

X線観測衛星の公開データを利用した銀河団画像の制作

石坂 千春*

概要

平成 19 年度科学研究費補助金(奨励研究)を受け、公開されているX線観測衛星のアーカイブデータから銀河団ガスに関する教材用の画像を製作することを目指した。

本稿ではアーカイブデータを利用してX線銀河団の画像を作成する手法について報告する。

1. はじめに

2006 年 8 月、NASAのチャンドラ衛星が銀河団衝突の痕跡を示す銀河団ガスの画像を公開した[1]。銀河団の典型的な大きさは約 1000 万光年であり、重力的に束縛されている宇宙最大規模の構造である。銀河団の形成や進化の過程ではより小規模な銀河団や銀河群の衝突合体が起きるが、銀河団進化の時間尺度は宇宙そのものの年齢に匹敵するため、銀河団を調べることで、誕生から現在に至る宇宙の歴史を追えると考えられている。

銀河団は単なる銀河の集団ではなく、大量の暗黒物質によって束縛された高温のプラズマ「銀河団ガス」に満たされていることが分かっている。筆者は大学時代、コンピュータシミュレーションによって銀河団形成における衝突合体が銀河団ガスにどのような影響を及ぼすか研究を行っていた[2]。その研究によって衝突合体における各フェーズで銀河団ガスは独特の温度分布、密度分布を示し、音波の伝播として衝突のフェーズをとらえることができることが分かったが、当時は銀河団ガスの温度分布や密度分布を高分解能で観測する手段が無かったため、実際の銀河団に応用することはできなかった。

高温の銀河団ガスはX線を放射するので、その観測にはX線天文衛星が活躍する。最近の代表的なX線天文衛星としては日本の「すざく」(2005 年運用開始)や「あすか」(2001 年運用停止)、NASAのチャンドラ、ESAのXMM - Newtonなどが挙げられるが、これらのX線観測衛星はシミュレーションと比較ができるよう

な高分解能の観測データを取得している。冒頭で挙げたチャンドラの成果はまさに、銀河団衝突シミュレーションで見られたものと同じような構造を示していた。

天文衛星の観測データは一定期間が経過した後、一般に公開されるため、大学等の研究室に所属していなくても、最先端の観測データを用いて研究を行うことができる。しかしながら、データ解析には専門の知識と独特のソフトが必要であり、教育関係者が簡単には扱えないようになっている。

そこで本研究では、こうしたX線観測衛星のデータ解析ソフトの使用方法を習得し、公開データから銀河団における衝突の痕跡、すなわち音波の検出を目指した。さらに結果を視覚化し、教材用画像としてホームページやプラネタリウムで公開することを目標とした。

研究者が発表する成果をただ待つのではなく、教育にたずさわる者が自らの手で解析したデータを市民の知的好奇心(教育)に資することは非常に重要である。研究という背景があって初めて、教材は強い説得力を持つからだ。

2章では公開アーカイブデータの利用方法および解析ソフトのインストール方法を示し、3章では解析方法と実際に作成したX線銀河団の画像を示す。

2. 方法

2-1. データ解析ソフトのインストール

X線観測衛星「すざく」[3]などの観測データは通常 FITS(Flexible Image Transport System)という形式でアーカイブされている。FITS データの特徴はそのヘッダ部分にある。ヘッダにはデータに関する情報がテキストで記述されており、“画像”部分は圧縮されてい

*大阪市立科学館 学芸課 学芸員
ishizaka@sci-museum.jp

い。FITS が記述するのは正確には画像ではなく、XSELECT および XSPEC といった解析用のソフトウェアによって必要なデータを抜き出し、ds9などのソフトで画像やスペクトルに変換する[4]。

これらのソフトウェアは NASA ゴダード宇宙センターのホームページからダウンロードすることができる。

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software.html>

ダウンロードするのは、一連の解析用ソフトがパッケージ化された HEASOFT である。

パッケージにはバイナリディストリビューションとソースコードディストリビューションがあるが、バイナリディストリビューションの場合、解析用 PC にインストールされている lib ファイルや perl のバージョンとの相性によってうまく動かないことがあるので、今回はソースコードディストリビューションを利用した(バージョンは 6.3.2)。

ダウンロードおよびインストールの手順は下記の通りである。

```
Source code distribution を選択
パッケージの種類は All を選択
Submit
適当なディレクトリで tar を展開
headas-6.3.2 ディレクトリに移動
BUILD_DIR に移動
$./configure > config.out
$make > build.log
$make install > install.log
.bashrc に次の行を加える
export HEADAS=$XraySrc/headas-6.3.2/x86_64-
unknown-linux-gnu
alias heainit =". $HEADAS/headas-init.sh"
```

