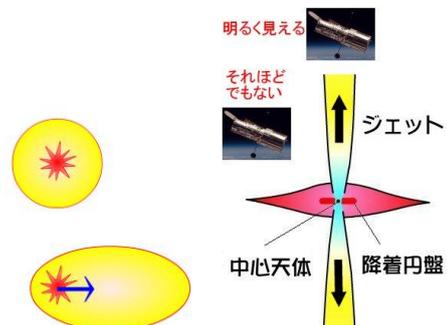


図8 ドップラーブースト。亜光速で運動するプラズマから出た光は、前方へ集束されると同時に、エネルギーが高くなる(左)。ブラックホールジェットを正面から観測すると明るく見える(右)。

■黒体放射の強度と温度

光を放射している天体プラズマが観測者に対して運動していると、ドップラーブーストの結果、観測される明るさや見かけの温度が変化して見える。

プラズマガスが黒体放射をしているとき、もともと放射された強度 B と観測される放射強度 B_{obs} 、および本来の温度 T と観測される温度 T_{obs} の間には、以下の関係がある。

$$B_{obs} = \frac{B}{(1+z)^4} = \frac{B}{[\gamma(1-\beta\cos\theta)]^4}$$

$$T_{obs} = \frac{T}{(1+z)} = \frac{T}{\gamma(1-\beta\cos\theta)}$$

ここで $\beta = v/c$ は光速を単位としたガスの速度、 θ はガスと観測者の視線方向のなす角度、そして $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ はローレンツ因子である。

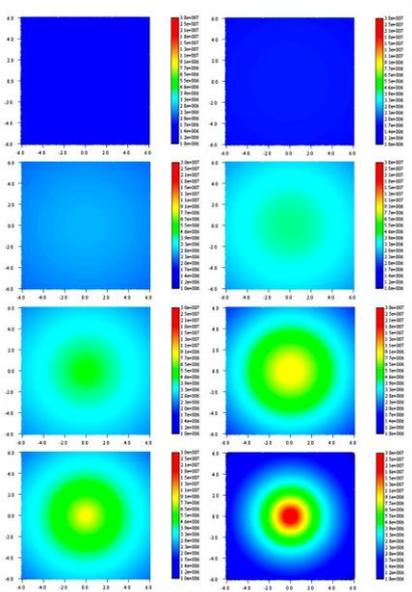


図9 ブラックホールジェットの見え方。右側がプラズマから放射される黒体放射の温度分布で、上から、速度が光速の20%、40%、60%、80%の場合。速度が大きくなるほど、光束が前方へ（手前）へ集束され、中央部がどんどん明るくなっている。

■ブラックホールジェットの起源と加速

ブラックホールの近傍からプラズマガスを光速近くまで加速するメカニズムには、放射圧加速と磁気力加速がある。

ブラックホールのまわりには周囲からガスが降り積もり、光り輝く降着円盤が形成されている。**放射圧加速モデル** (radiative acceleration) では、降着円盤から放射される光の圧力でプラズマガスを加速する。

一方、電離したプラズマガスでできた降着円盤には磁力線も存在している。**磁気力加速モデル** (magnetic acceleration) では、強く巻き込まれた磁場の力によってプラズマガスを加速する。

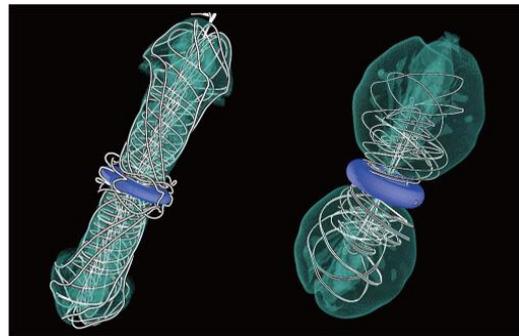
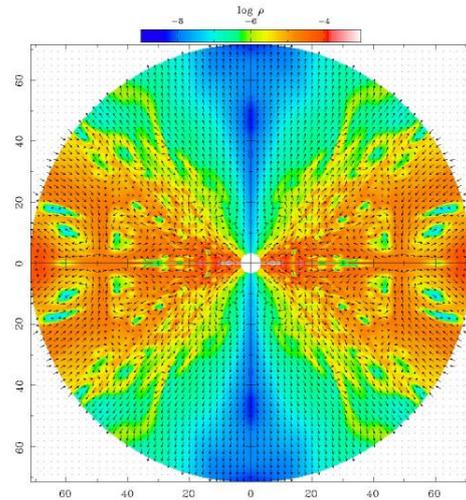


図10 放射圧加速モデルの数値シミュレーション例（上）と磁気力加速モデルの数値シミュレーション例（下）。

3 ドップラー効果と光行差

■光のドップラー効果

天体からやってくる光も波の一種なので、音のドップラー効果と似た現象が起こる。すなわち、光を出す天体（星やガス）が観測者（地球）から遠ざかるように運動しているときには、観測される波長がもとの波長より長くなり（赤方偏移）、逆に、近づくように運動しているときには、短くなる（青方偏移）。光源と観測者の間の相対運動によって、観測される光の波長（振動数）が実験室で測定されるものとずれる現象を、**光のドップラー効果** (Doppler effect) と呼ぶ。

