

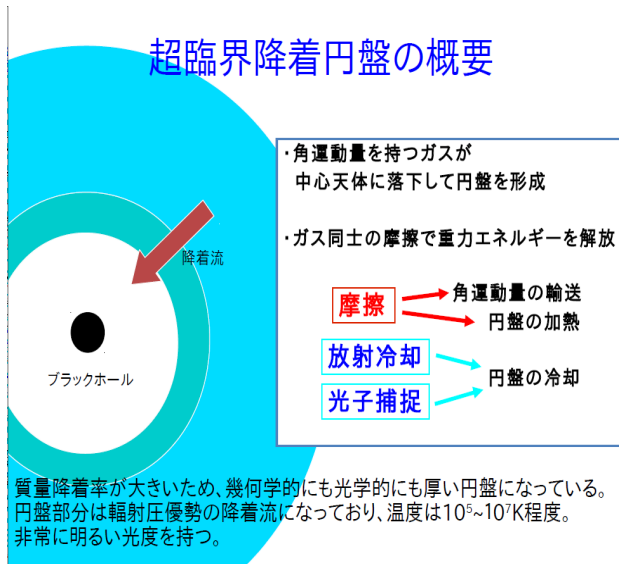
ブラックホール降着流における衝撃波加熱領域の形成

2011 年 8 月 26 日

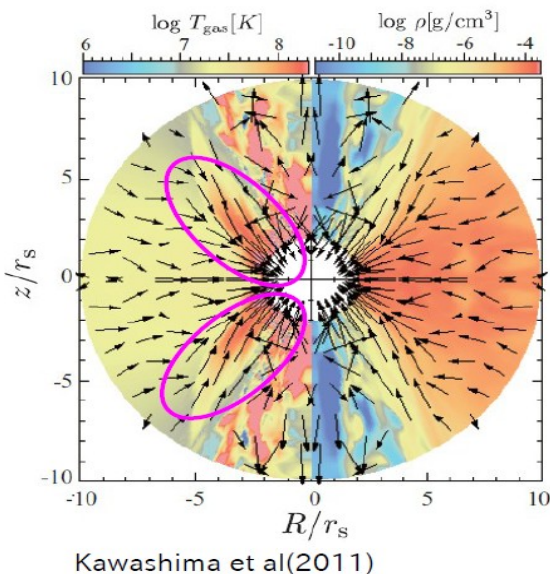
千葉大学大学院理学研究科

小野 貴史

ブラックホール候補天体では、硬 X 線領域でべき成分を持つ放射スペクトルが観測されることがある。このことから、逆コンプトン散乱が生じるような高温プラズマの存在が示唆されるが、その詳細な生成機構については未だ解明されていない。Kawashima et al.(2011)は超臨界降着流の放射流体シミュレーションを行った結果、中心から数シュバルツシルト半径付近に衝撃波加熱領域が形成されていることを見出した。このような衝撃波加熱領域がどのような場合に形成されるかを明らかにすることは重要な課題である。そこで現在、放射と物質の相互作用を無視する近似のもとでブラックホール降着流の研究に取りかかっている。角運動量輸送機構としては α 粘性を仮定し、ブラックホール近傍の構造に焦点を当てる。

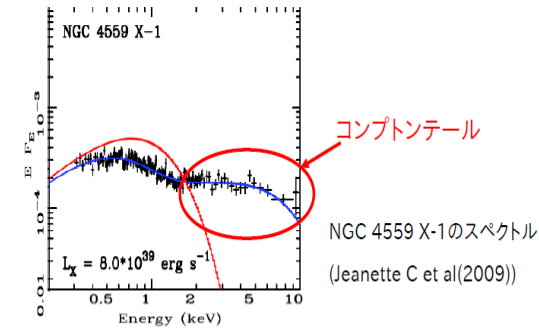


Kawashima et al.(2011)は超臨界降着流の放射流体シミュレーションを行った結果、ブラックホール近傍に衝撃波加熱領域の発生を確認している。超臨界降着流は超大光度 X 線源 (ULX) の観測結果を説明する一つのモデルである。ULX は光度が $10^{39} \sim 10^{41}$ erg/s の X 線源で、恒星質量ブラックホールを仮定すると、エディントン限界を越える降着率の降着流を考える必要がある。なお、ULX を説明するモデルとしては、100~1000 太陽質量の中間質量ブラックホールを仮定するモデルも存在する。Kawashima et al.(2011)は超臨界降着流のモデルで観測が示すスペクトルの特徴を再現した。