解析を開始する際は

```
$ heainit
```

とコマンドを入れることで、ソフトの初期設定がされ、XSELECT や XSPEC が使えるようになる。

なお解析用 PC として、DELL Precision490, Dual Core Xeon に Redhat Linux がインストールされたモデルを購入した。

また、HEASOFT は「すざく」だけではなく、チャンドラや XMM ニュートンなどの観測衛星データも解析できる汎用性の高いものである。

2-2 . ds9 のダウンロード

X線観測データである FITS ファイルを可視化するためには ds9 というソフトも必要である。

こちらはハーバード大学のサイト

<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

から Linux64(older versions)用のバイナリをダウンロードした(バージョンは 5.0)。

解凍すると ds9 という実行ファイルができるので、これをホームディレクトリに作った /bin ディレクトリの下にコピーして置いた。

XSELECT から saomage というコマンドで ds9 が起動する。

2-3 . 公開アーカイブ観測データのダウンロード

本研究では「すざく」の観測データを用いることにした。「すざく」のアーカイブデータは日本宇宙航空研究機構 JAXA の「すざく」サイトからダウンロードできる。

http://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku/public_seq.html

Public Data List では観測日時、ターゲット天体名、シーケンス番号が記載されている。データをダウンロードするためには、解析をしようと思うターゲットのシーケンス番号をクリックすればよい。

公開されているデータ(/xis/event_cl/の下にある)はすでにさまざまな較正処理を行った後のものなので、自分で複雑な補正作業をする必要はない。

また、解析後の画像データが登録されている場合は「UDON」、「XIS」などで見ることができ、JUDO というサイトでは、全天でさまざまな観測衛星が撮影した天体を画像として見るできるようになっている[5]。

データをまとめてダウンロードするためには、wget コマンドを使うこともできる。

```
$ wget -rL -nH --cut-dirs=4 ftp://darts.isas.jaxa.jp/pub/suzaku/ver1.2/(シーケンス番号)/
```

ダウンロードが完了すると、/auxil、/hxd、/log、/xis という4つのディレクトリができる。解析すべきデータは前述のように/xis/event_cl/の下にある

公開されているデータは暗号化されていないので、復号する必要はない。

3. データ解析

解析に使うのはダウンロードした観測データ(イベント・ファイル)のうち、すでに宇宙線やノイズの除去、衛星姿勢に依存する補正、X線検出器の較正といった下処理(スクリーニング)を済ませてあるもので、/xis/event_cl/の下にまとめられている。

処理済データには、衛星からの転送時の違いにより、3×3モードと5×5モードがあるが、銀河団のように広がっていて時間変化のあまりない対象の場合、それらを足し合わせて解析を行なう。足し合わせることでイベントの統計的信頼性を上げることができる。

本研究では、X線銀河団の観測データ(イベント・ファイル)から、

- 1) X線輝度分布(イメージ)を作成する(XSELECT)
- 2) 各点でのスペクトルを抽出し温度を求める(XSPEC)
- 3) 銀河団ガスの温度分布、密度分布を画像化する

ことを目指した。

3-1. XSELECT による解析

まず、XSELECTでX線輝度分布(イメージ)を作成し、スペクトルを抽出する。

以下で順番に説明する。なお、解析したのは

銀河団: A2256

赤経: 256.0138 度

赤緯: 78.7112 度

赤方偏移: $z = 0.0581$

シーケンス番号: 801061010

観測開始日時: 2006年11月10日20:32:39UT

のデータである。

銀河団 A2256 は銀河の視線方向速度分散[6]が1270km/s、銀河団ガスの温度[7]が7.3keVで、比較的近傍の大型の銀河団である。

1) X線輝度分布(イメージ)の作成

銀河団のX線輝度分布を求めるためにXSELECTによりイベント・ファイルを解析する。

手順は下記の通りである。

XSELECT を起動する

```
$ heainit
```

```
$ xselect
```

```
> Enter session name >[xsel] a2256
```

```
a2256: SUZAKU >
```

データを読み込む

```
a2256: SUZAKU > read event "@evt.lis"
```

```
> Enter the Event file dir >[./] ./
```

ここで evt.lis の中身はイベント・ファイルの列記である。

```
ae801061010xi3_0_3x3n000a_cl.evt.gz
```

```
ae801061010xi3_0_5x5n000a_cl.evt.gz
```

