



ブラックホール活動天体

- 活動銀河とクェーサー ☆ **モンスターブラックホール**
- X線星とマイクロクェーサー ☆ **ブラックホール連星**
- ガンマ線バースト ☆ **宇宙最大の爆発現象**
- ブラックホールエンジン** ☆ エネルギー源の正体
 - ブラックホールエンジンの提唱
 - 降着円盤 (アクリーションディスク)
 - ブラックホール
- ブラックホールシャドー** ☆ 見えないモノを見る
 - 光る衣を纏ったブラックホールのシルエット
 - 光る薄衣を纏ったブラックホールのシャドー (影)
- ブラックホールジェット** ☆ 黒い穴からのプラズマ噴流
 - 光学的厚みとガス体 (雲) の "表面"
 - ブラックホール風の見え方

2010/5/22 ブラックホール活動天体 2



ブラックホールエンジンの提唱

観測

- 1918年 変光星 "M31の左の天" (Curtis)
- 1963年 クェーサー 3C273 (ガイム)
- 1978年 超新星 SS418の発見 (Margon)
- 1994年 噴霧 マイクロクェーサーの識別 (Mirabel)
- 1997年 ガンマ線バーストの観測 (BeppoSAX)

理論

- 1969年 超巨大ブラックホールの提唱 (Lynden-Bell)
- 1973年 標準降着円盤モデルの構築 (Shakura and Sunyaev)
- 1986年 ファイアボールモデルの提案 (Paczynski)

リンデンベル

スニアエフ @ 2006年12月

オートの

コトイ

2010/5/22 ブラックホール活動天体 4

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

- ダムが落差を作る
- 水が燃料になる
- 落差を落ちて発電

宇宙の重力発電所

- BHが落差を作る
- 水素ガスが燃料になる
- 落下でエネルギー発生

2010/5/22 ブラックホール活動天体

ブラックホール

11.2km/s

300000km/s

- ニュートン力学
 - 天体の脱出速度が光速を超えてしまい、光でさえ出て来られなくなった天体。
- 一般相対論
 - 天体の重力が強すぎて空間の曲がりが大きくなり、光でさえ空間の曲がりの中に閉じ込められるようになった天体。

2010/5/22 ブラックホール活動天体

ブラックホールの構造

- 事象の地平面(ブラックホールの境界面)
- 特異点

事象の地平面
特異点

シュバルツシルト解

たとえば、河を流る舟に向かって流されている状態を思い浮かべてみると、水中に流る舟は流れている人にとっては、どの場所でも周囲は水(空間)であって、どこからが流(事象の地平面)だという認識があるわけがない。後流りや逆流になっているに気づいたときには舟がすでに流、激流(特異点)に落ちかかきまわらざるを得ないのである。

シュバルツシルト・ブラックホールの内部に入ると、その中心では重力の強度が無大になり、そこは「特異点(singularity)」と呼ばれている。特異点では古典的な一般相対論は破綻するため、量子重力あるいは新しい物理学を考えなければならない。この特異点は非特異点の重力の電磁気、争いこそが(事象の地平面)の彼方にあるために、この面に届きはしないようだ。

では、特異点と事象の地平面の間には何が流れるのか？ 流は何もない、いや正確に言えば、時間と空間(質量)と多少のエネルギーはあるだろうが、流としては何もないと言えるだろう。つまり、シュワルツシルト・ブラックホールは、絶望や大絶望なほどに非特異点、非特異点、おそくは宇宙の中でもっとも単純な天体である。

宇宙で一番単純な天体

10/10/22 ブラックホール活動天体

ドップラー効果

- 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。

光源
観測者

ドップラー効果の直交性は、光源の速度と観測方向に依存する。ドップラー効果の度合いを計算する目安として、観測される振動数と元の振動数の比率で定義されるドップラー因子(Doppler factor)を用いる。 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ (βはローレンツ因子である。)

$$\delta = \frac{\nu}{\nu_0} = \frac{1}{1+z} = \frac{1}{\gamma(1-\beta \cos\theta)}$$

角速度のいろいろあるとき、星々の運動としてドップラー因子の値。

11

光線の曲がり

- 重力場中で光線が曲がる現象を光線の曲がり(light bending)と呼ぶ。

ブラックホール
観測者

観測者
ブラックホール

観測するエレベータの中で、光線は曲がって見える。

12

降着円盤

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

黄色～赤電波画像
高温プラズマジェット

Ground Based Optical/Radio Image

HST Image of a Gas and Dust Disk

HST Image of a Gas and Dust Disk

中心部の拡大画像
主に星の光

380 Arc Seconds 88000 光年 17 Arc Seconds 400 光年

降着円盤

- 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、重力天体に周囲から降り積もったガスによって、重力天体のまわりに形成された回転ガス円盤を降着円盤(accretion disk)と呼ぶ。
- 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こなし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。