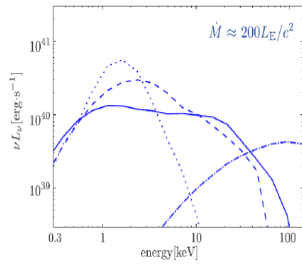


左図は Kawashima et al(2011)が示したブラックホール降着流の密度分布および温度分布である。色枠で囲っている部分を見ると、加熱領域が発生していることが分かる。この加熱領域の生成機構を解明することが課題となる。

Kawashima et al(2011)の二次元放射流体シミュレーションでは、ULX に特徴的なスペクトルと光度の関係を示すことに成功している。



コンプトンテール
NGC 4559 X-1のスペクトル
(Jeanette C et al(2009))



Kawashima et al(2011)のシミュレーション結果
点線:コンプトン散乱無
実線:コンプトン散乱有
破線:熱コンプトン散乱のみ
点破線:光子捕捉

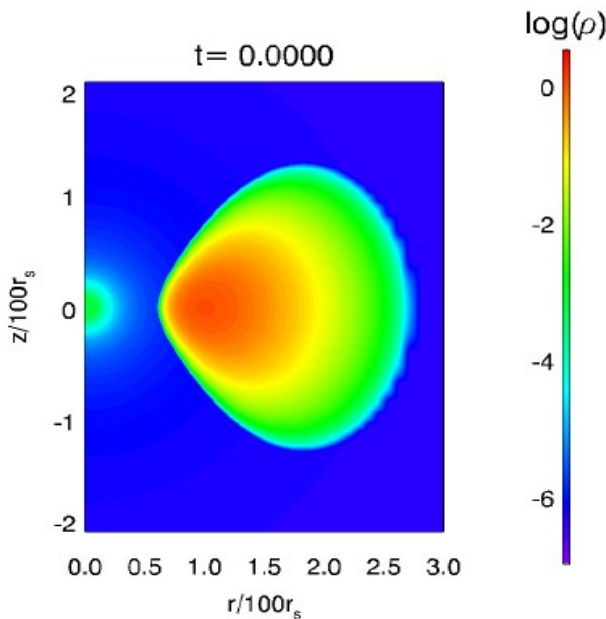
左図は ULX の例として NGC 4559 X-1 のスペクトル (Jeanette C et al.,2009) と Kawashima et al.(2011)のシミュレーション結果との比較である。

赤枠で囲っている部分がコンプトンテールと呼ばれる部分で、コンプトン散乱の効果によってスペクトルが硬化されている。このコンプトン散乱の効果をも有する現象として、ブラックホール近傍での衝撃波加熱領域の形成が示唆されている。

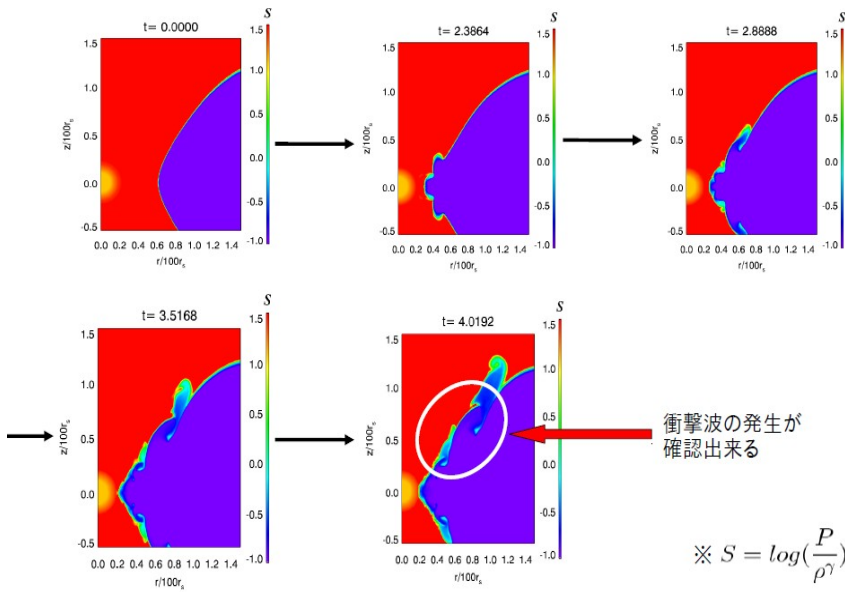
今回私の行ったシミュレーションの目的は、この衝撃波加熱領域の形成機構を解明することにある。まずは輻射冷却の効果を外すことで複雑なモデルを単純化し、計算を試みた。