「すざく」のX線望遠鏡XRTが4台搭載され、それぞれの焦点にX線検出器XIS(0~3)が置かれている。XIS0、XIS2、XIS3は表面照射型、XIS1は裏面照射型である。イベント・ファイル名の"xi"の後ろについている数字がXISの番号で、_cl.evtの前のアルファベット(上の例では「a」)が表面照射型か裏面照射型かを区別している。4台のXISはそれぞれの特長や光軸からの位置が違うので、異なるXISのイベント・ファイルは足し合わせて使うことができない。

イベント・ファイルから必要な情報を抜き出す

```
a2256: SUZAKU-XIS3-STANDARD > extract all
```

画像化する

```
a2256: SUZAKU-XIS3-STANDARD > saomage
```

```
a2256: SUZAKU-XIS3-STANDARD > save image
```

```
> Give output file name > [a2256] a2256
```

```
Wrote image to file a2256.img
```

これで銀河団 a2256 を XIS3 で観測したデータが画像として保存できた(図1)。

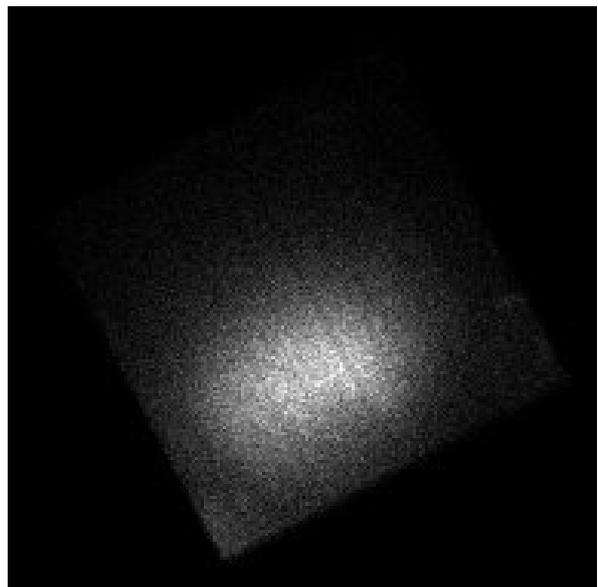


図1 . A2256 の XIS 画像

2) スペクトルの抽出

前節で読み込んだイベント・ファイルについて特定の領域のスペクトルを抽出する。

スペクトルを抽出するためには、領域を指定した region file を読み込む必要がある。

region file を作る手順は次のとおりである。

前節同様イメージを表示する

sky 座標 (2000 年分点) を指定する

```
Region File Format DS9/Funtools
Region File Coordinate System WCS
```

Region の形を指定する

```
Region Shape Circle など
```

場所と大きさを指定する

画面上で左クリックすると領域が描かれる。その領域内で再度、左クリックすると選択されるので大きさや位置を調整する。

ここでは赤経 17h04m04.725s、赤緯 78.666 度を中心とする半径 128 ピクセルの円で指定した (図 2)。

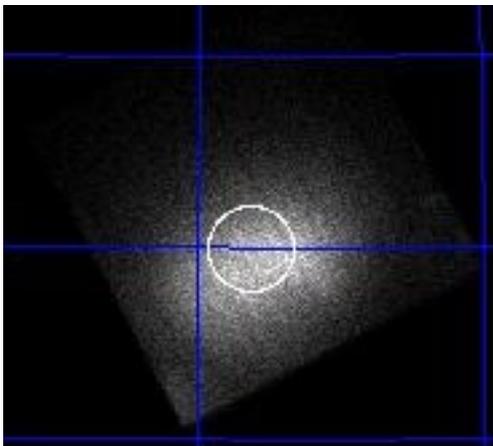


図 2. 領域の指定 (白い円内を指定)

Region を保存する

```
Region Save Regions
```

これで領域ファイル *.reg ができる (ここでは 256-78.reg として保存した)。

領域ファイルを XSELECT に読み込む

```
a2256: SUZAKU-... > filter region 256-78.reg
```

確認

```
a2256: SUZAKU-... > extract image
```

```
a2256: SUZAKU-... > saomimage
```

で領域が指定されているか確認する。

スペクトル抽出

```
a2256: SUZAKU-... > extract spec
a2256: SUZAKU-... > save spec 256-78.pha
> Group the ...? >[yes] no
Wrote spectrum to 256-78.pha
```

