

X線天文衛星「すざく」のデータを用いたブラックホール学習教材の作成

Making and verification of learning material for x-ray observation of stellar black holes

宇宙情報解析研究室：P08144-0 山上秀典

指導教員：久保田 あや 准教授

1 ブラックホールとX線放射

ブラックホール (BH) とは非常に強い重力を持ち、その内部の物質や光はある範囲内から外に出ることができない。この範囲の半径をシュバルツシルト半径 R_s といい、万有引力定数 G 、BH の質量 M 、光速 c を用いて以下の式で表される。

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \quad (1)$$

BH が単独で存在する場合、その姿を観測する事は難しいが、図1の様にBHと光学主星とが近接連星系をなす場合、光学主星からのガスはBHの強い重力に引かれ、BHのまわりをケプラー運動しながら落ち込んでいく。このようにして形成されるガス円盤を「降着円盤」と呼ぶ。光学主星からのガスが降着円盤を介してBHに落ち込むときに、摩擦により数千万度の高温に熱せられ強いX線が放射される。このX線を観測することにより、BHを間接的に知ることができる。

図2はCygnus X-1のX線スペクトルである。BHにガスが大量に落ちていくときには、明るい軟X線放射とベキ関数型の硬X線放射を特徴とする。この軟X線はBH周辺の標準降着円盤 [1] を近似した多温度黒体放射 (diskbb モデル [2]) でよく再現できる。これは円盤がBHからの距離 r において局所温度 $T(r) = T_{in}(r/r_{in})^{-3/4}$ の温度で黒体放射するとした放射モデルであり、スペクトルから円盤の最も内側の温度 T_{in} とその半径 r_{in} が得られる。

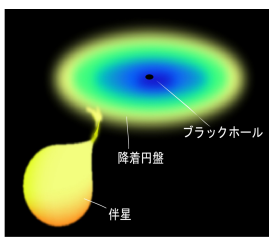
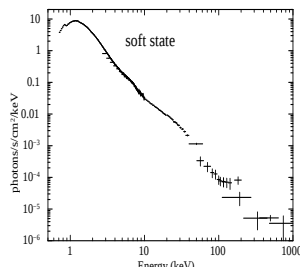


図1: ブラックホールと伴星 図2: Cygnus X-1 のスペクトル (提供: JAXA)



トル (Cui et al.(1997) より)

2 研究の目的

BHと降着円盤のイメージ図を図3に載せる。また T_{in} は降着円盤の最内縁温度、 R_{in} は降着円盤の最内縁半径である。一般相対性理論から、BHの周りの安定なケプラー軌道には最終安定軌道とよばれる下限があり、シュバルツシルト半径 R_s の3倍より内側では安定な軌道が存在せず、物質はBHに落ち込んで行く。したがって、観測から得られる円盤の内縁半径 r_{in} はBHの最終安定軌道に一致していると考えられる。X線観測から T_{in} やX線の放射強度 F が分かり、これからBHの半径や質量が分かる。本研究の

目的は、宇宙に興味のある一般の方向けに天文学者が観測データを解析して天体の性質を解明する過程を追体験できるような教材を作成し、宇宙への興味をもってもらうことである。

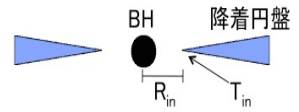


図3: BHと降着円盤のイメージ

3 「すざく」によるLMC X-3の観測

「すざく」は日本で5番目のX線天文衛星でX線CCDカメラ (XIS)[3]、硬X線検出器 (HXD)[4] が搭載されており、今までの衛星に比べて非常に広いエネルギー領域で観測ができる [5]。本研究で解析を行う LMC X-3 は大マゼラン星雲にある恒星質量BHで光学観測の結果から、距離は約18万光年、質量が $5.0-7.2M_{\odot}$ (太陽質量 $M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} \text{kg}$)、軌道傾斜角が $64^{\circ}-70^{\circ}$ と推定されている [6]。LMC X-3 はすざく衛星により2008年12月22日と2009年12月21日の2回観測が行われている。

4 データ解析と教材用データの選定

教材に最適なスペクトルデータを選ぶために LMC X-3 の2008年、2009年、2つのデータを解析した。まず、すざく衛星によって得られた LMC X-3 のデータからX線データ解析ソフトである XSELECT [5] を使用してスペクトルを抽出した。次に XSPEC というX線スペクトル解析ソフト [5] を使用して観測機器の状態によるスペクトルの変化を考慮するために作った応答関数をスペクトルに適用する。図4、5は抽出したスペクトルを降着円盤からの放射である diskbb モデルに、円盤の周りの高温コロナからの放射を模擬するベキ関数 (power-law) モデルで再現した結果を示している。

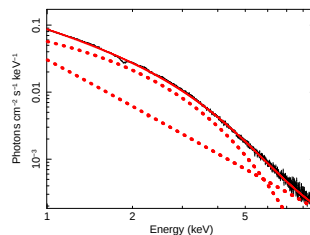


図4: LMC X-3 のスペクトル (2008年)

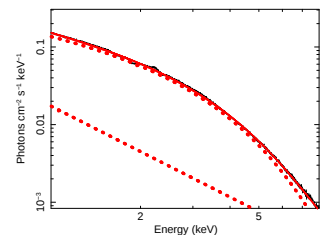


図5: LMC X-3 のスペクトル (2009年)

解析結果から、2008年、2009年の χ^2/dof は1955/1775、1811/1666 となり、どちらもモデルがデータを再現出来ることが分かった。power-law 成分に注目すると、2009年のほうがpower-law 成分が少ない。つまりこのデータは円盤からの放射のみを考えればいいということなので、教材に使用する際に理解がしやすい。よって教材では2009年のデータを使用することにした。