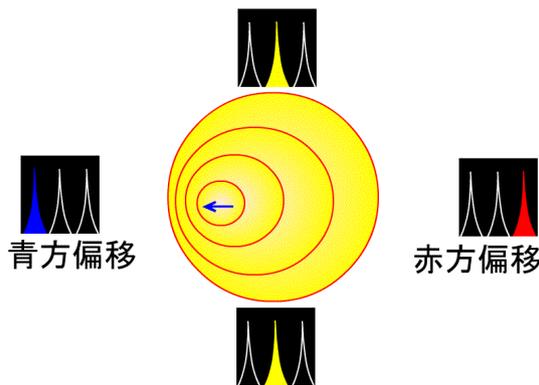


図 11 光のドップラー効果。

さらに光のエネルギーは振動数に比例するので、青方偏移すれば光のエネルギーが増加して明るくなり、赤方偏移ではエネルギーが減少して暗くなる。これは**相対論的なドップラー効果**で、ドップラーブースト／相対論的ビーミングが起こる原因である。

ドップラー効果の度合いは、光源の速度の大きさ v と運動方向 θ に依存して変わる。ドップラー効果の度合いを表す目安として、観測される振動数 ν ともとの振動数 ν_0 の比率で定義される **ドップラー因子** (Doppler factor) δ を用いる。

$$\delta = \frac{\nu}{\nu_0} = \frac{1}{1+z} = \frac{1}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)}$$

ここで $\gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2}$ は **ローレンツ因子** (Lorentz factor) と呼ばれる。

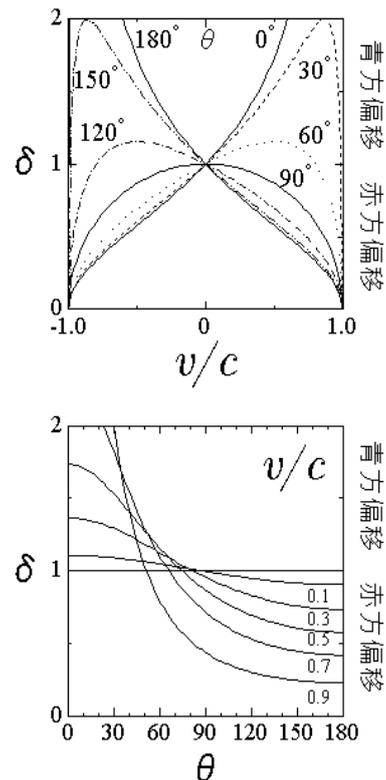


図 12 ドップラー因子 δ 。(上) 角度 θ をいろいろ与えたとき、速度 v の関数としてドップラー因子 δ の値。(下) 速度 v を与えたときの、角度 θ の関数としてドップラー因子 δ の値。

■光行差

雨の中を傘をさして歩いているとき、立ち止まっていれば雨が真上から降っている場合でも、歩いたり走ったりすれば、濡れないようにするためには傘を前方に傾けて歩かなければならない。

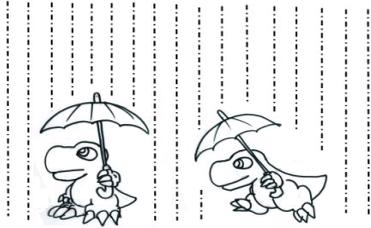


図 13 雨のお散歩。

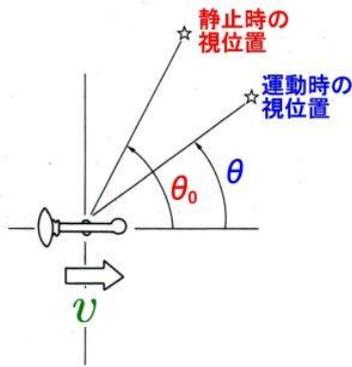


図 14 光行差。

光でも同じようなことが起こる。

たとえば宇宙空間を高速で飛翔している宇宙船から、ある方向に見える天体を観測したとき、光速が無敵大なら天体の見える方向は常に同じ方向にみえる。しかし光速は非常に大きいとはいえ有限なので、光の到来ベクトルは観測者の運動ベクトルの分だけずれてしまい、天体の見える方向は(本来の方向よりも)宇宙船の運動方向前方に少し移動して見える。このような、運動している宇宙船から見た天体の視位置が、静止しているときの視位置に比べ、宇宙船の

進行方向前方に移動して見える現象を**光行差**(aberration)という。

速度を v 、静止しているときの前方方向から測った星の視位置の角度を θ_0 、運動しているときの視位置を θ としよう。このとき、光行差による見かけの位置は、

$$\cos\theta = \frac{\cos\theta_0 + \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}\cos\theta_0}$$

で与えられる。ただしこれらの式で、 $\beta = v/c$ は光速を単位とした速度であり、 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ はローレンツ因子である。

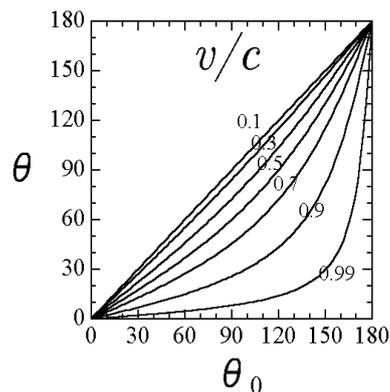


図 15 最初の到来方向 θ_0 と観測される到来方向 θ の関係。速度 v が 0 なら $\theta = \theta_0$ だが、 v が大きくなるにつれ θ は θ_0 より小さく観測される。

参考文献

- 福江 純『アインシュタインの宿題』光文社知恵の森文庫
- 福江 純『ブラックホールは怖くない?』恒星社厚生閣
- 福江 純『輝くブラックホール降着円盤』プレアデス出版