こうして抽出された“生”のスペクトル(チャンネル当たりのカウント数)を図 3 に示す。

スペクトルの解析は次節の XSPEC で行なう。

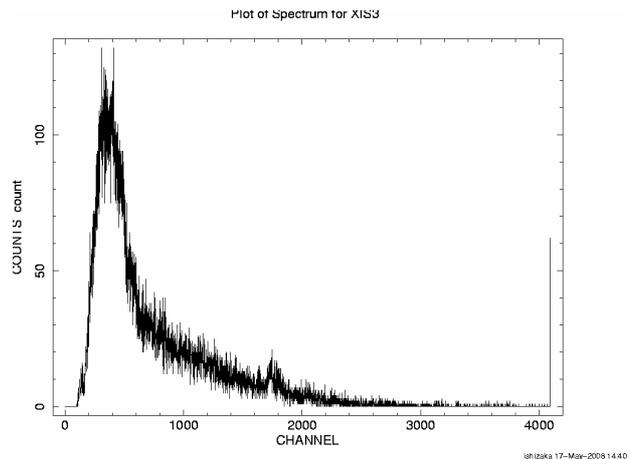


図 3 . A2256 中心部の生スペクトル

3-2 . XSPEC によるスペクトル解析

1) スペクトルの bin まとめ

3 1 2 で作成したスペクトル・データ 256-78.pha は bin が細かすぎて統計が悪いので、XSPEC で解析する前に、grppha というコマンドで bin をまとめる。ここでは、0-511 チャンネルを 1bin、512-1023 を 2bin、1024-2047 を 4bin、2048-4095 を 8bin でまとめた。

```
$ grppha 256-78.pha 256-78_grp.pha
GRPPHA[] group 0 511 1 512 1023 2 1024 2047 4
2048 4095 8
GRPPHA[] exit
... written the PHA data Extension
.....exiting,changes written to file:256-78_grp.pha
```

2) CALDB の設定

スペクトルを解析し、温度や柱密度などをフィッティングするためには観測データを較正するためのキャリブレーションファイルが必要である。

まず、キャリブレーション設定ファイルをダウンロードする。

http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/caldb/software/tools/caldb_setup_files.tar.Z

これを適当なディレクトリ(ここでは CALDB)で展開した後、CALDB/software/tools/caldbinit.sh の1行目を書き換える。

```
setenv CALDB /home/ishizaka/XraySrc/CALDB
```

ついで、キャリブレーションデータをダウンロードする。

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/caldb/data> からダウンロードした goodfiles_suzaku_xis.tar.Z を展開すると CALDB/data/suzaku/xis/ というディレクトリができる。

解析前に caldbinit.sh を走らせると HEASOFT に含まれている FTOOLS を使ってデータのキャリブレーションができるようになる。

3)XSPEC を使用する。

XSPEC でスペクトル解析を行なうためには、背景 X線データ*_bkg.pha、検出器のレスポンスデータ*.rmf、検出器の有効面積ファイル*.arf が必要である。これらを正しく用意し、3-2-1 で作成した bin ファイル*_grp.pha とともに XSPEC に読み込むことにより、モデルフィットができるようになる。

4. 考察および課題

本研究では、X線観測衛星のデータ解析ソフト(XSELECT、XSPEC、DS9)の使用法の習得を目指し、公開画像で使用されている FITS 形式データの利用講習会や X線観測衛星すざくの研究発表がされた天文学会にも出席した。

銀河団形成においては衝突合体が繰り返されて成長することが知られているが、こうした銀河団における衝突合体は銀河団ガスに音波(エントロピー)という形で痕跡を残す。

今回、明るいX線銀河団 A2256 の公開データに対して XSELECT、ds9による解析を行い、そのX線輝度分布と生のスペクトルを求めた。

今後、細かな領域ごとに XSPEC(3-2-3節)によるスペクトルフィッティングを行い、温度分布や密度分布から、衝突の痕跡、すなわち音波の検出を目指したい。

謝辞および参考文献

本研究は平成 19 年度日本学術振興会科学研究費補助金(奨励研究)No.19914016 の補助を受けた。また宇宙科学情報解析センターの村上弘志氏、宇宙航空研究開発機構の馬場彩氏には初歩的な質問に丁寧に答えていただいた。ここに感謝する。

- [1] http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/dark_matter_proven.html
- [2]C.Ishizaka, Astrophysics and Space Science, **254**, p233, 1997
- [3]すざく <http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/>
- [4]すざくファーストステップガイド
<http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/>
- [5] <http://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/judo/>
- [6]David et al., Astrophysical Journal, **412**, p479, 1993
- [7]Struble & Rood, Astrophysical Journal Supplement, **77**, p363, 1991