5 教材の作成

5.1 教材用のデータ作成

図6はLMC X-3のスペクトルデータをgnuplotで表示したものである。したがって、本教材では、高校物理の範囲で扱っており、比較的身近な波長 λ [m]や周波数 ν [Hz]を用いることとした。エネルギー E と周波数 ν および波長 λ の関係は、プランク定数 h と光速 c を用いて式(2)(3)で与えられる。また周波数あたりの放射強度 $F(\nu)$ と波長あたりの放射強度 $F(\lambda)$ の関係は微小周波数 $d\nu$ および微小波長 $d\lambda$ に含まれる光子数が等しいという関係から、式(4)を用いて変換できる。

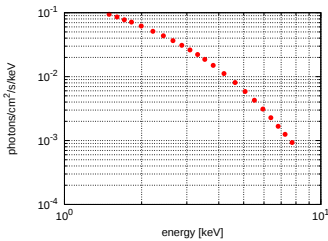


図 6: スペクトル (eV)

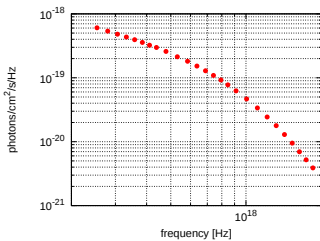


図 7: スペクトル (周波数)

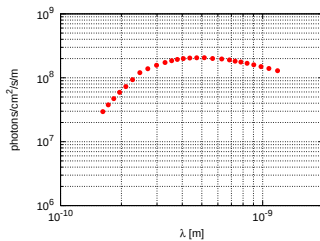


図 8: スペクトル (波長)

変換した周波数スペクトルを図7に、波長スペクトルを図8に示す。両者を見比べると、波長スペクトルにはピークが見える。これは教材でデータと降着円盤からの放射を見比べるときに比べやすい。よって今回の教材では波長のデータを使用することにした。

5.2 教材の流れ

5.2.1 ブラックホールの理解

まずは星がどのように誕生し、どんな進化をたどるかを理解する。そしてどんな経過を辿ってブラックホールができるか、どんな種類があるかを知る。その中で本当は見えないはずのブラックホールをどのようにして観測しているかを降着円盤の説明をしながら理解し、ブラックホールの半径や質量はどのようにして求められるかなどを学ぶ。

5.2.2 降着円盤からの放射について

次に黒体放射について学び、降着円盤からの放射との関係を理解する。そして降着円盤からの放射スペクトルの特徴として半径が同じで温度が変わるとスペクトルが左右に移動することや逆に温度が同じで半径が変わると横軸はそのまま縦に移動することを図などを見ながら理解する。

5.2.3 実習

実習教材には図9のような様々な内縁温度に対する標準降着円盤からの放射スペクトルモデルを与える。ここでは天体までの距離を18万光年、傾斜角を 66° とした。また最内縁半径は10kmの場合を示してある。図8と、図9を見比べて温度が一致していれば横軸は変わらないので形が合うはずである。実習者は、データにおいて放射強度が最大となる波長に注目し、形が一致するスペクトル、すなわち最大光度となる波長が同じスペクトルを図9から見つけ、最内縁温度を自ら決定する。次に、降着円盤が出す光の量は最内縁半径の2乗に比例するので光の量がX倍なら半径は $\sqrt{X}$ 倍になる。実習者はデータと温度が一致したスペクトルを求めた後、図の縦軸よりデータはモデルの何倍になっているかを計算し、半径を求める。その後、実際のフラックスの値より、式(2)から半径を求め、見た目から求めた値と一致することを確認する。そして以上で求めた半径からブラックホールの半径や質量を求める。

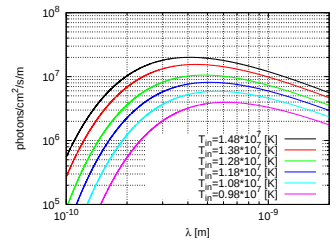


図 9: 降着円盤からの放射

6 教材の評価と改善点

今回は学部3年生を対象に教材を使用してもらった。まずブラックホールの理解においてはよい評価が得られ、観測するまでの流れはすぐに理解してもらうことができた。しかし黒体放射やスペクトルについては難しいと言うことだった特に降着円盤からの放射が黒体放射の重ね合わせで考えられるというところが理解しにくいという感想をうけた。最終的にすべて理解してもらえたが時間がかかってしまったため、より分かりやすいよう図や文書による説明も増やす必要があることが分かった。スペクトルは単に口頭での説明が多かったので文章でも説明を詳しく行う。他にもスペクトル以外にも図を使用する際はより詳細に説明する必要があると思った。

7 まとめ

実習者から良かった点や改善点を洗い出し、改善した結果、よりブラックホールや降着円盤、黒体放射について理解できる教材となった。今後、宇宙に興味をもち始めた人に対して、教材を使用してもらい、ブラックホールや降着円盤について理解を深めてもらいたい。そして宇宙に興味をもつ人が増えるように役立ててもらいたい。

参考文献

- [1] Shakura, Sunyaev. 1973, A&A, 24, 337
- [2] Mitsuda, K., et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [3] Koyama, K. et al. 2007, PASJ, 59, 23
- [4] Takahashi, T. et al. 2007, PASJ, 59, 35
- [5] すざくヘルプ編「『すざく』ファーストステップガイド」(<http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/index-j.html>)
- [6] Kuiper, L., van Paradijs, J., & van der Klis, M. 1988, A&A, 203, 79