使用した方程式は、質量保存の式 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$ 、運動方程式 $\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\rho \nabla \psi - \nabla p + \nabla \cdot \vec{S}$ 、エネルギー方程式 $\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \psi + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(H + \psi + \frac{1}{2} v^2 \right) \vec{v} - \vec{v} : \vec{S} \right] = 0$ 、状態方程式 $p = p_{gas} + p_{rad} = \frac{R}{\mu} \rho T + \frac{1}{3} a T^4$ である。 ρ は密度、 \vec{v} は速度ベクトル、 ψ は重力ポテンシャル、 P は圧力、 \vec{S} は粘性テンソル、 e は内部エネルギー、 H はエンタルピー、 R は気体定数、 μ は平均分子量、 T は温度、 a は放射定数である。

数値計算の手法としては、HLLD 法を用いた流体の軸対称二次元計算である。粘性の効果は α 粘性で評価している ($t_{r\phi} = \eta r \frac{d\Omega}{dr} = -\alpha p$)。輻射冷却は考慮していない。初期状態としては、原点にブラックホールを仮定した擬ニュートンポテンシャル下に静水圧平衡を保った回転トーラスを置き、粘性の効果でトーラスからガスを落下させていく。背景には高温のコロナを静止させている。物理量はトーラス中心の位置、密度、回転速度を用いて無次元化する。下図は実際の初期状態の図である。 r_s はシュバルツシルト半径である。次ページにシミュレーション結果を示す。



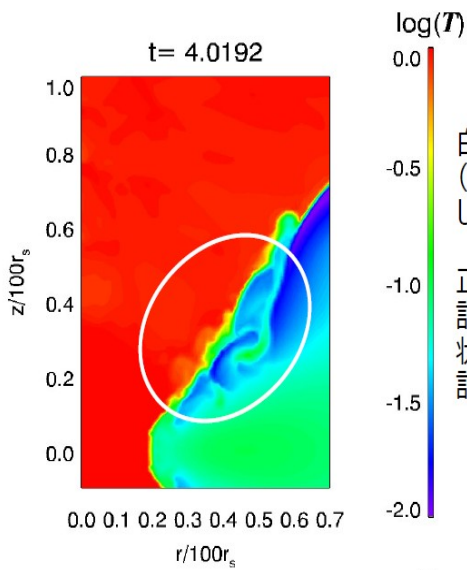
領域: $x_{min} = 0.0, x_{max} = 4.6$
 $z_{min} = -4.6, z_{max} = 4.6$
メッシュ: 168×328



左図がシミュレーション結果をエントロピーを用いて描いたもので、衝撃波の発生が確認される。摩擦によって速度を上げながら中心に落下していったガスが角運動量ポテンシャルの壁にぶつかって跳ね返り、トーラスを昇っていつている。加えて、その下に温度分布を示してある。これにより加熱領域が確認される。

この時点でまだ踏み込んだ解析は行えていないが、今後繋がる計算結果が出たと考えている。

$$\ast S = \log\left(\frac{P}{\rho^\gamma}\right)$$



白枠内に加熱領域がある。
(ただし温度は圧力をガス圧であると
して換算した温度。)
正しくコンプトン散乱への寄与を
計算する為には、
状態方程式を正しく解いた上で
計算する必要がある。

今後の課題としては、まずはこのモデルで準定常状態まで計算を行い加熱領域の形成を調べ、具体的に衝撃波の発生条件を調べる。その後、輻射流体モデルで解析を行えるようにする。

$$\ast T = \frac{P}{\rho} \quad (\text{その他定数はTの規格化に組み込んでいる})$$

参考文献

Kawashima et al.(2011)

Gladstone, J.C., Roberts, T.P., Done, C.: 2009, MNRAS 397, 1836