11

標準降着円盤 定性的描像

- 幾何学的に薄い: 平ら
- 光学的に厚い: 不透明

平坦な星

ブラックホール降着円盤の描像。
中心近傍ほど重力が高い。

- ケプラー回転
- 粘性: 角運動量輸送
- 粘性: 加熱

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、直線的には平たいほどと考えることができる。

ガスは降着円盤の中で、太陽系の衛星のように、中心ほど速い軌道速度で回っている。

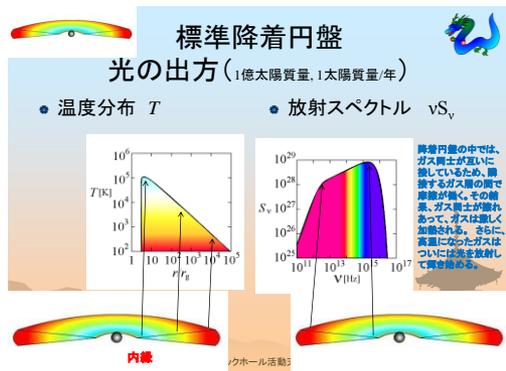
降着円盤の中では、ガス同士が互いに摩擦しているため、隣接するガス層の間で摩擦が働く。その結果、ガス同士が磨かれあって、ガスは強く加熱される。さらに、高温になったガスはついには光を放射して再び冷める。

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原因だ。このエネルギーは、中心のブラックホールなどに留まって、ガスが持っている位置エネルギー(重力エネルギー)である。つまり、降着円盤に落ちるブラックホールや中性子星が、その重力降着円盤の存在で非常に明るい天体に変身し、観測可能なものになるのだ。

ブラックホール活動天体

$$r_{in} \cong r_{ms} = 3r_g$$

12



ブラックホールシャドー

闇夜のカラスを見る方法

- 闇夜のカラスを見る方法
- ブラックホールは光でさえ出でられない天体だ。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ー (black hole shadow)**と呼ぶことがある。

ブラックホールのシルエット、見る角度が違う。

ブラックホール活動天体 15

歪むシャドー

回転のみ 何もなし

重力のみ 全部

ドップラー効果
光線の曲がり

ブラックホール=降着円盤の影が見える理由は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ピンを回転しているため、事前に遠く側のガスから出た光は非常に遅められる(右図の上)。その結果、円盤の影は歪んで見える(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、光線が曲がられる(右図の下)。その結果、円盤の影は同じ角度で輝き上がったように見える(左図の下)。これらの効果は合わさって、いろいろなシルエットになる。

標準円盤
内縁円盤

ブラックホール活動天体 16

シャドーあれこれ

傾角
90°
20°
10°
0°

ブラックホール活動天体

カー・ブラックホールのシャドー

標準円盤中で回転していないブラックホール

標準円盤中で最大回転するブラックホール

(c: K高橋)

2010/5/22 ブラックホール活動天体 18

薄衣で着膨れているとき

回転していないブラックホール 最大回転するブラックホール

(c:R高橋)

2010/5/22 ブラックホール活動天体 19

ブラックホールシャドー まとめ

- 見えないはずのブラックホールを“見る”方法がある
- シャドー(影)の形によって、ブラックホール時空の性質がわかる
- 光る衣の様子によって、ブラックホール降着円盤の性質がわかる

2010/5/22 ブラックホール活動天体 20



宇宙ジェット

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image HST Image of a Gas and Dust Disk

黄色～赤電波画像
高温プラズマジェット

中心部の拡大画像
可視光
主に星の光

380 Arc Seconds 88000光年
17 Arc Seconds 400光年

亜光速宇宙ジェット

宇宙ジェット (astrophysical jets)

中心の天体から双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの流れ

- (原始星)
- 特異星SS 433
- マイクロクェーサー
- 活動銀河
- クェーサー
- ガンマ線バースト

YSO SS433 M87 GRS1915 3C273 GRB

2010/5/22 ブラックホール

ブラックホールジェット

胃袋は無限だが喉元は有限

BHの胃袋は底なし
BHの喉元は有限
吸い込みきれないものを吐き出す→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。
- 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。
- 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現象に伴って現れる**普遍的な現象**だと思われるようになってきている。

2天文単位

2010/5/22 ブラックホール活動天体 24

ジェットの作り方1 磁場

- 磁場の力で駆動する

2010/5/22 ブラックホール活動天体 25 Y. Kato

ジェットの作り方2 放射

- 光の圧力で駆動する

2010/5/22 ブラックホール活動天体 26 K. Ohgusa

天体は“見た目”が10割

- 相対論的風(アウトフロー)
 - アウトフローが光学的に厚い
 - 見かけ上の“光球(photosphere)”
- 光の伝播への相対論的効果
 - 光行差
 - ドップラー効果
 - 重力赤方偏移
 - 光線の彎曲

2010/5/22 ブラックホール活動天体 27

ブラックホールジェットの“見た目”

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、ドップラー効果のために、観測される明るさや見かけの位置が変化して見える。
 たとえば、ブラックホール吸積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(エネルギーが高くなる)ため、また同時に、光行差のために光は前方方向へ集束される。これらの両方の効果が合わさって、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)と呼ぶことがある。

2010/5/22 ブラックホール活動天体 28

雲—ガス体—の“見た目”

- 半透明なガス体の表面はどこか?
- 背後から光が透け出てくるときは?
- ドコで反射するのか
- ドコで透過するのか
- ガスの密度分布や温度分布によって見える場所(深さ)は違う

08ASJ

ガス体や雲の“表面”

- 晴れた日には数km先まで見えるが霧が濃いときには1m先ぐらいいまでしか見えないこともある。星間空間では何万光年も彼方の星が見えるが、太陽内部では0.5cm先ぐらいいまでしか見えない。
- ガス体は半透明で、温度などの状況によって見える深さ(場所)も違う。

雨の日
 黄砂の日

2010/5/22 ブラックホール活動天体 30